



ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรง
HV.DC. TRANSMISSION SYSTEM SIMULATOR



โดย
นายนเรศรชฎ พัฒนเดช
นายรัชชัย ศิริจันทร์พร
นายศักดิ์ชาย แก้วสกุล

วัน เดือน ปี.....-5คค.2541.....
เลขทะเบียน.....038587.....
เลขเรียกหนังสือ.....T 4000662115.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี 038587

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ผู้จัดทำ



นายนรเศรษฐ พัฒนเดช

นายรัชชัย ศิริจันทร์พร

นายศักดิ์ชาย แก้วสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

นายนครเศรษฐ พัฒนเดช

นายรัชชชัย ศิริจันทร์พร

นายศักดิ์ชาย แก้วสกุล

รศ.ศิริวัฒน์ โทษิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

โครงการนี้จะเป็นการพัฒนาสร้างชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 12 พัลส์แบบบริดจ์ขึ้นมาเพื่อจะทำการศึกษาคูสมบัติต่างๆของการเชื่อมโยงระบบกระแสลับที่มีความถี่แตกต่างกันโดยการเชื่อมโยงด้วยระบบกระแสตรงและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับระบบ 6 พัลส์ กระแสอาร์โมนิกส์ที่เกิดทางด้านอินพุทของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชนิด 6 พัลส์บริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์ของระบบผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง 12 พัลส์บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อที่จะแก้ปัญหาในเรื่องกระแสอาร์โมนิกส์และระบบนี้ยังช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันกระแสตรงที่ออกมาจากตัวระบบอีกด้วย นอกจากนี้ระบบยังสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 2 เท่าของระบบ 6 พัลส์บริดจ์คอนเวอร์เตอร์เดิมและระบบยังถูกนำไปใช้ในการส่งถ่ายพลังงานระหว่าง 2 แหล่งที่มีความถี่ต่างกันได้ด้วย ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 2 ชุดซึ่งต่อกันอยู่ทางด้านแรงดันกระแสตรงและต่อขนานกันทางด้านแรงดันกระแสลับ ชุดหม้อแปลงซึ่งมีคุณลักษณะเหมือนกันจะต่อกันอยู่แบบ สตาร์-สตาร์ และ สตาร์-เดลต้า มุมของแรงดันเฟสของหม้อแปลงทั้ง 2 ชุด จะห่างกัน 30 องศา ดังนั้นลำดับฮาร์โมนิกส์ต่ำสุดก็จะเป็นกระแสอาร์โมนิกส์ลำดับที่ 11 ในขณะที่แบบ 6 พัลส์บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะเกิดกระแสอาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ออกมา สำหรับการควบคุมชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุด ที่ต่อกันอยู่นั้นจะใช้การควบคุมมูมทริกไปด้วยกัน

HV.DC. TRANSMISSION SYSTEM SIMULATOR

Noraset Pattanadech

Tawatchai Sirichanporn

Sakchai Keawsakul

Vice Prof.Siriwat Phothiwechakul Advisor

1997

ABSTRACT

This project is development a 12 pulse bridge converter of Highvoltage Direct Current transmission system simulator for education the characteristic of a Direct Current linking between 2 different frequency alternating voltage sources and compare it's characteristic with the characteristic of 6 pulse bridge converter of Highvoltage Direct Current transmission system. The harmonics current generated on an ac system of 6 pulse bridge converter of Highvoltage Direct Current transmission system will cause reduction of efficiency in power generation , transmission and utilization. 12 pulse bridge converter of Highvoltage Direct Current transmission system are built to reduce the harmonics current generated on the ac system and the voltage ripple produced on the dc system of converter. Additionally, it is more transfered electrical power than former system about two times. It also was transfered electrical power about two sources which different frequency. 12 pulse bridge converter of Highvoltage Direct Current transmission system compose of two 6 pulse converters. They are connected in series on the dc side and in parallels on the ac side. They are connected through a star-star and a star-delta transformer which are identical transformers. They are phase- shifted exactly 30° degree from each other. Also the lowest harmonic being the 11 th, while the lowest harmonic of 6 pulse converter being the 5th. Controlling system are controlled at exactly the same delay angle of converter.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ขอบเขตการทำโครงการทั้งหมด	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยโครงการ	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 พื้นฐานและระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	
2.1 ลักษณะของการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง	4
2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการส่งจ่ายพลังงานด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงและระบบไฟฟ้ากระแสสลับ	8
2.3 หลักการทำงานทั่วไปของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.4 ส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.5 คอนเวอร์เตอร์	13
2.5.1 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์	14
2.6 ฮาร์โมนิกส์	16
2.6.1 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร	17
2.7 คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริด	19
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ประกอบชุดจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	
3.1 วงจรสับเบอร์	25
3.2 คีซี ฟิลเตอร์	26
3.3 เอซี ฟิลเตอร์	29
3.4 สมุดตั้ง รีแอกเตอร์	29
3.5 ตัวเหนี่ยวนำ	31
3.5.1 คีซี ฟิลเตอร์ และ สมุดตั้ง รีแอกเตอร์	31
3.5.2 เอซี ฟิลเตอร์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบและสร้างหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น	32
3.7 การสร้างสัญญาณกระตุ้น คอนเวอร์เตอร์ ด้วย IC TCA 785	34
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองที่ 1 การทดลองชุด คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ และ 6 พัลส์ ในโหมดเรกติฟายเออร์	37
4.1.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองที่ 1	37
4.1.2 ผลการทดลองที่ 1	39
4.2 การทดลองที่ 2 การทดลองการส่งจ่ายพลังงาน	54
4.2.1 การทดลองที่ 2.1 การช่วยจ่ายพลังงานเมื่อแรงดันเท่ากัน และความถี่เท่ากัน	54
4.2.2 การทดลองที่ 2.2 การช่วยจ่ายพลังงานเมื่อแรงดันเท่ากัน แต่ความถี่ต่างกัน	68
4.2.3 การทดลองที่ 2.3 การส่งจ่ายพลังงานเมื่อแรงดันต่างกัน แต่ความถี่เท่ากัน	75
4.3 การทดลองที่ 3 การทดลองวัด ฮาร์โมนิกส์	87
4.3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองที่ 3 และผลการทดลอง	87
4.3.2 สรุปผลการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์	116
4.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง	117
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	120
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 1	
รูปที่ 1.1 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	2
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว (6 พัลส์)	4
รูปที่ 2.2 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว (12 พัลส์)	5
รูปที่ 2.3 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว ร่วมกัน	5
รูปที่ 2.4 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (6 พัลส์)	6
รูปที่ 2.5 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (12 พัลส์)	6
รูปที่ 2.6 การเชื่อมโยงระบบแบบขนาน	7
รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงระบบแบบอนุกรม	7
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ	9
รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบลักษณะวงจรของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ	10
รูปที่ 2.10 วงจรระบบส่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง	11
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง	12
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด ที่ได้จากการ นำเอา คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ พี และ เอ็น มาต่อเข้าด้วยกัน	13
รูปที่ 2.13 รูปคลื่นต่างๆทางทฤษฎีที่ได้จาก คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด โดยมีมุมจุดชนวน (α) 45 องศา และ (β) 150 องศา	15
รูปที่ 2.14 วงจร คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด	16
รูปที่ 2.15 Harmonic Spectrum จาก คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด	17
รูปที่ 2.16 คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 12 พัลส์ แบบบริด	19
รูปที่ 2.17 ลักษณะรูปคลื่นที่ได้จาก คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 12 พัลส์ แบบบริด โดยมีมุมจุดชนวน 60 องศา	21
รูปที่ 2.18 Harmonic Spectrum จาก คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริด	23
รูปที่ 2.19 การเปรียบเทียบ ฮาร์โมนิกส์ ที่เกิดขึ้นใน คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ และชนิด 12 พัลส์ แบบบริด	24

บทที่ 3

รูปที่ 3.1	วงจรสับเบอร์	25
รูปที่ 3.2	ชนิดของ ฟิวเตอร์ (ก) แบบความถี่เดียว (ข) แบบหลายความถี่	28
รูปที่ 3.3	วงจรที่ใช้วิเคราะห์หาค่า รีแอกแตนซ์ ที่ต่อกับระบบไฟฟ้า กระแสตรง	29
รูปที่ 3.4	(ก) แผนผังของหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น (ข) รูปสัญญาณของสัญญาณกระตุ้น และรูปสัญญาณของค่า ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	32
รูปที่ 3.5	ลักษณะภายในของ IC TCA 785	34
รูปที่ 3.6	สัญญาณที่ขาต่างๆของ IC TCA 785	35
รูปที่ 3.7	ลักษณะการต่อวงจรของสัญญาณกระตุ้น 3 ชุด ให้เรียงลำดับเฟสกันตามสัญญาณที่ป้อนเข้ามา	36

บทที่ 4

รูปที่ 4.1	วงจรการทดลองชุด คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ในโหมดเรกติฟาย	38
รูปที่ 4.2	วงจรการทดลองชุด คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ ในโหมดเรกติฟาย (ต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์-สตาร์)	38
รูปที่ 4.3	วงจรการทดลองชุด คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ ในโหมดเรกติฟาย (ต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์-เดลต้า)	38
รูปที่ 4.4	สัญญาณ แรมพ์ เทียบกับแรงดัน คีซี ควบคุม	41
รูปที่ 4.5	สัญญาณแรงดัน คีซี เอ้าท์พุท คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ มมทริก 0 องศา	41
รูปที่ 4.6	สัญญาณแรงดันคร่อม เอสซีอาร์ คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ มมทริก 0 องศา	42
รูปที่ 4.7	สัญญาณแรงดันเอ้าท์พุท ของชุด คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ มมทริก 0 องศา	42
รูปที่ 4.8	สัญญาณแรงดันเอ้าท์พุท ของชุด คอนเวอร์เตอร์ ชุด 1 เทียบกับ คอนเวอร์เตอร์ ชุด 2 (มมทริก 0 องศา)	43
รูปที่ 4.9	สัญญาณแรงดันเอ้าท์พุทของชุด คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ มมทริก 60 องศา	43
รูปที่ 4.10	สัญญาณแรงดันเอ้าท์พุทของชุด คอนเวอร์เตอร์ ชุด 1 และชุด 2 มมทริก 60 องศา	44

รูปที่ 4.11	รูปคลื่นกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L1}) 6 พัลส์ สตาร์- สตาร์	45
รูปที่ 4.12	Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L1})	46
รูปที่ 4.13	รูปคลื่นกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L2}) 6 พัลส์ สตาร์- เคลด้า	47
รูปที่ 4.14	Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L2})	48
รูปที่ 4.15	รูปคลื่นกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_L)	49
รูปที่ 4.16	Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_L)	50
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพภายในการกรอง กระแสกับมุมจุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ในโหมดเรกติฟาย	51
รูปที่ 4.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรีปเปิลแฟกเตอร์กับมุมจุดชนวนของ คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เมื่อทำงานในโหมดเรกติฟาย	52
รูปที่ 4.19	เปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อคอนเวอร์เตอร์ ทำงานในโหมดเรกติฟาย	53
รูปที่ 4.20	วงจรการทดลองการส่งจ่ายพลังงาน	56
รูปที่ 4.21	วงจรการทดลองการวัด ฮาร์โมนิกส์ (แบบ 12 พัลส์)	88
รูปที่ 4.22	วงจรการทดลองการวัด ฮาร์โมนิกส์ (แบบ 6 พัลส์) หม้อแปลงต่อ สตาร์-สตาร์	89
รูปที่ 4.23	วงจรการทดลองการวัด ฮาร์โมนิกส์ (แบบ 6 พัลส์) หม้อแปลงต่อ สตาร์-เคลด้า	90
รูปที่ 4.24	รูปแรงดันตกคร่อม เอสซีอาร์ เมื่อทำงานอยู่ในโหมดเรกติฟาย	91
รูปที่ 4.25	รูปแรงดันตกคร่อม เอสซีอาร์ เมื่อทำงานอยู่ในโหมด อินเวอร์เตอร์	91
รูปที่ 4.26	รูปคลื่นของแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	92
รูปที่ 4.27	Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	93
รูปที่ 4.28	รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	94
รูปที่ 4.29	Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	95
รูปที่ 4.30	รูปคลื่นของแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	96

รูปที่ 4.31 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	97
รูปที่ 4.32 รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	98
รูปที่ 4.33 Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)	99
รูปที่ 4.34 รูปคลื่นของแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	100
รูปที่ 4.35 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	101
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	102
รูปที่ 4.37 Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	103
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นของแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	104
รูปที่ 4.39 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	105
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	106
รูปที่ 4.41 Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-สตาร์)	107
รูปที่ 4.42 รูปคลื่นของแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เดลต้า)	108
รูปที่ 4.43 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เดลต้า)	109
รูปที่ 4.44 รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เดลต้า)	110
รูปที่ 4.45 Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เดลต้า)	111

รูปที่ 4.46	รูปคลื่นของแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เคลด้า)	112
รูปที่ 4.47	Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เคลด้า)	113
รูปที่ 4.48	รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เคลด้า)	114
รูปที่ 4.49	Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์-เคลด้า)	115
รูปที่ 4.50	วงจรการทดลองการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง	117
รูปที่ 4.51	รูปคลื่นของกระแส (I _r)	118
รูปที่ 4.52	Spectrum รูปคลื่นของกระแส (I _r)	119
บทที่ 5		
รูปที่ 5.1	ผลการเปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเรกติฟาย	122
รูปที่ 5.2	ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกรอง กระแสกับมุมจุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เมื่อทำงานในโหมดเรกติฟาย	123
รูปที่ 5.3	ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างริปเปิลฟลักเตอร์กับมุม จุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เมื่อทำงานในโหมดเรกติฟาย	124
รูปที่ 5.4	ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของแรงดันด้านส่ง เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ	125
รูปที่ 5.5	ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่ง เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ	126
รูปที่ 5.6	ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของแรงดันด้านรับ เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ	127
รูปที่ 5.7	ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านรับ เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ	128

สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง คอนเวอเตอร์ 12 พัลส์ ในโหมด เรกติฟายเออร์	39
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อจ่ายโหลดแก่สับสแตชัน A และ B	57
ตารางที่ 4.3 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน	57
ตารางที่ 4.4 ค่าต่างๆเมื่อเพิ่มโหลดให้กับสับสแตชัน B	58
ตารางที่ 4.5 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน	58
ตารางที่ 4.6 ค่าของกระแสและแรงดันเมื่อเพิ่ม โหลดให้กับสับสแตชัน B	59
ตารางที่ 4.7 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการเพิ่ม โหลด ด้านสับสแตชัน B	59
ตารางที่ 4.8 ค่าต่างๆเมื่อลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B	61
ตารางที่ 4.9 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการลดโหลด ด้านสับสแตชัน B	61
ตารางที่ 4.10 ค่าเมื่อทำการเพิ่ม โหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	63
ตารางที่ 4.11 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	63
ตารางที่ 4.12 ค่าเมื่อทำการเพิ่ม โหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	64
ตารางที่ 4.13 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	64
ตารางที่ 4.14 ค่าเมื่อทำการลด โหลดทางด้านสับสแตชัน A	66
ตารางที่ 4.15 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	66
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองเมื่อจ่าย โหลดให้กับสับสแตชัน A และ B	69
ตารางที่ 4.17 ค่าของกระแสและแรงดันขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน	69

ตารางที่ 4.18	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	70
ตารางที่ 4.19	ค่าของกระแสและแรงดันขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน	70
ตารางที่ 4.20	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	71
ตารางที่ 4.21	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะส่งผ่านกำลังงาน เมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A	71
ตารางที่ 4.22	ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A	73
ตารางที่ 4.23	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B	73
ตารางที่ 4.24	ผลการทดลองเมื่อจ่ายโหลดให้กับสับสแตชัน A และ B	76
ตารางที่ 4.25	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	76
ตารางที่ 4.26	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน B ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	77
ตารางที่ 4.27	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	77
ตารางที่ 4.28	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน B ขณะส่งผ่านกำลังงาน	78
ตารางที่ 4.29	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน B	78
ตารางที่ 4.30	ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B	80
ตารางที่ 4.31	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B	80
ตารางที่ 4.32	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	82
ตารางที่ 4.33	ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน	82
ตารางที่ 4.34	ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	83

ตารางที่ 4.35 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน	83
ตารางที่ 4.36 ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A	85
ตารางที่ 4.37 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง เมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A	85
ตาราง ผลการทดลองที่ 4.4	117

บทที่ 5

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของ 12 พัลส์บริดคอนเวอร์เตอร์ กับ 6 พัลส์บริดคอนเวอร์เตอร์	121
--	-----



บทที่ 1

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ซึ่งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์หรือทางด้านวิศวกรรมล้วนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าด้วยกันทั้งสิ้น สาเหตุที่พลังงานไฟฟ้ามีบทบาทขึ้นมากก็เพราะว่าพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสะอาดและปราศจากมลภาวะต่อมวลมนุษย์

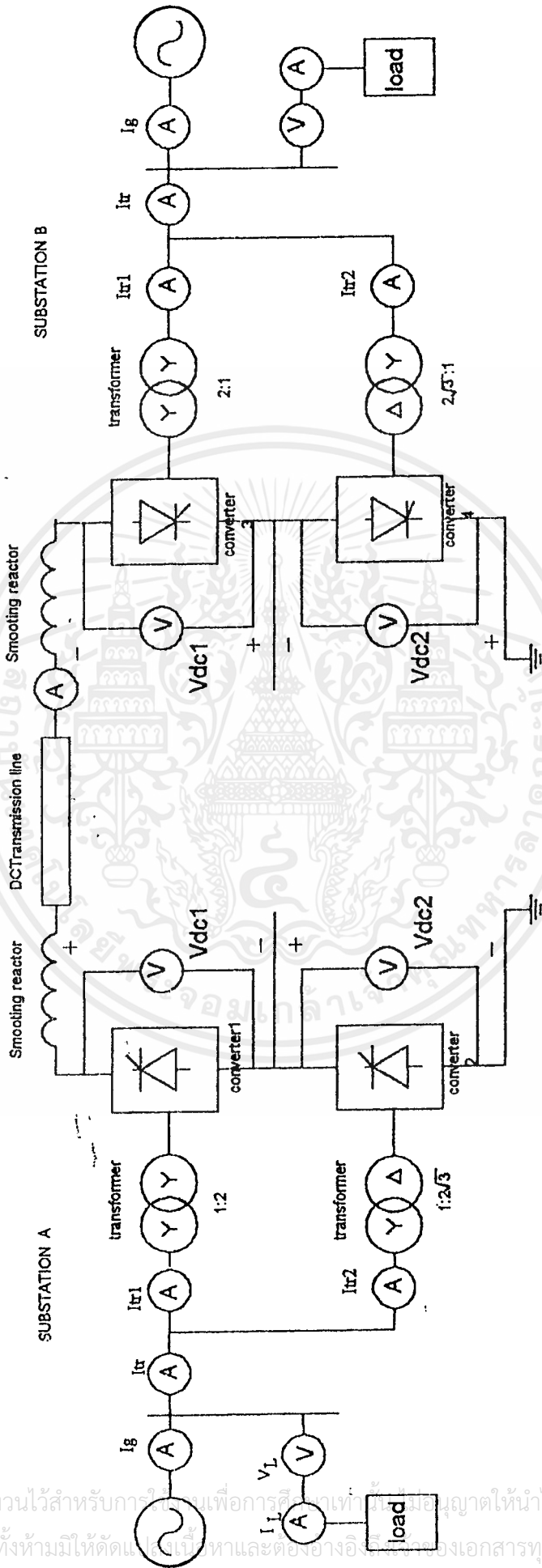
ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกปีในขณะที่ทรัพยากรต่างๆที่เรานำมาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าก็ร่อยหรอหมดลงไปซึ่งเป็นไปตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้านั่นเองซึ่งหน้าที่อีกอย่างหนึ่งของวิศวกรไฟฟ้าก็คือการพยายามที่จะใช้ทรัพยากรต่างๆให้มีประโยชน์สูงสุด หรือ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั่นเอง

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ตอบสนองความต้องการตรงจุดนี้เนื่องจากถ้าเรานำไปเปรียบเทียบกับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะพบว่าเมื่อเราต้องการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่พิคกำลังสูงและมีระยะทางไกลๆ มาก การส่งจ่ายด้วยระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องค่าสูญเสียในสายส่งประสิทธิภาพของการส่งพลังงานลักษณะการแกว่ง(Oscillated)ในระบบตลอดจนการทำการต่อเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่ต่างกัน

คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบจำลองขึ้นมา ซึ่งจะเป็นการพัฒนาจากแบบจำลองเดิม ซึ่งเป็นแบบ 6 พัลส์ ไปเป็นแบบ 12 พัลส์ เพื่อที่จะช่วยลดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากเดิม

1.1 ขอบเขตของการทำโครงการทั้งหมด

เพื่อทำการศึกษา ค้นคว้า พัฒนา และสร้างแบบจำลองการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวกลางในการส่งผ่านโดยการเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่แตกต่างกันสองระบบเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1.1 ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่หาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) แบบ 12 พัลส์ รวมทั้งการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียเพื่อเปรียบเทียบกับแบบ 6 พัลส์
- 2) เพื่อศึกษาการส่งจ่ายพลังงานระหว่างสองแหล่งจ่ายที่มีความถี่แตกต่างกัน
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยโครงการ

- 1) เป็นการนำเอาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มาประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) เป็นแนวทางที่จะพัฒนาระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) สามารถใช้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นข้อมูลอ้างอิงได้สำหรับผู้สนใจในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง
- 2) ศึกษาการทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลองแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์
- 3) ทำการสร้างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง แบบ 6 พัลส์ ขึ้นมา 2 ชุด เพื่อประกอบกันเป็น 12 พัลส์
- 4) ทดลองจ่ายโหลด
- 5) บันทึกผลการทดลอง และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์
- 6) สรุปผลการทดลอง พร้อมทั้งระบุให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งข้อเสนอแนะในการที่จะพัฒนาระบบอีกต่อไป

บทที่ 2

พื้นฐาน และระบบการทำงานของ ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

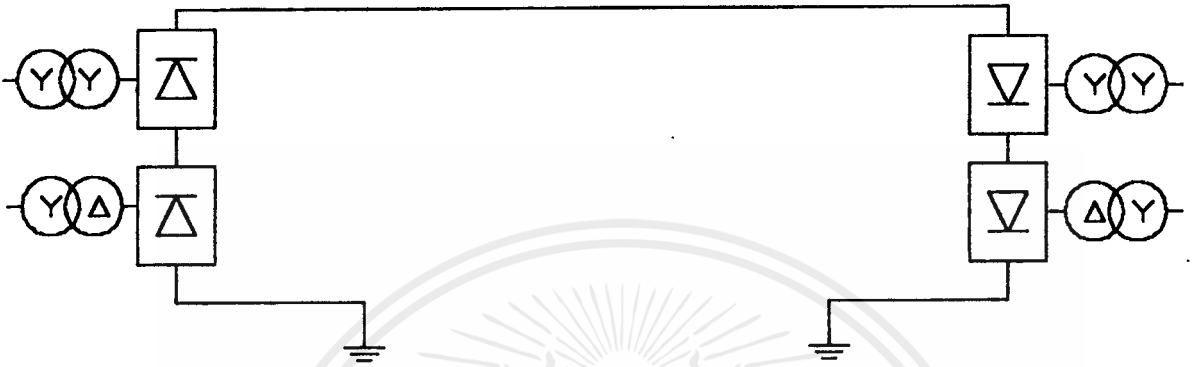
2.1 ลักษณะของการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Kind of dc link)

สามารถแบ่งรูปแบบการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ 3 ระบบคือ

2.1.1 ระบบขั้วเดียว (Monopolar Link) ในระบบนี้จะมีสายส่งที่เป็นตัวนำเพียงเส้นเดียว ซึ่งส่วนมากจะใช้สายส่งกำลังแบบ Overhead line หรือเคเบิลใต้น้ำ (Submarine) หรือใช้ทั้งสองแบบรวมกัน และจะใช้พื้นดินหรือทะเลเป็นตัวส่งกลับโดยส่วนใหญ่จะมีศักดาทางไฟฟ้าที่สายส่งกำลังเป็นลบ (-) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

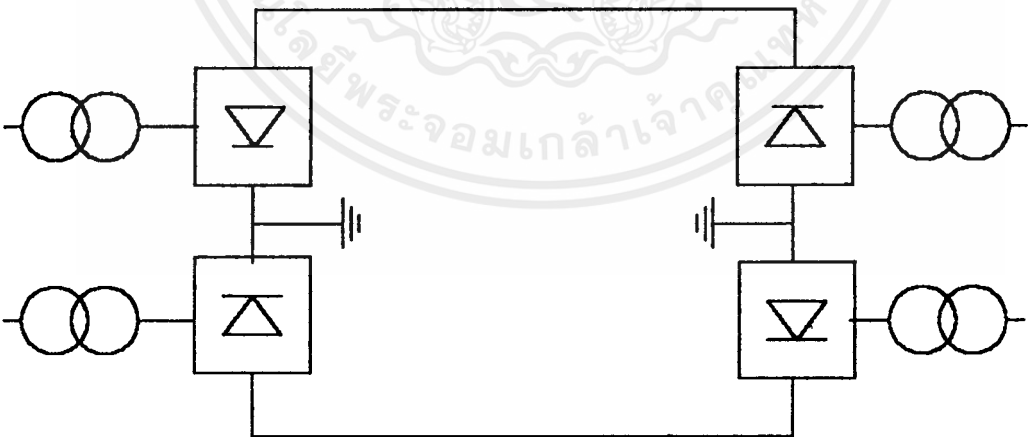


รูปที่ 2.1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว (6 พัลส์)



รูปที่ 2.2 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียว (12 พัลส์)

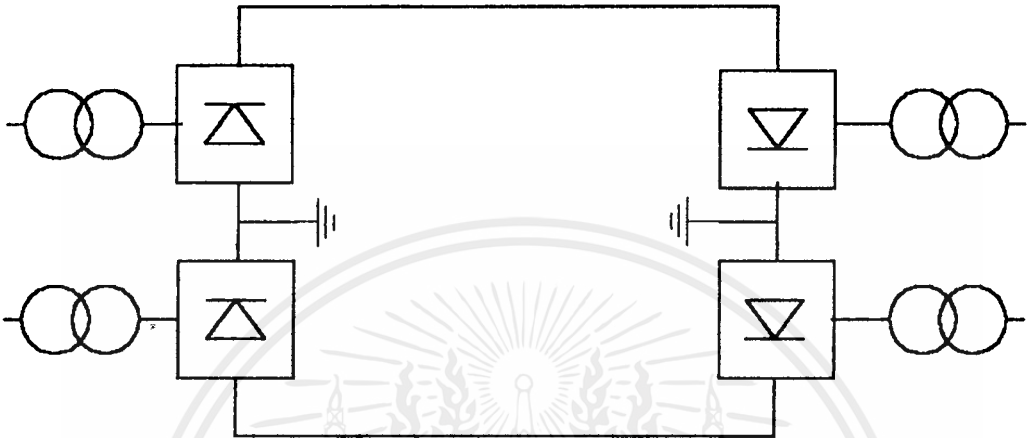
2.1.2 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (Homopolar Link) ในระบบนี้ ใช้สายส่งตัวนำสองตัวซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นลบ(-) ทั้งสองเส้น แล้วใช้พื้นดินเป็นทางเดินกลับ และถ้าหากเกิดมีเหตุเสียหายหรือข้อผิดพลาด (Fault) บนตัวนำใดตัวนำหนึ่ง ตัวนำที่เหลืออยู่จะทำหน้าที่จ่ายโหลดเต็มพิกัดแทนตัวนำที่เสียไปดังแสดงในรูปที่ 2.3



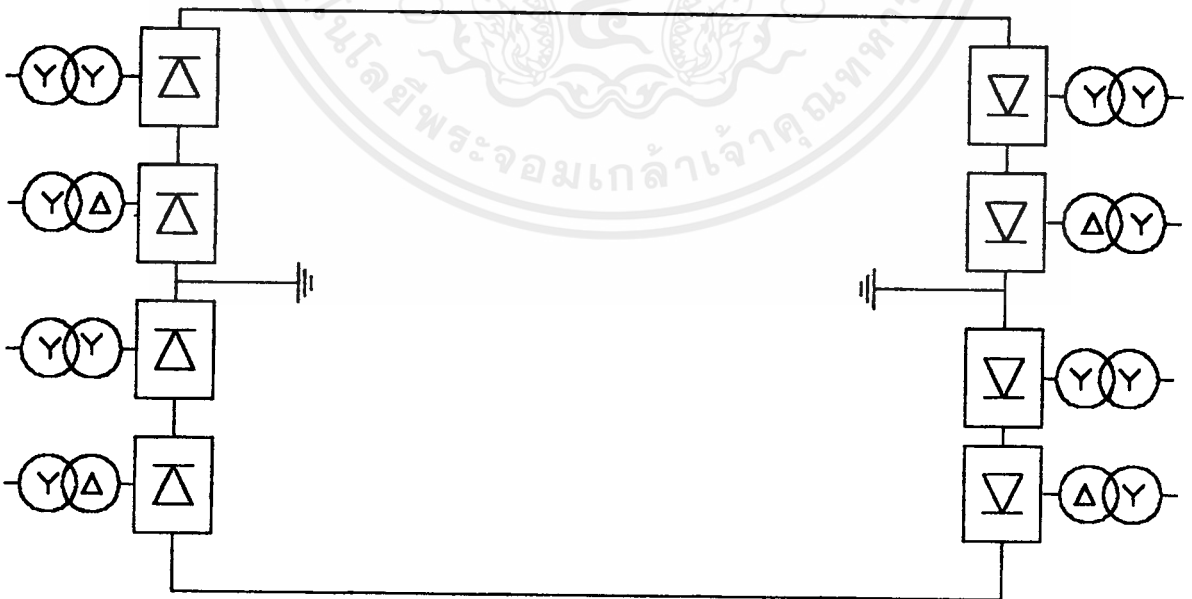
รูปที่ 2.3 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบขั้วเดียวร่วมกัน

2.1.3 ระบบสองขั้ว (Bipolar Link) ในระบบนี้จะมีตัวนำอยู่สองตัวนำโดยตัวนำแต่ละตัวจะมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวก(+) และลบ (-) ซึ่งแต่ละขั้วจะมีชุดคอนเวอร์เตอร์ แต่ละชุดการ

ทำงาน โดยเป็นอิสระต่อกัน เมื่อเกิดเหตุเสียใดๆ ขึ้นบนตัวนำใดตัวนำหนึ่ง ตัวนำที่เหลือก็จะทำการจ่ายโหลด เพียงครึ่งหนึ่งของพิกัด



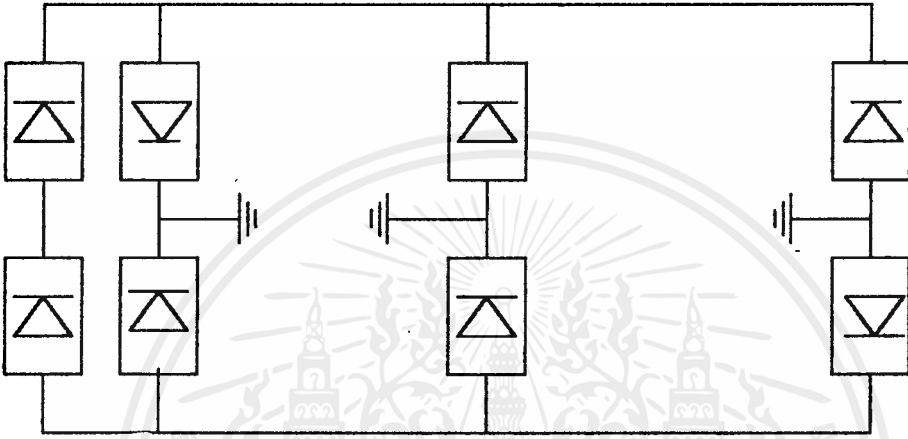
รูปที่ 2.4 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (6 พัลส์)



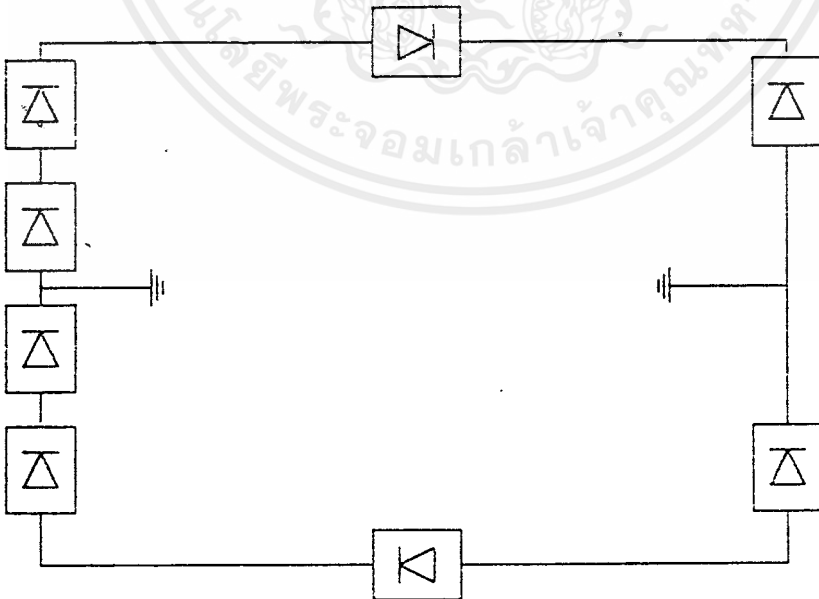
รูปที่ 2.5 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าระบบสองขั้ว (12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 3 ระบบดังกล่าวแล้วเป็นการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง แต่ถ้าเราต้องการส่งพลังงานระหว่างหลายจุดก็สามารถที่จะทำได้ ซึ่งเราเรียกระบบนี้ว่า ระบบหลายขั้ว(Multiterminal System) ซึ่งการเชื่อมโยงอาจจะเป็นแบบขนานหรือแบบอนุกรมก็ได้ ดังรูปที่ 2.6,2.7



รูปที่ 2.6 การเชื่อมโยงระบบแบบขนาน



รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงระบบแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการส่งจ่ายพลังงานด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงและระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

1) เมื่อใช้สายตัวนำรวมเท่านั้น ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถส่งจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสายส่งตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้จะมีสองเส้น โดยสายส่งตัวนำเส้นหนึ่งจะมีศักดาไฟฟ้าเป็นขั้วบวกเทียบกับกราวด์ และอีกเส้นหนึ่งมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับแต่มีขั้วศักดาไฟฟ้าเป็นลบเรียกว่าระบบสองขั้ว (Bipolar) ทำให้มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น $\pm V_{dc}$ และยังสามารถที่จะใช้สายตัวนำเพียงเส้นเดียว โดยมีทางเดินกลับด้วยพื้นดิน (Earth) ได้ เป็นผลให้ค่าความต้านทานของระบบกระแสตรงต่ำกว่าระบบกระแสสลับ ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าระบบขั้วเดียว (Monopolar) โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น $+V_{dc}$ หรือ $-V_{dc}$

2) การส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จะมีประสิทธิภาพและโวลเตจเรกกูเลชันดีกว่าระบบส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อพิจารณาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรจะพบว่าสำหรับการส่งจ่ายกำลังงานด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

AC JOULE LOSSES PER CIRCUIT

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

เมื่อ

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

R = Bundle resistance/km

เมื่อส่งจ่ายด้วยระบบการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงระบบ สองขั้ว

AC JOULE LOSSES PER BIPOLE

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$I = \frac{\text{POWER}}{V_1 - V_2}$$

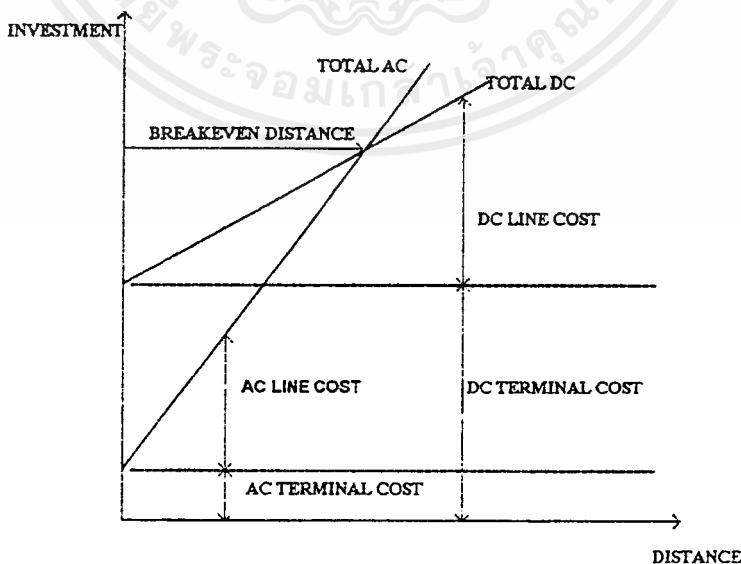
R = Bundle resistance/km

สำหรับโวลต์เตจเรกกูเลชันของระบบส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จะมีค่าต่ำเพราะว่าผลของแรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง จะมีผลจากความต้านทานเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจาก $\omega = 0$ จึงไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ มาเกี่ยวข้อง และปัญหาที่เกิดจากผลของค่า ความจุไฟฟ้า ทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าอัดประจุ(Charging Current) ก็จะไม่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายพลังงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

3) ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีความน่าเชื่อถือสูงทางด้านความมั่นคงของการส่งกำลังงานไฟฟ้าเนื่องจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้วจะมีความสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องซึ่งถ้าเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบสองขั้ว สายตัวนำหนึ่งในสองของระบบสองขั้วจะถูกต่อลงกราวด์ ระบบสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้โดยระบบขั้วเดียวแทน

4) ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จะสามารถเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่แตกต่างกันได้ เนื่องจากไม่มีระบบการซิงโครไนส์(Synchronous)

5) ราคาของอุปกรณ์ชุดคอนเวอร์เตอร์ยังมีราคาแพงแต่เมื่อมีการส่งจ่ายด้วยระยะทางไกลๆค่าใช้จ่ายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีราคาถูกกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังกราฟ

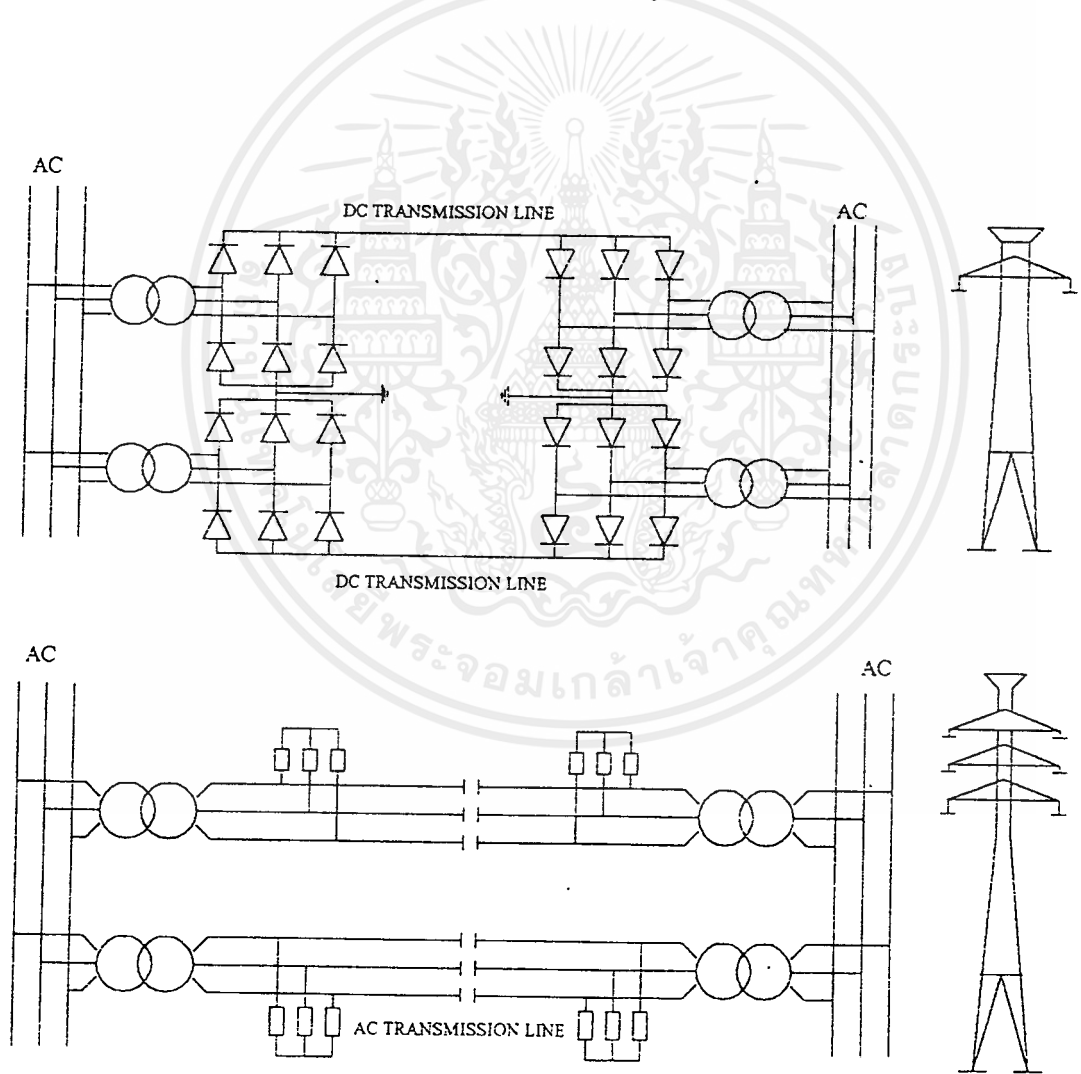


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

กับ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าระดับแรงดันได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง(Power Transformer) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าได้หลายระดับ ซึ่งมีพลังงานสูญเสียในหม้อแปลงน้อยมาก และยังไม่มีอุปกรณ์ตัดตอนหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับกระแสตรงแรงสูง เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดการอาร์ค(Arc)ได้ง่าย และรุนแรง ขณะที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ตัดตอนแยกออกจากกันขณะมีไหลลซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนานาเอาสารกึ่งตัวนำ มาใช้เป็นสวิตช์ รูปที่ 2.9 จะแสดงการเปรียบเทียบลักษณะวงจรของระบบกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

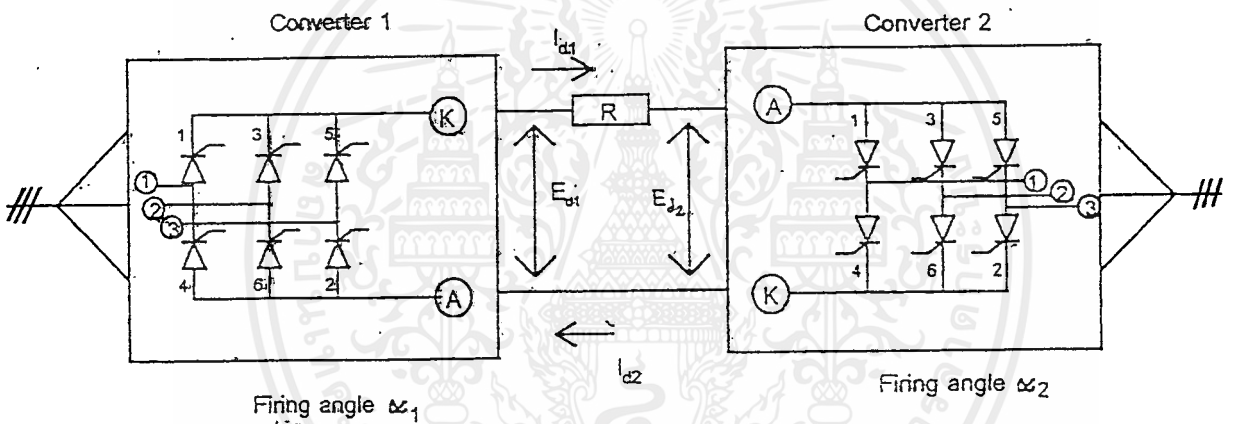


รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบลักษณะวงจรของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 หลักการทำงานทั่วไปของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยที่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับสองระบบ โดยมีชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ปลายด้านหนึ่งของสายส่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC converter) เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเรียกว่า เรกติฟาย (Rectifier) ในขณะที่มีคอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งที่ต่ออยู่อีกทางด้านปลายสายส่งหนึ่งทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC converter) เพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้งานต่อไป เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter)



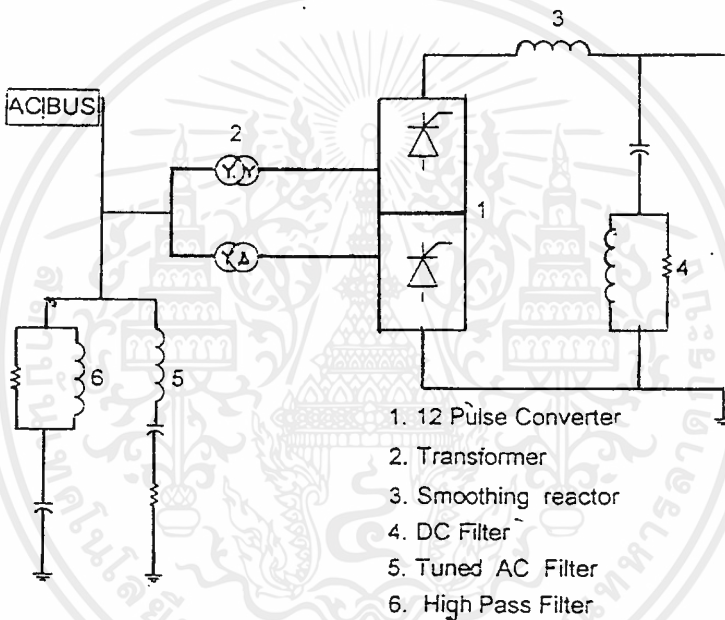
รูปที่ 2.10 วงจรระบบส่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

จากที่รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยที่ชุดคอนเวอร์เตอร์ 1 จะเป็นชุดเรกติฟายเออร์ซึ่ง ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับของสายส่งไลน์ 1 ไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกส่งผ่านไปโดยระบบสายส่งสองเส้น จากนั้นคอนเวอร์เตอร์ 2 จะทำการเปลี่ยนกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสใหม่ ซึ่งก็คือทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสองข้างสามารถมีความถี่ที่แตกต่างกันได้ทิศทางการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าอาจจะกลับทางกันได้โดยเปลี่ยนลักษณะการควบคุมวาล์วที่ควบคุมโดยมุมทริก α_1 และ α_2 เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์ 1 เป็นอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ 2 เป็น เรกติฟายเออร์ ซึ่งการเปลี่ยนมุมการทำงานเช่นนี้จะทำให้ขั้ว(Polarity)ของ

สายส่งตัวนำ จะสลับกันไป [จาก (+)→(-)] โดยทิศทางกระแสไหลของกระแสจะยังคงมีทิศทางเดิมที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าตัวนำ สามารถนำกระแสได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

2.4 ส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ในระบบจะประกอบด้วย

1) ชุด 12 พัลส์ คอนเวอร์เตอร์ จะเป็นตัวเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งขึ้นอยู่กับควบคุมมุมทริก

2) หม้อแปลง

3) สมุดตั้ง รีแอกเตอร์จะต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงจะทำงานร่วมกับคิซีฟิลเตอร์ ในการลดแอมพลิจูดของฮาร์โมนิกส์โวลเตจในสายคิซีและคอยบล็อก โวลเตจที่เกิดจาก ฟิวส์ และสวิตชิงเสิร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

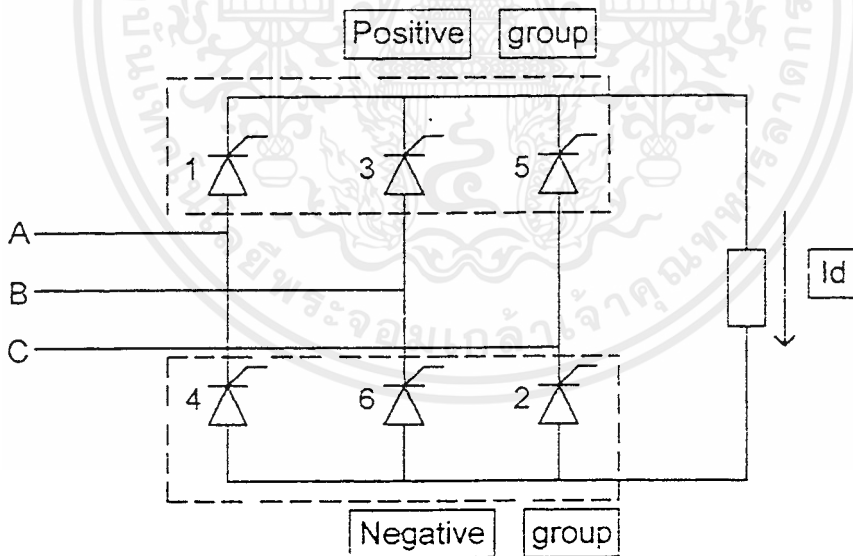
- 4) ดีซี ฟิลเตอร์ ทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกส์โวลเตจในสายส่งกระแสตรง
- 5) เอซี ฟิลเตอร์ ทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกส์ของกระแสกลับที่สร้างโดยคอนเวอร์เตอร์ไม่ให้อันเข้าในระบบ
- 6) ไฮพาท ฟิลเตอร์ กรองกระแสความถี่สูง

2.5 คอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์นี้จะได้จากการนำ คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ แบบบริดจ์ 2 ชุด มาต่ออนุกรมกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบ บริดจ์

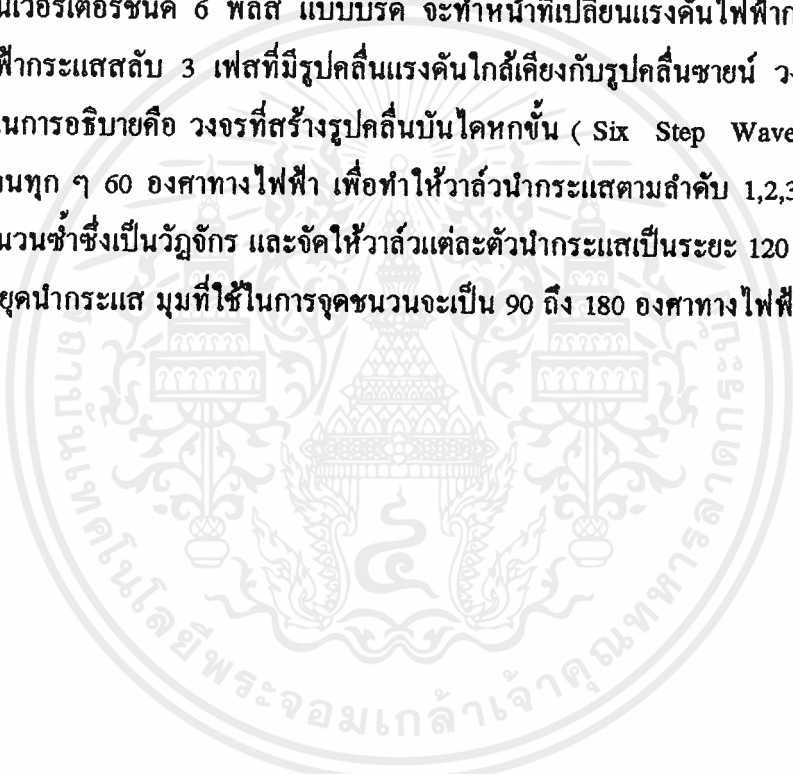
คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริดจ์ ได้จากการนำเอา คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ พี และ เอ็น มาต่อเข้าด้วยกัน

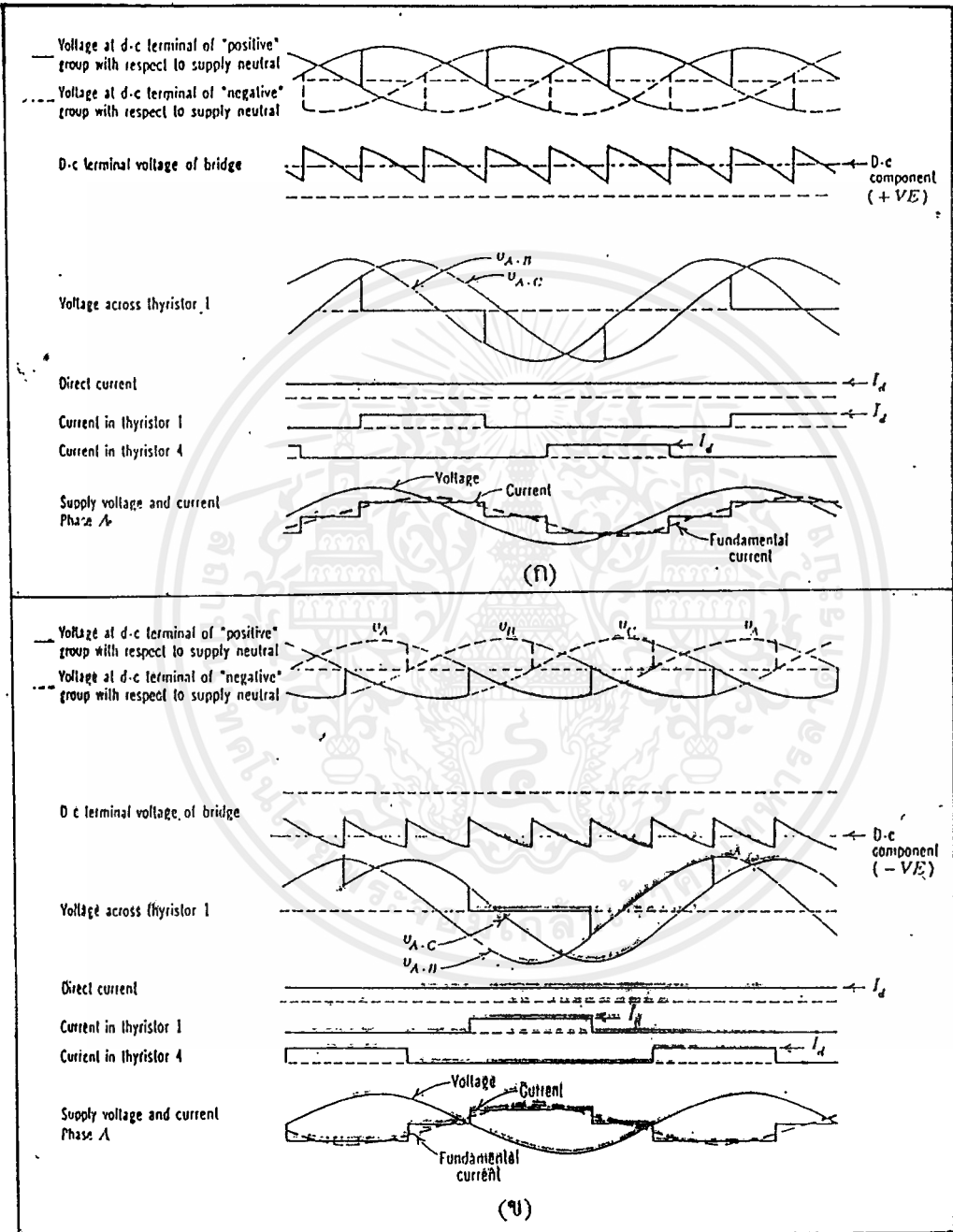


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริดจ์ ที่ได้จากการนำเอาคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ พี และ เอ็น มาต่อเข้าด้วยกัน

2.5.1) หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะมี 2 ลักษณะ คือ โหมคเรคตีฟายเออร์ และ โหมคอินเวอร์เตอร์สำหรับโหมคเรคตีฟายเออร์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าให้วาล์วทั้ง 6 เป็นวาล์วที่มีมุมจุดชนวนเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้สามารถที่จะแทนวาล์วเหล่านั้นด้วยไดโอด ซึ่งมันจะนำกระแสเมื่อให้ฟอร์เวิร์คไบอัส และหยุดนำกระแสเมื่อรีเวิร์คไบอัส ลำดับของการทำงานจะเป็น 1,2,3,4,5, และ 6 โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะมีมุมจุดชนวนอยู่ในช่วง 0 ถึง 90 องศาทางไฟฟ้า สำหรับโหมคอินเวอร์เตอร์นั้น คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริด จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่มีรูปคลื่นแรงดันใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ในการอธิบายคือ วงจรที่สร้างรูปคลื่นบันไดหกขั้น (Six Step Wave Form) ซึ่งจะมีการจุดชนวนทุก ๆ 60 องศาทางไฟฟ้า เพื่อทำให้วาล์วนำกระแสตามลำดับ 1,2,3,4,5, และ 6 แล้ววนไปจุดชนวนซ้ำซึ่งเป็นวัฏจักร และจัดให้วาล์วแต่ละตัวนำกระแสเป็นระยะ 120 องศาทางไฟฟ้า แล้วจึงให้หยุดนำกระแส มุมที่ใช้ในการจุดชนวนจะเป็น 90 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า





รูปที่ 2.18 รูปคลื่นต่าง ๆ ทางทฤษฎีที่ได้จาก คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 ทัดส์ แบบบริดจ์ โดยมีมุมจุดชนวน (ก) 45° และ (ข) 150°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ฮาร์โมนิกส์

เมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในวงจร คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ แบบบริดจ์ พบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีเฉพาะลำดับที่

$$6K \pm 1 \tag{2.1}$$

เมื่อ K เป็นจำนวนเต็มบวกใด ๆ (K= 1,2,3,...)

ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจะเป็นฮาร์โมนิกส์เลขคี่ 5,7,9...

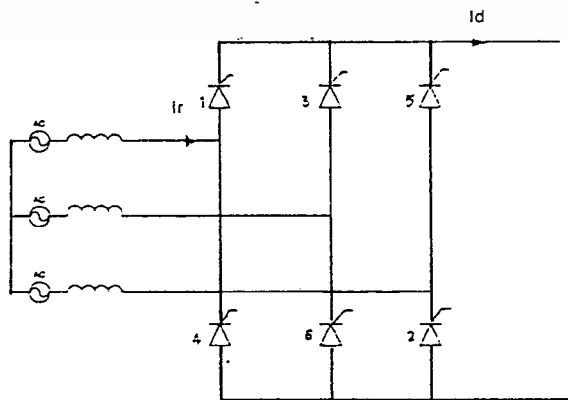
กำหนดให้

- I_1 คือ fundamental current
- I_r คือ transformer current
- I_d คือ direct current
- V_1 คือ fundamental voltage
- V_d คือ direct voltage
- S_n คือ transformer angle
- α คือ firing angle
- $\frac{1}{N}$ คือ turn ratio
- x คือ leakage reactance (perunit)

จะได้

$$I_r = I_1 (\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \dots) \text{ Amp} \tag{2.2}$$

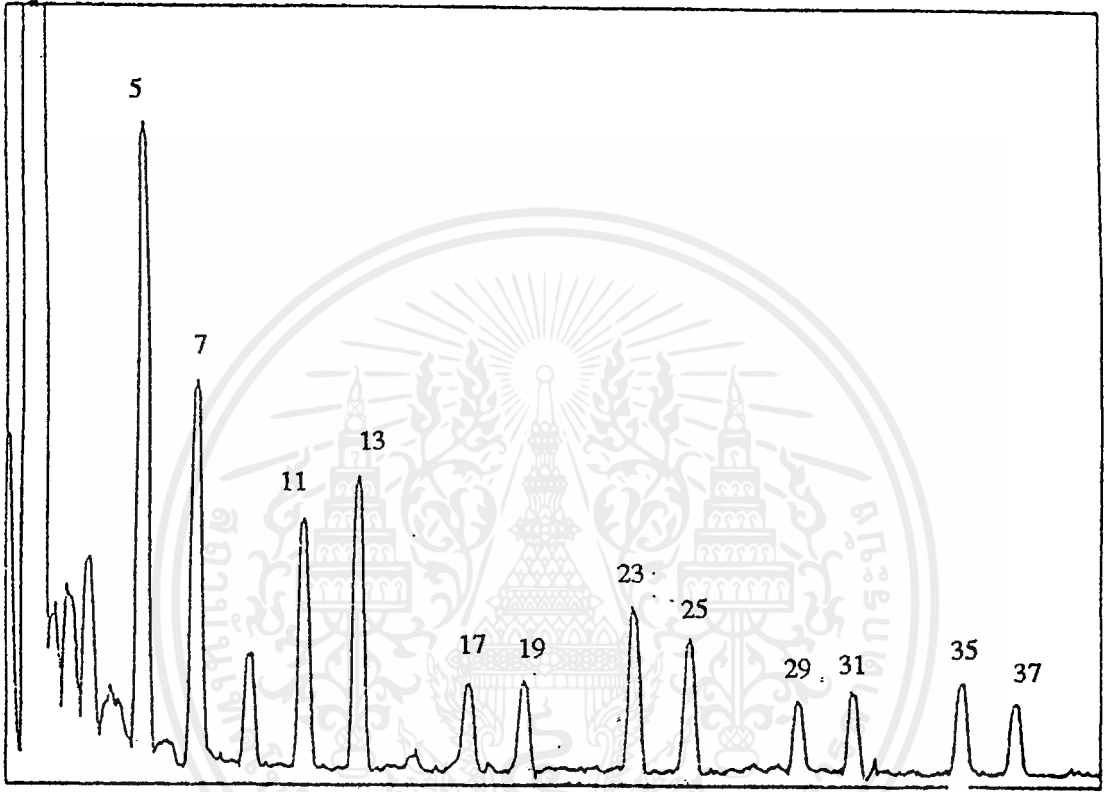
$$I_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \text{ Amp} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.14 วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบ ชนิด 6 พัลส์ แบบ บริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาถึงรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะพบว่ามีส่วนฮาร์โมนิกที่สูงซึ่งจะเป็นผลเสียต่อ ระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อทำการวิเคราะห์ออกมาเป็น spectrum จะได้ดังรูป



รูปที่ 2.15 Harmonic spectrum จาก คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบ บริค

2.6.1) ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร

1) ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อการเกิดรีโซแนนซ์ จะทำให้คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ เสียหายได้ เพราะว่าคาปาซิเตอร์ได้รับกระแสมากเกินไป เนื่องจากผลของการเกิดรีโซแนนซ์ขนาน (การเกิดอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกที่ความถี่รีโซแนนซ์) จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกโวลเตจเพิ่มขึ้นและจะเกิดกระแสไหลแต่ละสาขาของวงจรรีโซแนนซ์มีค่าสูง

2) ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรอีกด้วย

3)ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลง จะมี 3 ประการ ดังนี้

3.1) กระแสฮาร์โมนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลัง สูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray flux loss) มีค่าเพิ่มขึ้น

3.2) แรงแค่นฮาร์โมนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) และกำลังสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทอรีรีซิส (Hysteresis loss) เพิ่มขึ้น

3.3) ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย (Line capacitor)

4) ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อ หลอดไฟฟ้า จะทำให้อายุการใช้งานของหลอดสั้นลง

5) ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆที่สำคัญ เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak voltage) ให้ขนาด และ ความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

คอมพิวเตอรื คอมพิวเตอรืจะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์อย่างมาก ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกส์มากกว่าขีดจำกัด ที่เครื่องทนได้ จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอรืเสียหาย

อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น รีเลย์, เซอร์กิตเบรกเกอร์, ฟิวส์ และอุปกรณ์พวกมิเตอร์วัดไฟฟ้า เครื่องมือวัดต่าง ๆ ทำงานผิดพลาดอุปกรณ์พวกอิเล็กทรอนิกส์ ก็จะทำงานผิดพลาด

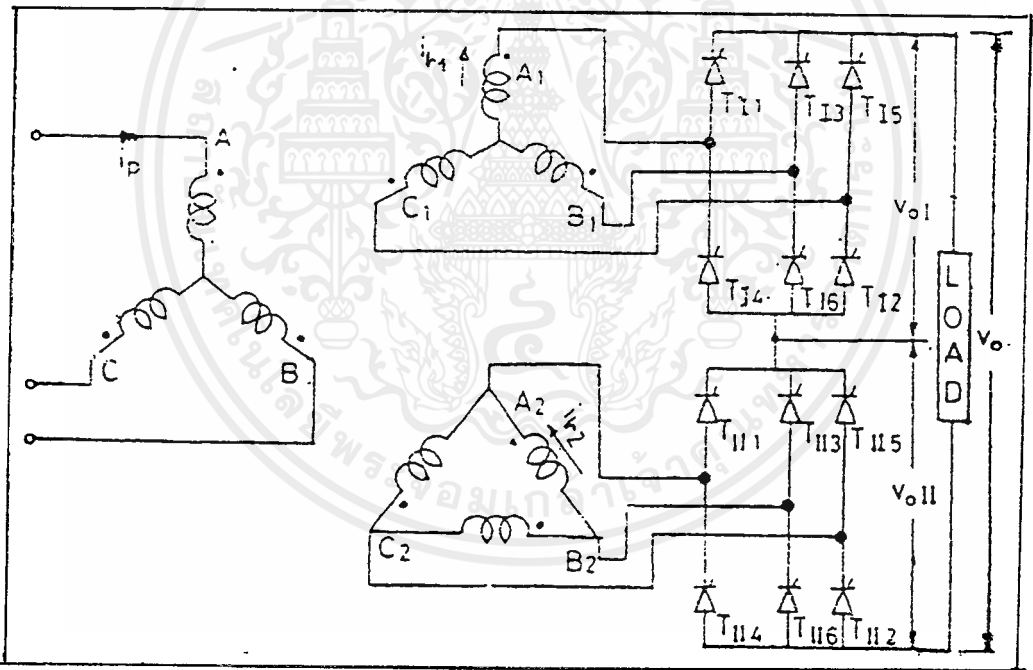
6) ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสายส่ง จะทำให้ตัวนำและฉนวนไฟฟ้าเกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น

7) ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสื่อสาร ฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง เกิดความรำคาญ

จะเห็นได้ว่าฮาร์โมนิกส์ได้ก่อให้เกิดผลเสียขึ้นมากมายในระบบไฟฟ้าและการสื่อสารจึงจำเป็นต้องแก้ไข ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้ฟิลเตอร์ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการติดตั้งของคาปาซิเตอร์ และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคอนเวอร์เตอร์จากชนิด 6 พัลส์ แบบบริค มาเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบ บริค แทน ซึ่งเป็นหัวข้อหลักของโปรเจกต์นี้

2.7 คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบ บริด

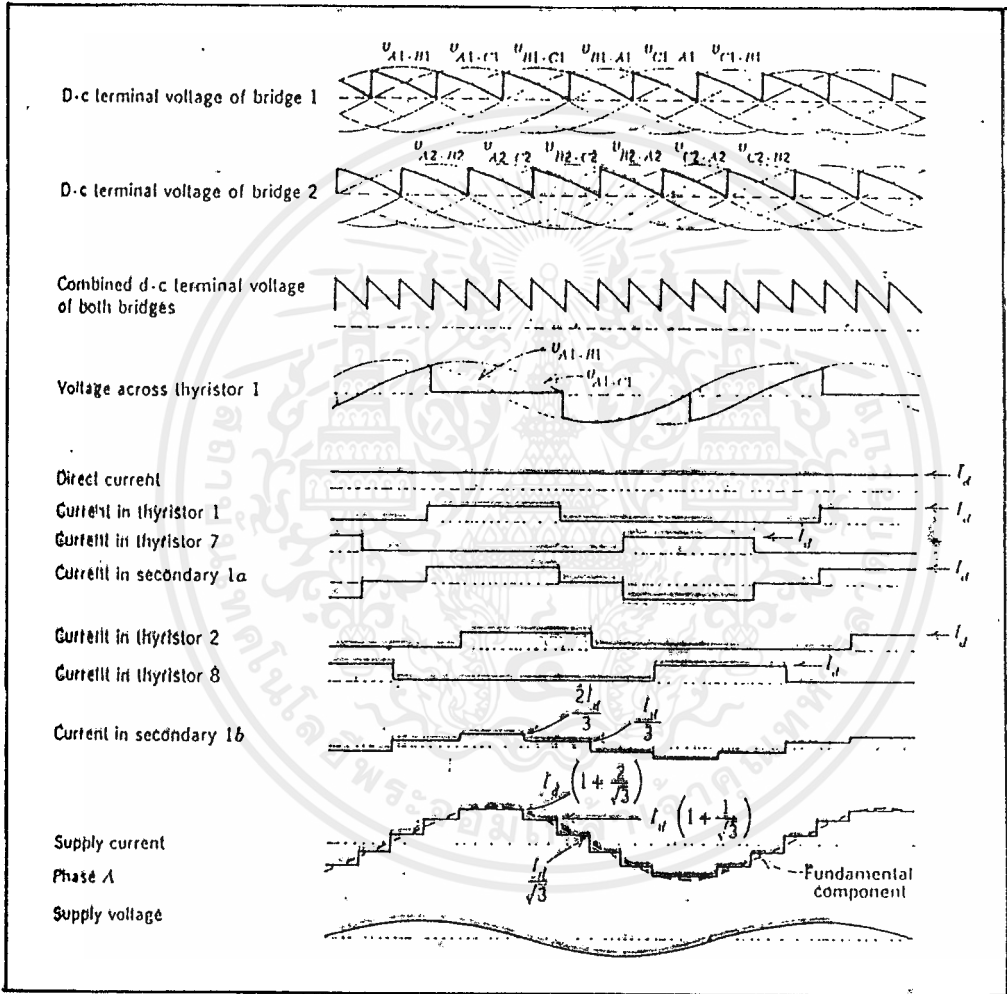
คอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์แบบ บริด ได้จากการนำเอาคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบ บริด 2 ชุด มาอนุกรมกัน โดยที่หม้อแปลงชุดแรกจะมีการต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิ เป็นแบบ สตาร์ และทางด้านทุติยภูมิก็ต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์ ส่วนหม้อแปลงชุดที่สองจะมีการต่อขดลวด ทางด้านปฐมภูมิเป็นแบบสตาร์ และทางด้านทุติยภูมิ เป็นแบบเคลด้า วาล์วของหม้อแปลงชุดที่มีการต่อขดลวดแบบ สตาร์-เคลด้า จะมีการทริกให้นำกระแสก่อนวาล์วของหม้อแปลงชุดที่มีการต่อ ขดลวดแบบ สตาร์-สตาร์ อยู่ 30 องศาทางไฟฟ้า สาเหตุที่หม้อแปลง 2 ชุดนี้มีการต่อขดลวดที่แตกต่างกัน และมีมุมทริกให้วาล์วนำกระแสห่างเฟสกันถึง 30 องศา ทางไฟฟ้าก็เพื่อให้ฮาร์โมนิกส์ ของหม้อแปลงทั้งสองชุดมีการหักล้างกัน



รูปที่ 2.16 คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ แบบบริด

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ แบบบริค สามารถที่จะอธิบายได้การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบบริค ดังที่ได้อธิบายมาแล้วและเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์แบบบริคนี้ เกิดจากการนำเอาคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ แบบบริค 2 ชุดมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุทของระบบจะเป็นผลรวมของแรงดันเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวและในการพิจารณาจะกำหนดให้อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเป็น 1

เมื่อพิจารณาการต่อขดลวดของหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของคลื่นกระแสไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ สตาร์-สตาร์ กระแสไลน์ และกระแสเฟส จะเป็นตัวเดียวกัน ส่วนหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ สตาร์-เดลต้า กระแสไลน์จะมีความกว้างพัลส์ 120 องศาทางไฟฟ้าและมีค่าความสูง (Amplitude) ที่คงที่ กระแสเฟสจะมีขนาด $\pm \frac{2}{3} Id$ หรือ $\pm \frac{1}{3} Id$ ซึ่งมีลักษณะการทำงานจะเป็นดังนี้ เมื่อเฟส A_2B_2 ให้นำกระแสในช่วงบวก กระแส i_{L2} จะเท่ากับ $\frac{2}{3} Id$ และกระแส i_{L2} จะเท่ากับ $-\frac{1}{3} Id$ เมื่อเฟส B_2C_2 หรือ C_2A_2 นำกระแส และเมื่อเฟส A_2B_2 นำกระแสในช่วงลบ กระแส i_{L2} จะเท่ากับ $-\frac{2}{3} Id$ และกระแส i_{L2} จะเท่ากับ $+\frac{1}{3} Id$ เมื่อเฟส B_2C_2 หรือ C_2A_2 นำกระแส เนื่องจากอัตราส่วนแรงดันของการต่อขดลวดแบบ เดลต้า ทางด้านทุติยภูมิเมื่อทำการทรานเฟอร์ไปสู่ทางด้านปฐมภูมิที่มีการต่อขดลวด แบบสตาร์จะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}$ ดังนั้น กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบสตาร์-เดลต้าจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3} i_{L2}$ ทำให้กระแสรวมทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ $(i_{L1} + \sqrt{3} i_{L2})$ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะรูปคลื่นที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริดจ์ โดยมีมุมจุด ชนวน 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบ
บริด จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์จะมีเฉพาะลำดับที่

$$12K \pm 1 \quad (2.4)$$

เมื่อ K เป็นจำนวนเต็มบวกใด ๆ (K= 1,2,3,...)

ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจะเป็นฮาร์โมนิกส์เลขที่ 11,13,23,25,...

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์- สตาร์

$$I_r = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t - \frac{1}{17} \cos 17 \omega t + \frac{1}{19} \cos 19 \omega t \dots \right) \quad (2.5)$$

สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์- เคลด้า

$$I_r = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5 \omega t - \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t + \frac{1}{17} \cos 17 \omega t - \frac{1}{19} \cos 19 \omega t \dots \right) \text{ Amp} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะได้กระแสรวม

$$I_r = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t - \frac{1}{23} \cos 23 \omega t + \frac{1}{25} \cos 25 \omega t \dots \right) \text{ Amp} \quad (2.7)$$

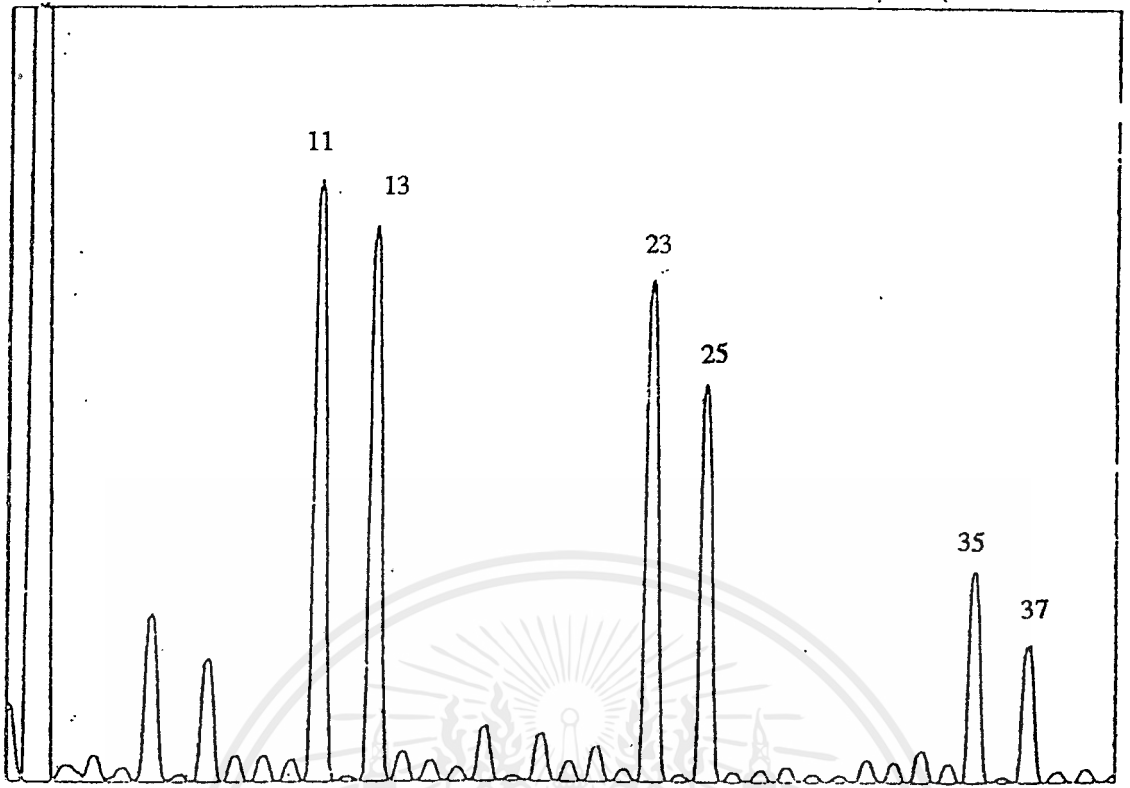
และ

$$I_d = \frac{\pi}{2\sqrt{6}} N I_1 \quad \text{Amp} \quad (2.8)$$

$$V_d = 2(3\sqrt{2} / \pi V_1 \cos \alpha - x / \sqrt{2} N V_{1n} I_1 / I_{1n}) \text{ Volt.} \quad (2.9)$$

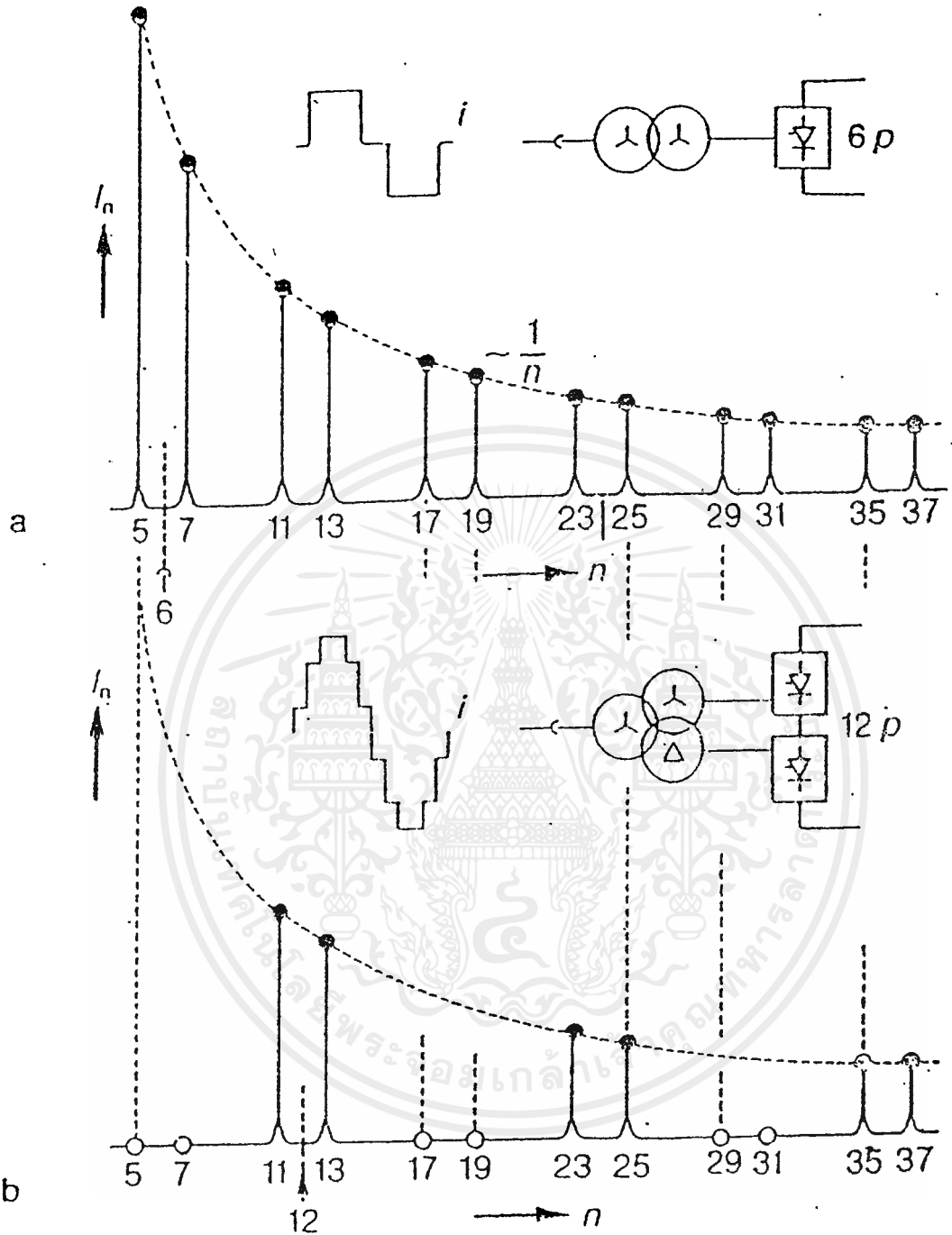
เมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ออกมาในรูปของสเปคตรัมได้ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 Harmonic spectrum จากคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริค

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์และ 12 พัลส์ แบบบริคให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.19



a Six pulse converter
 b Twelve-pulse converter
 I_i Current
 n Harmnic Number
 p Pulse number of converter

รูปที่ 2.19 การเปรียบเทียบฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ แบบบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์ประกอบชุดจ่าย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 วงจร snubber (snubber)

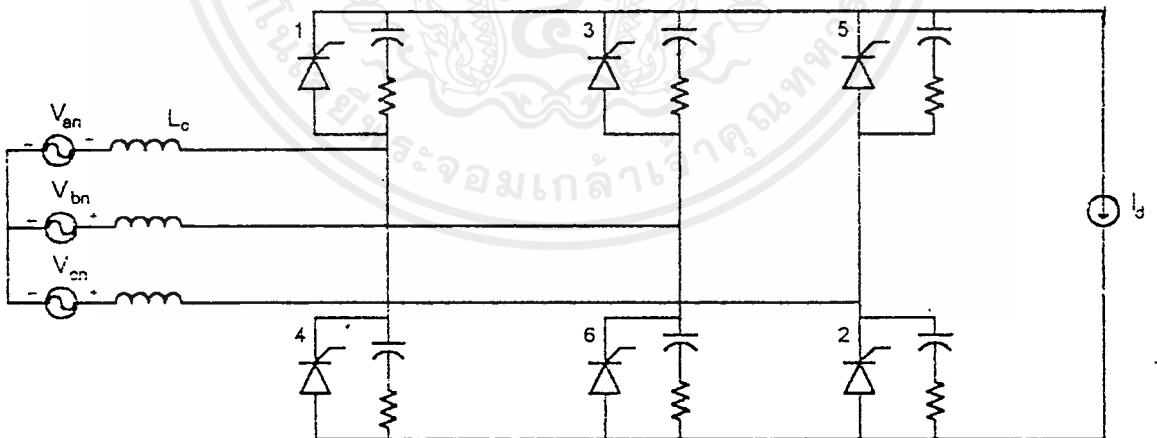
3.1.1) หน้าที่ของวงจร snubber

- 1) จำกัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวไทรสเตอร์ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-off transients
- 2) จำกัดกระแสที่จ่ายให้กับตัวไทรสเตอร์ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-on transients
- 3) จำกัดอัตราเพิ่มขึ้นของกระแส (di/dt) ในขณะที่เกิดสภาวะ turn-on
- 4) จำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน (dv/dt) ที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์ในขณะที่เกิด

สภาวะ turn-off

- 5) กำหนดทิศทางการไหลของกระแสอุปกรณ์ ในขณะที่ turn-on และ turn-off

วงจร snubber



รูปที่ 3.1 วงจร snubber

ในการวิเคราะห์เพื่อป้องกันผลของแรงดันเกินเนื่องจากผลของค่าอินดักแตนซ์ในสายไลน์

ให้ค่า อิมพีแดนซ์ของสาย = 5%

$$\text{จะได้ } x_c = \omega L_c = 0.05 \frac{V_{LL}}{I_d \sqrt{3}} \quad \Omega \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

V_{LL} คือ ค่าแรงดัน อาร์ เอ็ม เอส โวลต์ ทุ โวลต์

I_d คือ ค่ากระแสไหล

เราจะใช้ค่า C_s ที่สภาวะ optimum เมื่อ $\omega L = 314$

$$\text{จะได้ } C_s = C_{base} (\mu F) = 0.6 \frac{I_d}{V_{LL}} \quad \mu F \quad (3.2)$$

$$\text{และจะได้ค่า } R = R_{opt} = \frac{20V_{LL}}{I_d} \quad \Omega \quad (3.3)$$

กำลังที่สูญเสียในวงจรสับเบอร์ สามารถคำนวณได้จาก

$$W_{rubber} = 3C_s V_{LL}^2 \quad (3.4)$$

แทนค่าโดย $I_d = 1 \text{ A}$, $V_{LL} = 480 \text{ V}$

$$\text{จะได้ } C_s = 0.6 \frac{I_d}{V_{LL}} = \frac{0.6(1)}{480} = 0.00125 \quad \mu F$$

$$R = \frac{20V_{LL}}{I_d} = \frac{20(480)}{1} = 9600 \quad \Omega$$

$$W = 3C_s V_{LL}^2 = 3(1.25 \times 10^{-9})(480)^2 = 0.864 \text{ mW}$$

3.2 คีชี ฟิลเตอร์ (DC Filter)

3.2.1 ฟิลเตอร์ความถี่เดียว (Single tuned filter)

ลักษณะของซิงเกิลทูนฟิลเตอร์

- 1) มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูง ทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่นี้ไหลผ่านฟิลเตอร์เกือบทั้งหมด
- 2) อิมพีแดนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่นั้นมีค่ามากกว่า ความถี่อิมพีแดนซ์ของซิงเกิลทูนฟิลเตอร์ จะเกิดรีโซแนนซ์อนุกรมขึ้นในตัวฟิลเตอร์ดังสมการ

$$R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \quad \Omega \quad (3.8)$$

$$\text{ที่สภาวะรีโซแนนซ์ } \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \Omega \quad (3.9)$$

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad H_z \quad (3.10)$

เมื่อ f_r คือความถี่รีโซแนนซ์

ω คือความถี่เชิงมุมที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์

Q คือค่าที่บอกรูปร่าง ความชันของผลตอบสนองความถี่

หรือ Quality factor

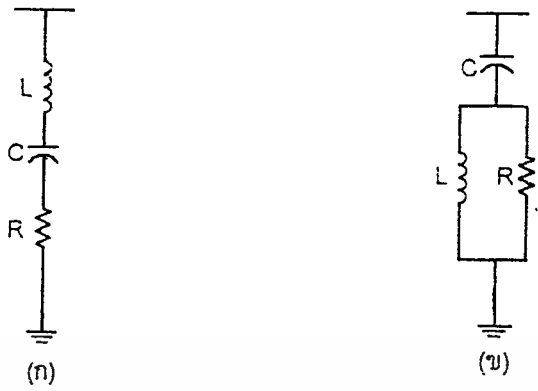
จะได้ $Q = \frac{X_{cr}}{R} = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (3.11)$

3.2.2) ฟิเตอร์หลายความถี่ (High-pass filter)

เป็นฟิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่ต่ำและอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูง เพื่อลดจำนวนฟิเตอร์ความถี่เดียวที่ต้องใช้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูงจึงต้องรับกระแสที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดทำให้ฟิเตอร์มีขนาดใหญ่มาก ในการออกแบบจะใช้แบบอันดับสอง (Second order) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมมาก เพราะสูญเสียน้อยและมีลักษณะของฟิเตอร์ที่ดี อิมพีแดนซ์ของฟิเตอร์หลายความถี่แบบอันดับสองคือ

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}} \quad \Omega \quad (3.12)$$

$$Q = \frac{R}{XL_r} = \frac{R}{XC_r} \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.2 แสดงชนิดของฟิลเตอร์ (ก) แบบความถี่เดียว (ข) แบบหลายความถี่

ในแบบจำลองนี้เราจะจัดสร้าง คีซีฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์โมนิกส์ บนสายส่งกระแสตรง จะอาศัยหลักการรีโซแนนซ์ โดยการจูนความถี่ที่ไม่ต้องการออกไปจากระบบ โดยผ่านลงกราวด์ ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 12,24,36 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงจะมีลำดับเท่ากับ

$$12 K \text{ เมื่อ } K \text{ เป็นจำนวนเต็มบวก} \tag{3.14}$$

ในสภาวะรีโซแนนซ์ $X_L = X_C \quad \Omega \tag{3.15}$

ดังนั้น

$$2\pi f_r L = \frac{1}{(2\pi f_r)C} \quad \Omega \tag{3.16}$$

แต่เราต้องการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ $12f_r = 12f$ เมื่อ $f=50 \text{ Hz}$ ดังนั้น $f_r=600 \text{ Hz}$ เลือกค่า

$$C=20 \mu F$$

ดังนั้น

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad H \tag{3.17}$$

แทนค่า

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 600)^2} \times \frac{1}{20 \times 10^{-6}}$$

$$= 3.52 \text{ mH}$$

ดังนั้น อินดักเตอร์มีค่าเท่ากับ 3.52 mH

3.3 เอซีฟิลเตอร์ (AC Filter)

ในการกรองฮาร์โมนิกส์ทางด้านกระแสสลับ นั้นมีจุดประสงค์คือ การป้องกันการผิดยื่นของรูปคลื่นไซน์ โดยปกติฮาร์โมนิกส์ที่มีผลมากที่สุดเกิดจากคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ แบบบริดจ์ คือ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับที่ 11 และ 13 ในการออกแบบในที่นี่จะใช้ ฟิลเตอร์แบบความถี่เดียว ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.17) โดยกำหนดให้ C มีค่าเท่ากับ $20 \mu F$ จะได้

$$L = 4.54 \text{ mH} \quad \text{เมื่อต้องการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 11}$$

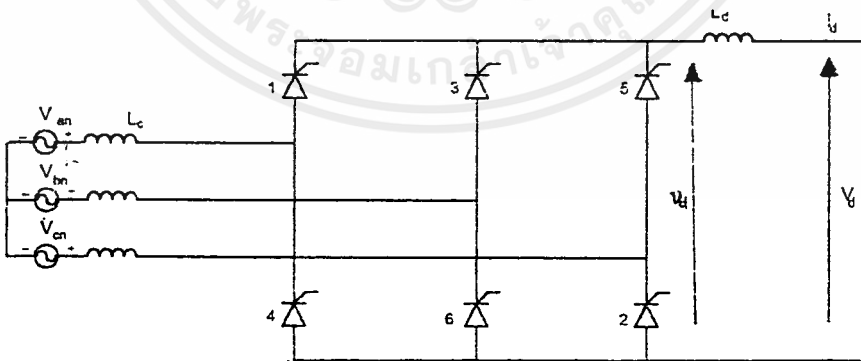
$$L = 3.25 \text{ mH} \quad \text{เมื่อต้องการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ 13}$$

โดยฮาร์โมนิกส์ทางด้านระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการที่ (3.4)

3.4 สมูทติง รีแอกเตอร์ (Smoothing reactor)

3.4.1) หน้าที่ของสมูทติงรีแอกเตอร์

- 1) ป้องกันผลเนื่องมาจาก การนำกระแสที่ผิดพลาดในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานอยู่โหมดของอินเวอร์เตอร์โดยการลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสในวงจรรบริดจ์
- 2) ทำให้คลื่นระลอก เรียบขึ้น
- 3) ลดฮาร์โมนิกส์ ของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
- 4) จำกัดค่ายอดของกระแสในวงจรรบริดจ์ที่เกิดจากการลัดวงจรในสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้วิเคราะห์ค่ารีแอกเตอร์ที่ต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรง

เพราะว่า
$$L_d \frac{di_d}{dt} = v_d - V_d \quad \text{Volt} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } i_d = \frac{1}{L_d} \int (v_d - V_d) dt \quad \text{Amp} \quad (3.19)$$

$$v_d = \sqrt{3} V_m \cos(\omega t - 30^\circ) \text{ Volt.} \quad \text{เมื่อ } \alpha \leq \omega t \leq \alpha + 60^\circ \quad (3.20)$$

$$\text{เนื่องจาก } V_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad \text{Volt} \quad (3.21)$$

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad \text{Volt} \quad (3.22)$$

เมื่อ V_m คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดระหว่างไลน์-นิวทรัล

V_{do} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อไม่มีโหลด

$$\text{โดยที่ } V_{do} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{L-N} = 2.34 V_{L-N} \quad \text{Volt} \quad (3.23)$$

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{L-L} = 1.35 V_{L-L} \quad \text{Volt} \quad (3.24)$$

แทนค่าสมการ (3.18) ค่าย สมการ (3.20) และ (3.22) จะได้

$$v_d - V_d = 2 V_{do} \left[\frac{\pi}{3} \cos(\omega t - 30^\circ) - \cos \alpha \right] \quad \text{Volt} \quad (3.25)$$

แทนค่าสมการที่ (3.19) ค่าย สมการ (3.25) จะได้

$$i_d = 2 \frac{V_{do}}{\omega L_d} \left\{ \frac{\pi}{3} [\sin(\omega t - 30^\circ) - \sin(\alpha - 30^\circ)] - (\omega t - \alpha) \cos \alpha \right\} \quad (3.26)$$

$$\text{จะได้ } I_d = 2 \frac{V_{do}}{\omega L_d} (0.0931 \sin \alpha) \quad \text{Amp} \quad (3.27)$$

$$\text{หรือ } L_d = 2 \frac{V_{do}}{\omega I_d} (0.0931 \sin \alpha) \quad \text{H} \quad (3.28)$$

$$\text{และ } V_{do} = 1.35 V_{L-L} \quad \text{Volt} \quad (3.29)$$

เมื่อ $V_{L-L} = 480 \text{ V}$ แทนค่าในสมการที่ (3.29) จะได้

$$V_{do} = 1.35 \times 480 = 648 \text{ V}$$

เพราะว่า $I_d = 1 \text{ A}$ และ $\alpha = 90^\circ$ เป็นมุมที่ I_d มีค่าสูงสุดซึ่ง L_d จะสามารถทนได้ แทนค่าเหล่านี้ลงไปในสมการที่ (3.28) จะได้

$$\begin{aligned} L_d &= \frac{648 \times 0.0931 \times \sin 90}{2\pi \times 50 \times 1} \times 2 \\ &= 0.384 \text{ H} \end{aligned}$$

ดังนั้น อินдукเตอร์ที่ต้องการให้เป็นรีแอกเตอร์มีค่าประมาณ 0.4 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

สำหรับการพันค่าอินดักเตอร์เพื่อนำไปใช้เป็น คีซี ฟิลเตอร์, สมูทติง รีแอกเตอร์ และ เอซี ฟิลเตอร์ จะใช้หลักการคล้ายกันกับวิธีการพันหม้อแปลงซึ่งสามารถแยกย่อยเป็นหัวข้อได้ดังนี้

8.5.1) คีซีฟิเตอร์ และสมูทติงรีแอกเตอร์

1) คำนวณค่า VA จากสูตร $S = 2\pi fLI^2 = VA$

2) หาขนาดของแกน A ตามสมการ

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad \text{ตารางนิ้ว} \quad (3.30)$$

3) หาจำนวนรอบของขดลวดจากสมการ

$$V_{rms} = 4.44fNB_{ac}A \quad \text{volt} \quad (3.31)$$

4) หาค่าระยะช่องว่างอากาศ l_g ต่ำสุดจาก

$$B_{dc} = \frac{NI\mu_0}{2l_g} \quad T, \text{Wb/m}^2 \quad (3.32)$$

5) นำค่าที่ได้จากข้อ 4 ไปเปรียบเทียบกับค่า l_g ที่ได้จากสมการ

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2l_g} \quad \text{H} \quad (3.33)$$

6) ถ้าค่า l_g ที่คำนวณได้จากข้อ 4 มีค่าน้อยกว่าค่า l_g ที่คำนวณได้จากข้อ 5 ค่าที่คำนวณได้ทั้งหมด สามารถที่จะนำไปใช้งานจริงได้ถ้าค่า l_g ที่ได้จากข้อ 4 มีค่ามากกว่าค่า l_g ที่ได้จากข้อ 5 ให้ทำการปรับแต่งค่าอินดักเตนซ์โดยการเพิ่ม A หรือ N

เมื่อ

N คือจำนวนรอบของขดลวด	รอบ
B_{dc} คือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง	เทสลา
B_{ac} คือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ	เทสลา
$B_{ac} + B_{dc} \approx 1 \text{ T}$	
μ_0 คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสุญญากาศ	เฮนรี่
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}$	

3.5.2) เอซีฟิลเตอร์

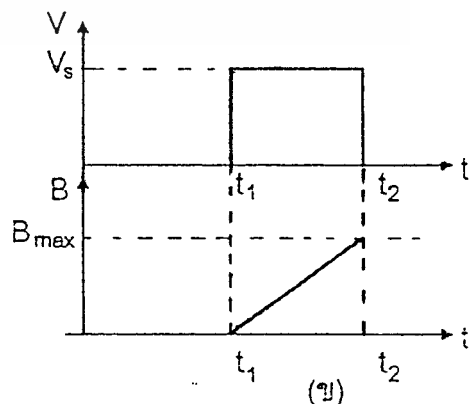
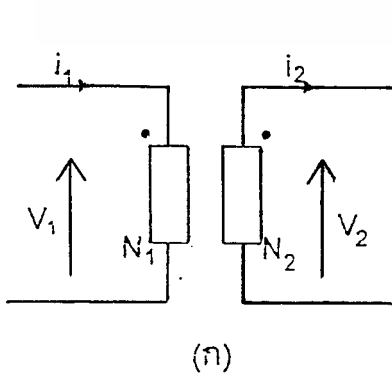
- 1) คำนวณหา VA
- 2) หาขนาดของแกนจากสูตร (3.30)
- 3) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดจากสมการ (3.31)
- 4) หาจำนวนรอบที่พันจริงซึ่งควรจะพันให้เต็มพื้นที่ว่าง แล้วทำการปรับระยะช่องว่างอากาศ (l_g) ตามสมการที่ (3.33)

3.6 การออกแบบและสร้างหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น

หม้อแปลงที่ใช้แปลงสัญญาณกระตุ้นจะเลือกใช้หม้อแปลง EI แกนเฟอร์ไรต์ เพราะแกนเฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก แกนเฟอร์ไรต์มีจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณ 3000 ถึง 4000 เกาส์ และเกิดสูญเสียในตัวมันค่าที่ความถี่สูง

การออกแบบควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนแม่เหล็กขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ สำหรับเรื่องการสูญเสียที่ความถี่ต่ำกว่า 100 kHz การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่ไม่ใหญ่นักเพราะฉะนั้น การสูญเสียจึงเหลืออยู่เฉพาะการสูญเสียที่เกิดจากฮิสเทอรีซิสของแกน

หม้อแปลงสัญญาณกระตุ้นที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงศักดาไฟฟ้าธรรมดา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 (ก) แผนผังของหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น

(ข) รูปสัญญาณของสัญญาณกระตุ้นและรูปสัญญาณของค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้ใช้หม้อแปลงแกนเฟอไรต์มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} B_{\max} &= 0.2 \text{ wb/m}^2 & V_2 &= 4 \text{ Volt} \\ A &= 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2 & \Delta t &= 20 \text{ ms} \\ V_1 &= 2 \text{ Volt} \end{aligned}$$

จำนวนรอบทางค้ำปฐมภูมิและทางค้ำทุติยภูมิของหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ(3.34)และ(3.35)

$$N_1 \geq \frac{V_1 \Delta t}{B_{\max} A} \quad \text{รอบ} \quad (3.34)$$

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} N_1 \quad \text{รอบ} \quad (3.35)$$

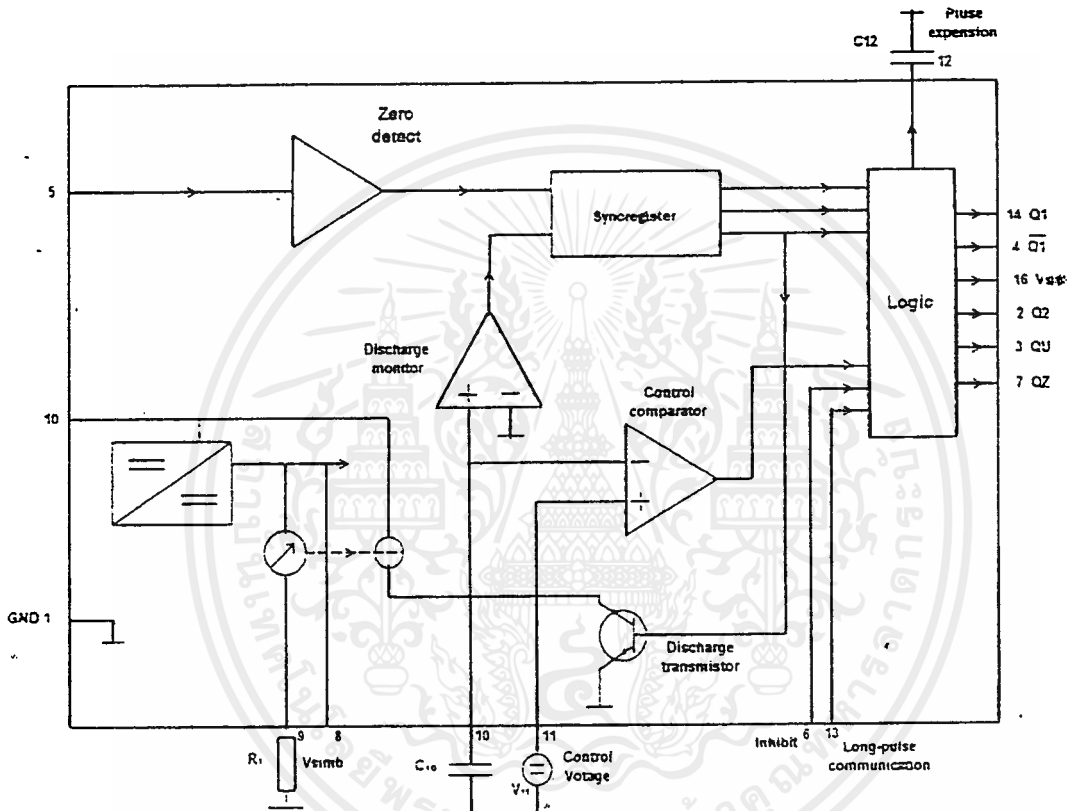
แทนค่า

$$N_1 = \frac{2 \times 20 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10 \times 10^{-4}} = 200 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = \frac{4}{2} \times 200 = 400 \text{ รอบ}$$

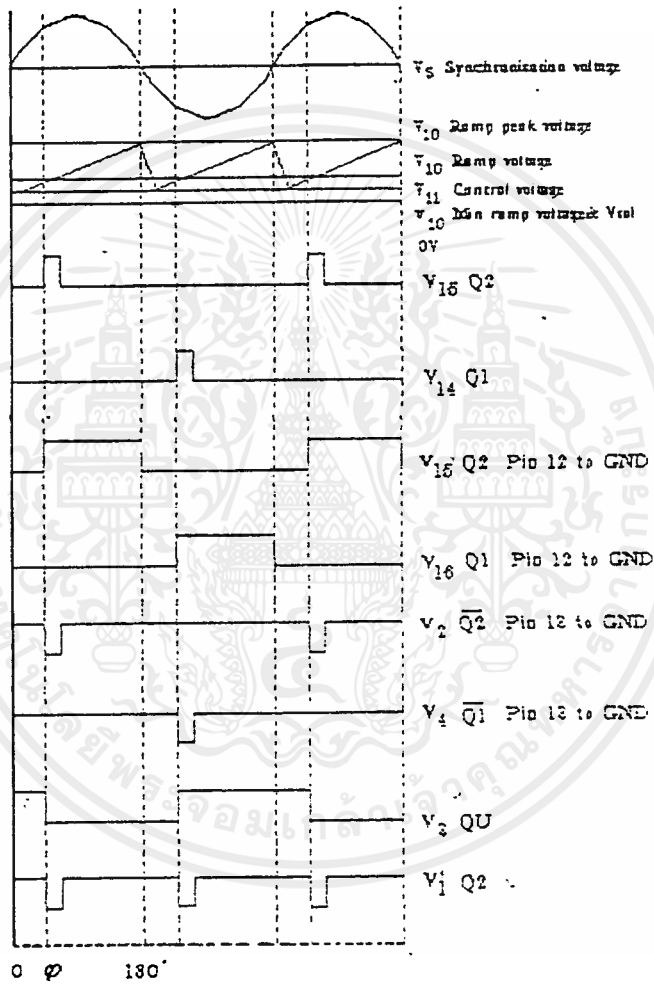
3.7 การสร้างสัญญาณกระตุ้น คอนเวอร์เตอร์ ด้วย IC TCA 785

ในส่วนของวงจรการสร้างสัญญาณกระตุ้นได้ใช้ IC TCA 785 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณทริกขาเกตของไทรสเตอร์ เพื่อควบคุมการปิด-เปิดวาล์วของคอนเวอร์เตอร์ โดยการทำงานของ IC TCA 785



รูปที่ 3.5 ลักษณะภายในของ IC TCA 785

เริ่มด้วยการนำสัญญาณซิงค์ จากแหล่งจ่ายที่ต้องการควบคุมด้วยคอนเวอร์เตอร์ มาจำกัดกระแสให้เหมาะสมต่อเข้าที่ขา 5 ของ ไอซี จากนั้นสัญญาณจะผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ไปยังส่วนของวงจรซิงโครไนซ์ไทรสเตอร์ ซึ่งควบคุมการสร้างสัญญาณแรมพ์ที่เกิดจากการเก็บประจุของ C_{10} ด้วยกระแสที่ ซึ่งกำหนดความชันของสัญญาณแรมพ์ ด้วย R_1 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ป้อนเข้าไปที่ขา 11 โดยอุปกรณ์ควบคุมอีกอันหนึ่ง และสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างขา 10 และขา 11 จะถูกนำไปสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อนำไปควบคุม ไทรสเตอร์ ที่ขา 15 และขา 14 โดยสัญญาณที่ขา 15 และขา 14 จะต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 3.6 สัญญาณที่ขาต่างๆของ IC TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

การทดลองของโครงการนี้ สามารถแบ่งการทดลองเป็น 4 การทดลอง
การทดลองที่ 1 การทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์และ 6 พัลส์ใน
โหมคเรคตีฟายเออร์

การทดลองที่ 2 การทดลองการส่งจ่ายพลังงาน

การทดลองที่ 3 การทดลองการวัด Harmonic

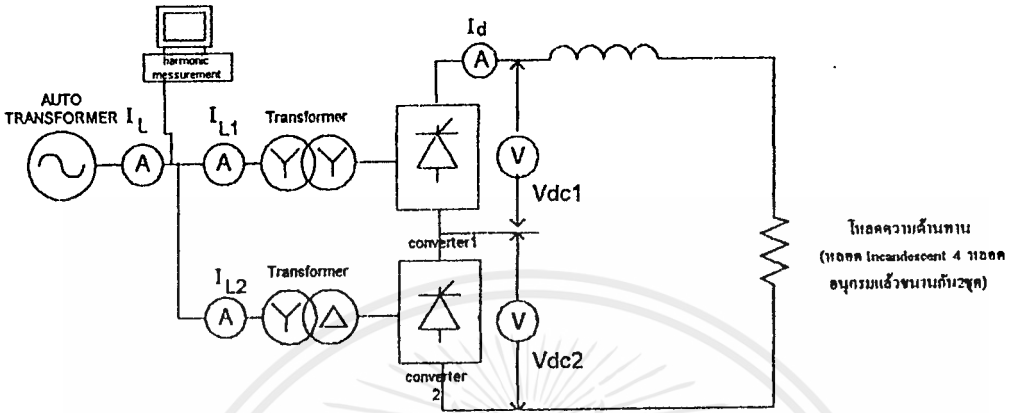
การทดลองที่ 4 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

4.1 การทดลองที่ 1 การทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ และ 6 พัลส์ ในโหมคเรคตีฟายเออร์

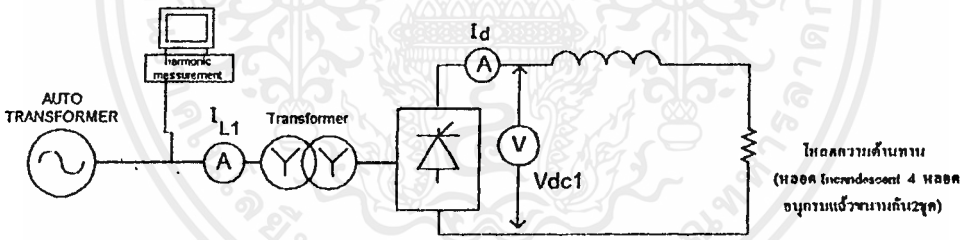
ในการทดลองนี้เป็นการทดลองการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ และ 6 พัลส์ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ และ 6 พัลส์

4.1.1) ลำดับขั้นการทดลองที่ 1

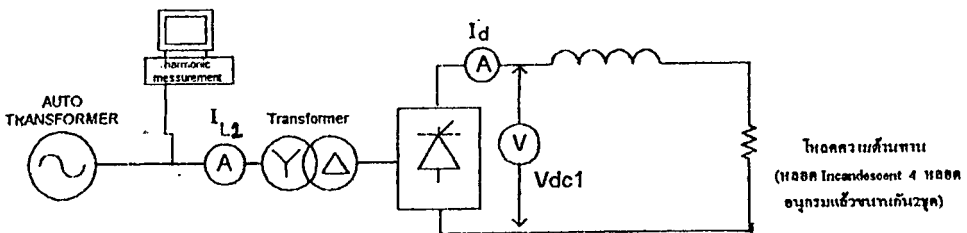
- 1) ต่อดวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.1
- 2) จ่ายไฟด้วยแรงดัน 110 โวลท์ (line-to-line) แล้วทำการปรับมุม α โดยเริ่มต้นที่มุม $\alpha = 0^\circ$ สังเกตและบันทึกผลการทดลอง
- 3) ทำการปรับมุม α เพิ่มขึ้นที่มุม $\alpha = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ สังเกตและบันทึกการทดลองตามลำดับมุม α



รูปที่ 4.1 วงจรการทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ในโหมดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 วงจรการทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ในโหมดแรงดันไฟฟ้า
(ต่อหม้อแปลงแบบสตาร์ - สตาร์)



รูปที่ 4.3 วงจรการทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ในโหมดแรงดันไฟฟ้า

(ต่อหม้อแปลงแบบสตาร์-เคลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2) ผลการทดลองที่ 1

มุมทริก	V_{LL}	I_L	I_{L1}	I_{L2}	W_{ac}	V_{dc}	V_{dc1}	V_{dc2}	V_{dc}	V_{dc}	I_d	W_{dc}	Ripple	eff
องศา	โวลต์	แอมป์	แอมป์	แอมป์	วัตต์	โวลต์	โวลต์	โวลต์	max	min	แอมป์	วัตต์	Factor	%
0	110	4.3	2	2.3	815	540	288	270	560	510	1.34	723.6	0.089	88.18
10	110	4.3	2	2.3	790	520	269	268	560	490	1.33	691.6	0.125	87.54
20	110	4.22	1.9	2.1	725	480	253	250	560	410	1.28	614.4	0.269	84.74
30	110	3.78	1.9	1.97	555	400	218	188	540	300	1.14	456	0.44	82.16
40	110	3.33	1.55	1.7	400	310	172	139	480	220	1	310	0.54	77.5
50	110	3.33	1.6	1.9	350	280	150	125	460	200	0.94	263.2	0.56	75.2
60	110	2.97	1.46	1.5	320	235	130	125	450	150	0.9	211.5	0.66	66.09
70	110	2.52	1.2	1.22	210	170	98	78	356	50	0.73	124.1	0.85	59.09
80	110	1.32	0.6	0.6	75	32	20	70	200	-100	0.37	11.84	1.5	15.78

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ในโหมดครกติไฟเออร์

ตัวอย่างการคำนวณและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองกระแสและรีปเปิลแฟคเตอร์

(Ripple Factor)

$$\text{ประสิทธิภาพในการกรองกระแส } (\eta) = \frac{\text{กำลังไฟฟ้ากระแสตรง}}{\text{กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ}} \times 100\%$$

เช่น ที่มุมทริก 0 องศา , $W_{dc} = 723.6 \text{ watt}$, $W_{ac} = 815 \text{ watt}$.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{723.6}{815} \times 100\% \\ &= 88.78 \% \end{aligned}$$

ที่มุมทริก 10 องศา , $W_{dc} = 691.6 \text{ watt}$, $W_{ac} = 790 \text{ watt}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{6916}{790} \times 100\%$$

$$= 87.54\%$$

$$\text{Ripple Factor (RF)} = \frac{V_{dc_{max}} - V_{dc_{min}}}{V_{dc_{max}}}$$

ที่มุมทริก 0 องศา , $V_{dc_{max}} = 560 \text{ volt.}$, $V_{dc_{min}} = 510 \text{ volt.}$

$$RF = \frac{560 - 510}{560} = 0.089$$

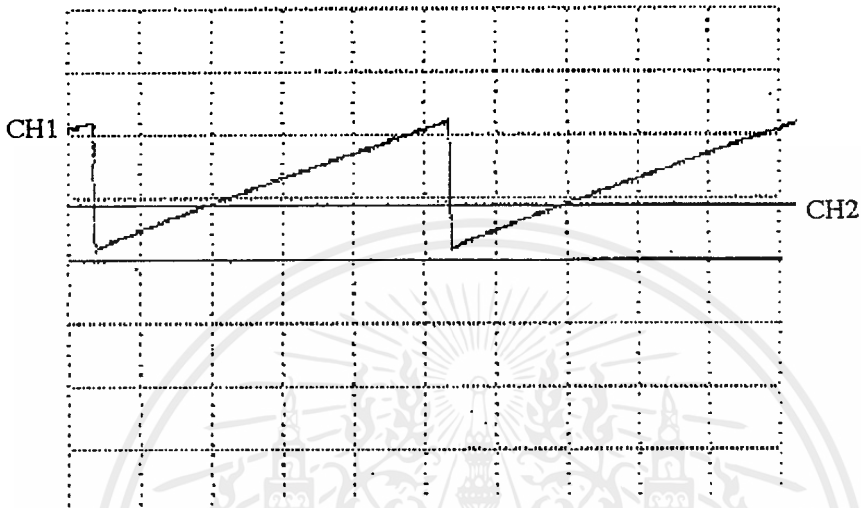
ที่มุมทริก 10 องศา , $V_{dc_{max}} = 560 \text{ volt.}$, $V_{dc_{min}} = 490 \text{ volt.}$

$$RF = \frac{560 - 490}{560} = 0.125$$

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองโดยให้แรงดันกระแสสลับทางด้านอินพุตมีค่าคงที่ที่ 110 โวลต์และทำการควบคุมชุดเรกติฟายคอนเวอร์เตอร์ โดยการปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุตจะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมจุดชนวนเป็น 0 องศา และที่มุมจุดชนวนเดียวกันนี้จะทำให้เกิดค่าประสิทธิภาพในการเรียงกระแสสูงสุดโดยที่ค่ารีปเปลแฟคเตอร์มีค่าต่ำสุด เมื่อทำการปรับขนาดของมุมจุดชนวนให้มีค่ามากขึ้นจะทำให้แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต มีค่าต่ำลง ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพในการเรียงกระแสมีค่าต่ำลงด้วยแต่ค่ารีปเปลแฟคเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมจุดชนวนที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองมีจุดหนึ่งที่ควรพิจารณาคือเมื่อมุมจุดชนวนมีค่า 0 องศา และ 10 องศา ค่ากระแสมีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดที่มีสเกลไม่ละเอียดเท่าที่ควร

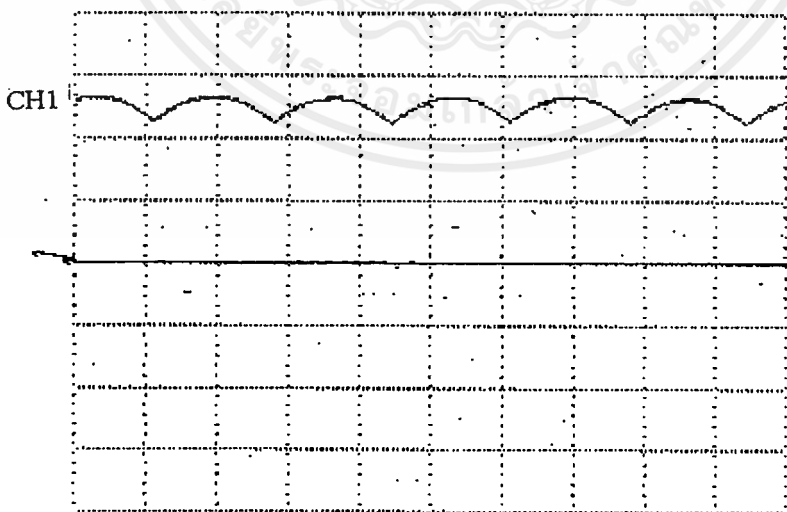
ผลการทดลองที่วัดได้จาก Oscilloscope และเครื่องวัดฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 4.4 สัญญาณ แรมป์ เทียบกับแรงดันคิซี ความคุม

CH1 สายโพรบคูณ 10 ; 0.5 V/DIV ; 2ms/DIV

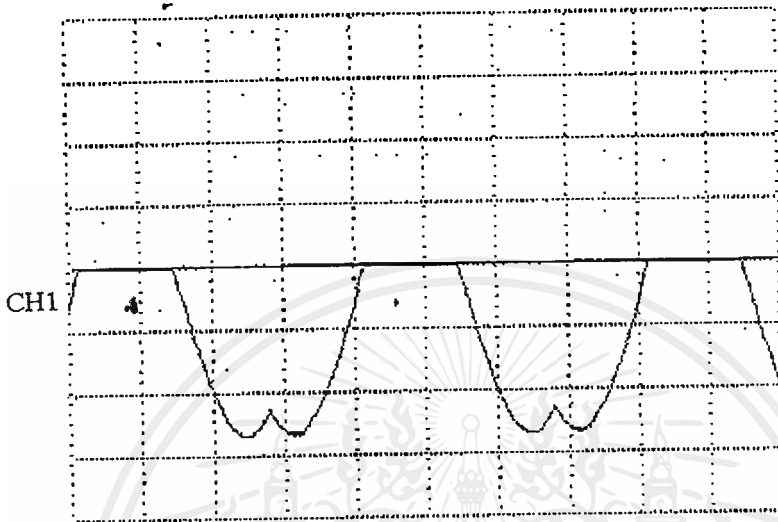
CH2 สายโพรบคูณ 1 ; 5V/DIV ; 2ms/DIV



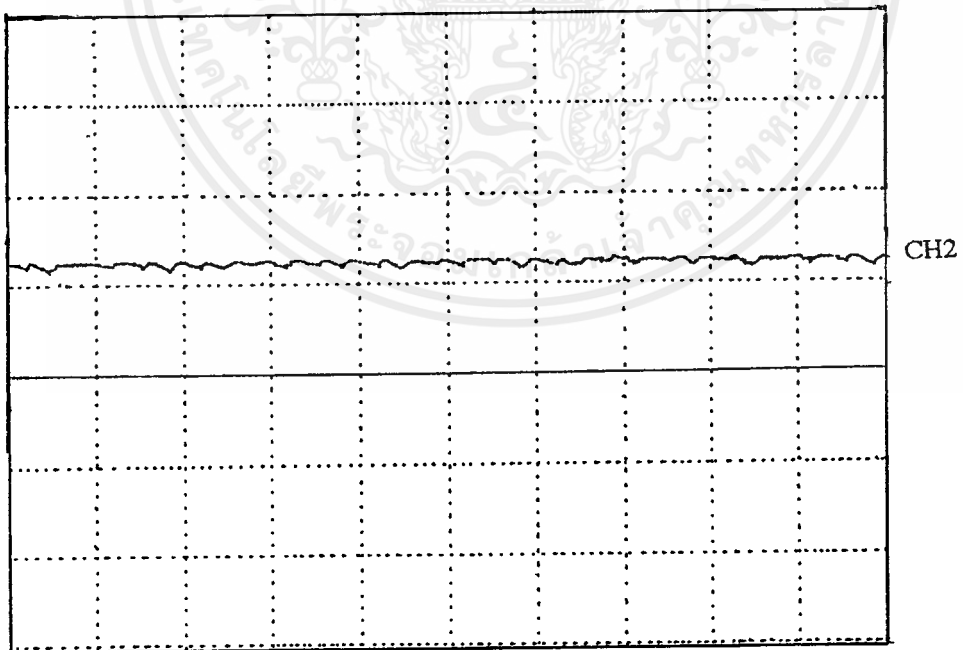
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันคิซี เอาท์พุทคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ มุมทริก 0 องศา

CH1 สายโพรบคูณ 100 ; V/DIV ; 2ms/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

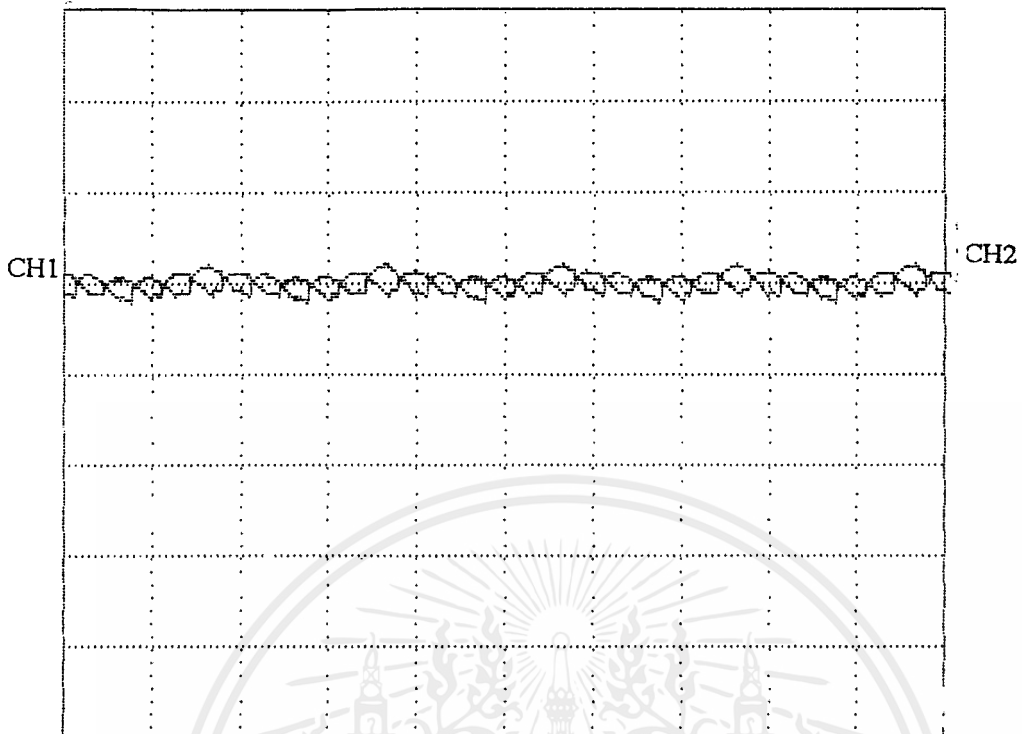


รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันคร่อม SCR คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ มุมทริก 0 องศา
CH1 สายโพรบคูณ 100 ; 1V/DIV ; 2ms/DIV



รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันอินพุตของชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ที่มุมทริก 0 องศา
CH2 สายโพรบคูณ 100 ; 2 SV/DIV ; 5 ms/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

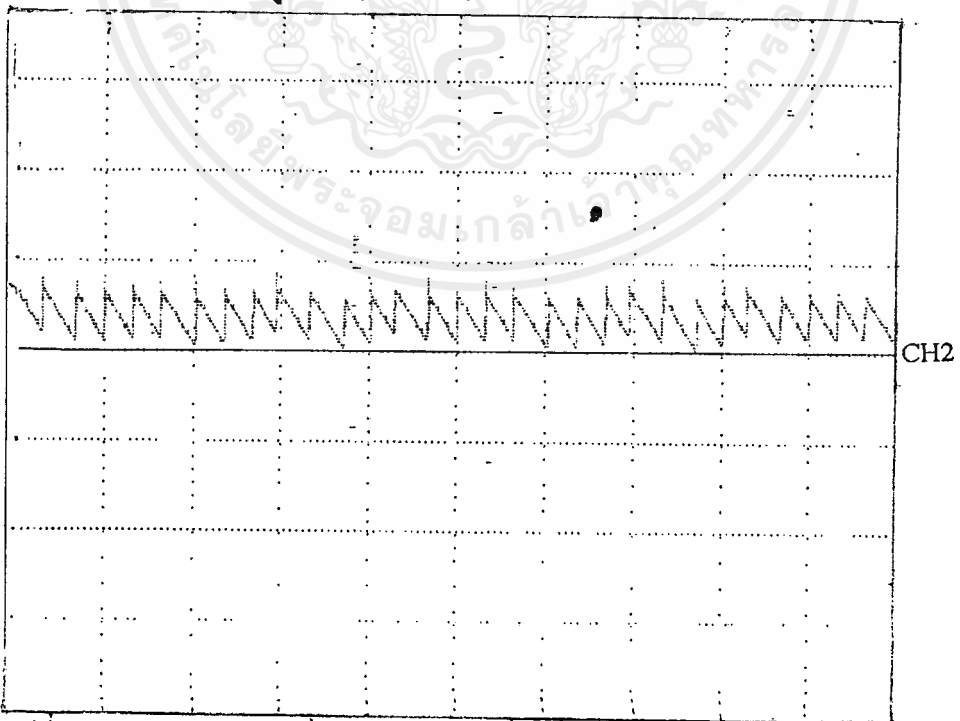


รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของชุดคอนเวอร์เตอร์ชุด 1 เทียบกับคอนเวอร์เตอร์ชุด 2

(มุมทริก 0 องศา)

CH1 สายโพรบคูณ 100 ; 5V/DIV ; 5ms/DIV

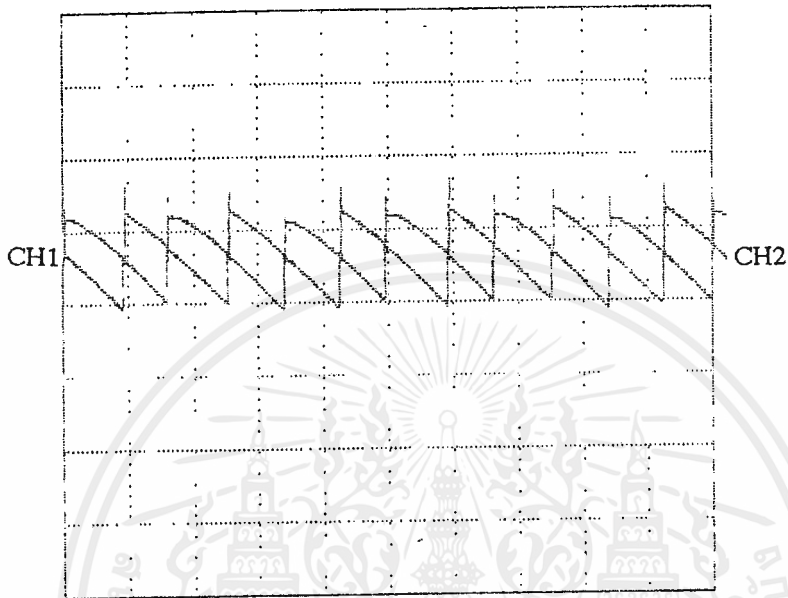
CH2 สายโพรบคูณ 100 ; 5V/DIV ; 5ms/DIV



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ มุมทริก 60 องศา

สายโพรบคูณ 100 ; 5V/DIV ; 2 ms/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

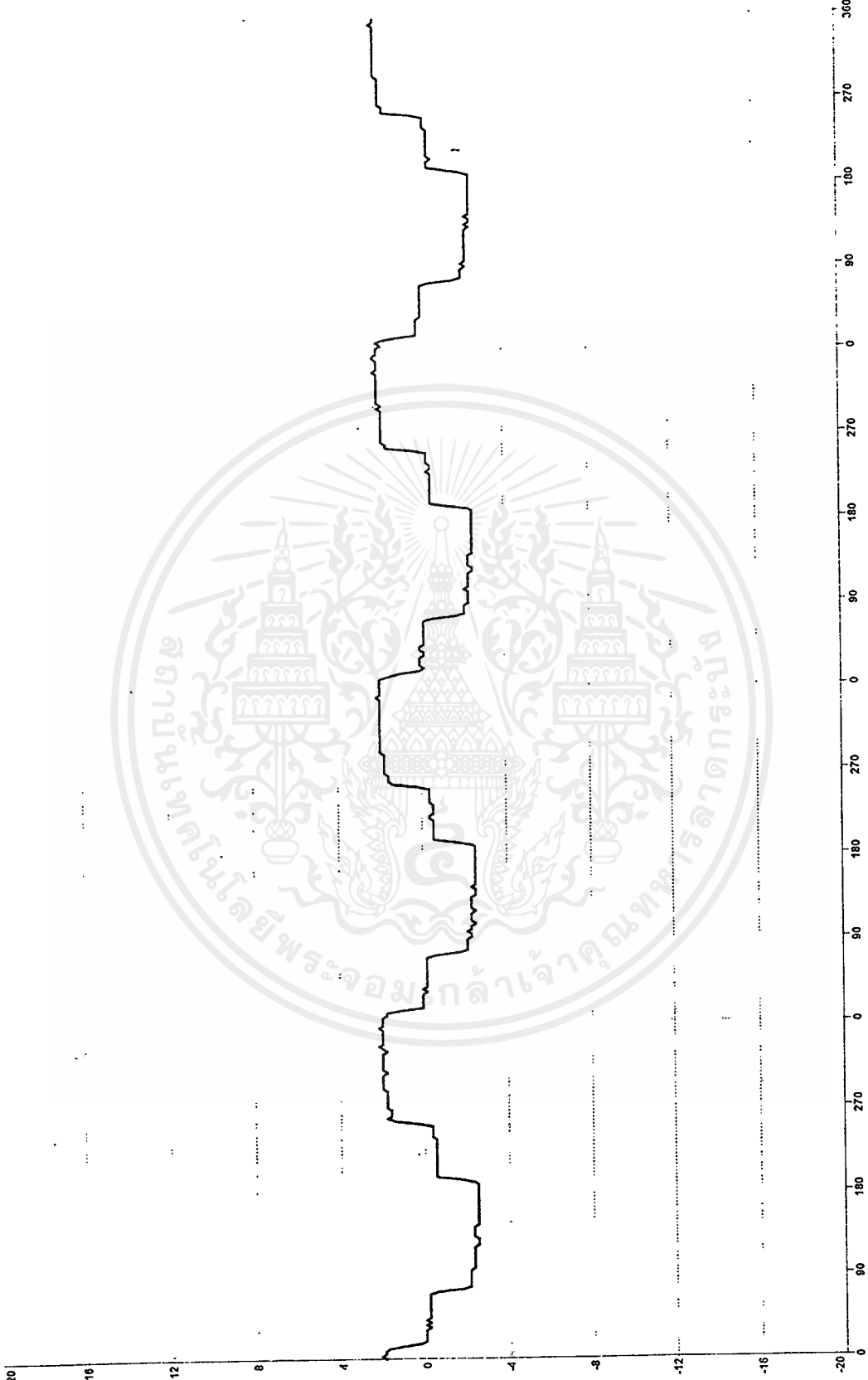


รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดัน เอ้าท์พุทของชุดคอนเวอร์เตอร์ชุด 1 และ ชุด 2 (มุมทริก 60 องศา)

CH1 สายโพรบคูณ 100 ; 2V/DIV ; 2ms/DIV

CH2 สายโพรบคูณ 100 ; 2V/DIV ; 2ms/DIV

18/02/1988
Current L1
Corresponding RMS value 249 A
Fundamental Frequency 49.90 Hz
THD 25.30 %



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแส ด้านส่งกำลังไฟฟ้า (L1) 6 พัลส์ ตตตาร/ตตาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

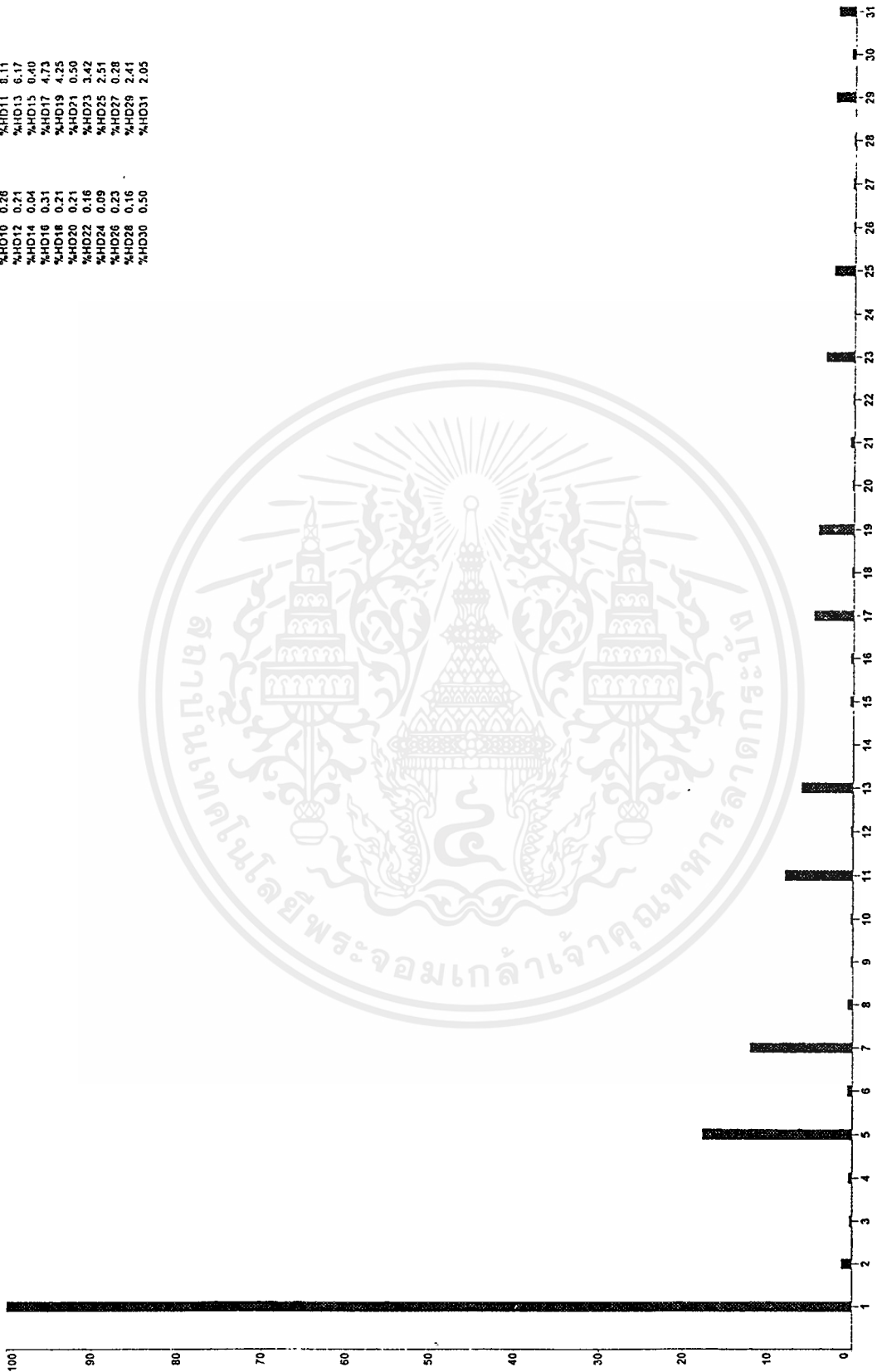
71:4R:51

Harmonic Spectrum

18/02/1988

Current L1
Corresponding RMS value 249 A
Fundamental frequency 49.93 Hz
THD 25.30 %

%HD1	1.29	0.31
%HD2	0.90	1.78
%HD3	12.13	12.13
%HD4	0.64	0.71
%HD5	0.26	0.21
%HD6	0.21	0.11
%HD7	0.21	0.17
%HD8	0.04	0.40
%HD9	0.31	4.73
%HD10	0.21	4.25
%HD11	0.16	0.50
%HD12	0.09	3.42
%HD13	0.23	2.51
%HD14	0.16	0.28
%HD15	0.50	2.41
%HD16		2.05



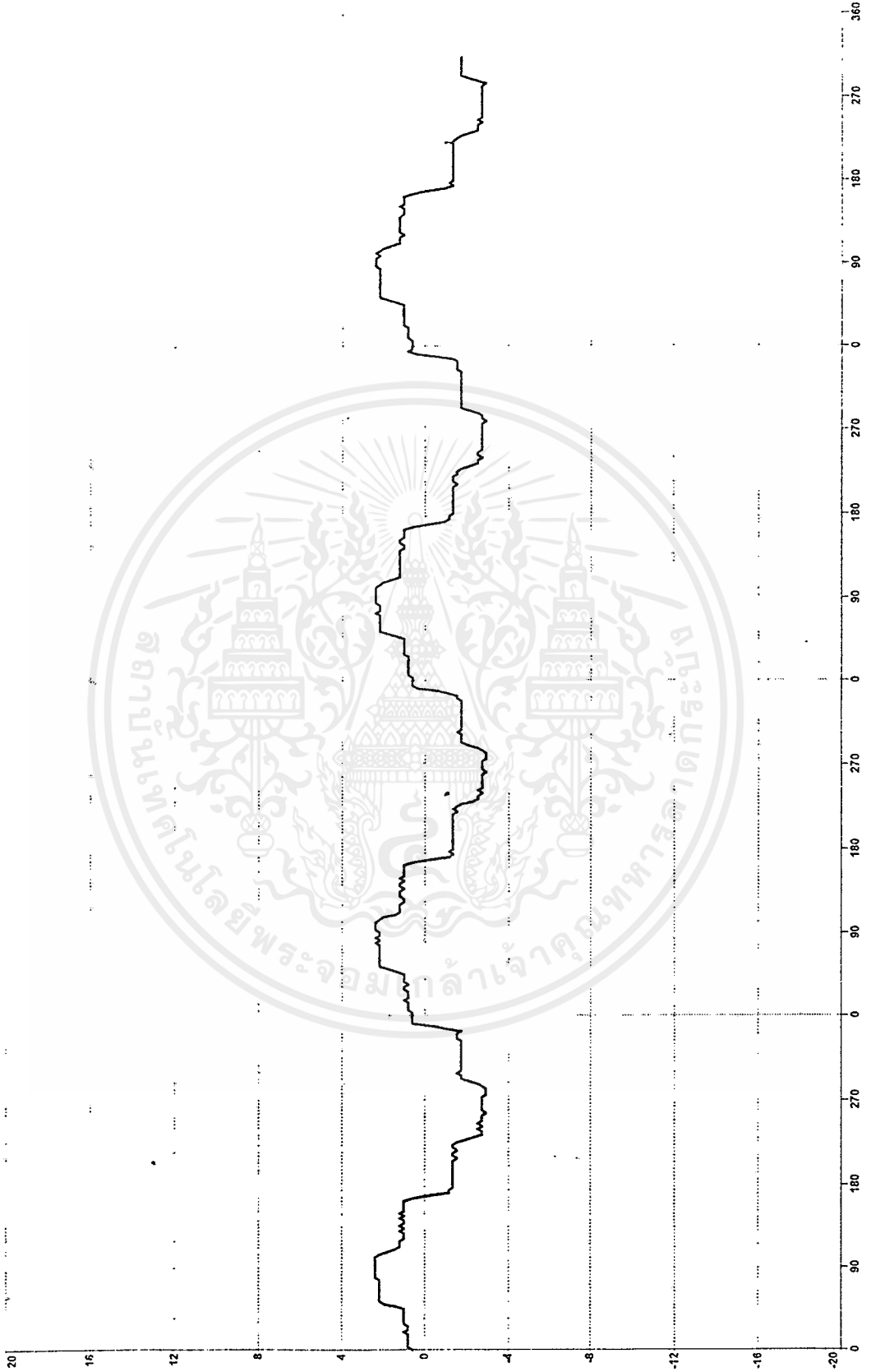
รูปที่ 4.12 Spectrum รูปคลื่นของกระแสแกนส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

77-14 00

Harmonic Waveform
Capture Date 19/04/98
Capture Time 22:38:54

180021990
Current L1
Corresponding RMS value 249 A
Fundamental Frequency 49.98 Hz
THD 24 %



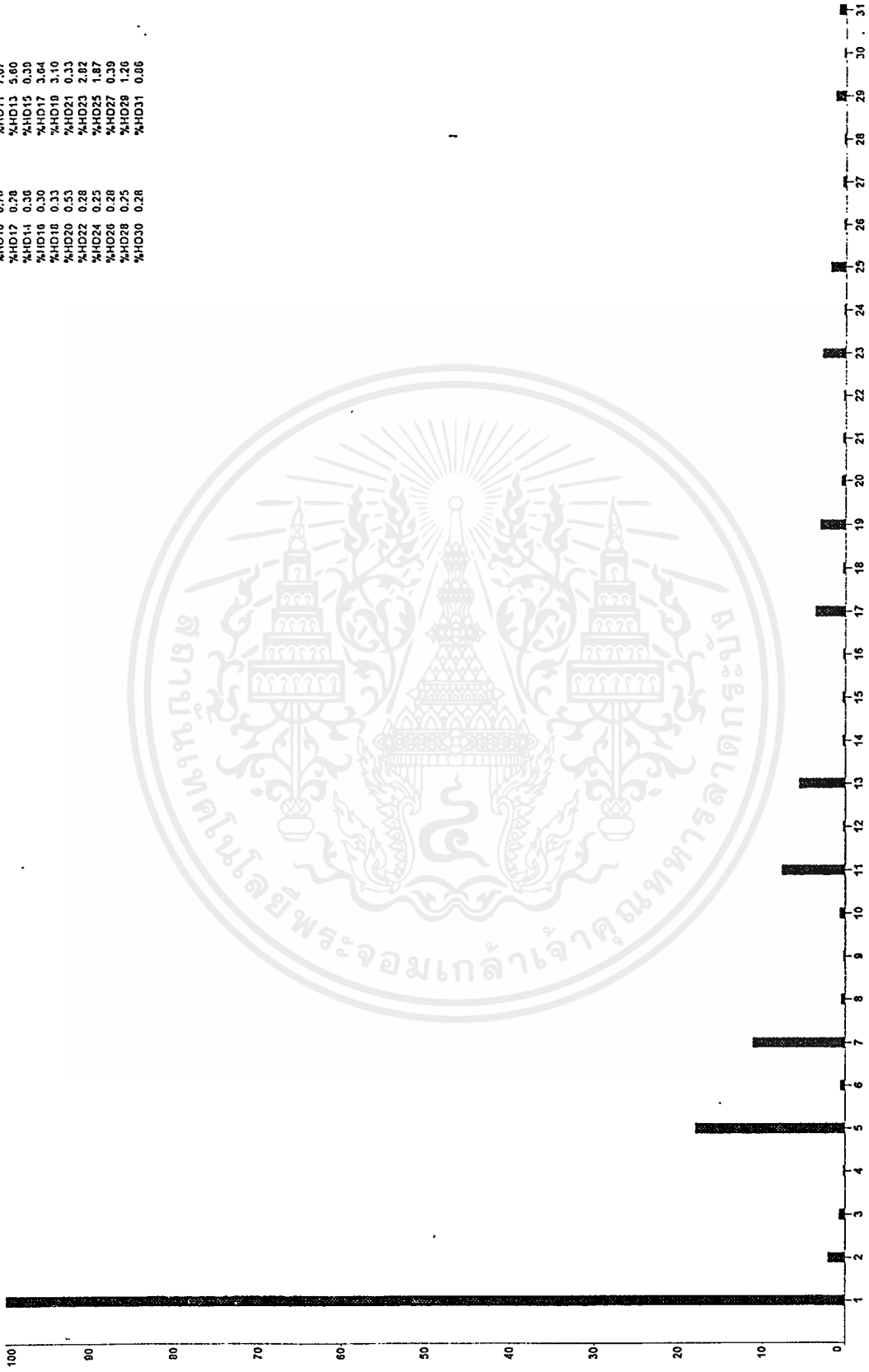
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า (I_{L2}) 6 พัลส์ ต่าคาร/เขตค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%HD2	7.16
%HD3	0.72
%HD4	0.25
%HD5	10.03
%HD6	0.58
%HD7	11.73
%HD8	0.53
%HD9	0.72
%HD10	0.70
%HD11	7.67
%HD12	0.28
%HD13	5.60
%HD14	0.30
%HD15	0.30
%HD16	0.30
%HD17	3.64
%HD18	3.10
%HD19	0.33
%HD20	0.53
%HD21	0.33
%HD22	2.82
%HD23	2.82
%HD24	0.25
%HD25	1.87
%HD26	0.28
%HD27	0.39
%HD28	0.25
%HD29	1.26
%HD30	0.28
%HD31	0.06

Harmonic Spectrum

18/02/1998 Current L1
 -Corresponding-RMS-value 249.4 A
 Fundamental Frequency 50.03 Hz
 THD 24 %



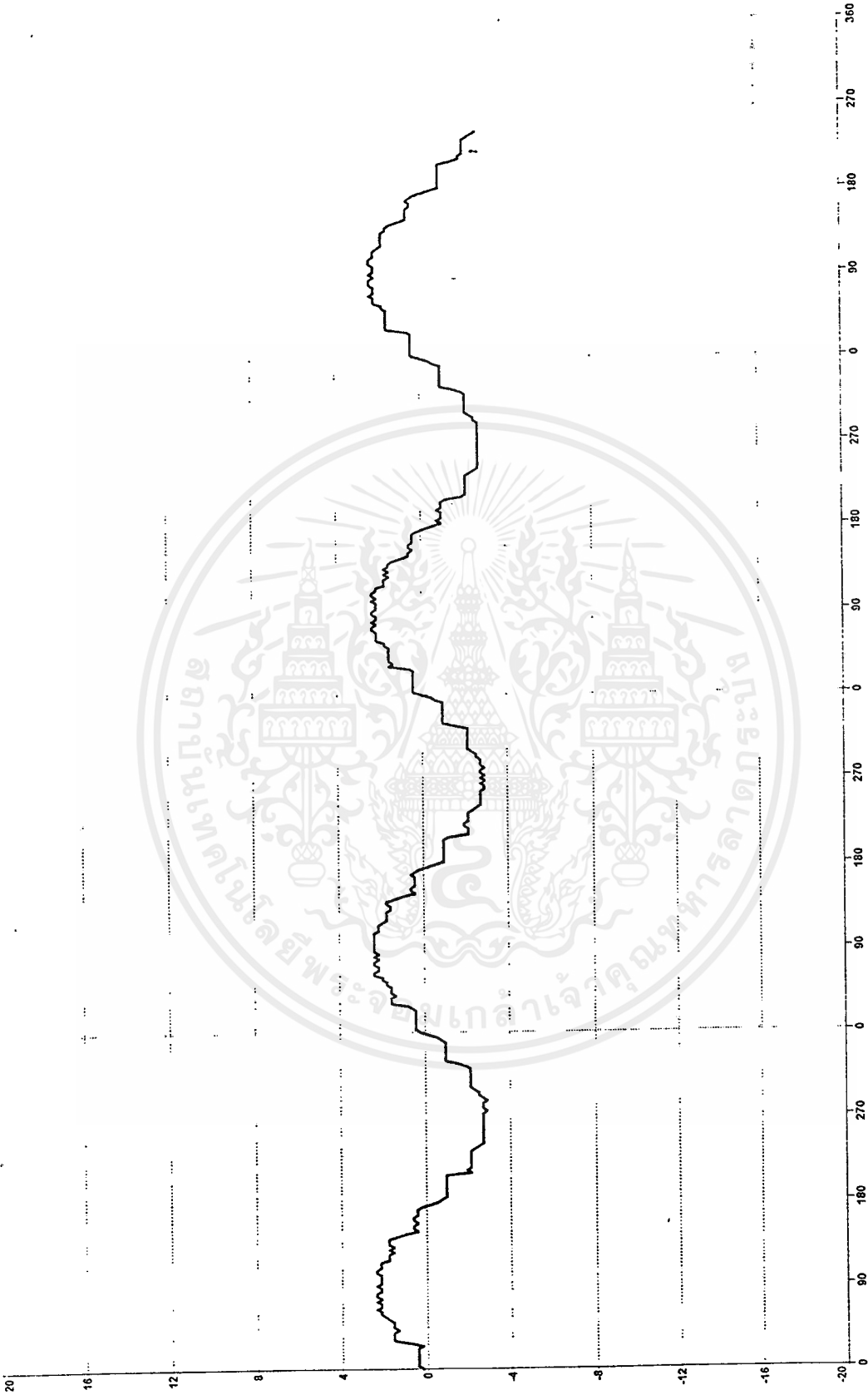
รูปที่ 4.14 Spectrum รูปคลื่นของกระแสต้นส่งกำลังไฟฟ้า (I_{L2})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70 77 74

Harmonic Waveform
Capture Date 19/04/98
Capture Time 20:54:21

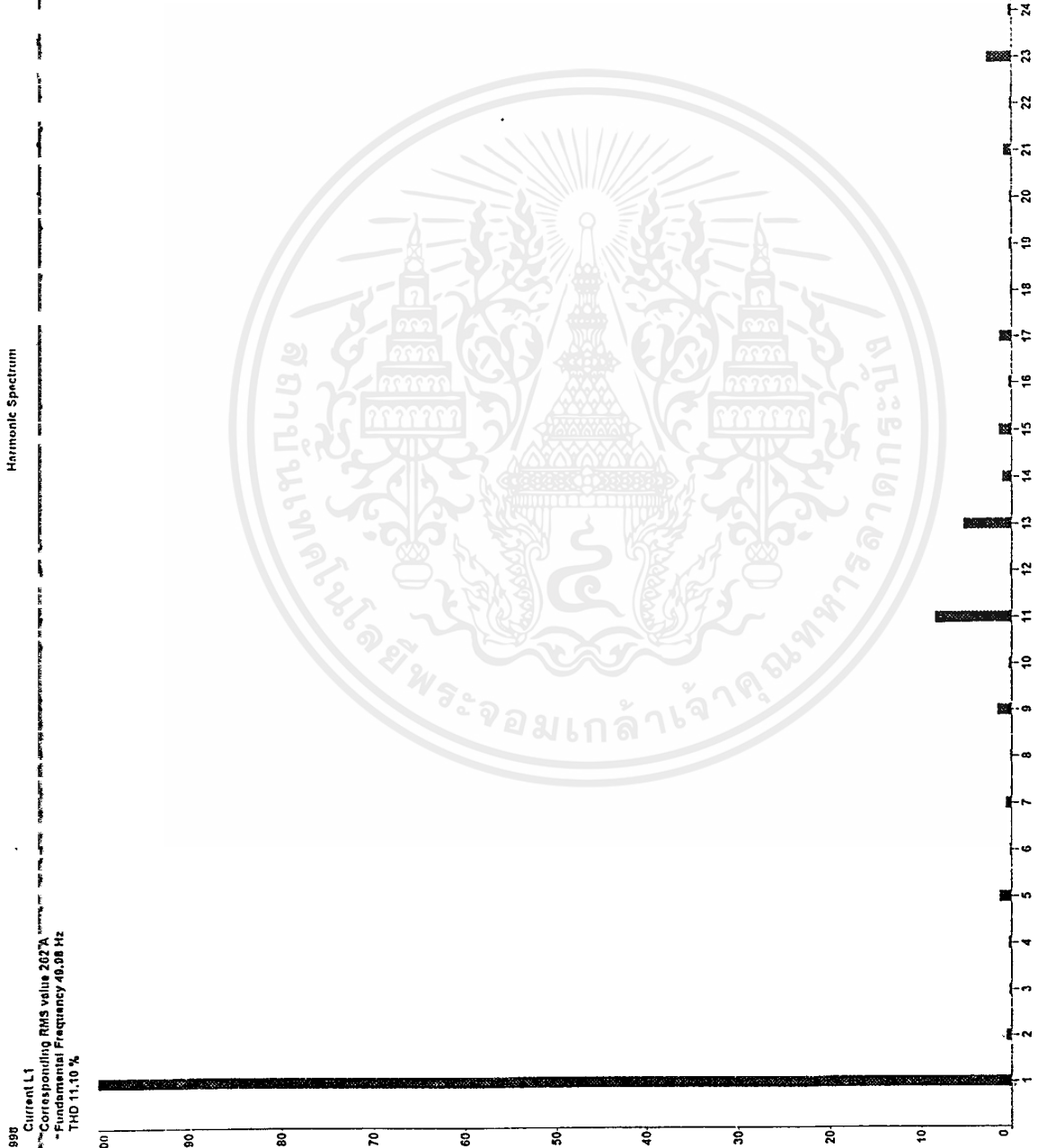
18/02/1998
Current L1
Corresponding RMS value 281 A
Fundamental Frequency 50 Hz
THD 11.10 %



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสค่านำส่งกำลังไฟฟ้า (L₁) 12 พัดซ์

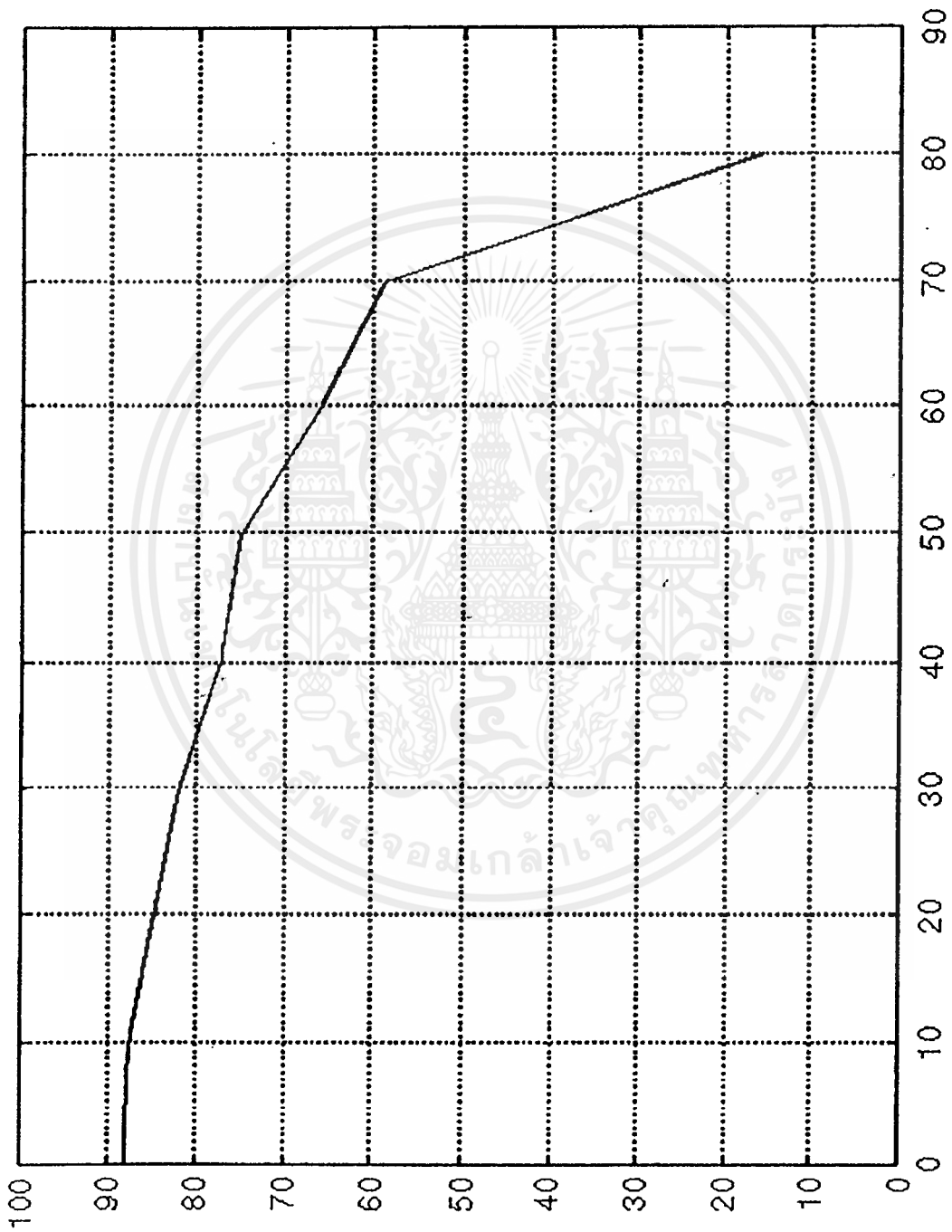
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่มีวาระคดีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%HD3	0.24
%HD7	0.57
%HD11	1.33
%HD15	1.50
%HD19	0.27
%HD23	0.27
%HD27	1.19
%HD29	0.87
%HD31	0.22
%HD33	0.32
%HD35	0.32
%HD37	0.32
%HD39	0.32
%HD41	0.32
%HD43	0.32
%HD45	0.32
%HD47	0.32
%HD49	0.32
%HD51	0.32
%HD53	0.32
%HD55	0.32
%HD57	0.32
%HD59	0.32
%HD61	0.32
%HD63	0.32
%HD65	0.32
%HD67	0.32
%HD69	0.32
%HD71	0.32
%HD73	0.32
%HD75	0.32
%HD77	0.32
%HD79	0.32
%HD81	0.32
%HD83	0.32
%HD85	0.32
%HD87	0.32
%HD89	0.32
%HD91	0.32
%HD93	0.32
%HD95	0.32
%HD97	0.32
%HD99	0.32

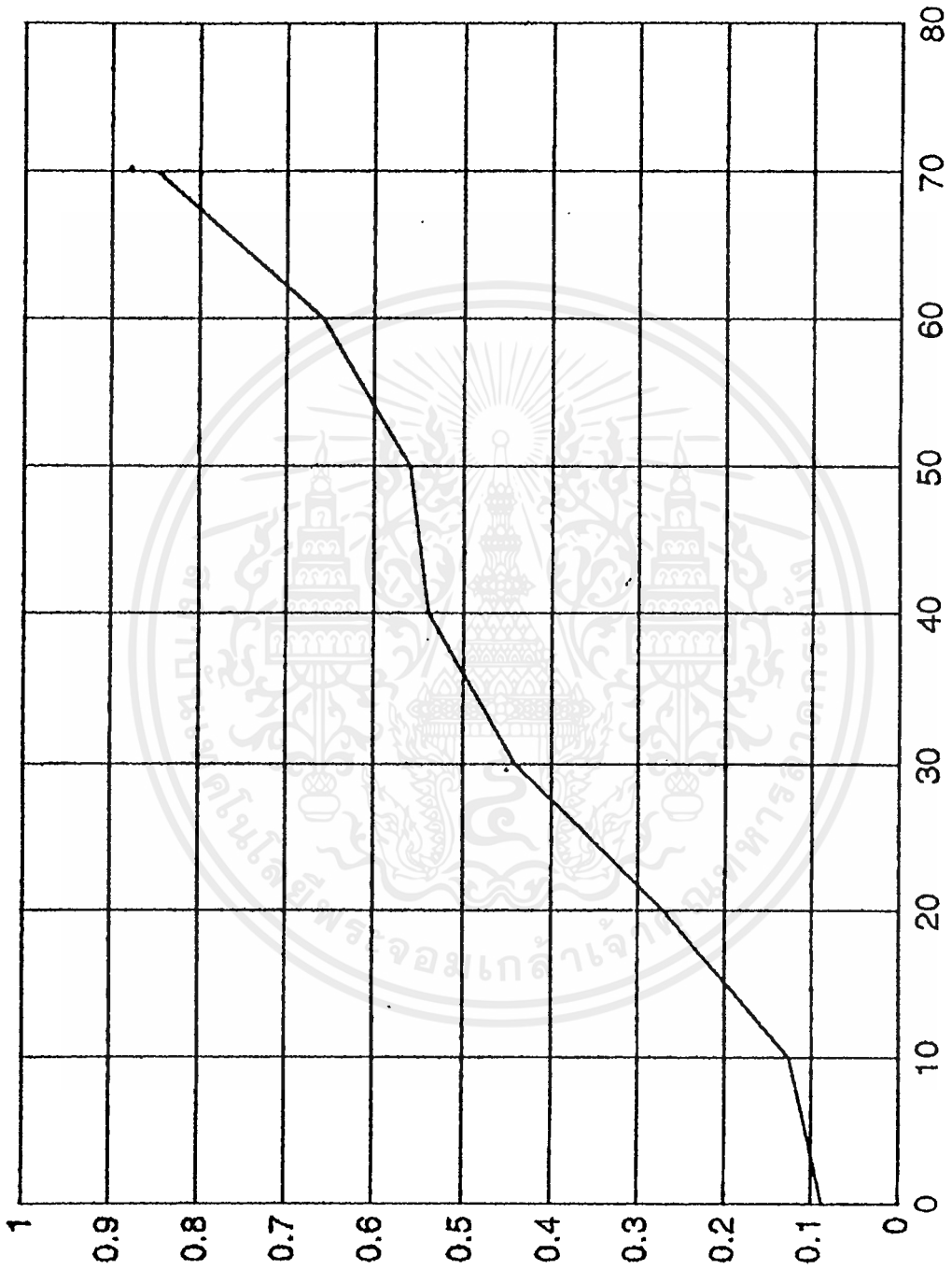


รูปที่ 4.16 Spectrum รูปคลื่นของกระแสด้านส่งกำลังไฟฟ้า (I_L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

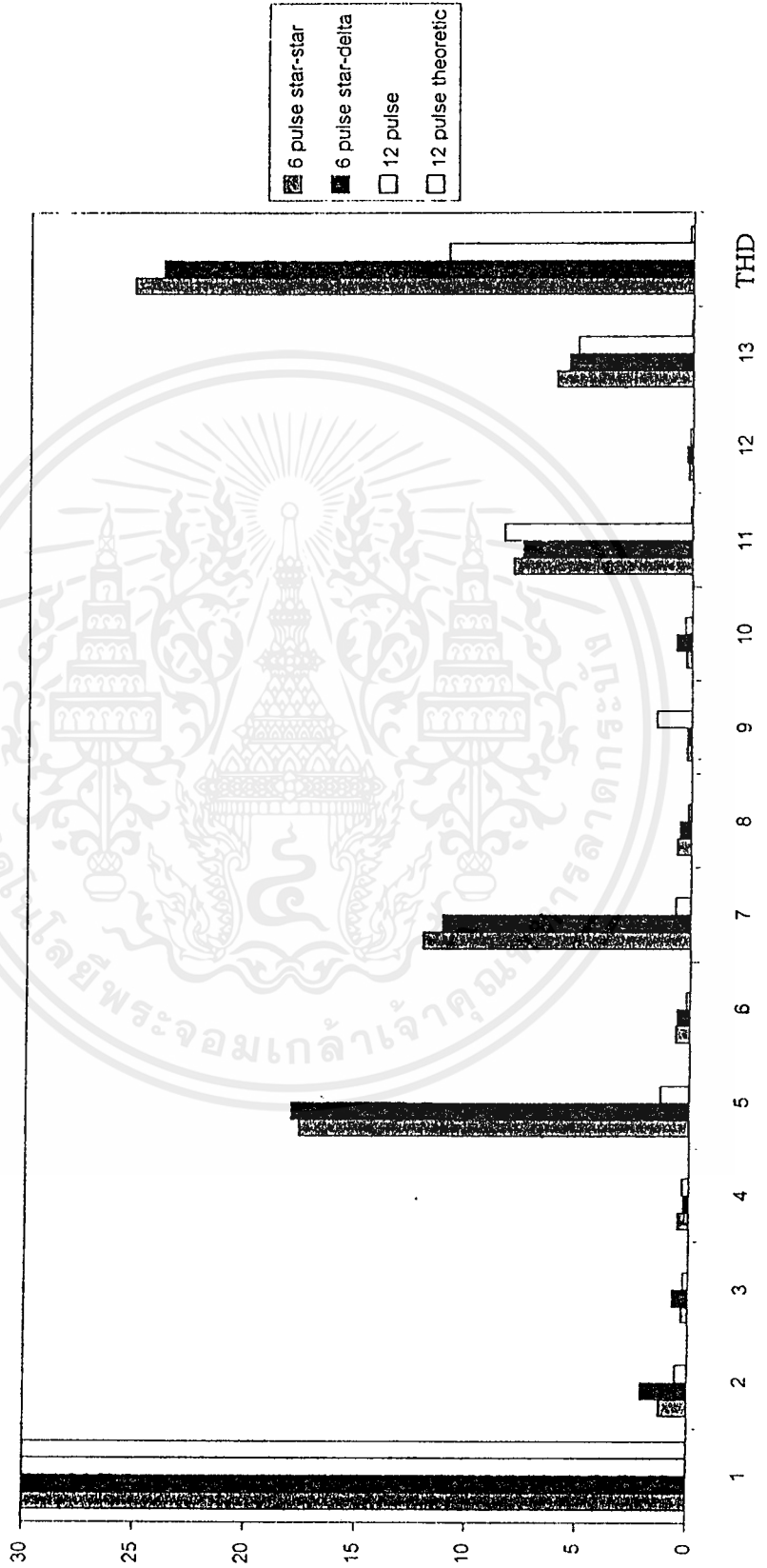


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกรองกระแสกับจำนวนของคอนกรีต 12 ทิศ มีที่ทำงานในโหมดเรดดิฟาย



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปิดเฟดเตอร์กับจำนวนของคอนเวอร์เตอร์ 12 ชั่วโมง เมื่อทำงานในโหมดเรกติไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสต้นส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเรกติฟาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใ้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองที่ 2 การทดลองการส่งจ่ายพลังงาน

การทดลองโดยนำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง มาเชื่อมต่อสับสแตชันไฟฟ้า 2 สับสแตชันดังรูป เพื่อส่งจ่ายกำลังงานระหว่างสับสแตชัน ทั้งสอง ในการส่งจ่ายพลังงานที่ความถี่เดียวกัน (50 เฮิทซ์) โดยสับสแตชันที่ 1 ใช้ ออโต้ ทรานฟอเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 15 แอมป์ 50 เฮิทซ์ และสับสแตชันที่ 2 ใช้ ออโต้ ทรานฟอเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 10 แอมป์ 50 เฮิทซ์ ในการส่งจ่ายพลังงานที่ความถี่ต่างกัน สับสแตชันที่ 1 ใช้ ออโต้ทรานฟอเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 15 แอมป์ 50 เฮิทซ์ สับสแตชันที่ 2 ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัส โดยจ่ายไฟฟ้า 100 โวลต์ และ 110 โวลต์ ความถี่ 45 เฮิทซ์ 1350 รอบต่อนาที และเนื่องจากในการทดลอง เครื่องกำเนิดไม่มีควมคุมให้จ่ายแรงดันได้คงที่ จึงต้องมีคนคอยปรับกระแสฟิลต์ เพื่อให้แรงดันและความเร็วรอบคงที่

ในการทดลองของโครงการนี้สามารถแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลองโดยมีเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

- การทดลองที่ 2.1 เมื่อแรงดันเท่ากันและความถี่เท่ากัน
- การทดลองที่ 2.2 เมื่อแรงดันเท่ากันแต่ความถี่ต่างกัน
- การทดลองที่ 2.3 เมื่อแรงดันต่างกันแต่ความถี่เท่ากัน

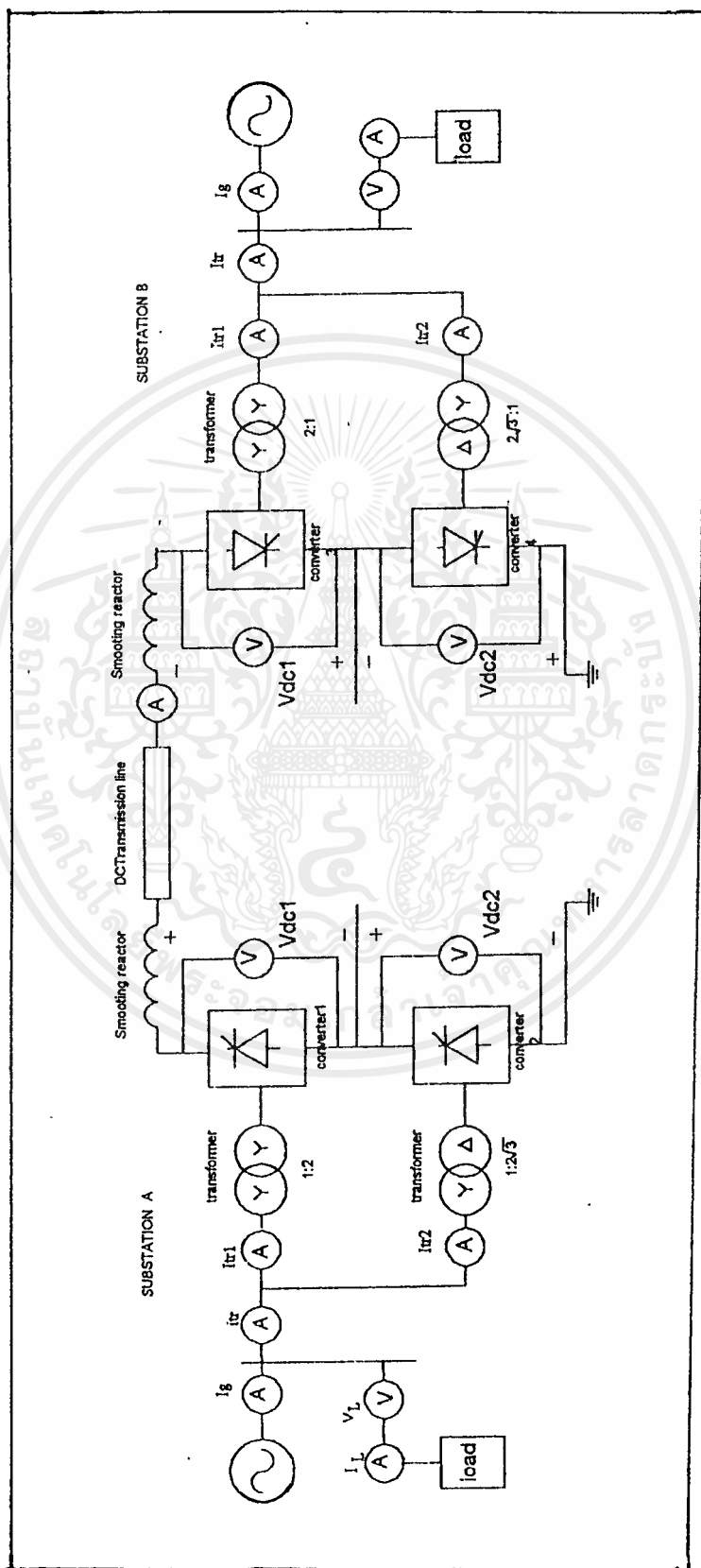
4.2.1) การทดลองที่ 2.1 การช่วยจ่ายพลังงานเมื่อแรงดันเท่ากันและความถี่เท่ากัน

4.2.1.1) ลำดับขั้นการทดลองที่ 2.1

- 1) สมมติให้ ออโต้ทรานฟอเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 15 แอมป์ เป็น สับสแตชัน A โดยจ่ายไฟ $100 V_{L-L}$
- 2) สมมติให้ ออโต้ทรานฟอเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 10 แอมป์ เป็น สับสแตชัน B โดยจ่ายไฟ $100 V_{L-L}$
- 3) จ่ายโหลด ทางด้าน สับสแตชัน A โดยจ่ายให้ได้กระแส 2 แอมแปร์
- 4) จ่ายโหลดทางด้าน สับสแตชัน B โดยจ่ายให้ได้กระแส 2 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 5) จ่ายโหลดทางด้าน สับสแตชัน B เพิ่มเป็น 4 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล

- 6) ทำการปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดเรกติฟายแล้วปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ สังเกตและบันทึกผล
- 7) ลดโหลดทางด้าน สับสแตชัน B ให้เหลือ 2 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 8) ปรับมุมของชุดคอนเวอร์เตอร์ ทั้งสองชุดให้หยุดทำงาน
- 9) จ่ายโหลดทางด้าน สับสแตชัน A โดยเพิ่มเป็น 4 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 10) ปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมด เรกติฟายแล้วปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมด อินเวอร์เตอร์ สังเกตและบันทึกผล
- 11) ลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A ให้เหลือ 2 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 12) ทำการปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ ทั้งสองให้หยุดทำงาน





รูปที่ 4.20 วงจรการทดลองการส่งจ่ายพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 2.1

ตารางผลการทดลองจากลำดับขั้นการทดลองที่ 3 และ 4

	Substation A	Substation B
Ig	2.23	2.24
Itr	0.23	0.2
Itr1	0.13	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	2	2
Vac	100	100
Wac	325	330
PF	0.84	0.85

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อจ่าย โหลดแก่ตัวทดลอง A และ B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.3 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลัง ขณะไม่ส่งผ่านกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองจากลำดับขั้นที่ 5

	Substation A	Substation B
Ig	2.23	4.24
Itr	0.23	0.2
Itr1	0.13	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	2	4
Vac	100	100
Wac	325	660
PF	0.84	0.9

ตารางที่ 4.4 ค่าเมื่อเพิ่มโหลดให้กับสับสแตชัน B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.5 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองตามลำดับขั้นที่ 6

	Substation A	Substation B
I_g	2.45	3.86
I_{tr}	1.2	0.9
I_{tr1}	0.8	0.45
I_{tr2}	0.4	0.45
I_L	2	4
V_{ac}	100	100
W_{ac}	380	615
PF	0.89	0.92

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสและแรงดันเมื่อเพิ่มโหลดให้กับสับตชัน B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
V_{dc}	390	365
V_{dc1}	205	180
V_{dc2}	185	185
I_{dc}	0.21	0.21

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อมีการเพิ่มโหลดด้าน สับตชัน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการลำดับชั้นการทดลองที่ 6

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสเตรชั่น B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.2)(0.89) \\ &= 184.98 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสเตรชั่น B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.9)(0.92) \\ &= 143.41 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{143.41}{184.98} \\ &= 0.7752 \text{ หรือ } 77.52\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{390 - 365}{365} \\ &= 0.0684 \text{ หรือ } 6.84\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง ตามลำดับขั้นที่ 7

	Substation A	Substation B
Ig	2.4	2.04
Itr	1	0.74
Itr1	0.6	0.37
Itr2	0.4	0.37
I_L	2	2
Vac	100	100
Wac	360	300
PF	0.866	0.85

ตารางที่ 4.8 ค่า เมื่อดัดโหลดทางค้ำ กับสัดชั้น B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	393	375
Vdc1	205	185
Vdc2	188	190
Idc	0.16	0.16

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงค้ำ และกระแสในสายส่งกำลังเมื่อทำการลดโหลด ทางค้ำ
กับสัดชั้น B

จากตารางลำดับชั้นการทดลองที่ 7

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.0)(0.866) \\ &= 150 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.74)(0.85) \\ &= 109 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{109}{150} \\ &= 0.7266 \text{ หรือ } 72.66\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{393 - 375}{375} \\ &= 0.048 \text{ หรือ } 4.8\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 9

	Substation A	Substation B
Ig	4.2	2.23
Itr	0.2	0.2
Itr1	0.1	0.1
Itr2	0.1	0.1
I _L	4	2
Vac	100	100
Wac	690	335
PF	0.94	0.86

ตารางที่ 4.10 ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะยังไม่ส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันและกระแสในสายส่งกำลังขณะไม่ส่งผ่านกำลัง

ตารางผลการทดลอง ตามลำดับขั้นที่ 10

	Substation A	Substation B
I _g	3.55	2.8
I _{tr}	1	0.9
I _{tr1}	0.65	0.4
I _{tr2}	0.35	0.5
I _L	4	2
V _{ac}	100	100
W _{ac}	570	420
PF	0.92	0.87

ตารางที่ 4.12 ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
V _{dc}	378	403
V _{dc1}	190	205
V _{dc2}	188	198
I _{dc}	0.19	0.19

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันและกระแสในสายส่งกำลัง เมื่อเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

จากตารางลำดับชั้นการทดลองที่ 10

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางค่านับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1)(0.92) \\ &= 159.34 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางค่านับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.9)(0.87) \\ &= 135.62 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{135.62}{159.34} \\ &= 0.8511 \text{ หรือ } 85.11\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_r - V_r}{V_r} \\ &= \frac{403 - 378}{378} \\ &= 0.0661 \text{ หรือ } 6.61\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 11

	Substation A	Substation B
Ig	1.8	2.73
Itr	0.85	0.7
Itr1	0.55	0.35
Itr2	0.3	0.35
I_L	2	2
Vac	100	100
Wac	250	430
PF	0.8	0.9

ตารางที่ 4.14 ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	388	407
Vdc1	195	207
Vdc2	193	200
Idc	0.17	0.17

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงดันและกระแสในสายส่งกำลัง เมื่อลดโหลดทางด้าน
สับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

จากตารางลำดับขั้นการทดลองที่ 11

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.85)(0.8) \\ &= 117.78 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.7)(0.9) \\ &= 109.12 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{109.12}{117.78} \\ &= 0.9264 \text{ หรือ } 92.64\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{407 - 388}{388} \\ &= 0.0489 \text{ หรือ } 4.89\% \end{aligned}$$

4.2.2) การทดลองที่ 2.2 การช่วยจ่ายพลังงาน เมื่อแรงดันเท่ากันแต่ความถี่ต่างกัน

4.2.2.1) ลำดับขั้นตอนการทดลองที่ 2.2

- 1) สมมติให้ ออโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 15 แอมแปร์ เป็นสลับสแตจชั่น A โดยจ่ายไฟ 100 โวลท์
- 2) สมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 3 เฟส 100 โวลท์ โดยที่มีความเร็ว 1350 รอบต่อนาที และกำหนดให้เป็นสลับสแตจชั่น B
- 3) จ่ายโหลดทางด้าน สลับสแตจชั่น A โดยจ่ายกระแส 2 แอมแปร์
- 4) จ่ายโหลดทางด้าน สลับสแตจชั่น B โดยจ่ายกระแส 2 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 5) จ่ายโหลดทางด้าน สลับสแตจชั่น A โดยเพิ่มโหลดเป็น 4 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล
- 6) ทำการปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ B ให้ทำงานในโหมดเรกติฟาย์แล้วปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ A ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ สังเกตและบันทึกผล
- 7) ลดโหลดทางด้าน สลับสแตจชั่น A ให้เหลือ 2 แอมแปร์ สังเกตและบันทึกผล

ผลการทดลองที่ 2.2

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 3,4

	Substation A	Substation B
I_g	2.2	2.24
I_{tr}	0.2	0.2
I_{tr1}	0.1	0.1
I_{tr2}	0.1	0.1
I_L	2	2
Vac	100	100
Wac	320	340
PF	0.84	0.87

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองเมื่อจ่ายโหลดแก่กับสถานี A และ B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.17 ค่าของกระแสและแรงดันขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 5

	Substation A	Substation B
Ig	4.15	2.34
Itr	0.2	0.2
Itr1	0.1	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	4	2
Vac	100	100
Wac	650	350
PF	0.9	0.86

ตารางที่ 4.18 ค่าเมื่อเพิ่มโหลดให้กับตัวตดชั้น A ขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.19 ค่าของกระแสและแรงดันขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 6

	Substation A	Substation B
I _g	3.6	3.15
I _{tr}	1.13	1.25
I _{tr1}	0.63	0.6
I _{tr2}	0.5	0.65
I _L	4	2
V _{ac}	100	100
W _{ac}	555	480
PF	0.89	0.88

ตารางที่ 4.20 ค่าเมื่อเพิ่มโหลดให้กับสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
V _{dc}	377	400
V _{dc1}	187	195
V _{dc2}	190	205
I _{dc}	0.3	0.3

ตารางที่ 4.21 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะส่งผ่านกำลังงาน
เมื่อเพิ่ม โหลดทางด้านสับสแตชัน A

จากตารางลำดับขั้นการทดลองที่ 6

พลังงานไฟฟ้าที่รับไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.13)(0.89) \\ &= 174.19 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.25)(0.88) \\ &= 190.52 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{174.19}{190.52} \\ &= 0.9142 \text{ หรือ } 91.42\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{400 - 377}{377} \\ &= 0.0610 \text{ หรือ } 6.10\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 7

	Substation A	Substation B
Ig	1.8	3.13
Itr	0.88	1.12
Itr1	0.4	0.55
Itr2	0.48	0.57
I_L	2	2
Vac	100	100
Wac	260	500
PF	0.84	0.92

ตารางที่ 4.22 ค่าเมื่อลดโหลดให้กับสับสแตชัน A

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	387	408
Vdc1	192	200
Vdc2	195	208
Idc	0.29	0.29

ตารางที่ 4.23 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางลำดับขั้นการทดลองที่ 7

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.88)(0.84) \\ &= 128 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.12)(0.92) \\ &= 178 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{128}{178} \\ &= 0.72 \text{ หรือ } 72\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{408 - 387}{387} \\ &= 0.0542 \text{ หรือ } 5.42\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8) การทดลองที่ 2.8 ส่งถ่ายพลังงาน เมื่อแรงดันต่างกันแต่ความถี่เท่ากัน

4.2.8.1) ลำดับขั้นการทดลอง

- 1) สมมติให้ ออกได้ทรานฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 15 แอมแปร์ เป็นสับสแตชัน A โดยจ่ายไฟ 110 โวลต์
- 2) สมมติให้ออกได้ทรานฟอร์มเมอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 10 แอมป์ เป็นสับสแตชัน B โดยจ่ายไฟ 100 โวลต์
- 3) ลำดับขั้นที่ 3-12 ทำการทดลองตามการทดลองที่ 1



ผลการทดลองที่ 2.3

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 3 และ 4

	Substation A	Substation B
Ig	2.22	2.23
Itr	0.2	0.2
Itr1	0.1	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	2	2
Vac	110	100
Wac	325	310
PF	0.85	0.82

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองเมื่อจ่ายโหลดให้กับสับสแตชั่น A และ B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.25 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 5

	Substation A	Substation B
Ig	2.3	4.25
Itr	0.3	0.2
Itr1	0.15	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	2	4
Vac	110	100
Wac	370	665
PF	0.84	0.9

ตารางที่ 4.26 ค่าเมื่อเพิ่มโหลดให้กับสับสแตชัน B ขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.27 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 6

	Substation A	Substation B
Ig	3	3.75
Itr	1.2	0.97
Itr1	0.7	0.55
Itr2	0.5	0.42
I _L	2.1	4
Vac	110	100
Wac	520	610
PF	0.9	0.93

ตารางที่ 4.28 ค่าเมื่อเพิ่มโหลดให้กับตัวตบชั้น B ขณะส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	438	406
Vdc1	235	203
Vdc2	203	203
Idc	0.26	0.26

ตารางที่ 4.29 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อมีการเพิ่มโหลดทางด้านตัวตบชั้น B

จากการทดลองลำดับขั้นที่ 6

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(110)(1.2)(0.9) \\ &= 205.76 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.97)(0.93) \\ &= 156.2 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{156.2}{205.76} \\ &= 0.7594 \text{ หรือ } 75.94\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{445 - 416}{416} \\ &= 0.0697 \text{ หรือ } 6.97\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 7

	Substation A	Substation B
I _g	3.15	1.9
I _{tr}	1.5	1.23
I _{tr1}	1	0.8
I _{tr2}	0.5	0.43
I _L	2.1	2
V _{ac}	110	100
W _{ac}	540	275
PF	0.9	0.835

ตารางที่ 4.80 ค่าเมื่อลดโหลดทางด้านสับสแตชัน B

DC LINE		
	Substation A	Substation B
V _{dc}	445	416
V _{dc1}	235	208
V _{dc2}	210	208
I _{dc}	0.26	0.26

ตารางที่ 4.81 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อมีการลดโหลด
ทางด้านสับสแตชัน B

จากการทดลองลำดับขั้นที่ 7

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(110)(1.5)(0.9) \\ &= 257.2 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(1.23)(0.835) \\ &= 179.89 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{179.89}{257.2} \\ &= 0.7 \text{ หรือ } 70\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{445 - 416}{416} \\ &= 0.0697 \text{ หรือ } 6.97\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 9

	Substation A	Substation B
Ig	4.3	2.33
Itr	0.2	0.2
Itr1	0.1	0.1
Itr2	0.1	0.1
I_L	4.2	2
Vac	110	100
Wac	770	350
PF	0.94	0.87

ตารางที่ 4.32 ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านต้นตลับชุดชั้น A ขณะยังไม่ผ่าน
กำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	0	0
Vdc1	0	0
Vdc2	0	0
Idc	0	0

ตารางที่ 4.33 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังขณะไม่ส่งผ่านกำลังงาน

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 10

	Substation A	Substation B
Ig	3.95	2.87
Itr	1.05	0.9
Itr1	0.65	0.4
Itr2	0.4	0.5
I_L	4.2	2
Vac	110	100
Wac	700	445
PF	0.93	0.895

ตารางที่ 4.34 ค่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	388	418
Vdc1	195	215
Vdc2	193	203
Idc	0.21	0.21

ตารางที่ 4.35 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อเพิ่มโหลดทางด้านสับสแตชัน A ขณะส่งผ่านกำลังงาน

จากการทดลองลำดับขั้นที่ 10

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(110)(1.05)(0.93) \\ &= 186 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับไปทางด้านสับสแตชัน A

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.9)(0.895) \\ &= 139.51 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{139.51}{186} \\ &= 0.75 \text{ หรือ } 75\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{418 - 388}{388} \\ &= 0.0773 \text{ หรือ } 7.73\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองตามลำดับขั้นที่ 11

	Substation A	Substation B
Ig	2	2.8
Itr	0.9	0.8
Itr1	0.6	0.4
Itr2	0.3	0.4
I_L	2.1	2
Vac	110	100
Wac	315	400
PF	0.826	0.84

ตารางที่ 4.36 ค่าเมื่อทำการลดโหลดทางด้านสับสแตชัน A

DC LINE		
	Substation A	Substation B
Vdc	400	427
Vdc1	200	217
Vdc2	200	210
Idc	0.18	0.18

ตารางที่ 4.37 ค่าของกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังเมื่อลดโหลดทางด้าน
สับสแตชัน A

จากการทดลองลำดับขั้นที่ 11

พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(110)(0.9)(0.826) \\ &= 141.63 \text{ watt.} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่รับทางด้านสับสแตชัน B

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI\cos\phi \\ &= \sqrt{3}(100)(0.8)(0.84) \\ &= 116.93 \text{ watt.} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายพลังงาน

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{116.39}{141.63} \\ &= 0.8217 \text{ หรือ } 82.17\% \end{aligned}$$

DC Voltage Regulation

$$\begin{aligned} \text{Reg} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \\ &= \frac{427 - 400}{400} \\ &= 0.0675 \text{ หรือ } 6.75\% \end{aligned}$$

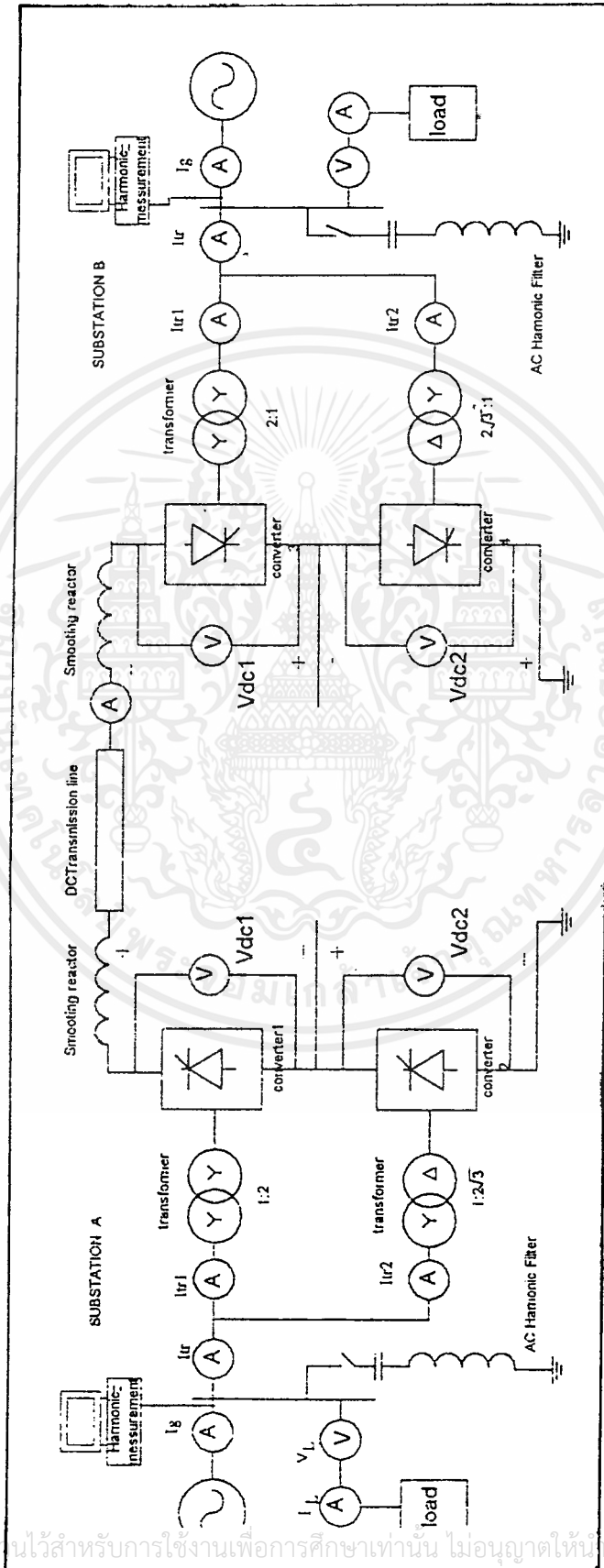
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การทดลองที่ 8 การทดลองการวัดฮาร์โมนิกส์

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยการส่งจ่ายกำลังงานจากสับสแตชัน A ไปยังสับสแตชัน B แล้วทำการบันทึกผล เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบระหว่างการส่งจ่ายกำลังงานด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์ และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์

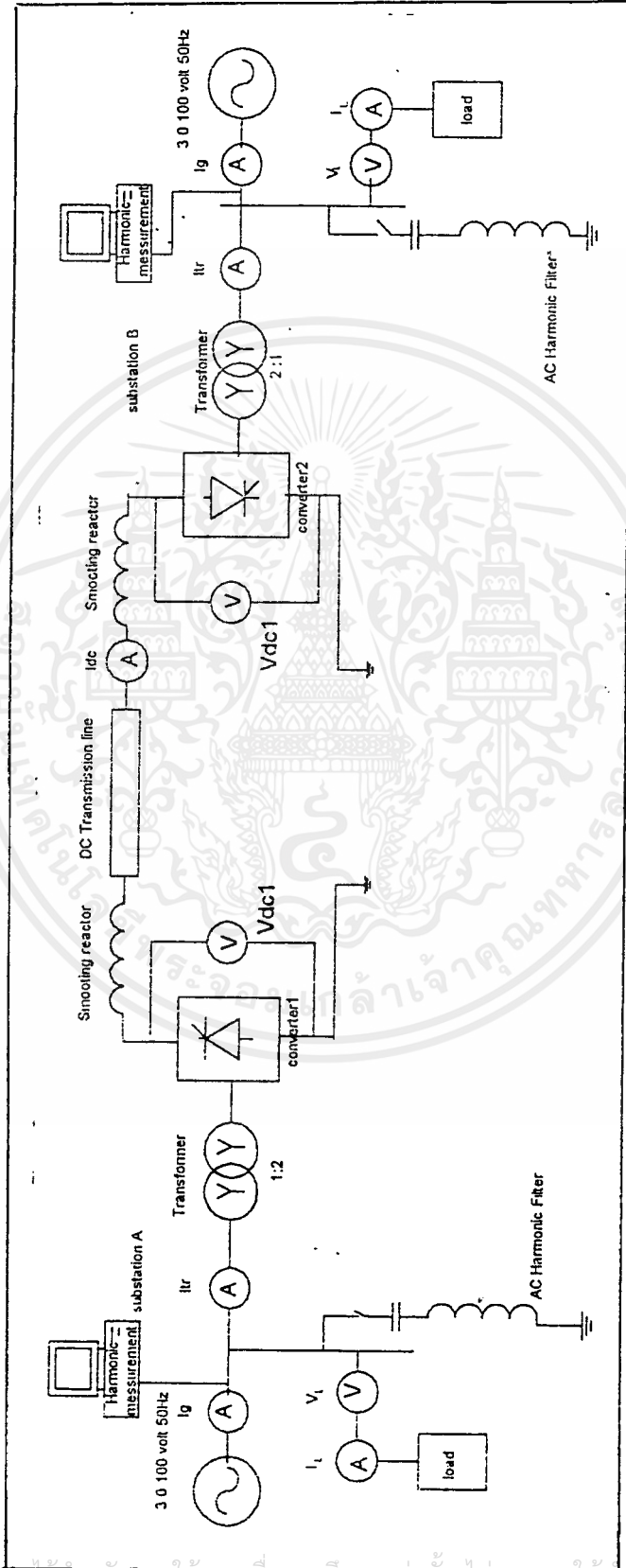
4.8.1) ลำดับขั้นตอนการทดลองที่ 8

- 1) ต่อดวงจรมัดรูป
- 2) สมมติให้ ออโต้ ทรานฟอเมอร์ ขนาด 3 เฟส 380 โวลต์ 15 แอมแปร์ เป็นสับสแตชัน A จ่ายไฟ 100 โวลต์ (line-to-line)
- 3) สมมติให้ ออโต้ ทรานฟอเมอร์ขนาด 3 เฟส 380 โวลต์ 10 แอมแปร์ เป็นสับสแตชันB จ่ายไฟ 100 โวลต์ (line-to-line)
- 4) จ่ายโหลดทางด้านสับสแตชัน A โดยจ่ายให้ได้กระแส 2 แอมแปร์ จ่ายโหลดทางด้านสับสแตชัน B ให้ได้กระแส 4 แอมแปร์
- 5) ทำการปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ ทางด้านสับสแตชัน A ให้ทำงานในโหมดเรกติฟายและทำการปรับมุมของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านสับสแตชัน B ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์
- 6) ทำการบันทึกผล



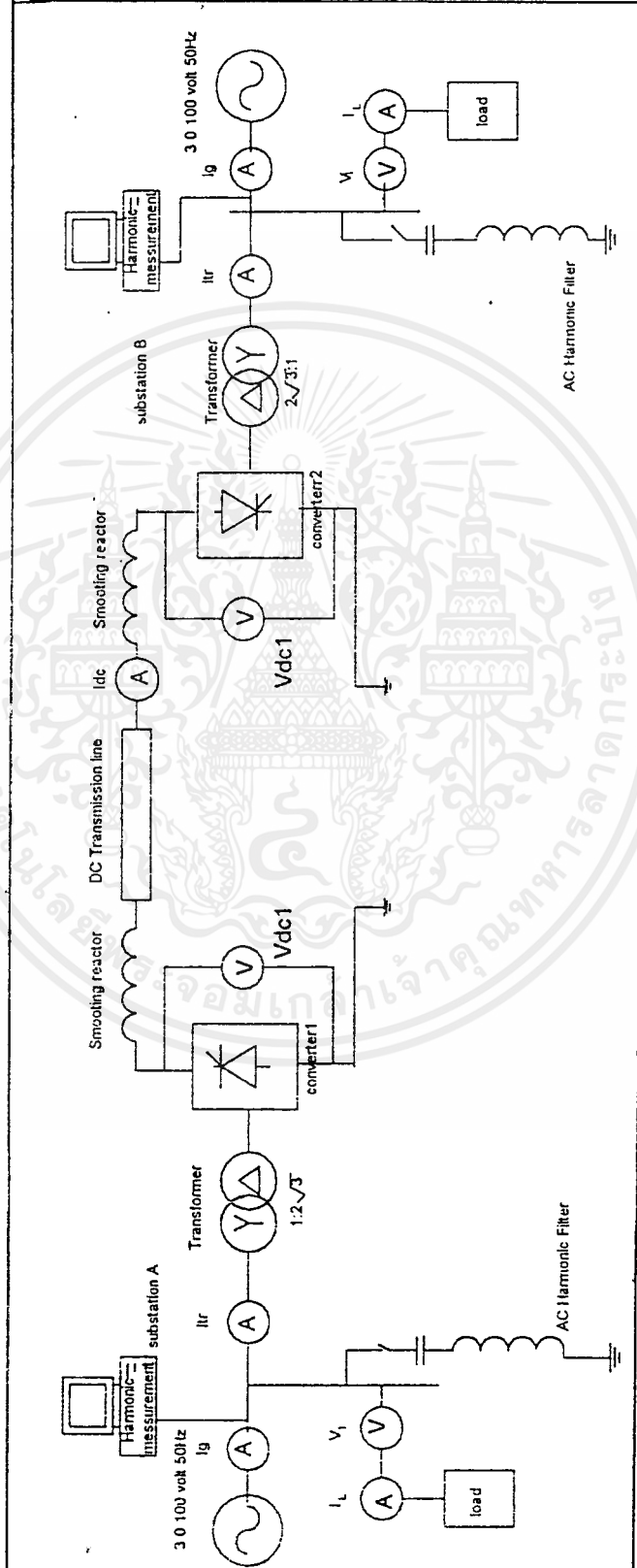
รูปที่ 4.21 วงจรการทดลองการวัด ฮาร์โมนิคส์ (แบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



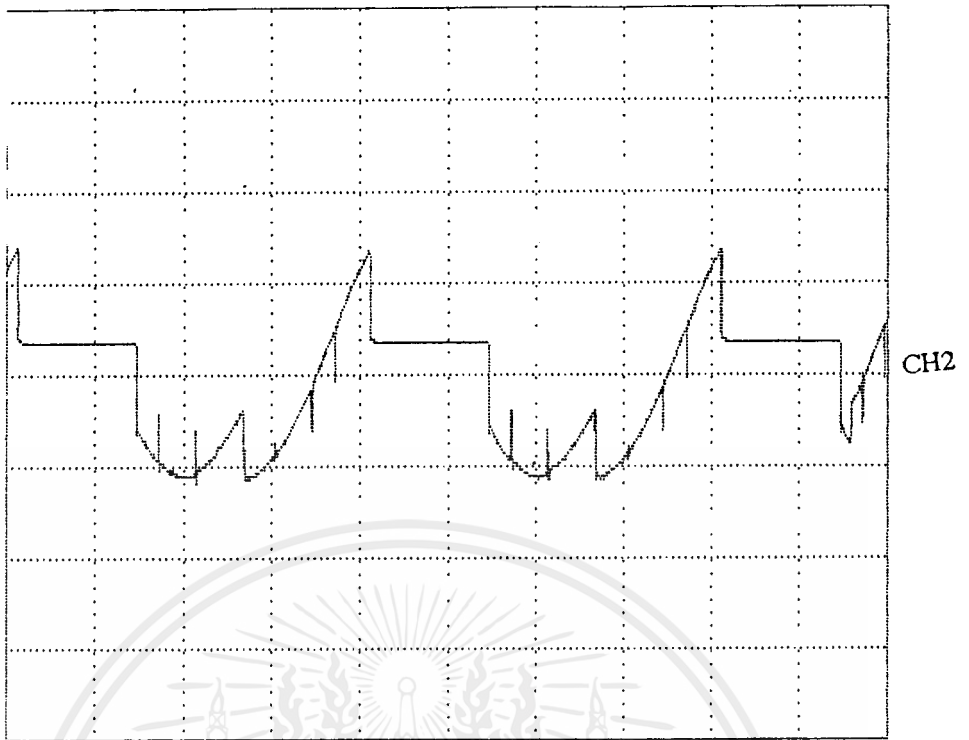
รูปที่ 4.22 วงจรการทดลองการวัด ฮาร์โมนิกส์ (แบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

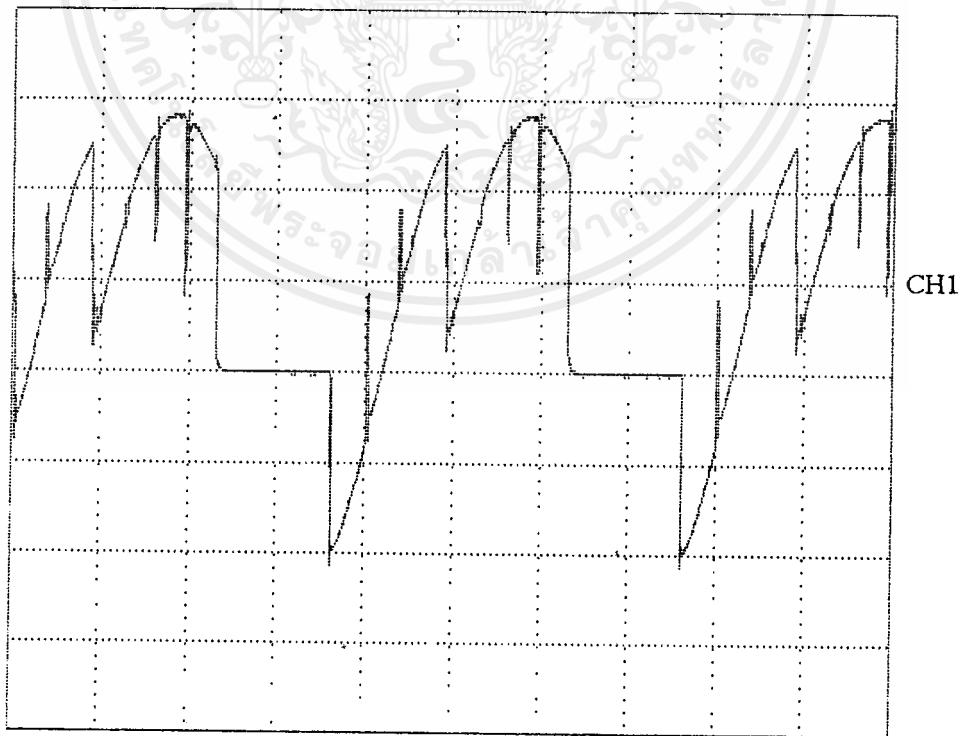


รูปที่ 4.28 วงจรการทดลอง การวัด ฮาร์โมนิกส์ (แบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



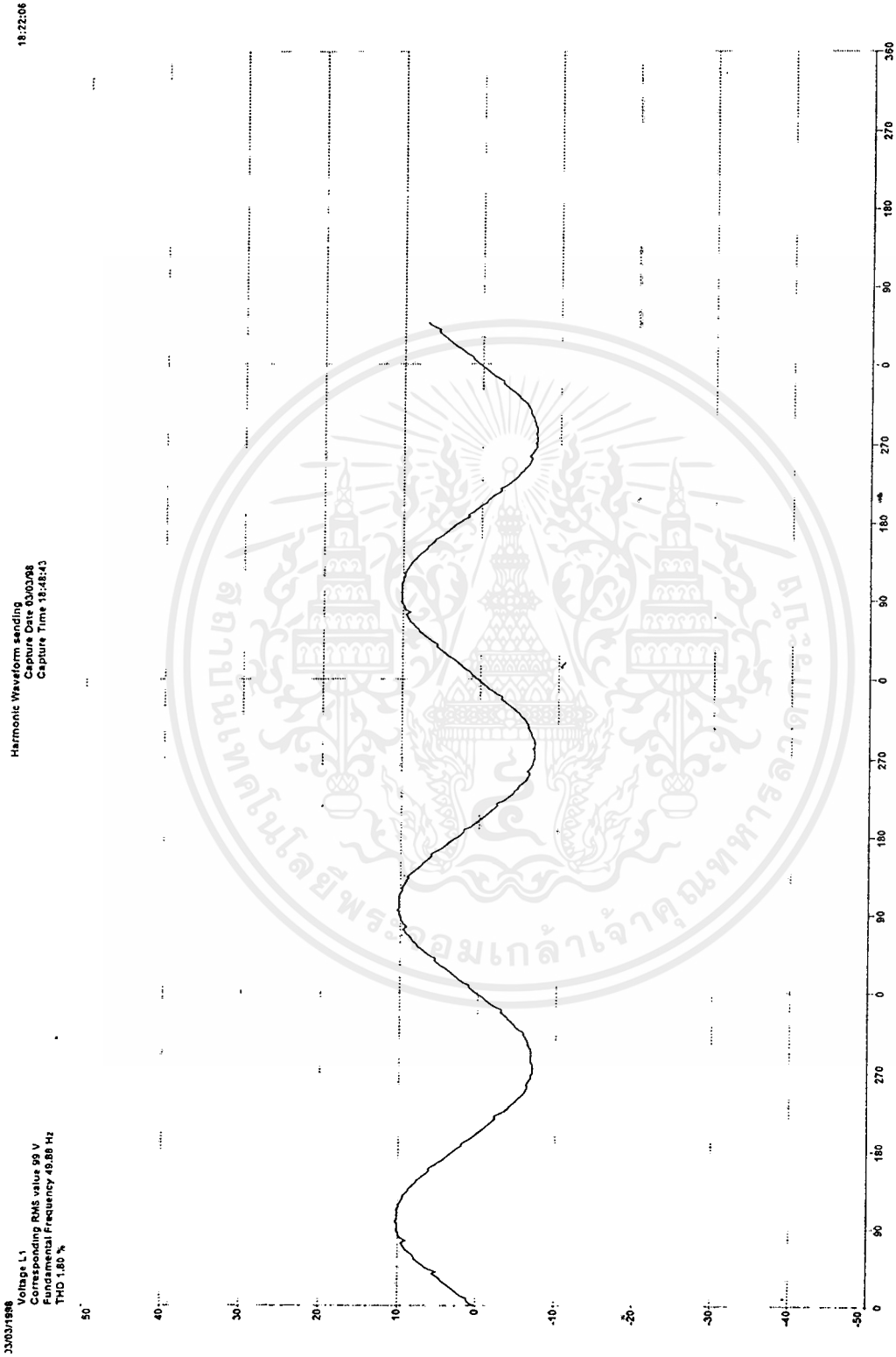
รูปที่ 4.24 รูปแรงดันตกคร่อม เอส ซี อาร์ เมื่อทำงานอยู่ในโหมดเรคตีฟาย
โพรบคูณ 100 ; 2V/DIV;5ms/DIV



รูปที่ 4.25 รูปแรงดันตกคร่อม เอส ซี อาร์ เมื่อทำงานอยู่ในโหมดอินเวอร์เตอร์

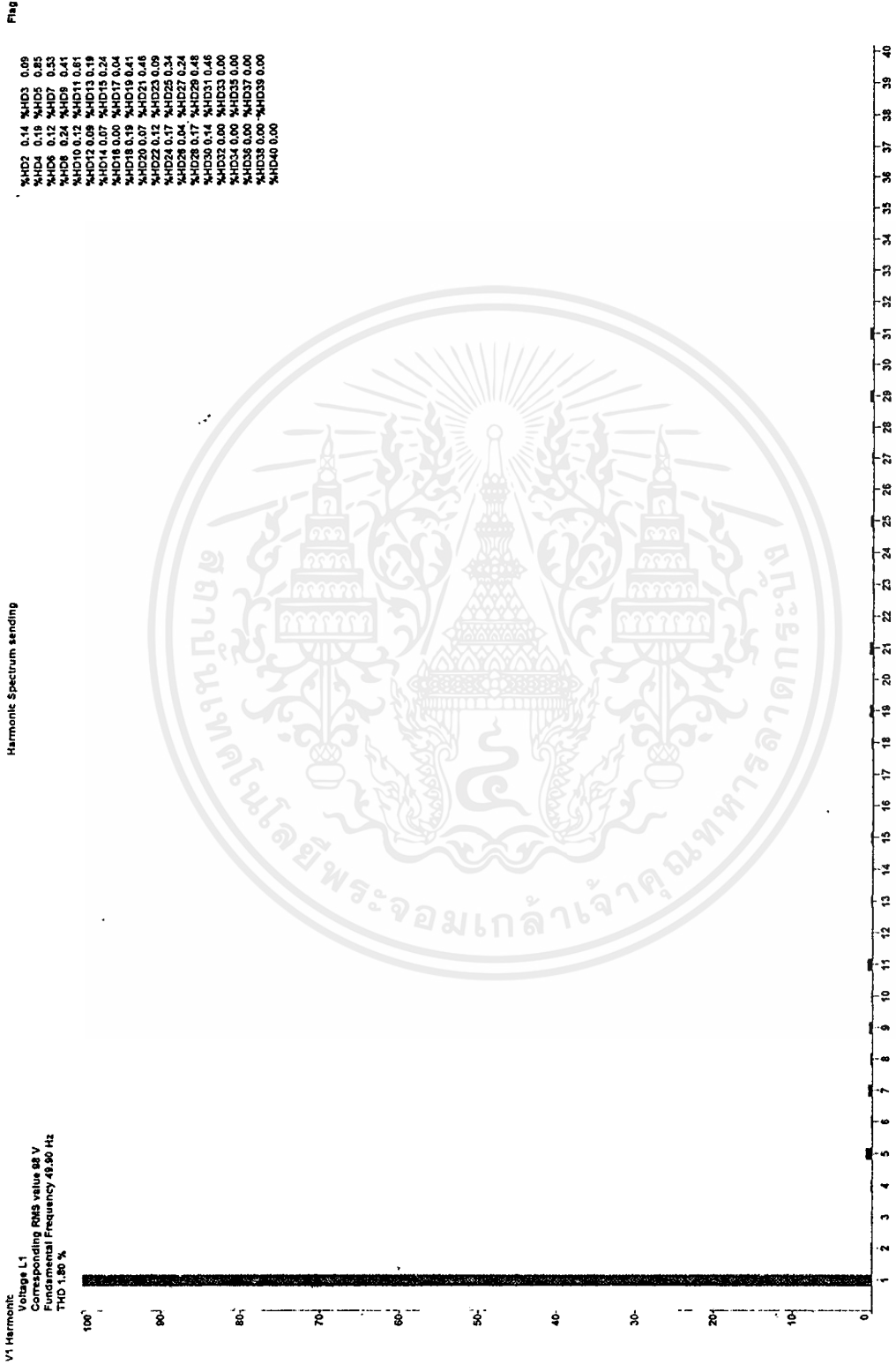
โพรบคูณ 100 ; 1 V/DIV ; 5ms/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

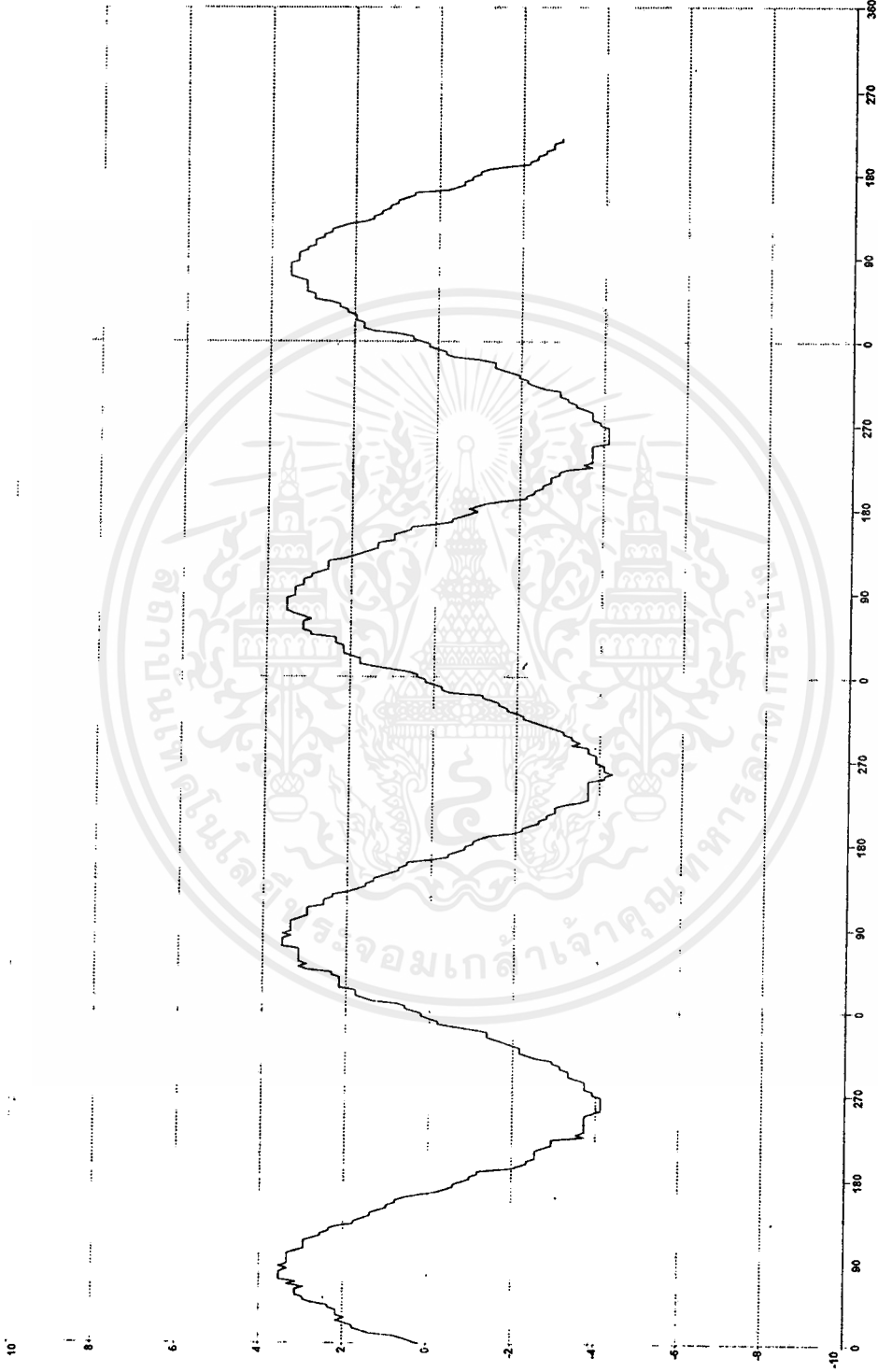
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

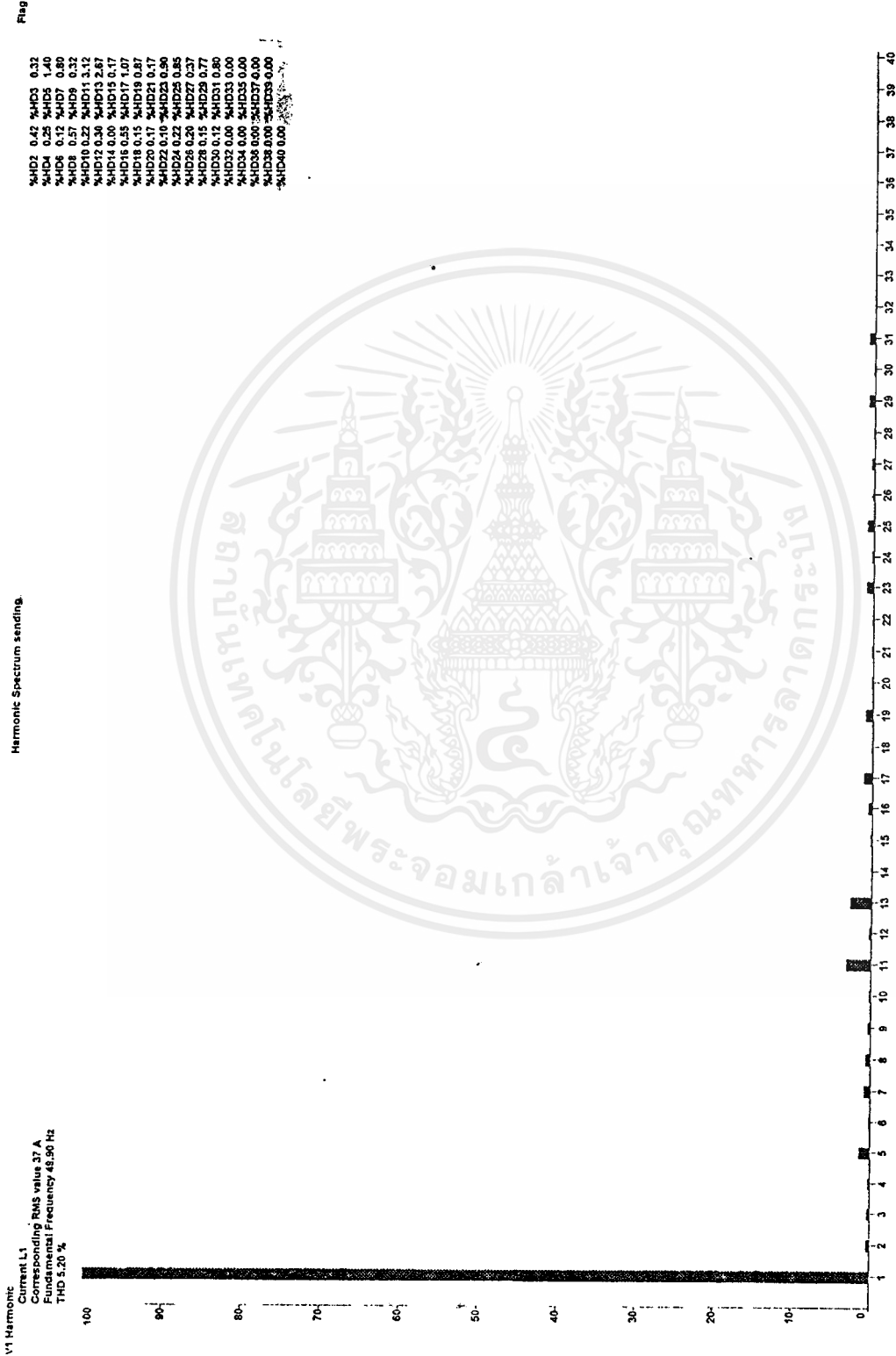
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

03/03/1998 Current L1 Harmonic Waveform sending 11:52:32
 Corresponding RMS value 37 A Capture Date 02/05/98
 Fundamental Frequency 49.90 Hz Capture Time 12:19:17
 THD 5.20 %



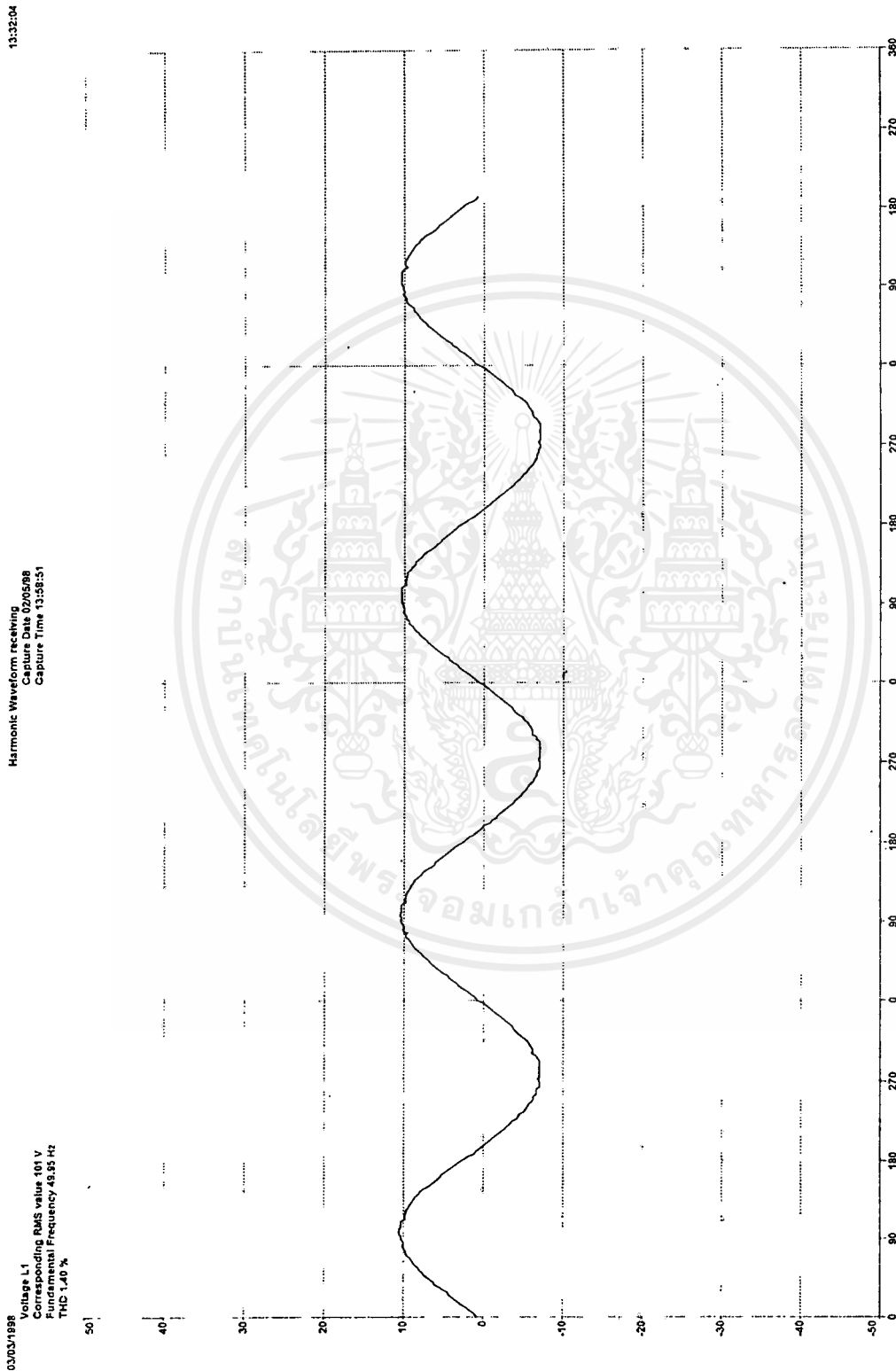
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นของกระแสแกนส่งตัวได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



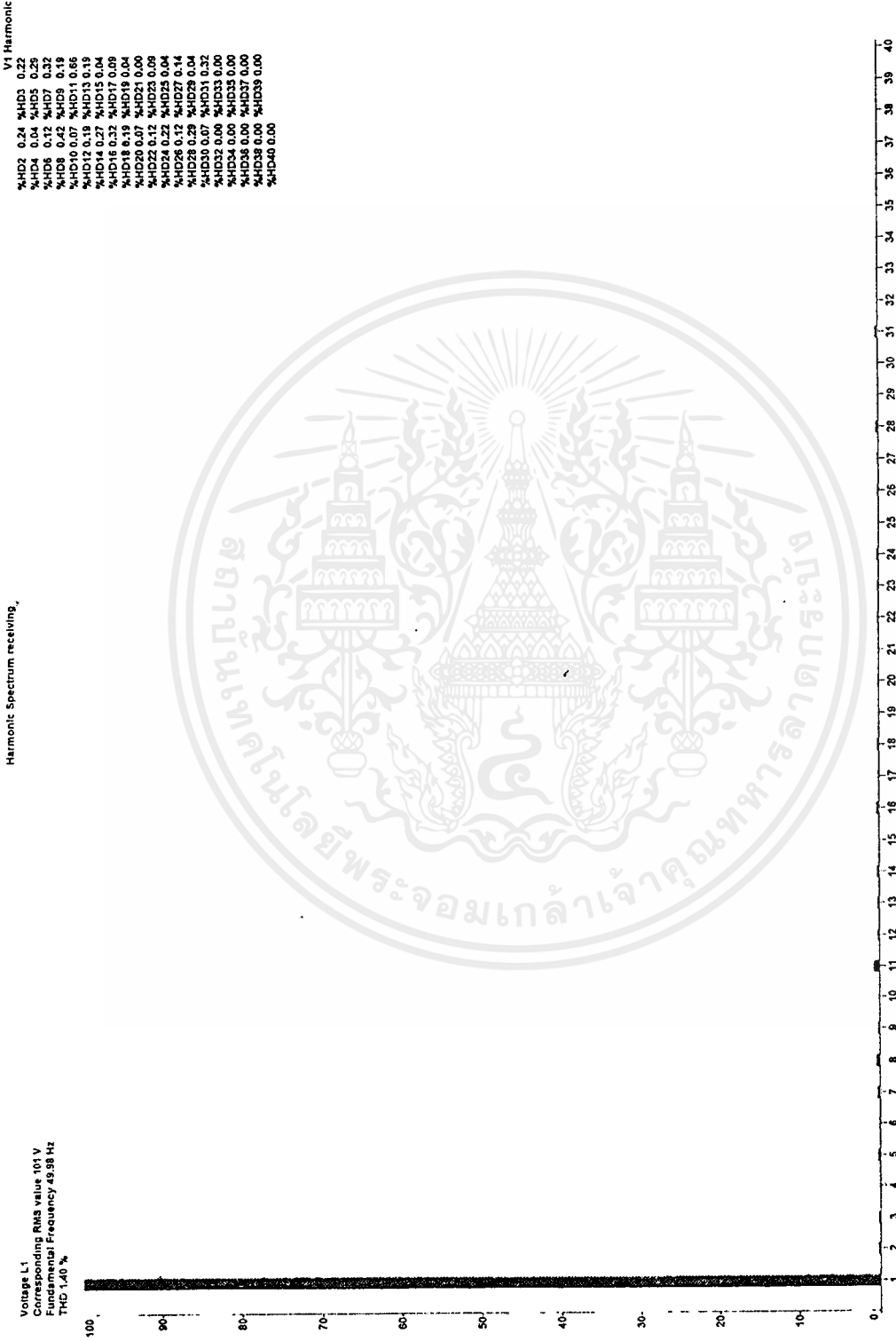
รูปที่ 4.29 Spectrum รูปคลื่นกระแสต้านส่งที่จัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



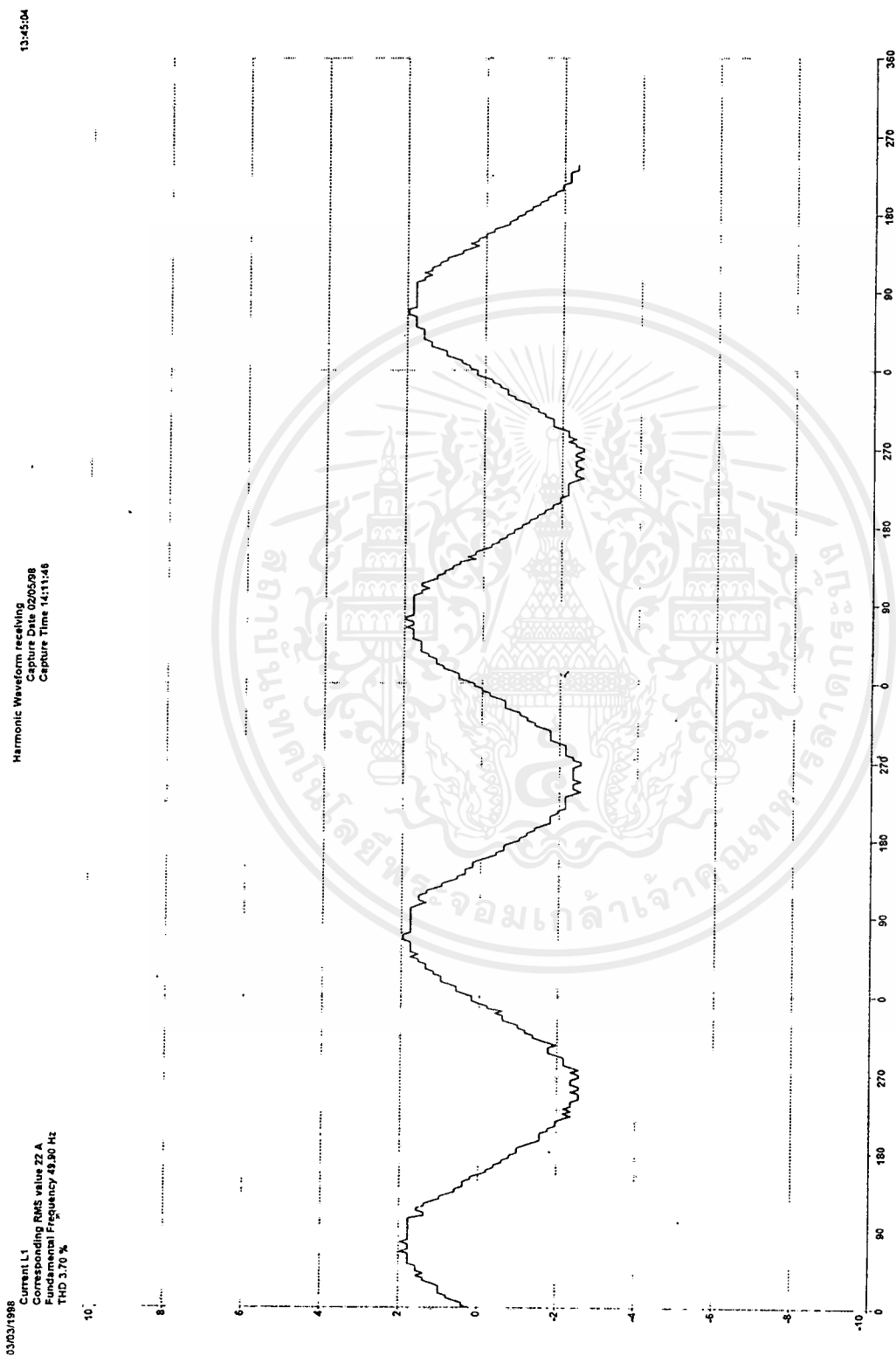
รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันคาน รับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



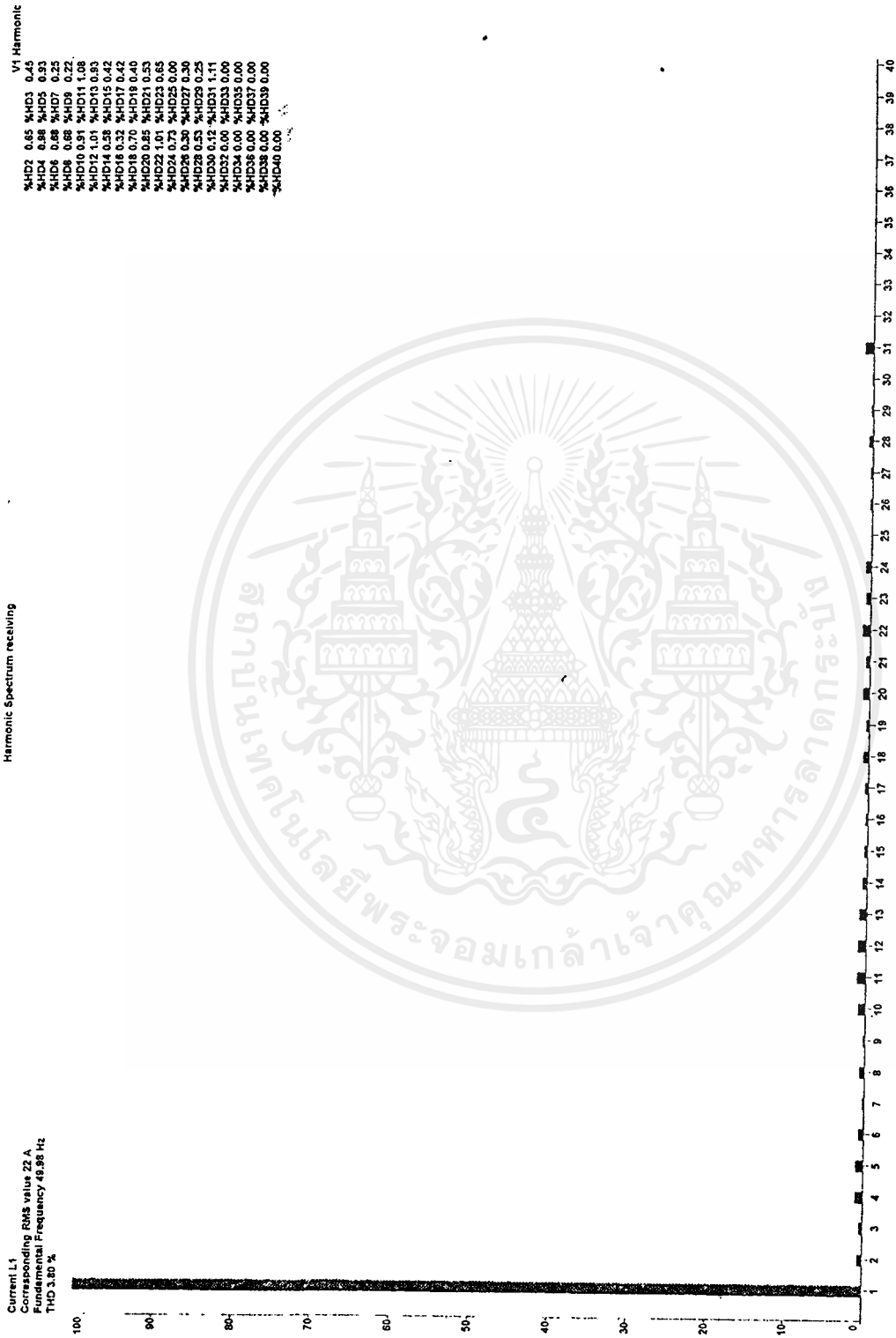
รูปที่ 4.31 Spectrum รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



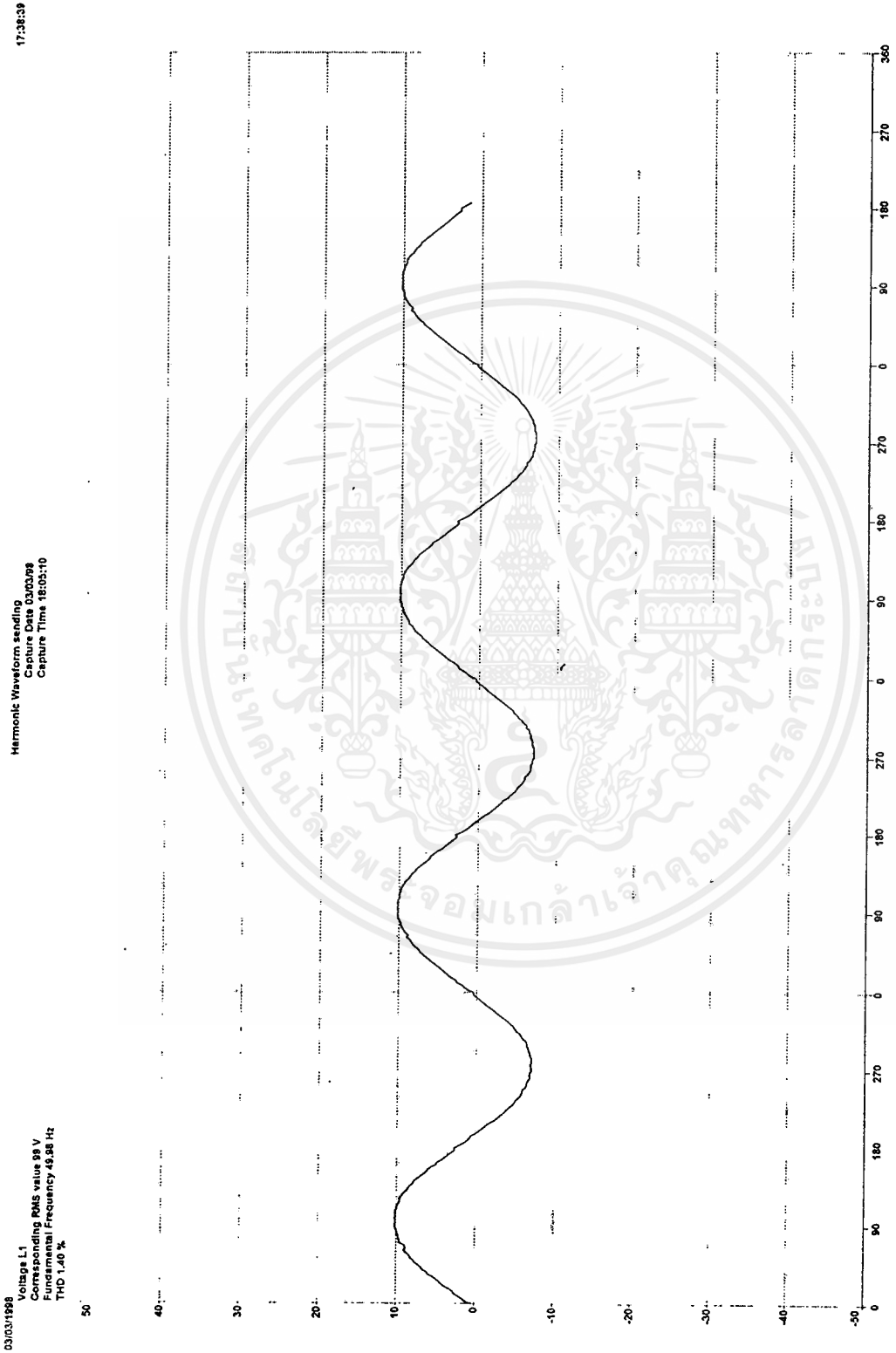
รูปที่ 4.92 รูปคลื่นกระแสต้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



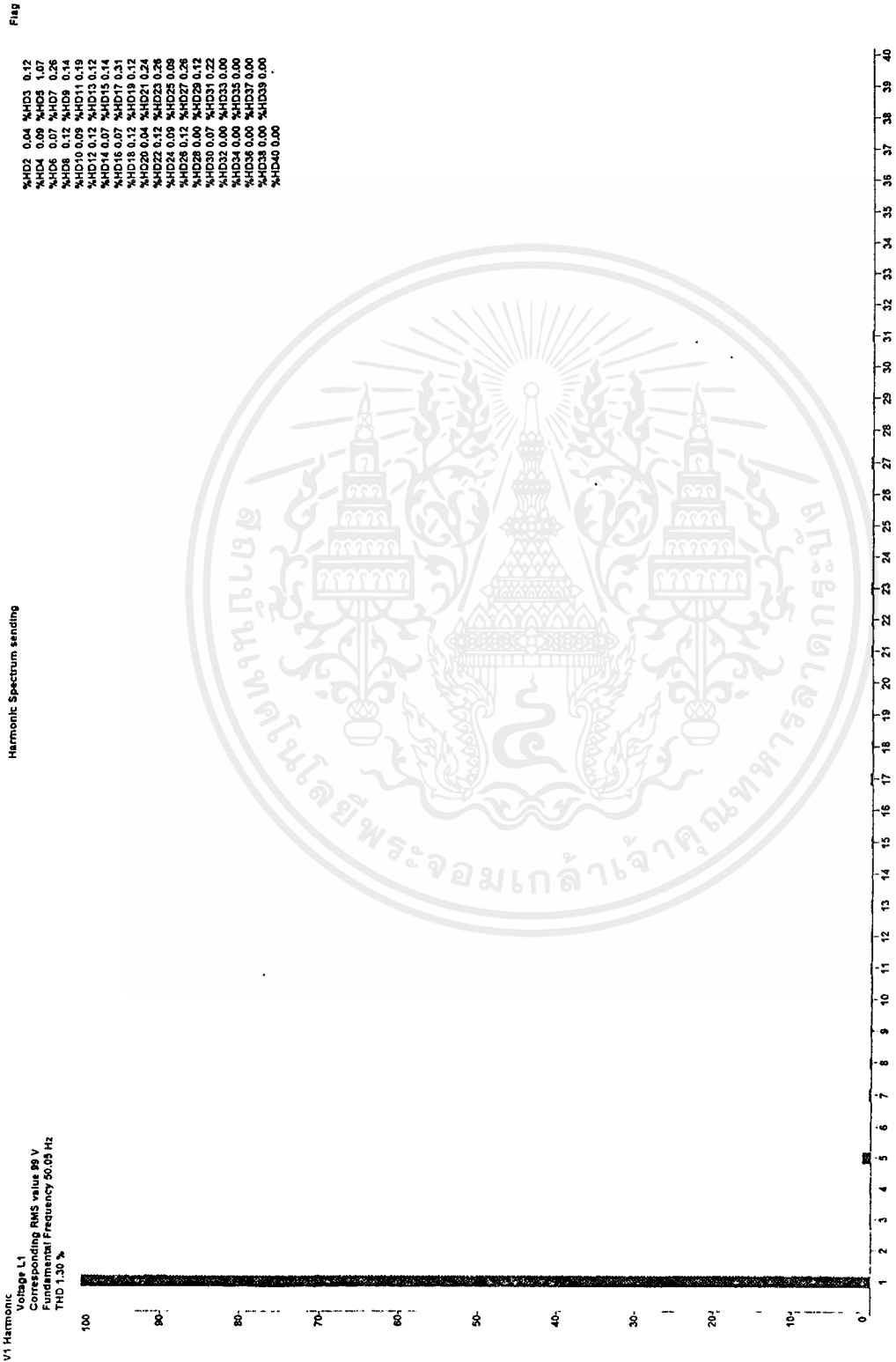
รูปที่ 4.33 Spectrum รูปคลื่นกระแสต้านรับที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 12 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



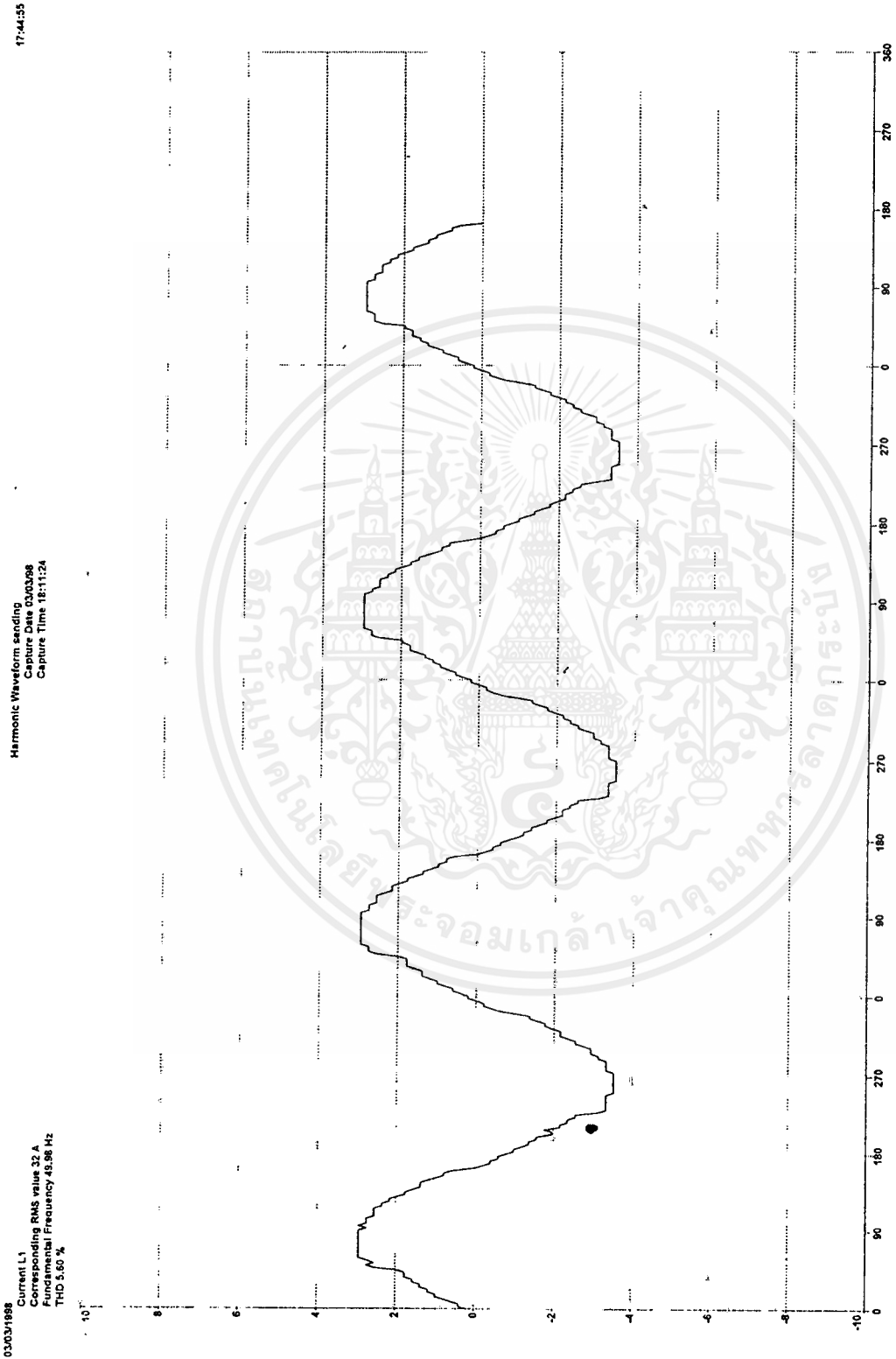
รูปที่ 4.34 รูปคลื่นของแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลง ต่อแบบ สตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



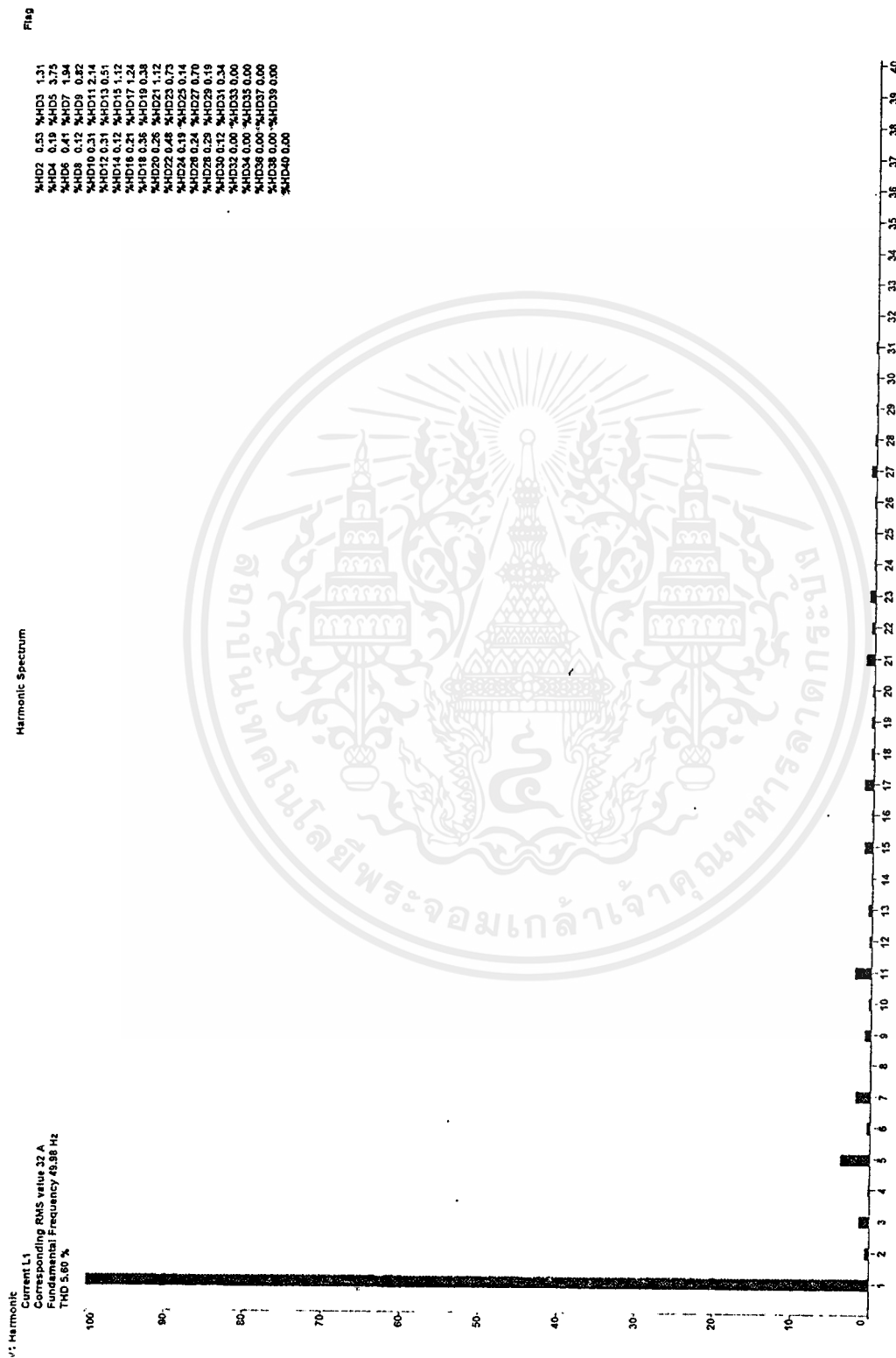
รูปที่ 4.35 Spectrum รูปคลื่นแรงดันต้นส่ง (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 ฟीलต์ หม้อแปลงพิเศษแบบเตา/สตาฟ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 รูปคลื่นของกระแสค่านึงที่วัดได้ (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ ามโยแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.87 Spectrum รูปคลื่นกระแสค่านิ่ง (ระบบส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ที่มีอิมพีแดนซ์ต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17:33:24

Harmonic Waveform receiving
Capture Date 03/03/98
Capture Time 19:00:05

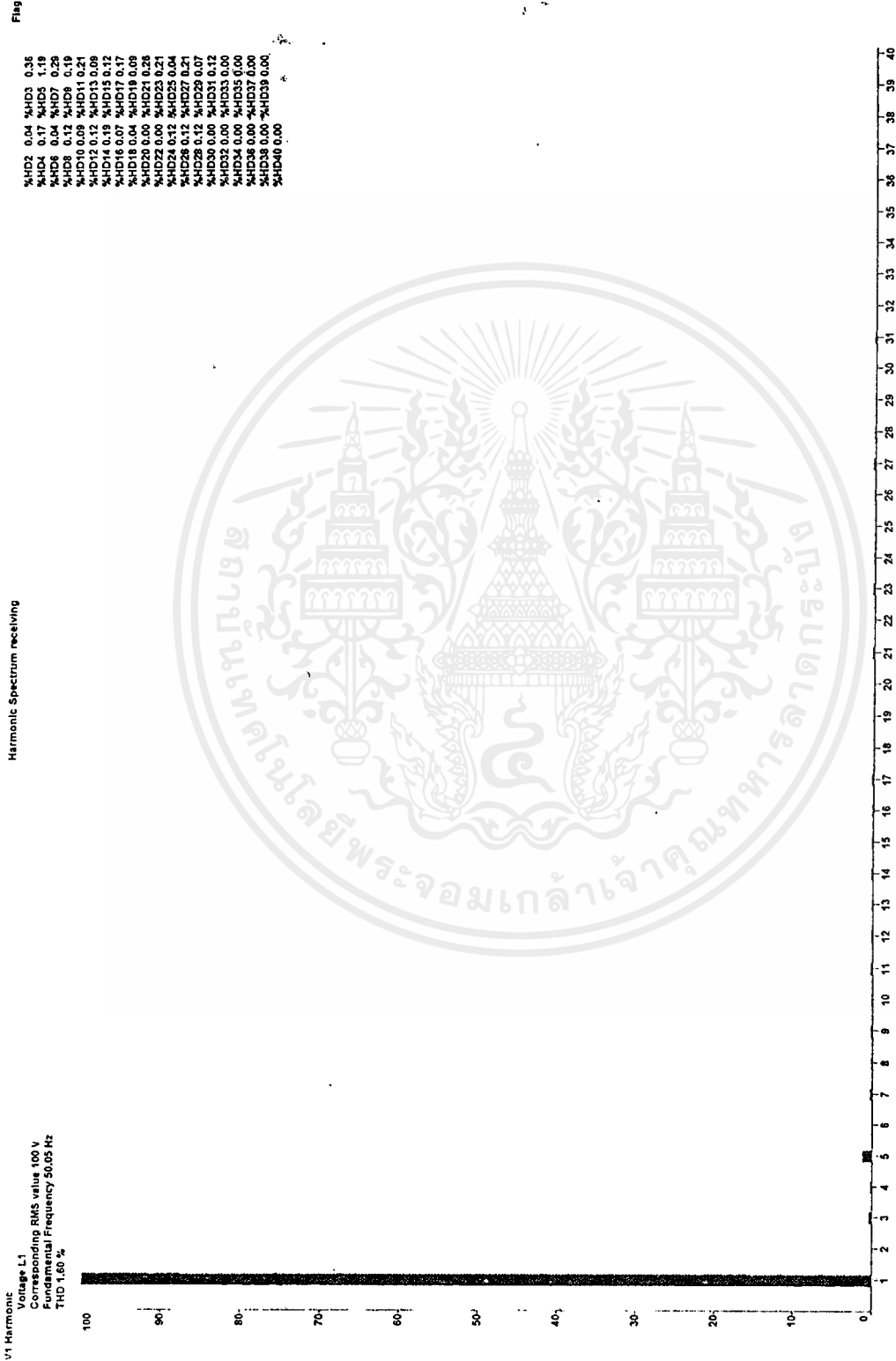
03/03/1998
Voltage L1
Corresponding RMS value 100 V
Fundamental Frequency 49.98 Hz
THD 1.80 %

50°



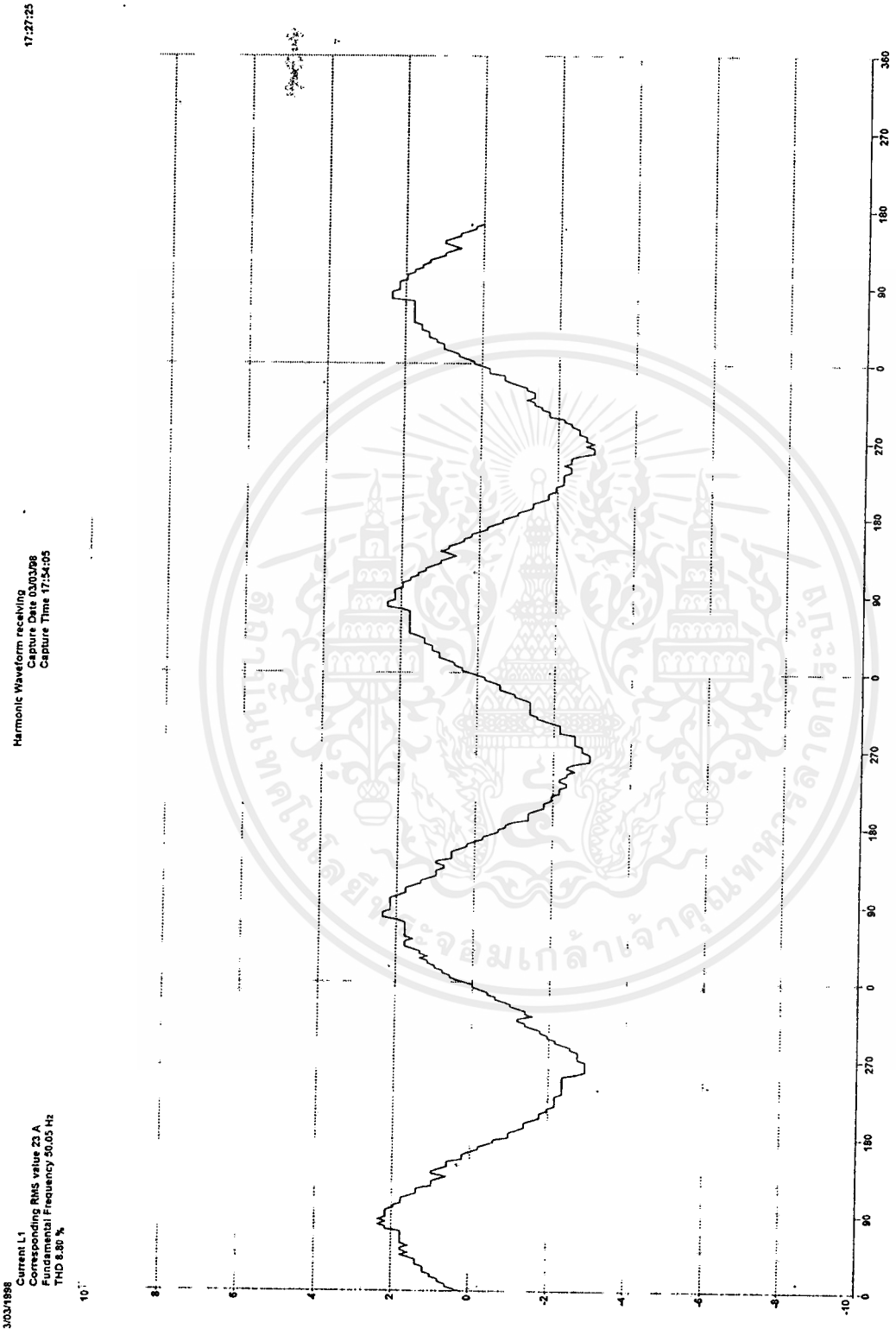
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบการส่งกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



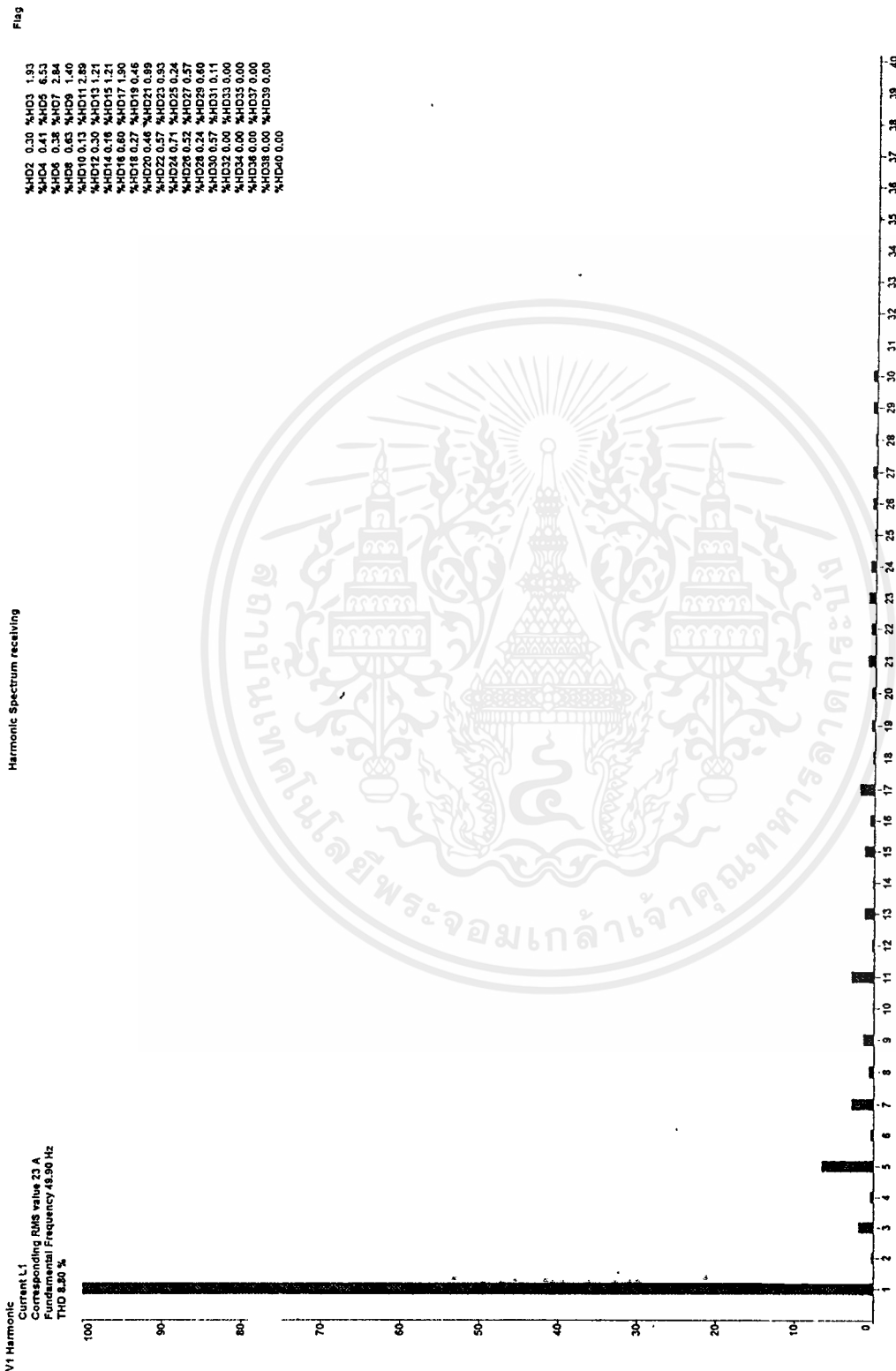
รูปที่ 4.39 Spectrum รูปคลื่นแรงดันต้นรับที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 รูปคลื่นกระแสด้านรับที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



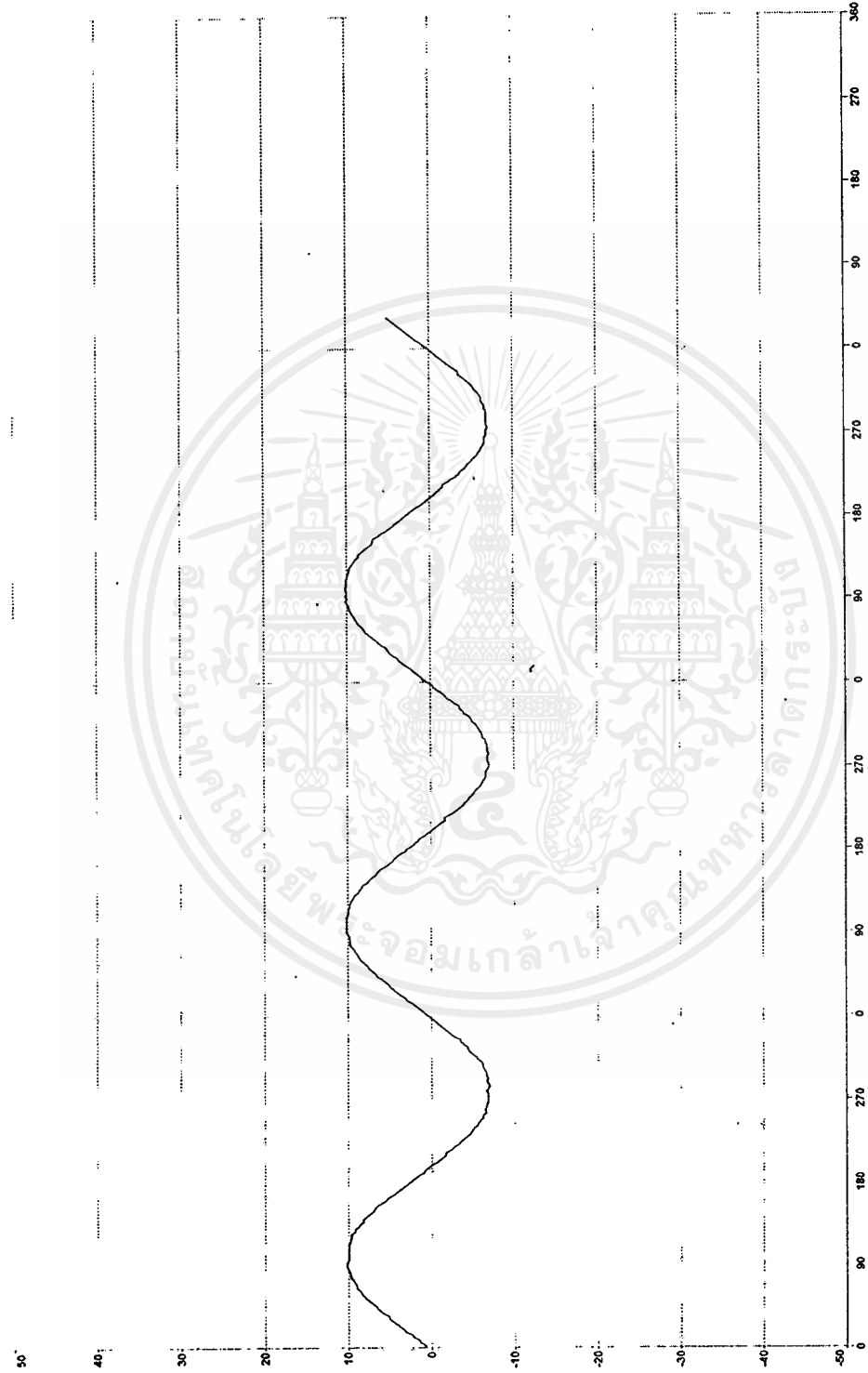
รูปที่ 4-41 Spectrum รูปคลื่น กระแสต้นรับที่วัดได้ (ระบบการส่งถ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบสตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17:51:13

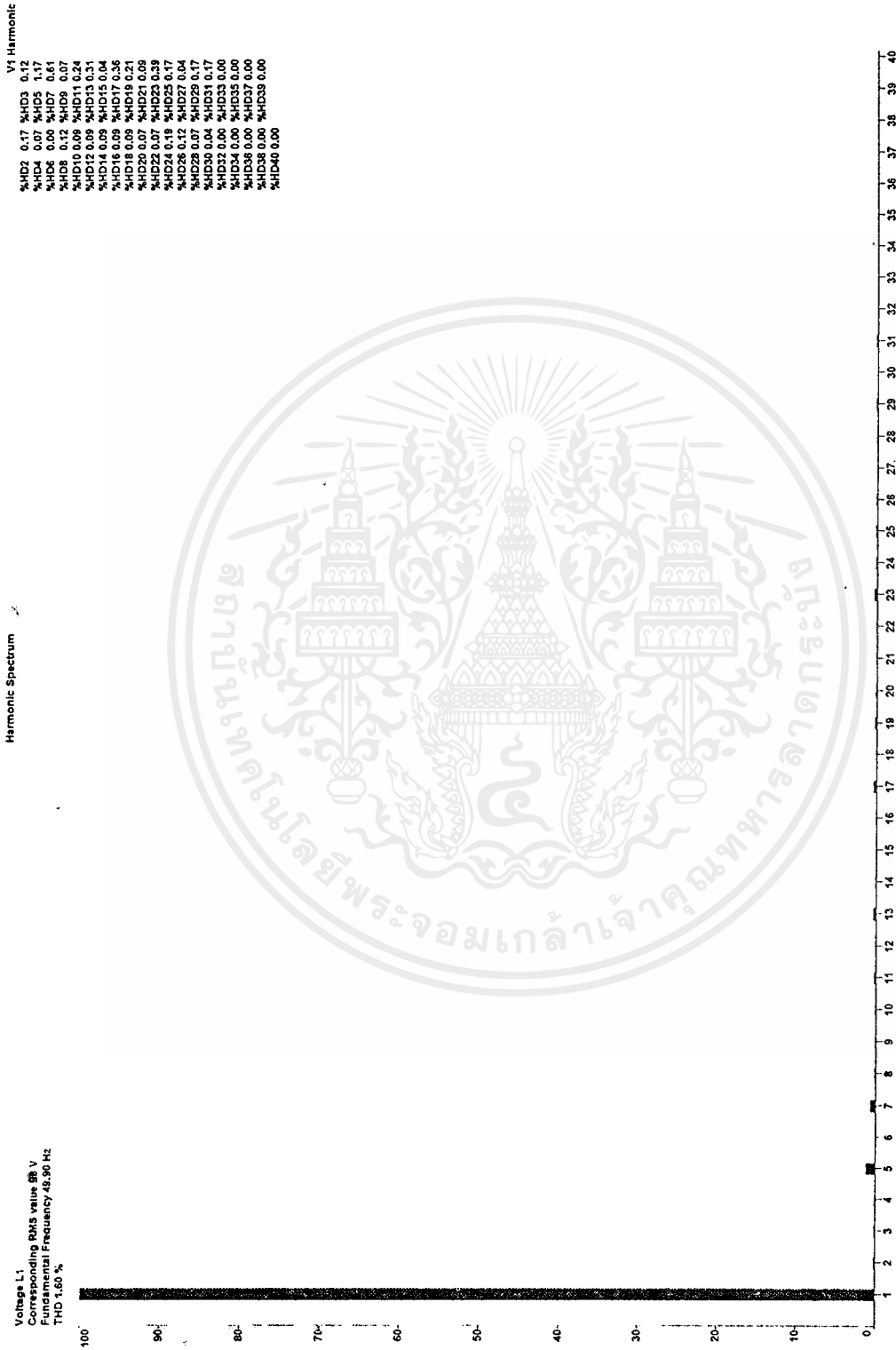
Harmonic Waveform sending
Capture Date 09:03:98
Capture Time 18:17:45

03/03/1986
Voltage L1
Corresponding RMS value 88 V
Fundamental Frequency 50.05 Hz
THD 1.50 %



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันด้านส่งที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



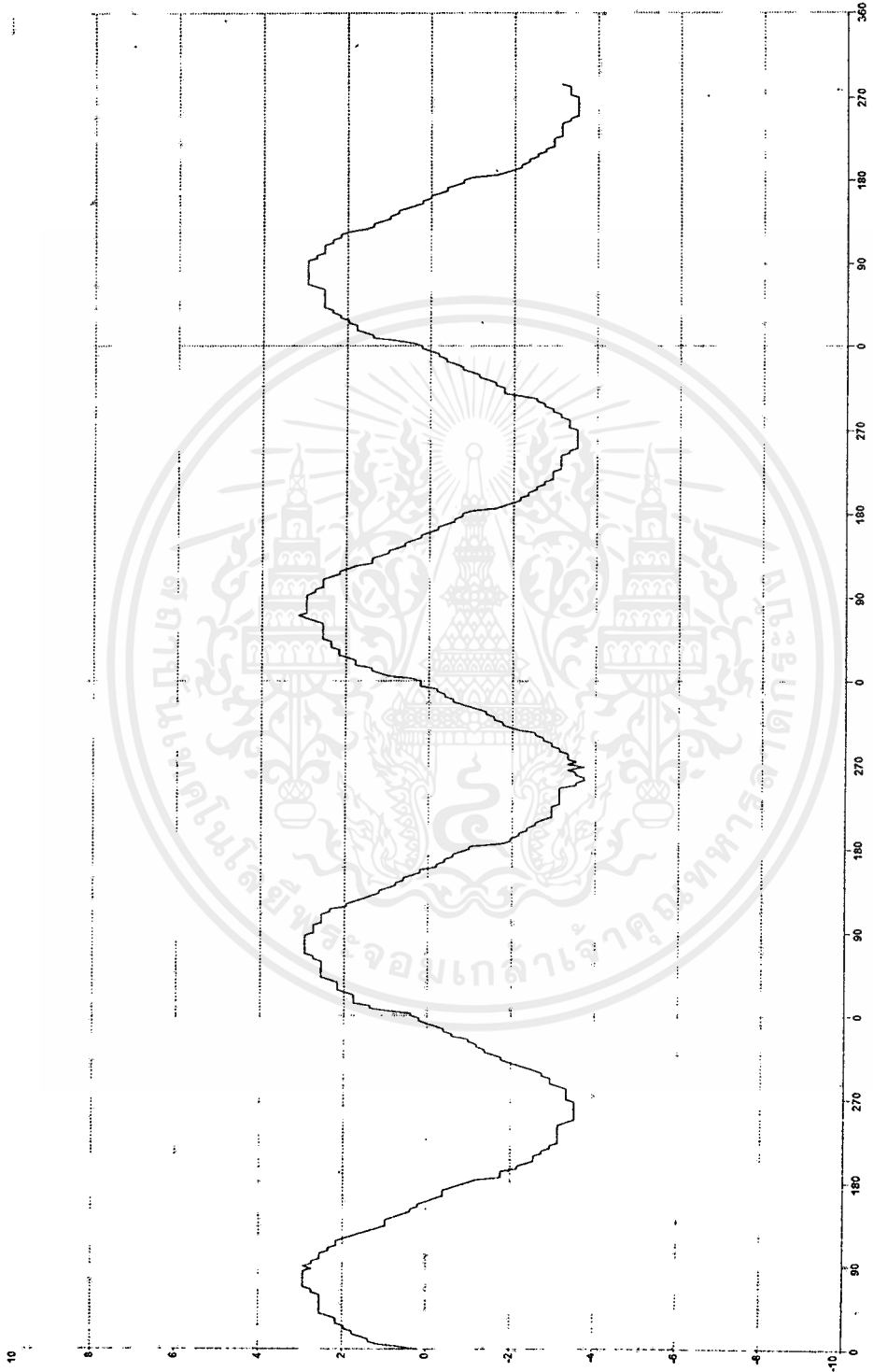
รูปที่ 4-48 Spectrum รูปคลื่นแรงดันต้นสังกัดที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงคอนเวกเตอร์ สตาร์ท/เดดตัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17:48:56

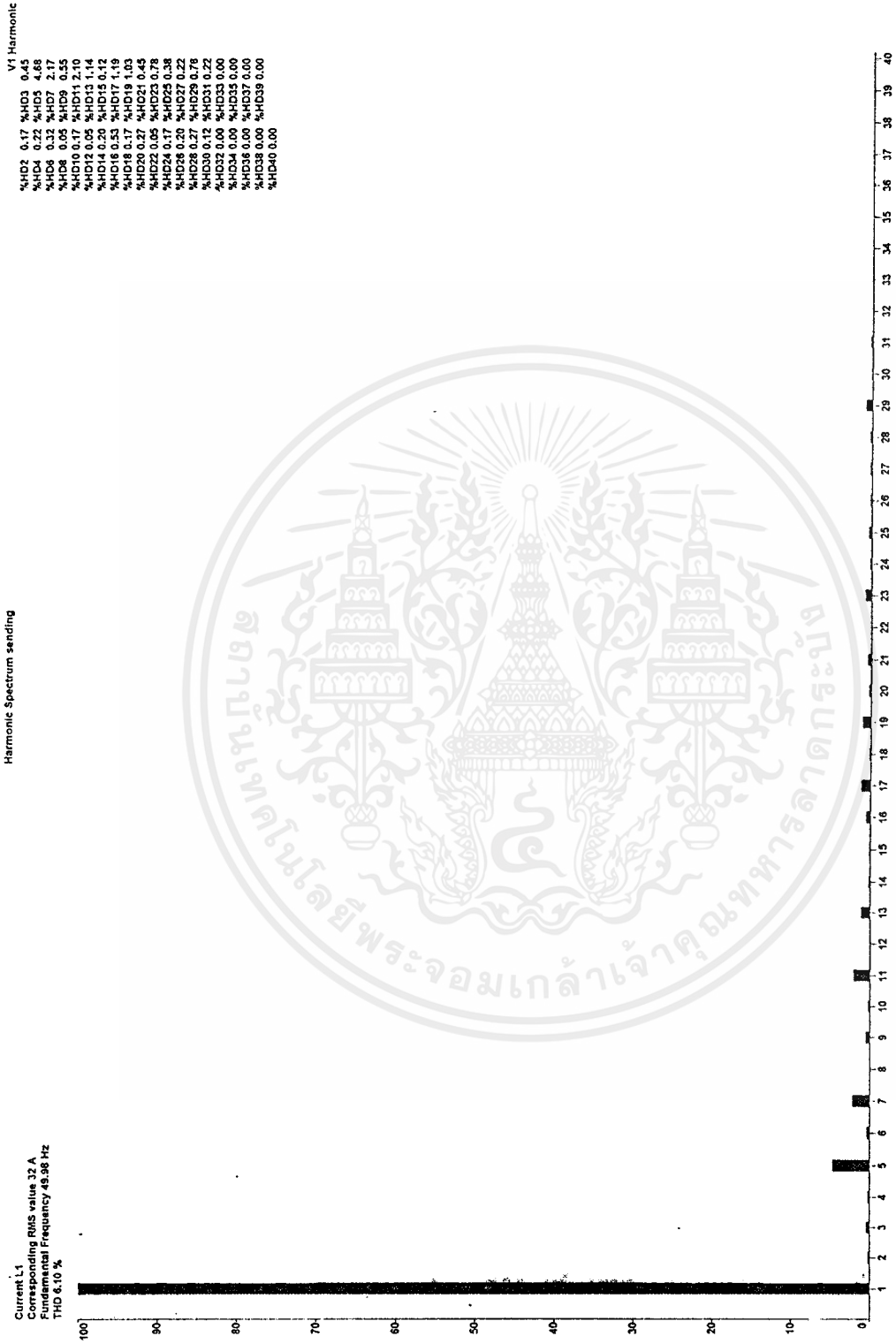
Harmonic Waveform sending
Capture Date 03/03/98
Capture Time 18:15:41

13/03/1998
Current L1
Corresponding RMS value 32 A
Fundamental Frequency 50.05 Hz
THD 6.20 %



รูปที่ 4.4.4 รูปคลื่นกระแสต้นแรงที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 Spectrum รูปคลื่นกระแสต้านส่งที่วัดได้ (ระบบการส่งกำลังกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18:07:43

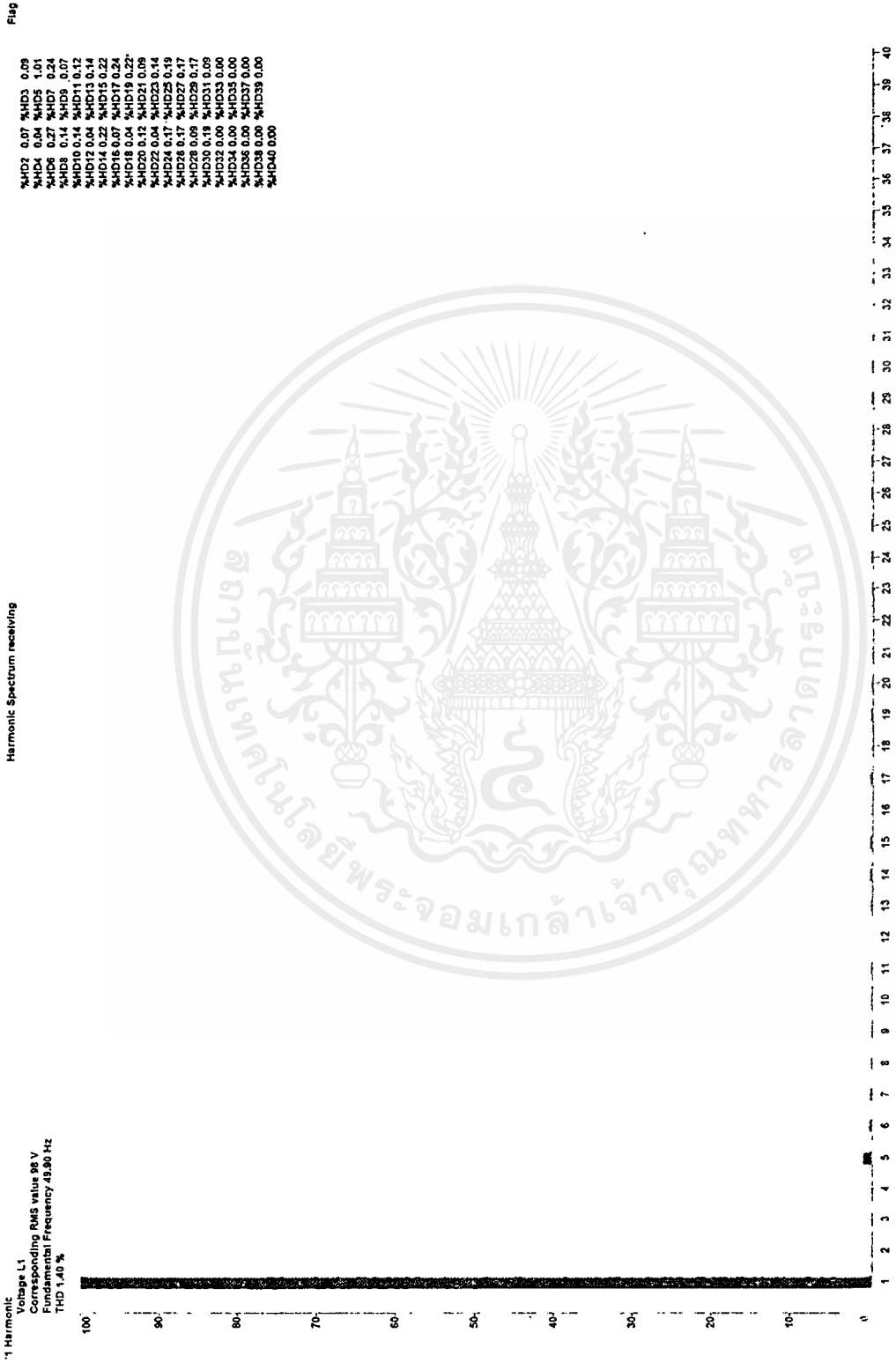
Harmonic Waveform receiving
Capture Date 03/03/98
Capture Time 18:34:19

13037198
Voltage L1
Corresponding RMS value 98 V
Fundamental Frequency 50.05 Hz
THD 1.30 %



รูปที่ 4.48 รูปคลื่นแรงดันด้านรับที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ 1 มิวแปดต่อแบบ สตาร์/สตาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



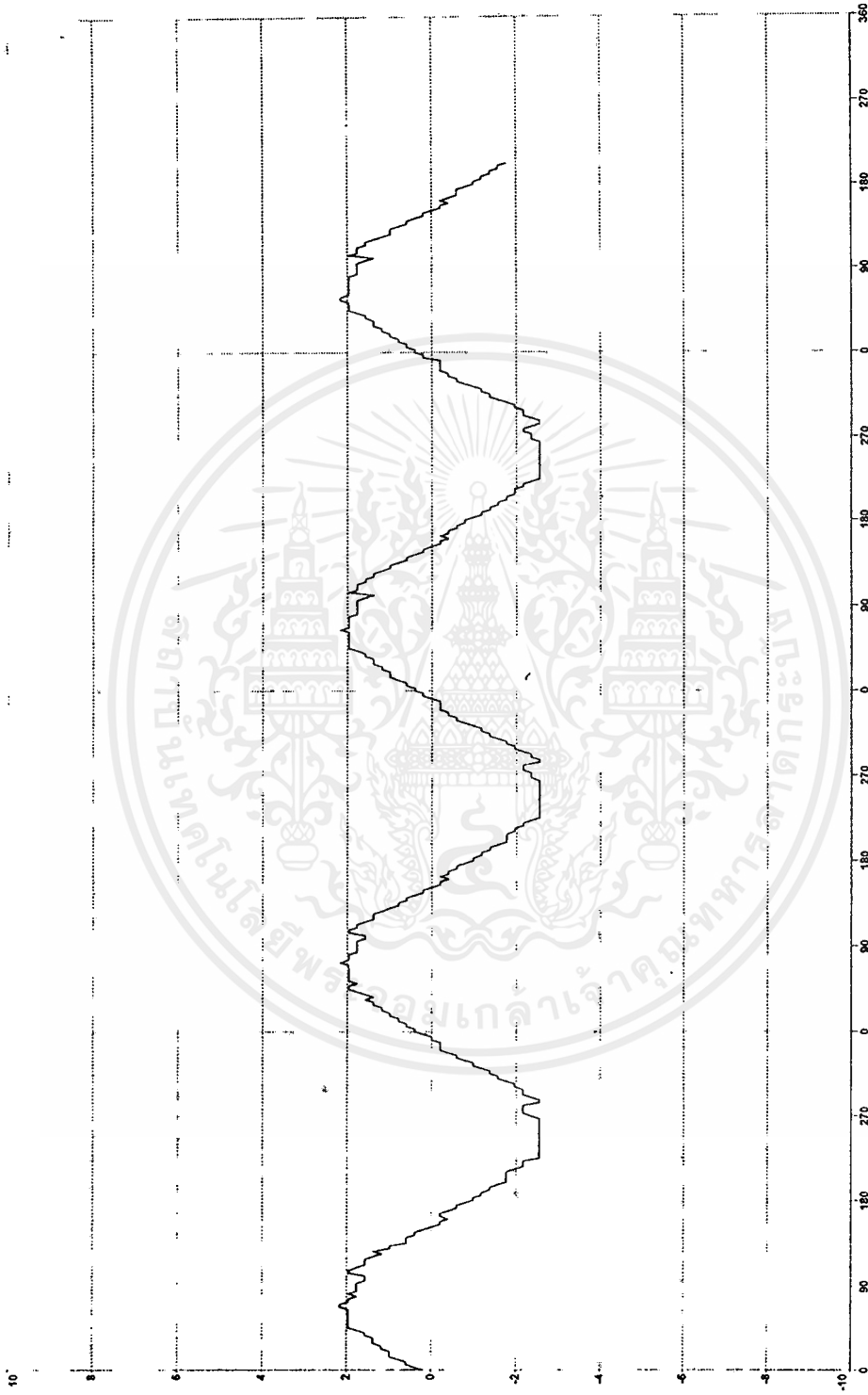
รูปที่ 4.47 Spectrum รูปคลื่นแรงดันค่านับที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์ท/คัลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18:09:43

Harmonic Waveform receiving
Capture Date 04/03/08
Capture Time 18:08:27

3:00:1998
Current L1
Corresponding RMS value 23 A
Fundamental Frequency 49.80 Hz
THD 7.10 %



รูปที่ 4.48 รูปคลื่นกระแสต้านรับที่วัดได้ (ระบบการส่งจ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 Spectrum รูปคลื่นกระแสต้านรับที่วัดได้ (ระบบการส่งถ่ายกำลังแบบ 6 พัลส์ หม้อแปลงต่อแบบ สตาร์/เดลต้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2) สรุปผลการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์

เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ สตาร์- สตาร์ จากผลการทดลองจะพบว่า ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี เช่น กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จะมีค่า 17.68% , กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 มีค่า 8.11% และกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 13 มีค่า 6.17% ซึ่งในทางทฤษฎี กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จะมีค่าประมาณ 20% กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 จะมีค่าประมาณ 14.2% กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 จะมีค่าประมาณ 9.09% และกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 13 จะมีค่าประมาณ 7.69% แต่จะพบว่า กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 4 กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 6 กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 8 กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 9 และกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว ค่ากระแสเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้น สำหรับสาเหตุของการเกิดขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ ส่วนหนึ่งเกิดจากตัว ออกได้ ทรานฟอเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับระบบ สำหรับกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 และลำดับทวีคูณของ 3 เป็นผลจากคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกประการของหม้อแปลง 1 เฟส ทั้งสามตัวที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน

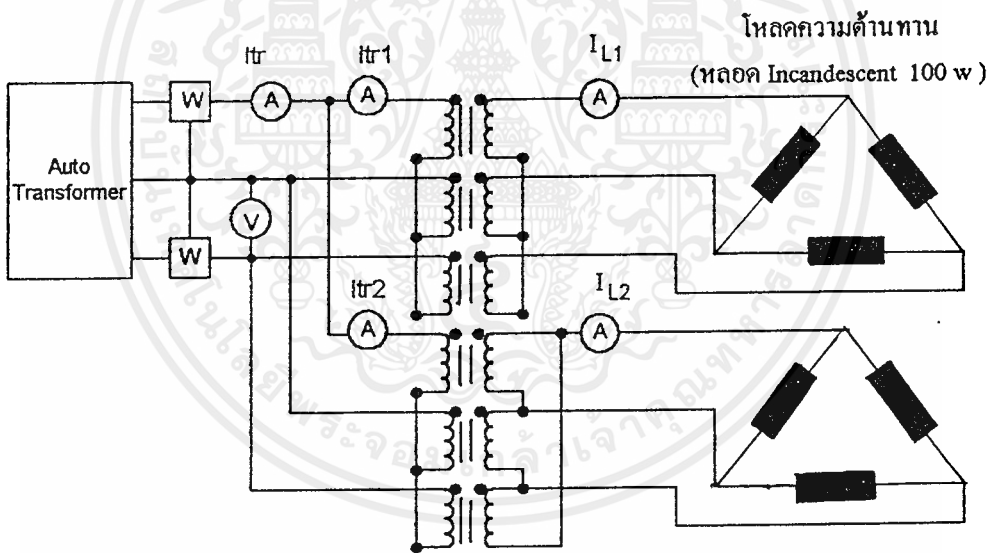
สำหรับผลของการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์- เกลด้า ผลที่เกิดขึ้นจะเกิดเหมือนกับการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์- สตาร์ แต่รูปคลื่นกระแสที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงรูป Sinusoidal มากกว่าการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์- สตาร์ ซึ่งจะเห็นได้จากค่า %THD แต่จะไม่เด่นชัดนัก เมื่อนำการต่อทั้งสองแบบมาเปรียบเทียบกันจะพบความแตกต่างคือ การต่อแบบ สตาร์- สตาร์ กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับต้นๆจะมีค่าสูงกว่า กระแสฮาร์โมนิกส์ของการต่อแบบ สตาร์- เกลด้า แต่เมื่อพิจารณาฮาร์โมนิกส์ลำดับ 6 ขึ้นไป กระแสฮาร์โมนิกส์ของการต่อแบบ สตาร์- สตาร์ จะมีค่าสูงกว่า สำหรับความแตกต่างของรูปคลื่นของการต่อทั้งสองแบบ สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีซึ่งเกิดจากความแตกต่างของเครื่องหมายของแต่ละพจน์ของกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ

เมื่อนำหม้อแปลงทั้งสองชุดมาต่อรวมกันแบบ 12 พัลส์ จะพบว่ารูปคลื่นกระแสจะใกล้เคียง Sinusoidal มากขึ้น กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 , 7 , 17 , 19 จะลดลงมากจนเกือบจะเป็นศูนย์ ซึ่งโดยทางทฤษฎีจะต้องเป็นศูนย์ ส่วนกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 จะยังคงมีอยู่ และค่า Total Harmonic Distortion จะลดลงไปประมาณ 55% ซึ่งจะเป็นผลดีต่อระบบเป็นอย่างมาก

4.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

การทดลองหาประสิทธิภาพของการต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์-สตาร์ และ สตาร์-เดลต้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลองเป็นระบบใหญ่ที่ประกอบด้วย ระบบย่อยๆหลายระบบต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพรวมหรือประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบย่อย ดังนั้นการทดสอบหาประสิทธิภาพที่ระบบย่อยต่างๆจึงเป็นสิ่งจำเป็น ผลการทดลองจะทำให้สามารถมองเห็นการสูญเสียที่จุดต่างๆของระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

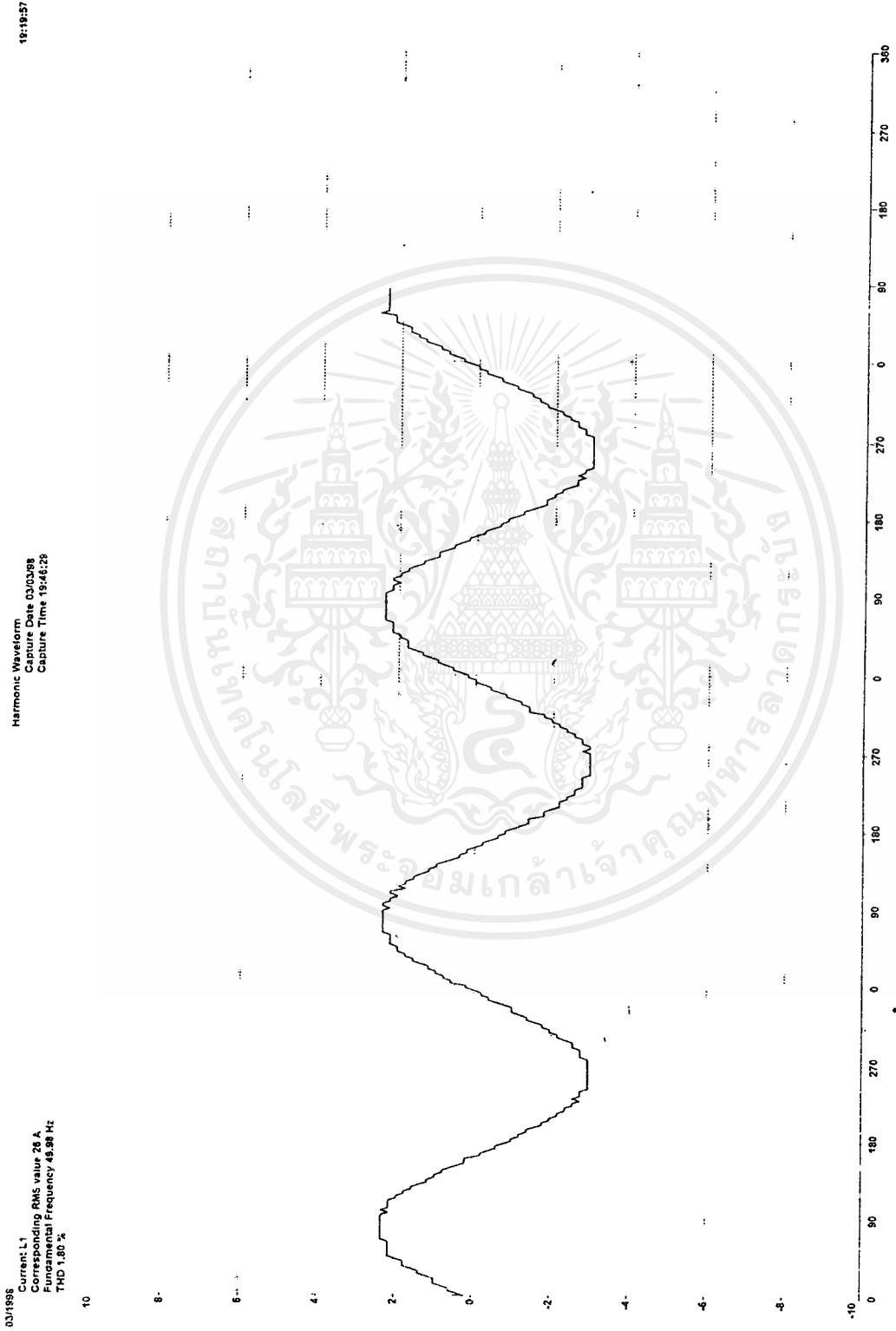
การทดลองได้นำหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัวมาต่อแบบ สตาร์-สตาร์ (Y_0) และหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัวแบบ สตาร์-เดลต้า (D_{11}) แล้วนำมาต่อขนานกันเพื่อทำการจ่ายโหลดซึ่งโหลดที่ใช้เป็นโหลดความต้านทาน(หลอด Incandescent 100W)



รูปที่ 4.50 วงจรการทดลอง

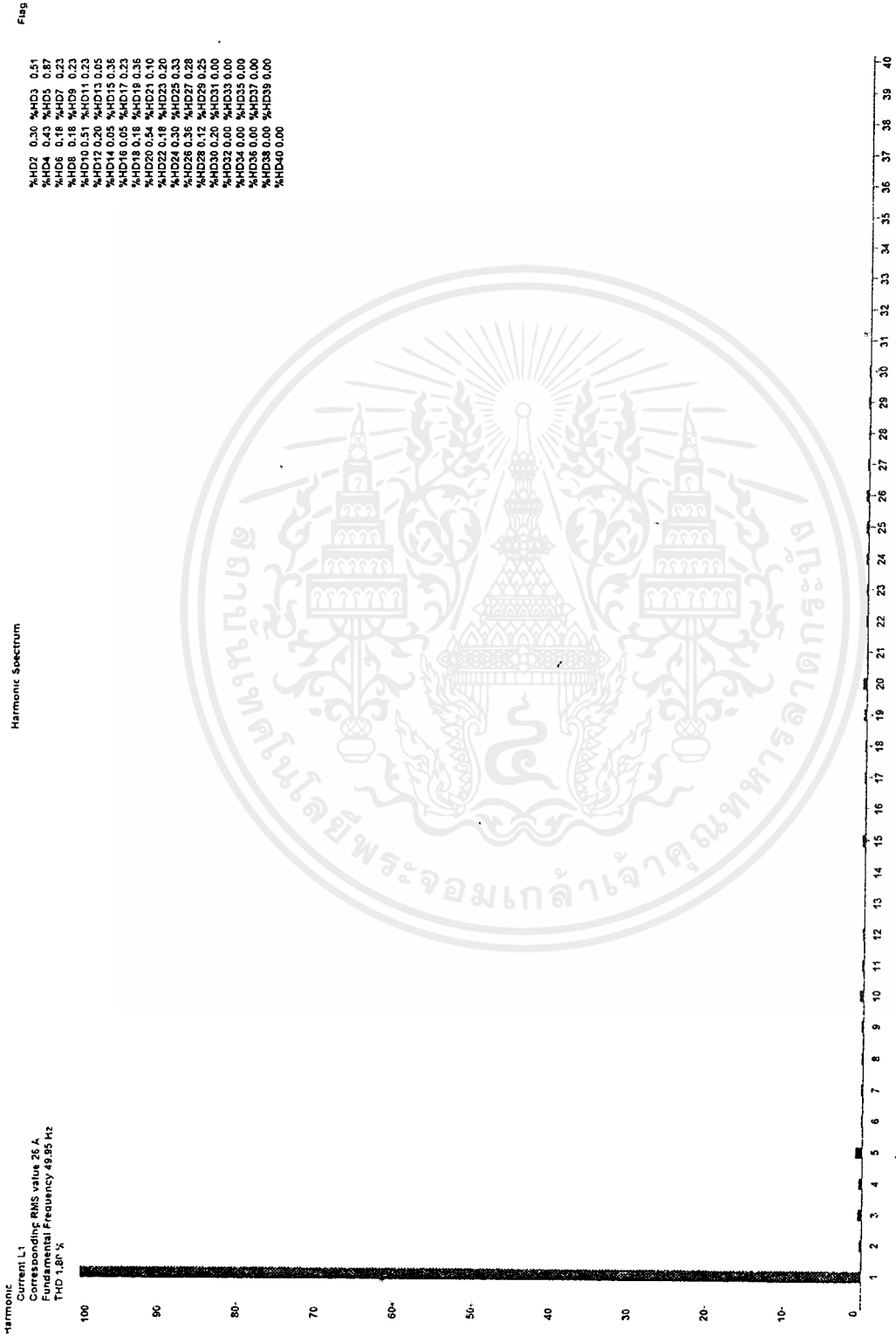
ผลการทดลองที่ 4.4

	V	I_{tr}	I_{tr1}	I_{tr2}	W_{in}	I_{L1}	I_{L2}	V_{o1}	V_{o2}	%eff
Substation A	100	5.16	2.45	2.67	900	1.12	1.28	185	195	87.91%
Substation B	100	5.11	2.41	2.6	875	1.24	1.25	185	189	92.17%



รูปที่ 4.51 รูปคลื่นของกระแส (1๕)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 Spectrum รูปคลื่นกระแส (I_r)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

วัตถุประสงค์หลักของโครงการ ชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ แบบบริคนี้ก็คือ การลดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์และเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายกำลังงานที่มีความถี่แตกต่างกันสองแหล่งจ่ายให้มีพิกัดกำลังสูงขึ้นรวมทั้งเป็นการปรับปรุงให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลองให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ แบบบริค ที่ได้สร้างขึ้นมา เมื่อทำงานในโหมดเรกติฟาย จะมีประสิทธิภาพในการกรองกระแสสูงสุด เมื่อมุมจุดชนวน(α) มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งที่มุมจุดชนวนเดียวกันนี้จะทำให้เกิดค่ารีปเปิลแฟคเตอร์ต่ำสุด ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของระบบสูงสุด ควรที่จะควบคุมให้มุมจุดชนวนเป็น 0 องศาในทำนองเดียวกันเมื่อคอนเวอร์เตอร์ ทำงานอยู่ในโหมด อินเวอร์เตอร์ มุมจุดชนวนที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงสุดคือ 180 องศา

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจเพราะว่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต้นๆ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อระบบ เช่นกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, 5 และ 7 มีขนาดลดลงไปเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสำหรับกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 11 และ 13 จะยังคงมีอยู่ในระบบ จึงได้ออกแบบฟิลเตอร์กระแสสลับมาใช้กรองกระแสฮาร์โมนิกส์ในส่วนที่เหลือนี้แต่ผลไม่เป็นที่น่าพอใจเพราะตัวฟิลเตอร์กระแสสลับนี้กลับกลายเป็นภาระของระบบซะเอง สำหรับความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นมีค่าสูงขึ้นเพราะเกิดจากการที่นำชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์แบบบริคมาต่ออนุกรมกันนั่นเองผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจเช่นกันรวมทั้งประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าก็มีค่าสูงขึ้นด้วย จากเดิมเมื่อใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์แบบบริค ประสิทธิภาพประมาณ 60-75% แต่เมื่อใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์แบบบริค ประสิทธิภาพจะมีค่าประมาณ 70-85% สำหรับการเชื่อมโยงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 2 แหล่งที่มีความถี่แตกต่างกัน วิธีการทดลองซึ่งวางแผนไว้ในตอนแรกก็จะใช้ซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ 2 ตัวเป็นต้นกำเนิดกำลังไฟฟ้าของระบบแต่ไม่สามารถทำได้เพราะลักษณะรูปร่างของแรงดันของเครื่องกำเนิดจะมีค่าเฟสชิฟระหว่างเฟสไม่คงที่และรูปคลื่นแรงดันไม่ได้เป็นรูปไซน์อย่างแท้จริงรวมทั้งการควบคุมความเร็วของตัวต้นกำเนิดและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคอนข้างเป็นไปด้วยความลำบากค่าที่ได้จึงไม่แน่นอน พยายามทำการแก้ไขไปแล้วแต่ไม่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจจึงนำ ฮอโต้ ทรานฟอเมอร์ เข้ามาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนซึ่งโครนัสเจนเนอเรเตอร์ซึ่งผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมาที่ความถี่ 50Hz และอีกด้านหนึ่งของระบบผลิตกำลังไฟฟ้ายังคงใช้ซึ่งโครนัสเจนเนอเรเตอร์ทำการผลิตแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาที่ความถี่ 45 Hz โดยควบคุมความเร็วของต้นกำลังที่นำมาขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ซึ่งได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวต้นกำลัง

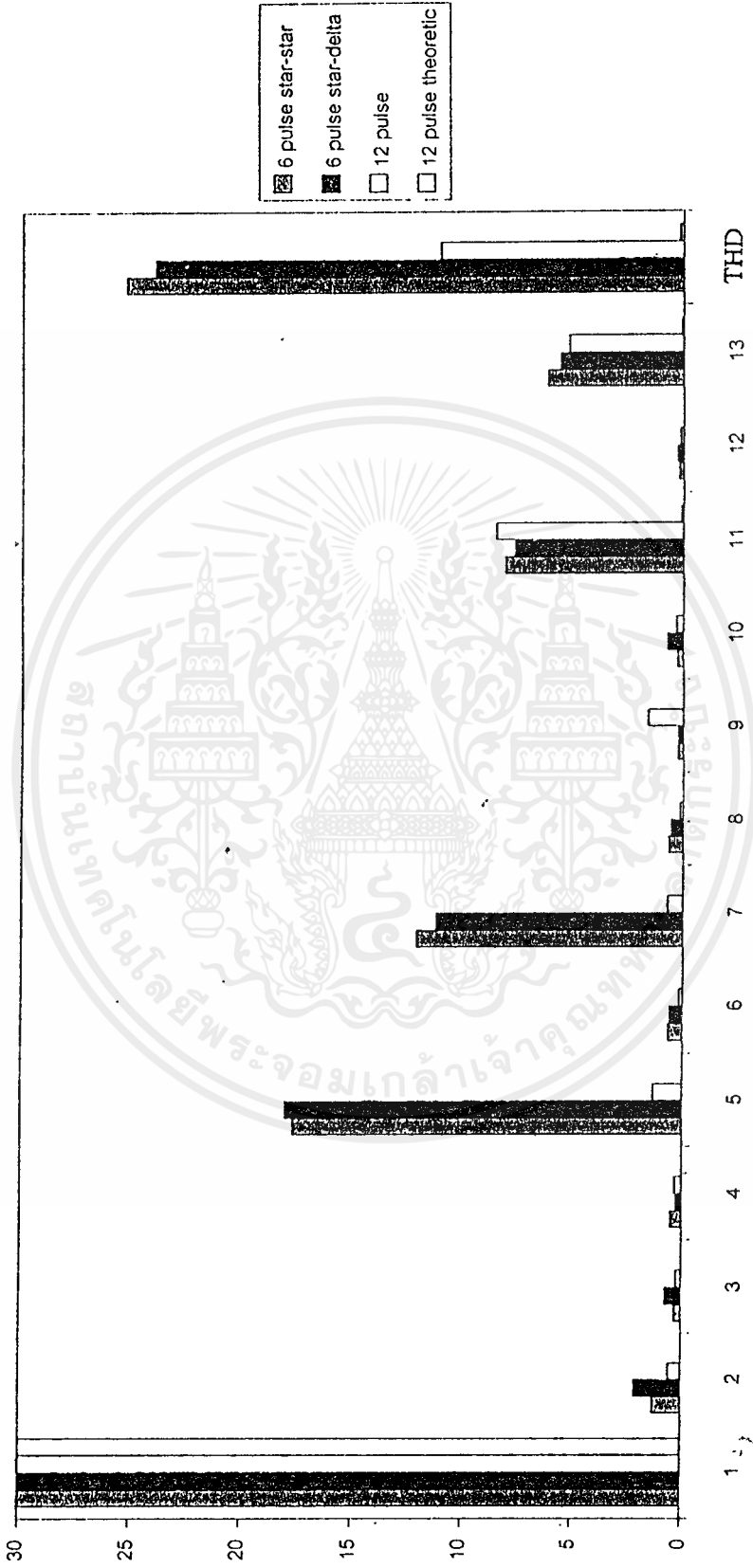
ในการทดลองปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือความยากลำบากในการควบคุมมอดูลชนวนของชุดคอนเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการกระชากของกระแสคังนั้นจึงนำเอาตัวอินดักเตอร์ไปต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำให้การควบคุมมอดูลชนวนทำได้ง่ายขึ้น แต่ก็ทำให้แรงดันเอาต์พุตของชุดคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดมีค่าลดลงและตัวอินดักเตอร์ที่ต่อเข้าไปนั้นมีผลน้อยมากต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นนี้ยังไม่สมบูรณ์ที่เคียวนัก ยังมีข้อควรปรับปรุงอีกมากมาย เช่นควรจะควบคุมมอดูลชริกโดยใช้ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และควรรนำคอมพิวเตอร์มาแสดงให้เห็นถึงการไหลและการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งควรจะเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันต่างๆเข้าไปในระบบด้วย ซึ่งจะทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงทำงานได้ใกล้เคียงระบบจริงมากขึ้น ซึ่งจะสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้ต่อไป

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของ 12 พัลส์บริดคอนเวอร์เตอร์ กับ 6 พัลส์บริดคอนเวอร์เตอร์

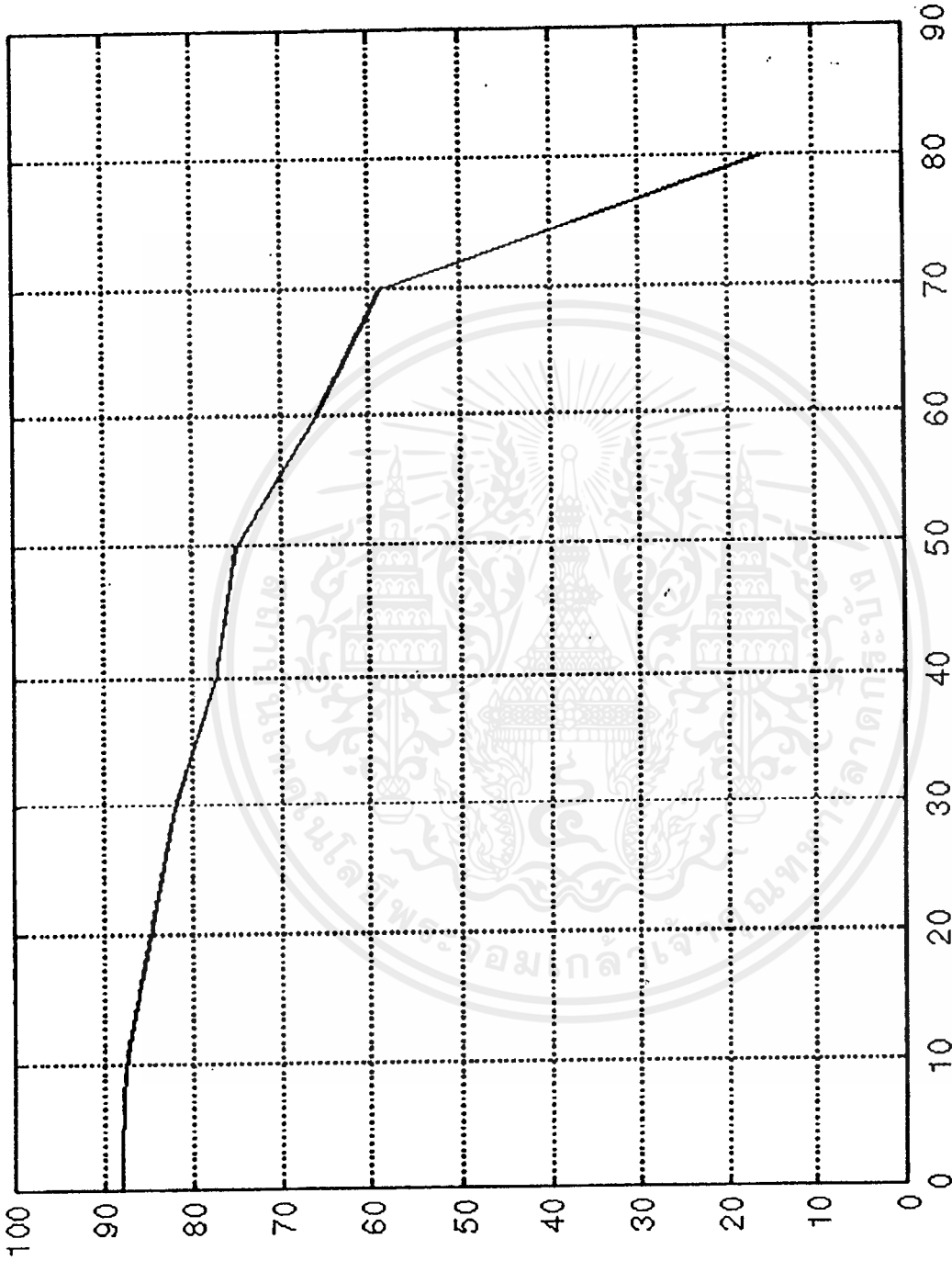
คุณสมบัติ	6 พัลส์	6 พัลส์	12 พัลส์
	สตาร์-สตาร์	สตาร์-เดลต้า	
กระแสฮาร์โมนิกส์ทางด้านส่ง			
HD5	3.75%	4.68%	1.40%
HD7	1.94%	2.17%	0.80%
THD	5.60%	6.15%	5.20%
กระแสฮาร์โมนิกส์ทางด้านรับ			
HD5	6.53%	4.80%	0.93%
HD7	2.84%	2.98%	0.25%
THD	8.80%	7.15%	3.75%
การควบคุมมอดูลชนวน	ง่าย	ง่าย	ค่อนข้างยาก
คิซีโวลท์เร็กกูเลชั่น	2.80%	2.80%	6.15%
ประสิทธิภาพของระบบ	60-75%	60-75%	70-85%
ราคาอุปกรณ์และต้นทุน	ปานกลาง	ปานกลาง	แพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



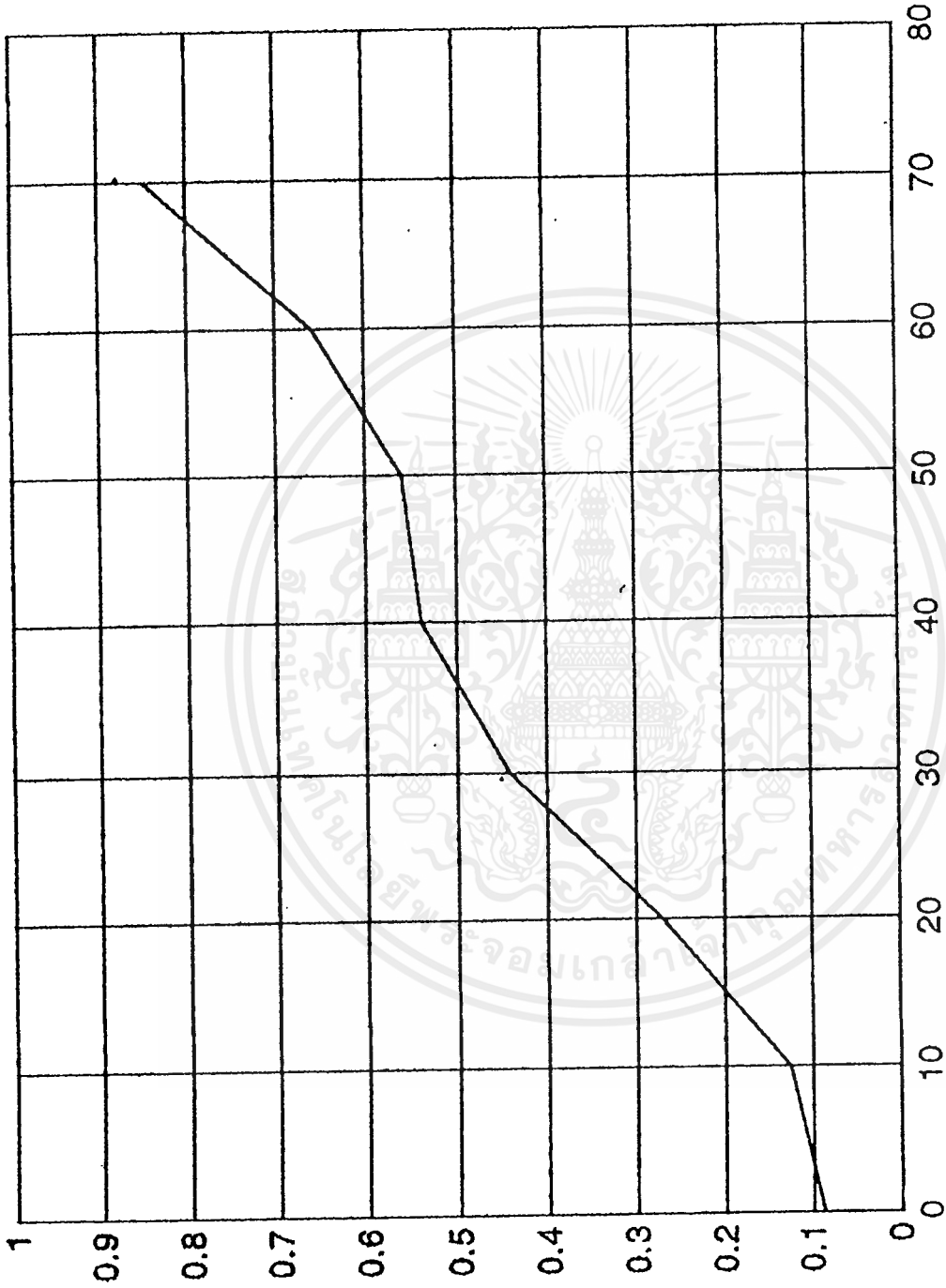
รูปที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบ Spectrum ของกระแสต้านกำลังไฟฟ้าเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเรกติไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



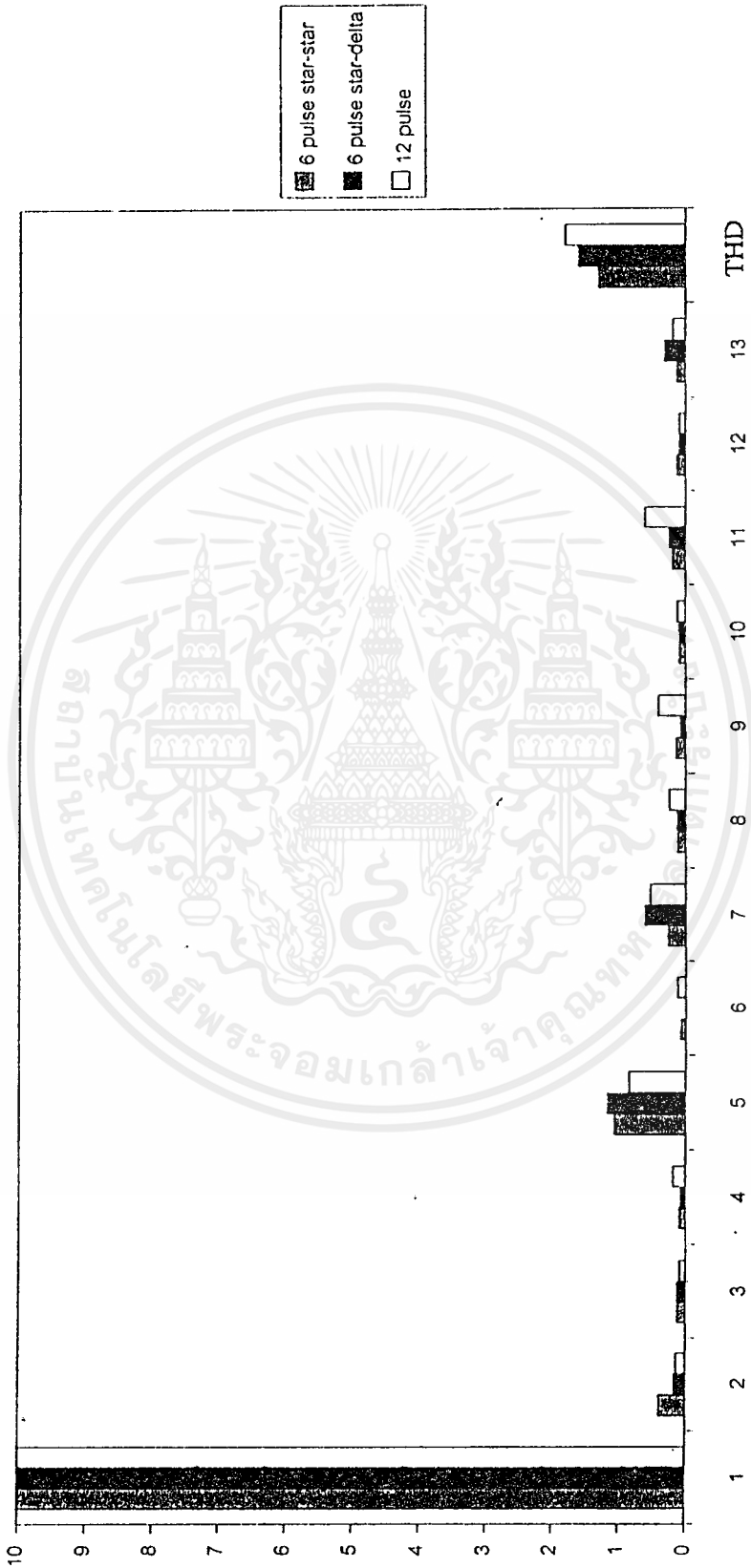
รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการรอกกระแกับมุดชวนวนของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เมื่อทำงานในโหมดเรกติฟาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



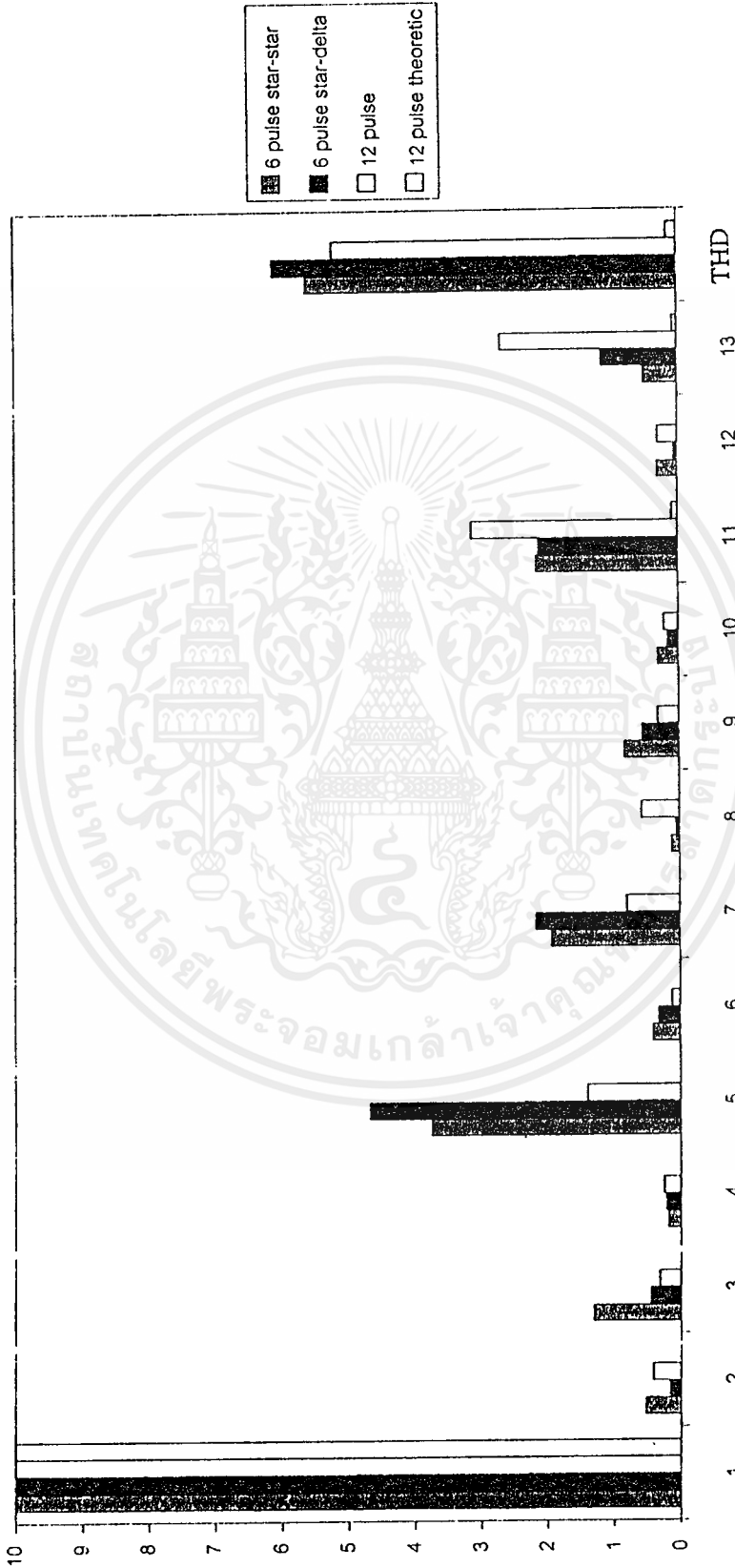
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปิดเพศเตอร์กับมุมมองขบวนการของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ เมื่อทำงานในโหมดเรคคิตไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



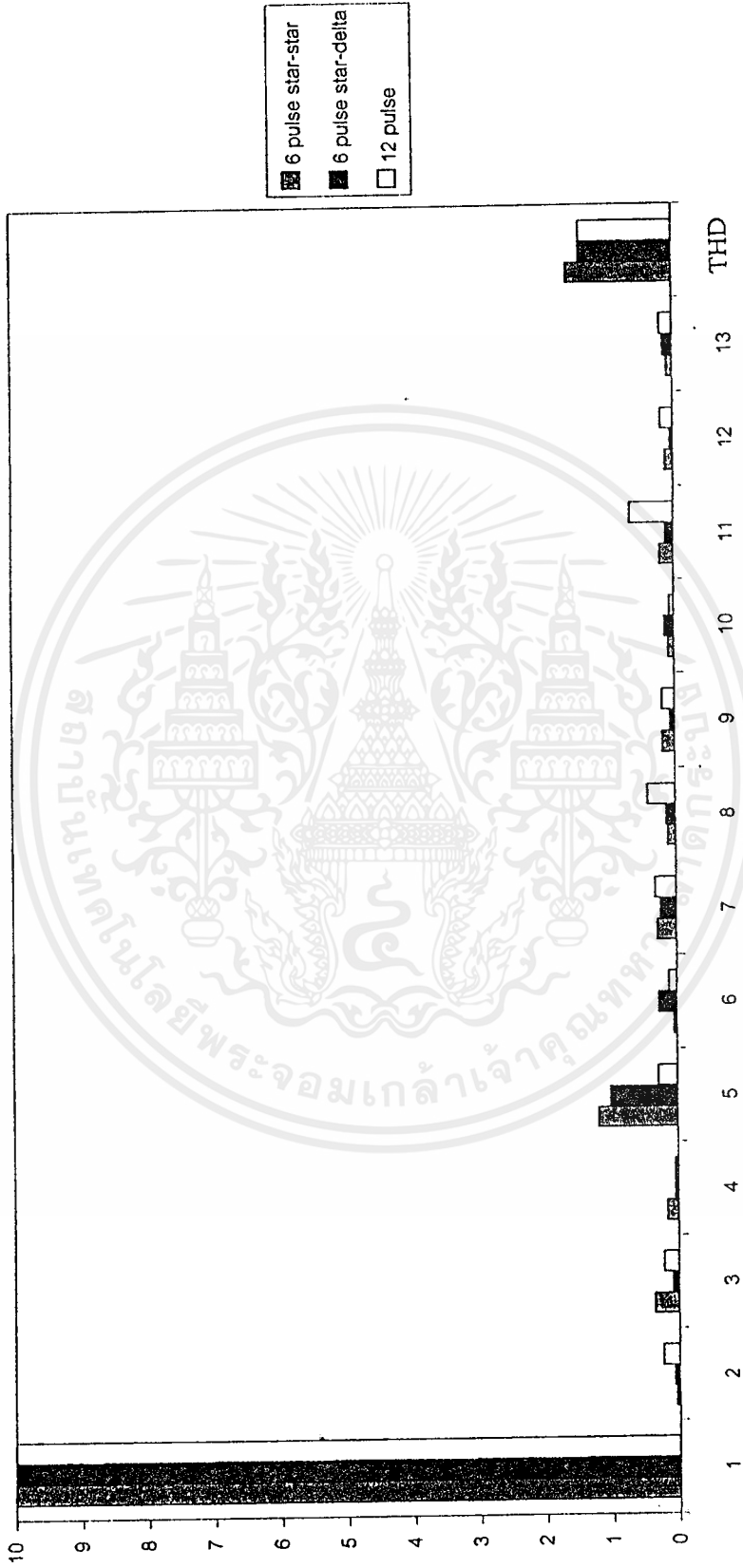
รูปที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของแรงดันด้านส่ง เมื่อคอนเวอร์เตอร์คือเป็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



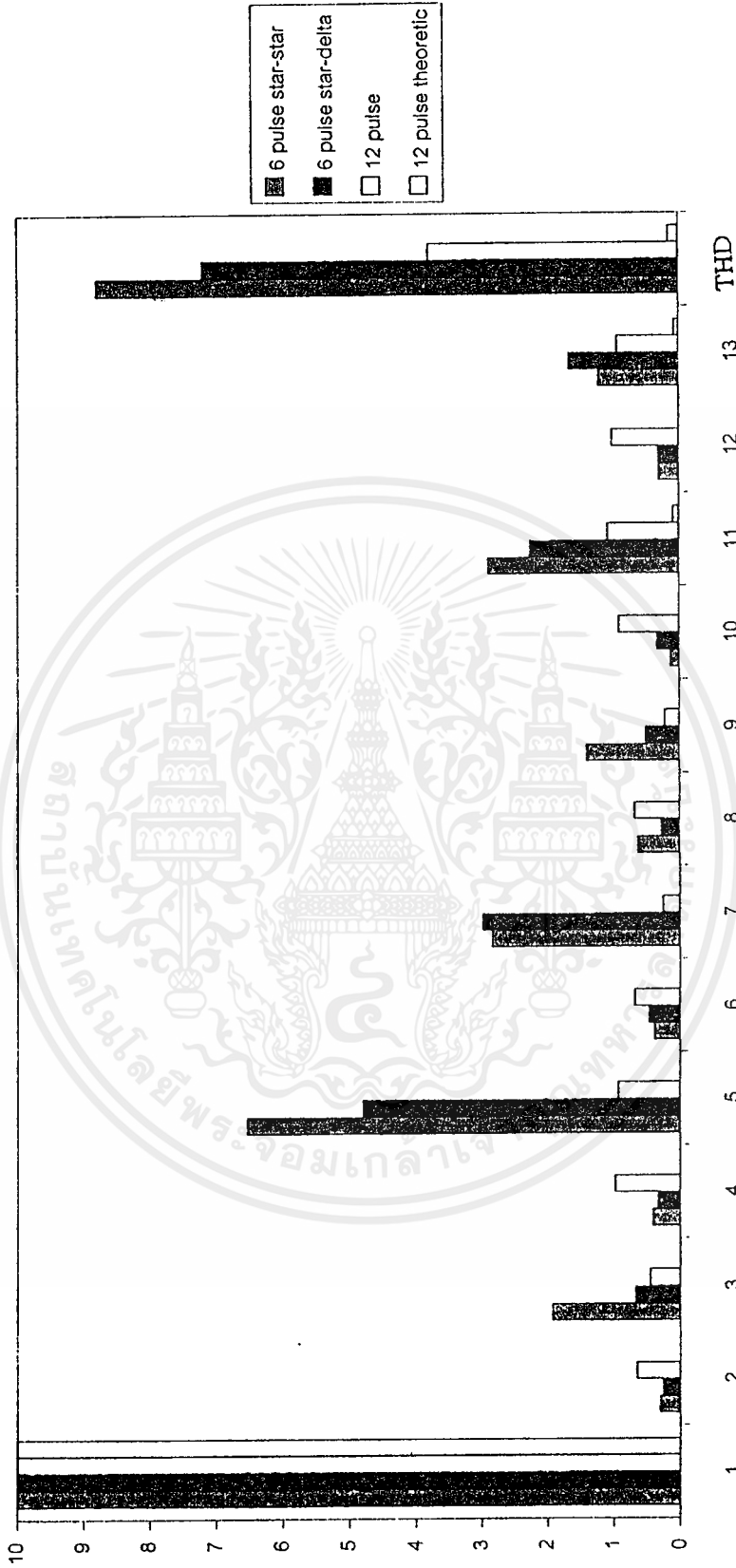
รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของกระแสค้ำส่ง เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของแรงดันด้านรับ เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

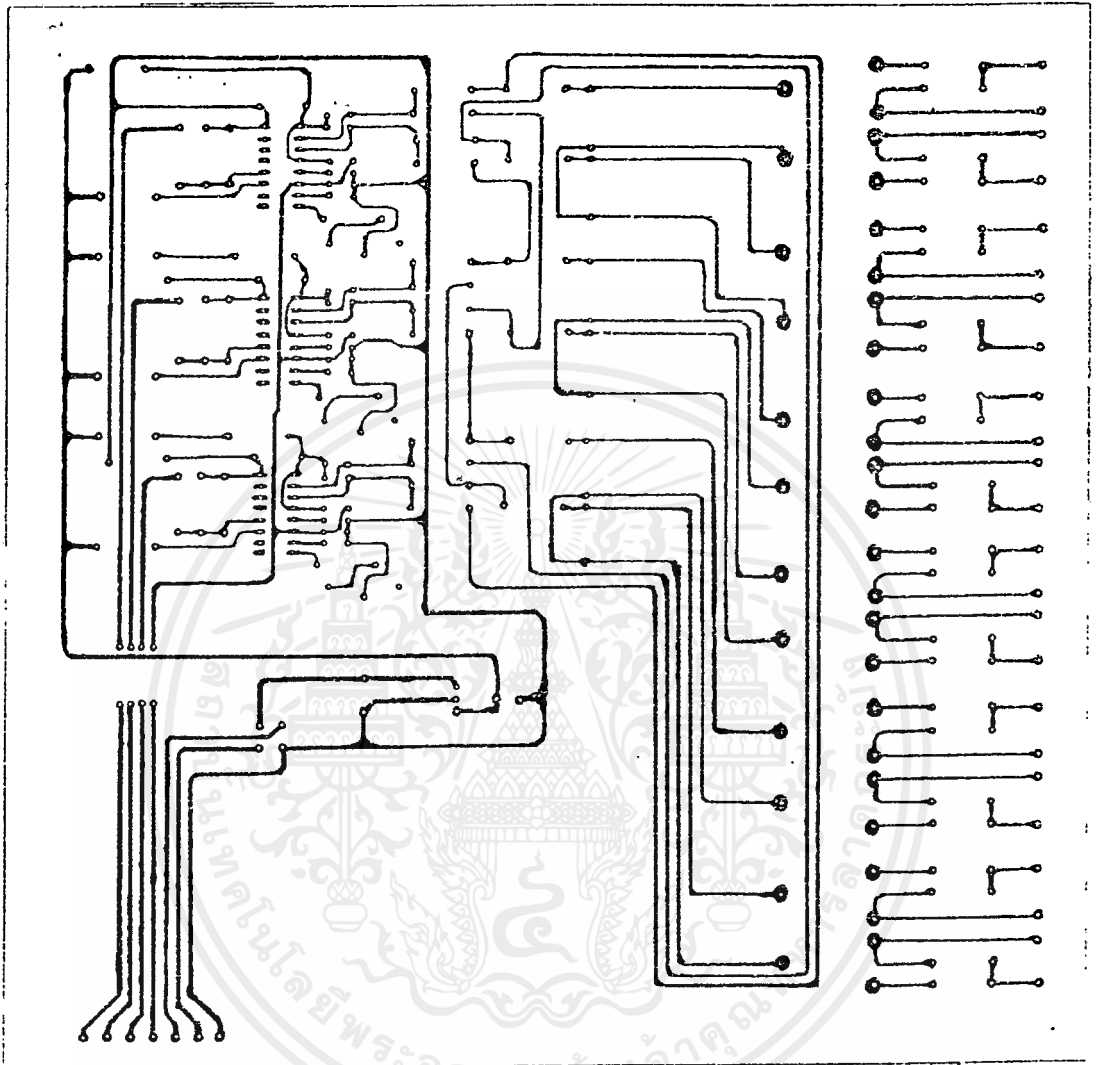


รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบ Spectrum รูปคลื่นของกระแสต้านรับ เมื่อคอนเวอร์เตอร์ต่อเป็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปถ่ายปรินต์วงจรสัญญาณกระตุ้น(1:1.66)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

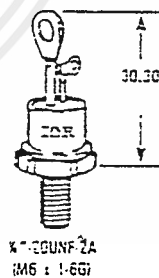
Part Number	VRRM V	I(TAV) A	T _B T _C °C	I _{TSM} (1)		I ² t (1)		V _{GT} (2) V	I _{GT} (2) mA	d _{width} (3) V _{bus}	R _{thJC} °C KW	Package
				50Hz A	60Hz A	50Hz A ² s	50Hz A ² s					
10RIA10 10RIA20 10RIA40 10RIA60 10RIA80 10RIA100 10RIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	10	85	190	200	180	165	2.0	60	300	1.55	TO-208AA (5)
16RIA10 16RIA20 16RIA40 16RIA60 16RIA80 16RIA100 16RIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	16	85	285	300	405	375	2.0	60	300	1.15	TO-208AA (5)
22RIA10 22RIA20 22RIA40 22RIA60 22RIA80 22RIA100 22RIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	22	85	335	355	520	515	2.0	60	300	0.85	TO-208AA (5)
25RIA10 25RIA20 25RIA40 25RIA60 25RIA80 25RIA100 25RIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	25	85	350	370	535	550	2.0	60	300	0.75	TO-208AA* (5)
50RIA10 50RIA20 50RIA40 50RIA60 50RIA80 50RIA100 50RIA120	100 200 400 600 800 1000 1200	50	84	1200	1255	7200	6550	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_{μs}.
- (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. 50RIA120M etc.

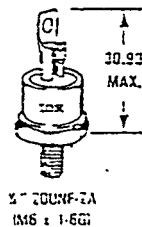
TO-208AA
(TO-49)

14.3 MAX.
ACROSS FLATS



TO-208AC
(TO-65)

17.25 MAX.
ACROSS FLATS



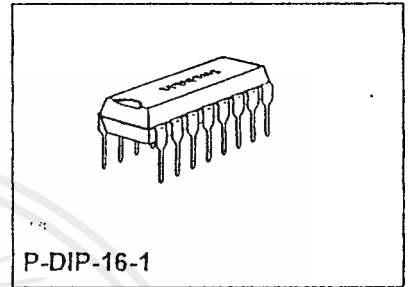
Phase Control IC

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

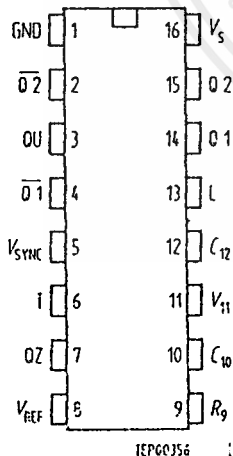


Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

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 Definitions and Functions



Pin Configuration
(top view)

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

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 μ 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.

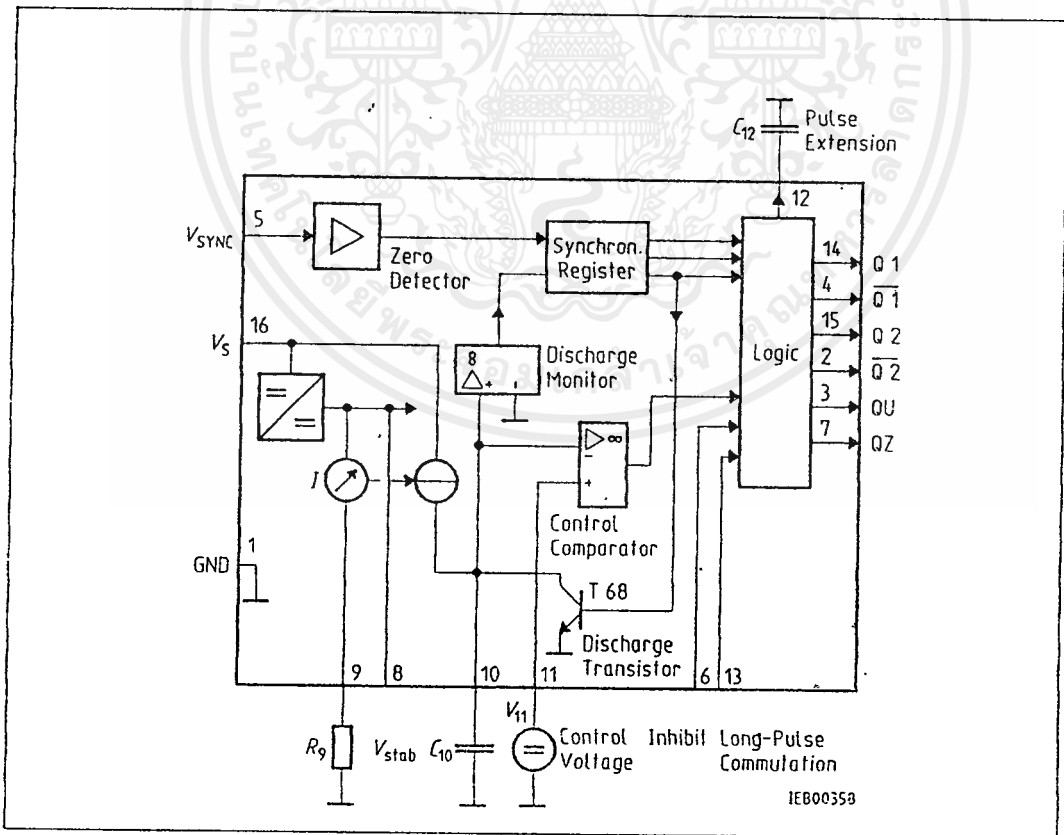
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

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

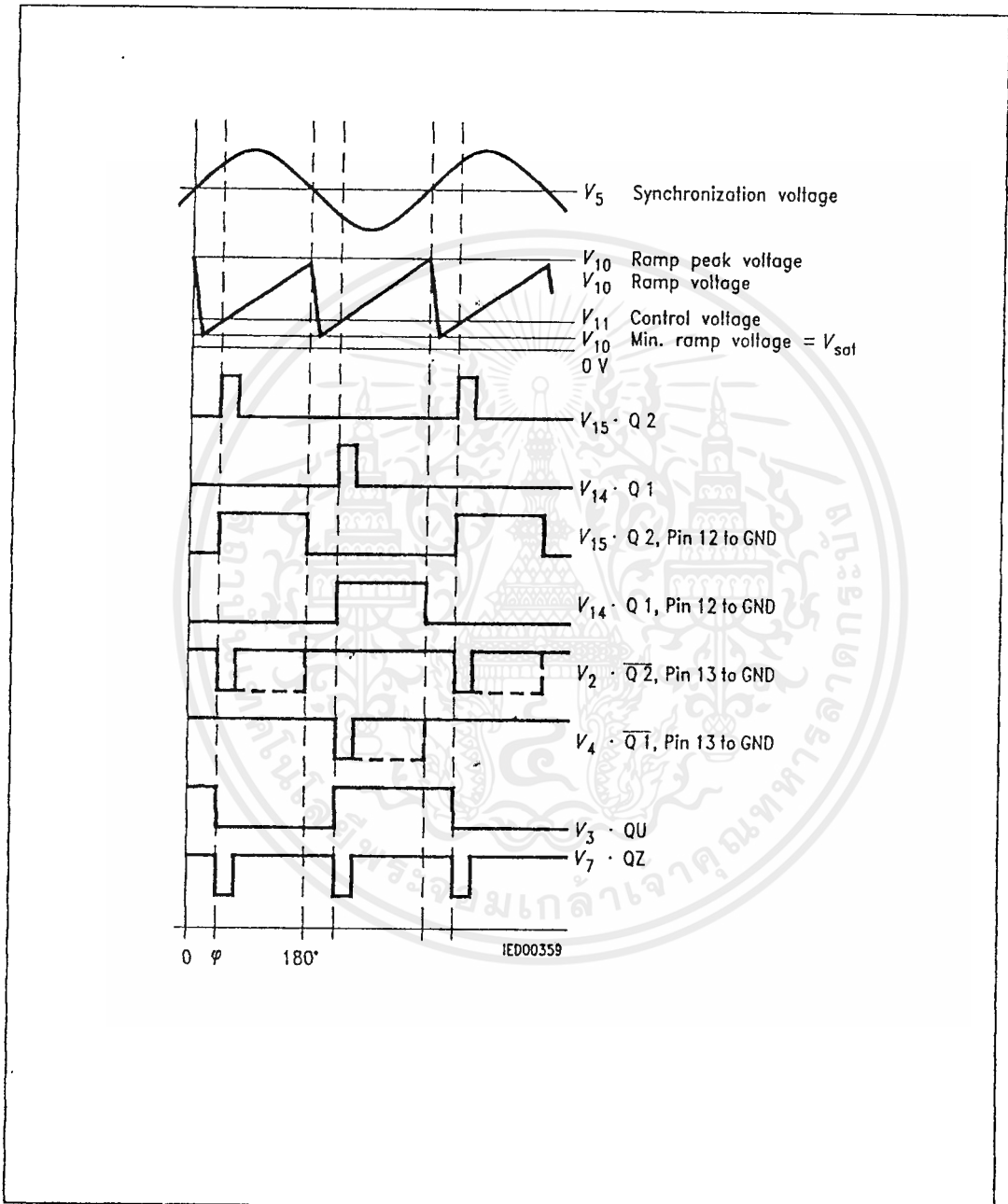
A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

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

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



Block Diagram



Pulse Diagram

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	V_s	-0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	I_o	-10	400	mA
Inhibit voltage	V_i	-0.5	V_s	V
Control voltage	V_{11}	-0.5	V_s	V
Voltage short-pulse circuit	V_{13}	-0.5	V_s	V
Synchronization input current	V_s	-200	± 200	μA
Output voltage at pin 14, 15	V_o		V_s	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	I_o		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	V_o		V_s	V
Junction temperature	T_j		150	C
Storage temperature	T_{stg}	-55	125	C
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

Operating Range

Supply voltage	V_s	8	18	V
Operating frequency	f	10	500	Hz
Ambient temperature	T_A	-25	85	C

Characteristics

$8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ C} \leq T_A \leq 85 \text{ C}; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}; R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	I_s	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current	$I_{5 rms}$	30		200	μA	1
Offset voltage	ΔV_5		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range	V_{11}	0.2		$V_{10 peak}$	V	1
Input resistance	R_{11}		15		k Ω	5

Characteristics (cont'd)

$8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}$; $-25 \leq T_A \leq 85 \text{ C}$; $f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator						
Charge current	I_{10}	10		1000	μA	
Max. ramp voltage	V_{10}			$V/2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	V_{10}	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	R_9	3		300	$\text{k}\Omega$	1
Sawtooth return time	t_r		80		μs	1
Inhibit pin 6						
switch-over of pin 7						
Outputs disabled	V_{6L}		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	V_{6H}	4	3.3		V	1
Signal transition time	t_r	1		5	μs	1
Input current	I_{6H}		500	800	μA	1
$V_6 = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{6L}$	80	150	200	μA	1
$V_6 = 1.7 \text{ V}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-5		5	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 12 \text{ V}$; $C_{10} = 47 \text{ nF}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-20		20	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$						
Deviation of the ramp voltage						
between 2 following						
half-waves, $V_s = \text{const.}$	$\Delta V_{10 \text{ max}}$		± 1		%	
Long pulse switch-over						
pin 13						
switch-over of S8						
Short pulse at output	V_{13H}	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	V_{13L}		2.5	2	V	1
Input current	I_{13H}			10	μA	1
$V_{13} = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{13L}$	45	65	100	μA	1
$V_{13} = 1.7 \text{ V}$						
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current	I_{CEO}			10	μA	2.6
$V_0 = V_s$						
Saturation voltage	V_{sat}	0.1	0.4	2	V	2.6
$I_0 = 2 \text{ mA}$						

Characteristics (cont'd)

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15						
H-output voltage $-I_o = 250 \text{ mA}$	$V_{14/15H}$	$V_s - 3$	$V_s - 2.5$	$V_s - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_o = 2 \text{ mA}$	$V_{14/15L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	t_p	20	30	40	μs	1
Pulse width (short pulse) with C_{12}	t_p	530	620	760	$\mu\text{s}/\text{nF}$	1
Internal voltage control						
Reference voltage	V_{REF}	2.8	3.1	3.4	V	1
Parallel connection of 10 ICs possible						
TC of reference voltage	α_{REF}		2×10^{-4}	5×10^{-4}	1/K	1

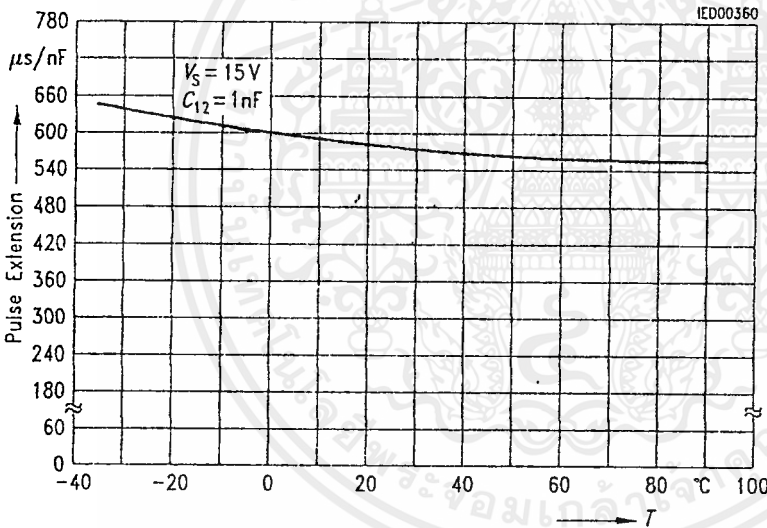
Application Hints for External Components

Ramp capacitance C_{10} min 500 pF max $1 \mu\text{F}^{1)}$ The minimum and maximum values of I_{10} are to be observed

Triggering point $t_{Tr} = \frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K} \quad 2)$

Charge current $I_{10} = \frac{V_{REF} \times K}{R_9} \quad 2)$ Ramp voltage $V_{10 \max} = V_S - 2 \text{ V}$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}} \quad 2)$

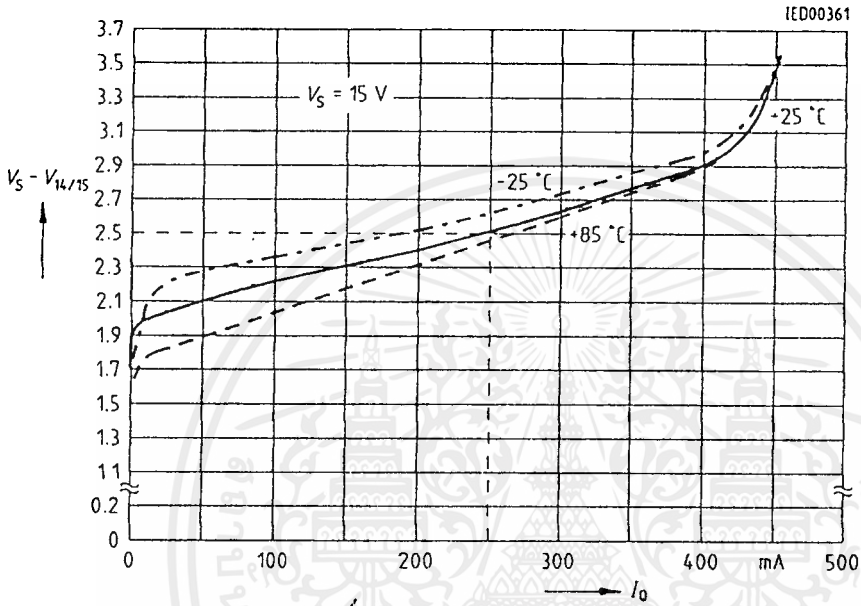
Pulse Extension versus Temperature



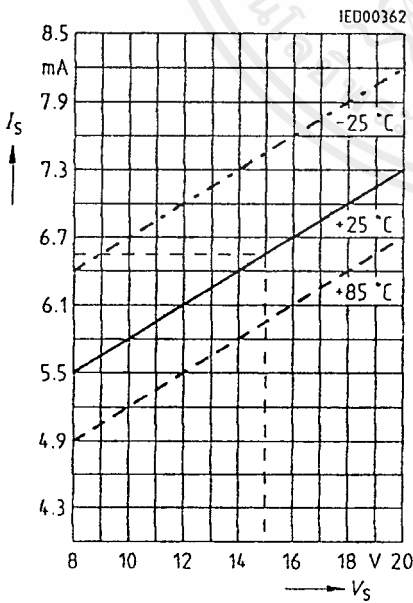
1) Attention to flyback times

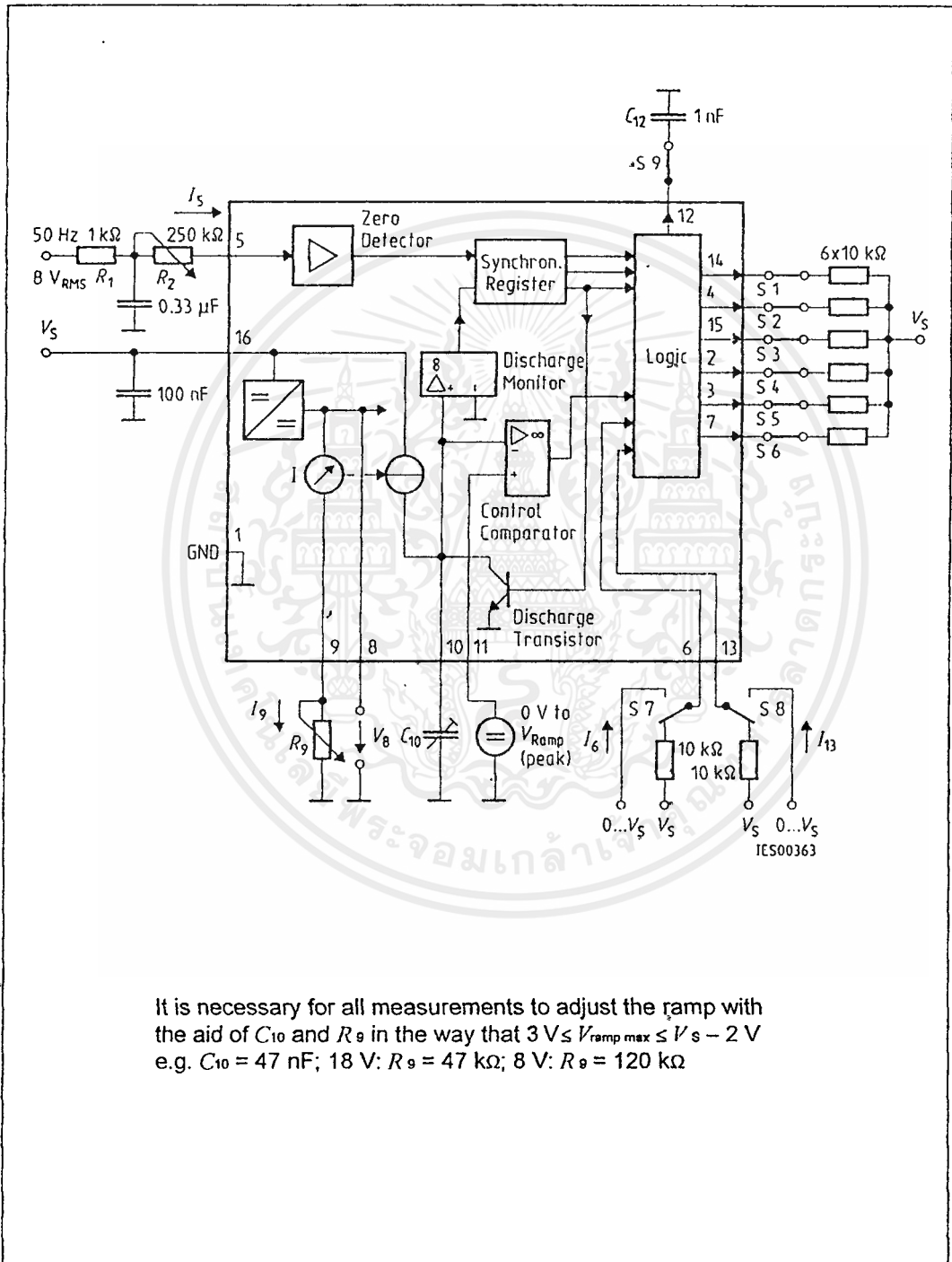
2) $K = 1.10 \pm 20 \%$

Output Voltage measured to + V_S



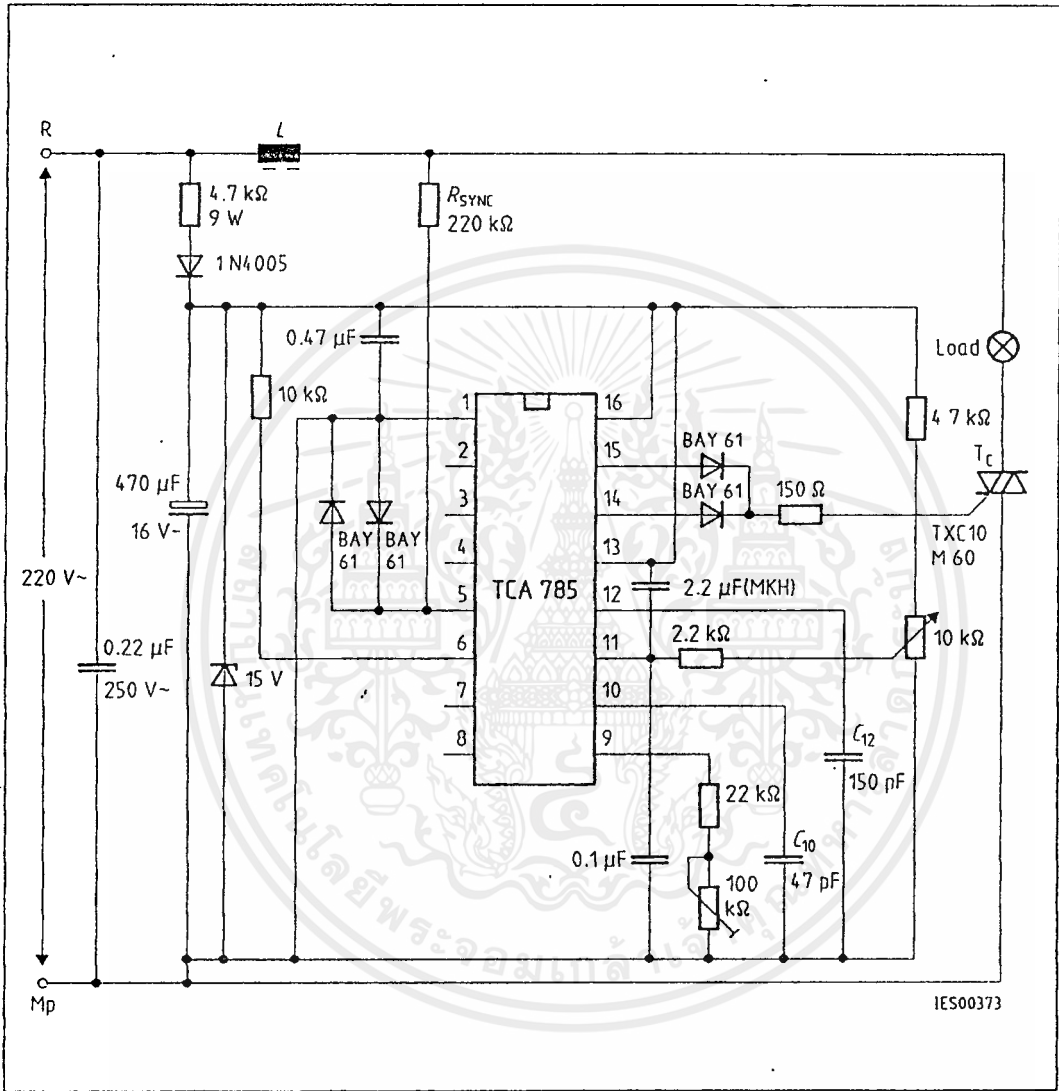
Supply Current versus Supply Voltage





It is necessary for all measurements to adjust the ramp with the aid of C_{10} and R_9 in the way that $3 V_S V_{Ramp\ max} \leq V_S - 2 V$
 e.g. $C_{10} = 47\ nF$; $18\ V: R_9 = 47\ k\Omega$; $8\ V: R_9 = 120\ k\Omega$

Test Circuit 1



Application Examples
Triac Control for up to 50 mA Gate Trigger Current

A phase control with a directly controlled triac is shown in the figure. The triggering angle of the triac can be adjusted continuously between 0 and 180 with the aid of an external potentiometer. During the positive half-wave of the line voltage, the triac receives a positive gate pulse from the IC output pin 15. During the negative half-wave, it also receives a positive trigger pulse from pin 14. The trigger pulse width is approx. 100 μs.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือดูแลเป็นอย่างดีจากอาจารย์ ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยให้คำปรึกษาในด้านระบบการทำงาน ด้านอุปกรณ์ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ คุณจักรพงษ์ จารุมิทร์ นักศึกษาปริญญาโทที่ให้คำแนะนำทางด้านวงจรควบคุมและการทดลอง ตลอดจนทั้งเจ้าหน้าที่ธุรการที่ช่วยแนะนำเกี่ยวกับเอกสารต่างๆ เจ้าหน้าที่สโตร์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ในการทดลองทุกอย่างให้



คณะผู้จัดทำ
25 มีนาคม 2540



เอกสารอ้างอิง

- [1] คมกฤช อนุกุลเวช และ กำจร โปร่งใจ “การวิเคราะห์การทำงานของวงจกรองฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Filter Analysis)” ปรินูญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , 2539 หน้า 24-32
- [2] จตุพร กุลถาวร , เทพจิตร เชยโกลา , วิชัย ลีวนานนท์ชัย และสมศักดิ์ หอมนวน “ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำลอง” ปรินูญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538 , หน้า 14-16, 42-50
- [3] ไชยะ แซ่มซ้อย “Harmonics in Power System {Problems and Solution}” เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ , วันที่ 27-28 สิงหาคม 2539 , หน้า 2/4-2/9
- [4] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล “ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม 2” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรกฎาคม 2537 , หน้า 51-54
- [5] ศุภกิจ จูตะวิริยะ “เอกสารประกอบคำบรรยาย วิชา อิเล็กทรอนิกส์ 2” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538 หน้า 2-9
- [6] ABB Sweden / ABB Group “ABB Power Systems- HVDC,SVC,SC & System Analysis”
[http:// www.abb.sc/pow/home.htm](http://www.abb.sc/pow/home.htm)
- [7] B.R. Pelly “Thyristor Phase Controlled Converters and Cycloconverters operation , control, and performance” John Wiley & Sons, Inc 1971, Toronto, Canada PP 44-49
- [8] G.K. Dubey , S.R. Doradla, A. Joshi and R.M.K. sinha “Thyristorised Power Controllers”Wiley Eastern Limited , New Delhi , India, 1986, PP 103-109
- [9] K.R. Padiyar “HVDC Power Transmission Systems Technology and System Interactions” Wiloy Eastern Limited, New Delhi, India, 1993, PP 12-14,10
- [10] Ned Mohand, Tore M Undeland and William P Robbins “Power Electronic converter, application, and design” John Wiley & Sons, Inc, 1995 , Toronto, Canada, PP 669, 678-680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้