สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

การเปรียบเทียบการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีเรียงกระแสแบบเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล

Comparison of Three Phase ~~Phase~~ control rectifier and Three Phase PWM control rectifier

T042617

โดย

นาย กฤษดา กันทาสีบ

นาย ชัยรัตน์ กันทา

นาย เพ็ญชาติ ประไพทอง

นาย วันชัย แป้นทอง

เลขหมู่
เลขทะเบียน 42617
วัน, เดือน, ปี 4 ธ.ค. 2545

.b.....
.i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเปรียบเทียบการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีเรียงกระแสแบบเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล

ผู้จัดทำ

นาย กฤษดา กันทาสืบ

นาย ชัยรัตน์ กันทา

นาย เพ็ญชาติ ประไพทอง

นาย วันชัย แป้นทอง

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ)

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีเรียงกระแสแบบเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล

นาย กฤษดา กันทาสืบ
นาย ชัยรัตน์ กันทา
นาย เพ็ญชาติ ประไพทอง
นาย วันชัย แป้นทอง
รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ นำเสนอวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถควบคุมแรงดันทางด้านกระแสตรงได้ โดยใช้หลักการทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ 2 แบบ คือ วงจรเฟสคอนโทรลเร็กติไฟเออร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็กติไฟเออร์ โดยจะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่แรงดัน 380 โวลท์ 50เฮิร์ต ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ ที่ความถี่ของการสวิทช์ 10 กิโลเฮิร์ต จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวงจรทั้งสองแบบ โดยเปรียบเทียบถึง ลักษณะและขนาดของแรงดัน (V) กระแส (I) กำลังไฟฟ้าที่ได้ (P) ตัวประกอบกำลัง (PF) ผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้น (THDi ,THDv) ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งจะอธิบายได้ถึงข้อดีและข้อเสียของการนำวงจรทั้งสองไปใช้งาน นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดทางด้านเอาท์พุท โดยโหลดที่ใช้ทดสอบจะเป็น โหลดความต้านทาน และโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison of Three Phase control rectifier and Three Phase PWM control rectifier

Kritsada Kanthasueb
Chairat Kanta
Penchart Prapaithong
Wanchai Panthong
Advisor
Assoc.Prof.Dr. Viriya Pichetchumroen
Dr. Vijit Kinares
Mr. Surin Khomfoi
2000

ABSTRACT

The purpose of this project is to transfer the AC circuit to be the DC circuit that can adjust the output voltage by use of 2 types of power electronic circuit. First is phase control rectifier that usually use and second is PWM control rectifier by transfer AC circuit that have 3 phase 220 volt. 50 Hz to DC circuit at frequency switch 10 kHz. Later ,compare the result of phase control rectifier and PWM control rectifier by compare how the characteristic and value of amplitude voltage(V) ,current (I) ,power (P) ,power factor (PF) and total harmonic distortion of voltage and current (THDi,THDv) be. That can explain the advantage and disadvantage of the use of 2 circuit. Others , the compare of experiment when transfer the load of output by load that use in this experiment is the resistance load and the inductance load both of resistance load.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
-เอสซีอาร์ (Silicon Control Rectifier :SCR)	3
-โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์	3
-การทำงานของเอสซีอาร์	4
-คุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์	5
-กรรมวิธีการนำกระแสของเอสซีอาร์	7
-วิธีการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (Commutation)	9
-การป้องกันเอสซีอาร์	11
-การต่ออนุกรมเอสซีอาร์	13
-การต่อเอสซีอาร์แบบขนาน	14
-ไอจีบีที (IGBT)	15
-ฮาร์มอนิคส์ (Harmonic)	19
บทที่ 3 ทฤษฎีเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล	29
-เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์	29
-พีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์(PWM Control Rectifier)	37
บทที่ 4 วงจรการทดลอง	40
-ส่วนที่ 1 วงจรเฟสคอนโทรล (Phase Control Rectifier)	40
-ส่วนที่ 2 วงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล	42
บทที่5 ผลการทดลอง	44
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	119
กิตติกรรมประกาศ	IX
เอกสารอ้างอิง	X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่2.1 แสดงโครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์ 4

รูปที่2.2 แสดงการไบอัสของเอสซีอาร์ 4

รูปที่2.3 แสดงแบบจำลองเอสซีอาร์ด้วยทรานซิสเตอร์ 5

รูปที่2.4 แสดงกราฟแสดงคุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์ 6

รูปที่2.5 แสดงแบบจำลองทรานซิสเตอร์ของเอสซีอาร์ 8

รูปที่2.6 แสดงการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์โดยวิธีธรรมชาติ 10

รูปที่2.7 แสดงภาพตัดแนวดิ่งของไอจีบีที 16

รูปที่2.8 แสดงคุณลักษณะของกระแสและความต่างศักดิ์ของไอจีบีที 17

รูปที่3.1 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์ 29

รูปที่3.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันระหว่างสายและลำดับของการจุดชนวนเกตของไทรีสเตอร์ 30

รูปที่3.3 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน 31

รูปที่3.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลดความต้านทาน 32

รูปที่3.5 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 33

รูปที่3.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มุมα = 0,30 องศาไฟฟ้า 35

รูปที่3.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มุมα = 0,30 องศาไฟฟ้า 36

รูปที่3.8 การสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulation)โดยการเปรียบเทียบ 2สัญญาณ 37

รูปที่3.9 วงจร One-phase PWM Control Rectifier 38

รูปที่3.10 แสดงวงจร Three-phase PWM control rectifier 39

รูปที่4.1 รูปวงจร Three-Phase Full Bridge Rectifier ของเฟสคอนโทรล 40

รูปที่4.2 แสดงรูปวงจรจุดชนวนเกตุของ SCR โดยใช้ IC เบอร์ TCA785 41

รูปที่4.3 แสดงวงจร Drive SCR 41

รูปที่4.4 แสดงรูปวงจร Full Bridge Rectifier ของ PWM คอนโทรล 42

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจรปรับระดับสัญญาณ 42

รูปที่ 4.6 แสดงวงจร Comparator ที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM311 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงวงจรชุดตรวจจับศูนย์ 43

รูปที่ 5.1 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของแรงดัน Input แรงดัน Output และ กระแส Input ของวงจร Three phase control rectifier 44

รูปที่ 5.2 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของแรงดัน Input แรงดัน Output และ กระแส Input ของวงจร PWM control rectifier 44

รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้า (P)เพาเวอร์เฟคเตอร์(pf) ของวงจร Three phase control rectifier 45

รูปที่ 5.4 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้า (P)เพาเวอร์เฟคเตอร์(pf) ของวงจร PWM control rectifier 46

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt ,Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 47

รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 50

รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 53

รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 56

รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 59

รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 62

รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 65

รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 68

รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 71

รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 77

รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 80

รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 83

รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 86

รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 89

รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt ,Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 92

รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 95

รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 98

รูปที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 101

รูปที่ 5.24 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W , L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier 104

รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Factor Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W 111

รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Factor Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W , L= 2 H 111

รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W 112

รูปที่ 5.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W ,L= 2 H 112

รูปที่ 5.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Output ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W 113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Output ของวงจร Phase Control Rectifier และ วงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R=1100 W , L= 2 H 113

รูปที่ 5.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Losses ของวงจร Phase Control Rectifier และ วงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W 114

รูปที่ 5.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Losses ของวงจร Phase Control Rectifier และ วงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W , L= 2 H 114

รูปที่ 5.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ % THD_V เมื่อ LOAD R=1100 W 115

รูปที่ 5.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ % THD_V เมื่อ LOAD R=1100 W , L=2 H 116

รูปที่ 5.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ % THD_I เมื่อ LOAD R=1100 117

รูปที่ 5.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ % THD_I เมื่อ LOAD R=1100 W , L=2 H 118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ของวงจรเฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ 107

ตารางที่5.2 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ และโหลดความเหนี่ยวนำ 2 เฮนรี่ (H) ของวงจรเฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ 108

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ 109

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ และโหลดความเหนี่ยวนำ 2 เฮนรี่ (H) ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ 110

ตารางที่ 5.5แสดงค่า %THD_v ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W 115

ตารางที่ 5.6 แสดงค่า %THD_v ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W , L=2 H 116

ตารางที่ 5.7 แสดงค่า %THD_I ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W 117

ตารางที่ 5.8 แสดงค่า %THD_I ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W, L=2 H 118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

บทนำ

เนื่องจากแนวโน้มของการขยายตัวทางอุตสาหกรรมภายในประเทศสูงขึ้น จึงทำให้ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามีมากขึ้น จึงต้องมีการหาแหล่งพลังงานเพิ่มขึ้น ทางออกทางหนึ่งคือการนำเข้าพลังงานไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน แต่เนื่องจากแต่ละประเทศใช้ไฟฟ้าที่ความถี่ที่ต่างกัน จึงต้องทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเสียก่อนแล้วจึงแปลงกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ใช้งาน ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier) เป็นตัวแปลง วงจรเรียงกระแสที่ใช้อยู่มักจะมีปัญหาในเรื่องของ ฮาร์มอนิกส์ อยู่ ทำให้ค่ากำลังงานที่สูญเสียไปมีค่าที่มาก ดังนั้นจึงมีการคิดหาวิธีที่จะลดค่าของ ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นให้มีค่าที่น้อยที่สุด

โครงงานชิ้นนี้ เป็นการศึกษาถึงวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้หลักการของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) 2 แบบด้วยกัน นั่นคือ วงจรเฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ (Phase control rectifier) และ วงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ (PWM control rectifier) ในวงจรแบบเฟสคอนโทรลนั้น จะอาศัยหลักการของการปรับเปลี่ยนแรงดันโดยอาศัยมุมจุดชนวนเกต (Trig) ของอุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (เช่น SCR) ในส่วนของ พีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะอาศัยหลักการ นำสัญญาณ PWM มาเป็นสัญญาณจุดชนวนเกต (Trig) ให้กับอุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความถี่ในการ สวิทช์ (Switch) ที่สูง ดังนั้นสัญญาณทางด้านเอาร์พุตทั้งสองจะไม่เหมือนกัน

ในการศึกษาวงจรทั้งสองแบบนี้ จะทำการศึกษาทั้งรูปแบบ ลักษณะการทำงานของวงจรค่าแรงดันและกระแสที่ได้ทางเอาร์พุต กำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายโหลดได้ ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Facter) และฮาร์มอนิกส์ (Harmonic) ที่เกิดขึ้นแล้วนำมาเปรียบเทียบกันว่าวงจรทั้งสองมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันเพียงไร และเมื่อทำการเปลี่ยนโหลดไปจะทำให้เอาร์พุตเปลี่ยนไปเป็นอย่างไร

ในส่วนของปริญญานิพนธ์จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของเอสซีอาร์และไอจีบีทีทั้งลักษณะ สัญลักษณ์ คุณสมบัติต่างๆรวมถึงการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังนำเสนอความรู้เบื้องต้นของฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะบอกถึง ความหมายของฮาร์มอนิกส์ การเกิดฮาร์มอนิกส์ และการป้องกันแก้ไข ทั้งหมดนี้จะนำเสนอในบทที่ 2 ในบทที่ 3 จะกล่าวถึง วงจรเฟสคอนโทรลเร็กติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ 3 เฟสและวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็กติไฟเออร์ ทั้งหลักการทำงานและการคำนวน ในบทที่ 4 จะแสดงถึงวงจรที่ใช้ในการทดลอง ทั้งในส่วนของวงจรเฟสคอนโทรลเร็กติไฟเออร์แบบ 3 เฟสและวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็กติไฟเออร์ ในบทที่ 5 เป็นการแสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการเก็บผลจากการจ่ายโหลดให้กับโหลดค่าความต้านทานและทั้งค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำรวมกัน บทที่ 6 จะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และสรุปผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

<u>วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์</u>

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของการแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีการเรียงกระแสแบบต่างๆ
2. เพื่อศึกษาถึงลักษณะทางด้านอินพุทของวงจรเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล ทั้งลักษณะของกระแส แรงดัน กำลังงานไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังและฮาร์มอนิกส์
3. เพื่อศึกษาถึงผลดีและผลเสียของวงจรเรียงกระแสแบบ เฟสคอนโทรลและแบบพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล

<u>ประโยชน์ที่จะได้รับจากปริญญานิพนธ์</u>

1. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของวงจรเร็กติไฟเออร์แบบเฟสคอนโทรลและแบบพีดับบลิวคอนโทรลเพิ่มขึ้น
2. สามรถบอกถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรเร็กติไฟเออร์แบบเฟสคอนโทรลและแบบ พีดับบลิวคอนโทรลได้
3. สามารเลือกใช้งานวงจรเร็กติไฟเออร์ได้ตามความเหมาะสมของงาน
4. มีทักษะในการปฏิบัติงานทางด้าน Engineering
5. สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาและจำลองวงจรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

เอสซีอาร์ (Silicon Control Rectifier :SCR)

ไทริสเตอร์ (Thyristor) เป็นชื่อทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ P และ N วางเรียงสลับกันสี่ชั้น และคุณสมบัติของสวิตซ์มีการสลัก (Latching Switch) ไทริสเตอร์อาจมี 2,3 หรือ 4 ขั้ว และอาจนำกระแสทางเดียวหรือสองทางก็ได้ ไทริสเตอร์ที่นำกระแสทางเดียวได้แก่ เอสซีอาร์ (Silicon Control rectifier : SCR) และไทริสเตอร์ที่นำกระแสได้สองทางได้แก่ ไทรแอก (Triac ;Triode AC Switch)

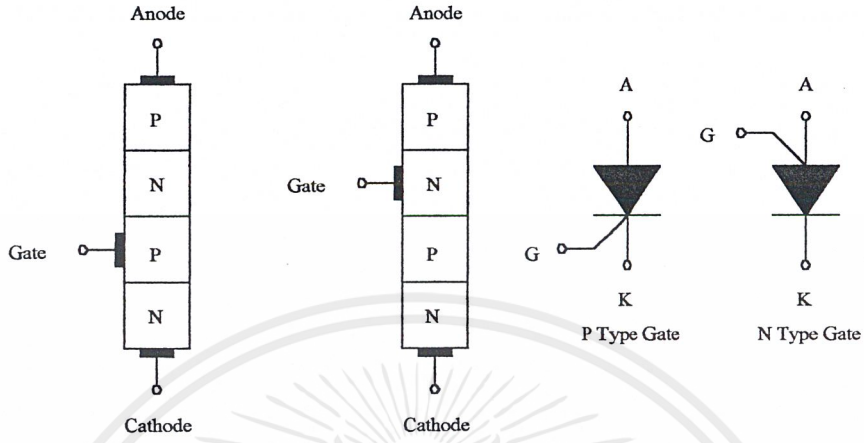
เอสซีอาร์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่จัดอยู่ในตระกูลไทริสเตอร์ (Thyristor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นในปลายปี ค.ศ.1957 โดยทีมวิศวกรของบริษัท เจนเนอร์รอลอิเล็กทริก(General Electric) และได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 และได้พัฒนาขีดความสามารถทางด้านแรงดันและกระแสเรื่อยมา จากขนาดพิกัด 1.6 แอมป์ 25 โวลท์ ขึ้นมาจนถึง 3,500 แอมป์ 4,000 โวลท์ หรือ 6,000 โวลท์ ในปัจจุบันเพื่อใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) และสามารถเพิ่มพิกัดแรงดันและกระแสได้โดยการต่ออนุกรมและขนาน

โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์

เอสซีอาร์เป็นไทริสเตอร์ (Thyristor) ที่นิยมใช้มากที่สุด ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาการทำงานมีความเชื่อถือได้สูงเมื่อใช้ระบบป้องกันที่เหมาะสม การใช้งานเอสซีอาร์ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา และเสียค่าใช้จ่ายต่อแอมแปร์ต่ำ เอสซีอาร์เป็นสวิตซ์ที่มีค่าความต้านทานสูงแม้ในขณะได้รับแรงดันไปหน้า (Forward Voltage) จนกว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนเกตที่เหมาะสมป้อนให้กับขาเกตของเอสซีอาร์ เอสซีอาร์ก็จะเริ่มนำกระแสได้ และค้างสภาวะการทำงาน (Latching) คือนำกระแสต่อไปได้โดยลำพัง ในสภาวะนี้เอสซีอาร์จะมีความต้านทานภายในต่ำมาก

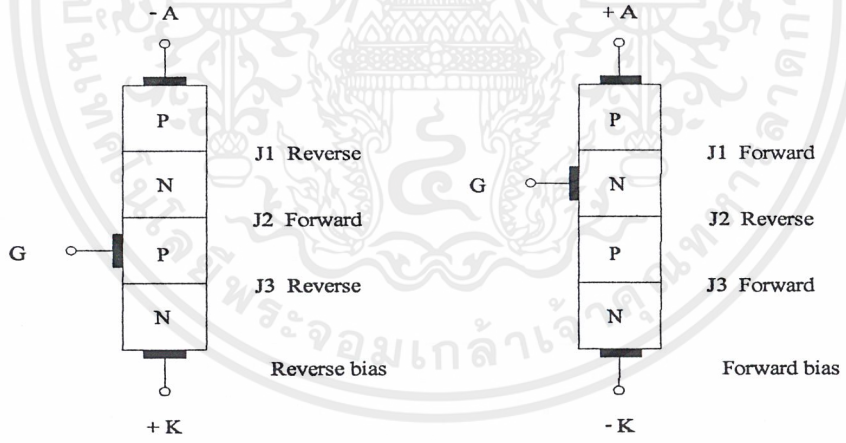
เอสซีอาร์จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอล 4 ชั้น คือ P-N-P-N จึงมี 3 รอยต่อ และมีขั้วต่อไฟฟ้าเพียง 3 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode : K) ขั้วแอโนด (Anode : A) และขาเกต (Gate : G) ดังรูปที่ 2.1 มีทั้งชนิดที่ขาเกตอยู่ที่สารพี เรียกว่า เกตชนิดพี (P-gate) และขาเกตอยู่ที่สารเอ็น เรียกว่า เกตชนิดเอ็น (N-gate) แต่โดยทั่วไปจะเป็นเกตชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

การทำงานของเอสซีอาร์



รูปที่ 2.2 แสดงการไบอัสของเอสซีอาร์

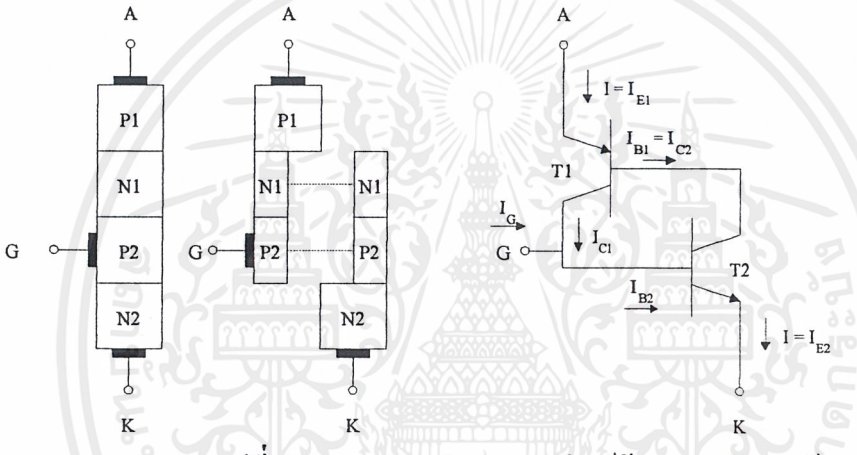
ผลึกสารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ชั้น จะถูกบรรจุไว้ในภาชนะรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งรูปร่างของเอสซีอาร์จะมีลักษณะคล้ายกับไดโอดกำลัง แต่เอสซีอาร์จะมีขั้วเกตอีกหนึ่งขั้ว

การไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) คือ การป้อนศักย์แรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วแอโนด และป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแคโทด สภาวะนี้ถ้าแรงดันไปสูงเกินพิกัดเอสซีอาร์จะไม่นำกระแส ถึงแม้จะป้อนสัญญาณควบคุมให้กับขาเกตก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไบแอสไปหน้า (Forward bias) คือ การป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอโนดและป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้กับขั้วแคโทด สภาวะนี้เอสซีอาร์ก็จะยังไม่สามารถนำกระแสได้ จนกว่าจะป้อนสัญญาณควบคุมเกต โดยขาเกตจะได้ศักย์ไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดเอสซีอาร์จึงจะนำกระแส กระแสไหลผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดได้และเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสแล้วไม่จำเป็นมีสัญญาณเกตอีกต่อไป เอสซีอาร์จะหยุดนำกระเมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์เป็นศูนย์

การทำงานของเอสซีอาร์ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทรานซิสเตอร์ (Transistor model) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองเอสซีอาร์ด้วยทรานซิสเตอร์

ชั้นสาร P-N-P-N สามารถจำลองเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ PNP และ NPN เมื่อป้อน I_C เข้าที่ขาเกตหรือขาเบสของทรานซิสเตอร์ T_2 ก็จะทำให้เกิด I_{C2}หรือ I_{B1} และทรานซิสเตอร์ T_1 ก็จะนำกระแส กระแส I_{C1} ก็จะป้อนให้ขาเบสของ T_2 วนเวียนกันไปจนกระแสเพิ่มถึงจุดอิ่มตัวและถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดกระแส I_C ก็สามารถตัดออกได้

คุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์

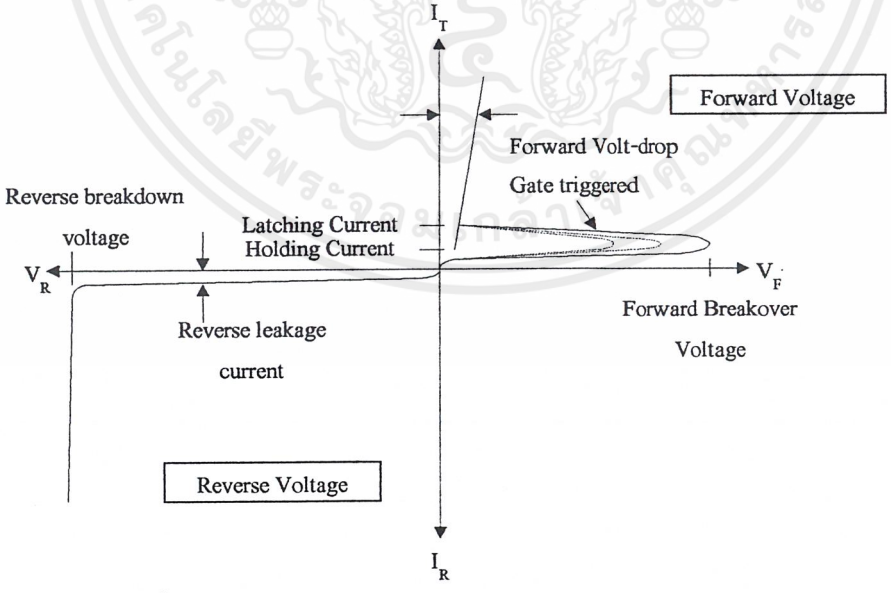
เอสซีอาร์สามารถแบ่งสภาวะการทำงานได้ 3 สภาวะ คือ

1. สภาวะปิดกั้นแรงดันย้อนกลับ (Reverse Blocking)
2. สภาวะปิดกั้นแรงดันไปหน้า (Forward Blocking)
3. สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะ Reverse Blocking เอสซีอาร์ได้รับไบแอสย้อนกลับ (V_R) จะมีกระแสรั่วไหล (I_R) เพียงเล็กน้อย กระแสไหลจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด กระแสรั่วไหลจะทำให้อุณหภูมิของรอยต่อสูงขึ้น ด้วยผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลจึงสูงขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นค่ากระแสสูงสุดภายใต้สภาวะไบแอสแบบย้อนกลับจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิต เพื่อจำกัดผลของความร้อยภายใน แต่อย่างไรก็ตามขณะไบแอสแบบย้อนกลับเมื่อป้อนแรงดันสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดรีเวิร์ดเบรกดาวน์(Reverse Breakdown) จะเกิดผลเช่นเดียวกับไดโอด กระแสจะไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณรอยต่อสูงเกินค่าที่กำหนด

ในสภาวะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิ้ง (Forward Blocking (Off - State)) เอสซีอาร์ได้รับไบแอสไปหน้า (V_D) แต่บริเวณรอยต่อ J2 ระหว่างสาร N_1 และ P_2 ยังคงเป็นไบแอสย้อนกลับ เนื่องจากไม่มีสัญญาณเกต ดังนั้นกระแส (I_D) ที่ไหลระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจึงยังเป็นเพียงกระแสรั่วไหลเท่านั้นในสภาวะ แต่เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบแอสไปหน้าขึ้นไป จนกระแสรั่วไหลเริ่มเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุดฟอร์เวิร์ดเบรกโอเวอร์โวลท์เตจ (Forward Breakover Voltage๗ หรือ V_{BO} แล้วกระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดก็จะลดลงต่ำกว่า V_{BO} เข้าสู่สภาวะนำกระแสได้



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟแสดงคุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอร์เวิร์ดคอนดัคชั่น (Forward Conduction (on - state)๗ เอสซีอาร์ได้รับไบแอสไปหน้า (V_D) และมีสัญญาณจุดชนวนเกตหรือกระแสเกต เอสซีอาร์จะนำกระแสจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดซึ่งมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส (V_T) โดยประมาณ 1-1.5 V ขณะเมื่อเอสซีอาร์เริ่มนำกระแสถ้าหากมีกระแสแอโนด (I_T) สูงกว่าค่ากระแสค้าง (Latching Current : I_L) เอสซีอาร์ก็จะสามารถคงค้างสภาวะการนำกระแสต่อไปได้ โดยมิต้องอาศัยกระแสเกตอีกเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสเต็มที่แล้ว ถ้ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ลดลงต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current : I_H) ของเอสซีอาร์แล้ว เอสซีอาร์ก็จะหยุดการนำกระแสได้เอง

กรรมวิธีการนำกระแสของเอสซีอาร์

เทคนิคการควบคุมให้เอสซีอาร์นำกระแสในขณะไบแอสไปหน้า (Forward Bias) มีวิธีการ ดังต่อไปนี้

1.ป้อนกระแสเกต (Gate Current)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการควบคุมให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยทั่วไป เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้เข้ากับขาเกตเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดแล้ว กระแสจะไหลเข้าชั้นสารชนิดพี (P2) และสารชนิดเอ็น (N2) ครบวงจรที่ขั้วแคโทด (ดังรูปที่ 2.3) ทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวถูกไบแอสและนำกระแส ถ้าแรงดันตกคร่อมแอโนดและแคโทดมีค่าสูงขึ้นกระแสเกตที่ใช้ไบแอสก็จะมีค่าลดลง เอสซีอาร์ เมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) สูงกว่ากระแสค้างแล้ว สามารถตัดกระแสเกต ออกได้โดยเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไป แต่ถ้าตัดกระแสเกตออกโดยที่กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าต่ำกว่ากระแสค้างแล้วเอสซีอาร์ก็จะไม่สามารถนำกระแสต่อไปได้ ดังนั้นสัญญาณเกตจะต้องมีความกว้างพอที่จะทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์สูงกว่ากระแสค้างก่อนที่จะตัดกระแสเกตออก

2.ใช้แสง (Light)

เอสซีอาร์แบบที่ใช้แสงจุดชนวนเกตมีชื่อเรียกว่า LASCR (Light Activated SCR) สร้างขึ้นโดยให้มีช่องโปร่งแสง เพื่อให้แสงลอดไปถึงสารที่เป็นขาเบสของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นในรูปที่ 2.5 ด้วยคุณลักษณะรอยต่อพีเอ็นที่สามารถเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นได้เมื่อมีพลังงานแสงตกกระทบ เมื่อมีคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นจำนวนมากก็จะเกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวกและทำให้เอสซีอาร์นำกระแสต่อไปได้

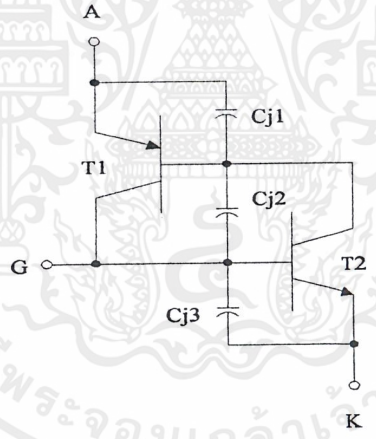
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ใช้แรงดันไฟฟ้าสูง (High Voltage)

ขณะที่เพิ่มแรงดันไปหน้า (Forward Voltage) ให้สูงขึ้นจนมากพอที่จะทำให้บริเวณรอยต่อเกิดเบรกดาวน์แล้ว เอสซีอาร์จะเปลี่ยนไปยังสภาวะการนำกระแสได้โดยไม่ต้องมีกระแสเกต สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง โดยทั่วไปแรงดันเบรกโอเวอร์ไปหน้าจะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์ย้อนกลับ

4.การเพิ่ม dv/dt

เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันต่อเวลา (dv/dt) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ถ้ามีค่าสูงมากจะทำให้เกิดกระแสเกตแบบชั่วครู่ขึ้น (I=Cdv/dt) เนื่องจากค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแอโนดกับขาเกต และขาเกตกับขั้วแคโทด ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นอาจมากพอที่จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง ค่า dv/dt จะเพิ่มสูงขึ้นโดยการใช้ตัวต้านทานค่าต่ำๆต่อระหว่างขาเกตและขั้วแคโทด



รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองทรานซิสเตอร์ของเอสซีอาร์

5.ใช้ความร้อน (Thermals)

จากรูปที่ 2.5 ถ้าอุณหภูมิของเอสซีอาร์สูงขึ้น จะมีกระแสรั่วไหลสูงขึ้นและทำให้ เพิ่มขึ้นตามเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กระแสรั่วไหลอาจเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกๆอุณหภูมิที่สูงขึ้น 80°c ดังนั้น $\alpha 1+\alpha 2$ จะเข้าใกล้ 1 มากขึ้น ทำให้เอสซีอาร์สามารถเข้าสู่สภาวะนำกระแสได้ จึงเป็นสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามทฤษฎีของทรานซิสเตอร์แล้ว I_C จะมีความสัมพันธ์กับ I_E และ I_{CBO} ซึ่งเป็นกระแสรั่วไหลระหว่างรอยต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ดังนี้

$$I_T = I_{CBO} + I_E \quad \ldots(2.1)$$

ที่ T1 : $$I_{C1} = \alpha 1 I_A + I_{CBO1} \quad \ldots(2.2)$$

ที่ T2 : $$I_{C2} = \alpha 2 I_A + I_{TCBO2} \quad \ldots(2.3)$$

$$I_A = I_{C1} + I_{TC2}$$

$$= \alpha 1 I_A + \alpha 2 I_K + I_{CBO1} + I_{TCBO1} \quad \ldots(2.4)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad \ldots(2.5)$$

ดังนั้น $$I_A = (\alpha_2 I_B + I_{CBO1} + I_{CBO2}) \div [1-(\alpha_1+\alpha_2)] \quad \ldots(2.6)$$

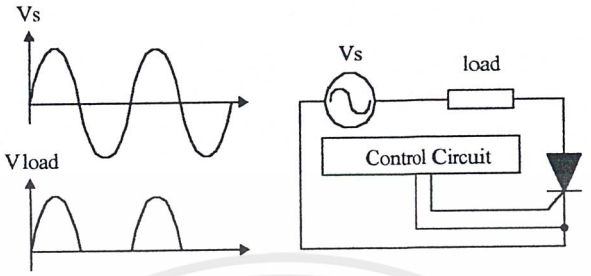
วิธีการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (Commutation)

เมื่อเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะนำกระแสเต็มที่ โดยมีกระแสแอโนดสูงกว่ากระแสยึดแล้ว การตัดกระแสเกตออกจะไม่ทำให้กระแสเอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส จะใช้วิธีการ *สับเปลี่ยนกระแส(Commutation)* ทำได้โดยการลดหรือทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าต่ำกว่ากระแสยึดเป็นเวลานานกว่า Turn Off Time : t_q ของเอสซีอาร์ เอสซีอาร์จึงจะหยุดนำกระแส การสับเปลี่ยนกระแส แบ่งได้ 3 วิธีคือ

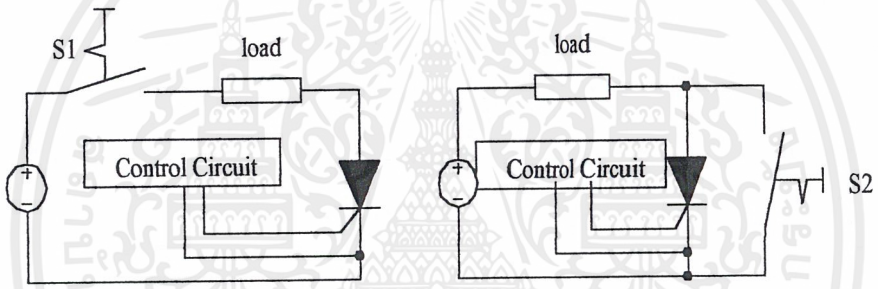
1.วิธีธรรมชาติ (Natural Commutation)

ในกรณีที่เอสซีอาร์ต่ออยู่ในวงจรที่สามารถทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้เองโดยไม่ต้องอาศัยวงจรควบคุมจากภายนอกเรียกว่า *การสับเปลี่ยนโดยธรรมชาติ* เช่น เอสซีอาร์ที่ต่ออยู่ในวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสจะลดลงสู่ศูนย์ทุกๆรอบคลื่นในช่วงบวก และเอสซีอาร์จะได้รับแรงดันย้อนกลับในทุกๆรอบคลื่น ถ้าช่วงเวลาที่ได้รับแรงดันย้อนกลับไปจนถึงเวลาที่รอบคลื่นช่วงบวกกลับมาอีกครั้งนานกว่า Turn Off Time ของเอสซีอาร์ ก็จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ ซึ่งวิธีนี้เกิดจากธรรมชาติของแหล่งจ่ายไฟสลับหรือเรียกว่า *Line Commutation* ดังนั้นวิธีนี้จะต้องจุดชนวนเกตให้เอสซีอาร์นำกระแสทุกๆรอบคลื่นของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 2.6 (ก) วิธีนี้จะแตกต่างจากเอสซีอาร์ในวงจรที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากเอสซีอาร์ได้รับแรงดันไปหน้าจากแหล่งจ่ายตลอดเวลา การลดกระแสเอสซีอาร์ลดลงต่ำกว่ากระแสยึดอย่างง่ายจะทำได้โดยการปิดสวิตช์วงจร หรือแบ่งกระแสจากเอสซีอาร์ผ่านวงจรขนาน ดังรูปที่ 2.6 (ข) แต่การใช้งานจริงจะใช้วิธีบังคับ (Forced Commutation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การหยุดนำกระแสในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีธรรมชาติ



(ข) การหยุดนำกระแสอย่างง่ายในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 2.6 แสดงการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์โดยวิธีธรรมชาติ

2.วิธีการจัดโหลดให้เหมาะสม (Load Commutation)

โหลดที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมโดยอยู่ในสภาวะถ่วงน้อย (Under damped) เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสจะเป็นการสวิตช์ให้กระแสไหลผ่านโหลด กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะตกลงสู่ศูนย์โดยธรรมชาติของโหลด ทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสยึด และถ้าเป็นเวลานานกว่า Turn Off Time จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ เช่น วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (Series Inverter)

3.วิธีบังคับ (Forced Commutation)

การควบคุมให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกที่ไม่ได้เป็นทางไหลผ่านของกระแสโหลดตามปกติ เรียกว่า *วิธีบังคับ* เป็นการทำให้กระแสไหลลดลงสู่ศูนย์ โดยทั่วไปจะใช้เก็บประจุจ่ายแรงดันย้อนกลับให้แก่เอสซีอาร์ เช่น วงจรชอปเปอร์ (Choppers Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกันเอสซีอาร์

การป้องกันแรงดันเกินพิกัดชนิดทรานเซียนต์

ในการใช้งานของเอสซีอาร์นั้น อาจจะมีภาวะที่ผิดปกติเกิดขึ้นได้ เช่น มีแรงดันเกินพิกัดที่กำหนดไว้ สภาวะเหล่านี้จะทำให้เอสซีอาร์มีอายุการใช้งานสั้นลงหรืออาจเสียหายได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

1)แรงดันเกินพิกัดจากภายในวงจร

เกิดจากโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ ในช่วงที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส ตัวเหนี่ยวนำนี้จะสร้างแรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง ตกคร่อมเอสซีอาร์ซึ่งจะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้

2)แรงดันเกินพิกัดจากภายนอกวงจร

เกิดจากหม้อแปลงที่จ่ายแรงดันให้เอสซีอาร์ มีหลายกรณีคือ

-เมื่อมีการเปิดวงจรทางขดปฐมภูมิ

-เมื่อมีการเปิดวงจรทางขดทุติยภูมิ

-เมื่อมีกระแสเสิร์จ (Surge Current) เข้ามาทางขดปฐมภูมิ

-เมื่อฟิวส์ในวงจรขาดจริงๆ

-เมื่อโหลดในวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำสูง ก็จะมีผลต่อหม้อแปลงในช่วงที่เอสซีอาร์นำกระแสและหยุดนำกระแส

การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลา (di/dt)

เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลามีค่ามากกว่าขีดจำกัดของเอสซีอาร์จะทำให้เกิดความร้อนสูงมากจนไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน จึงทำให้เอสซีอาร์หรือไทรแอกเสียหาย การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาสามารถทำได้โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับเอสซีอาร์ จากวงจรในรูปที่ 2-33 เมื่อทำการจุดชนวนเอสซีอาร์ที่มุม 90 องศาซึ่งเป็นมุมที่แรงดันอินพุตมีค่าสูงสุด

จากวงจรเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสจะได้สมการ

$$I = V_m / R\,(1-e^{(-R/L)t}) \qquad \ldots(2.7)$$

$$di/dt = V_m / L\,(e^{(-R/L)t}) \qquad \ldots(2.8)$$

เมื่อเอสซีอาร์นำกระแส แทนค่า t =0

$$di/dt = V_m / L \qquad \ldots(2.9)$$

ดังนั้นสมการค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ลด di/dt ของเอสซีอาร์ คือ

$$L = V_m / di / dt \qquad \ldots(2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ Lให้แทนค่ายอดแรงดันและค่า di/dt ของเอสซีอาร์ที่นำมาใช้ในวงจร ในสมการที่ 2.10

การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา (dv/dt)

ถ้าเกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมเอสซีอาร์ต่อเวลา สูงกว่าขีดจำกัดของเอสซีอาร์ จะเป็นผลทำให้เอสซีอาร์นำกระแส โดยไม่ต้องใช้สัญญาณจุดชนวนเกต วิธีป้องกันที่ดี คือการใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ซึ่งเรียกว่า วงจร สนับเบอร์ (Snubber Circuit) ต่อคร่อมระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดของเอสซีอาร์ โดยทั่วไปใช้ค่าความต้านทานโดยประมาณ 15 โอห์มและค่าตัวเก็บประจุ Cs = 0.1 μf และค่าตัวเหนี่ยวนำเพื่อใช้ลด di/dt ในกรณีที่ต่อวงจรสนับเบอร์คำนวณจากสมการดังนี้

$$L = R_s V_m / dv_{AK} / dt \qquad \ldots(2.11)$$

การป้องกันกระแสเกินพิกัด

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดจะใช้ป้องกันเอสซีอาร์เมื่อเกิดการลัดวงจร ซึ่งมีสองกรณีคือ ลัดวงจรที่เอสซีอาร์ และลัดวงจรที่โหลด อุปกรณ์ป้องกันนี้ปกติจะใช้ฟิวส์ ฟิวส์จะเป็นอุปกรณ์ที่ตัดวงจรได้เร็วที่สุด หลักการเลือกใช้ฟิวส์ คือ เลือกฟิวส์ให้ตัดวงจรออกก่อนที่ ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวเอสซีอาร์สูงเกินจนทำให้เสียหายได้ ค่า i^2t ของฟิวส์ต้องต่ำกว่าค่า i^2t ของเอสซีอาร์ และแรงดันที่เกิดการอาร์กของฟิวส์จะต้องไม่สูงกว่าสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันที่จ่ายให้เอสซีอาร์ ดังนั้นฟิวส์ที่ใช้ต้องเป็นฟิวส์แบบ Fast Acting หรือฟิวส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor fuse) จะตัดกระแสในวงจรได้รวดเร็วมาก

การพิจารณาและเลือกใช้ขนาดพิกัดเอสซีอาร์

การเลือกใช้เอสซีอาร์ นั้นต้องพิจารณาถึงจุดมุ่งหมายหลักในการใช้งานก่อน เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์ที่ให้กระแสไหลทิศทางเดียว แต่ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กระแสสูงๆก็อาจจะใช้เอสซีอาร์แทนไทรแอก เนื่องจากไม่มีไทรแอกที่มีพิกัดสูงพอ อาจจะหายากในท้องถิ่น และราคาไทรแอกสูงกว่าใช้เอสซีอาร์สองตัว การพิจารณาเลือกใช้ขนาดพิกัดของเอสซีอาร์มีหลักเบื้องต้นโดยรวมดังนี้

1. ขีดจำกัดทางด้านแรงดัน

ต้องพิจารณาค่าแรงดันเบรกโอเวอร์ทั้งด้านไปหน้าและย้อนกลับของเอสซีอาร์ให้มีค่ามากกว่าแรงดันที่ป้อนให้เอสซีอาร์ เช่น ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220Vเอสซีอาร์ต้องทนแรงดันได้มากกว่าค่าสูงสุดของแรงดันรูปไซน์คือ 1.414x220 = 308 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขีดจำกัดทางด้านกระแส

เอสซีอาร์ที่ใช้จะต้องทนกระแสได้สูงกว่ากระแสโหลดแบบต่อเนื่อง ส่วนค่ากระแสเสิร์จสูงสุด (Peak Surge Current) ควรมีค่าประมาณ 15 เท่าของกระแสโหลด ปกติกระแสเสิร์จสูงสุดจะคิดใน 1 รอบคลื่น (cycle) ตัวอย่างเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1,100 VA ใช้แรงดัน 220 V กระแสโหลด = 1,100/220 = 5 A จะต้องใช้เอสซีอาร์ที่ทนกระแสเสิร์จสูงสุดใน 1 รอบคลื่นคือ 5x15 = 75 A

3.ความไวในการจุดชนวนเกต

กระแสและแรงดันที่จุดชนวนเกตของเอสซีอาร์ จะต้องสูงกว่าค่ากระแสและแรงดันที่ใช้ในการจุดชนวนที่กำหนดไว้ เพื่อให้มีความไวในการจุดชนวนเกตพอ เช่น วงจรจุดชนวนเกตจ่ายกระแสได้สูงสุด 50mA ที่ 2 V เอสซีอาร์จะต้องมีค่ากระแสเกต (I_{GT}) สูงสุดไม่เกิน 50mA ที่ V_{GT} = 2 V เป็นต้น

4.ความเร็วในการใช้งาน

เอสซีอาร์จะต้องใช้เวลากลับสู่สภาพหยุดนำกระแส (t_q) ไม่เกินกว่า 0.5 f (f เท่ากับความถี่ของแรงดันที่ใช้งาน) เช่น ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz เอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส 50 ครั้งต่อวินาที เวลา t_q ของเอสซีอาร์จะต้องน้อยกว่า 10 ms เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติความถี่ต่ำๆ เอสซีอาร์สามารถใช้ได้ดีอยู่แล้ว เพราะค่า t_q โดยทั่วไปมีค่าเป็นไมโคร วินาที

5.กระแสรั่วไหล

เอสซีอาร์ที่ใช้จะต้องมีกระแสรั่วไหลทั้งทางด้านไปหน้า และย้อนกลับ น้อยกว่ากระแสที่โหลดจะทำงานได้ ซึ่งค่านี้เป็นตัวจำกัดการใช้งานของเอสซีอาร์กับโหลดน้อยๆ

6.แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ขณะนำกระแส

แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ขณะนำกระแสต้องไม่มากจนเกิดผลต่อวงจรด้านโหลด เช่น โหลดที่ต้องทำงานโดยแรงดันไม่ต่ำกว่า 6 โวลต์ เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 7 โวลต์ เอสซีอาร์ที่ใช้จะต้องมีแรงดันตกคร่อมตัวเอง ขณะนำกระแสไม่เกิน 7-6 = 1 โวลต์ มิฉะนั้นโหลดจะไม่สามารถทำงานได้ เป็นต้น

การต่ออนุกรมเอสซีอาร์

การทำงานเมื่อเอสซีอาร์ต่ออนุกรม

จะต่อเอสซีอาร์อนุกรมเมื่อวงจรใช้แรงดันสูงเกินพิกัดที่เอสซีอาร์ตัวเดียวไม่สามารถทนได้ การใช้งานจะนำคุณลักษณะของการใช้งานเอสซีอาร์ที่อนุกรมกันนั้นมาพิจารณาร่วมกันจากกราฟเป็นคุณลักษณะแรงดันไปหน้าของเอสซีอาร์ 2 ตัว ที่ใช้ต่ออนุกรมกันค่าแรงดันปิดกั้นกระแสทางไปหน้า (V_D) จะเพิ่มขึ้นจากเดิม การพิจารณากระแสที่จุด (I_D) จะเห็นว่าที่กระแสเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน (เป็นวงจรอนุกรม) แรงดันที่ตกคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัวอาจจะไม่เท่ากัน แต่ค่าแรงดันรวมก็จะเท่ากับผลบวกของ V_D ของเอสซีอาร์ทั้ง 2 ตัว

คุณลักษณะทางด้านแรงดันย้อนกลับของเอสซีอาร์ก็จะพิจารณาในทำนองเดียวกับแรงดันไปหน้า คือจะทนแรงดันเบรกดาวน์ให้มากขึ้น เท่ากับผลบวกของแรงดันเบรกดาวน์ทั้ง 2 ตัว

การเลือกเอสซีอาร์ที่จะมาต่ออนุกรมกันนั้นควรเลือกเอสซีอาร์ที่มีคุณลักษณะและพิกัดต่างๆเท่ากันหรือใกล้เคียงกันเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นในวงจร แต่เนื่องจากคุณลักษณะของเอสซีอาร์ที่เท่ากันหาได้ยาก จึงเป็นผลให้มีแรงดันตกคร่อมตัวเอสซีอาร์ไม่เท่ากันในสภาวะที่เอสซีอาร์ไม่นำกระแส ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการต่อตัวต้านทานค่าเท่าๆกันคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัว

เมื่อต่อเอสซีอาร์แบบอนุกรมกันจำนวน n ตัว กระแส I_{D1} เป็นกระแสรั่วไหลที่ไหลในสภาวะปิดกั้นกระแสขณะแรงดันไปหน้าของ Th1

เมื่อ $I_{D2} = I_{DS} = I_{DN}$ และ $I_{D1} < I_{D2}$

ขณะที่เอสซีอาร์ยังมิได้นำกระแสนั้น เอสซีอาร์ Th1 ที่มีกระแสรั่วไหลน้อยที่สุดก็จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเองสูงกว่าตัวอื่น เมื่อต่อชุดความต้านทานที่มีค่าเท่ากันขนานกับเอสซีอาร์ทุกตัว จะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัวเท่ากัน เรียกว่า วงจรปรับสมดุลย์ทางสแตติก (Static Equalising Network) I1 คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ขนานกับ Th1

ในช่วงเวลาชั่วขณะที่เอสซีอาร์นำกระแสและหยุดนำกระแส ก็จะมีปัญหาของแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ไม่เท่ากันด้วย ซึ่งสามารถแก้ไขโดยใช้วงจรปรับสมดุลย์แรงดันทาง ไดนามิก (Dynamic Equalising Network) ซึ่งประกอบด้วย R-C-D เอสซีอาร์ตัวที่เริ่มนำกระแสช้า และเอสซีอาร์ตัวที่หยุดนำกระแสได้เร็วจะทำให้มีแรงดันอินพุตทั้งหมดมาตกคร่อมที่ตัวมันเพียงตัวเดียว ซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายได้ วงจรปรับสมดุลแรงดันทางไดนามิกจะช่วยลดอันตรายดังกล่าวได้ โดยการต่อตัวเก็บประจุขนานเอสซีอาร์ทุกตัว ซึ่งคุณลักษณะแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจะทำให้ลดอันตรายลงได้ การทำงานของวงจรแบบไดนามิก คือ ในช่วงที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส กระแสก็จะไหลผ่านไดโอดไปเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุเสมือนกับมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับเอสซีอาร์ และในขณะที่เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสตัวเก็บประจุก็จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและเอสซีอาร์

การต่อเอสซีอาร์แบบขนาน

เมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าสูงกว่าพิกัดของเอสซีอาร์ตัวเดียวจะทนได้จะนำเอสซีอาร์มาต่อขนานกันเพื่อให้จ่ายกระแสได้สูงขึ้น การพิจารณาคุณลักษณะจะคล้ายกับการต่ออนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการขนานเอสซีอาร์จะพิจารณาที่แรงดันค่าเดียวกันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์เท่ากัน กระแสที่สามารถจ่ายได้ก็ได้คือผลรวมของค่ากระแสเอสซีอาร์ทุกตัว

ในขณะที่เอสซีอาร์นำกระแส ถ้ามีเอสซีอาร์ตัวหนึ่งตัวใดมีกระแสผ่านมากกว่าตัวอื่นจะเกิดความร้อนภายในมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานภายในเอสซีอาร์ลดลง จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ตัวนั้นเพิ่มมากยิ่งขึ้น ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยการใช้ตัวต้านทานที่มีค่าต่ำต่ออนุกรมกับเอสซีอาร์ทุกตัว

เมื่อต่อเอสซีอาร์ขนานกันมากกว่า 2 ตัว การทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัวเท่าๆกันจะใช้ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงมาต่อร่วมกันผลของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลง จะช่วยเฉลี่ยให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์แต่ละตัวมีค่าเท่าๆกัน

ดังนั้นการเลือกใช้เอสซีอาร์ที่จะมาต่อขนานกันจะต้องเลือกคุณลักษณะสมบัติต่างๆทั้งพิกัดแรงดันและกระแสเท่ากันหรือใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการนำมาต่ออนุกรมกัน

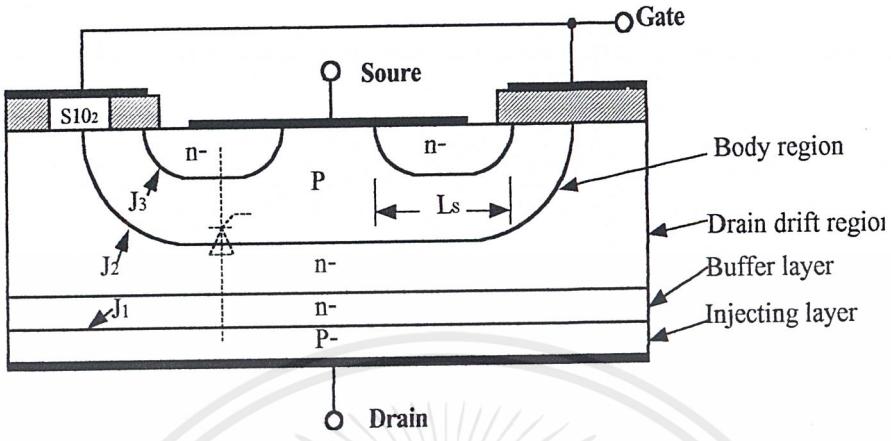
ไอจีบีที (IGBT)

โครงสร้างพื้นฐานของไอจีบีที

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่พอจะค้นเคยและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น เอสซีอาร์ ไตรแอก ทรานซิสเตอร์และมอสเฟต โดยทรานซิสเตอร์และมอสเฟต จะนิยมใช้กันมากในปัจจุบันและเป็นจุดเริ่มต้นของอุปกรณ์ชนิดใหม่ขึ้นมา ทรานซิสเตอร์ขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำมีอัตราการทนแรงดันและขยายกระแสได้สูงแต่ความเร็วในการตัด-ต่อยังช้าอยู่ โดยเฉพาะช่วงนำกระแสจะยาวกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับมอสเฟต ที่จะมีความเร็วในการตัดต่อเร็วมากแต่อัตราการสูญเสียพลังงานสูงมากขณะทำงานเช่นกัน จากสาเหตุที่ผ่านมาของอุปกรณ์ทั้งสองจึงได้มีการพัฒนาอุปกรใหม่ขึ้นมาโดยจะมีคุณสมบัติที่รวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์และมอสเฟตเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีชื่อเรียกว่า ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT)

ในรูปที่ 2.7 แสดงรูปตัดในแนวดิ่งของไอจีบีทีเอ็นแชนแนล(N-Channel) ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับมอสเฟตมากจะแตกต่างกันที่ไอจีบีทีจะมีสารชั้น P+ หรืออินเจ็กติ้ง (Injecting) ระหว่างขาเดรน (Drain) ซึ่งในมอสเฟตนั้นไม่มี ระดับสารเจือ(Dopping Levels)ในแต่ละชั้นของไอจีบีทีจะคล้ายกับที่ใช้ในแต่ละชั้นของมอสเฟตยกเว้นในส่วนของบอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



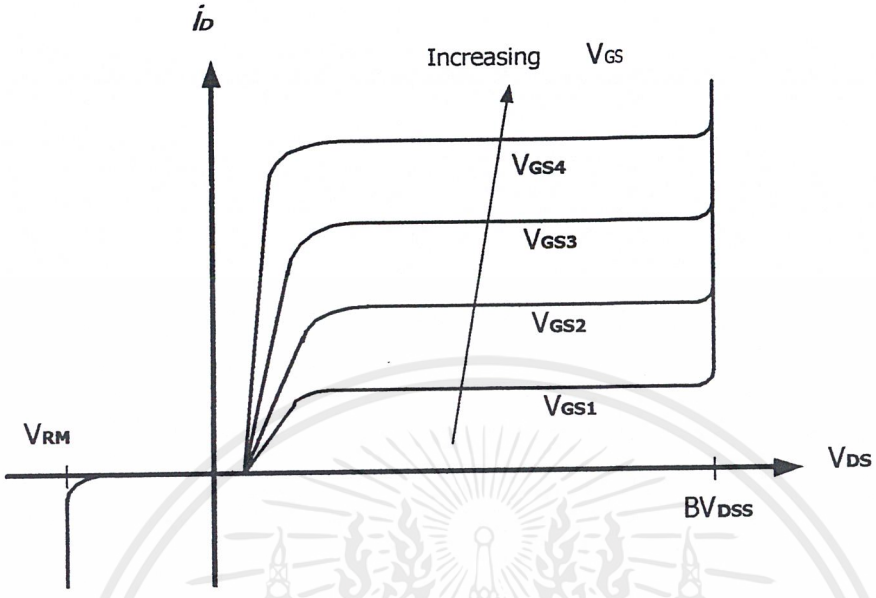
รูปที่ 2.7 แสดงภาพตัดแนวดิ่งของไอจีบีที

คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

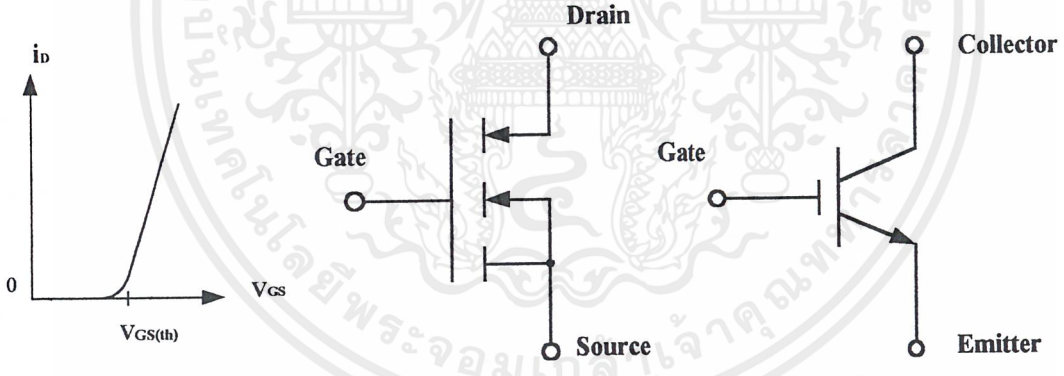
ลักษณะของกระแสและศักดาไฟฟ้าของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนแนลดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)ในทิศทางฟอร์วาร์ดจะเหมือนกับของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในลอจิกเซอร์กิตแตกต่างกันเพียงการควบคุมการทำงานด้วยความต่างศักย์ แทนที่จะควบคุมการทำงานด้วยกระแสเหมือนกับทรานซิสเตอร์ คุณสมบัติของไอจีบีทีชนิดพี-แชลแนลจะเหมือนกันแต่ขั้วของความต่างศักย์และทิศทางของกระแสจะกลับกันที่รอยต่อJ_1 ในรูปที่ 2.8 (ก) จะกันแรงดันฟอร์เวิร์สเมื่อไอจีบีทีอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสค่าการทนการกระแสในทิศทางรีเวิร์ส (Reward Blocking Voltage) จะสามารถมีค่าเท่ากับการทนความต่างศักย์ในทิศทางฟอร์เวิร์สได้ ถ้าไม่มีชั้นบัฟเฟอร์ n+ ที่รอยต่อ j1ในรูปที่2. 8 (ก) เรียกว่าเป็นรอยต่อของรีเวิร์สบล็อกกิ้ง (Reverse Blocking) ในโครงสร้างของอุปกรณ์มีชั้นของบัฟเฟอร์ n+ จะทำให้ค่าแรงดันเบรคดาวน์มีค่าลดลงเหลือเพียงสิบกว่าโวลท์ เพราะมีปริมาณสารเจือสูงมากทั้ง2ด้านของรอยต่อทำให้ไม่สามารถกั้นกระแสรีเวิร์สได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



(ก) ลักษณะเอาท์พุตของไอจีบีที



(ข) Transfer Characteristic

(ค) สัญลักษณ์ของไอจีบีทีแบบเอ็น-แชลแนล

รูปที่ 2.8 แสดงคุณลักษณะของกระแสและความต่างศักดิ์ของไอจีบีที

ในรูปที่ 2.8 (ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_Dและ V_{GS} ลักษณะเหมือนของมอสเฟต ลักษณะของเส้นกราฟจะเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของกระแสเดรนและไม่เป็นเชิงเส้น ณ จุดที่กระแสเดรนมีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่งเรียกว่า $V_{GS(TH)}$ (Threshold Voltage) ไอจีบีทีจะอยู่ในสภาวะ OFF(หยุดนำกระแส) ความต่างศักย์คร่อมเกทและซอร์สสูงสุดที่ยอมให้ใช้ได้ขึ้นอยู่กับกระแสเดรนสูงสุดที่ยอมให้ไหลในตัวไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

42617

คุณลักษณะการทำงาน

สภาวะการนำกระแส

เมื่อขาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรงคือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและแรงดัน ระหว่างเกทและซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(TH)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขากเทจะดึงเออิเล็กตรอนให้มารวมอยู่ด้วยกันในบริเวณภายใต้เกท ทำให้ชั้นบอดีตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n (Drift Region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n (Source Region) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการทำงานของมอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกทมายังบริเวณลอยเลื่อน n จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจ็กติ้ง P เพราะรอยต่อ J_1 ได้รับแรงดันไบแอสตรงทำให้ไอจีบีทีอยู่ในสภาวะนำกระแส เกิดการไหลของกระแสจากเดรนไปซอร์สได้การทำงานรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายใต้บริเวณ n เรียกว่าการมอดดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation)

ผลการมอดดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานบริเวณ n มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสให้สูงขึ้นซึ่งจะเป็นลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมต่ำลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงไปด้วย

สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(TH)}$ จะทำให้แรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี J_1 เป็น J_2 ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n ไอจีบีทีจึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้รอยต่อ J_2 ที่ได้รับแรงดันไบแอสกลับจะเกิดการรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่รอยต่อ J_2 ด้วยบริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว่าขึ้นจนเกินเข้าไปในบริเวณ nทั้งนี้บริเวณชั้นบอดี้ Pมีความหนาแน่นในการโดปสารมากกว่า ถ้าความหนาแน่นของสารที่โดปในบริเวณลอยเลื่อน n มากพอก็จะทำให้การขยายบริเวณปลอดพาหะไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจ็กติ้ง P ได ชั้นบัฟเฟอร์ n ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้นหรือไม่จำเป็นต้องโดปสาร ทั้งนั้นเพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบแอสตรง สำหรับไอจีบีทีที่ไม่มีการโดปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n+ นี้จะเรียกว่า ไอจีบีทีแบบสมมาตรซึ่งจะมีอัตราทนแรงดันย้อนกลับสูงพอๆกับการทนแรงดันไหลตรง เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การลดความหนาของบริเวณ n ลงแต่ยังมีความสามารถของอัตราทนแรงดันไหลตรงไว้สามารถนำไปต่อเพิ่มในชั้นสาร n+ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กติ้ง ซึ่งจะเรียกไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร และจะมีการลดความหนาของบริเวณลอยเลื่อน n ลงจะส่งผลให้เกิดผลดีสองประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลงเป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย

2. ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้น้อยลง

แต่มีข้อเสียของการเพิ่มชั้นสาร n+ ก็คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้น้อยลงเหลือเพียงไม่กี่สิบโวลต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อไอจีบีทีได้รับแรงดันไบแอสกลับที่ขาเดรนรอยต่อ J_1 ซึ่งทั้งสองข้างจะมีความหนาแน่นในการโดปสารมากจะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้นไอจีบีทีชนิดนี้จึงไม่เหมาะกับงานวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

ฮาร์มอนิคส์ (Harmonic)

ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1. ฮาร์มอนิคส์ (Harmonic) คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลโดยการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่มูลฐานคือ 50 Hz ดังนั้นฮาร์มอนิคส์ 2 , 3 คือ 100 , 150 Hz เป็นต้น ซึ่งความถี่มูลฐานจะเรียกว่าฮาร์มอนิคส์ที่ 1 การวัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิคส์สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิคส์รวม (Total Harmonic Distortion : THD) ที่ความถี่ฮาร์มินิคส์ต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูล และเครื่องมือวัดฮาร์มอนิคส์ทั้งหลายจะแสดงผลความเพี้ยนฮาร์อมนิคส์รวมและความเพี้ยนฮาร์มอนิคส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสนี้จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่ายเมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามาความเพี้ยนของกระแสทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดัน ด้วยเหตุนี้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์มอนิคส์จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิคส์ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสม

2. กระแสฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Current) คือ ฮาร์มอนิคส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้

3. แรงดันฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Voltage) เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิคส์ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของสายส่งหรือรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และแรงดันให้ดีขึ้นทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากรีแอคแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_h = I_h \cdot Z_h$ ...(2.12)

V_h = แรงดันฮาร์มอนิคส์

I_h = กระแสฮาร์มอนิคส์ในระบบ

Z_h = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

4. ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor : DF) ตัวประกอบฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Factor : HF) ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิคส์ทั้งหมด (Total Harmonic Distortion : THD) ความหมายของทั้งสามตัวนั้นตามมาตรฐาน IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิคส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัวว่ามันคือ ความเพี้ยนของฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Distortion : HD) กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิคส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms. ของปริมาณทั้งหมด

5. ลำดับฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Order) คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์มอนิคส์ และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อกล่าวถึงฮาร์มอนิคส์อันดับที่ 3 ถ้าความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ฮาร์มอนิคส์ที่ 3 เป็น 150 Hz

ประเภทของฮาร์มอนิคส์

1 ฮาร์มอนิคส์ (Harmonics) คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของสัญญาณความถี่หลักมูล (Fundamental)

2 อินเตอร์ฮาร์มอนิคส์ (Interharmonics) คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของสัญญาณความถี่หลักมูลเนื่องจากคาบสัญญาณของเวลาไม่เท่ากันในทุกคาบซึ่งจะพบได้ในโหลดประเภท เตาหลอมอาร์ก และในการควบคุมที่เป็นแบบ อินทิเกิล คอนโทรล (Integral Control)

ฮาร์มอนิคส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonics) คือ ฮาร์มอนิคส์ที่เกิดจากเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยอันดับของฮาร์มอนิคส์จะเป็นดังสมการนี้

$$n = (k*p) \pm 1 \quad \text{...(2.13)}$$

p = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อหนึ่งคาบ

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3,...)

ตัวอย่างของโหลดที่สร้างฮาร์มอนิคส์ในกลุ่มนี้คือ คอนเวอร์เตอร์ , อินเวอร์เตอร์ และยูพีเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิคส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonics) คือ ฮาร์มอนิคส์ที่ถูกสร้าง โดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยอันดับของฮาร์มอนิคส์ไม่เป็นไปตามสมการในข้อ 2.2.3 เช่น เครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีอันดับฮาร์มอนิคส์เป็น 11 , 13 , 23 , 25 , ... แต่ถ้ามีฮาร์มอนิคส์อันดับอื่นปนเข้ามาจะถือว่าเป็น Non-characteristic Harmonics

ฮาร์มอนิคส์ลำดับที่สามหารลงตัว (Triple Harmonics) คือ ลำดับฮาร์มอนิคส์ที่หารด้วยสามลงตัว ได้แก่ 3 , 6 , 9 , ... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (Sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่มีการต่อวงจรแบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิคส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลในสายนิวทรอล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวทรอลร้อน ฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์มีดังต่อไปนี้

1 หม้อแปลง (Transformer)

ในสถานะปกติหม้อแปลงไม่ทำให้เกิดความเพี้ยนแก่ข่ายวงจร แต่ขณะสถานะชั่วครู่หรือขณะหม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตปกติจะทำให้เกิดฮาร์มอนิคส์ขึ้น กรณีหม้อแปลงไม่มีโหลด แรงดันด้านปฐมภูมิรูปคลื่นซายน์ของหม้อแปลงจะสร้างฟลักซ์รูปคลื่นซายน์ แต่กระแสด้านปฐมภูมิไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ที่เป็นเช่นนี้ เพราะฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing Current)

2 เครื่องจักรไฟฟ้า (Electric Machinery)

เครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลง นั่นคือในสถานะอยู่ตัวมันจะไม่ทำให้เกิดความเพี้ยนแก่ข่ายวงจร แต่ในสถานะชั่วครู่หรือขณะเครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตจะทำให้เกิดฮาร์มอนิคส์ขึ้น ซึ่งเครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์มอนิคส์ในฟังก์ชันของความเร็วกับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์มอนิคส์มีค่าน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติกระแสฮาร์มอนิคส์ลำดับสามจะได้รับการสกัดกั้น โดยการต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า

3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ก (Arc Equicment)

อุปกรณ์ประเภทอาร์กมีมากมายหลายชนิดซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อมไฟฟ้า อุปกรณ์ทั้งสองทำให้เกิดปัญหาทางฮาร์มอนิคส์ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อาร์กอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิคส์ ได้แก่ แสงสว่างอาร์กที่ใช้กับถนนและลานจอดรถ การเพี้ยนของกระแสอาร์กเนื่องจากอุปกรณ์อาร์กมีขนาดเกิน 10% ของกระแสพิกัด ในอุปกรณ์บางชนิดอาจมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าถึง 30% ถ้าวัดแรงดันขาออกของเตาอาร์กจะพบว่า แรงดันฮาร์มอนิคส์เปลี่ยนแปลงอย่างมาก และมีค่าไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น

ขณะเริ่มหลอม แรงดันฮาร์มอนิคส์อันดับที่ 5 มีขนาด 8% เมื่อเทียบกับแรงดันหลักมูล

เมื่อสิ้นสุดการหลอม แรงดันฮาร์มอนิคส์อันดับที่ 5 มีขนาด 6%

ขณะถลุงแร่ แรงดันฮาร์มอนิคส์อันดับที่ 5 มีขนาด 2.5%

4 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้กันมากในบ้านเรือน และในอุตสาหกรรมบางชนิดจึงถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์ที่สำคัญ การปล่อยประจุในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิคส์อันดับคี่

5 เครื่องแปลงผัน (Converter)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ในบ้านจนถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่อุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เครื่องแปลงผันขนาดเล็กจะเป็นหนึ่งเฟส โดยใช้กับอุปกรณ์จำพวกเครื่องรับโทรทัศน์คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ภายในบ้าน

เครื่องแปลงผันสามเฟสที่ใช้กันทั่วไปจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

กรณี AC/DC ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่ มอเตอร์กระแสตรง แบตเตอรี่หรือขบวนการเคมี

กรณี AC/DC/AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องการเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้งเพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่มากกว่า 50 Hz เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งแยกตามจำนวนพัลส์ เช่น 3 , 6 , 12 , 18 , 24 และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์ยังบอกถึงจำนวนอุปกรณ์ปิด-เปิดวงจรที่ใช้โซลิดสเตท ซึ่งโดยปกติใช้ไทริสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมุมจุดชนวนของมันควบคุมได้ง่าย งานทั่วไปนิยมใช้ 6 พัลส์หรือ 12 พัลส์ สำหรับงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ 3 พัลส์ งานที่ต้องการใช้กำลังสูงจะใช้ 18 พัลส์หรือมากกว่านี้

ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์โดยทั่วไป

แรงดันและกระแสฮาร์มอนิคส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังต่อไปนี้

ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์มอนิคส์ เนื่องจากผลของการเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพเป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง ทำให้โรงจักรทำงานผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ที่มีต่อระบบอื่นๆและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ที่มีต่อการเกิดเรโซแนนซ์

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ในระบบไฟฟ้าอาจเกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่งขึ้น ซึ่งจะเป็นเหตุให้ตัวเก็บประจุได้รับกระแสที่มากเกิน และจะเป็นเหตุให้ตัวเก็บประจุได้รับความเสียหายได้ ซึ่งการเกิดเรโซแนนซ์อาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังนี้

เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดัคเตอร์ของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิคส์กับตัวเก็บประจุที่บัสบาร์เดียวกัน

เรโซแนนซ์ขนานและอนุกรมระหว่างอินดัคเตอร์ของระบบกับโหลดที่เป็นตัวเก็บประจุของระบบ

2 ผลกระทบฮาร์มอนิคส์ต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีฮาร์มอนิคส์ไหลในระบบสายส่งจะทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการ คือ

1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบสูงขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่า rms ของรูปคลื่นกระแสหาได้จากสมการ

โดยที่ P_l = กำลังสูญเสียในระบบ

I_n = กระแสฮาร์มอนิคส์อันดับที่ n (rms.)

R_n = ค่าความต้านทานที่ความถี่ฮาร์มอนิคส์

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์วงจร โดยเป็นผลของกระแสฮาร์มอนิคส์ที่ไหลในวงจร กรณีที่ระบบไม่มั่นคง คือระบบมีอิมพีแดนซ์สูง และมีระดับฟอลต์ต่ำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมากเป็นผลทำให้เกิดการเพี้ยนของแรงดัน ซึ่งผิดกับระบบที่มั่นคงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำระดับฟอลต์สูง แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริกสูงกว่าปกติเป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลง และทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

3 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อหม้อแปลง

แรงดันฮาร์มอนิคส์จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน , ฮิสเตอร์รีซิส และความเครียดของฉนวน ส่วนกระแสฮาร์มอนิคส์ก็จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียในทองแดงโดยเฉพาะในกรณีเป็นหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์เพราะว่าตัวหม้อแปลงจะไม่ได้รับประโยชน์จากฟิลเตอร์ที่จะทำการกรองฮาร์มอนิคส์ซึ่งปกติจะต่ออยู่ทางด้าน AC

4 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์มอนิคส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ จะสร้างความหนาแน่นฟลักซ์รบกวนอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นซายน์ ฮาร์มอนิคส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพธ์กระจายในช่องว่างอากาศและทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง (Cogging) คือการไม่สามารถเดินเครื่องได้ หรือการครอลิง (Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าซิงโครนัสซึ่งขณะนี้ยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิคส์สำหรับมอเตอร์

5 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อสวิตซ์เกียร์

กระแสฮาร์มอนิคส์จะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิตซ์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์มอนิคส์ในรูปกระแสมีผลกระทบในความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capability) ของสวิตซ์เกียร์เป็นผลทำให้การตัดยากมาก สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์มอนิคส์ทั้งนี้เนื่องจากขอลวดเป่าดับอาร์ก (Blowout Coils) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์กชูต (Arc-Chute) เพื่อทำการตัดวงจรทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพเป็นผลให้อาร์กไม่ขาดทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตซ์ตัวปิด-เปิดวงจร เป็นต้น แต่เบรกเกอร์สูญญากาศจะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์มอนิคส์

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมในการกำหนดระดับของฮาร์มอนิคส์ที่สวิตซ์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากการทดสอบตัดวงจรจะทำที่พิกัดความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

6 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อคาปาซิเตอร์แบงค์

ผลกระทบของฮามอนิคส์จะทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมากและการเพี้ยนของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง (รีเลย์)

ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลงหรือทำงานที่ค่าสูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานที่ค่าเริ่มต้นต่ำๆ

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้รีเลย์สถิตย์แบบความถี่ต่ำมีความไวปกติทำให้ทริกผิดพลาด

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิดเปลี่ยนลักษณะการทำงาน

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้แรงบิดการทำงานของรีเลย์กลับทิศทาง

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (Balanced Beam Impedance-Relay) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ฮาร์มอนิคส์ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างช้าลง

โดยทั่วไประดับฮาร์มอนิคส์ที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดจะสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆขีดจำกัดของฮาร์มอนิคส์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% จึงจะเกิดปัญหากับรีเลย์

8 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆก่อนการใช้ต้องทำการปรับแต่งที่กระแสไฟฟ้าสลับรูปคลื่นซายน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิคส์ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดหรือกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ในระบบ มีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิคส์ค่าสูงในวงจร ทำให้มิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ เช่น มิเตอร์วัตต์-ชั่วโมง ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิคส์ โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิคส์มากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

9 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

-เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์มอนิคส์จะมีผลต่อแรงดันยอด ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

-หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอร์คิวรีอาร์ก การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งต้องมีคาปาซิเตอร์ด้วยจึงอาจเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้เกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหานได้

-คอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิคส์อย่างมาก ทุกบริษัทจะมีขีดจำกัดฮาร์มอนิคส์ค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิคส์มากกว่าขีดจำกัดนี้จะทำให้คอมพิวเตอร์เสียหายได้

10 ผลกระทบของฮาร์มอนิคส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิคส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิดความรำคาญฮาร์มอนิคส์จะเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูงฮาร์มอนิคส์ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสารหรือระบบสื่อสารอาจใช้การไม่ได้

ศักดาไฟฟ้าและกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิคส์

การวิเคราะห์ระบบเพื่อดูผลเนื่องจากเรโซแนนซ์ต้องอาศัยการคำนวณกระแสฮาร์มอนิคส์ต่างๆที่ไหลในระบบ และคำนวณศักดาไฟฟ้าฮาร์มอนิคส์ที่เกิดขึ้นจากกระแสนี้ เรคติไฟเออร์และอุปกรณ์อย่างอื่นที่คล้ายคลึงกันแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source) และเตาหลอมแบบอาร์กแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดศักดาไฟฟ้า (Voltage Source)

การวิเคราะห์ผลจากฮาร์มอนิคส์ควรมีค่าต่างๆในการพิจารณาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$KVA_{ch} = \sum V_h * I_h = \sum (V_t^2 / X_h) \quad \ldots(2.14)$$

$$V_p = \sum V_h \quad \ldots(2.15)$$

$$I_{rms} = \sum I_h^2 \quad \ldots(2.16)$$

$$V_{rms} = \sum V_h^2 \quad \ldots(2.17)$$

KVA_{ch} : KVA ที่เกิดขึ้นจากคาปาซิเตอร์เนื่องจากฮามอนิคส์ทั้งหมด

V_h : ศักดาไฟฟ้าเกิดเนื่องจากฮาร์มอนิคส์ลำดับที่ h

I_h : กระแสไฟฟ้าเนื่องจากฮาร์มอนิคส์ลำดับที่ h

V_p : ศักดาไฟฟ้าสูงสุด

I_{rms} : กระแส rms รวมที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์

V_{rms} : ศักดาไฟฟ้า rms ที่คร่อมคาปาซิเตอร์

ศักดาไฟฟ้าและกระแสตามสมการข้างต้น มีไว้เพื่อพิจารณาว่าจะมีผลต่อคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระบบหรือไม่เพราะคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันนั้นถูกกำหนดคุณสมบัติตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Standard 18-1980 และ NEMA CP1-1973 ไว้ดังนี้

KVA สูงสุด : 135% ของกำลังไฟฟ้าอัตราของคาปาซิเตอร์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด : 110% ของศักดาไฟฟ้าอัตราของคาปาซิเตอร์

กระแสสูงสุด : 180% ของกระแสไฟฟ้าอัตราของคาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ที่ถูกออกแบบและสร้างจากผู้ผลิตดังนี้ ก็เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์เพื่อความปลอดภัยเผื่อไว้ สำหรับศักดาไฟฟ้าเกินหรือศักดาไฟฟ้าฮาร์มอนิคส์ที่อาจเกิดขึ้น

มาตรฐานกำหนดให้คาปาซิเตอร์สามารถทำงานที่ 135% ของกำลังไฟฟ้าอัตราก็ เนื่องมาจาก

กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากศักดาไฟฟ้าฮาร์มอนิคส์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วของคาปาซิเตอร์

กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากศักดาไฟฟ้าระบบเพิ่มขึ้น (0-10%)

กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแปรค่าของคาปาซิเตอร์จากโรงงานผลิต (มาตรฐานกำหนดไว้ให้ 0-15% แต่ส่วนใหญ่โรงงานผู้ผลิตจะสูงสุด 10%)

กรณีศักดาไฟฟ้าเกินในระบบ 10% และถ้าเกิดมีการแปรค่าของคาปาซิเตอร์ 10% กำลังไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์มีขนาด (1.2/0.9) = 1.34 หรือประมาณ 135% ของกำลังไฟฟ้าอัตราของคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิคส์

ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิคส์ ถ้าไม่จำกัดฮาร์มอนิคส์ดังกล่าวก็จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆได้รับความเสียหายได้ระบบที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิคส์มักมีพาวเวอร์แฟคเตอร์ต่ำดังนั้นจึงมีคาปาซิเตอร์ช่วยแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ด้วยถ้าหากขนาดคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ไปใกล้เคียงกับฮาร์มอนิคส์ใดจากอุปกรณ์ดังกล่าวทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าและกระแสในระบบก็ยิ่งมีโอกาสทำให้อุปกรณ์เสียหายได้มากขึ้น

การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิคส์สามารถทำได้หลายประการดังนี้

1.การกรองสัญญาณ (Filter) เพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิคส์ให้มีปริมาณต่ำๆโดยฟิลเตอร์ต่อขนานกับระบบ

2.ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าโดยหม้อแปลงจะต่อแบบ Y-Δ ปริมาณฮาร์มอนิคส์ที่ 3 จะไหลวนอยู่ในหม้อแปลงโดยไม่ไหลไปสู่ระบบ

3.การลดทอนฮาร์มอนิคส์ โดยการสร้างปริมาณฮาร์โมนิคส์ซึ่งไปหักล้างกับปริมาณฮาร์มอนิคส์ที่จ่ายเข้ามา

การเปลี่ยนระบบ การเปลี่ยนที่ตั้งหรือขนาดคาปาซิเตอร์ที่แก้เพาเวอร์แฟคเตอร์หรือเพิ่มรีแอคเตอร์ให้อนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยตอบสนองความถี่ฮาร์มอนิคส์

วงจรกรองฮาร์มอนิคส์ (Harmonic Filter)

วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิคส์สามารถแบ่งได้หลายแบบ คือ

ฟิลเตอร์แบบอนุกรม ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวเก็บประจุซึ่งจะต่ออนุกรมเข้ากับระบบ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันแรงดันฮาร์มอนิคส์ที่มีความถี่ที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์ไม่ให้ไปเข้าสู่ระบบ โดยจะแสดงตัวเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงกว่าความถี่ที่กำหนด

ฟิลเตอร์แบบขนาน เป็นฟิลเตอร์ที่ต่อขนานเข้ากับระบบเพื่อทำหน้าที่ป้องกันกระแสฮาร์มอนิคส์ที่ความถี่ที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิคส์ไม่ให้เข้าไปสู่ระบบ โดยจะแสดงตัวเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำที่ความถี่ที่กำหนด ซึ่งลักษณะของตัวกรองความถี่แบบต่อขนานเข้ากับระบบที่นิยมใช้กันมี 2 แบบ คือ Single Tuned , Damped Filter

การหาค่าฮาร์มอนิกส์และตัวประกอบกำลัง

การหาค่าฮาร์มอนิกส์ (Harmonic)

ฮาร์มอนิกส์ (Harmonic) หมายถึงไฟฟ้าความถี่สูงในรูปแบบกระแสและแรงดันที่ปะปนมากับไฟฟ้า 50 เฮิร์ต ที่ได้จากการไฟฟ้า ซึ่งถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกส์มากๆในระบบจะทำให้เกิดความเสียหายหรือปัญหาต่างๆขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม(Total Harmonic Distortion –THD) หมายถึงตัวเลขแสดงความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสหรือแรงดันจากรูปคลื่นไซน์ 50 เฮิร์ต ตัวเลขยิ่งสูงแสดงถึงความเพี้ยนมากหรืออีกในหนึ่งมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ปริมาณมากปะปนอยู่ มีค่า THD อยู่ 2 ค่าคือ

1. THDI (Current THD) หมายถึงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแสมีค่าเป็น

$$\text{THDI (\%)} = \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+I_4^2+I_5^2+\dots}}{I_1} \times 100 \qquad \dots(2.18)$$

โดยที่ I_1 คือกระแสที่ความถี่ 50 เฮิร์ต

$I_2, I_3, I_4, I_5, \dots$ คือกระแสที่ความถี่มากกว่า 50 เฮิร์ต

2. THDV (Voltage THD) หมายถึงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน

$$\text{THDV (\%)} = \frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+V_4^2+V_5^2+\dots}}{V_1} \times 100 \qquad \dots(2.19)$$

โดยที่ V_1 คือ แรงดันที่ความถี่ 50 เฮิร์ต

$V_2, V_3, V_4, V_5, \dots$ คือ แรงดันที่ความถี่มากกว่า 50 เฮิร์ต

การหาค่าตัวประกอบกำลัง

จาก $$\text{Power Facter} = \frac{P}{S} = \frac{V I_1 \cos\phi}{VI} = \frac{I_1}{I}\cos\phi \qquad \dots(2.20)$$

เมื่อ $\cos\phi$ คือ Distortion Power Factor

จาก $$I^2 = I_1^2+I_3^2+I_5^2+\dots+I_{2k+1}^2+\dots$$

ให้ $$\tau_i = \frac{1}{I_1}\sqrt{I^2-I_1^2}$$

ดังนั้น $$\frac{I_1}{I} = \frac{1}{\sqrt{1+\tau_i^2}} \qquad \dots(2.21)$$

แทนค่า (2.21) ใน (2.20) ได้

$$F = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1+\tau_i^2}} \qquad \dots(2.22)$$

นอกจากนี้ค่า Power factor สามารถคำนวนได้โดยตรงคือ

$$F = \left(\frac{I}{V/Z}\right)\frac{1}{\sqrt{1+Q^2}} \qquad \dots(2.23)$$

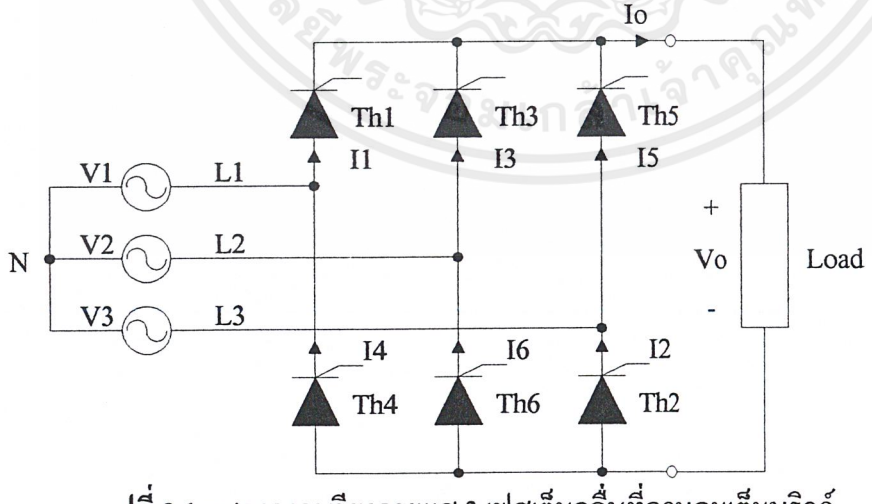
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีเฟสคอนโทรลและพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล

เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์ คือ วงจรที่สามารถเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่สามารถควบคุมขนาดสัญญาณทางด้าน เอาท์พุต ได้ ซึ่งอาศัยหลักการของวงจร ฟูลเวฟบลิดจ์เร็คติไฟเออร์ แต่จะใช้ ไทรีสเตอร์ แทน ไดโอด ด้วยเหตุที่ว่า ไทรีสเตอร์ มีคุณสมบัติที่จะนำกระแสได้โดยตัวมันเองจะต้องอยู่ในสภาวะ ฟอร์เวิร์ดไบอัส และจะต้องมีสัญญาณจุดชนวนเกต และจะนำกระแสต่อไปไม่ว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนเกตหรือไม่ จนกว่าจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าทางแอโนด น้อยกว่าทางด้าน แคโธด หรือแรงดันที่ตัวมันมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้สามารถควบคุมสัญญาณทางด้าน เอาท์พุตโดยการควบคุมสัญญาณการจุดชนวนเกต

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ควบคุมเต็มบริดจ์ วงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์นี้ ประกอบไปด้วยไทริสเตอร์ทั้งหมดจำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูป 3.1 โดยที่ไทริสเตอร์แต่ละคู่จะทำงานพร้อมกันตามลำดับการป้อนสัญญาณจุดชนงนเกตดังแสดงในรูป 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทริสเตอร์ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\propto = 0^{\bullet}$

ไทริสเตอร์ 1 และ 2 ทำงานที่มุม $\propto = 60^{\bullet}$

ไทริสเตอร์ 2 และ 3 ทำงานที่มุม $\propto = 120^{\bullet}$

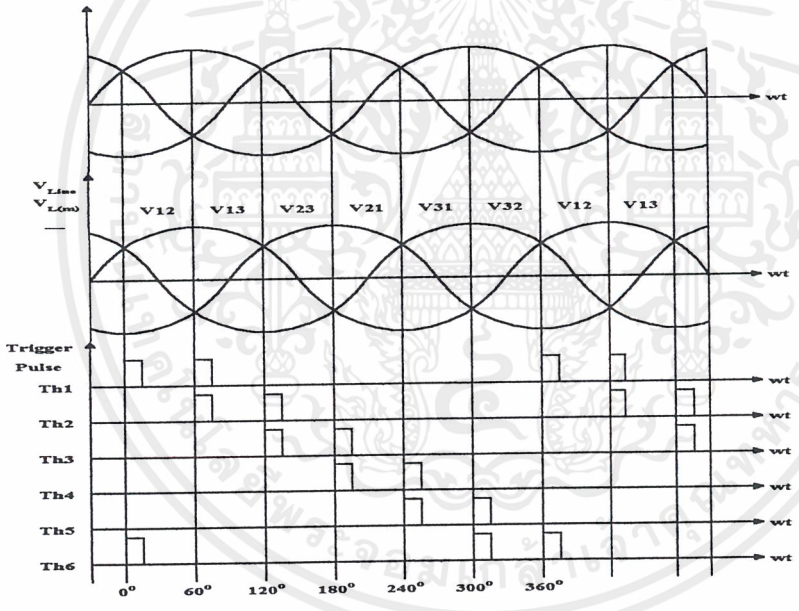
ไทริสเตอร์ 3 และ 4 ทำงานที่มุม $\propto = 180^{\bullet}$

ไทริสเตอร์ 4 และ 5 ทำงานที่มุม $\propto = 240^{\bullet}$

ไทริสเตอร์ 5 และ 6 ทำงานที่มุม $\propto = 300^{\bullet}$

ไทริสเตอร์ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\propto = 360^{\bullet}$

จะเห็นว่าที่มุมจุดชนวน $\propto = 0^{\bullet}$ ไทริสเตอร์แต่ละตัวจะนำกระแสเป็นมุมเท่ากับ $60^{\bullet}$ และที่มุม $\propto$ โตขึ้น จำนวนมุมนำกระแสก็จะลดลง

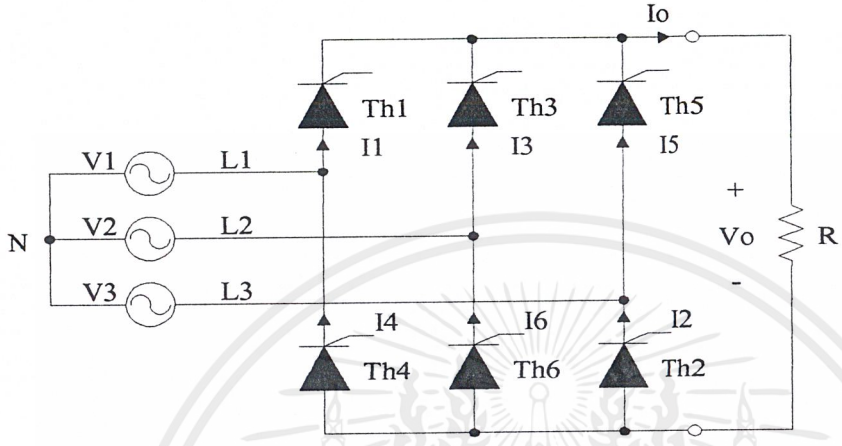


รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันระหว่างสายและลำดับของการจุดชนวนเกตของไทรีสเตอร์

ลักษณะทางด้านเอาท์พุทของเฟสคอนโทรล จะมีลักษณะเปลี่ยนไปตามโหลด ดังนั้นในการคำนวนหาค่าแรงดันและกระแสทางด้านเอาท์พุทจะต้องพิจารณาตามลักษณะของโหลดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน การทำงานของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวให้พิจารณาในรูปที่ 3.3 และรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_O) และกระแสที่ไหลผ่านโหลด(I_O)ในรูป3.4



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเต็มคลื่นที่ควบคุมเต็มบริดจ์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน

จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_O) จะปรากฏเมื่อมุม $\propto$ มีค่าระหว่าง 0^O ถึง 120^O เท่านั้น และที่มุมจุดชนวนกด $\propto$ มีค่าระหว่าง $0^\bullet$ ถึง $60^\bullet$ ($0^\bullet < \propto < 60^\bullet$) กระแสโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าจุดชนวนกดที่มุม $\propto$ มากกว่า $60^\bullet$ แต่ไม่เกิน $120^\bullet$ ($60^\bullet < \propto < 120^\bullet$) กระแสโหลดจะไหลไม่ต่อเนื่อง ทำให้การพิจารณากาสมการแรงดัดตกคร่อมโหลดเกิดขึ้น 2 กรณี

เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม ($0^\bullet < \propto < 60^\bullet$)

สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{O(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} V_{L1-L2}\, d\,\omega t$$

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

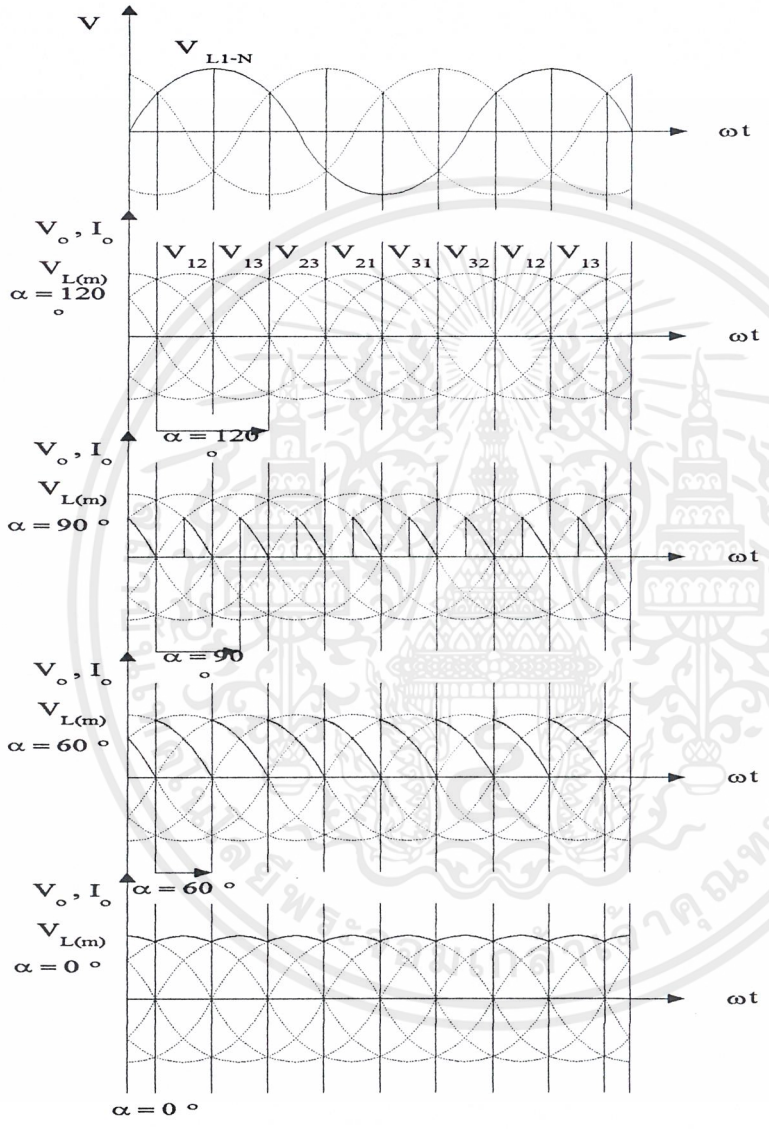
$$= \frac{3\sqrt{3}\, V_m}{\pi}[\cos\alpha] \qquad \ldots(3.1)$$

สมการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์.เอ็ม.เอส.ที่โหลด คือ

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

$$= \sqrt{3}\, V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\cos 2\alpha} \qquad \ldots(3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลดความต้านทาน

เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม $(60^\circ < \propto < 120^\circ)$

สมการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Vo_{(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\beta}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\,\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{\pi}\left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)\right] \qquad \ldots(3.3)$$

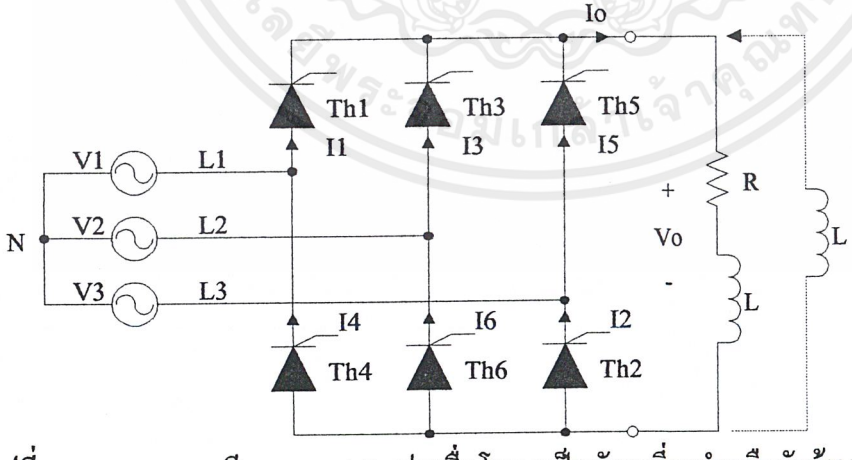
$$Vo_{(RMS)} = \sqrt{\frac{6}{2\pi}\int 3V_m^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\,\omega t}$$

$$= \frac{3V_m}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{2\pi}{3} - \alpha + \frac{1}{4\left[\sqrt{3}\cos 2\alpha + \sin 2\alpha\right]}} \qquad \ldots(3.4)$$

หมายเหตุ $V_{L1\text{-}L2}$ คือ แรงดันระหว่างสาย (Line - To - Line)

V_m คือ แรงดันสูงสุดระหว่างเฟส (Line - To - Nutral)

เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำนี้ รวมถึงโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่มีค่า ωLสูงมาก ๆ ($\omega L >> R$)อีกด้วย ซึ่งลักษณะการควบคุมวงจรดังกล่าว จะแตกต่างจากกรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน กล่าวคือ เมื่อจุดขนวนเกตที่มุม $\propto$ มากกว่า 60° จะเกิดรูปคลื่นด้านลบตกคร่อมโหลด และเมื่อมุม $\propto$ มีค่ามากกว่า 90° จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ ลักษณะของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำแสดงในรูป 3.5 และรูปคลื่นกระแสและแรงดันขาออกวงจรแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีมุมจุดชนวนมีค่าระหว่าง 0° ถึง 90° เท่านั้น($0° < \propto < 90°$)และถ้าจุดชนวนเกตเกินกว่ามุม 90° จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ และลักษณะการไหลของกระแสเมื่อมุม $\propto$ โตกว่า 90° จะไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง สมการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเกิดขึ้น 2 กรณีคือ

เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม กระแสโหลดไหลอย่างต่อเนื่อง

สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย คือ

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

$$= \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{\pi}[\cos\alpha] \qquad \ldots(3.5)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าอาร์.เอ็ม.เอส. คือ

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

$$= \sqrt{3}\,V_m\sqrt{\left[\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\cos 2\alpha\right]} \qquad \ldots(3.6)$$

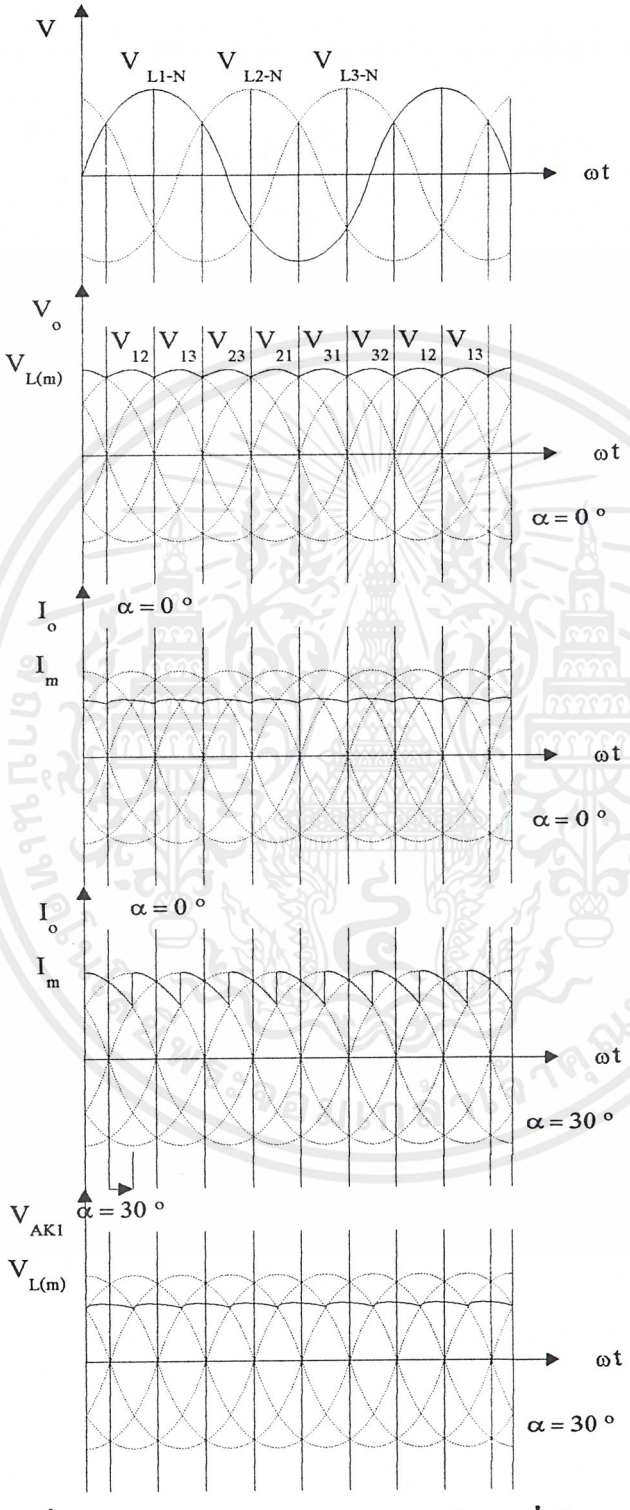
เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม ($90° < \propto < 120°$) กระแสโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง

สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย คือ

$$V_{O(avg)} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}}\sqrt{3}\,V_m \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\,\omega t$$

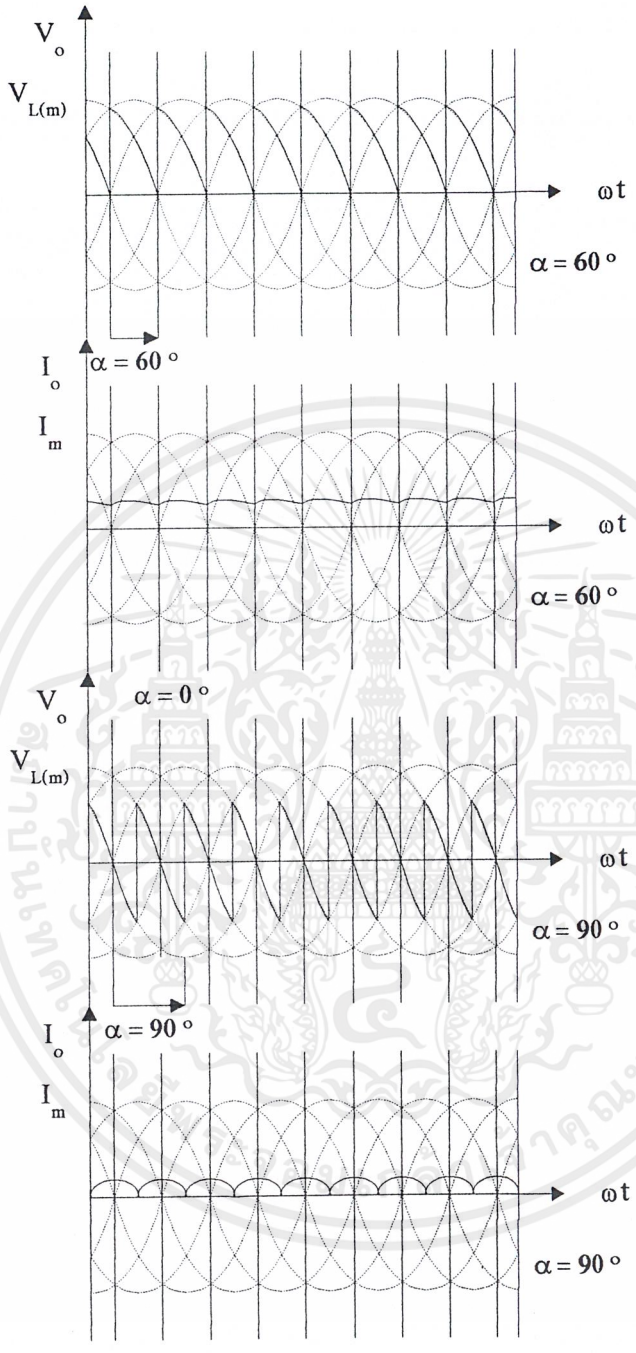
$$= 0 \qquad \ldots(3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มุมα = 0,30 องศาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

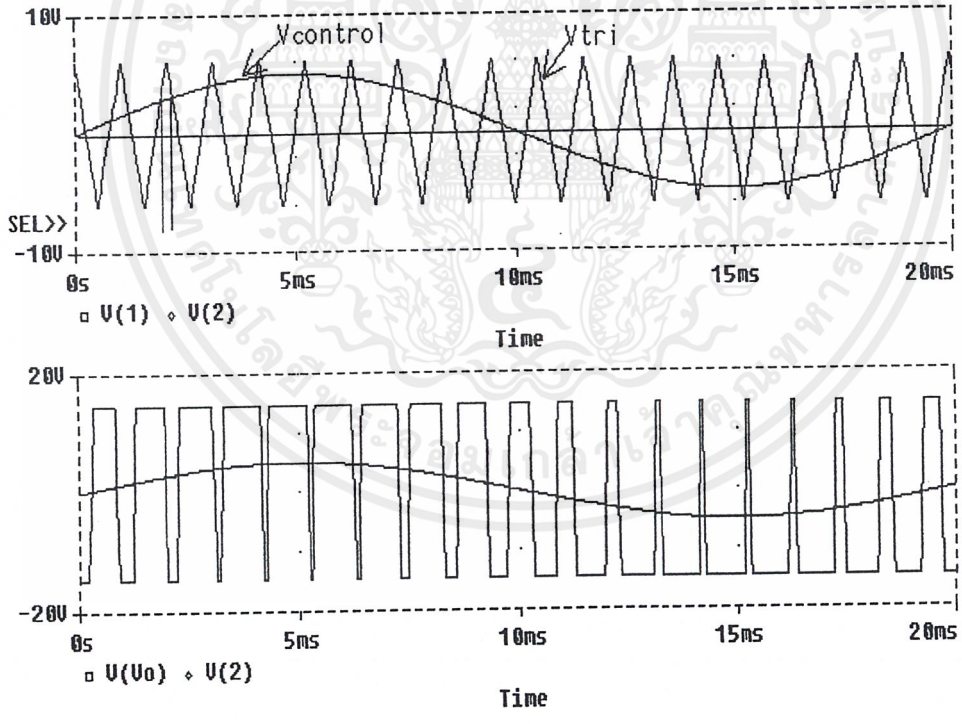


รูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มุมα = 0,30 องศาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์(PWM Control Rectifier)

พีดับบลิวเอ็ม (Pulse width modulation) คือ การสร้างสัญญาณทางไฟฟ้า ที่สามารถปรับความกว้างของรูปคลื่น เพื่อให้ได้ เอาท์พุต ตามต้องการ ในการสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม มีอยู่หลายวิธีการ แต่หลักการสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายๆกัน คือ จะนำสัญญาณที่ต่างกัน 2 สัญญาณ มาทำการเปรียบเทียบกัน โดยที่สัญญาณแรกจะเป็นสัญญาณที่สามารถปรับค่าของความสูงของรูปคลื่น ได้ แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (ความถี่) จะคงที่และมีค่าที่ไม่สูงมากนัก เรียกว่า สัญญาณควบคุม ($V_{control}$) อาจจะเป็นได้ทั้งสัญญาณไฟ กระแสตรง หรือสัญญาณไฟกระแสสลับ ก็ได้ที่สามารถปรับค่า ความสูงของรูปคลื่น ได้ ส่วนอีกสัญญาณหนึ่งจะมีค่าของ ความสูงของรูปคลื่น คงที่แต่มีค่าของความถี่ที่สูงกว่าสัญญาณแรกและสามารถปรับค่าของความถี่ได้ เรียกว่า สัญญาณทริกส์ (V_{tri}) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่3.8 การสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulation)โดยการเปรียบเทียบ 2สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำสัญญาณทั้งสองมาเปรียบเทียบกันจะใช้ตัว คอมพาราเตอร์ (Comparator) เช่น ออปแอมป์ เป็นตัวเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบจะเปรียบเทียบโดย ถ้า $V_{control}$ มีค่าน้อยกว่า V_{tri} ที่เวลาเดียวกัน จะทำให้ได้ค่าออกมาเป็นค่าที่ต่ำสุด แต่ถ้า $V_{control}$ มีค่ามากกว่า V_{tri} จะทำให้ได้ค่าสูงสุด การหาค่าของอัตราส่วนการควบคุมแรงดัน (Amplitude modulation ratio : m_a) หาได้จาก

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \qquad \ldots(3.8)$$

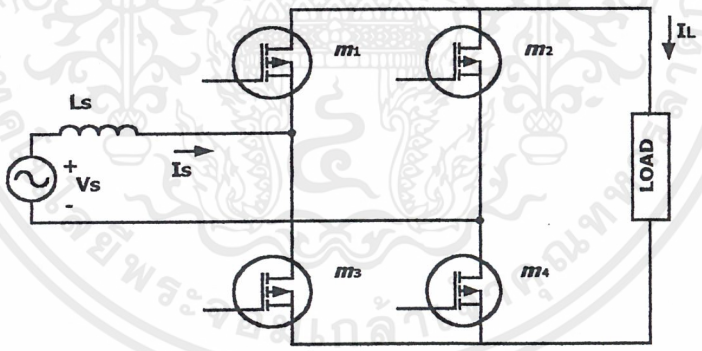
อัตราส่วนของการปรับค่าความถี่ (Frequency modulation ratio : m_f) หาได้จาก

$$mf = \frac{f_s}{f_1} \qquad \ldots(3.9)$$

เมื่อ fs = (carrier frequency) เป็นความถี่ของ Vtri

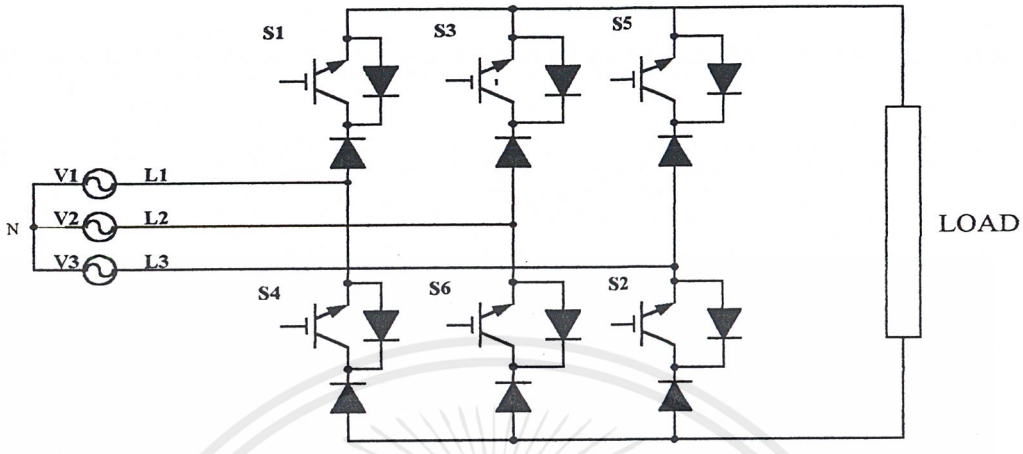
f1 = (modulating frequency) เป็นความถี่ของ Vcontrol

การนำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มมาควบคุมการทำงานของวงจร เร็คติไฟเออร์ โดยนำมาเป็นสัญญาณทริกให้กับอุปกรณ์ สวิทช์ชิ่ง ที่มีการควบคุมโดยใช้แรงดัน และมีความถี่ในการสวิทช์ ค่อนข้างสูง เช่น MOSFET และ IGBT เป็นต้น ลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 3.9และ 3.10



รูปที่ 3.9 วงจร One-phase PWM Control Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงวงจร Three-phase PWM control rectifier

หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจร พีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

วงจรควบคุม การทำงานในส่วนของวงจรควบคุมเริ่มจากที่ชุดตรวจจับจุดตัดศูนย์เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเข้ามาที่วงจรตรวจจับ ส่วนที่เป็นสัญญาณ (+) ของทุกเฟส เอาท์พุต ที่ได้จากวงจรจะเป็นลอจิกหนึ่ง ส่วนที่เป็นสัญญาณ (-) ของทุกเฟส เอาท์พุต ที่ได้จะเป็นลอจิกศูนย์ ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะมีการต่างเฟสกันโดยเฟสของแรงดันที่ป้อนเข้ามาและสัญญาณที่ได้จะมีคาบเวลา 180° ทางไฟฟ้า

เมื่อได้สัญญาณที่เฟสตรงกับแรงดันที่ป้อนเข้ามาแล้ว จะนำสัญญาณที่ได้มาผ่านวงจรลอจิกเกต (Logic Gate) เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความเหมาะสมกับสัญญาณที่จะนำไปสั่งให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงาน คือ มีคาบเวลา 120° ทางไฟฟ้า

วงจรสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม เป็นการนำสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากการสร้างโดยใช้ ไอซี มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันได้

นำสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมซึ่งมีคาบเวลา 120° ทางไฟฟ้ามาทำการ แอน (AND) กับสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม ที่สร้างขึ้นมาจะได้สัญญาณที่มีคาบเวลาที่ตรงกับแรงดันที่ป้อนเข้าและสามารถที่ปรับช่วงเวลาในการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จากสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม ที่รวมเข้าไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

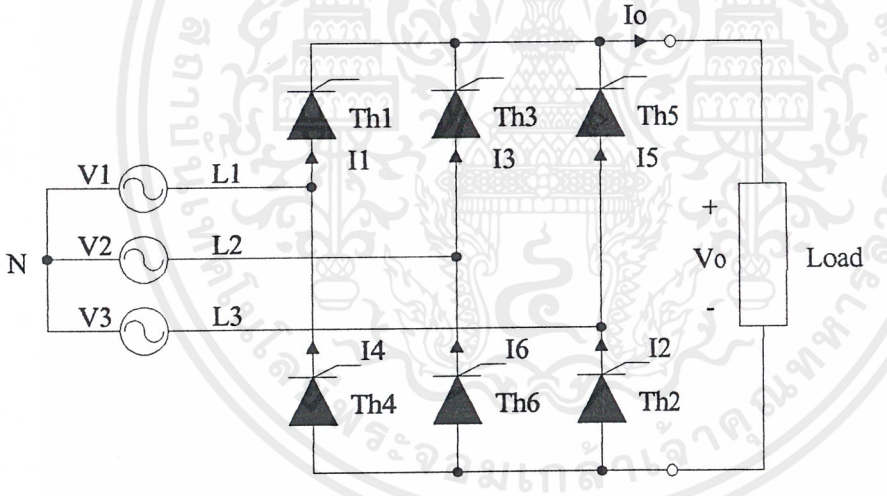
วงจรการทดลอง

วงจรการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

<u>ส่วนที่ 1</u> วงจรเฟสคอนโทรล (Phase Control Rectifier)

วงจร Full Bridge Rectifier

เป็นวงจรที่จะทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง โดยใช้ เอสซีอาร์ เบอร์ TYN610 ซึ่งสามารถใช้ได้ที่พิกัดแรงดันไม่เกิน 600 โวลท์ ที่พิกัดกระแส 10 แอมป์ ดังรูปที่ 4.1

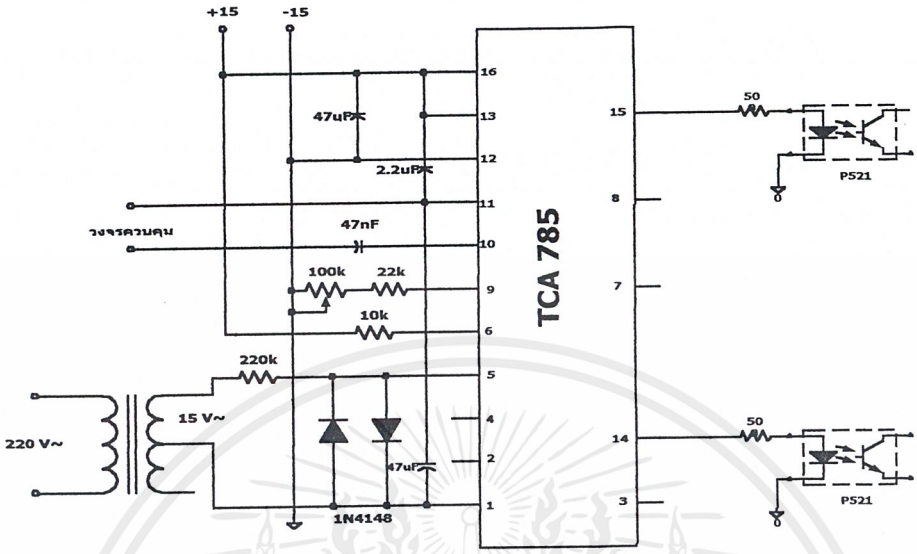


รูปที่ 4.1รูปวงจร Three-Phase Full Bridge Rectifier ของเฟสคอนโทรล

วงจร ขับเอสซีอาร์

การสร้างสัญญาณจุดชนวนเกตุให้กับ เอสซีอาร์ จะใช้ ไอซี เบอร์ TCA785 เป็นตัวสร้างสัญญาณดังรูปวงจรที่ 7 การปรับมุมทริกจะใช้วงจรควบคุมโดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณทางด้านเอาท์พุทของวงจรในส่วนของ พีดับบลิวเอ็มคอนโทรล เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่เท่ากัน สัญญาณทริกที่ได้จะนำไปทำการแยกกราวด์โดย ออปโต้ เบอร์ P521 เพื่อป้องกันการถึงกันทางไฟฟ้า

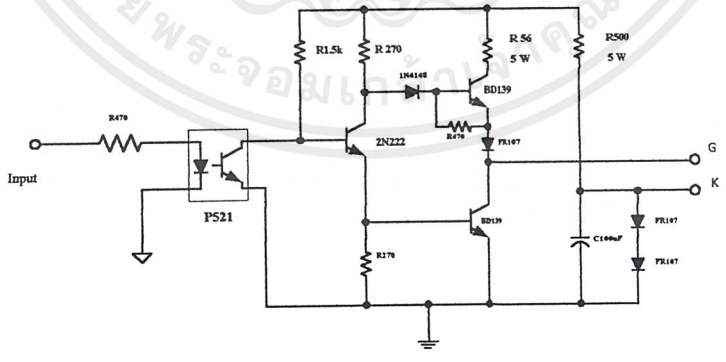
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงรูปวงจรจุดชนวนเกตุของ SCR โดยใช้ IC เบอร์ TCA785

วงจร ขับเอสซีอาร์

วงจรนี้จะใช้ ออปโต้ เบอร์ P521 เป็นตัวแยกกราวด์ เพื่อป้องกันอันตรายระหว่างวงจรทางด้านอินพุทและเอาท์พุทที่ต้องส่งสัญญาณทางไฟฟ้าถึงกัน สัญญาณที่ออกจาก ออปโต้ จะมีลักษณะกลับหัว ลักษณะเป็นโอเพนคอลเลคเตอร์ ลักษณะวงจรดังรูป 4.3



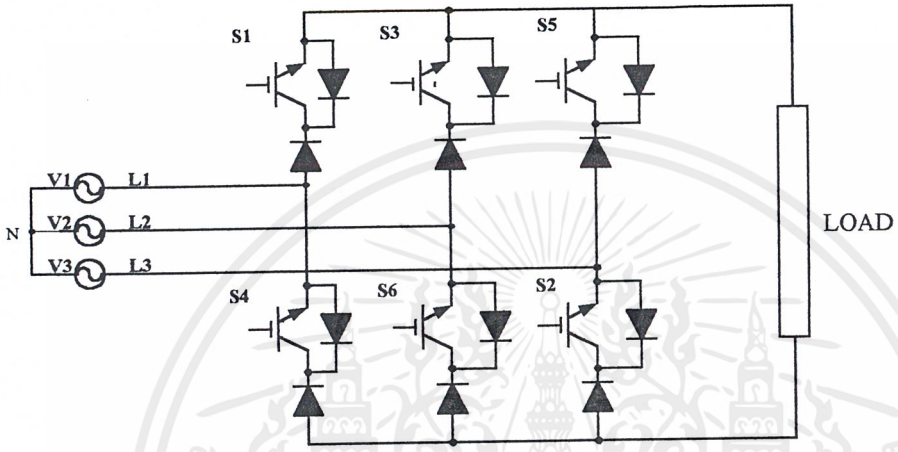
รูปที่ 4.3 แสดงวงจร Drive SCR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ส่วนที่ 2</u> วงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล (PWM Control Rectifier)

วงจร ฟลูบริดจ์เร็คติไฟเออร์

วงจรนี้จะมีลักษณะที่นำเอาอุปกรณ์สวิทช์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความถี่ในการสวิทช์สูงเช่น มอสเฟต หรือ IGBT มาต่อกันในลักษณะแบบบริดจ์ ดังรูปที่ 4.4



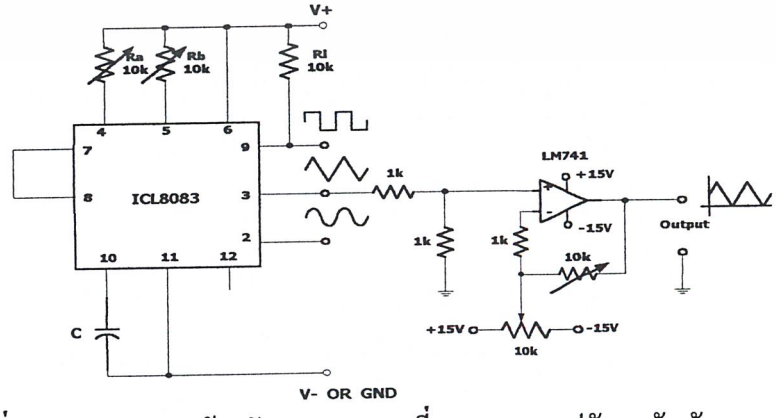
รูปที่ 4.4 แสดงรูปวงจร Full Bridge Rectifier ของ PWM คอนโทรล

วงจรสร้างสัญญาณ PWM

วงจรสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

-วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

สัญญาณสามเหลี่ยมสามารถสร้างโดยใช้ไอซีเบอร์ ICL8038 ตามรูปวงจรที่ 4.5โดยที่ R_a และ R_b สามารถปรับค่าได้เพื่อที่จะปรับค่าความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมได้ จากนั้นจะนำมาผ่านวงจรเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยใช้ ออปแอมป์ เบอร์ LM741 ที่มีการต่อวงจรเป็นแบบ นอนอินเวอร์ติ้ง(Non-inverting ๗ ซึ่งจะทำให้มีลักษณะของเฟสคงเดิม

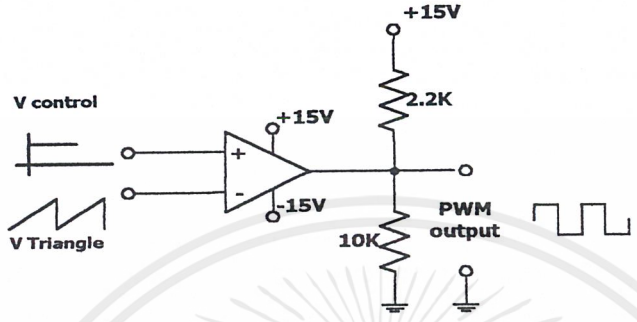


รูปที่ 4.5 แสดงวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจรปรับระดับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

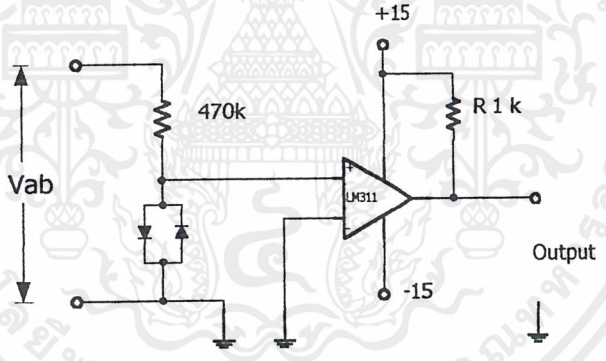
-วงจร คอมพาราเตอร์ (Comparator)

เป็นวงจรที่นำสัญญาณที่ได้จากวงจรสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง นำมาเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้ ออปแอมป์ เบอร์ LM311 มาใช้ในการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงวงจร Comparator ที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM311

-ชุดตรวจจับจุดตัดศูนย์



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรชุดตรวจจับศูนย์

การทำงานในส่วนของชุดตรวจจับจุดตัดศูนย์เริ่มจากเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเข้ามาที่วงจรตรวจจับ ส่วนที่เป็นสัญญาณ (+) ของทุกเฟส เอาท์พุต ที่ได้จากวงจรจะเป็นลอจิกหนึ่ง ส่วนที่เป็นสัญญาณ (-) ของทุกเฟส เอาท์พุต ที่ได้จะเป็นลอจิกศูนย์ ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะมีการต่างเฟสกันโดยเฟสของแรงดันที่ป้อนเข้ามาและสัญญาณที่ได้จะมีคาบเวลา180°ทางไฟฟ้าเมื่อได้สัญญาณที่เฟส ตรงกับแรงดันที่ป้อนเข้ามาแล้ว จะนำสัญญาณที่ได้มาผ่านวงจร ลอจิกเกต (Logic Gate) เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความเหมาะสมกับสัญญาณที่จะนำไปสั่งให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงาน คือ มีคาบเวลา 120°ทางไฟฟ้า

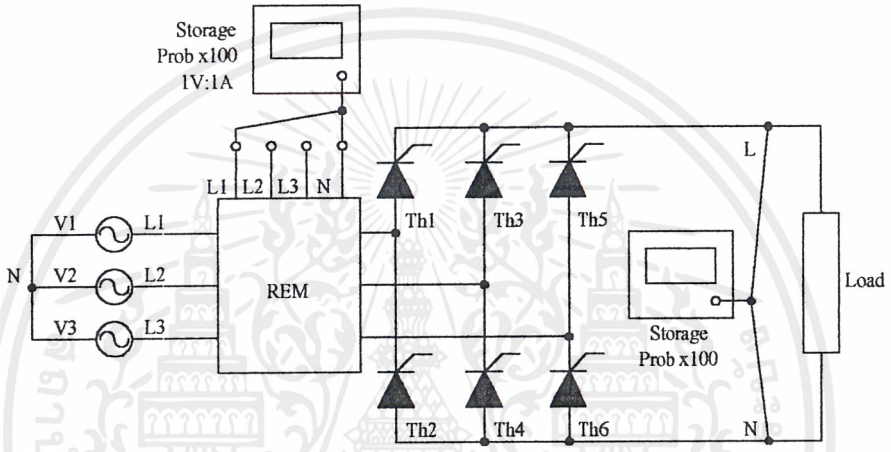
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5

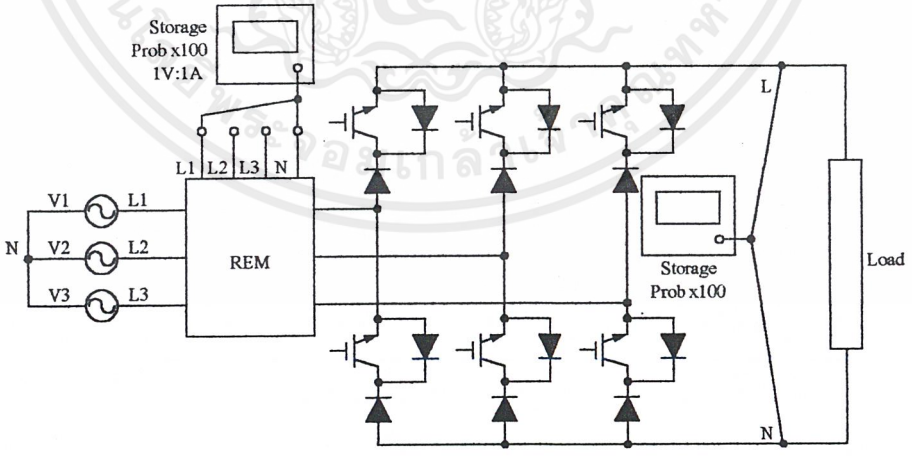
ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 การวัดค่าแรงดันอินพุต (Input voltage) แรงดันเอาท์พุต (Output voltage) และกระแสอินพุต (Input current)ของวงจร เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

วงจรการทดลอง



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของแรงดัน Input แรงดัน Output และ กระแส Input ของวงจร Three phase control rectifier



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของแรงดัน Input แรงดัน Output และ กระแส Input ของวงจร PWM control rectifier

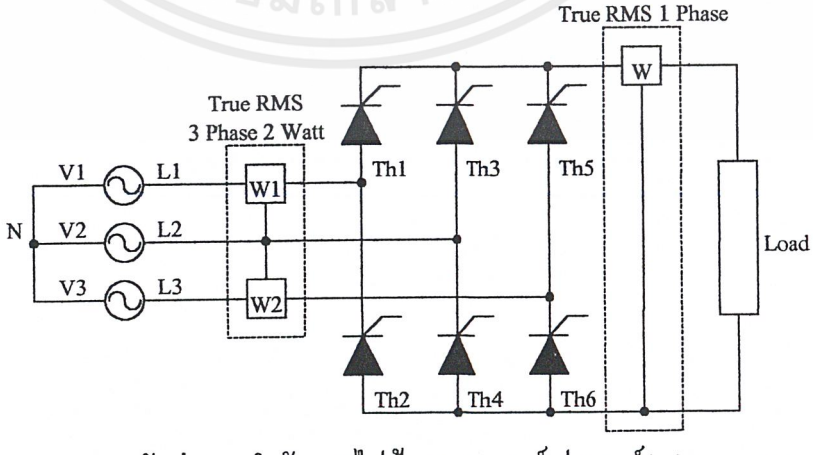
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.1 โดยต่อโหลดเป็นโหลดความต้านทาน
2. ป้อนแหล่งจ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุมและชุดวงจรการทดลอง
3. ปรับมุมจุดชนวนให้ได้แรงดันขาออกเท่ากับ 75 โวลท์
4. บันทึกผลการทดลองค่าแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกและกระแสขาเข้าในรูปของ File ASCI โดยใช้ Storage เป็นอุปกรณ์บันทึกผล
5. ทำการทดลองขั้นที่ 3 และ 4 อีกโดยการปรับมุมจุดชนวนให้ได้แรงดันขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 50 โวลท์ ไปจนถึงแรงดันขาออกมีค่าสูงสุด
6. นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หา Harmonic ที่มีผลกระทบต่อวงจร โดยใช้โปรแกรม MATLAB
7. เปลี่ยนโหลดเป็นโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ(R =1100 วัตต์,L=2H) แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ1-6
8. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.2 โดยต่อโหลดเป็นโหลดความต้านทาน
9. ทำการทดลองตามการทดลองข้อที่ 1-7
10. นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน
11. สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

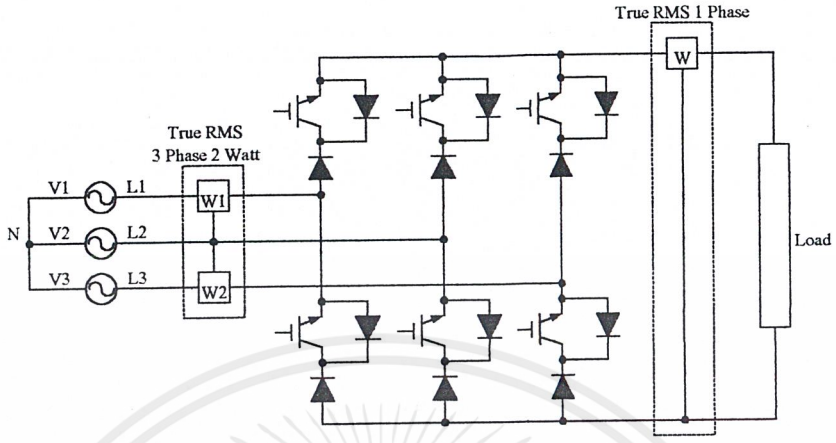
การทดลองที่ 2 การวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้า (P)เพาเวอร์เฟคเตอร์(pf) และหาค่าของTHDi THDv และ Power Losses

วงจรการทดลอง



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้า (P)เพาเวอร์เฟคเตอร์(pf) ของวงจร Three phase control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงวงจรการทดลองวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้า (P)เพาเวอร์เฟคเตอร์(pf) ของวงจร PWM control rectifier

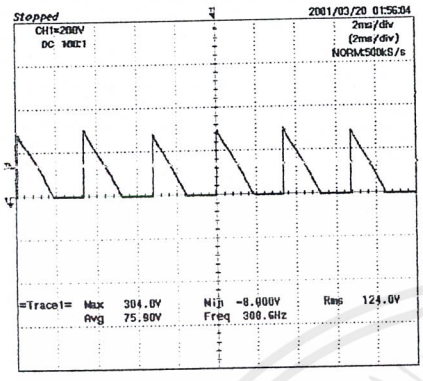
ลำดับขั้นการทดลอง

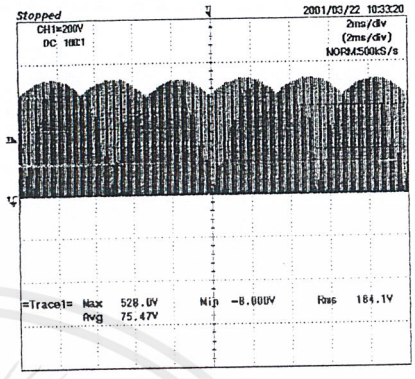
1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.3 โดยต่อโหลดเป็นโหลดความต้านทาน
2. ป้อนแหล่งจ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุมและชุดวงจรการทดลอง
3. ปรับมุมจุดชนวนให้ได้แรงดันขาออกเท่ากับ 75 โวลท์
4. บันทึกผลของ แรงดันอินพุต แรงดันเอาท์พุต กระแสอินพุต ค่ากำลังงานไฟฟ้าทั้งทางด้านอินพุตและเอาท์พุต ค่าเพาเวอร์เฟคเตอร์ ตามตารางบันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองขั้นที่ 3 และ 4 อีกโดยการปรับมุมจุดชนวนให้ได้แรงดันขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 50 โวลท์ ไปจนถึงแรงดันขาออกมีค่าสูงสุด
6. นำผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าของ Power Losses ,THDi และ THDvนำค่าที่ได้มาเขียนเป็นกราฟ
7. เปลี่ยนโหลดเป็นโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ(R =1100 วัตต์,L=2H) แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ1-6
8. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.4 โดยต่อโหลดเป็นโหลดความต้านทาน
9. ทำการทดลองตามการทดลองข้อที่ 1-7
10. นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน
11. สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

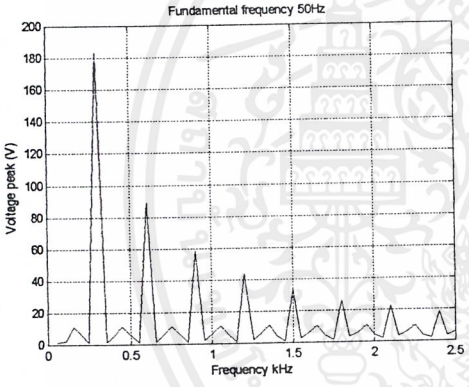
ผลการทดลองที่ 1

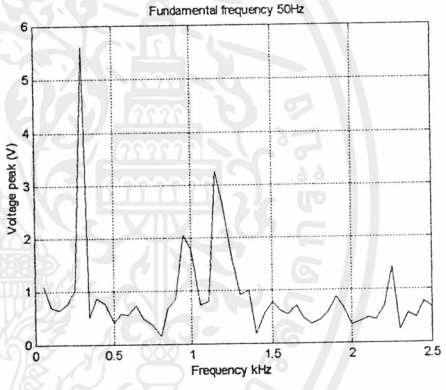
1. ที่แรงดัน Output = 75 volt , LOAD R=1100 W



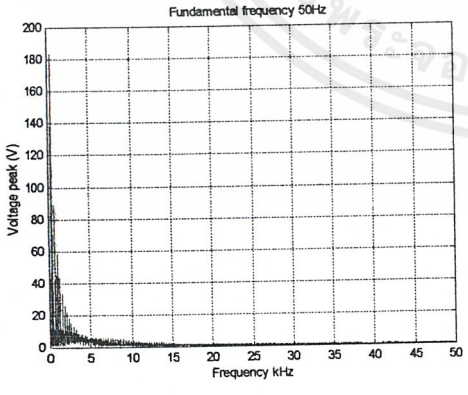


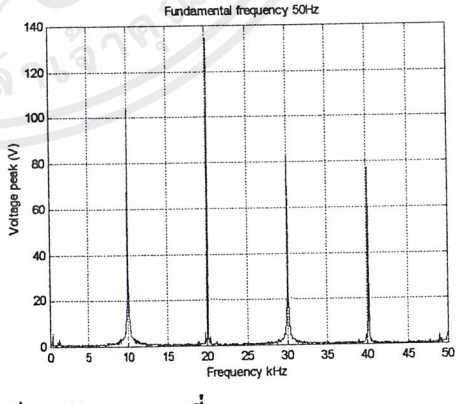
(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output





(ข)แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz

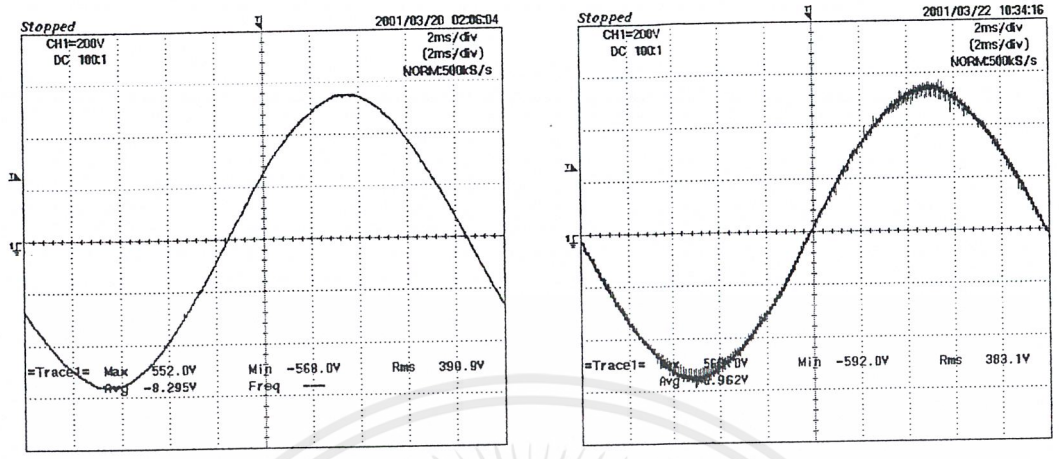




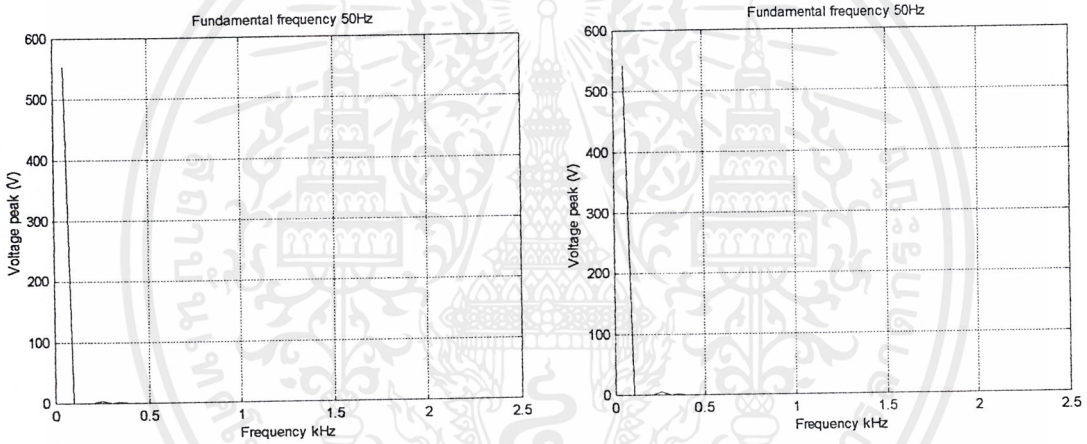
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt ,Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

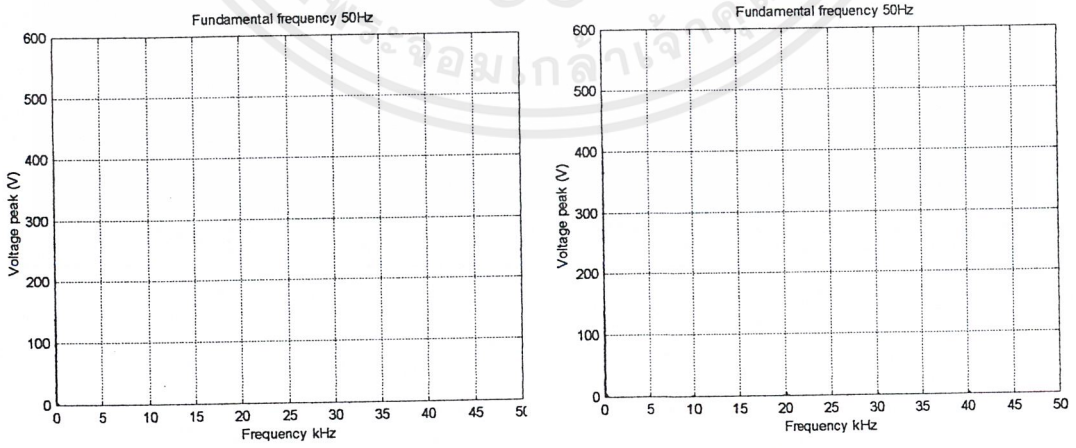
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



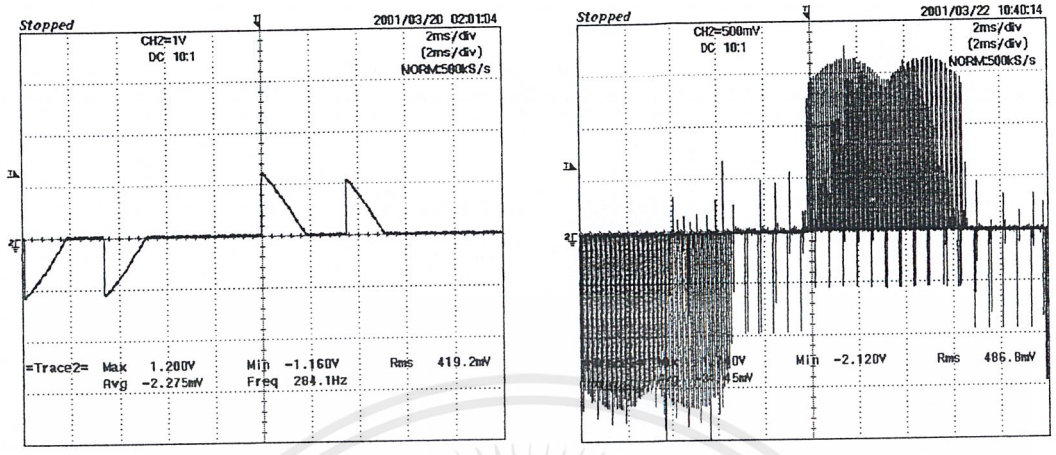
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



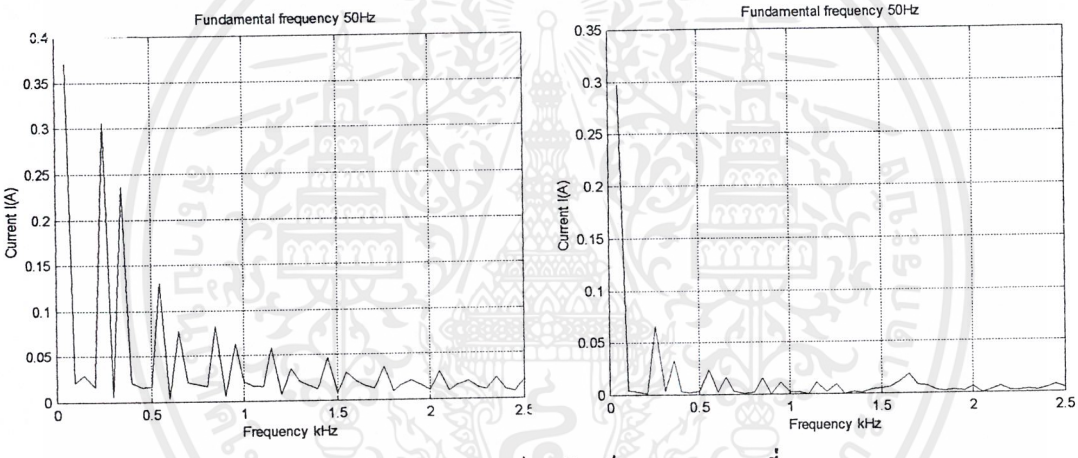
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.5 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

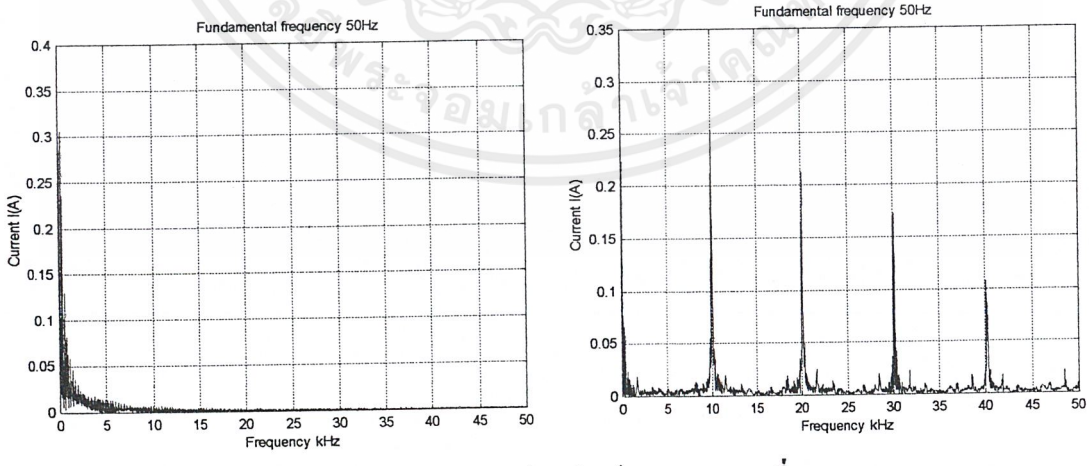
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

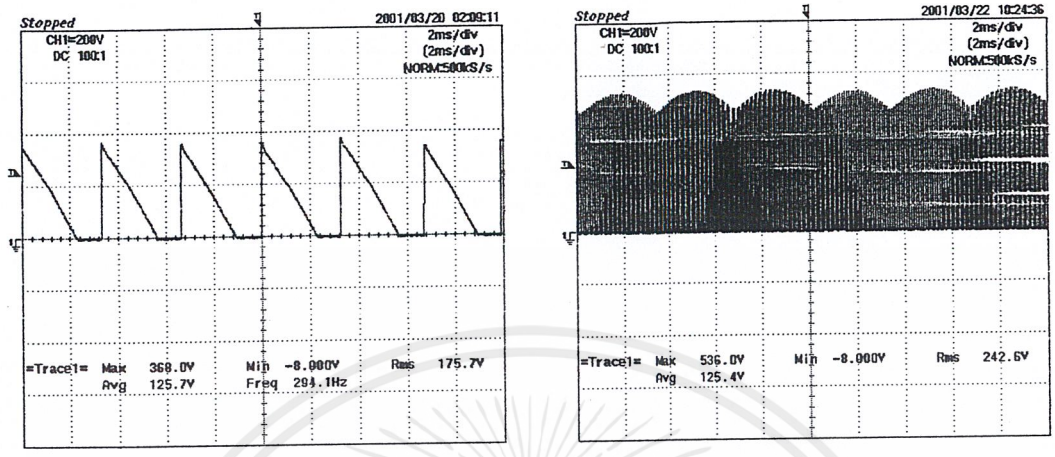


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

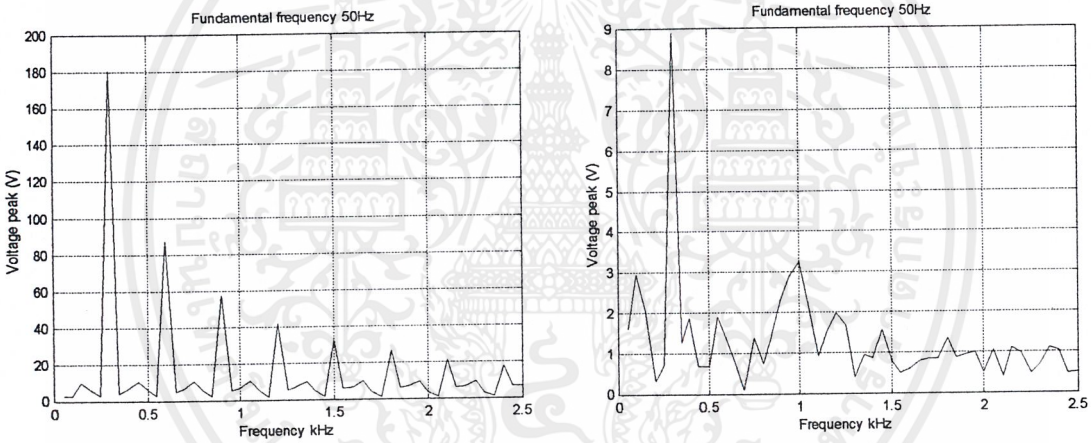
รูปที่ 5.5 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

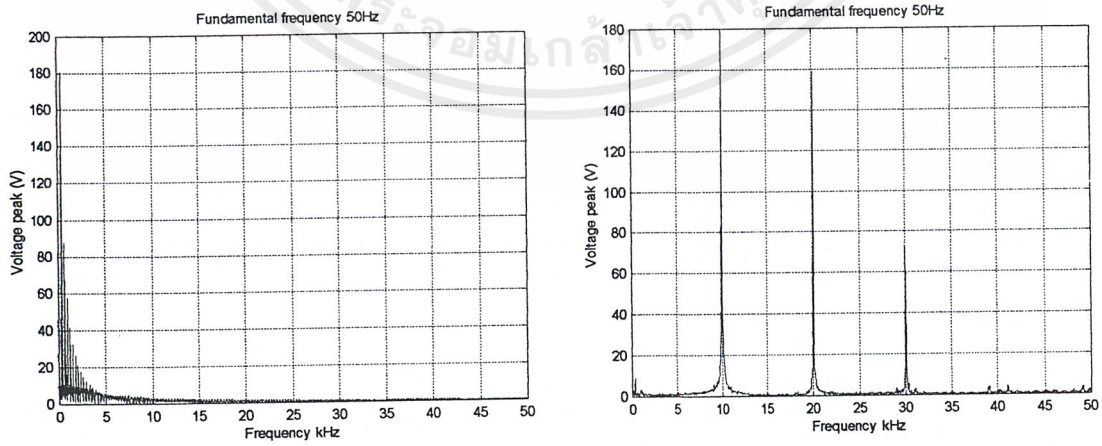
2. ที่แรงดัน Output = 125 volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



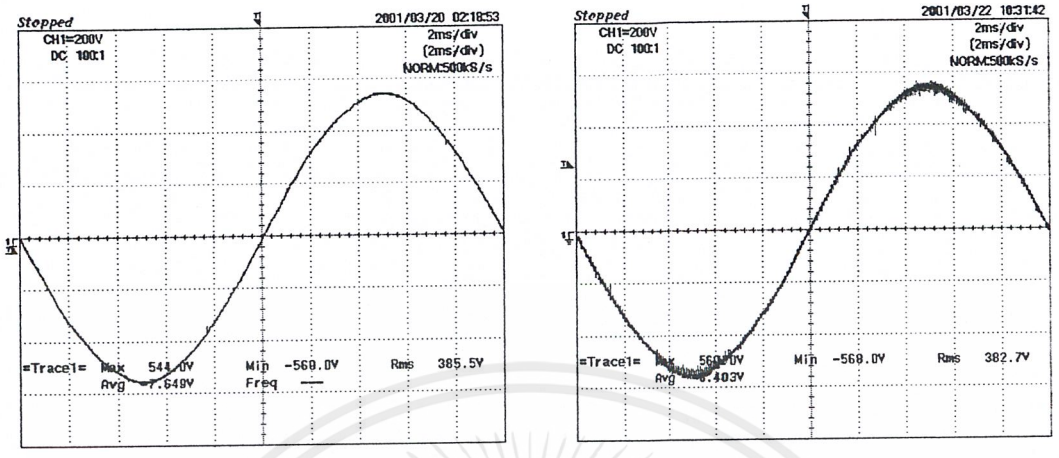
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



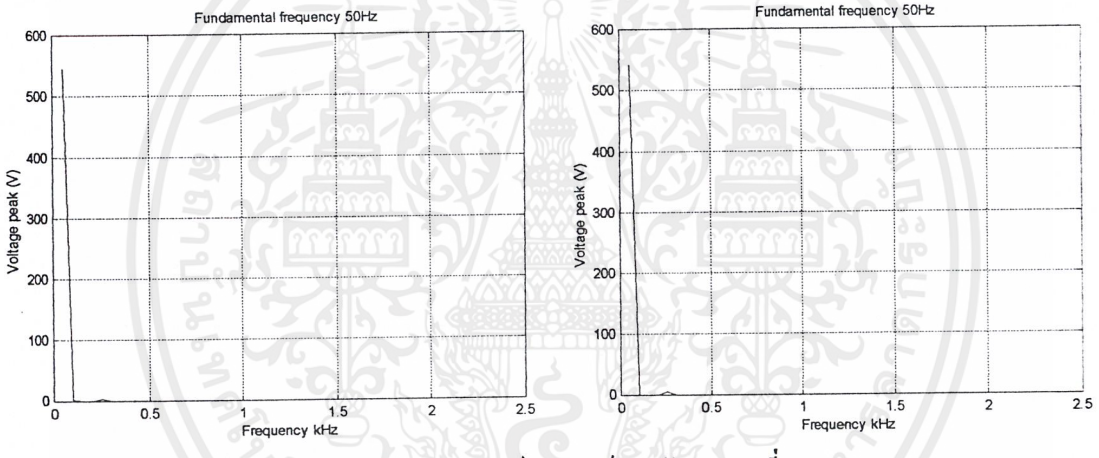
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

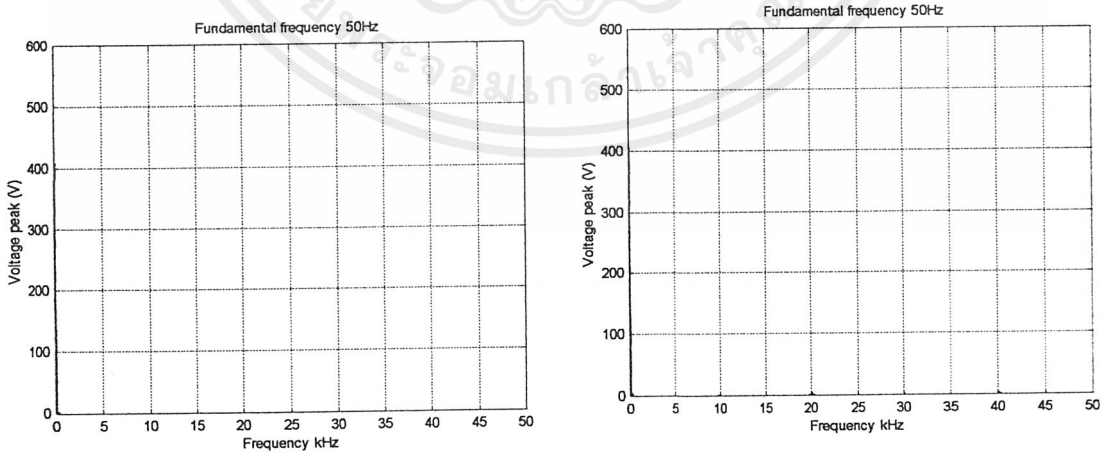
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



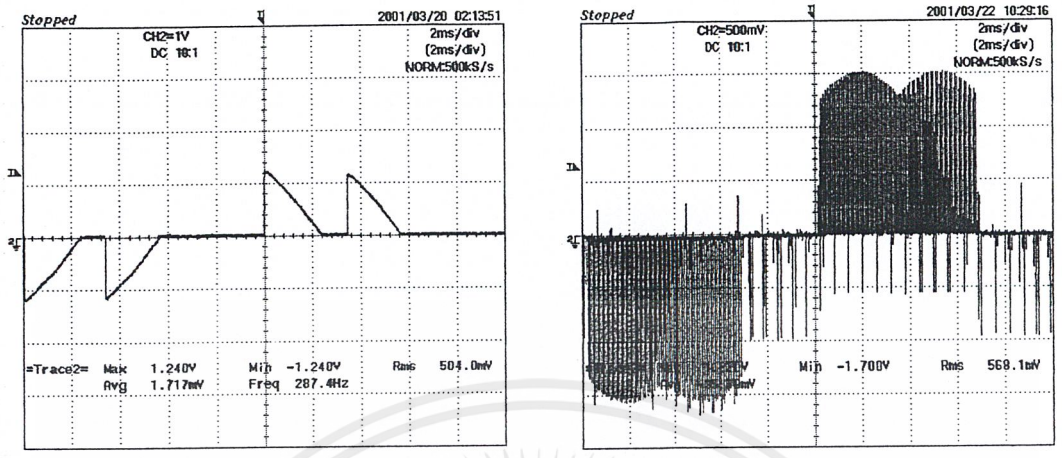
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



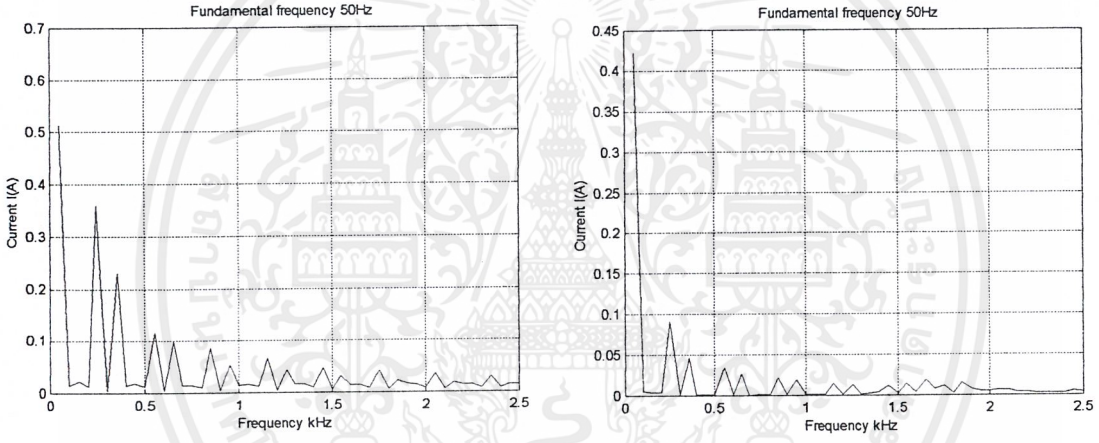
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.6 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

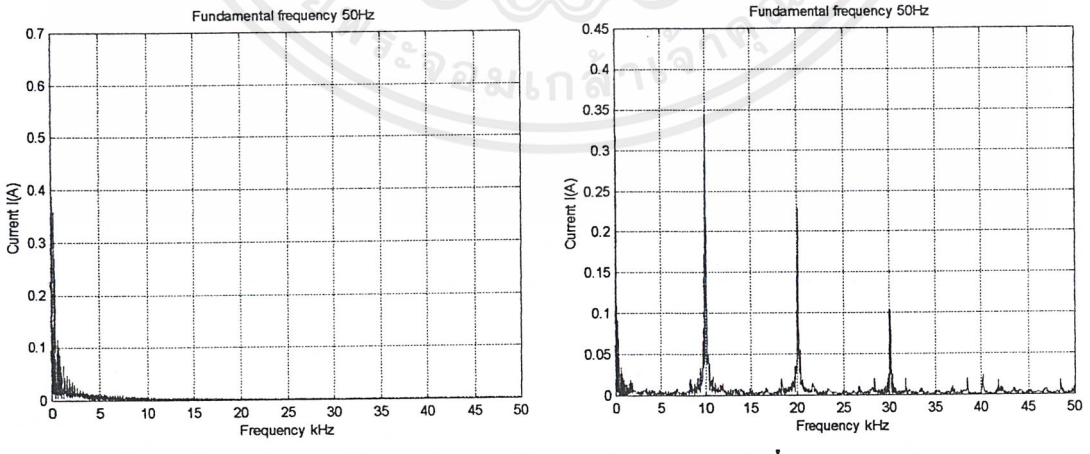
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

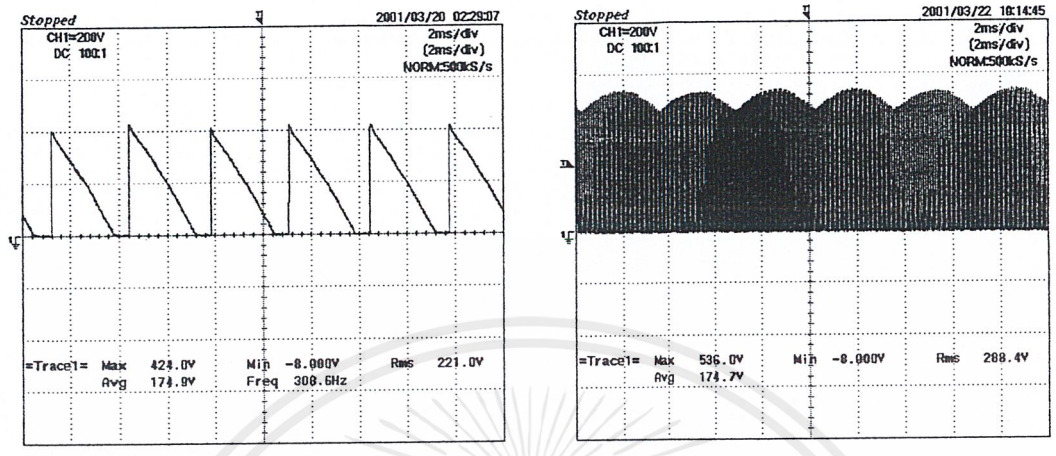


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

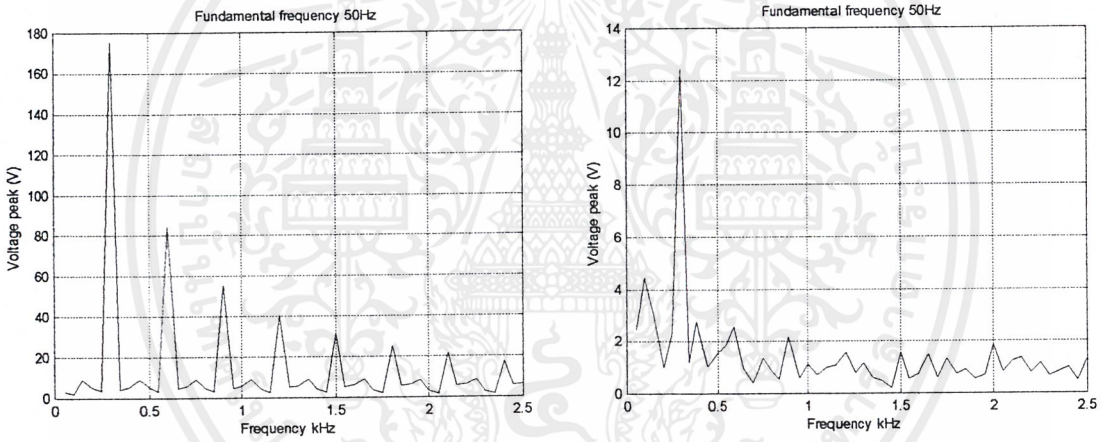
รูปที่5.6 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

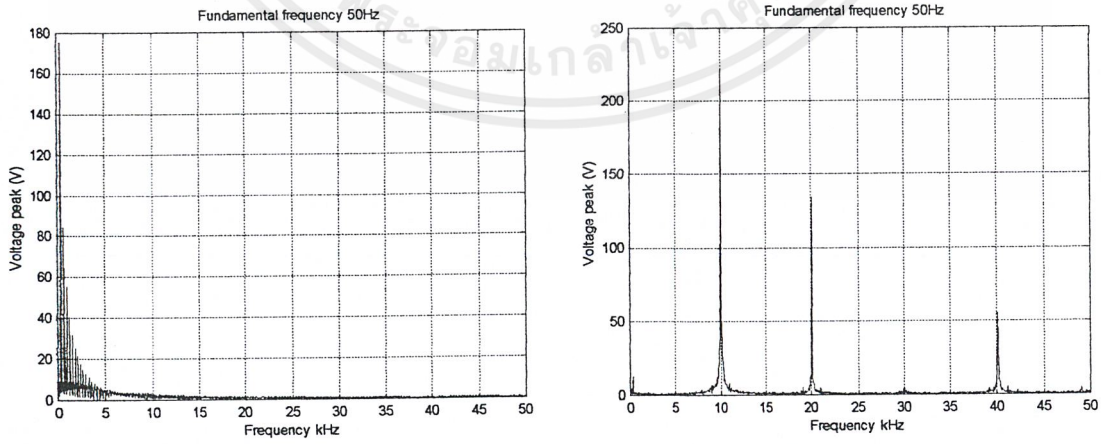
3. ที่แรงดัน Output = 175 volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



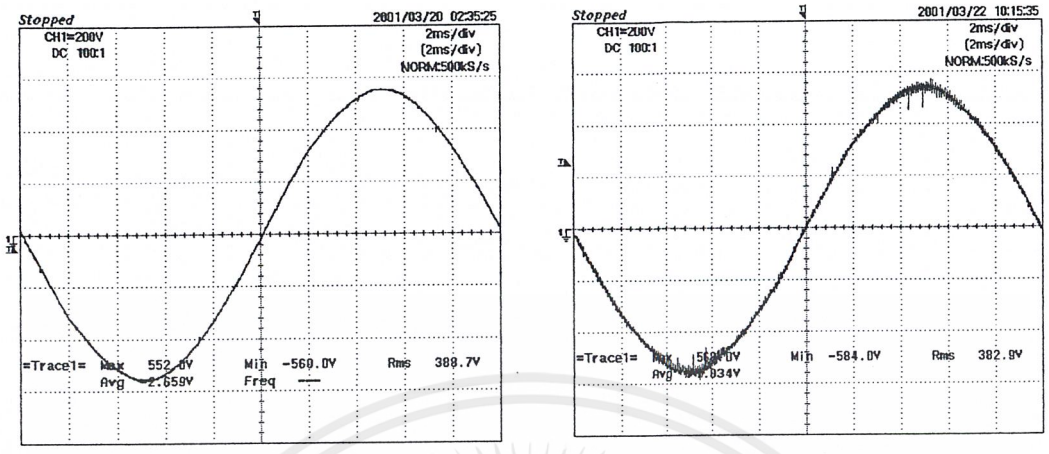
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



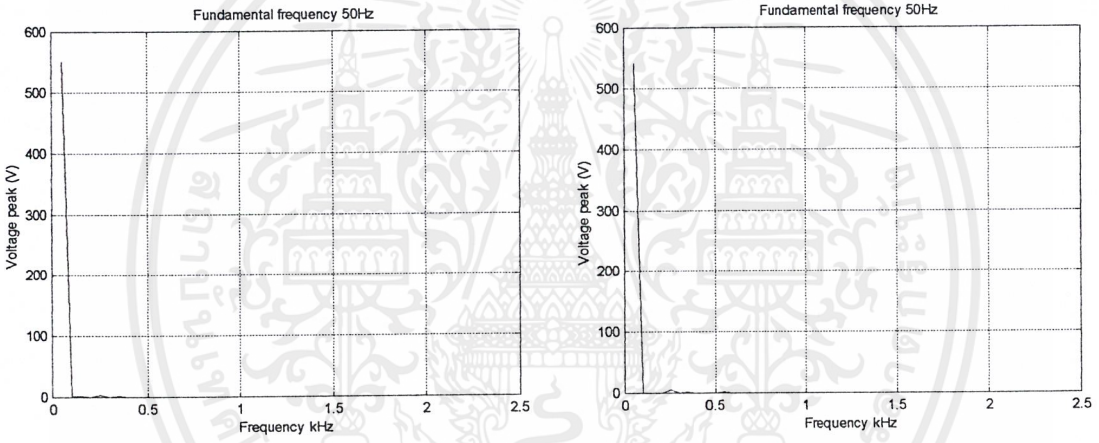
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

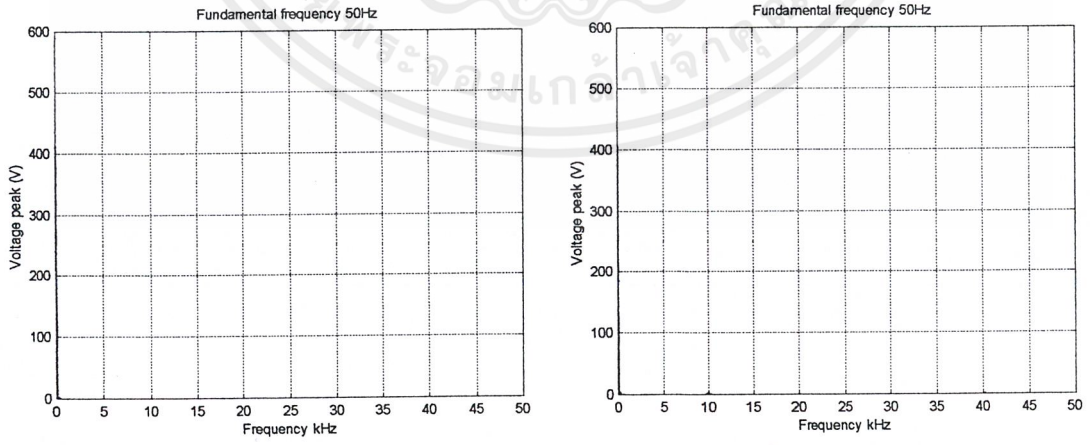
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



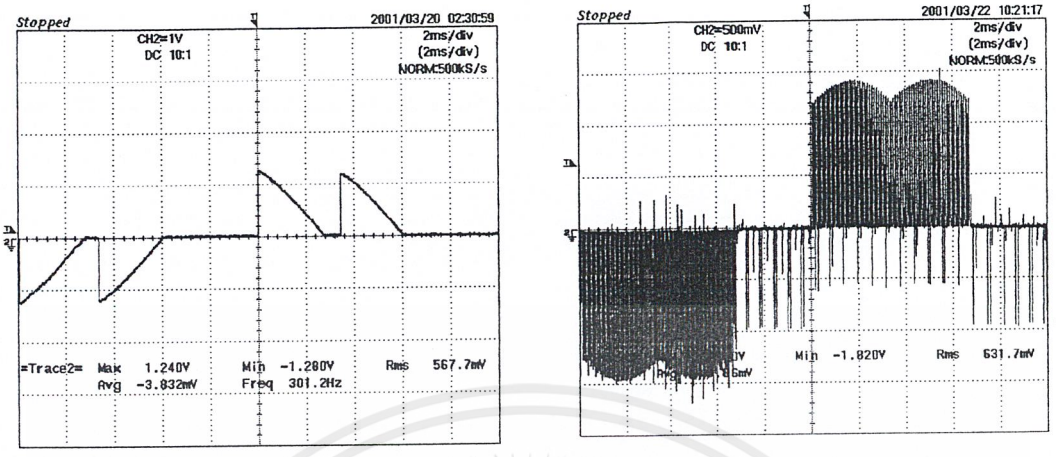
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



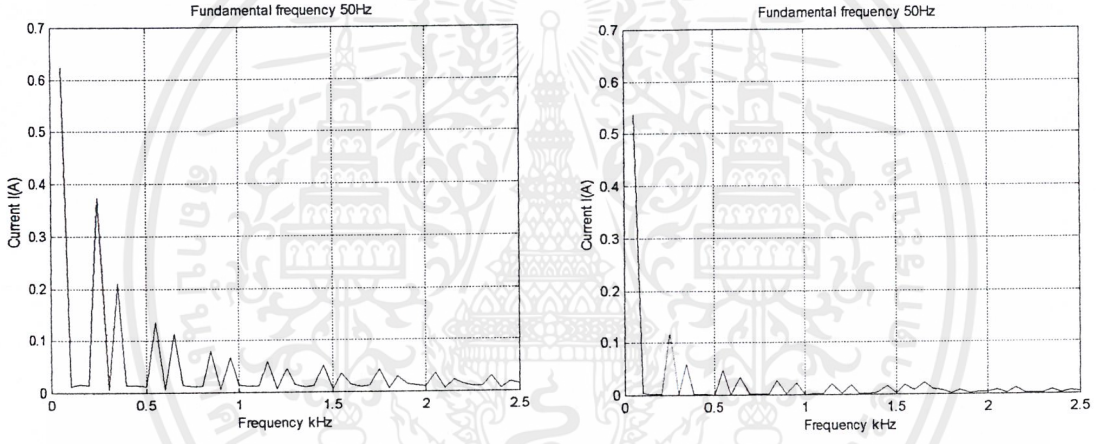
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.7 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

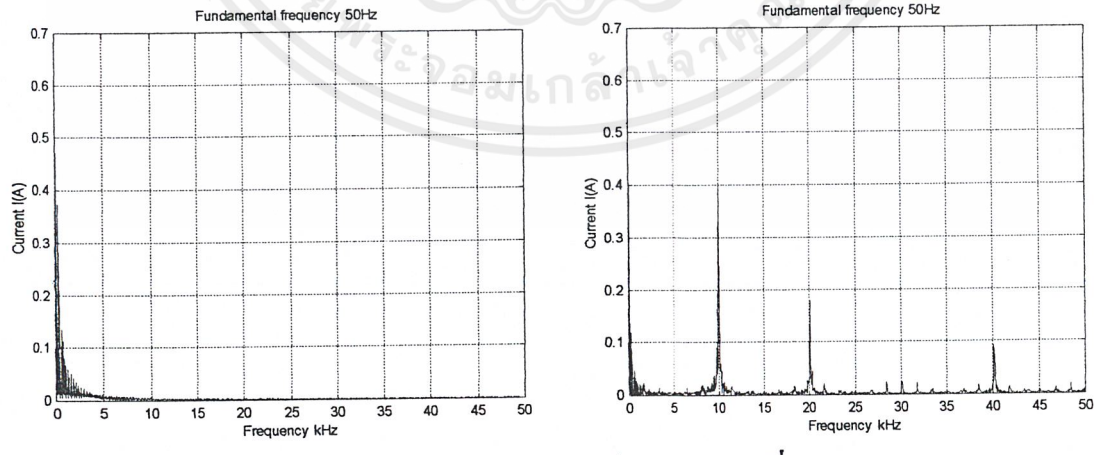
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

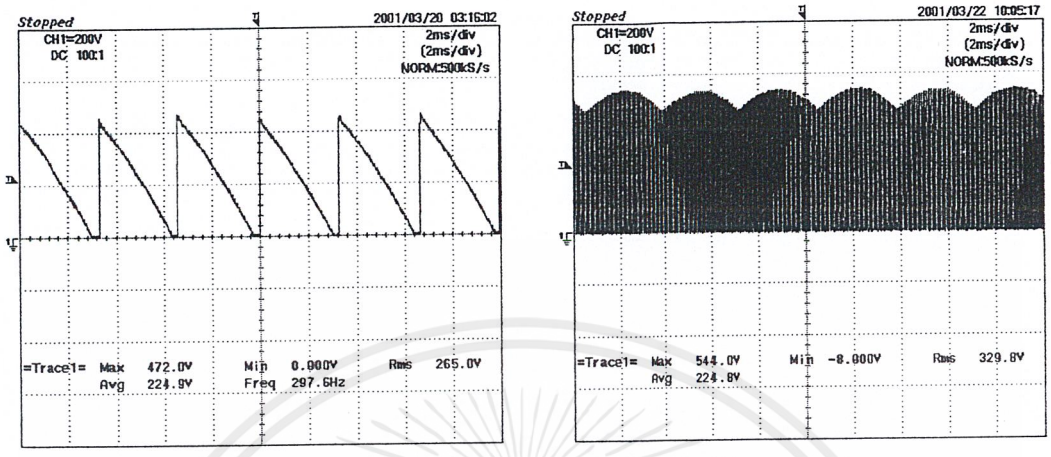


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

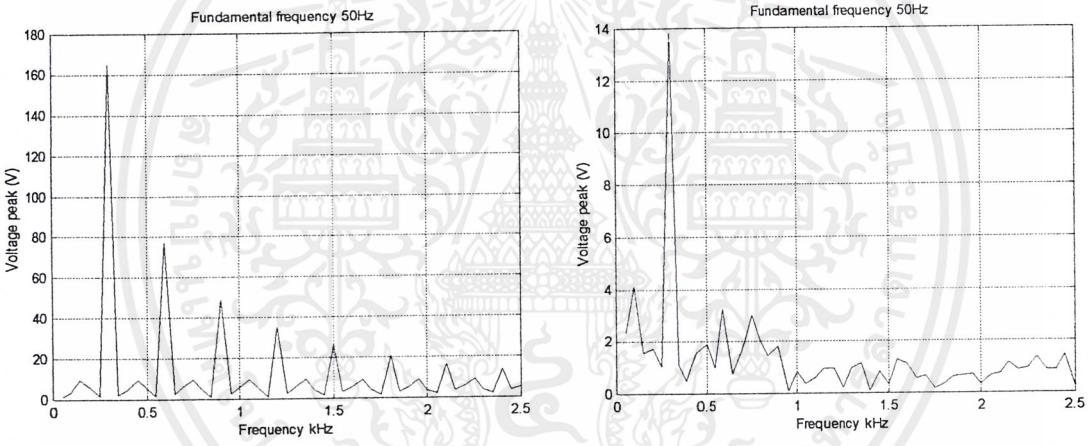
รูปที่ 5.7 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt ,Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

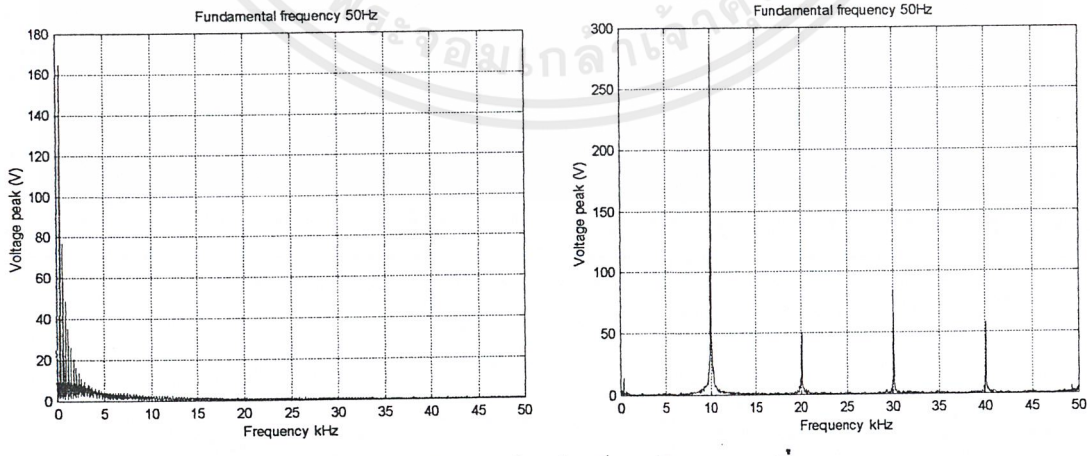
4. ที่แรงดัน Output = 225volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



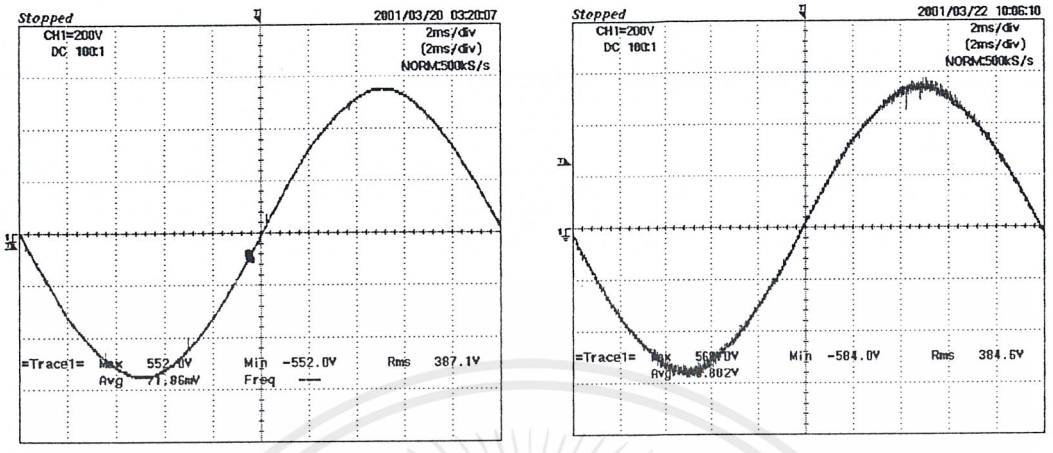
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



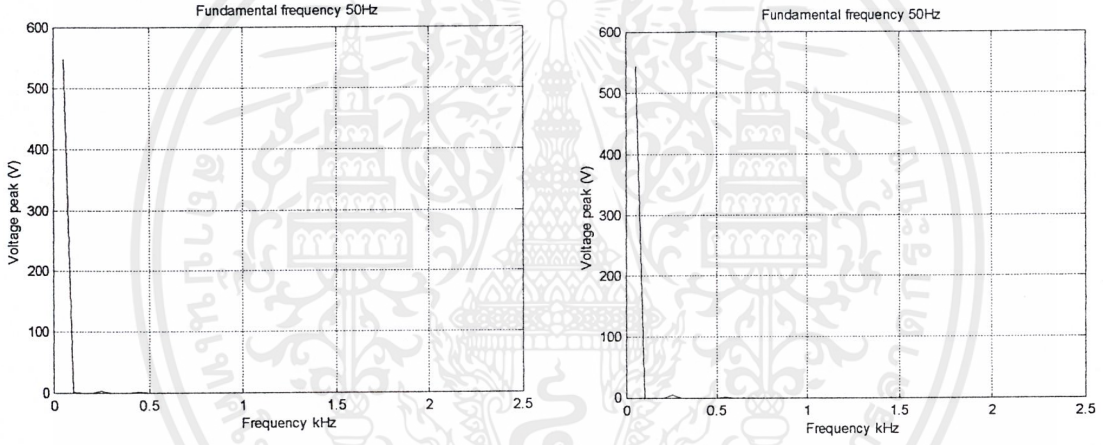
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

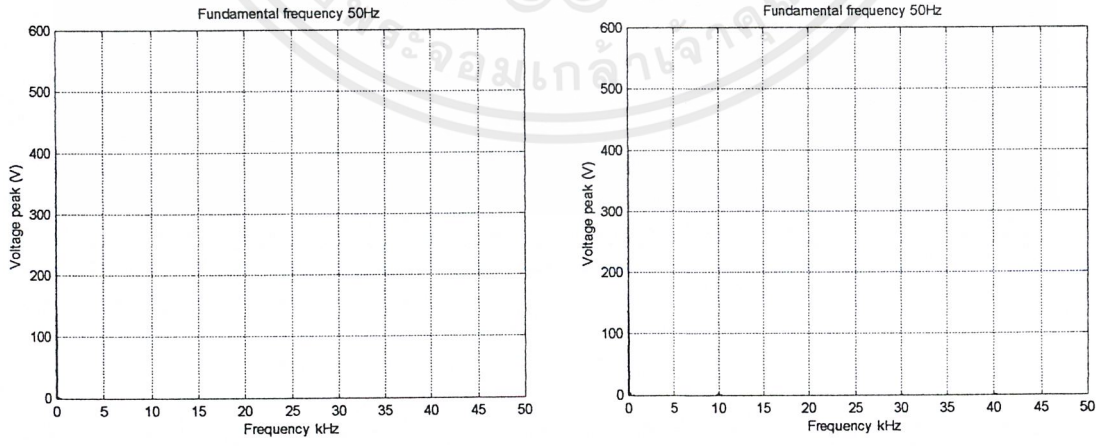
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



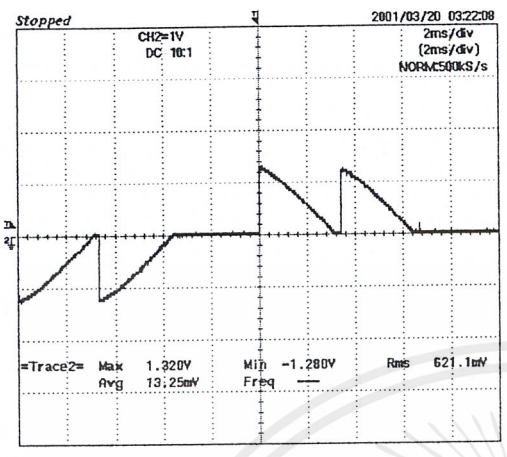
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

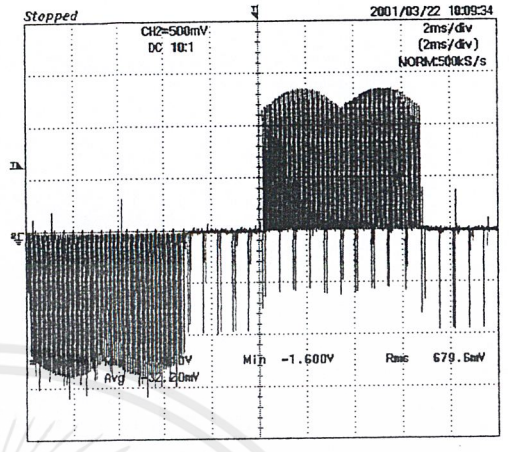


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

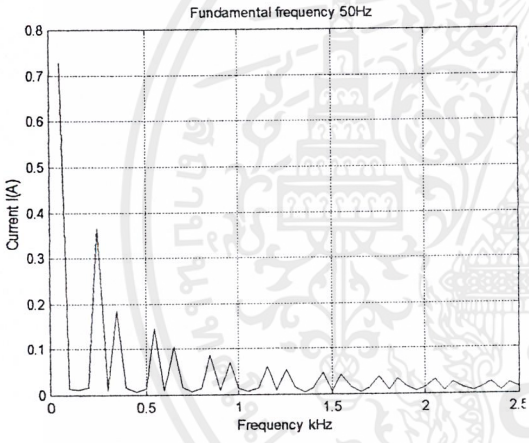
รูปที่ 5.8 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

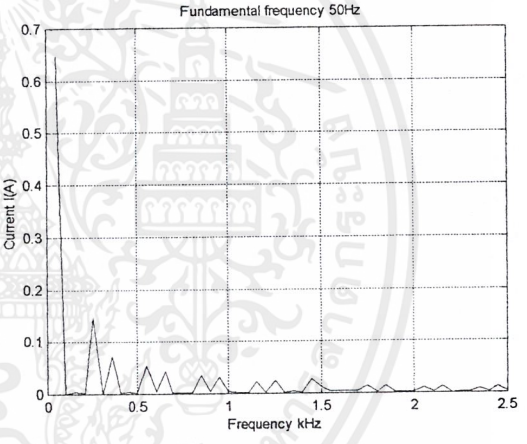
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



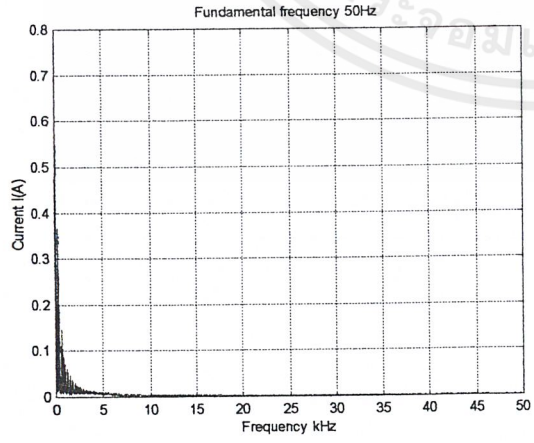


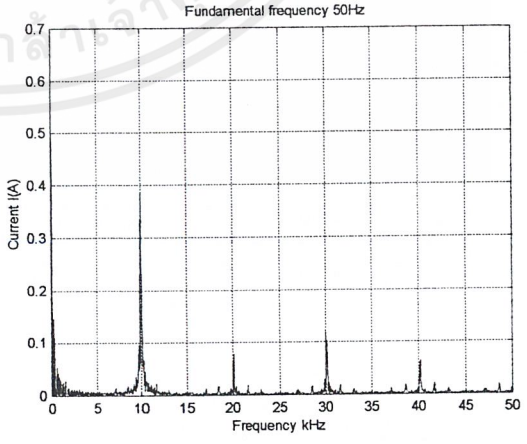
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



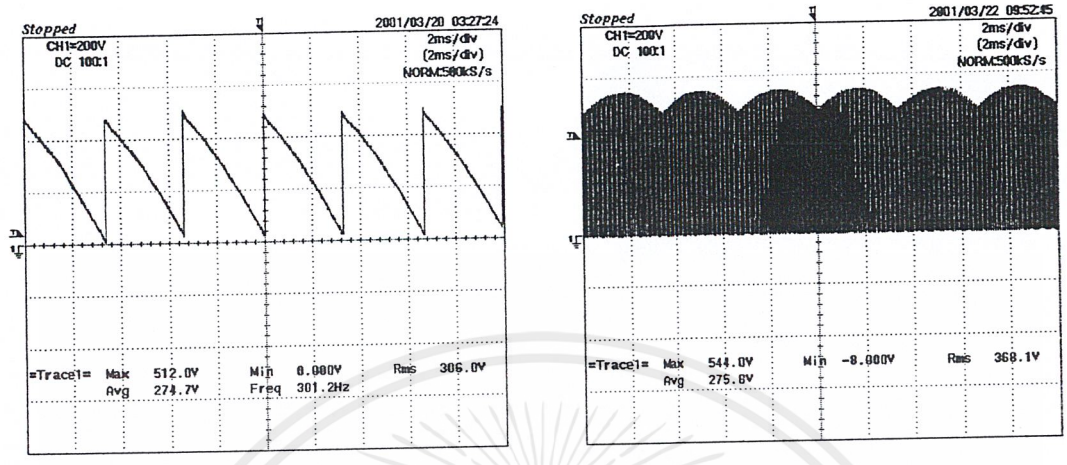


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

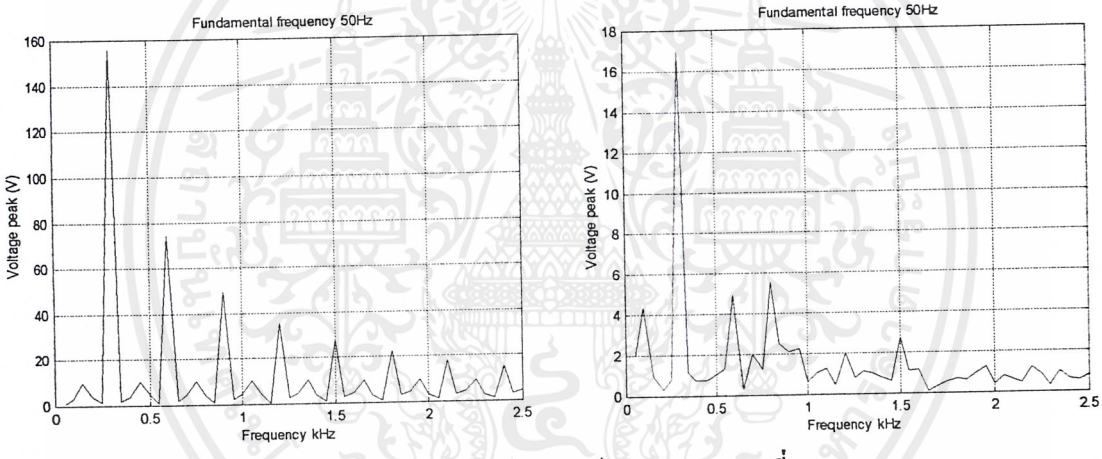
รูปที่ 5.8 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

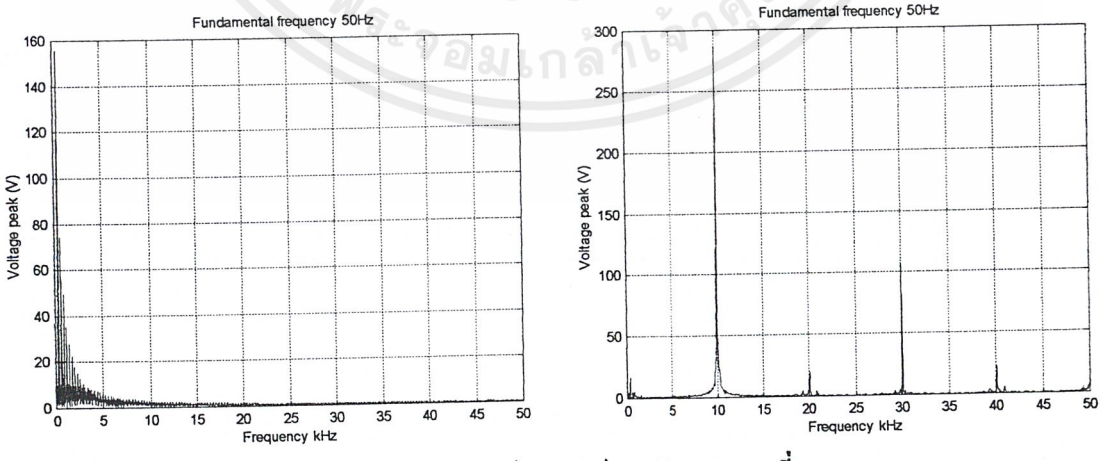
5. ที่แรงดัน Output = 275volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



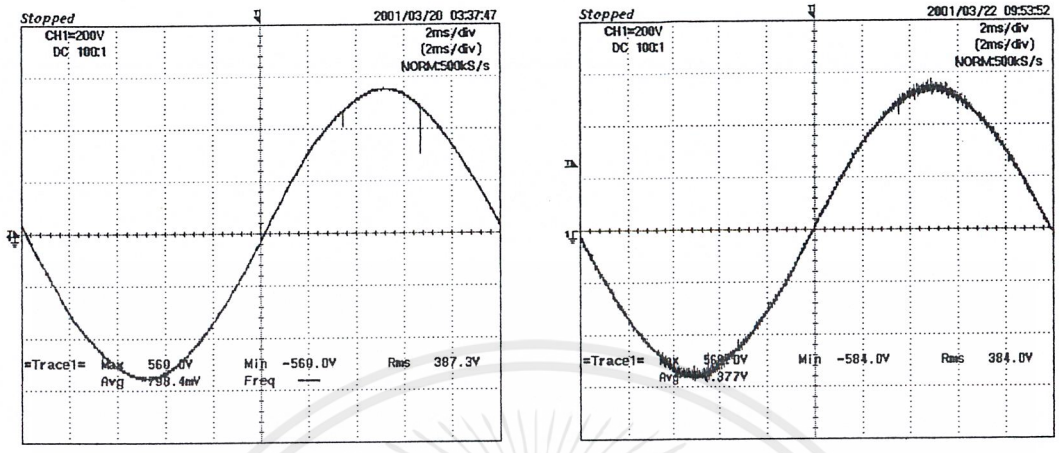
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



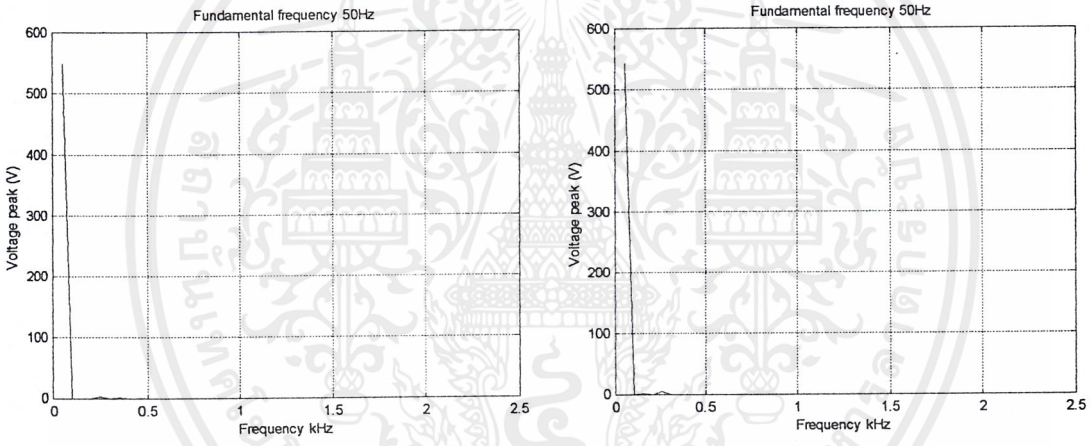
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

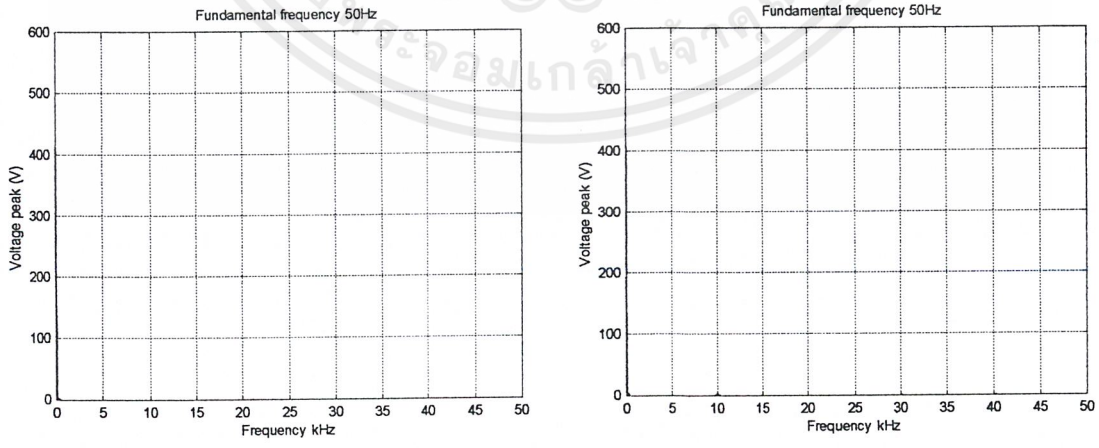
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



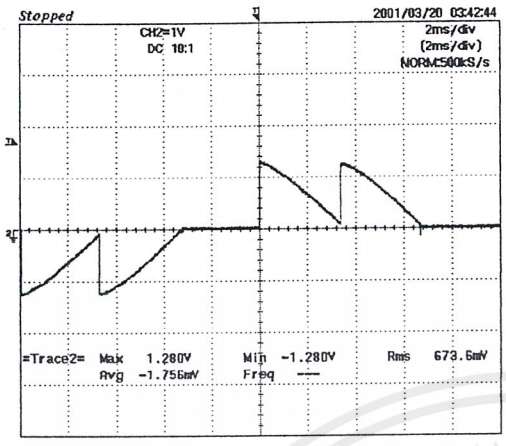
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

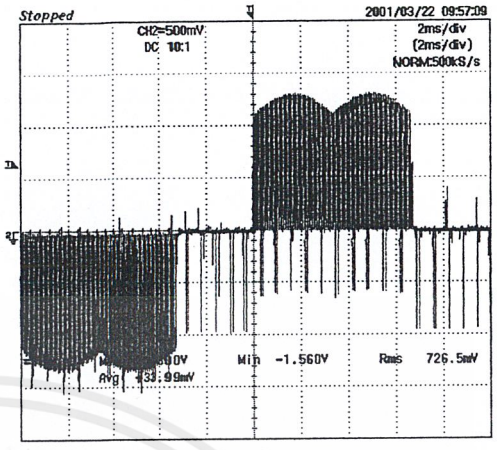


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

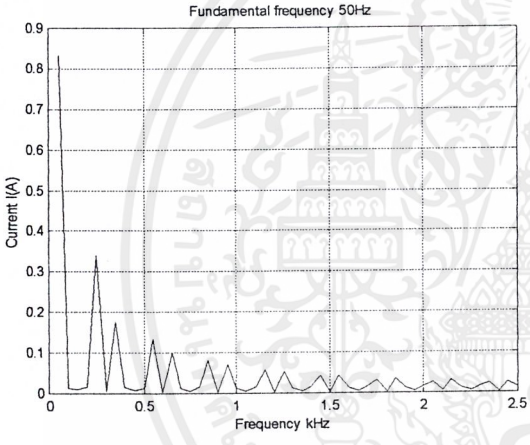
รูปที่ 5.9 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

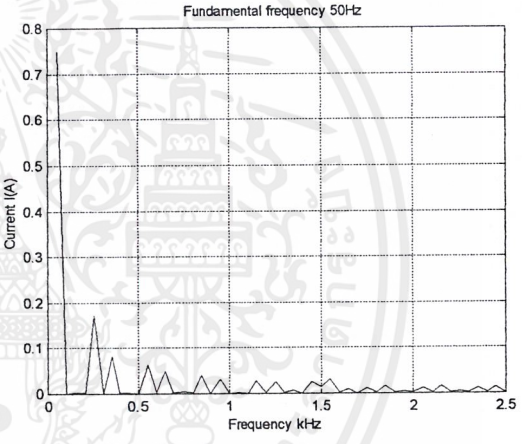
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



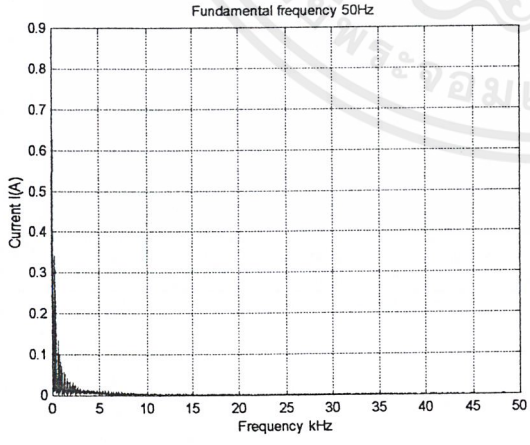


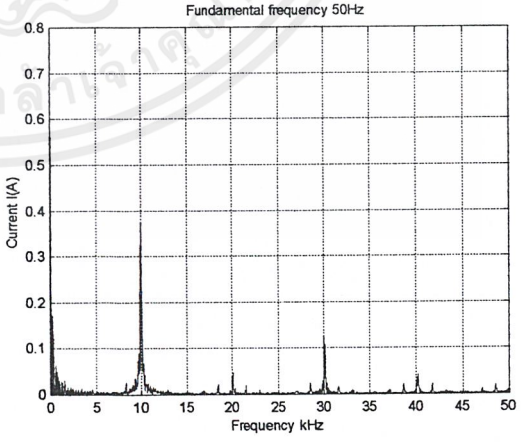
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



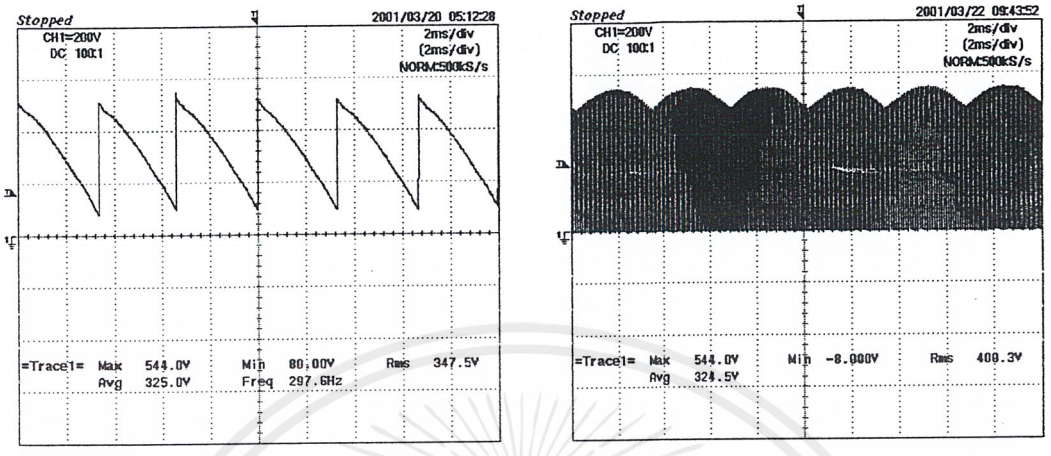


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

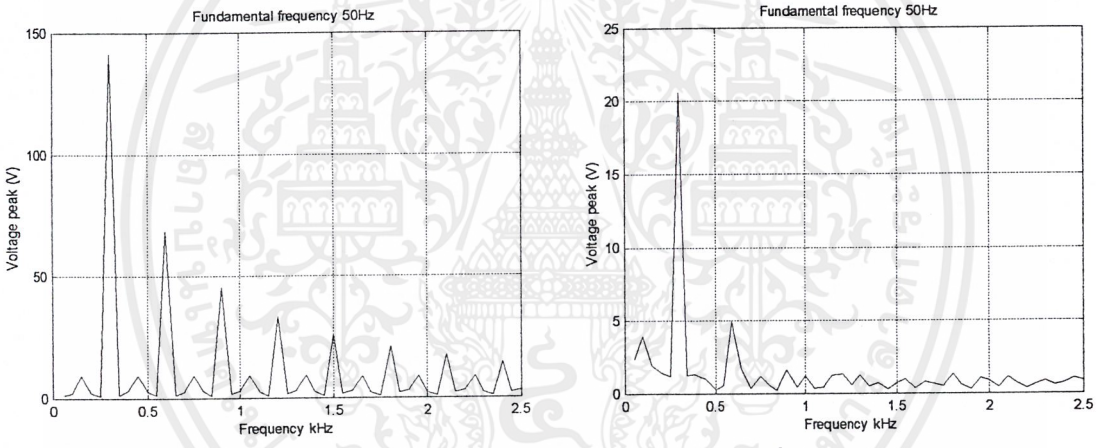
รูปที่ 5.9 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

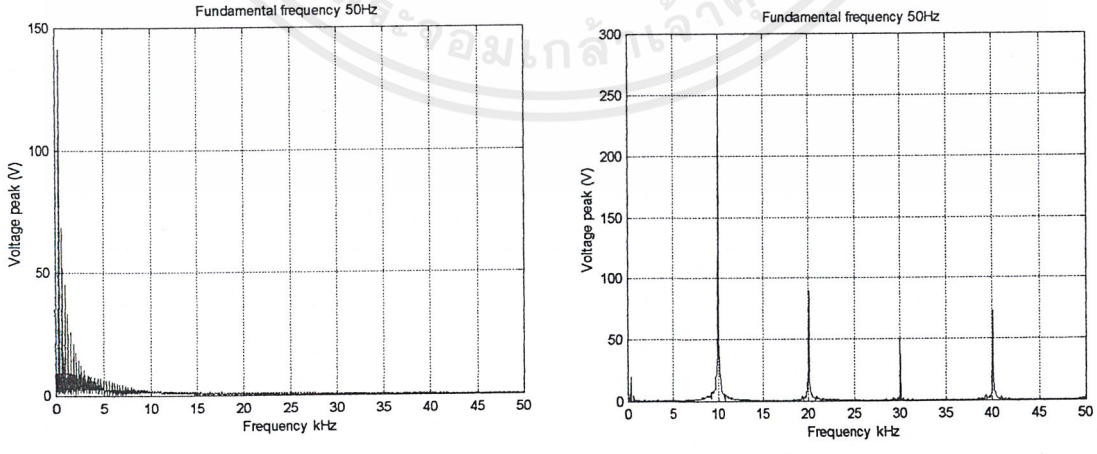
6. ที่แรงดัน Output = 325volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



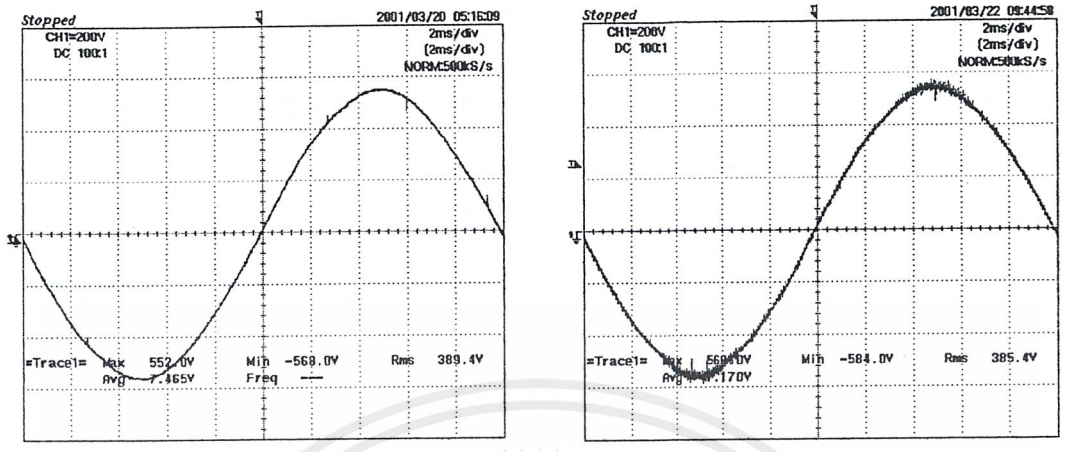
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



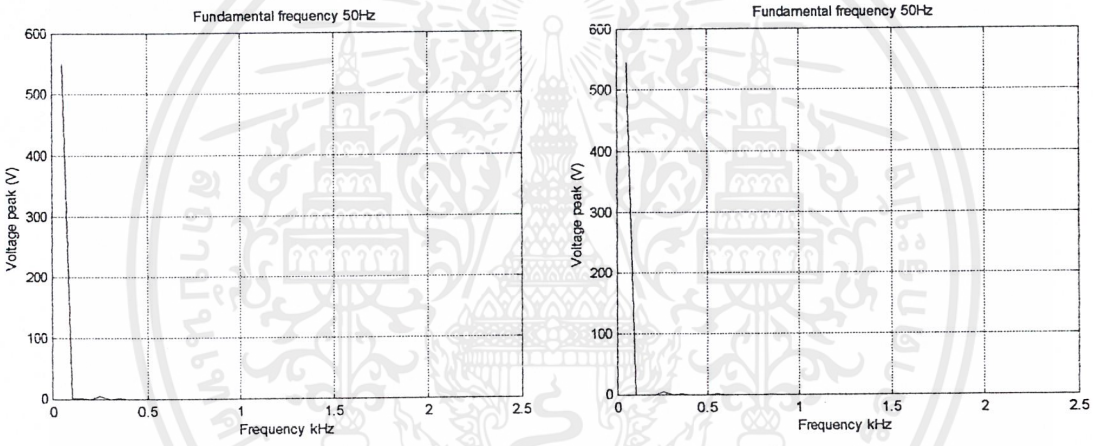
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

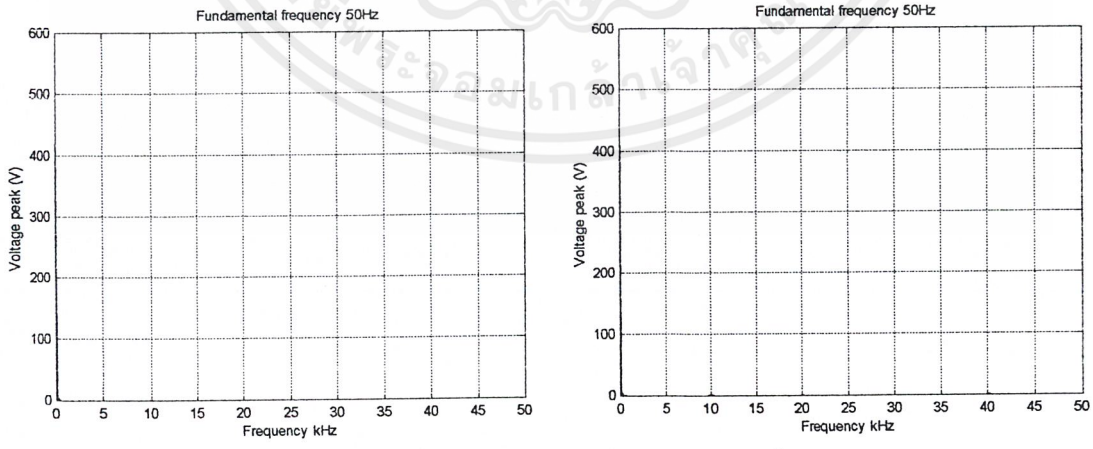
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



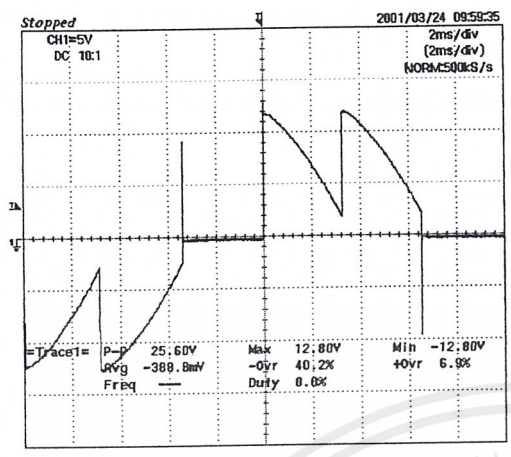
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

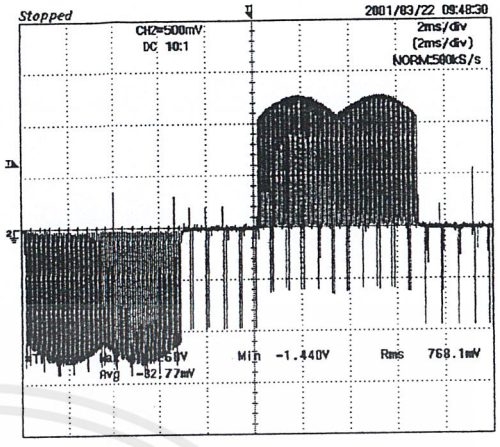


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

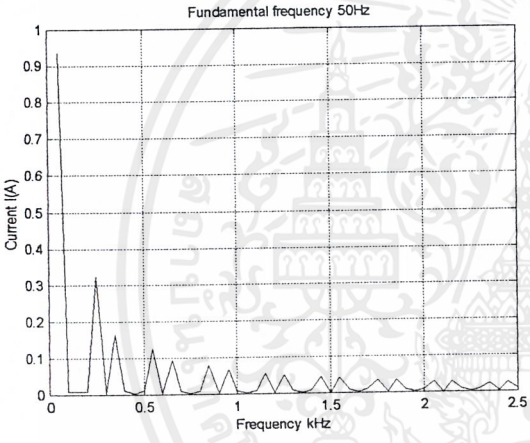
รูปที่ 5.10 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

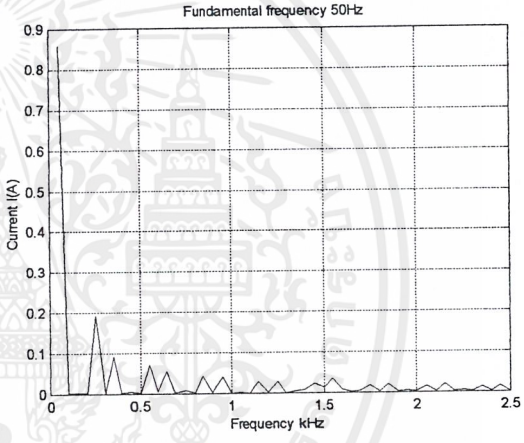
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



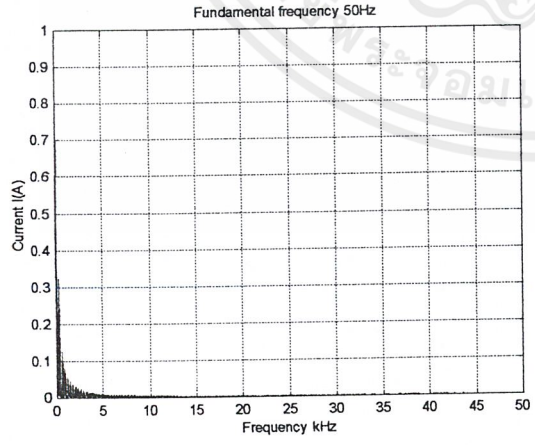


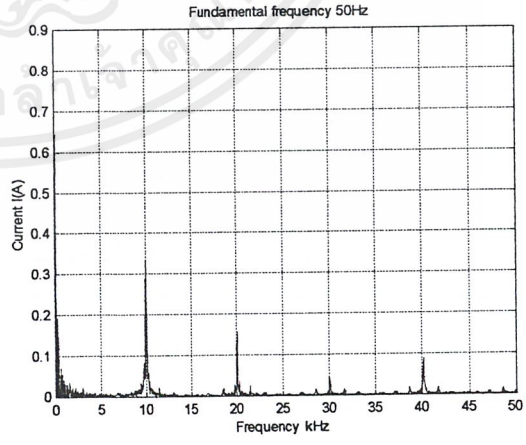
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



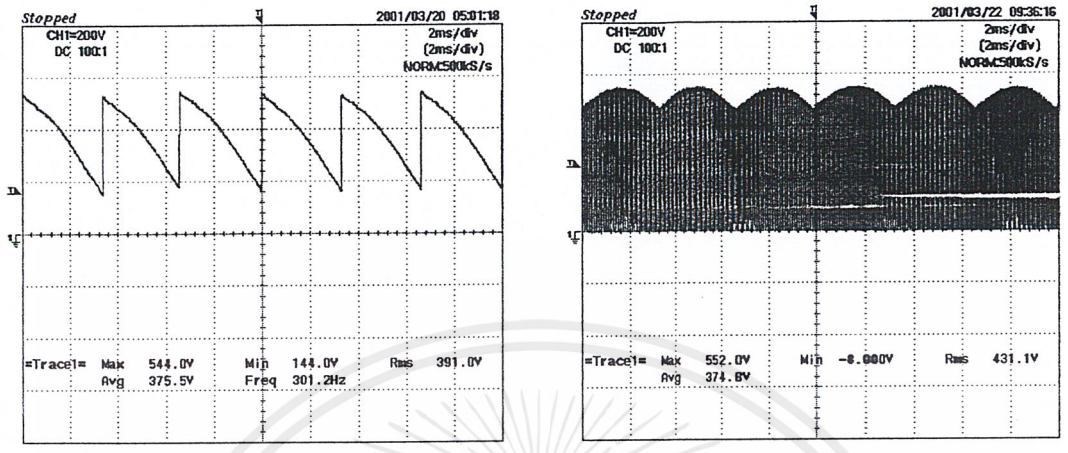


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

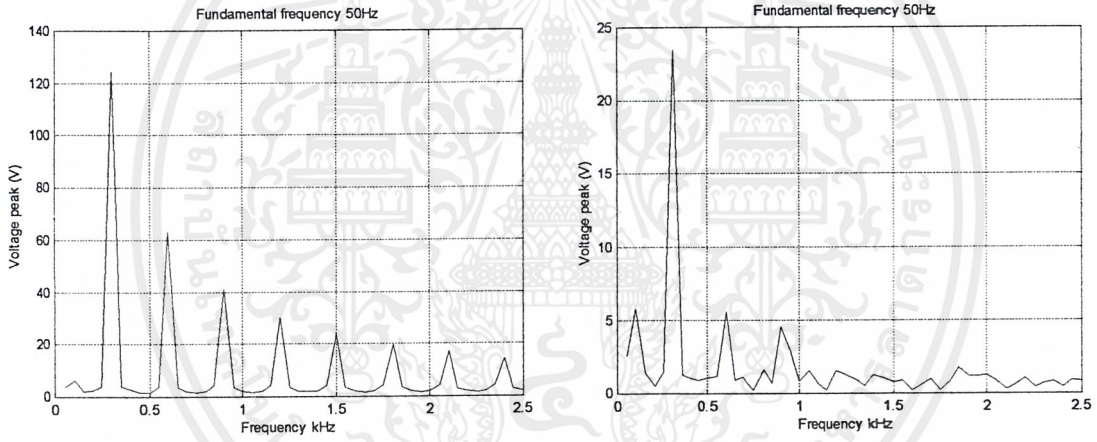
รูปที่ 5.10 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

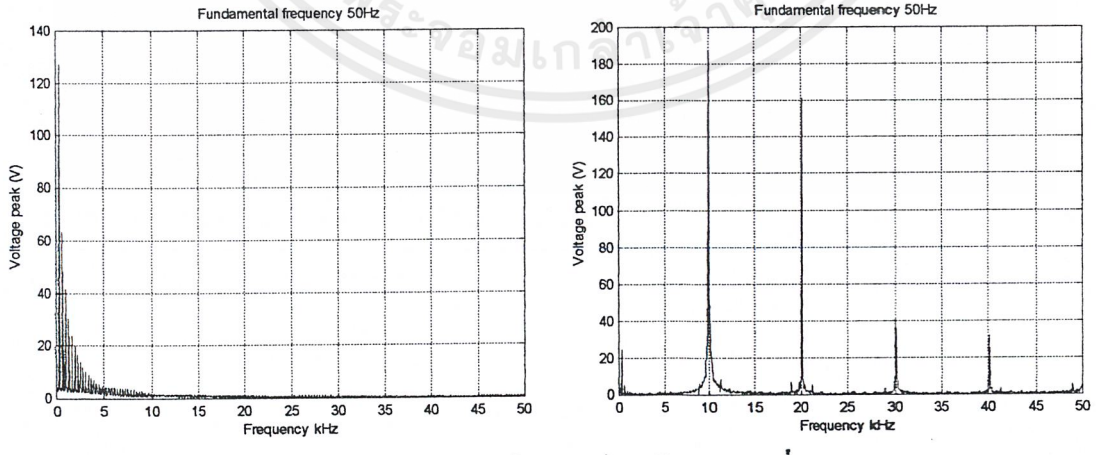
7. ที่แรงดัน Output = 375volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



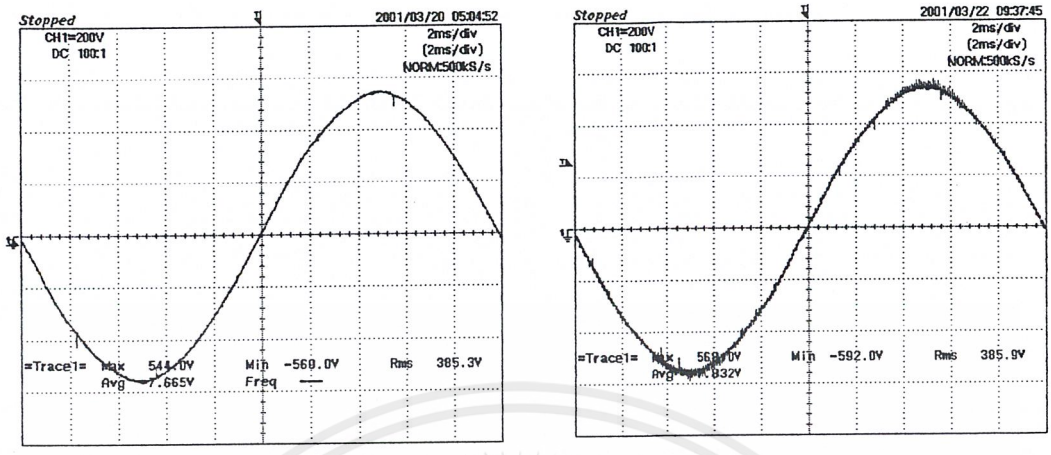
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



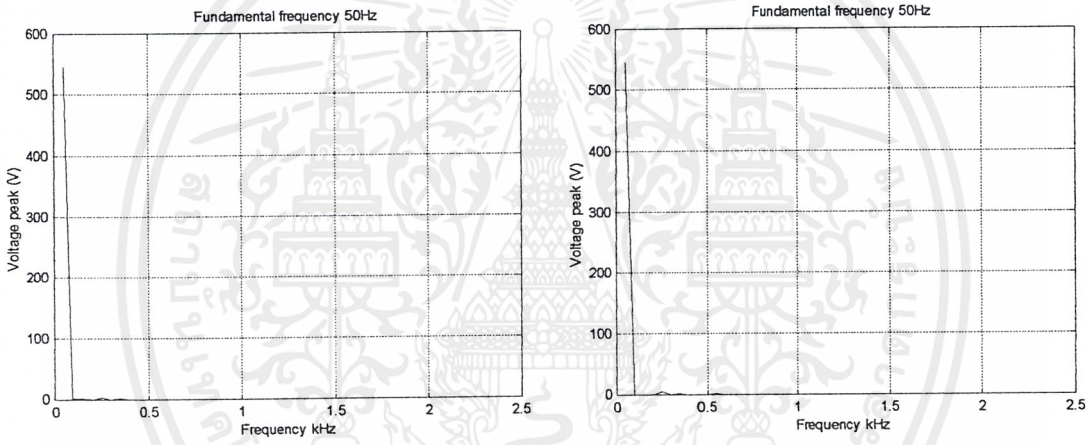
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

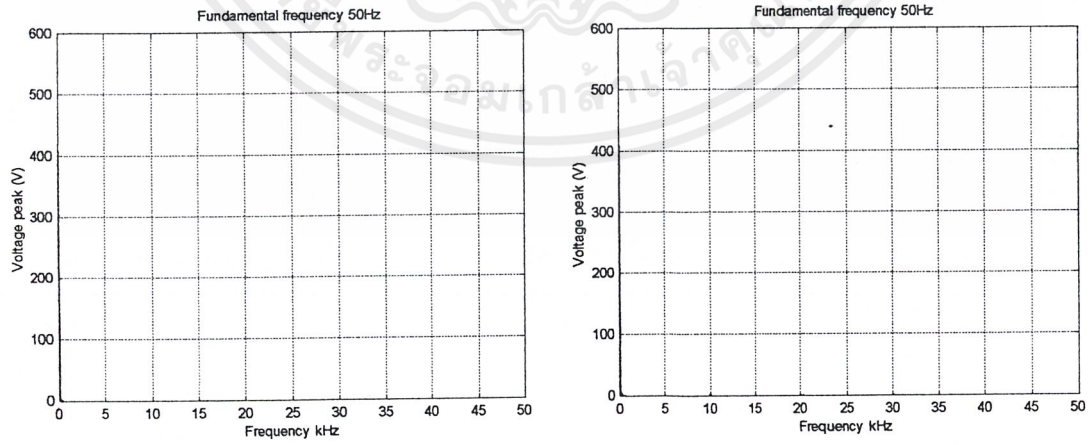
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



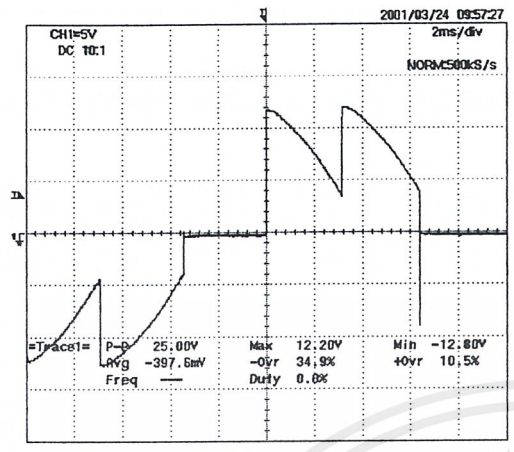
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

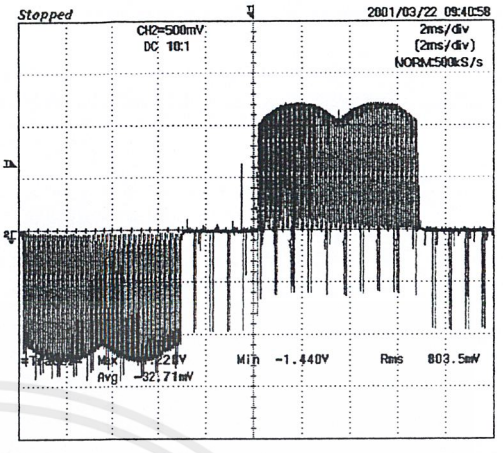


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

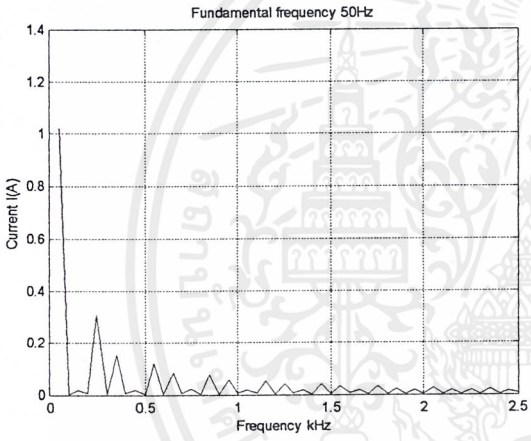
รูปที่ 5.11 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

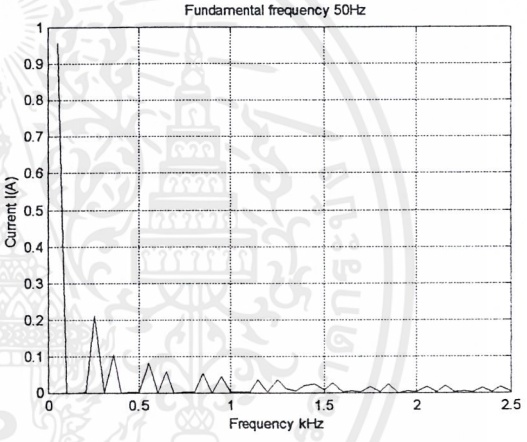
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



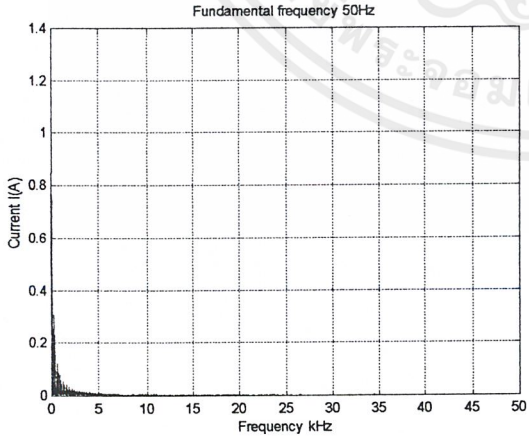


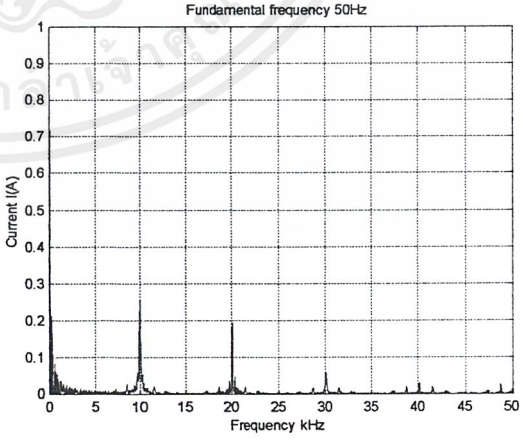
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



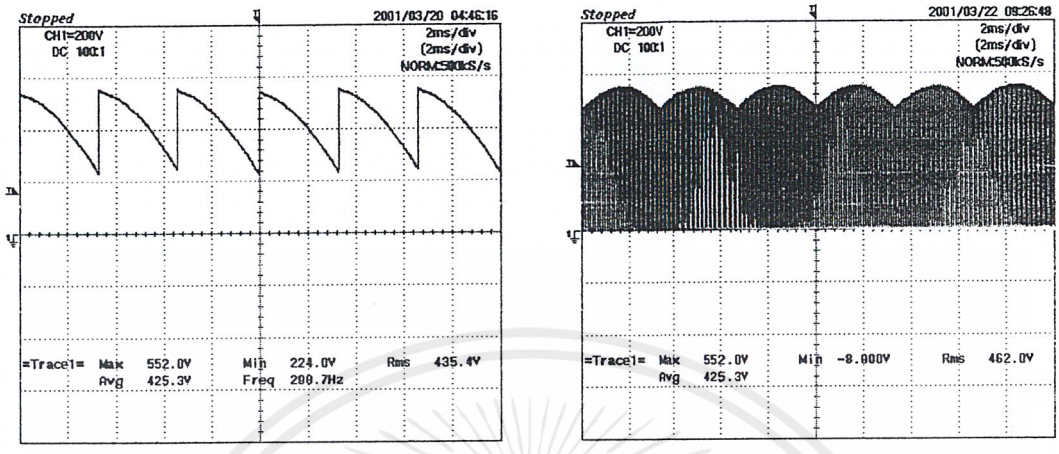


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

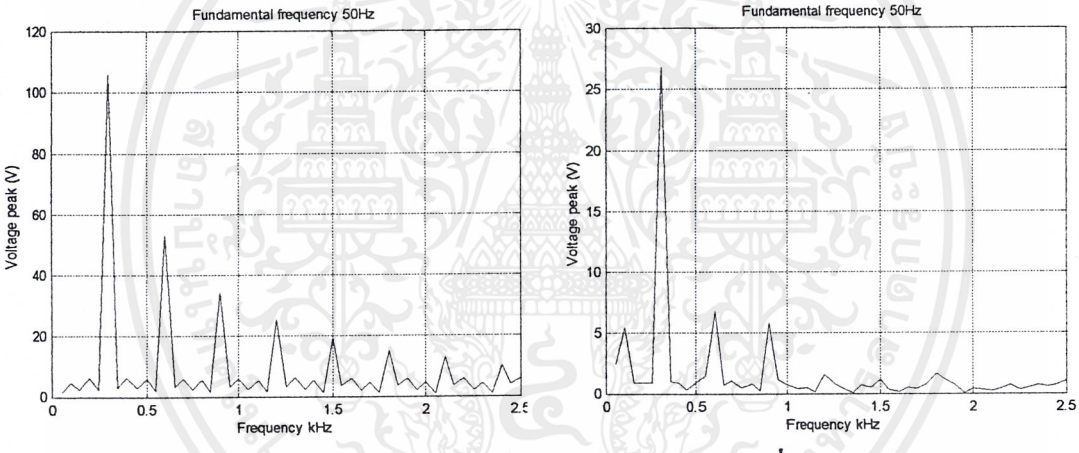
รูปที่ 5.11 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

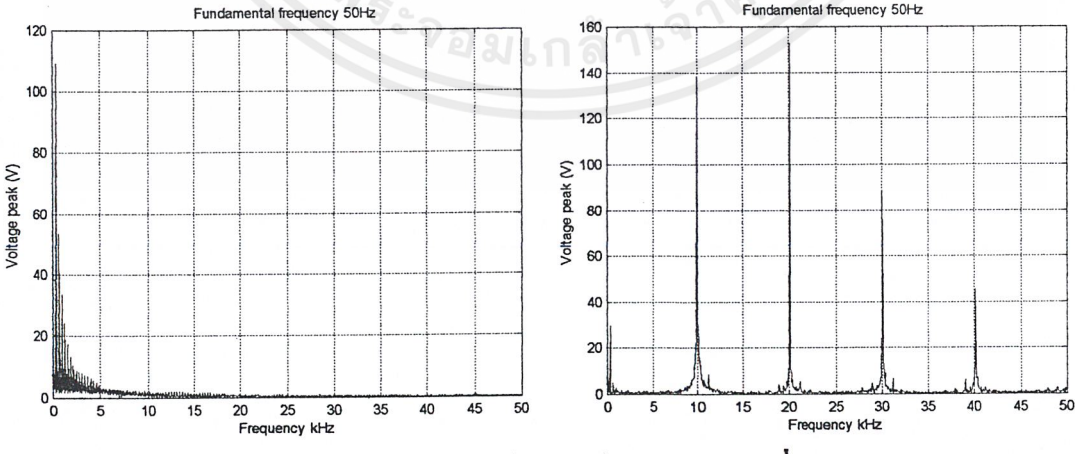
8. ที่แรงดัน Output = 425volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



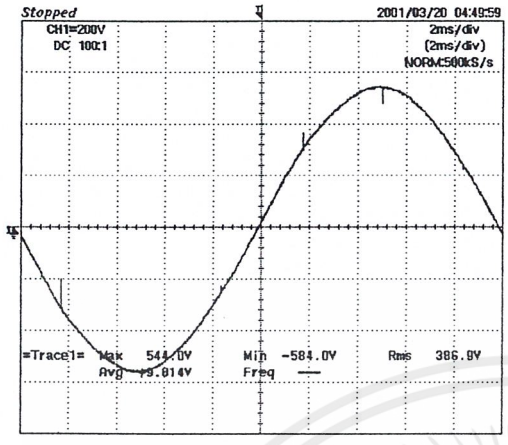
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz

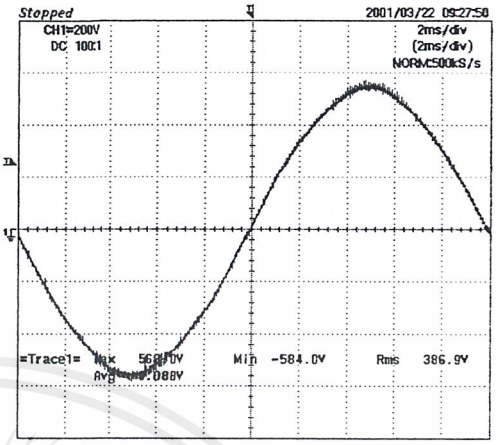


(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

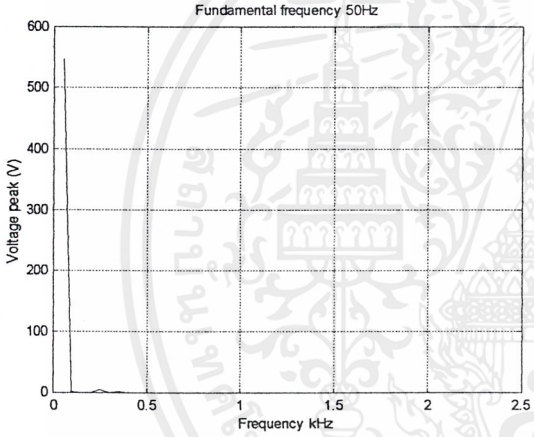
รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

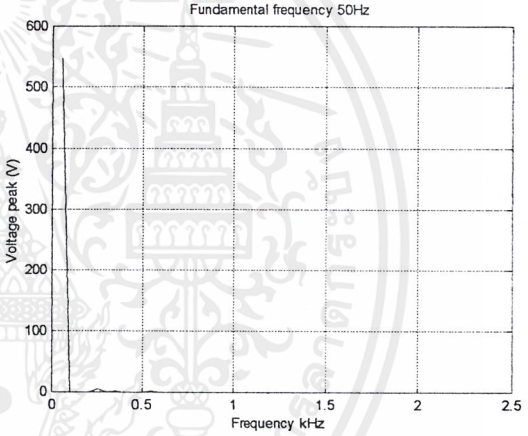
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



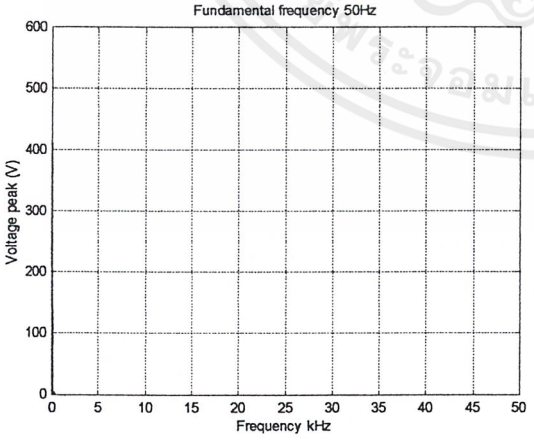


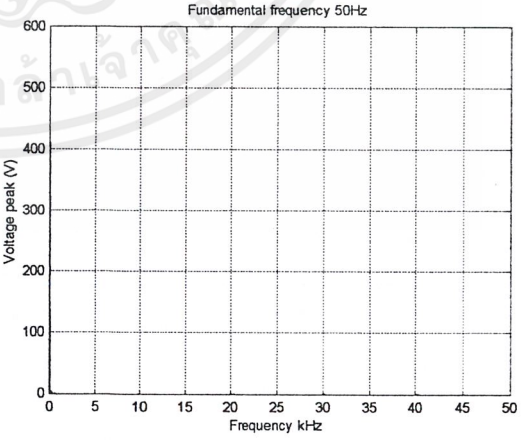
(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input





(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

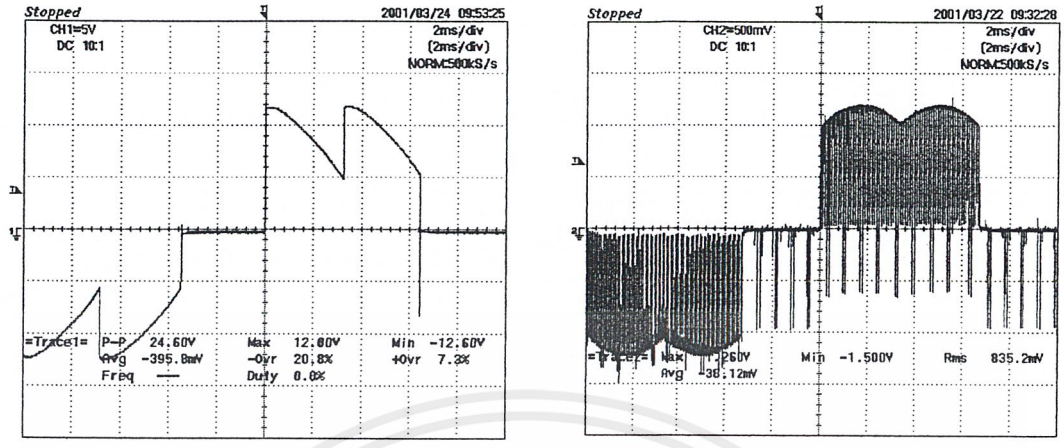




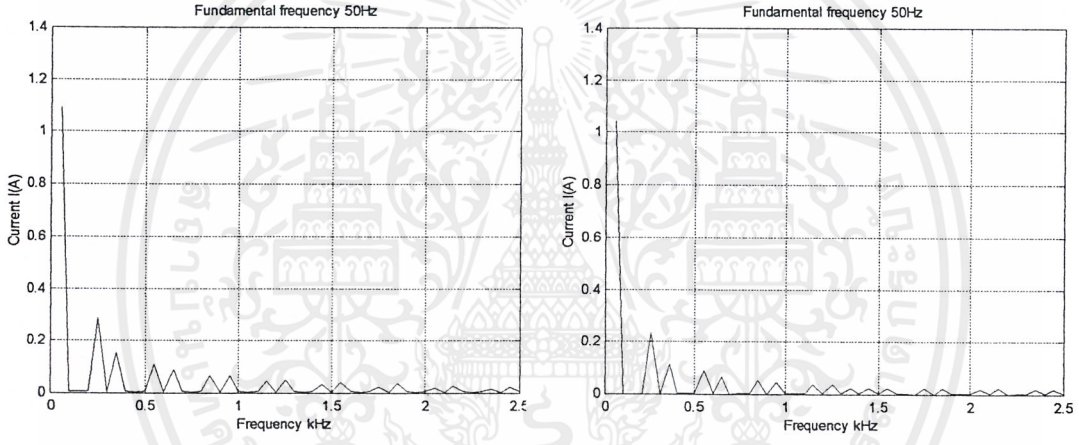
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.12 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

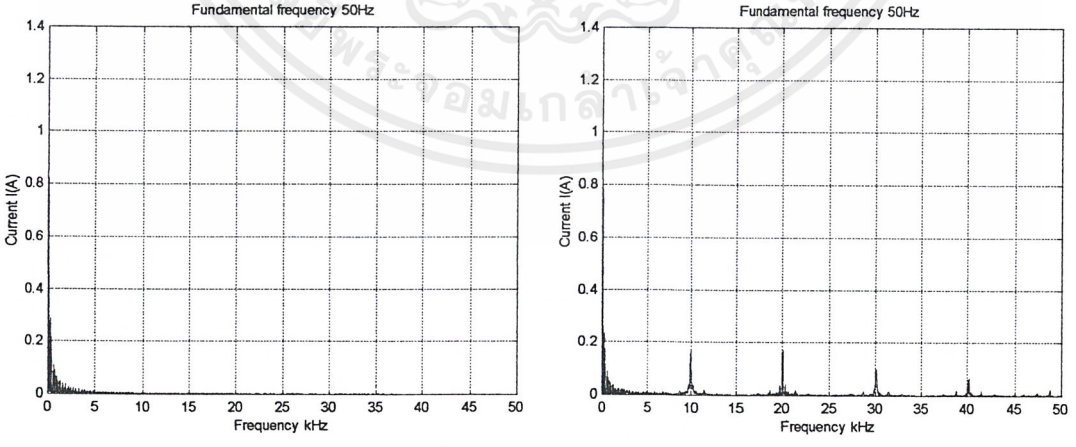
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

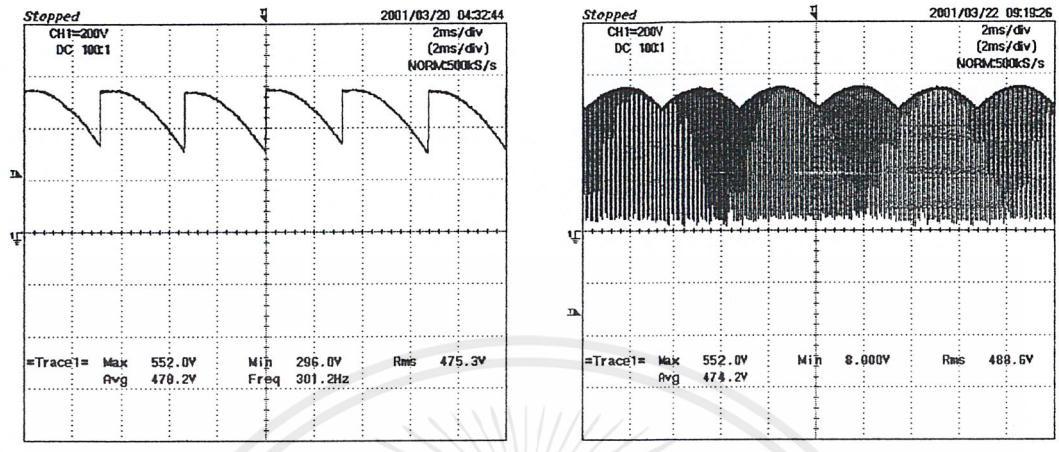


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

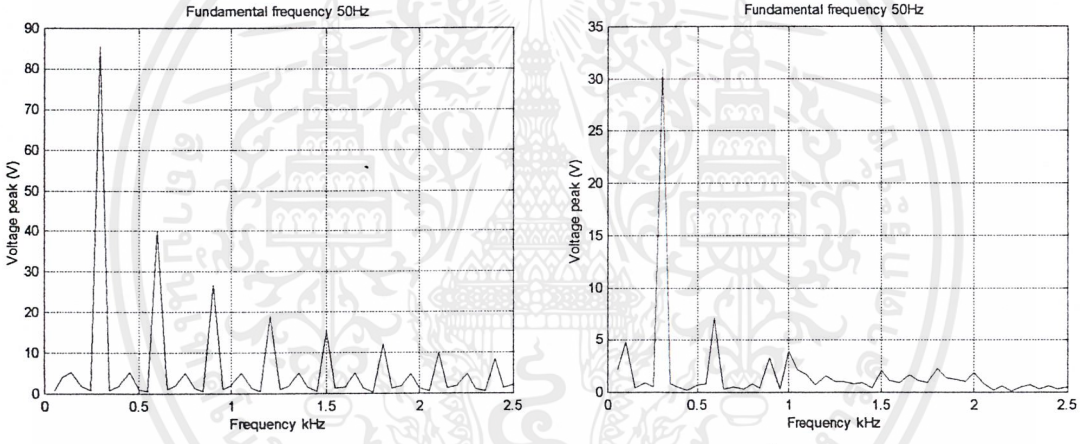
รูปที่ 5.12 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

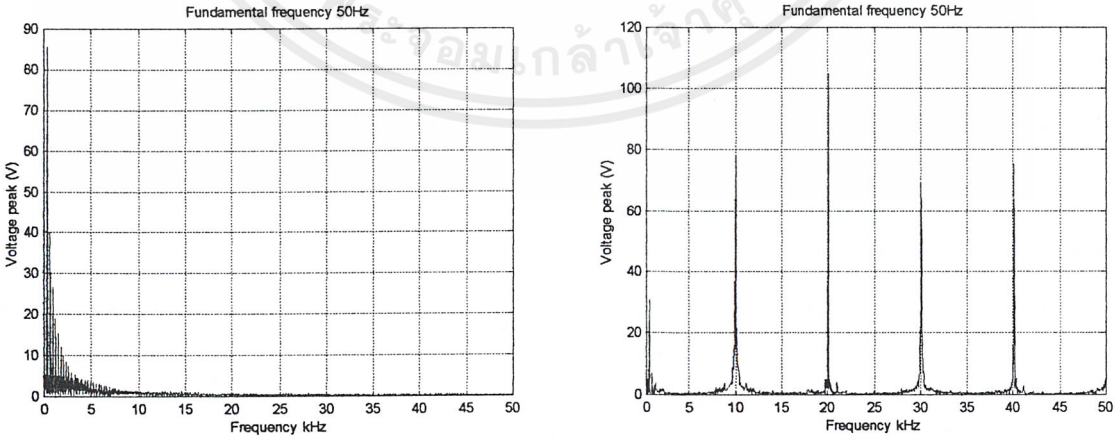
9. ที่แรงดัน Output = 475volt , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



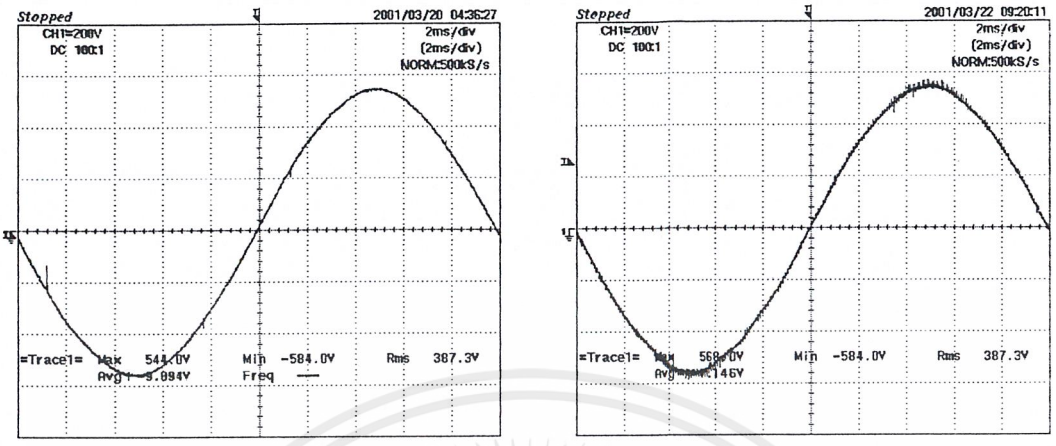
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



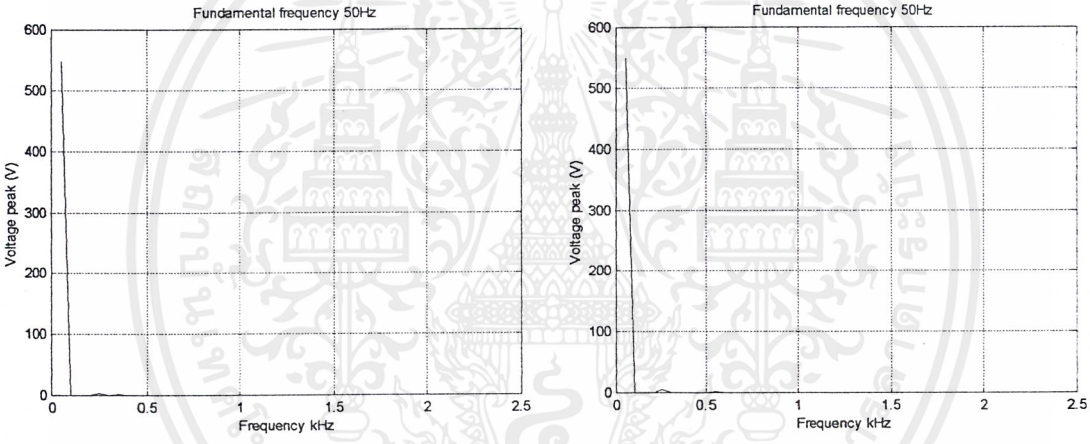
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

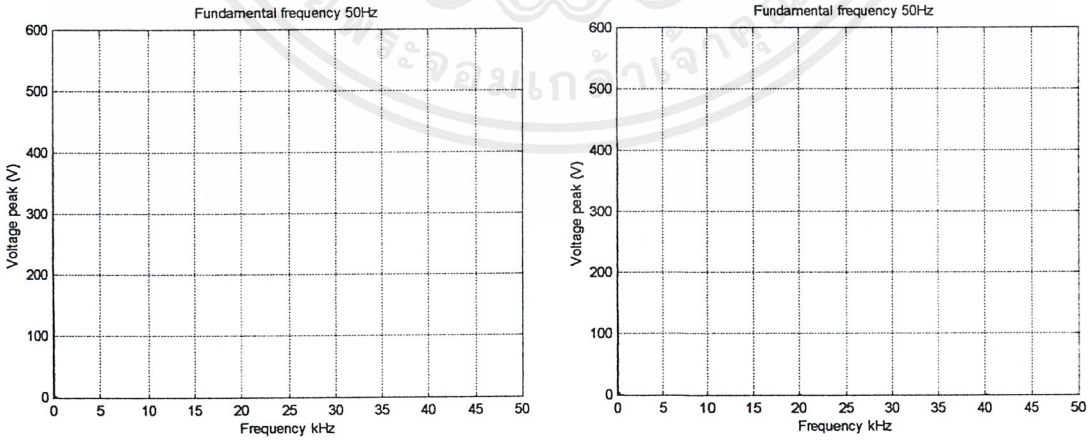
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



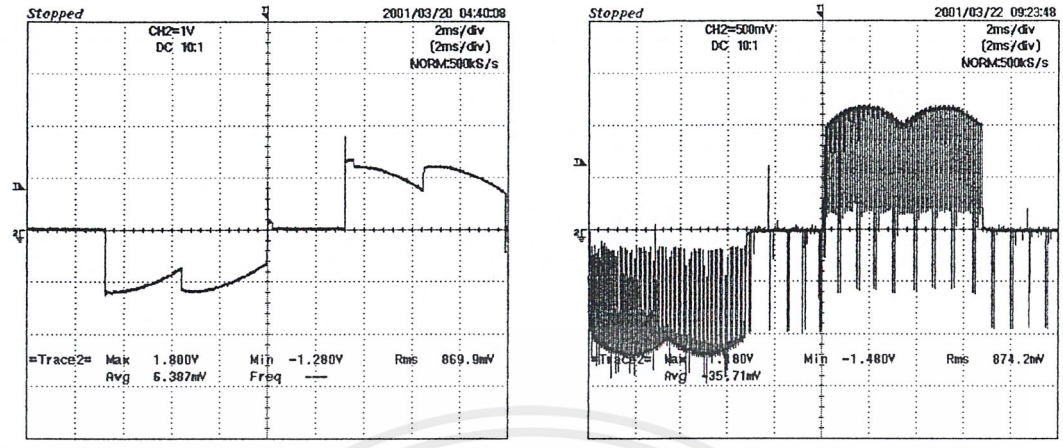
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



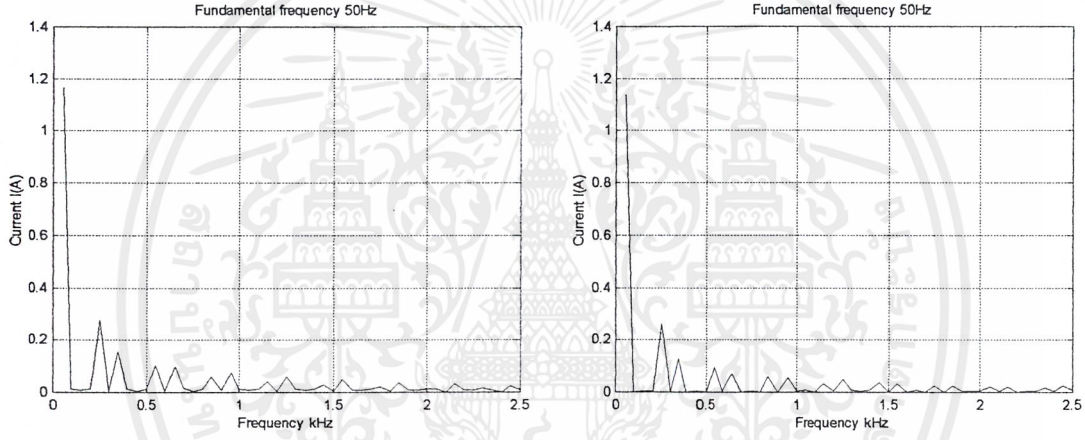
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.13 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

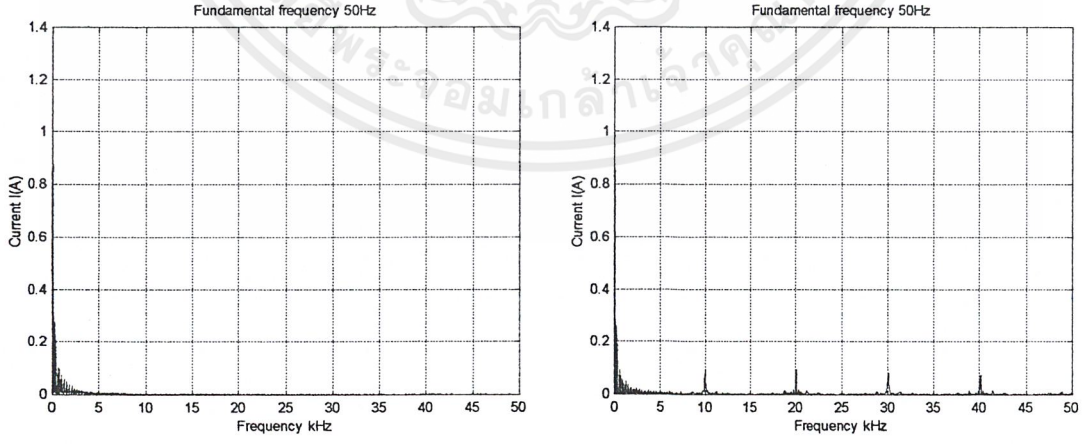
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

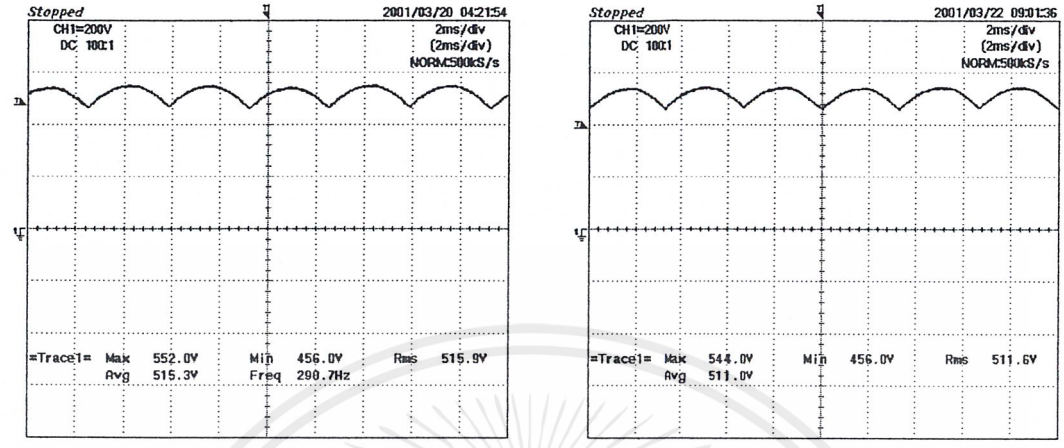


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

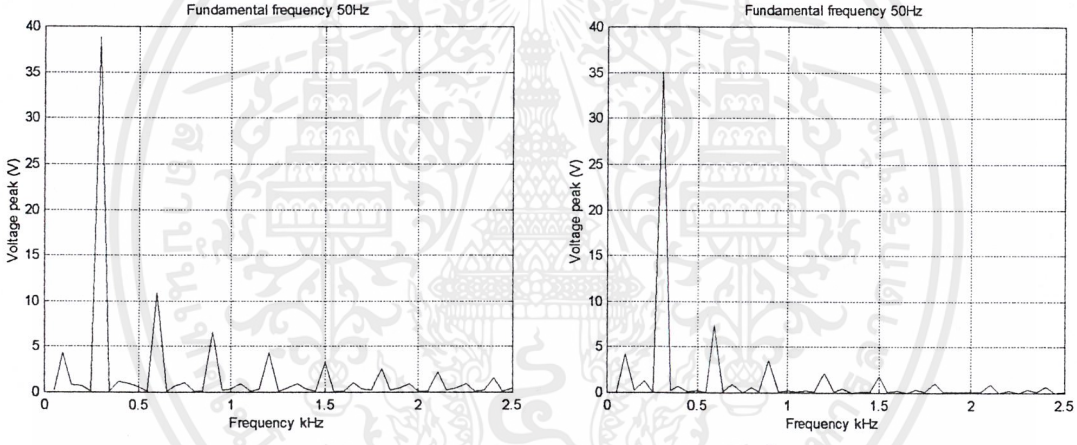
รูปที่ 5.13 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

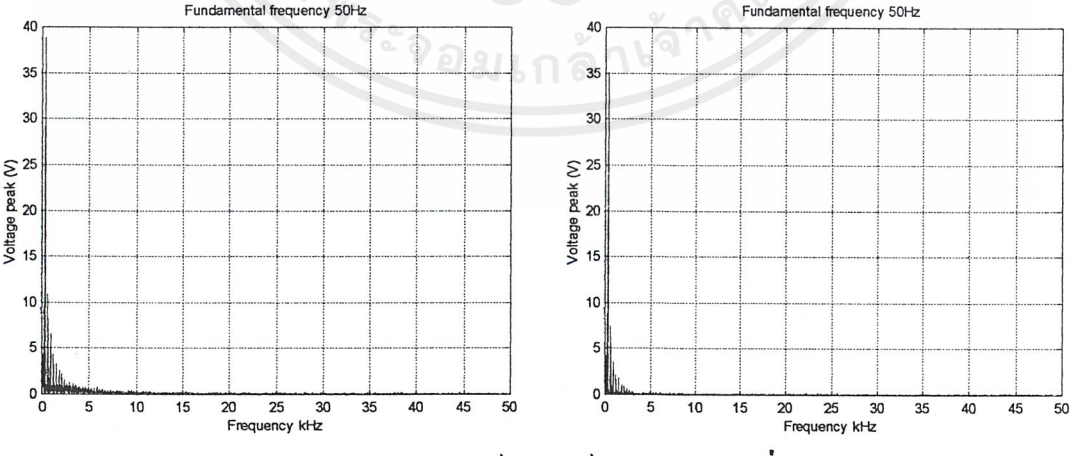
10. ที่แรงดัน Output = Maximum , LOAD R=1100 W



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



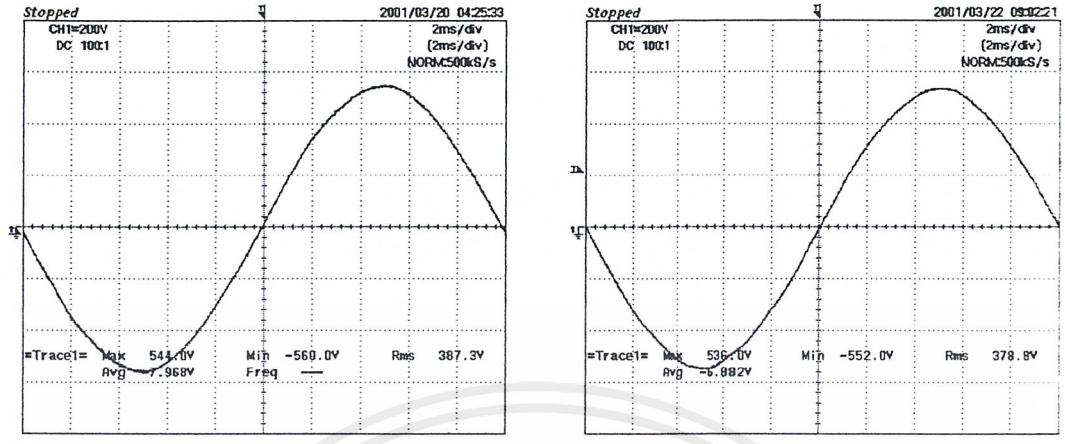
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



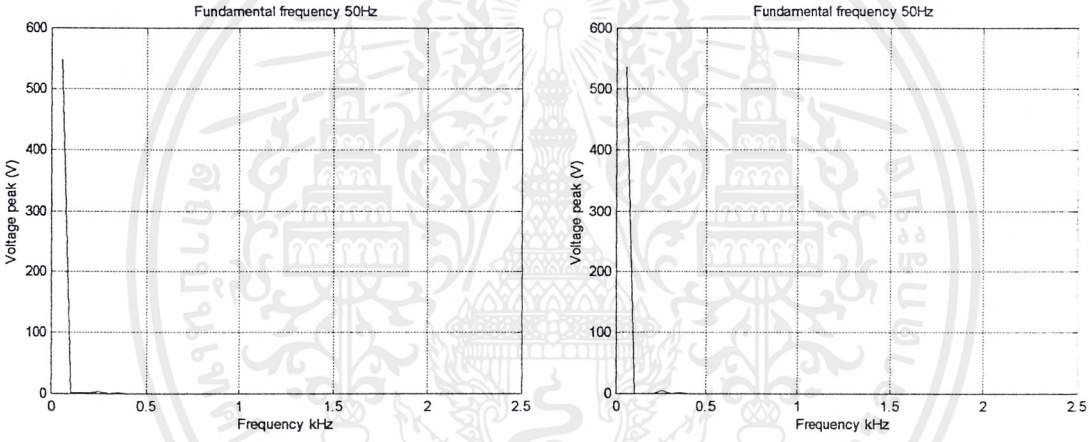
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

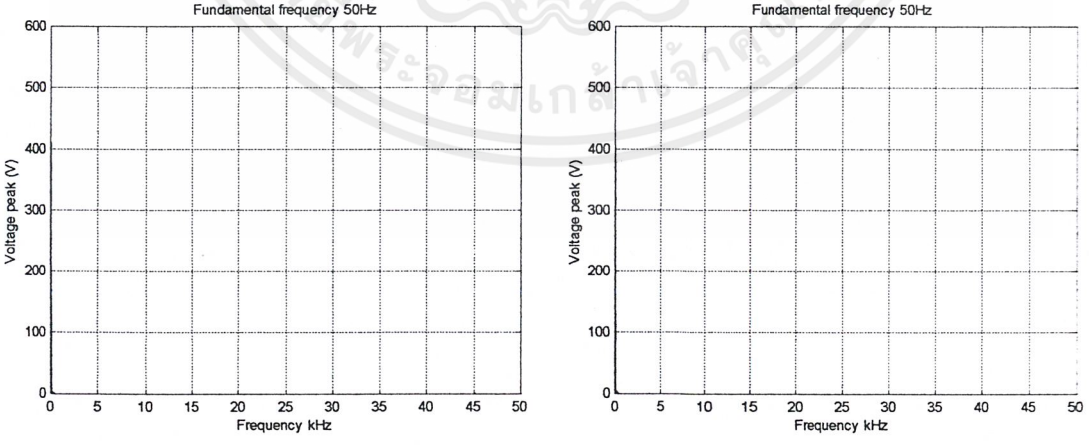
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



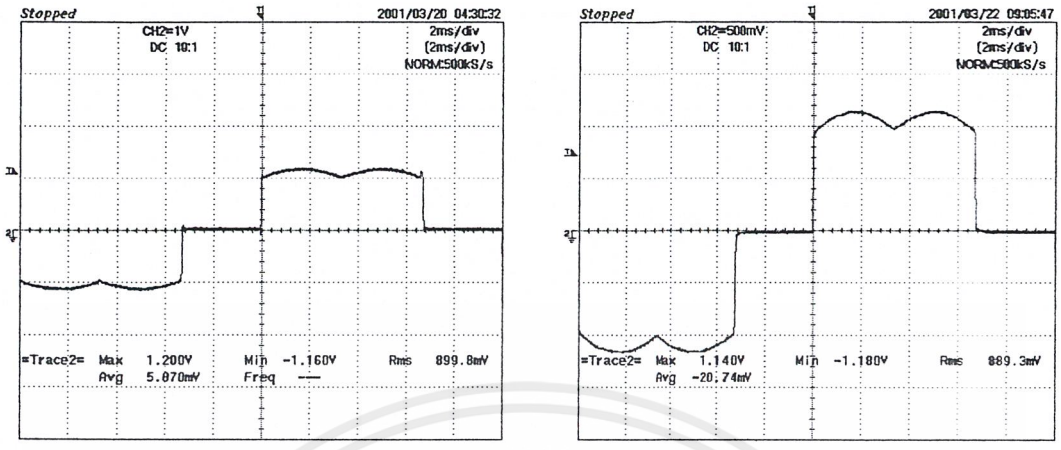
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



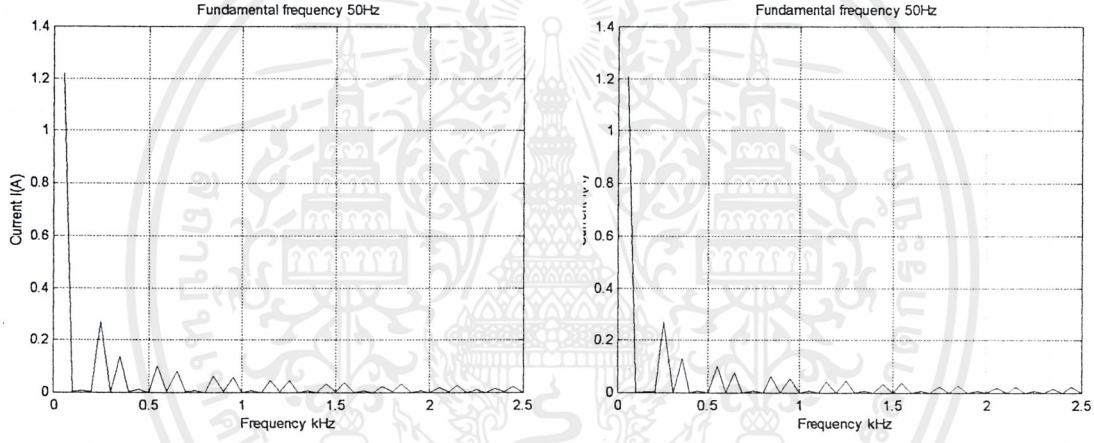
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.14 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

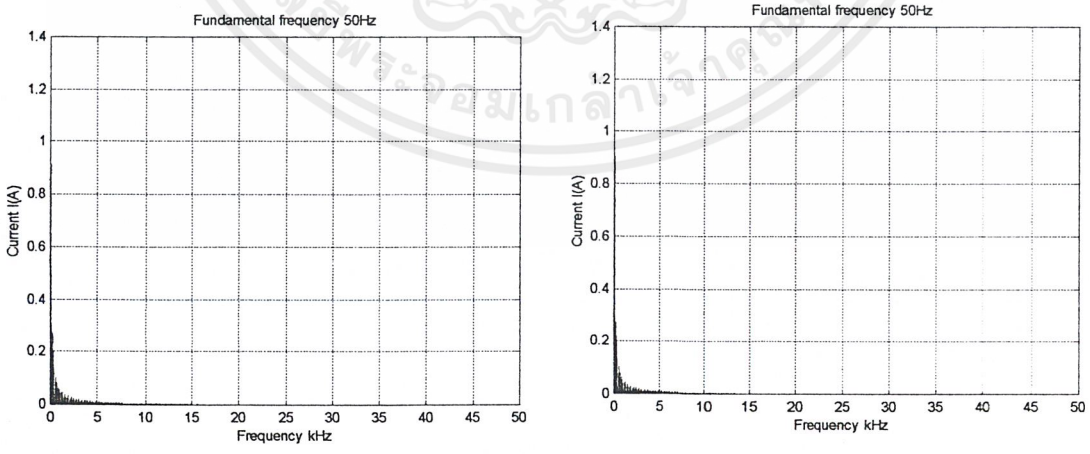
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

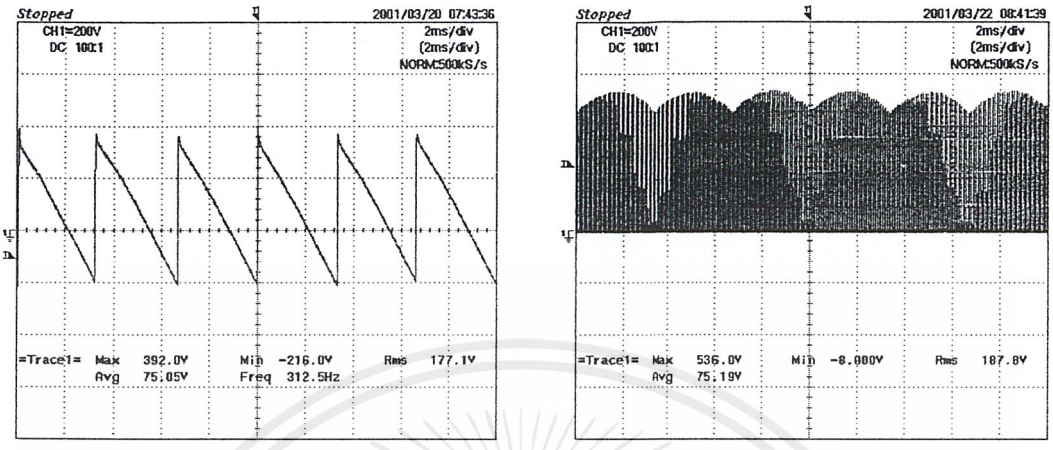


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

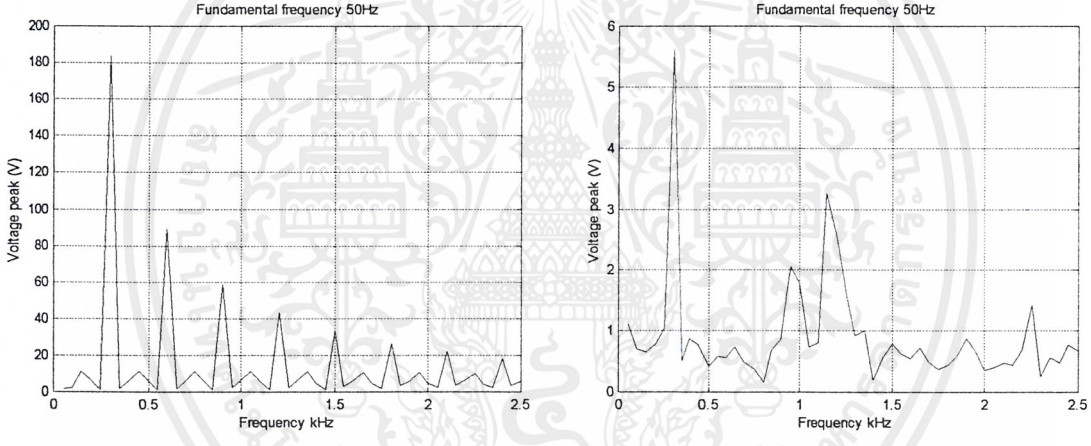
รูปที่ 5.14 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

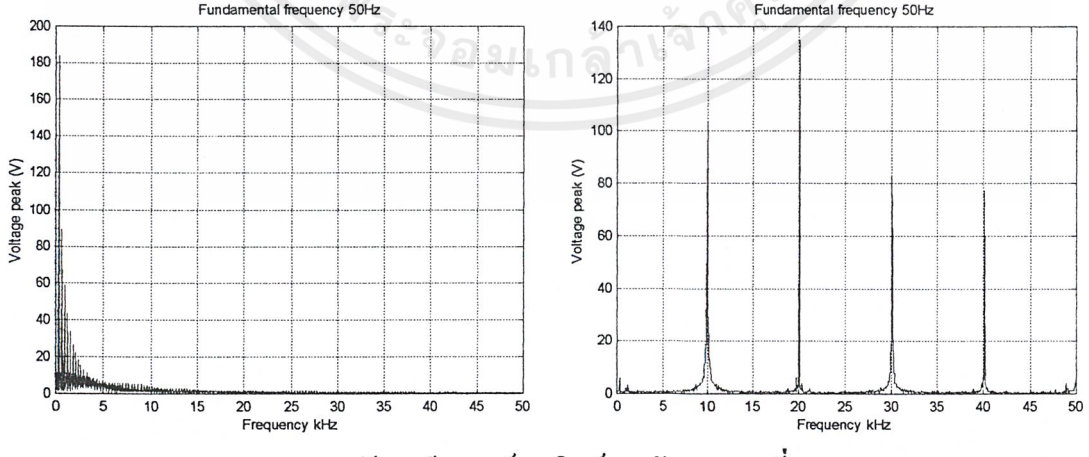
11. ที่แรงดัน Output = 75 volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



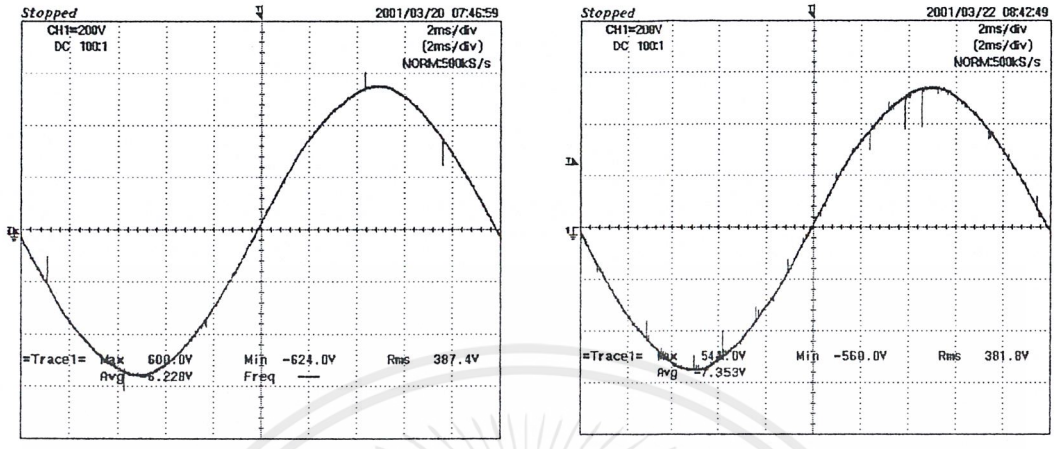
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



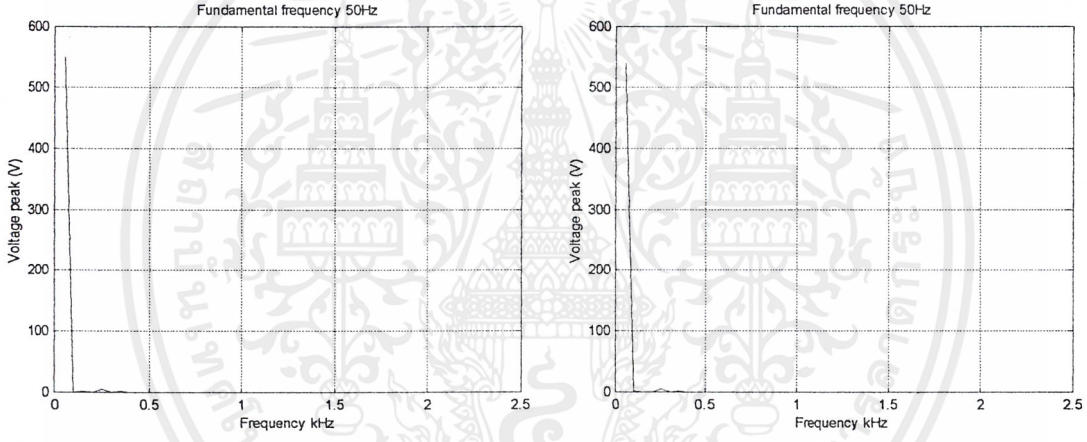
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

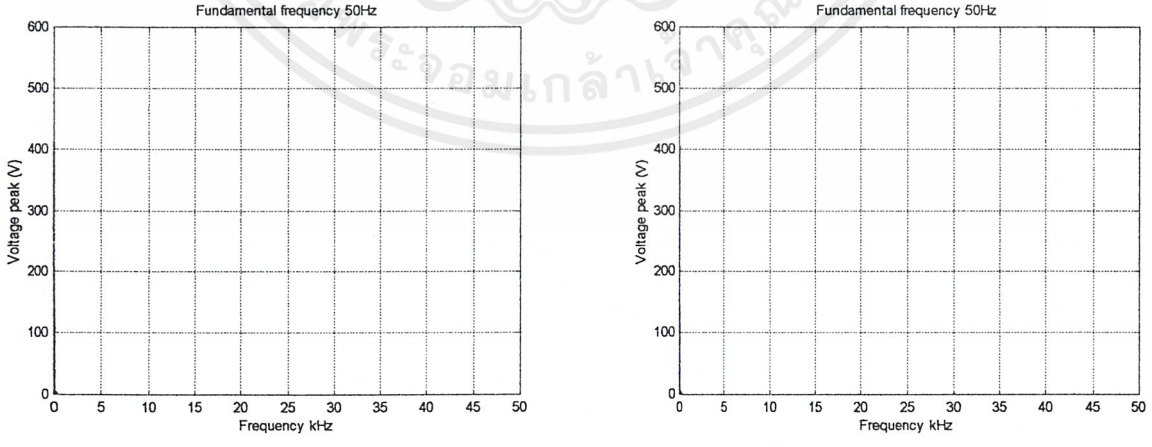
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



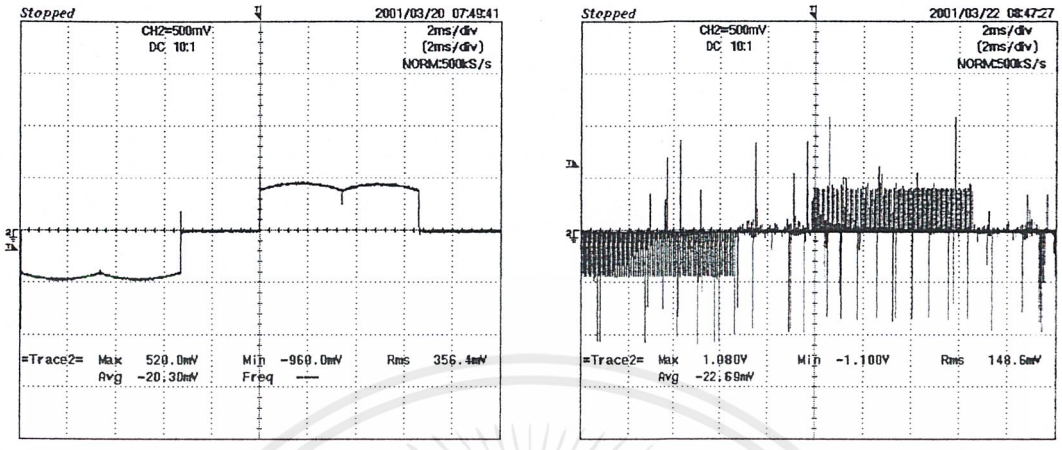
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



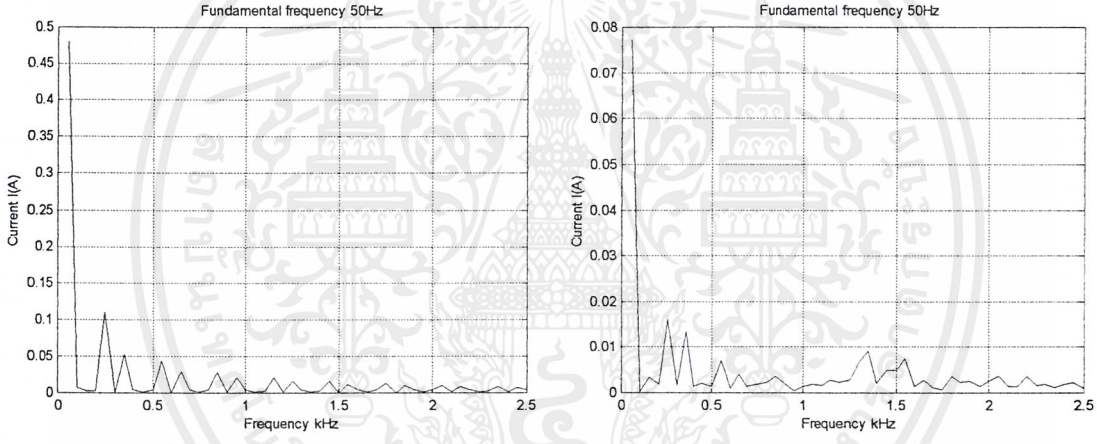
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.15 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

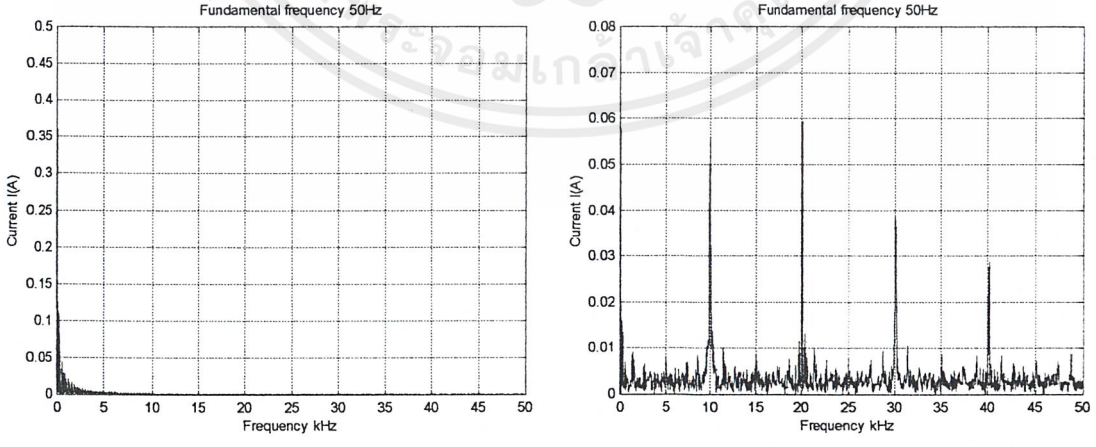
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

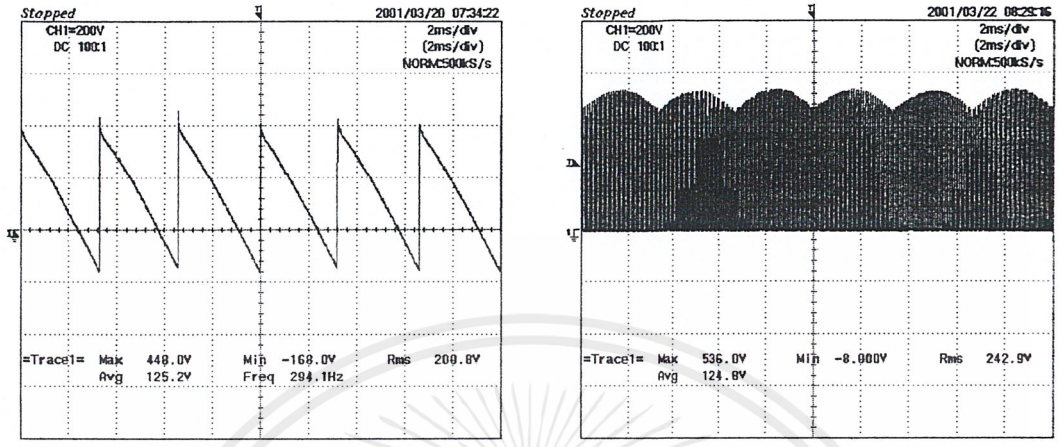


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

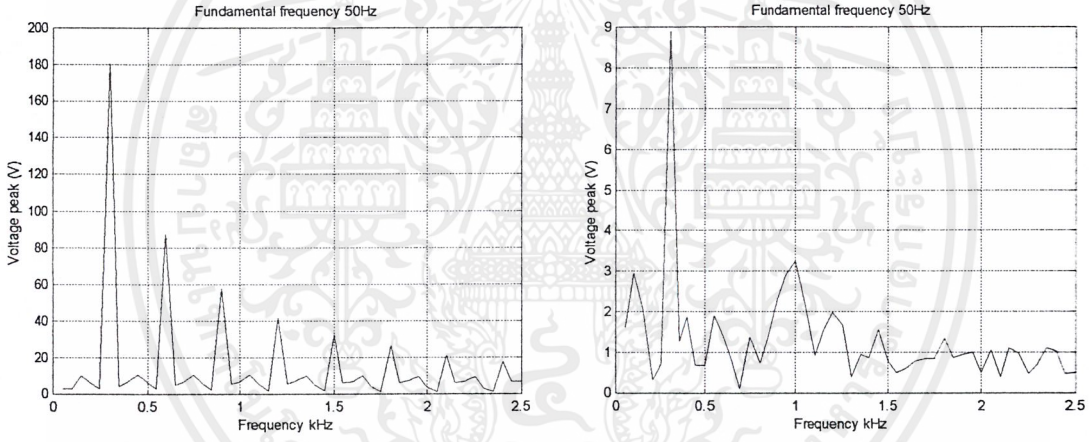
รูปที่ 5.15 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=75 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

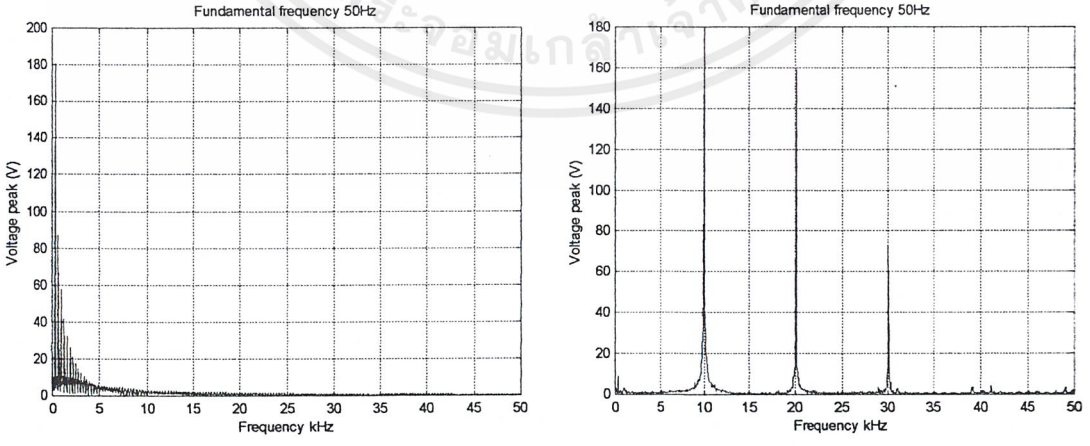
12. ที่แรงดัน Output = 125 volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



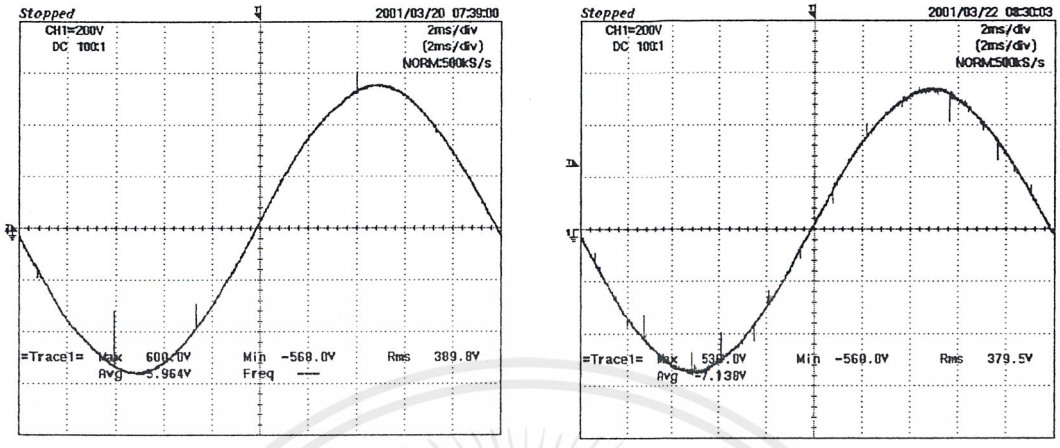
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



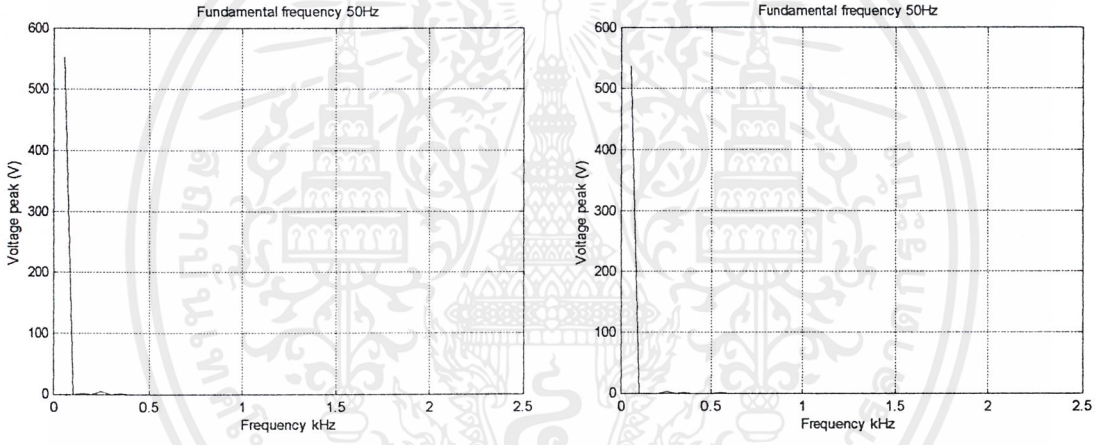
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

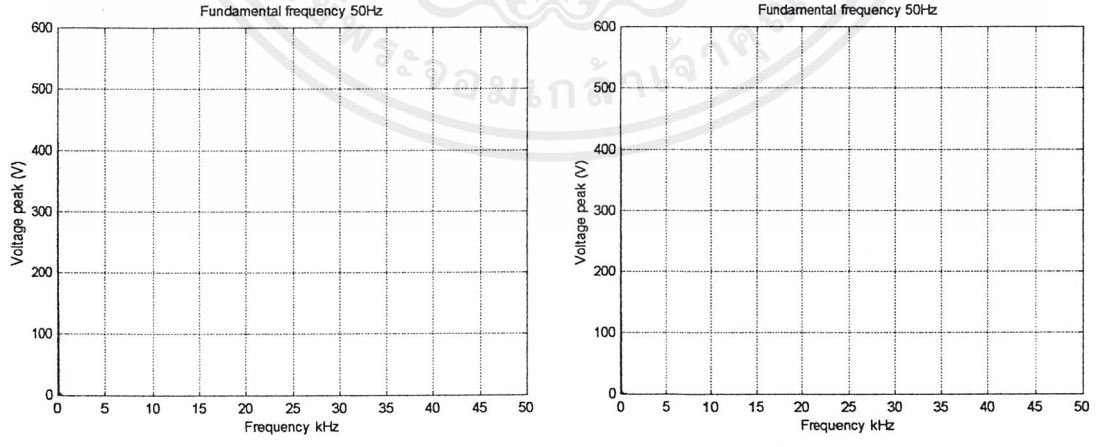
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



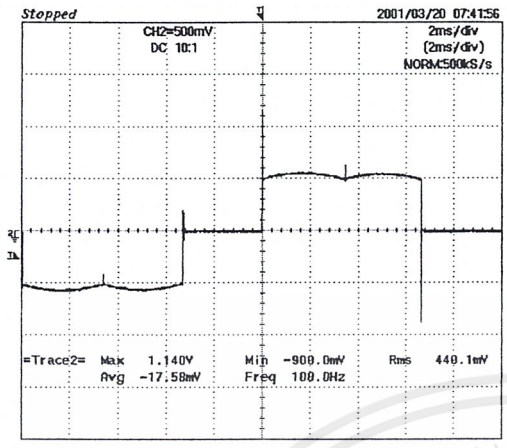
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

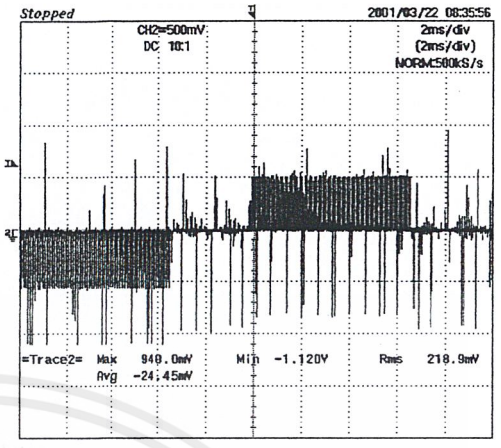


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

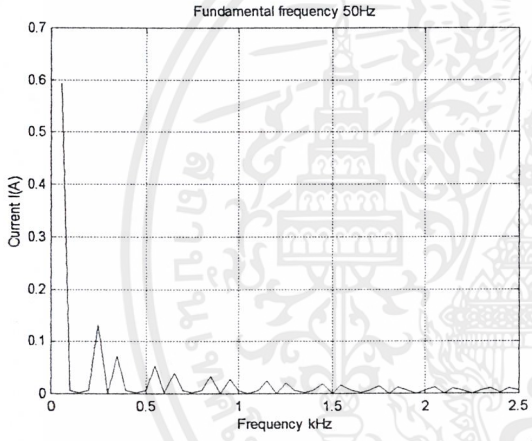
รูปที่ 5.16 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

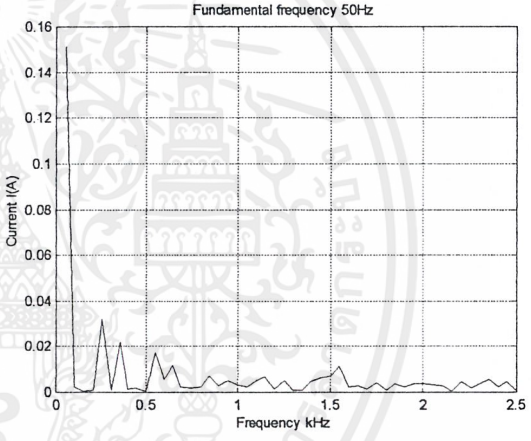
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



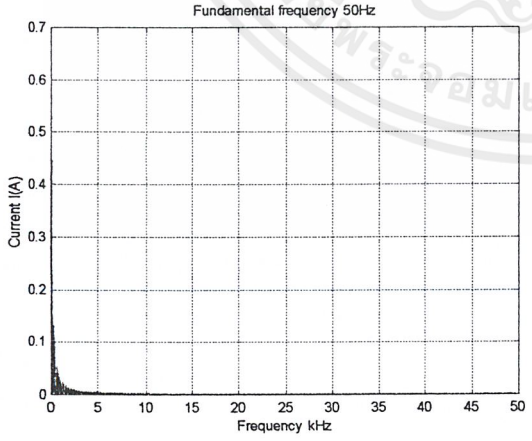


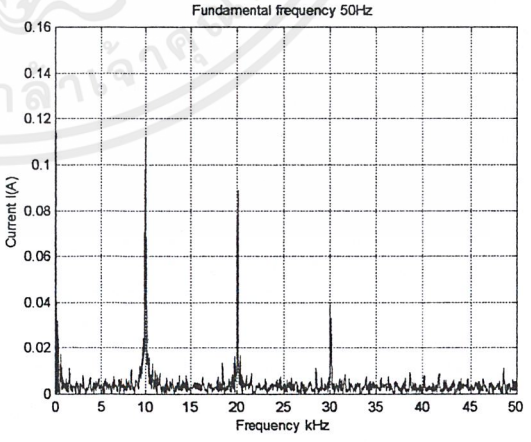
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



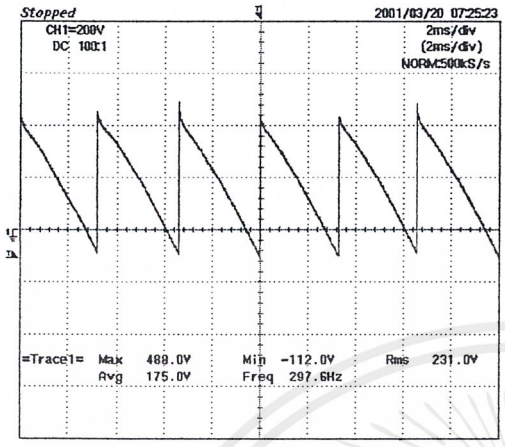


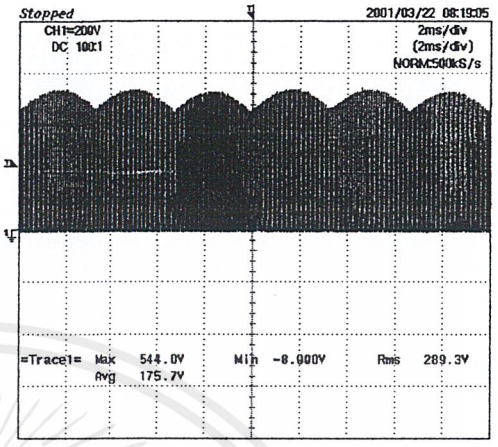
(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.16 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=125 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

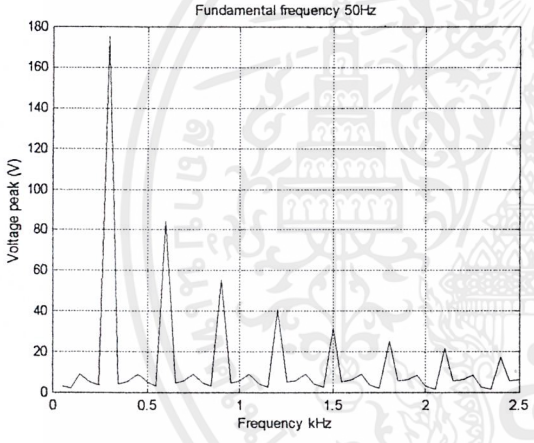
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

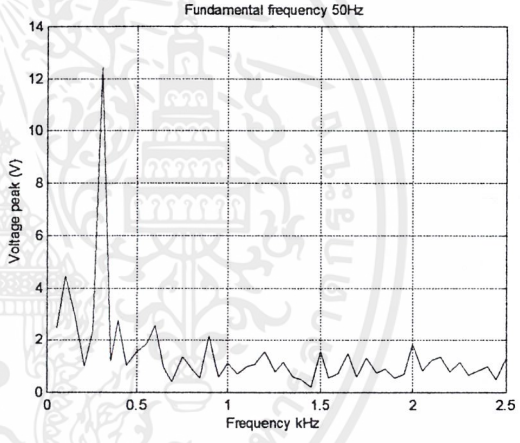
13. ที่แรงดัน Output = 175volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



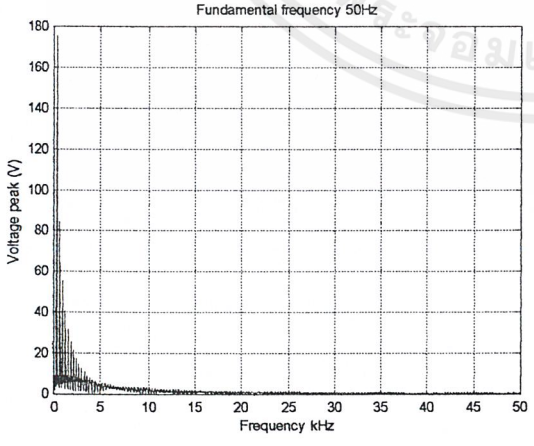


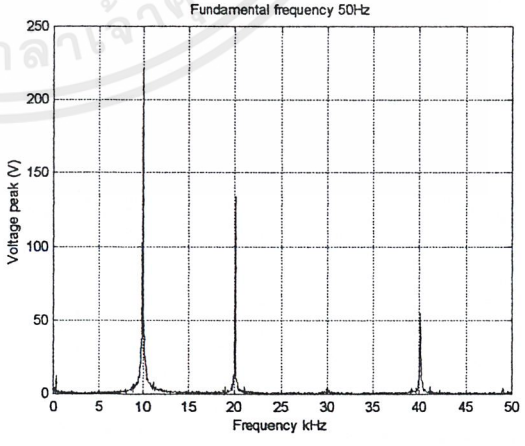
(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output





(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz

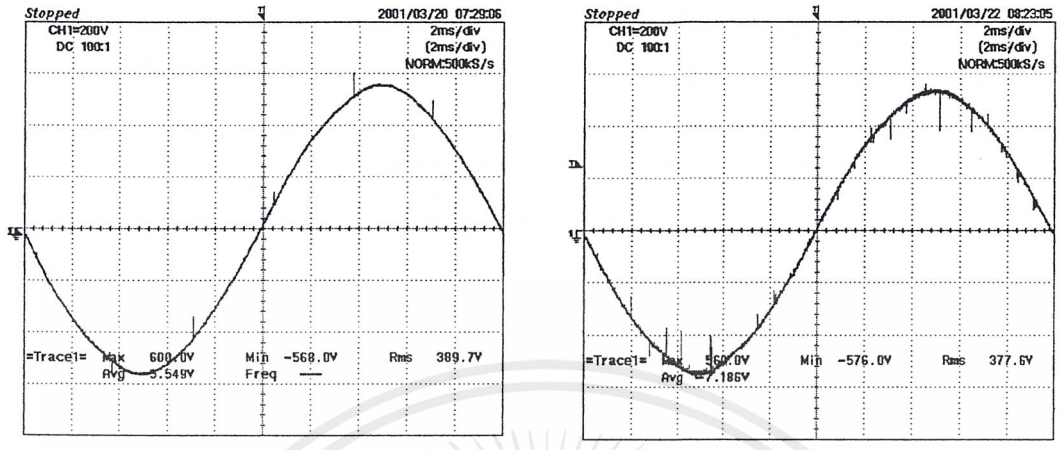




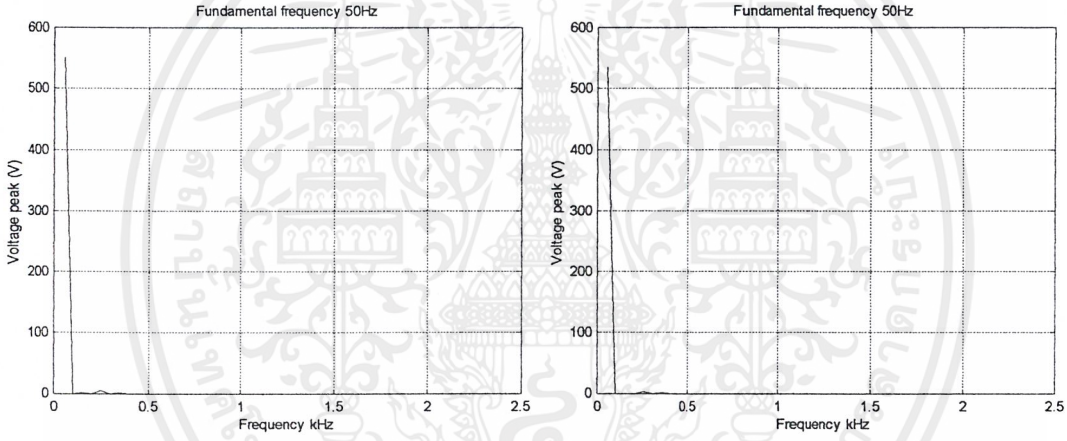
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

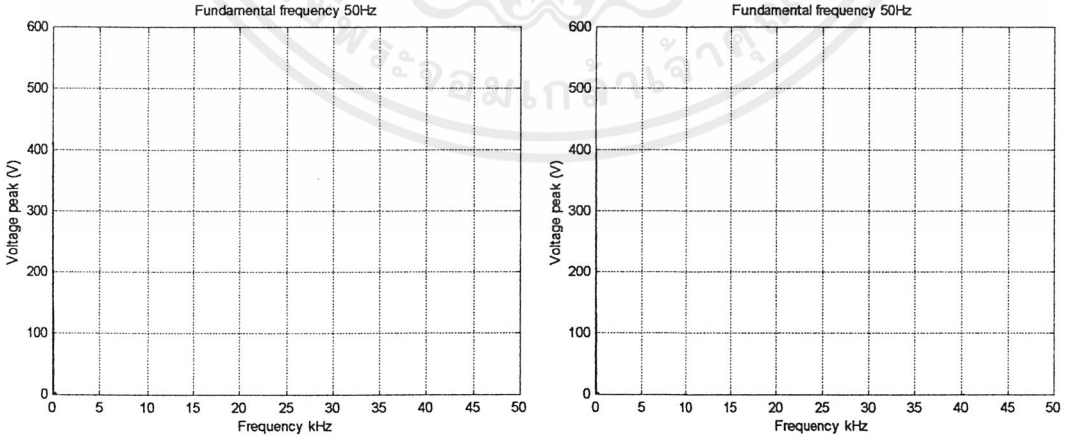
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



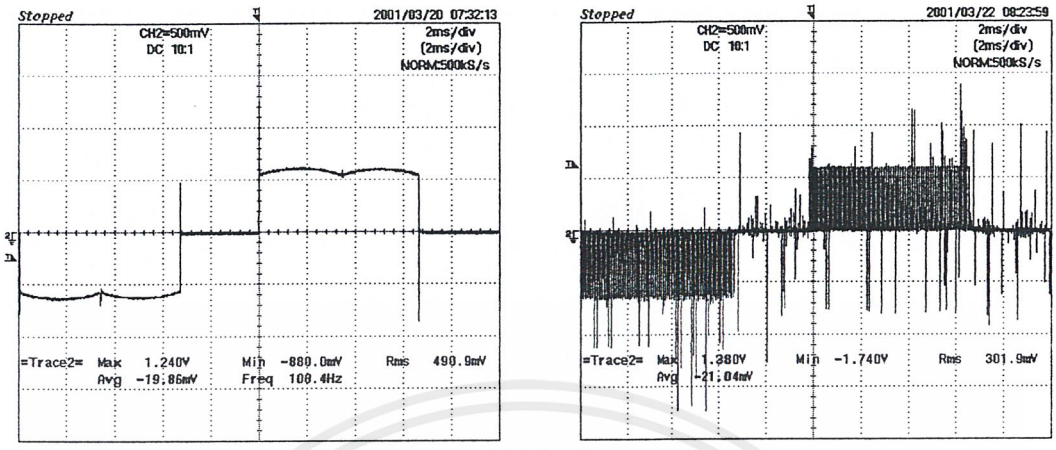
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



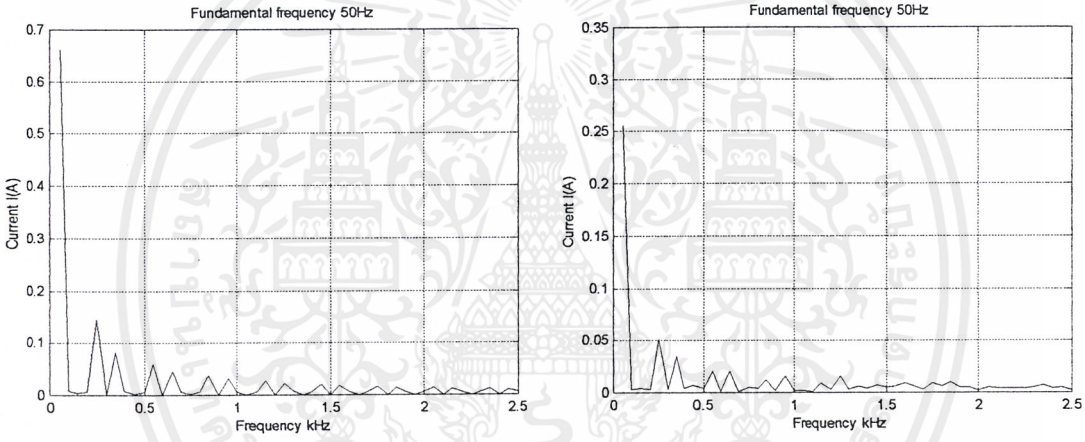
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.17 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

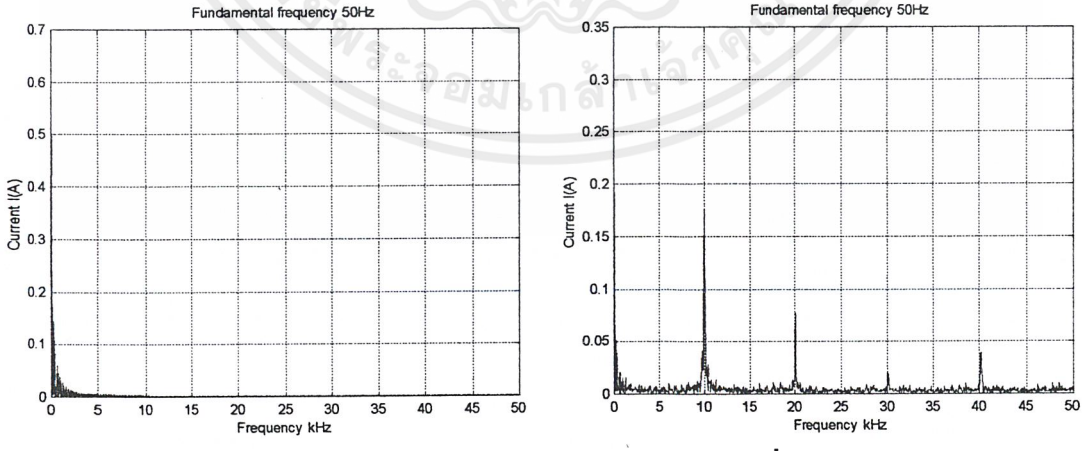
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

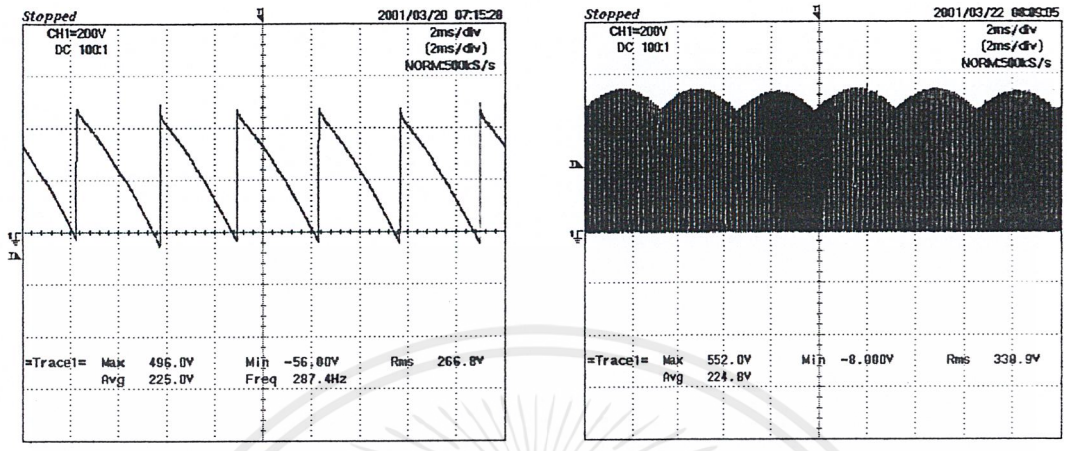


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

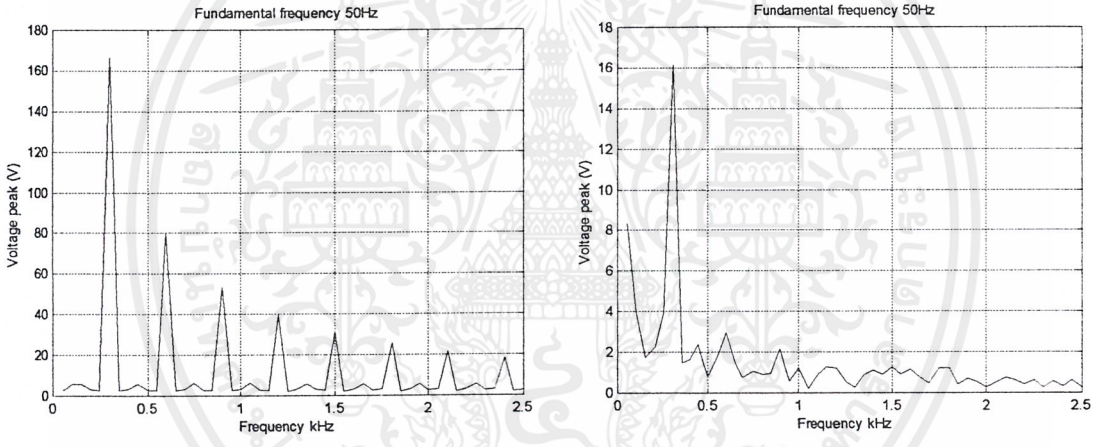
รูปที่ 5.17 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=175 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

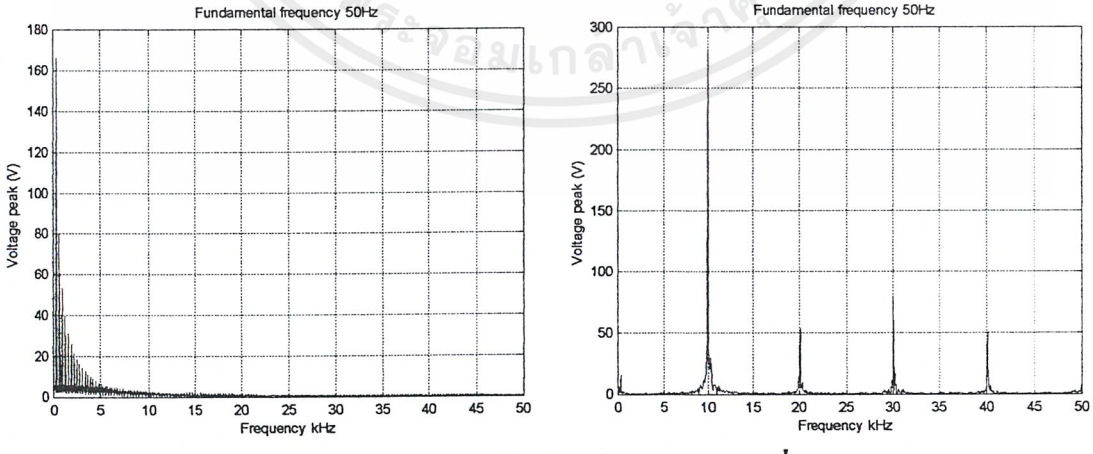
14. ที่แรงดัน Output = 225volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



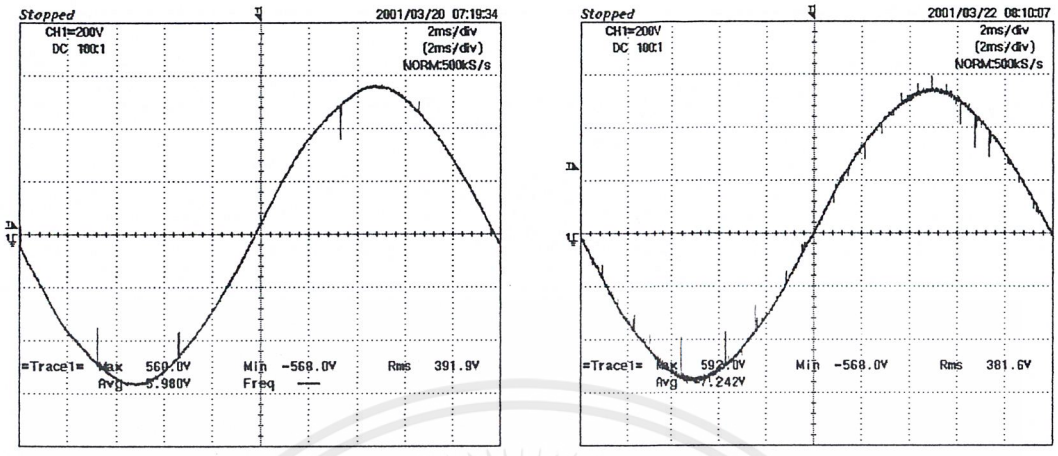
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



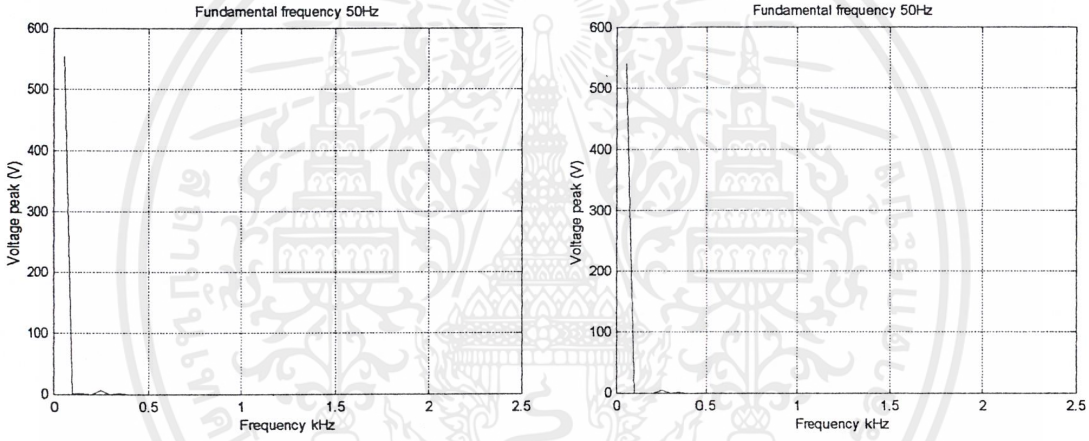
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

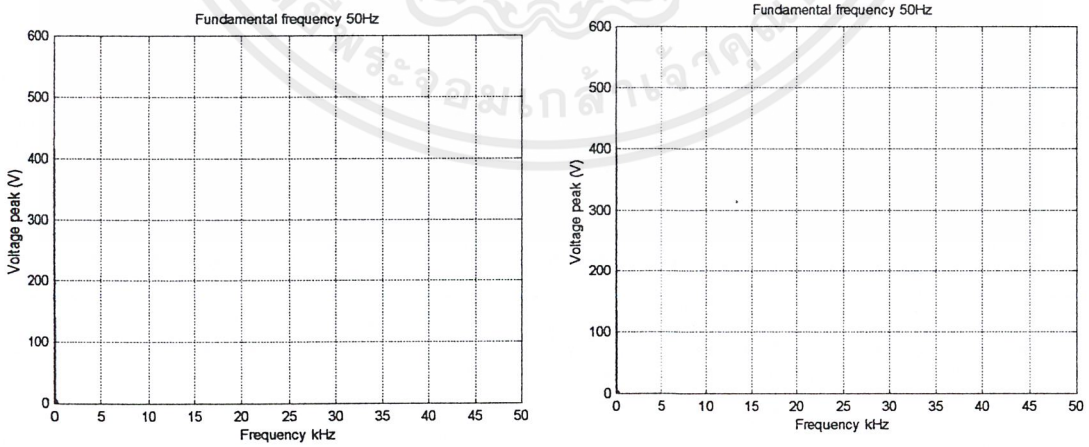
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



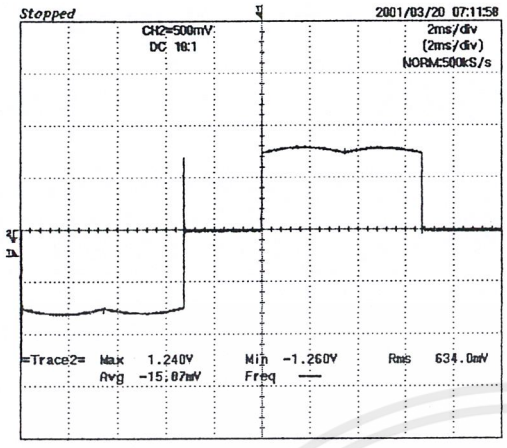
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

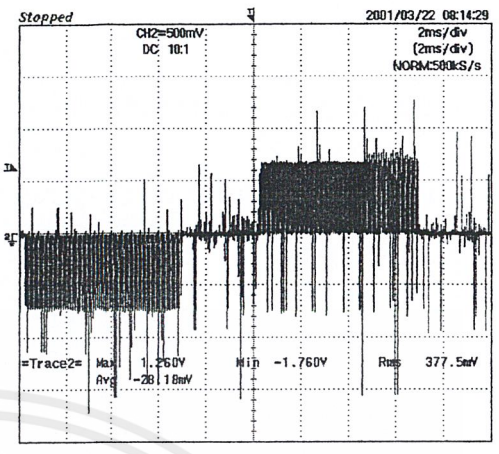


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

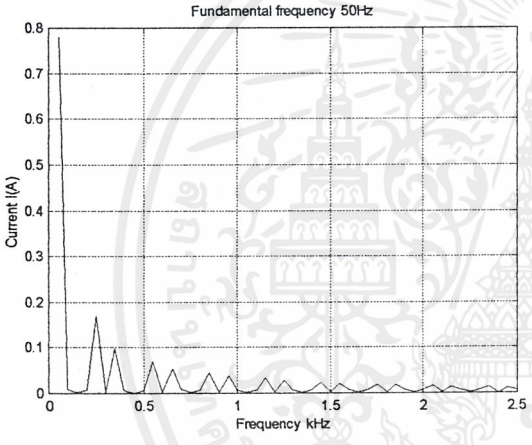
รูปที่ 5.18 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

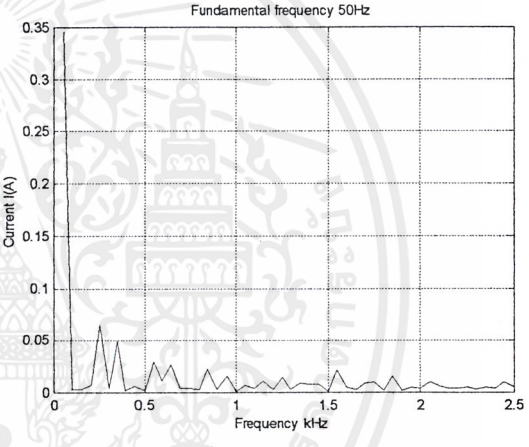
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



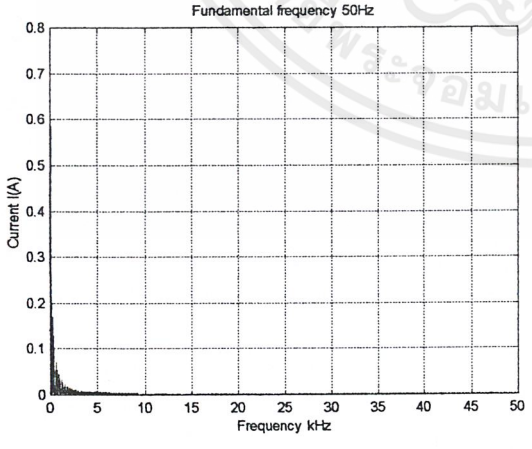


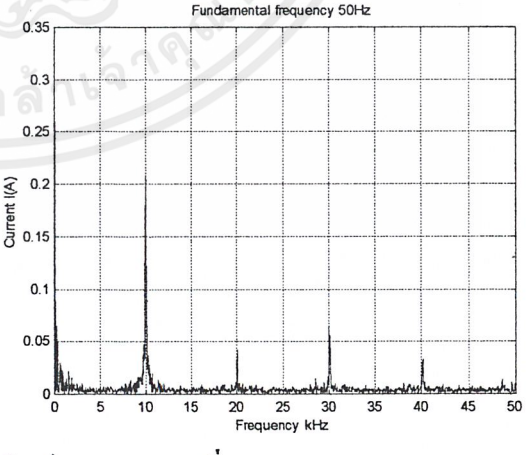
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



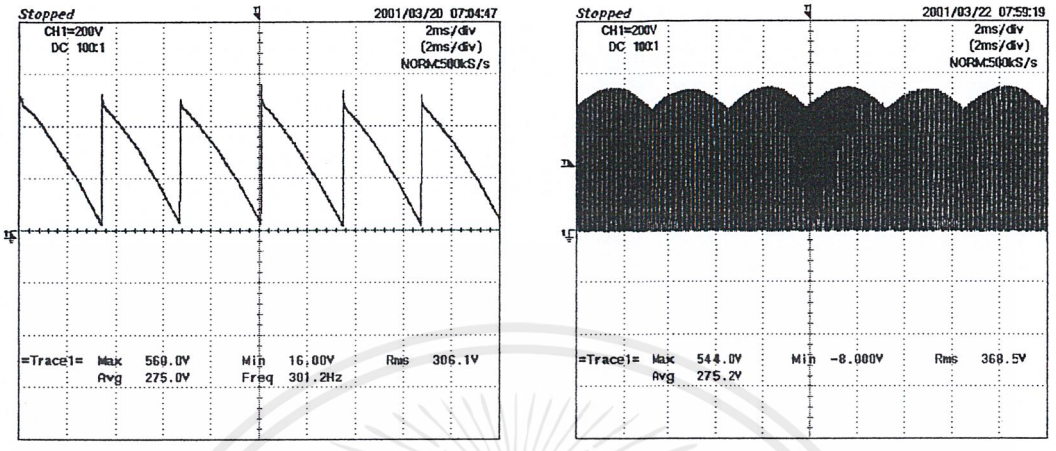


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

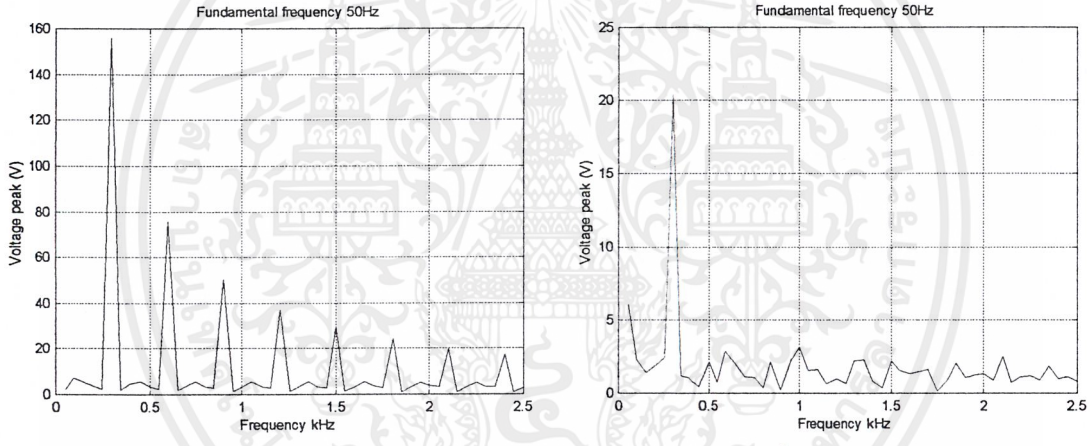
รูปที่ 5.18 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=225 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

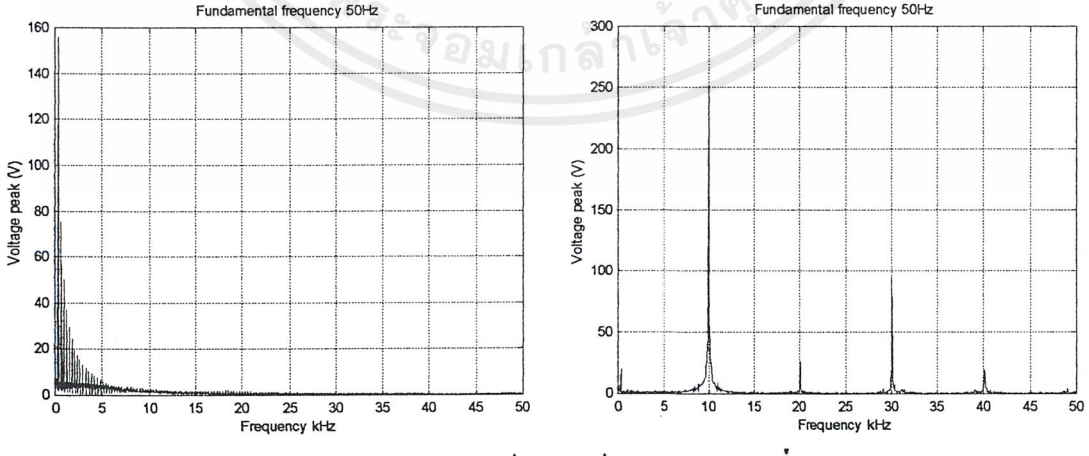
15. ที่แรงดัน Output = 275volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



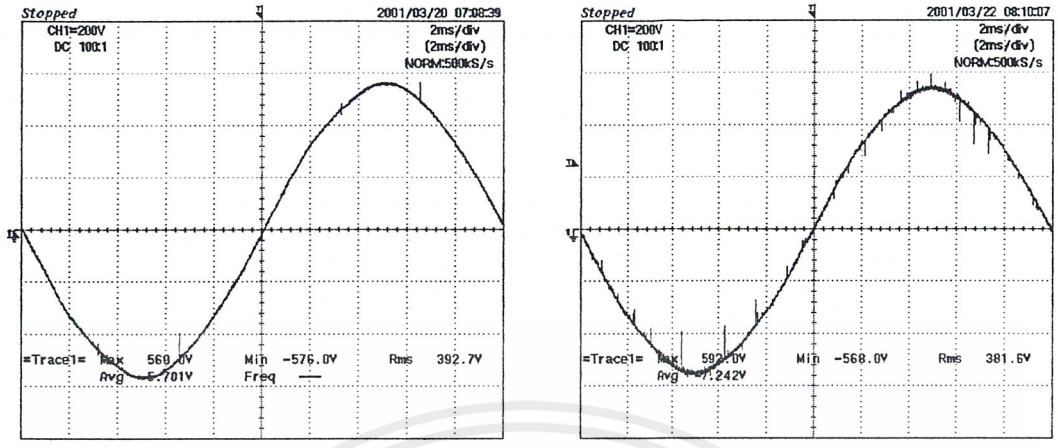
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



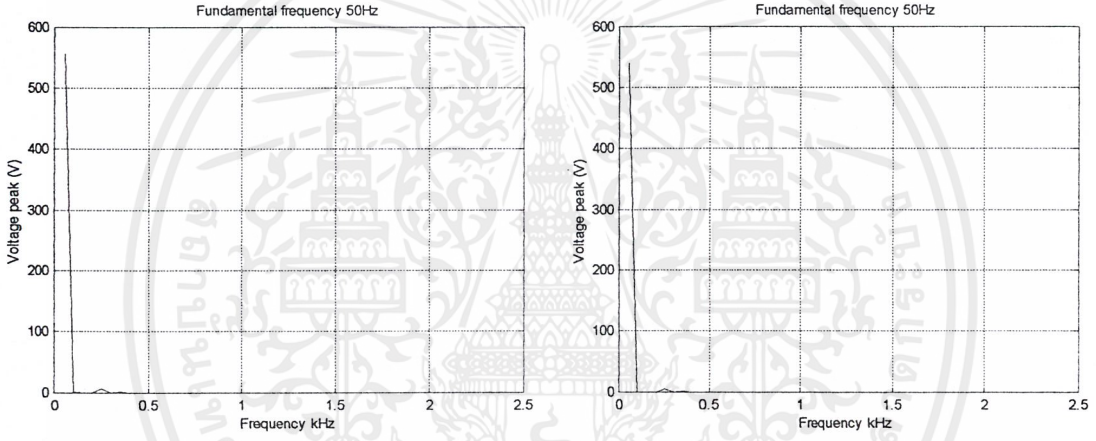
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

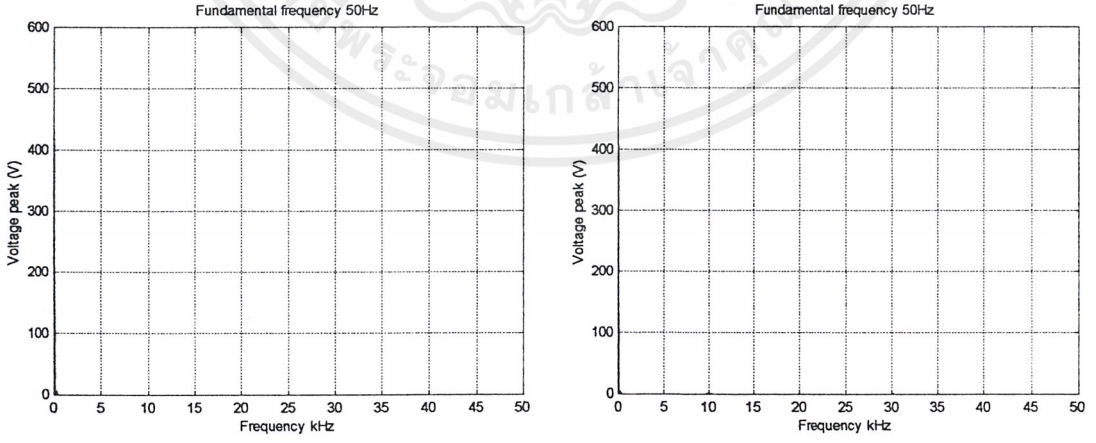
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



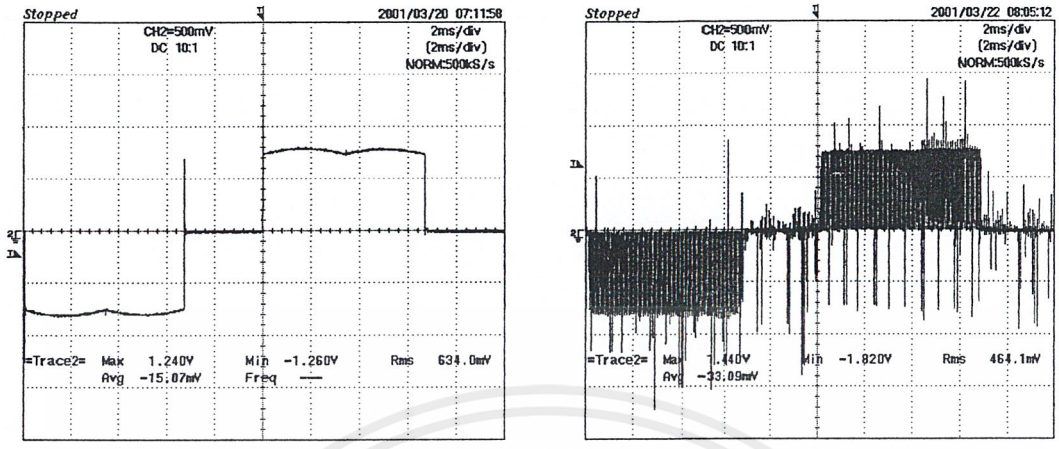
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



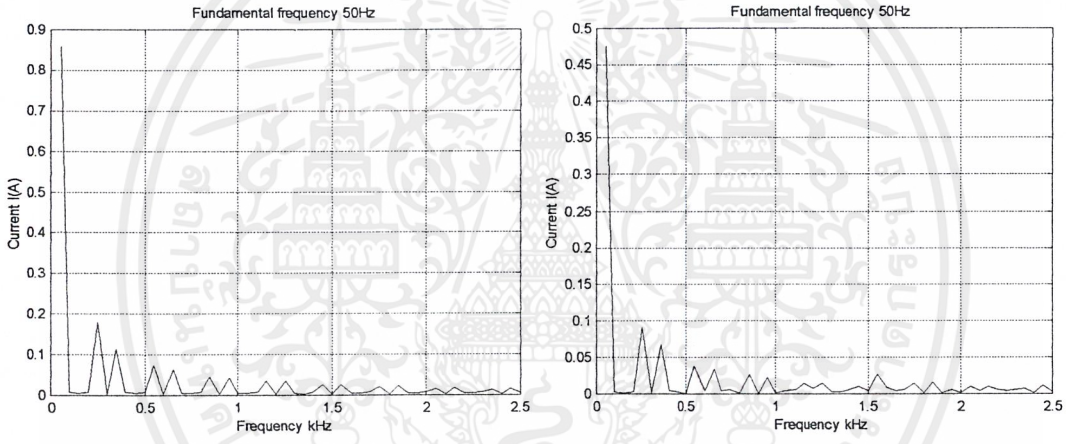
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.19 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

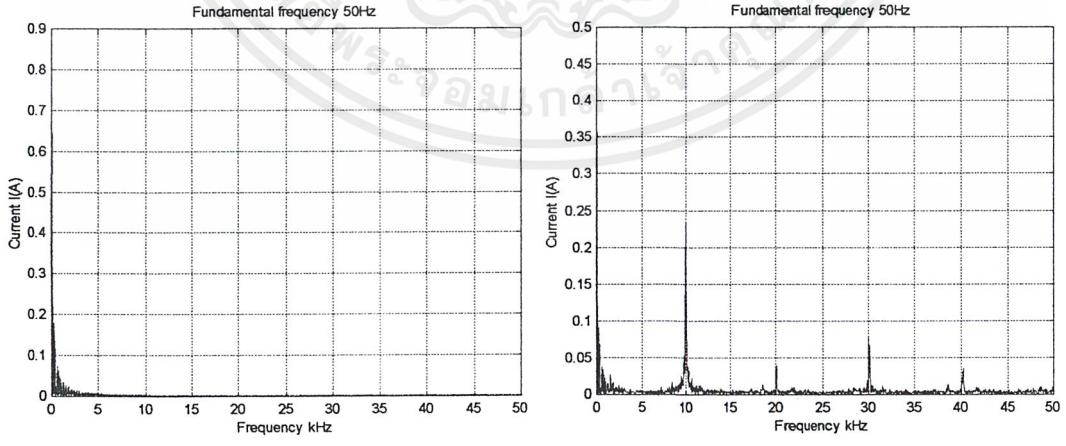
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

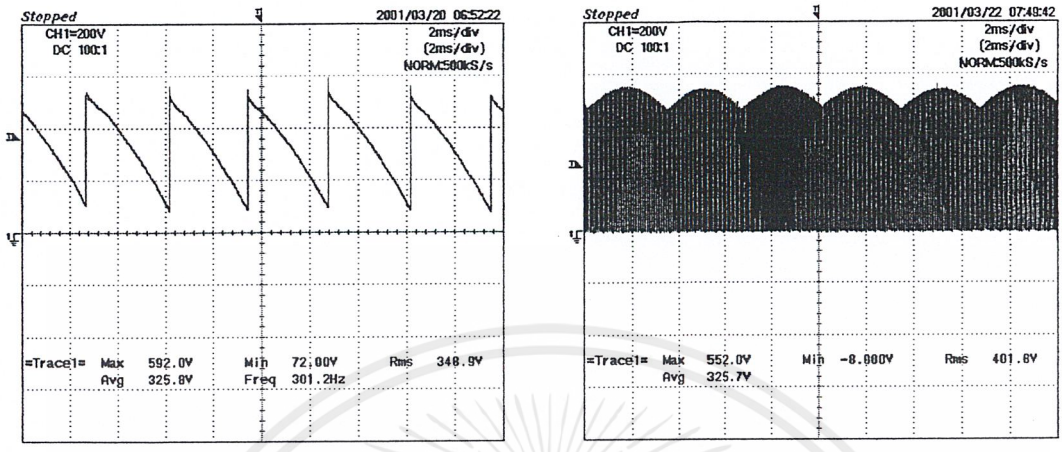


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

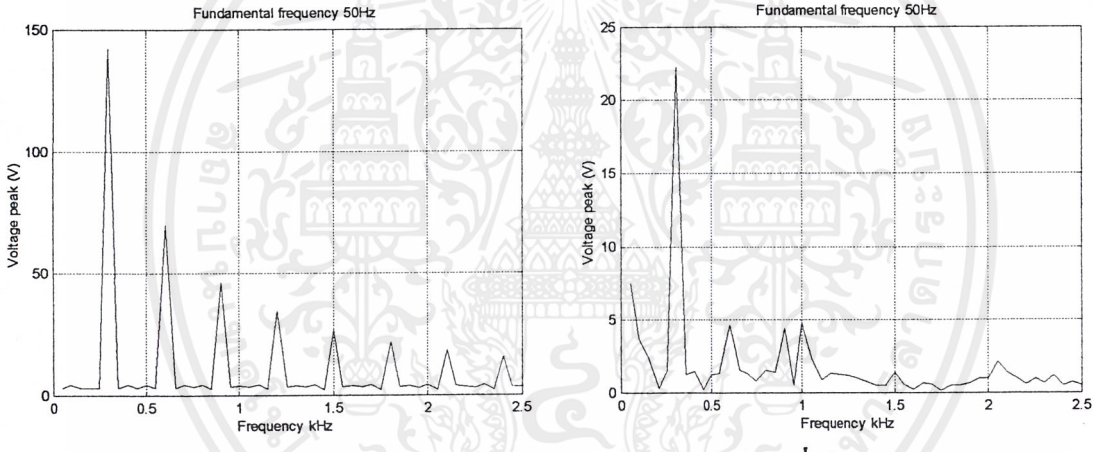
รูปที่ 5.19 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=275 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

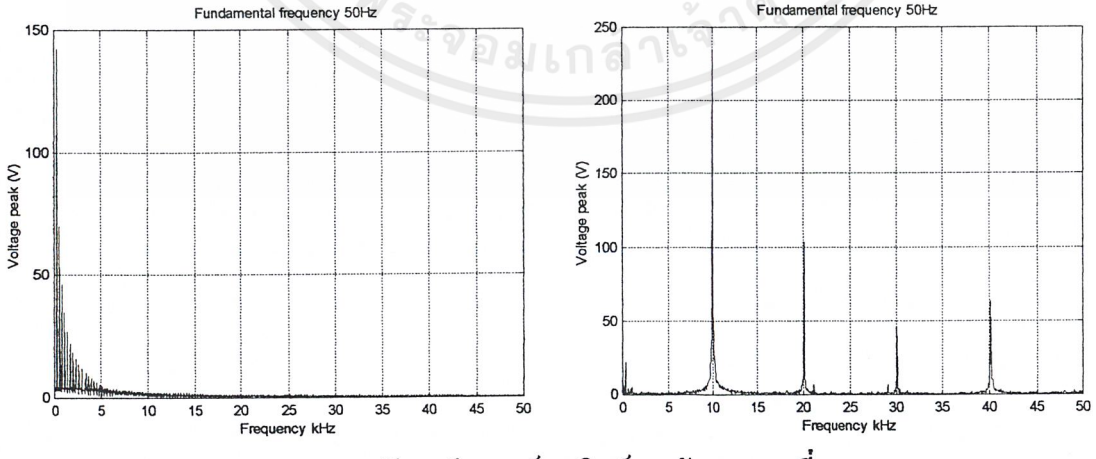
16. ที่แรงดัน Output = 325volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



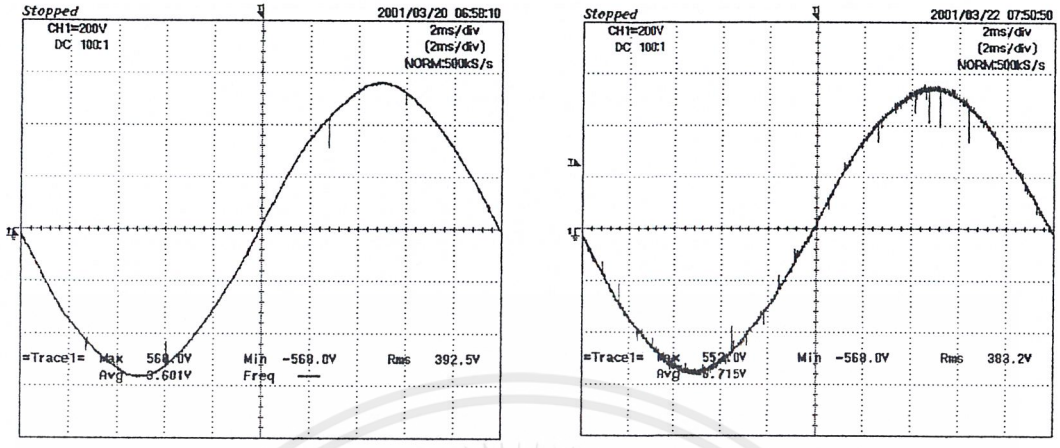
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



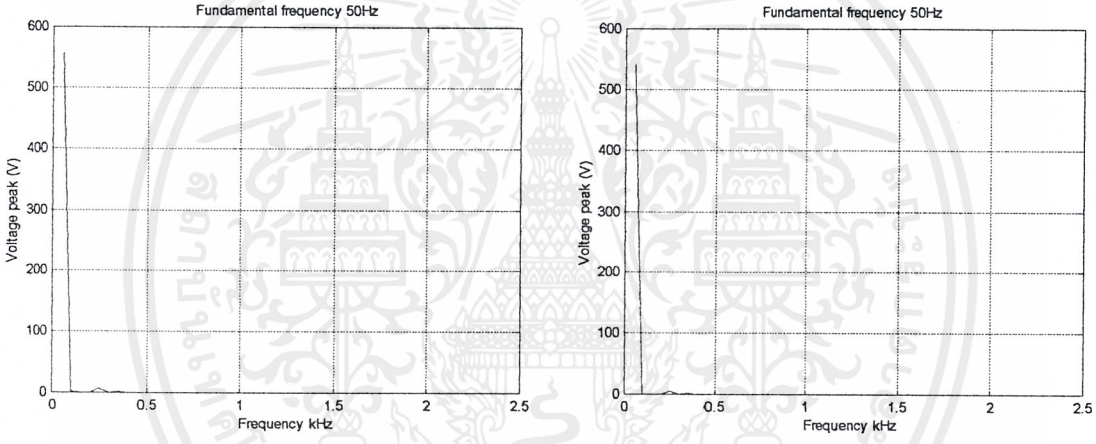
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt ,Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

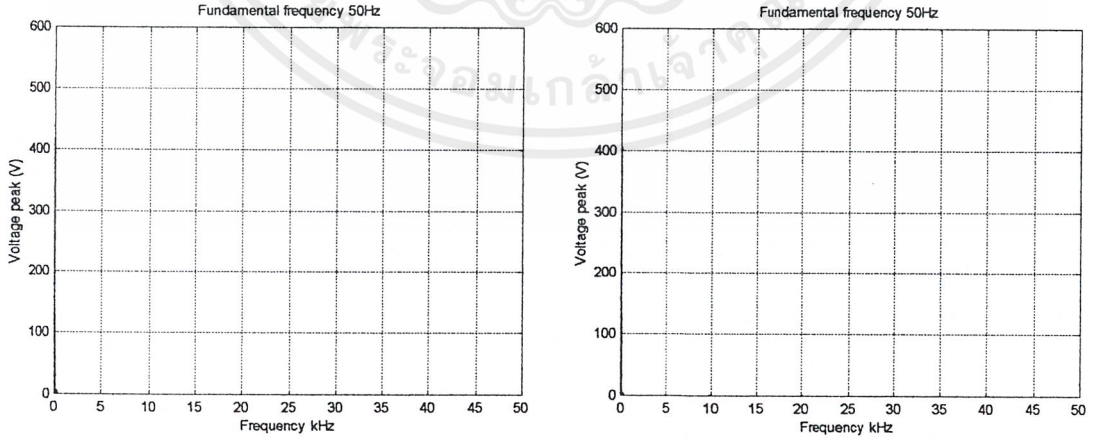
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



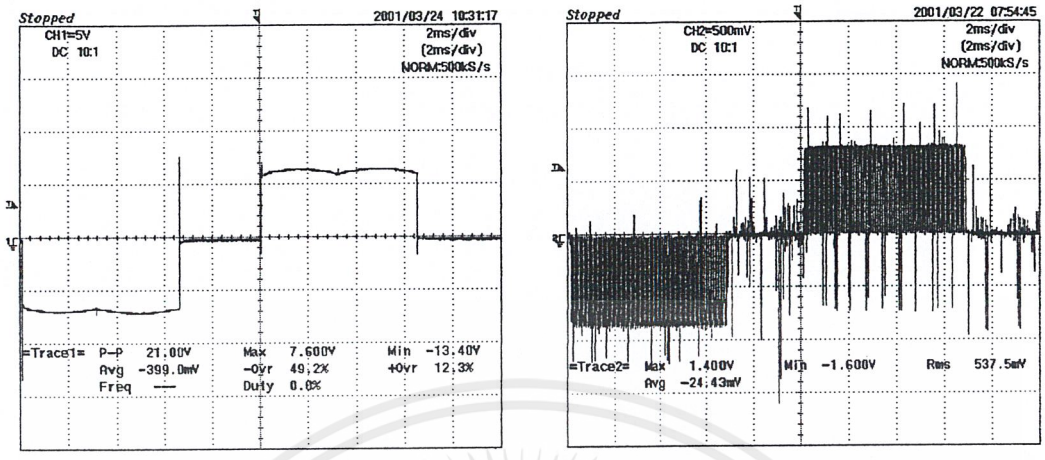
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



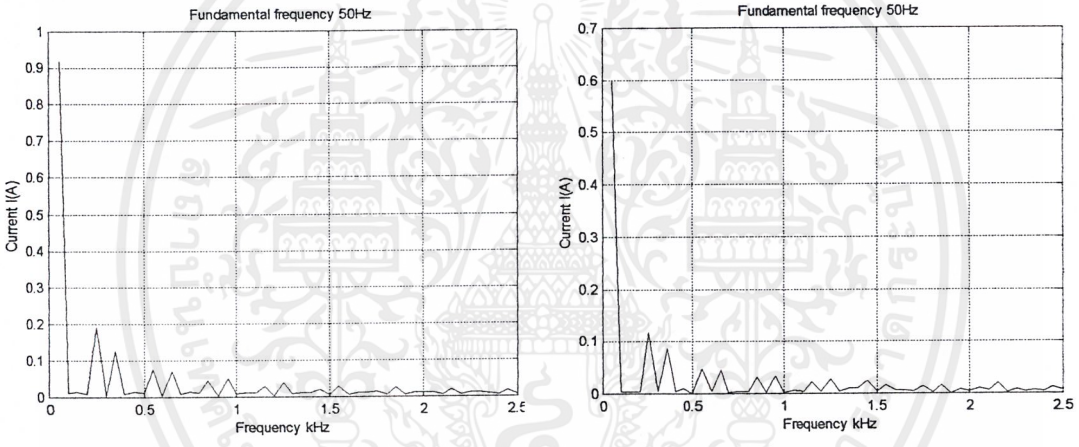
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.20 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

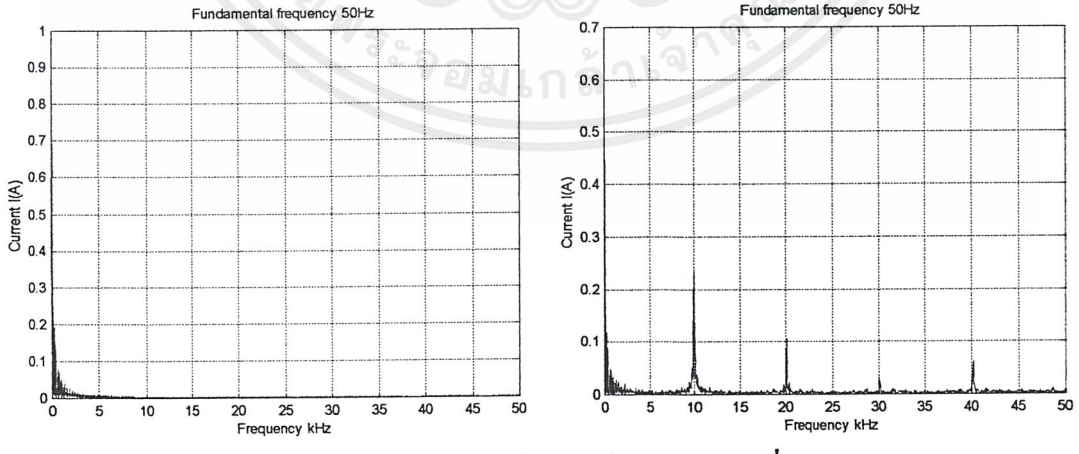
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

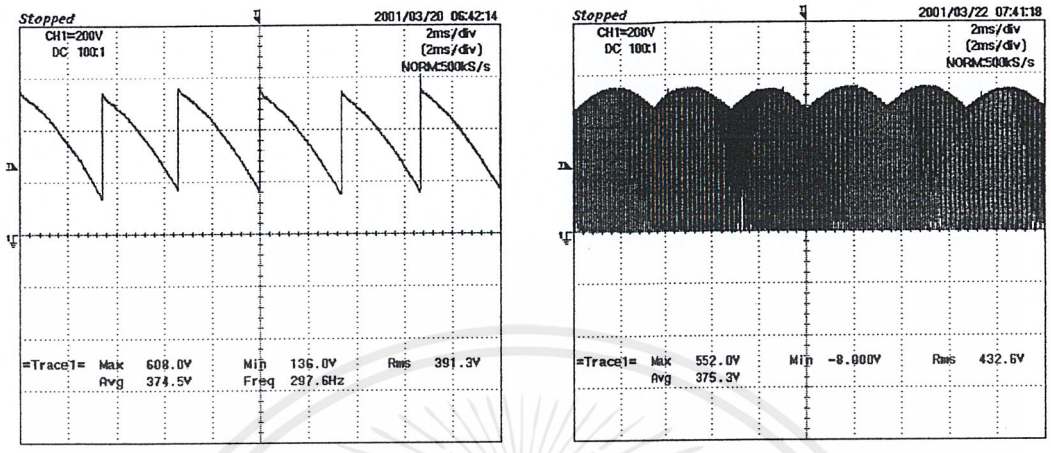


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

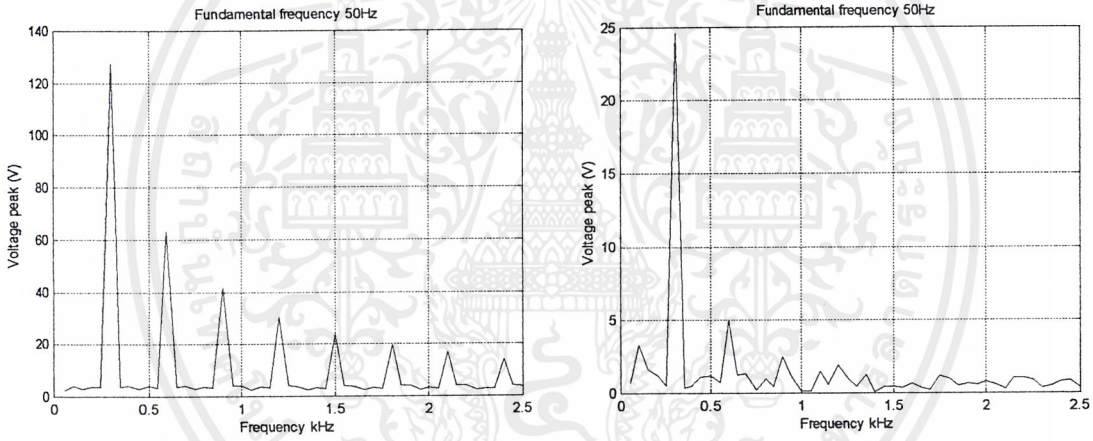
รูปที่ 5.20 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=325 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

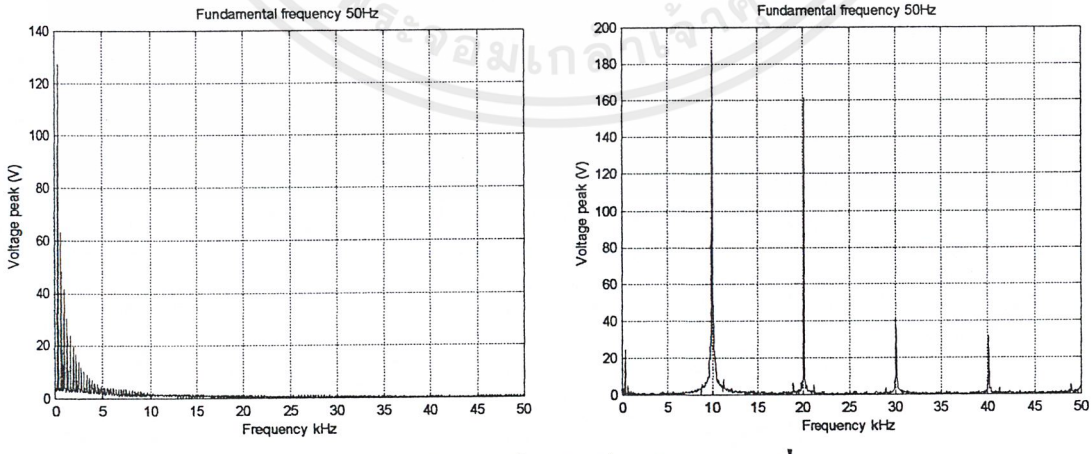
17. ที่แรงดัน Output = 375volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



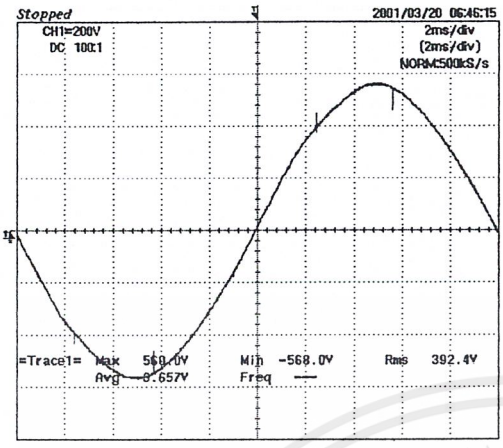
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz

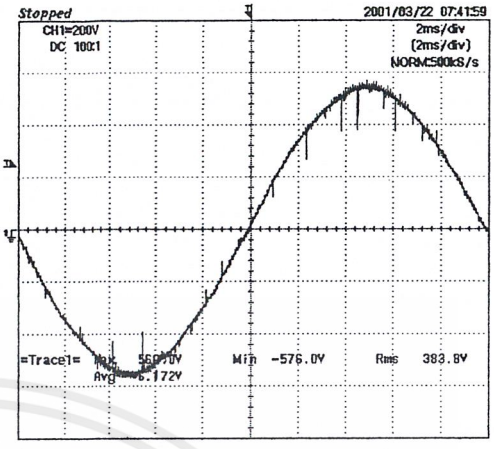


(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

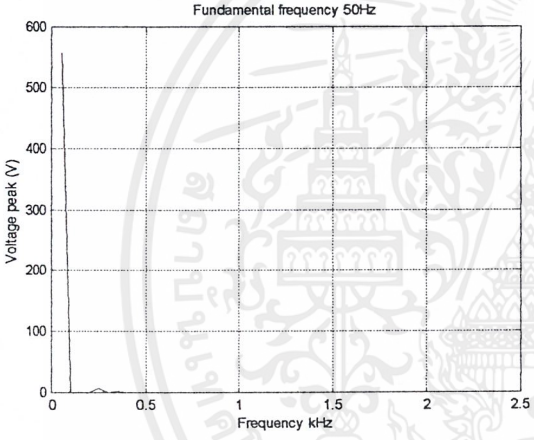
รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

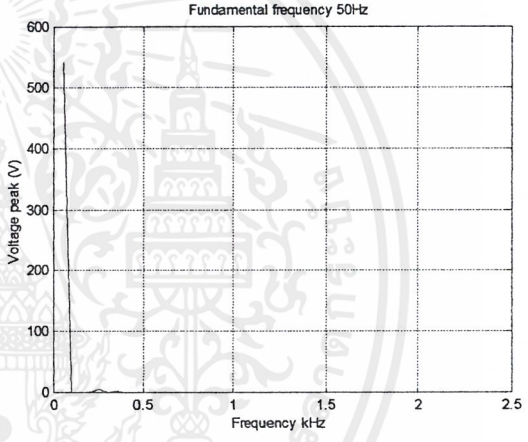
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



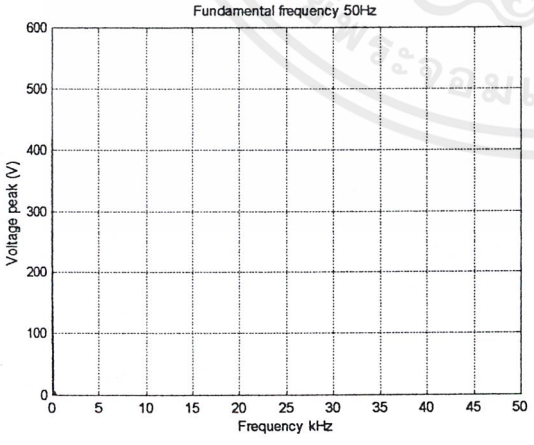


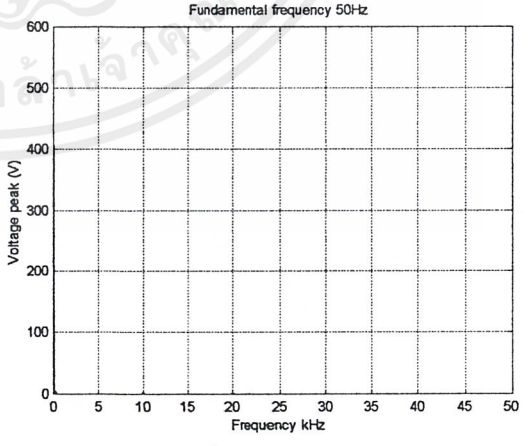
(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input





(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

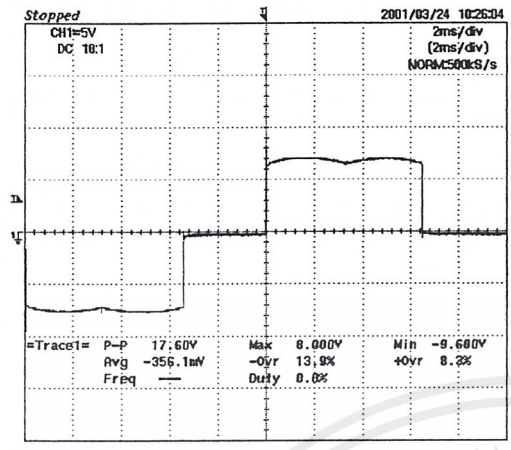


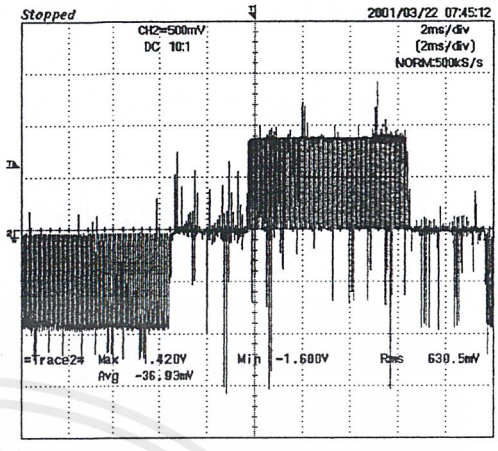


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

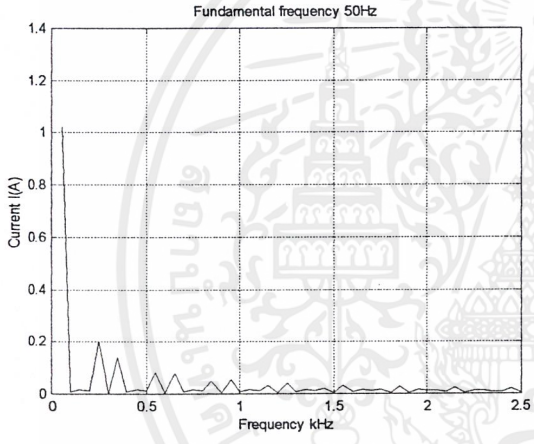
รูปที่ 5.21(ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

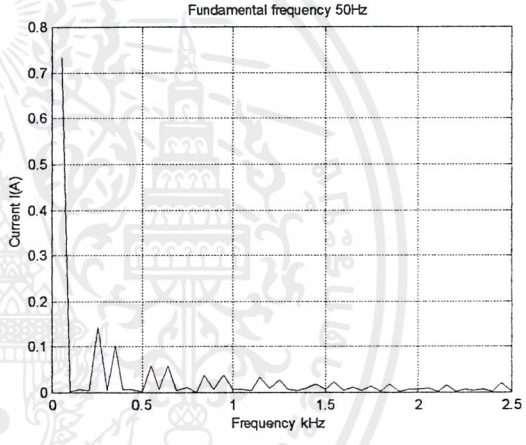
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



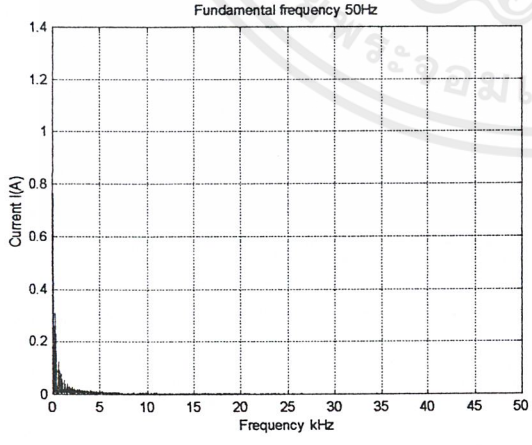


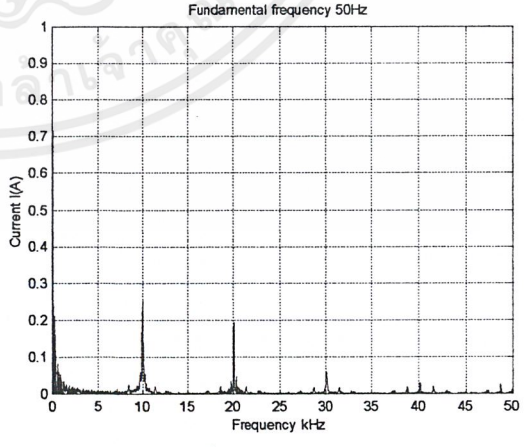
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



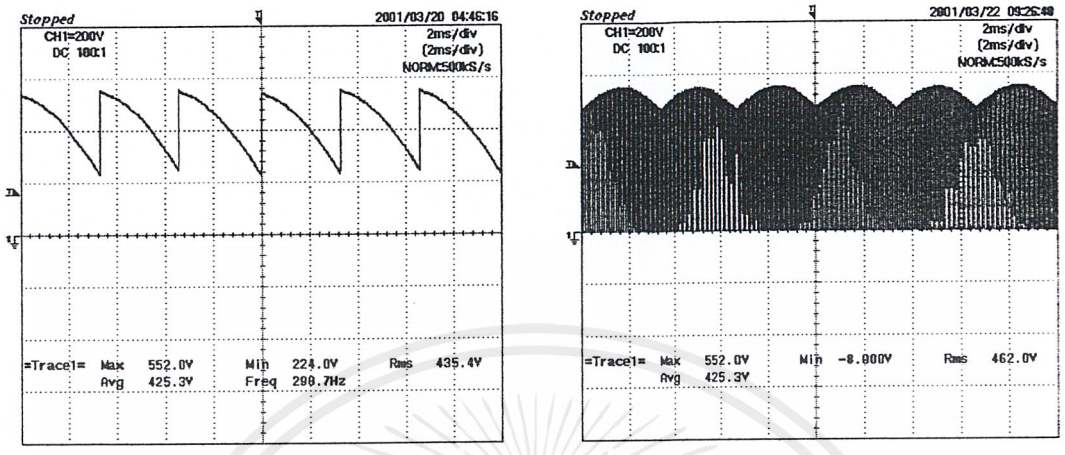


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

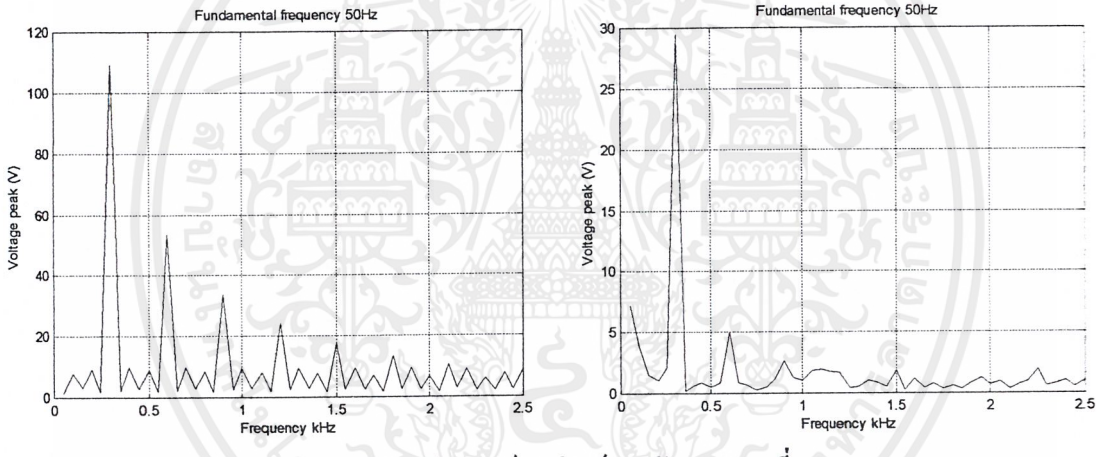
รูปที่ 5.21(ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=375 volt , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

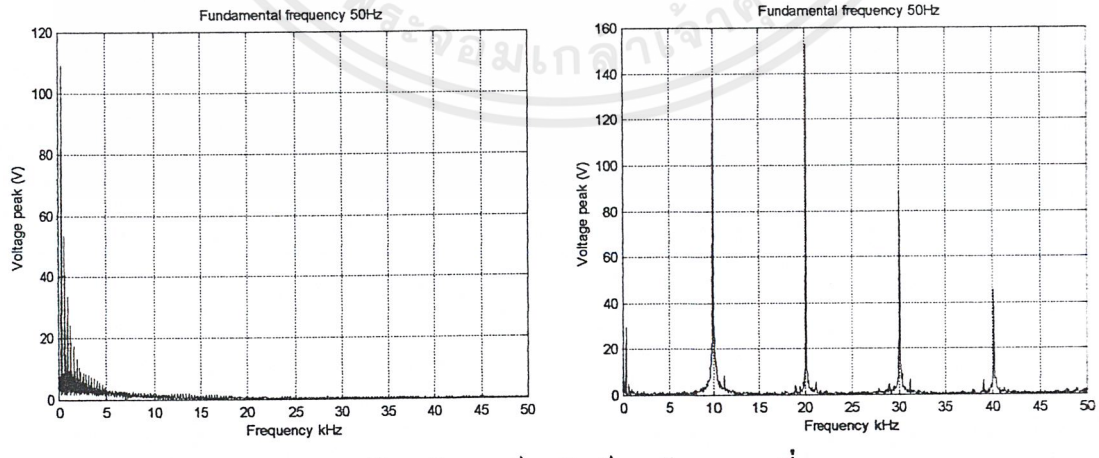
18. ที่แรงดัน Output = 425volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



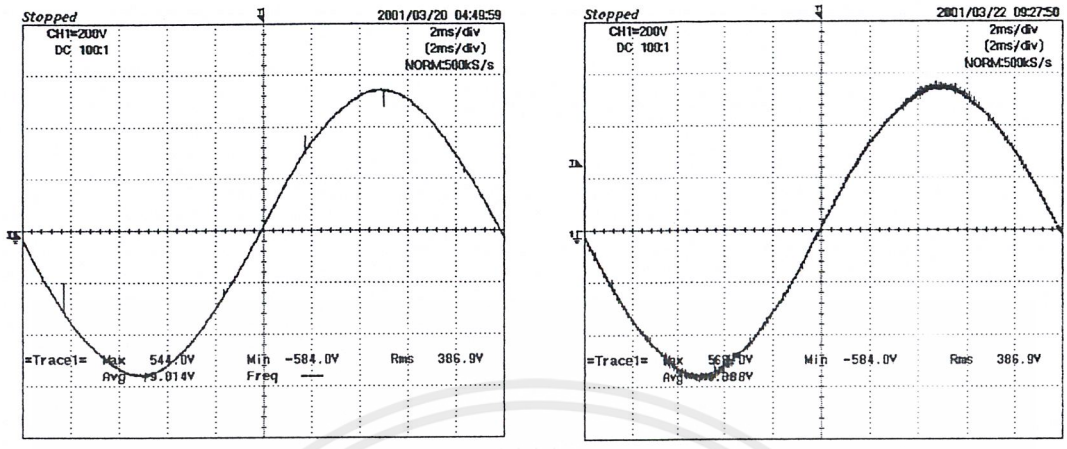
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



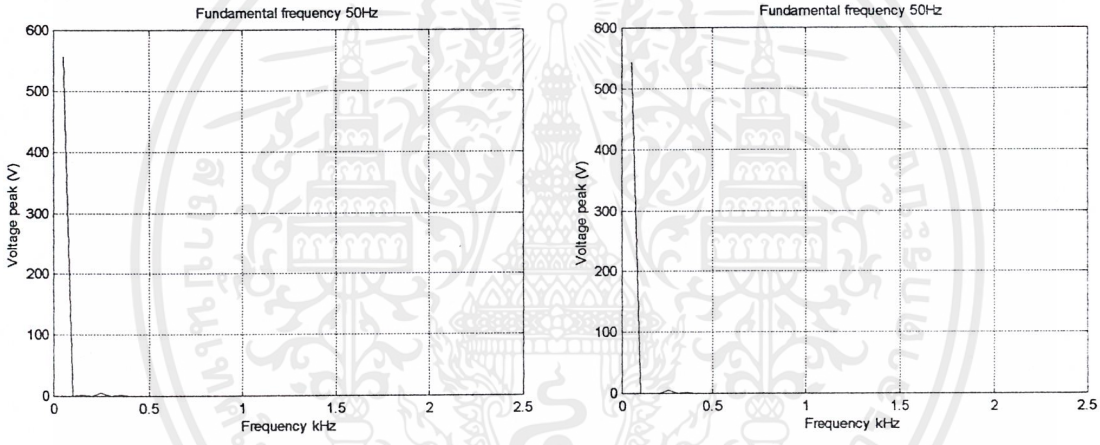
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

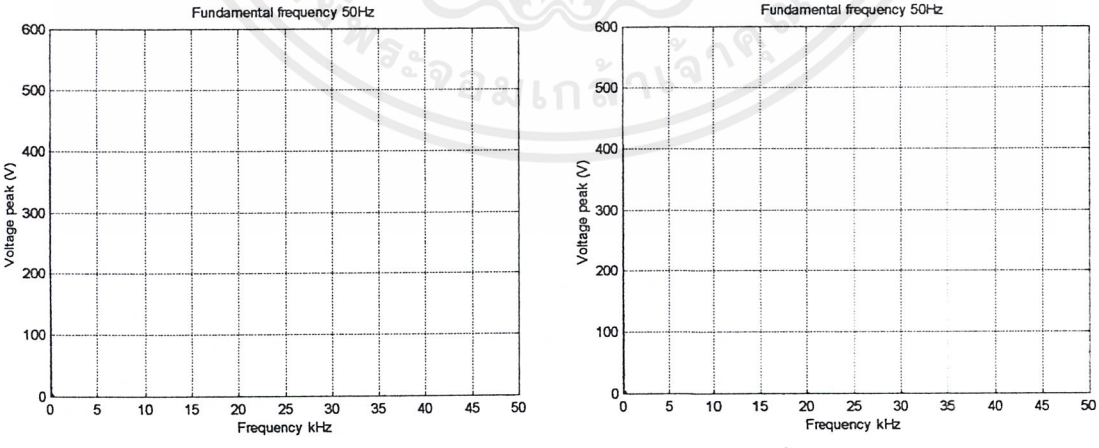
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



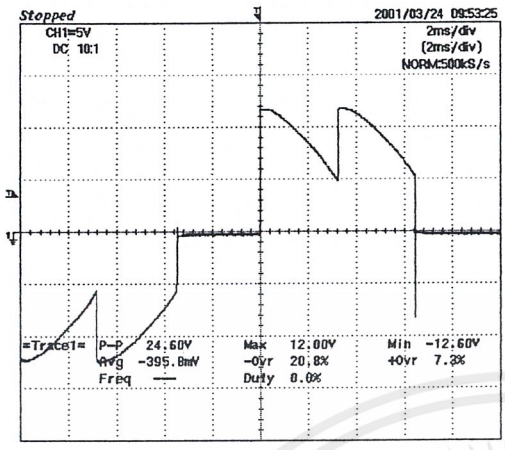
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

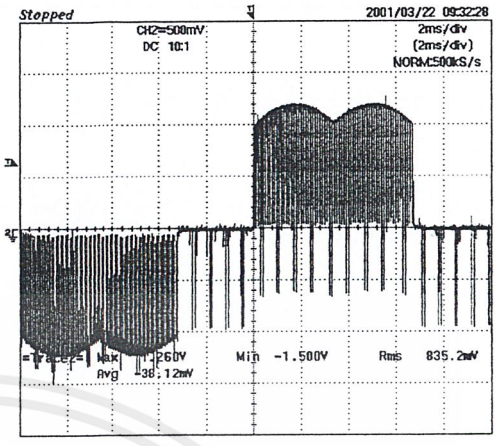


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

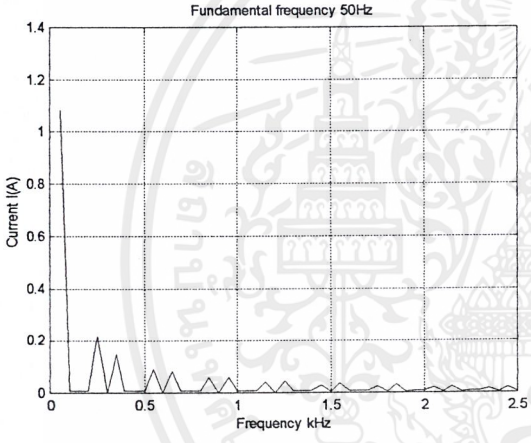
รูปที่ 5.22 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

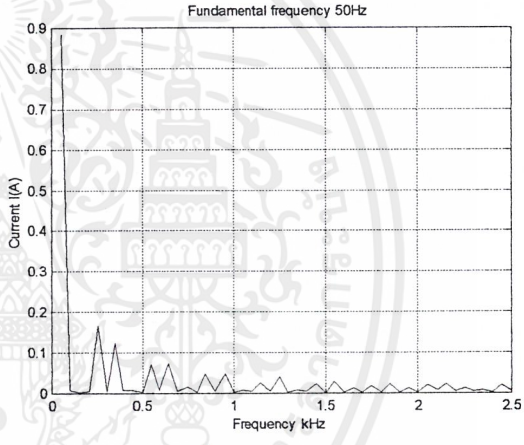
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



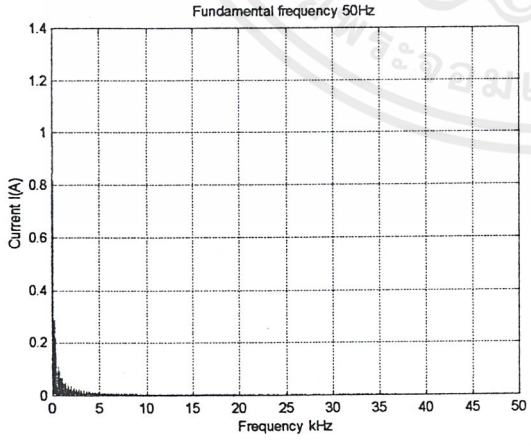


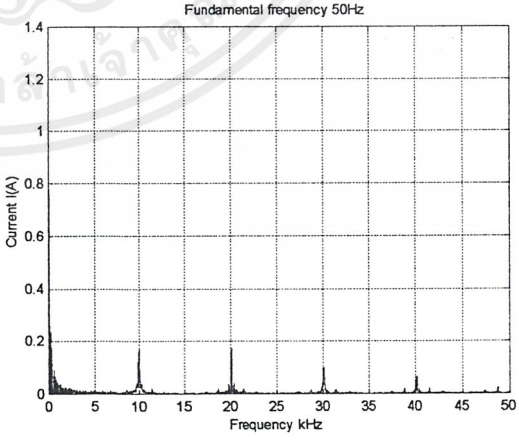
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz



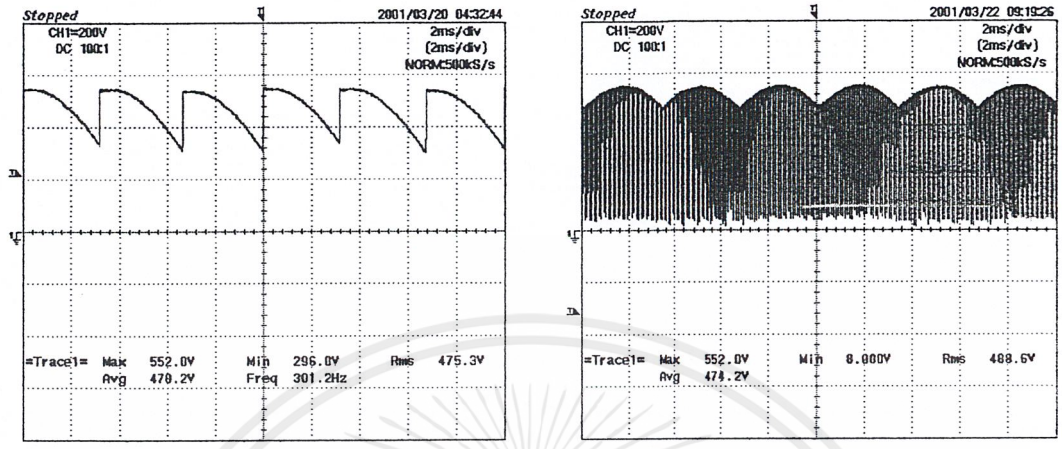


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

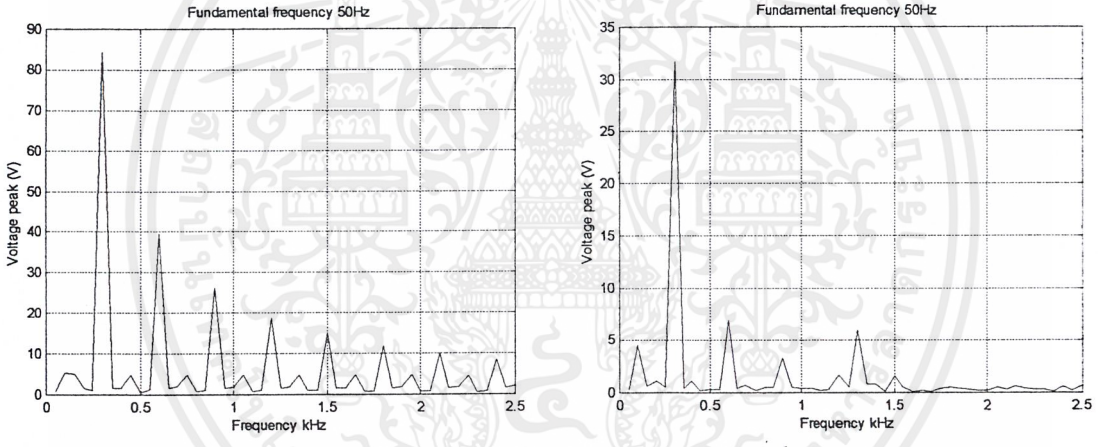
รูปที่ 5.22 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=425 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

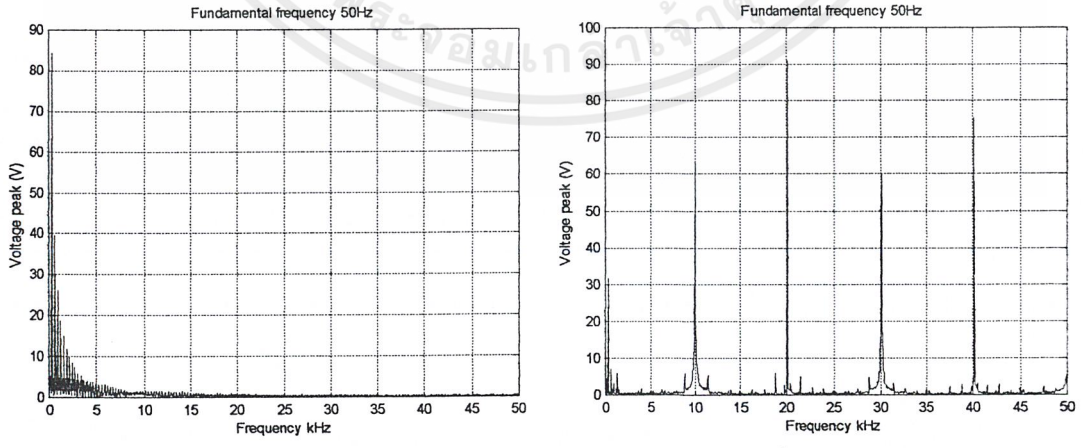
19. ที่แรงดัน Output = 475volt , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



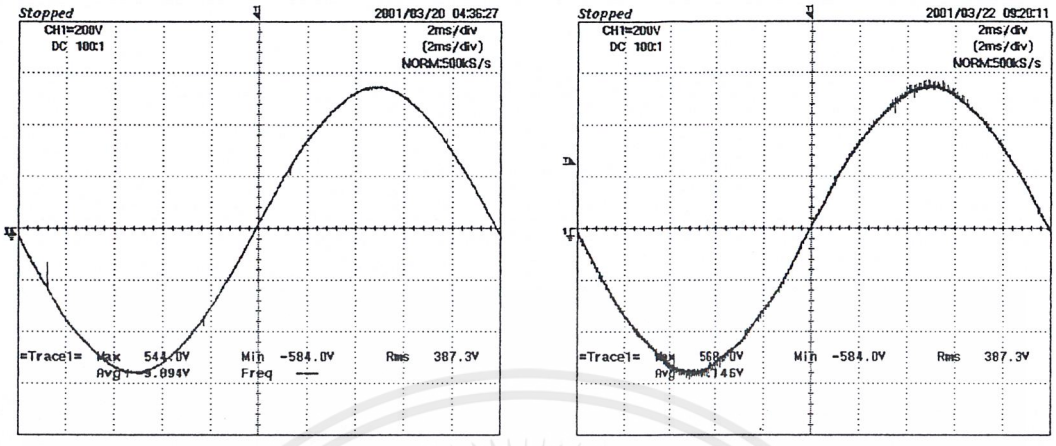
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



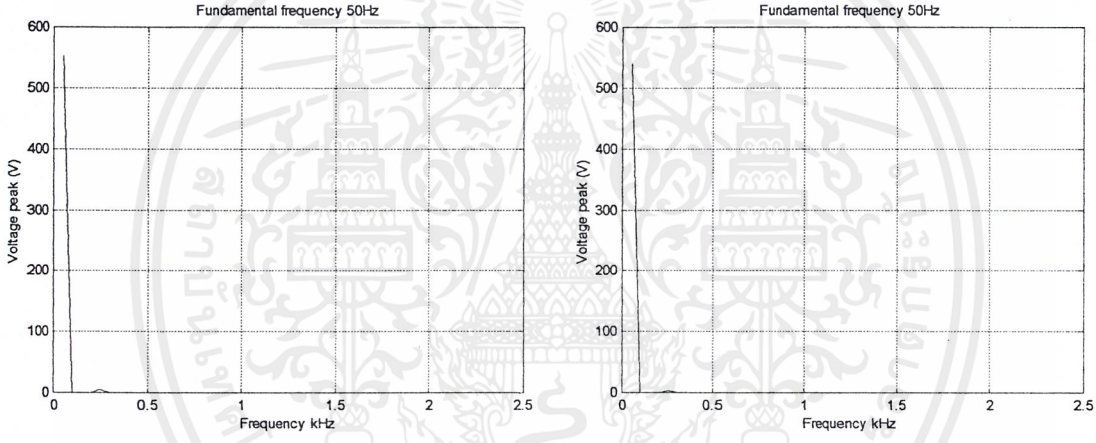
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

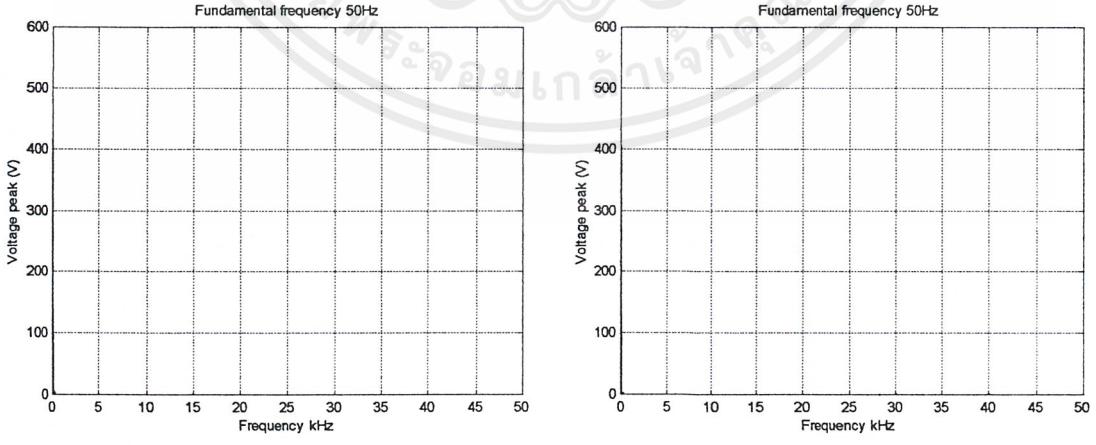
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



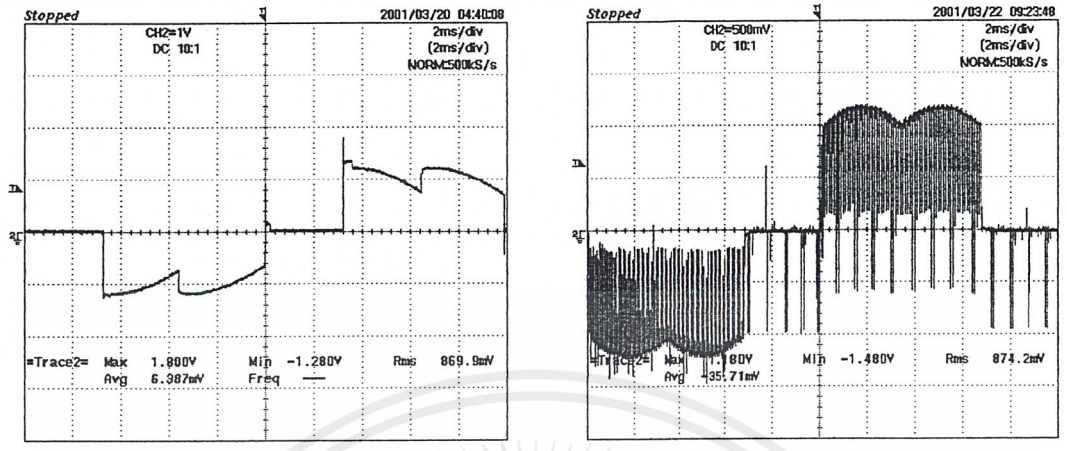
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz



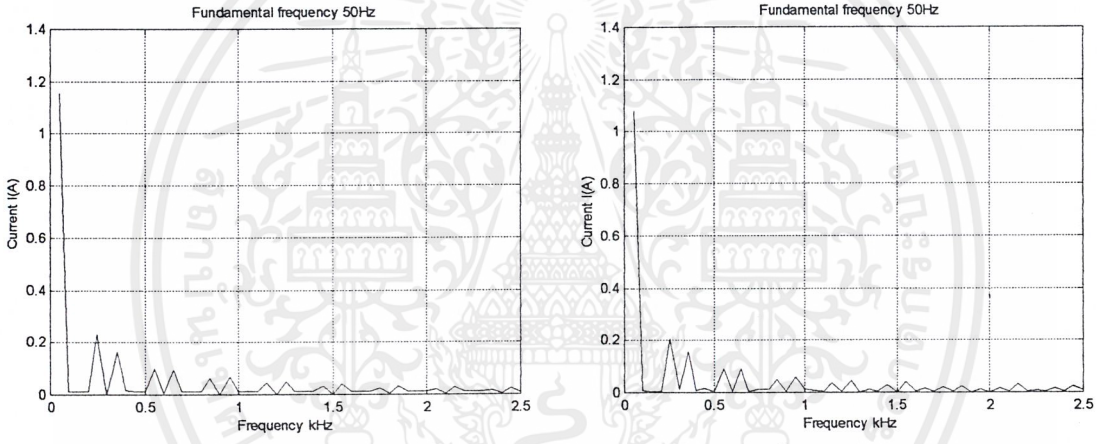
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.23 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

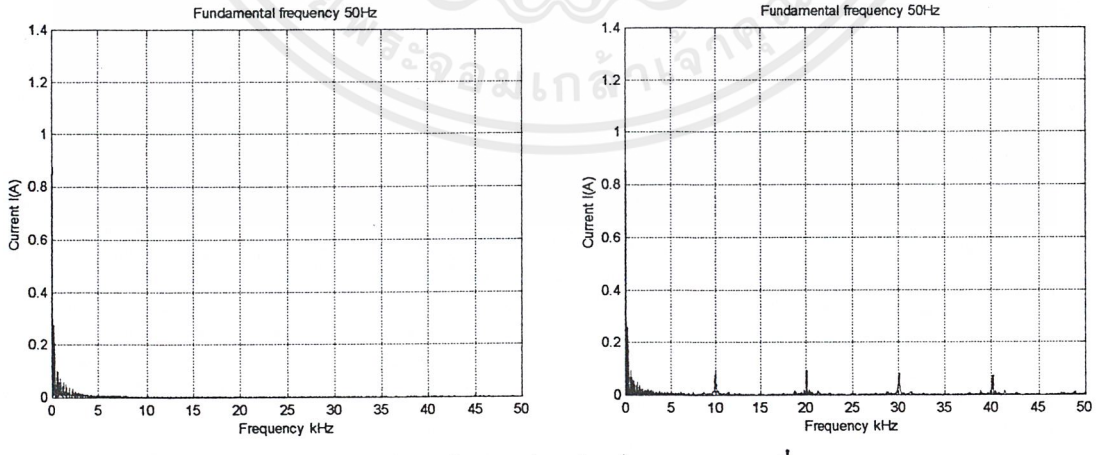
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input



(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz

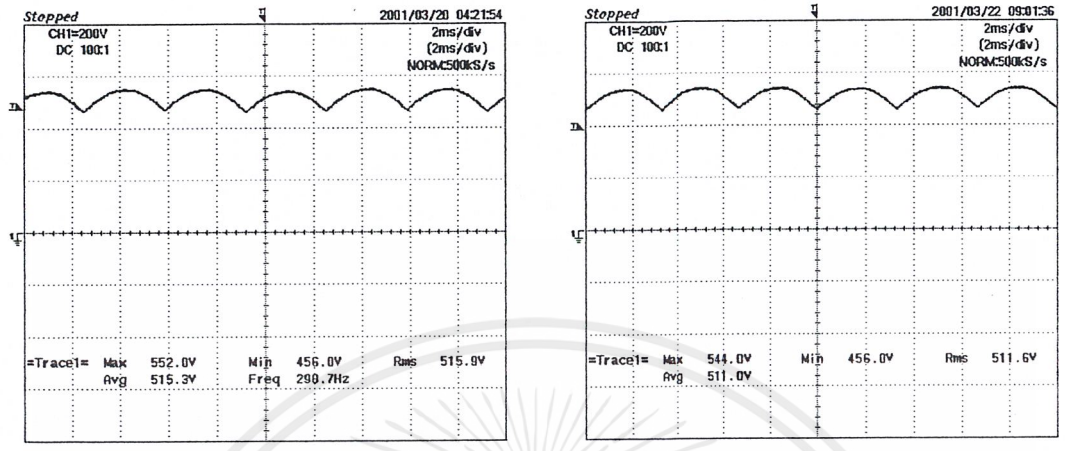


(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

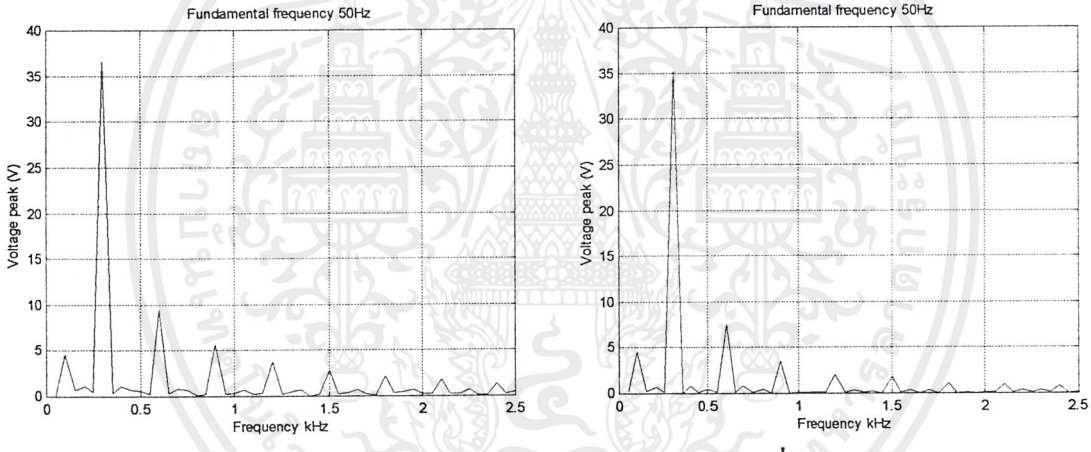
รูปที่ 5.23 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput=475 volt , Load R=1100 W ,L = 2 H ขอ งวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

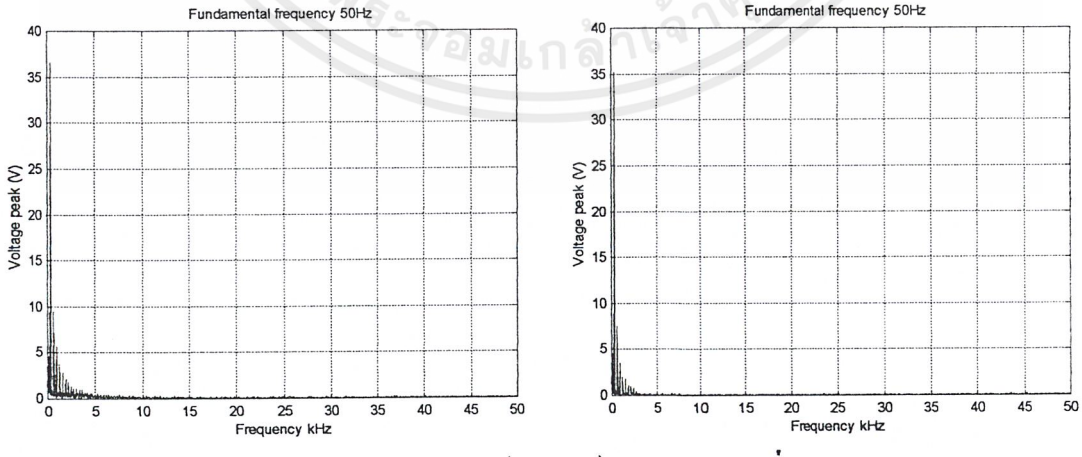
20. ที่แรงดัน Output = Maximum , LOAD R=1100 W ,L = 2 H



(ก) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Output



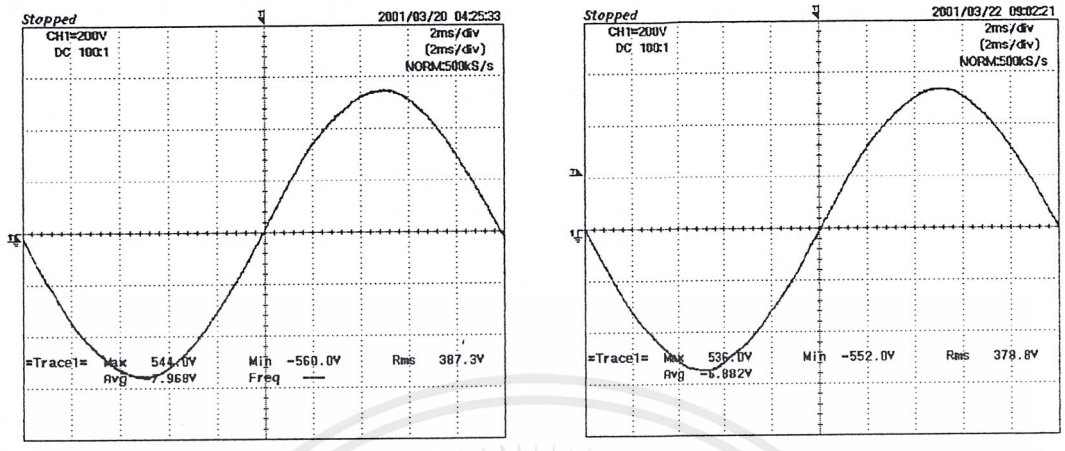
(ข) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 2.5 kHz



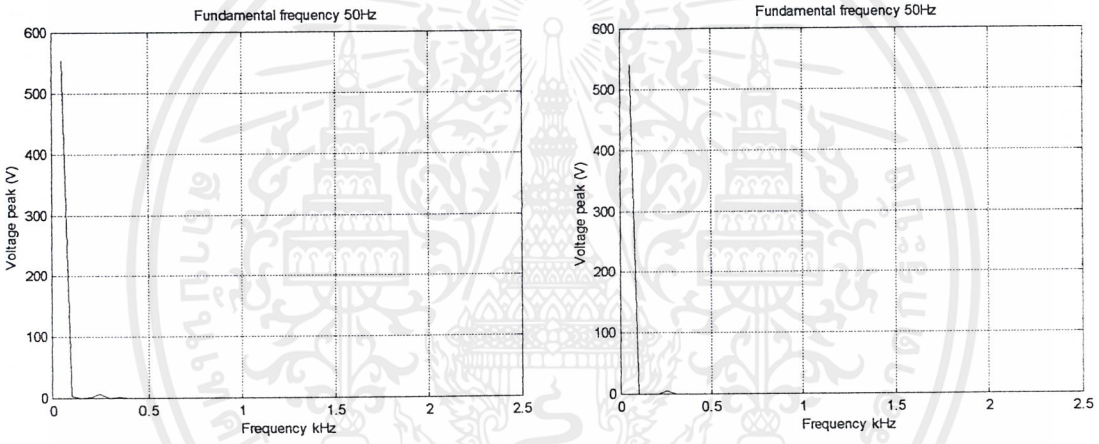
(ค) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Output ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.24 แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

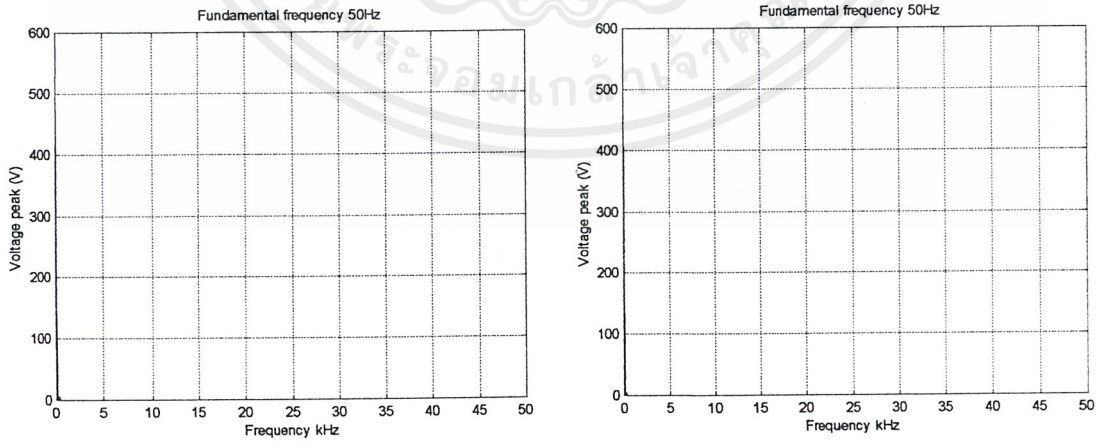
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แสดงการเปรียบเทียบแรงดัน Input



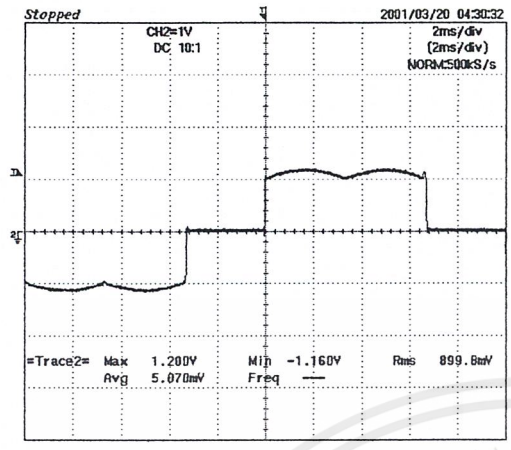
(จ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 2.5 kHz

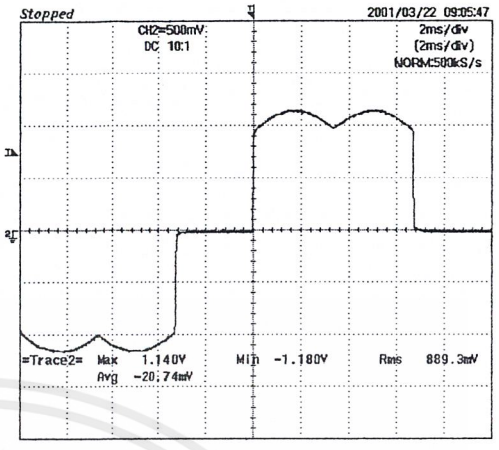


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์แรงดัน Input ที่ 50 kHz

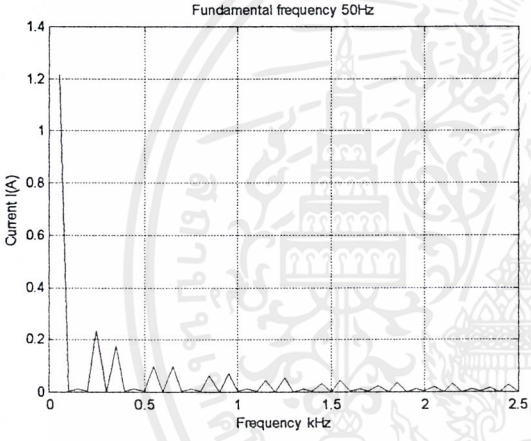
รูปที่ 5.24 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W ,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

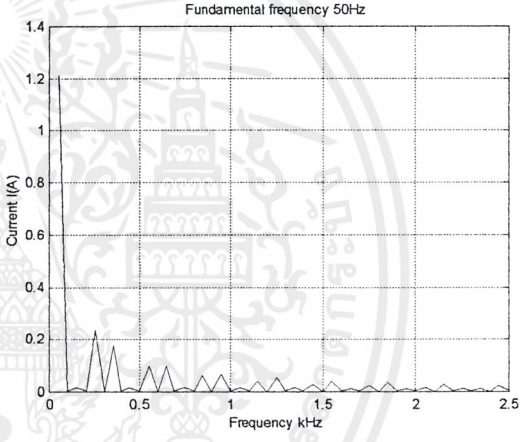
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



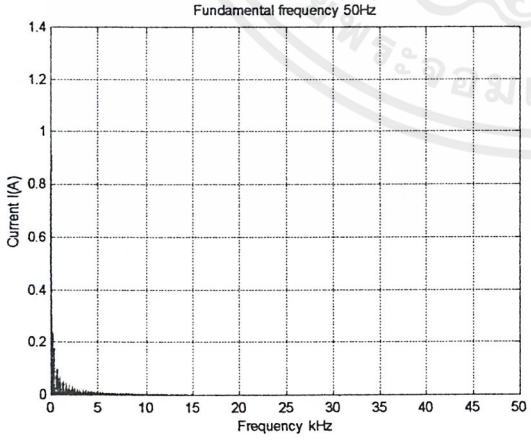


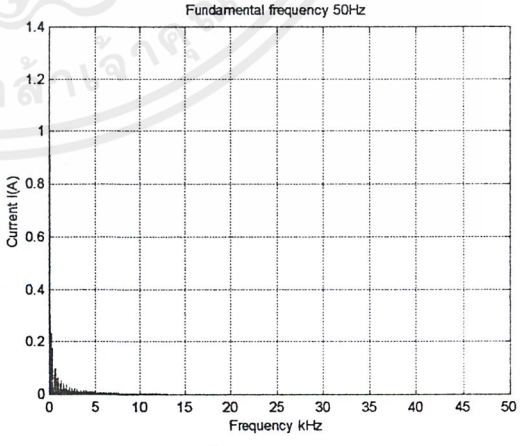
(ช) แสดงการเปรียบเทียบกระแส Input





(ซ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 2.5 kHz





(ฌ) แสดงการเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์กระแส Input ที่ 50 kHz

รูปที่ 5.24 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบที่แรงดันOutput= Maximum , Load R=1100 W,L = 2 H ของวงจร Phase control rectifier และวงจร PWM control rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 2

เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1. โหลดความต้านทาน 1100 วัตต์

V_{out} (avr)	V_{in} (rms)	I_{out} (avr)	I_{in} (rms)	S_{out} (VA)	S_{in} (VA)	P_{out} (watt)	P_{in} (watt)	Q_{out} (VAR)	Q_{in} (VAR)	PF (in)
75	395.6	0.909	0.724	61	496	103	106	0	485	0.214
100	395.8	0.992	0.81	101	555	136	141	0	536	0.255
125	394.8	1.071	0.874	133	597	172	178	0	570	0.297
150	393.5	1.144	0.934	171	638	209	215	0	601	0.338
175	393.5	1.212	0.99	211	675	249	255	0	625	0.378
200	393.5	1.275	1.043	256	711	288	296	0	646	0.417
225	393.4	1.332	1.096	301	743	327	336	0	662	0.453
250	390.0	1.384	1.134	344	766	366	373	0	668	0.488
275	391.3	1.436	1.178	393	798	407	461	0	681	0.521
300	390.3	1.484	1.219	446	824	447	457	0	685	0.555
325	387.2	1.531	1.259	497	844	489	50	87	680	0.592
350	392.5	1.580	1.301	553	885	535	548	135	695	0.619
375	390.9	1.626	1.337	608	906	581	595	178	683	0.657
400	390.9	1.672	1.376	667	932	630	646	222	672	0.693
425	390.3	1.719	1.416	730	958	683	698	262	656	0.729
450	389.1	1.764	1.454	798	980	735	751	301	629	0.767
475	388.9	1.810	1.493	862	1005	792	808	339	597	0.804
500	388.6	1.853	1.535	927	1033	847	865	373	564	0.838
525	396.7	1.901	1.578	996	1084	916	933	410	553	0.860
550	396.7	1.944	1.607	1071	1104	971	994	449	481	0.900
583 (max)	395.5	1.999	1.643	1163	1125	1049	1071	502	347	0.951

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ของวงจรเฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 โหลดความต้านทานและความเหนี่วยนำ(R = 1100 watt ,L= 2 H)

V_{out} (avr)	V_{in} (rms)	I_{out} (avr)	I_{in} (rms)	S_{out} (VA)	S_{in} (VA)	P_{out} (watt)	P_{in} (watt)	Q_{out} (VAR)	Q_{in} (VAR)	PF (in)
75	396.4	0.659	0.338	53	323	33	34	32	227	0.148
100	396.2	0.711	0.402	64	280	46	41	53	254	0.161
125	396.1	0.777	0.474	96	325	59	64	76	319	0.196
150	396.5	0.862	0.566	132	389	89	93	98	380	0.238
175	396.6	0.951	0.653	184	449	120	124	116	413	0.276
200	396.8	1.029	0.749	207	513	155	162	135	478	0.316
225	396.9	1.118	0.841	251	579	198	206	152	541	0.356
250	396.7	1.207	0.935	298	642	243	251	170	588	0.393
275	398.1	1.294	1.036	354	714	303	311	183	643	0.435
300	397.4	1.378	1.126	413	775	367	377	191	677	0.487
325	397.2	1.458	1.191	474	820	432	444	194	689	0.542
350	398.6	1.538	1.254	539	866	502	515	197	696	0.594
375	398.5	1.613	1.322	606	913	576	586	218	699	0.643
400	399.0	1.679	1.375	669	951	645	658	246	686	0.693
425	399.2	1.697	1.391	738	962	665	679	273	680	0.707
450	398.7	1.727	1.415	778	978	701	761	337	665	0.733
475	398.3	1.777	1.455	845	1004	759	775	367	638	0.772
500	399.5	1.833	1.507	908	1044	830	854	404	603	0.817
525	399.2	1.877	1.545	990	1069	889	910	430	560	0.852
550	398.3	1.926	1.587	1061	1095	954	974	461	494	0.892
583 (max)	398.3	1.993	1.636	1171	1129	1053	1073	510	352	0.950

ตารางที่5.2 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ และโหลดความเหนี่ยวนำ 2 เฮนรี่ (H) ของวงจรเฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3. โหลดความต้านทาน 1100 วัตต์

V_{out} (avr)	V_{in} (rms)	I_{out} (avr)	I_{in} (rms)	S_{out} (VA)	S_{in} (VA)	P_{out} (watt)	P_{in} (watt)	Q_{out} (VAR)	Q_{in} (VAR)	PF (in)
75	391.4	1.134	0.924	84	628	193	214	0	590631	0.341
100	396.5	1.228	1.000	120	687	250	272	0	659	0.396
125	397.3	1.307	1.068	163	735	303	325	0	677	0.442
150	397.2	1.374	1.124	212	774	351	374	0	689	0.484
175	397.8	1.433	1.172	248	808	397	421	0	696	0.522
200	397.3	1.488	1.220	302	840	443	471	0	698	0.560
225	397.2	1.536	1.254	343	863	487	507	0	698	0.588
250	397.8	1.581	1.294	394	829	528	555	0	692	0.622
275	396.9	1.622	1.328	441	913	571	596	0	692	0.653
300	397.4	1.664	1.361	498	937	614	639	0	685	0.682
325	398.1	1.701	1.396	557	962	654	685	0	676	0.712
350	399.0	1.737	1.424	606	984	696	725	0	666	0.737
375	397.9	1.767	1.448	666	998	733	761	0	646	0.762
400	399.6	1.802	1.477	711	1022	774	805	0	630	0.787
425	396.0	1.829	1.504	785	1038	809	846	0	602	0.815
450	396.1	1.855	1.522	826	1036	842	862	0	574	0.837
475	396.6	1.885	1.545	907	1060	881	913	181	539	0.861
500	396.6	1.911	1.556	960	1076	917	950	272	506	0.833
525	396.2	1.939	1.586	1018	1088	955	985	354	463	0.905
550	396.2	1.963	1.606	1102	1087	988	1019	429	420	0.925
583 (max)	397.0	1.996	1.638	1160	1128	1047	1070	502	350	0.951

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

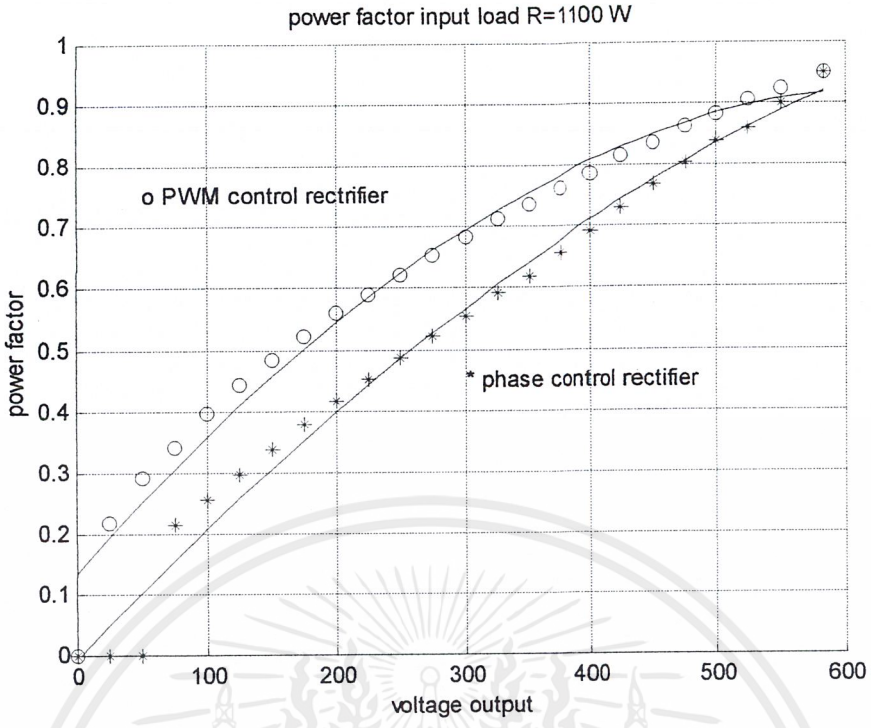
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 โหลดความต้านทานและความเหนี่วยนำ(R = 1100 watt , L = 2 H)

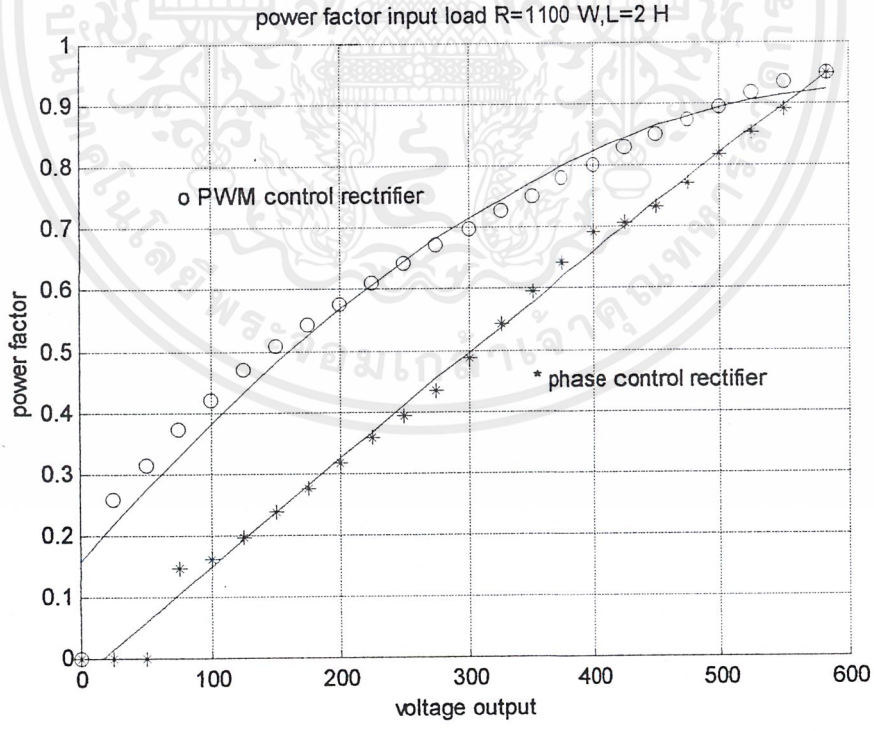
V_{out} (avr)	V_{in} (rms)	I_{out} (avr)	I_{in} (rms)	S_{out} (VA)	S_{in} (VA)	P_{out} (watt)	P_{in} (watt)	Q_{out} (VAR)	Q_{in} (VAR)	PF (in)
75	396.7	0.731	0.238	54	164	49	61	31	152	0.373
100	396.0	0.823	0.298	84	204	75	86	31	185	0.420
125	397.3	0.911	0.372	113	256	102	120	53	227	0.468
150	397.8	0.991	0.443	152	305	133	155	69	263	0.508
175	398.2	1.066	0.500	178	345	165	187	87	290	0.542
200	397.0	1.141	0.570	229	392	208	226	107	320	0.576
225	397.2	1.210	0.639	276	440	241	268	128	349	0.610
250	397.6	1.279	0.707	322	487	283	312	149	374	0.641
275	397.4	1.350	0.789	376	543	331	366	175	402	0.673
300	401.3	1.409	0.847	425	589	374	410	194	425	0.697
325	398.4	1.473	0.925	481	638	424	464	226	438	0.727
350	398.6	1.529	0.988	527	682	478	512	244	450	0.751
375	397.6	1.590	1.064	608	733	536	751	285	460	0.779
400	397.5	1.646	1.130	670	778	583	624	314	465	0.802
425	398.4	1.704	1.211	721	836	643	692	331	468	0.829
450	396.8	1.751	1.275	780	877	698	745	361	461	0.850
475	396.4	1.801	1.353	863	929	758	813	398	449	0.875
500	395.9	1.848	1.414	917	970	818	868	425	433	0.895
525	395.9	1.900	1.488	993	1021	884	937	461	406	0.918
550	394.8	1.950	1.566	1088	1071	966	1002	483	378	0.936
583 (max)	394.2	1.979	1.621	1129	1104	1017	1052	490	344	0.950

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองจ่ายโหลดความต้านทาน 1100 วัตต์ และโหลดความเหนี่ยวนำ 2 เฮนรี่ (H) ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเร็คติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

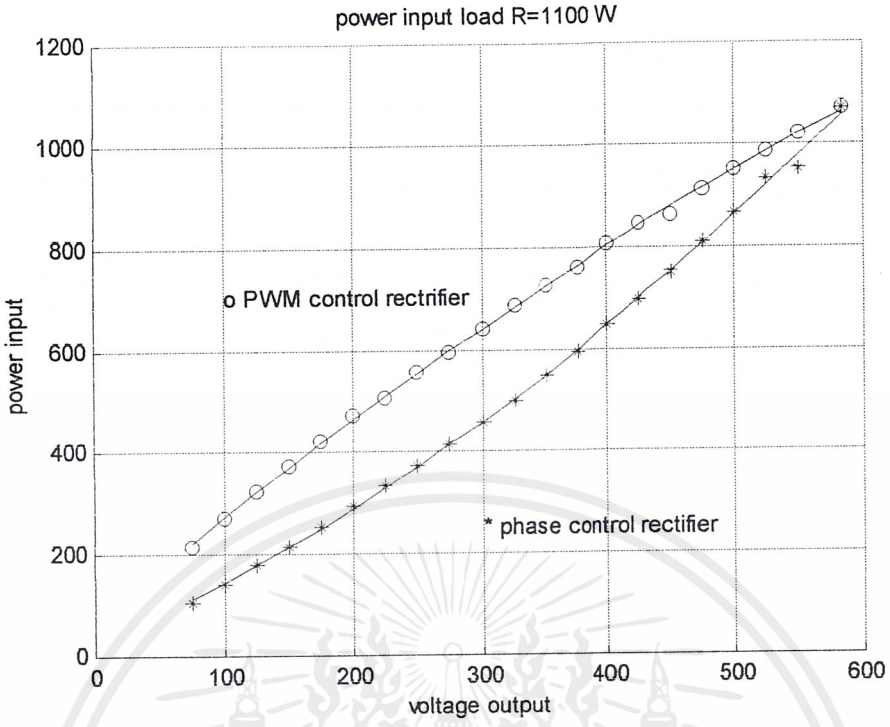


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Factor Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W

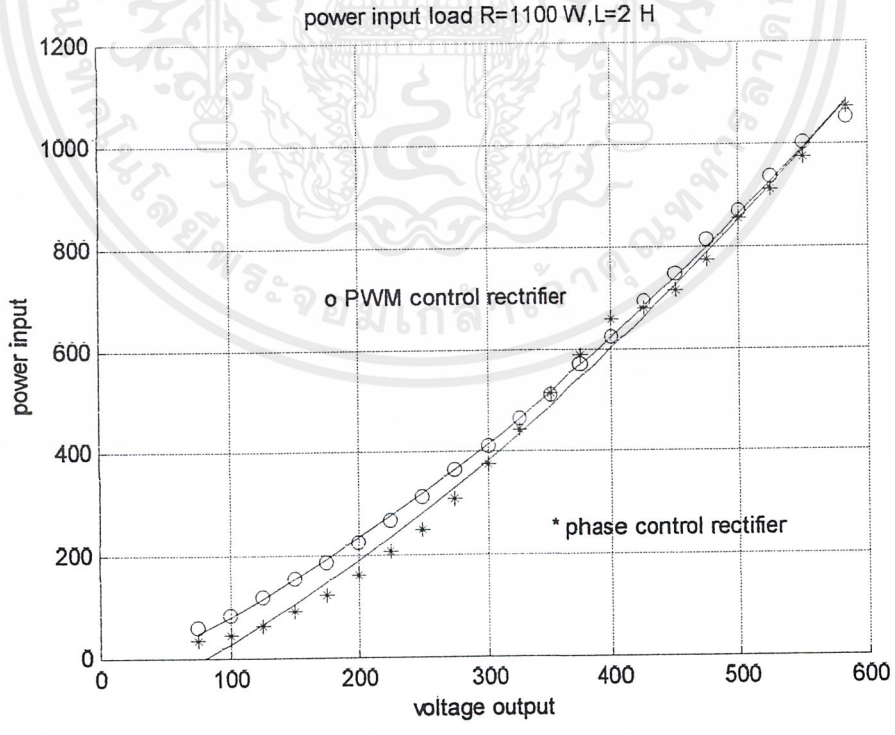


รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Factor Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W , L= 2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

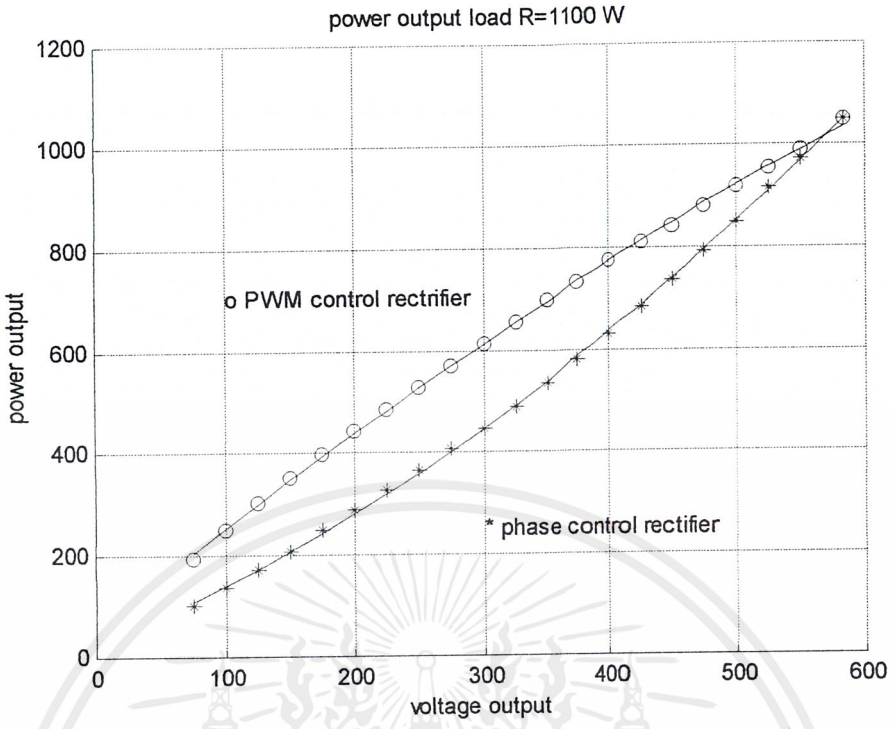


รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W

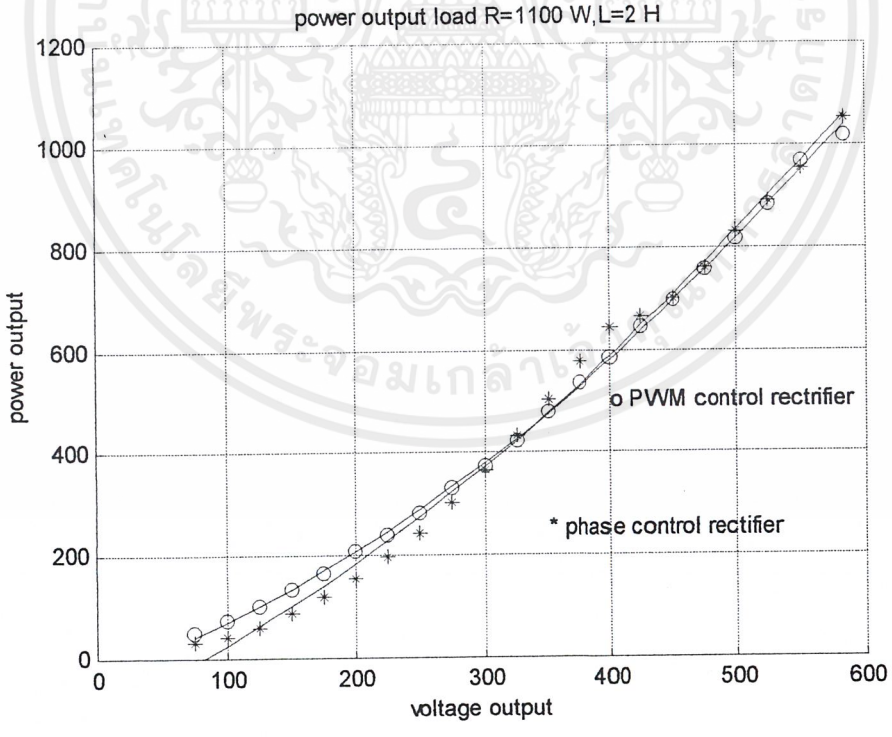


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Input ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W ,L= 2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

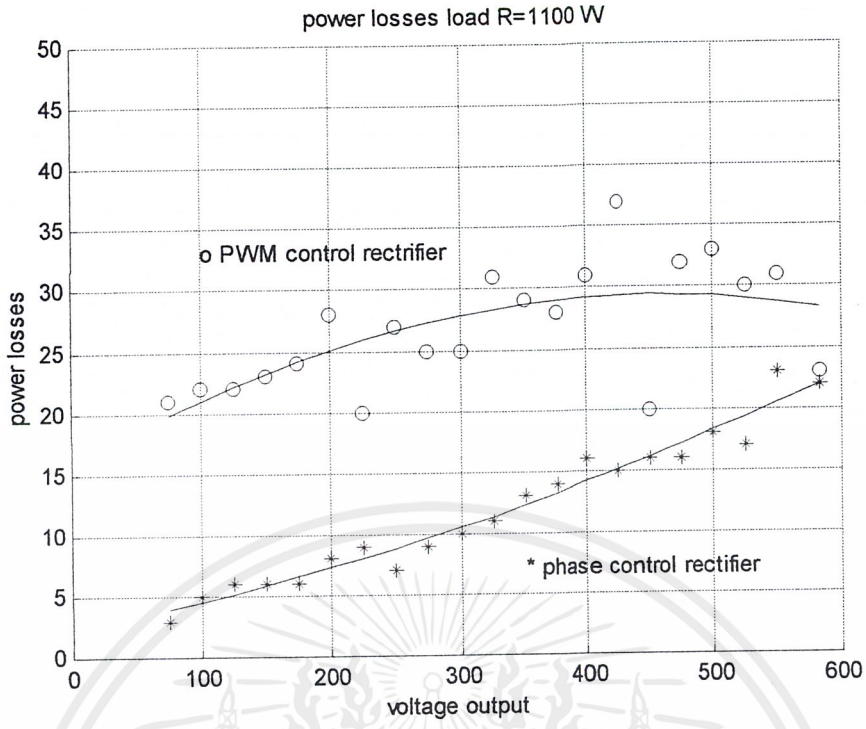


รูปที่ 5.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Output ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W

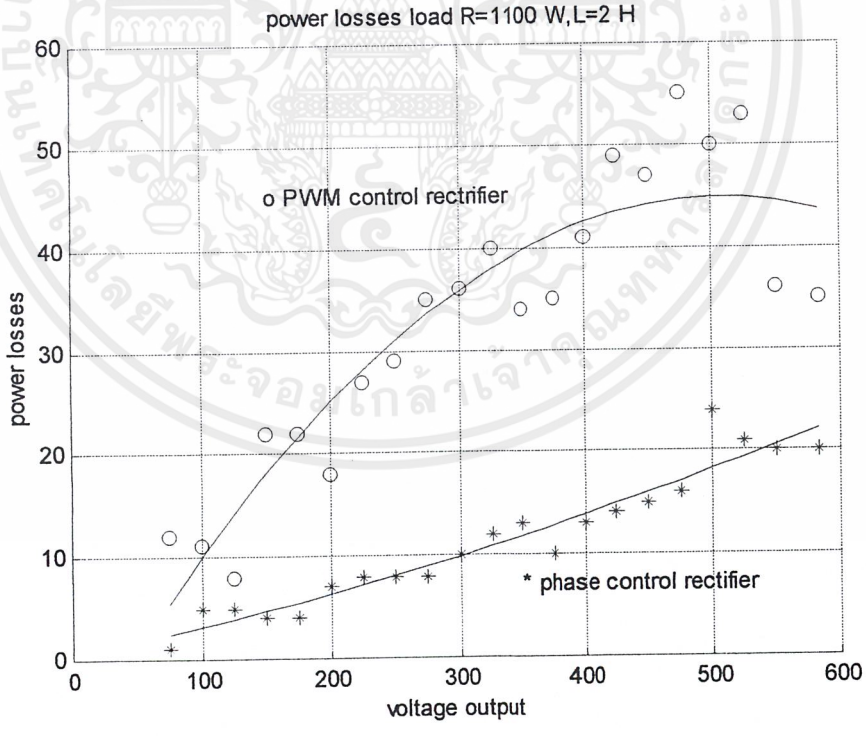


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Output ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R=1100 W , L= 2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Losses ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W

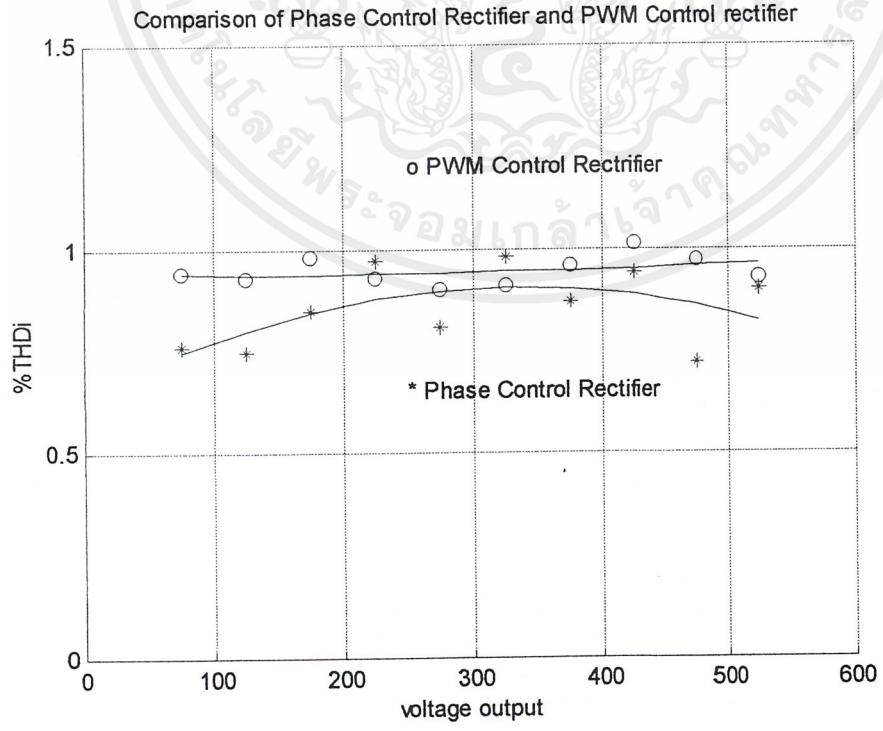


รูปที่ 5.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Power Losses ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier เมื่อ LOAD R= 1100 W , L= 2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5แสดงค่า $\%THD_v$ ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W

แรงดัน Output (V)	$\%THD_v$ วงจร Phase Control Rectifier	$\%THD_v$ วงจร PWM Control Rectifier
0	0.00	0.00
75	0.76	0.94
125	0.75	0.93
175	0.85	0.98
225	0.97	0.93
275	0.81	0.90
325	0.98	0.91
375	0.87	0.96
425	0.94	1.01
475	0.72	0.97
max	0.90	0.93

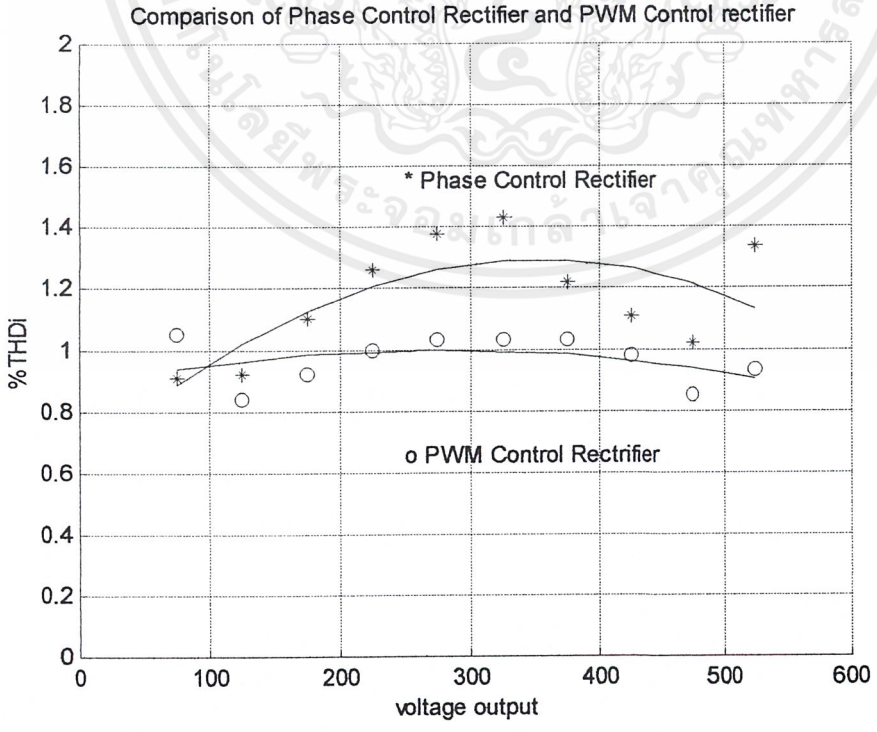


รูปที่ 5.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $\%THD_v$ เมื่อ LOAD R=1100 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่า $\%THD_v$ ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W , L=2 H

แรงดัน Output (V)	$\%THD_v$ วงจร Phase Control Rectifier	$\%THD_v$ วงจร PWM Control Rectifier
0	0.00	0.00
75	0.91	1.05
125	0.92	0.84
175	1.10	0.92
225	1.26	1.00
275	1.38	1.03
325	1.43	1.03
375	1.22	1.03
425	1.11	0.98
475	1.02	0.85
max	1.34	0.93

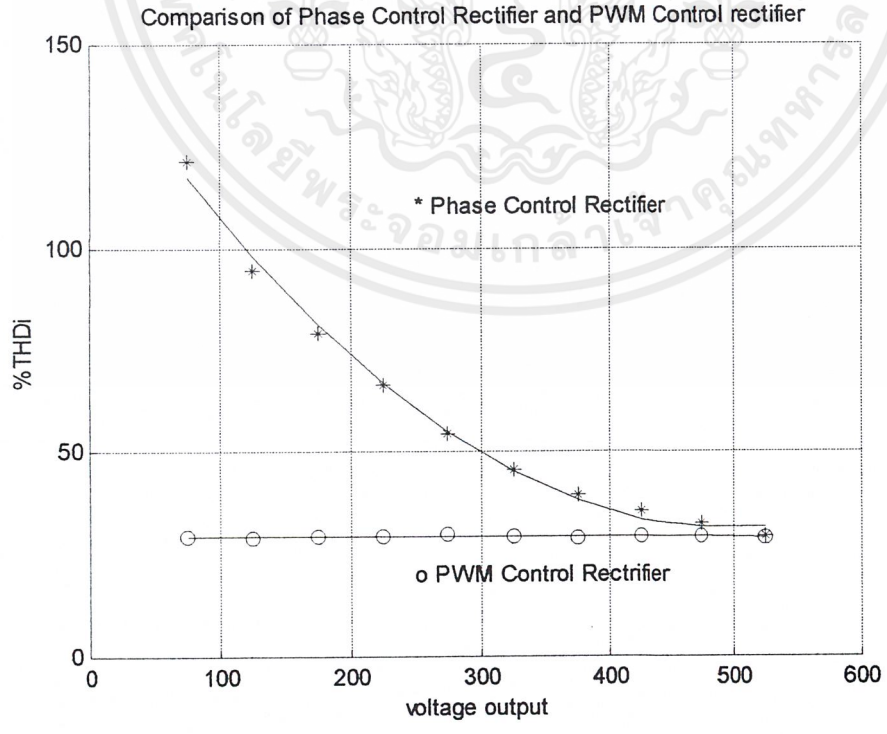


รูปที่ 5.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $\%THD_V$ เมื่อ LOAD R=1100 W , L=2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงค่า % THD_I ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W

แรงดัน Output (V)	% THD_I วงจร Phase Control Rectifier	% THD_I วงจร PWM Control Rectifier
0	0.00	0.00
75	121.47	29.56
125	94.38	29.04
175	79.32	29.41
225	66.43	29.48
275	54.42	29.70
325	45.67	29.37
375	39.75	29.25
425	35.45	29.28
475	32.39	29.32
max	29.36	29.16

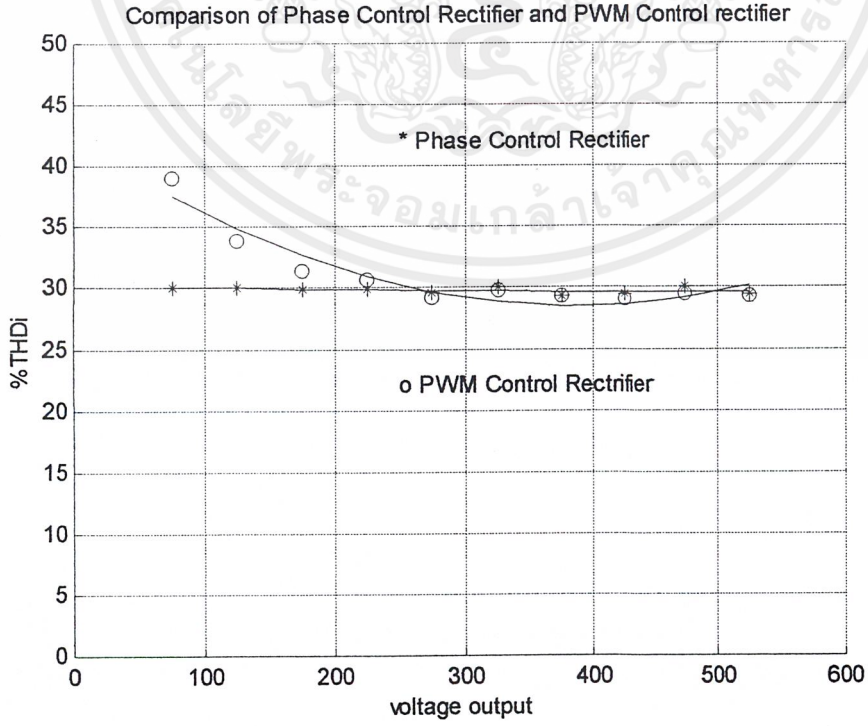


รูปที่ 5.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ % THD_I เมื่อ LOAD R=1100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงค่า $\%THD_I$ ของวงจร Phase Control Rectifier และวงจร PWM Control Rectifier ในขณะที่ LOAD R=1100 W, L=2 H

แรงดัน Output (V)	$\%\ THD_I$ วงจร Phase Control Rectifier	$\%\ THD_I$ วงจร PWM Control Rectifier
0	0.00	0.00
75	30.12	38.99
125	29.99	33.83
175	29.92	31.44
225	29.94	30.68
275	29.65	29.17
325	30.06	29.72
375	29.27	29.29
425	29.53	29.10
475	30.02	29.46
max	29.47	29.26



รูปที่ 5.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $\%THD_I$ เมื่อ LOAD R=1100 W , L=2 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่6
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์และวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยที่การเปรียบเทียบกันนี้จะให้แรงดันเฉลี่ยที่ด้านเอาท์พุตที่ใช้และโหลดมีค่าที่เท่ากัน

จากการทดลองโหลดที่เป็นความต้านทานในที่นี้ใช้หลอดใส้ 100 วัตต์ จำนวน 15 หลอดในการทดลองแล้วทำการวัดค่าที่ได้โดยเครื่องมือวัด ผลที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

จากการทดลองที่ 1 เมื่อโหลดที่ใช้เป็นโหลดความต้านทาน

ด้านแรงดันเอาท์พุต ลักษณะสัญญาณทางด้านเอาท์พุตของวงจรเฟสคอนโทรลจะมีลักษณะที่เป็นรูปคลื่นไซน์ด้านบวกที่ถูกตัด ส่วนวงจรพีดับบลิวเอ็มจะมีลักษณะที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ถูกสับด้วยความถี่ที่สูง เมื่อทำการแตกฮาร์มอนิกส์แล้วสเปคตัมที่ได้ของวงจรเฟสคอนโทรลจะมีค่าที่สูงกว่าของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับ ฟันดาเมนทอล และจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ห่างจากฟันดาเมนทอล ส่วนของพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลนั้นจะมีลักษณะที่เกิดขึ้นบริเวณความถี่ของการสวิทช์และจำนวนเท่าของความถี่สวิทช์มีค่าที่สูง ดังนั้นยิ่งความถี่ของการสวิทช์มีค่ามากเท่าใด ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ห่างจากฟันดาเมนทอลเท่านั้น

ด้านแรงดันอินพุต ลักษณะของสัญญาณอินพุตของวงจรทั้งสองจะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นโดยวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีสัญญาณรบกวนมากกว่า เมื่อทำการแตกสเปคตัมของฮาร์มอนิกส์แล้วพบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันตรงที่วงจรพีดับบลิวเอ็มจะมีค่าฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่สวิทช์และจำนวนเท่าของความถี่สวิทช์ แต่มีค่าที่น้อยมาก

พิจารณากระแสทางด้านอินพุตของวงจรเฟสคอนโทรลจะมีสเปคตัมของฮาร์มอนิกส์ที่มีค่าที่ค่อนข้างที่จะสูงกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลในขณะที่แรงดันเอาท์พุตมีค่าที่ต่ำ ถ้ายิ่งแรงดันเอาท์พุตมีค่ามากขึ้นเท่าใดความแตกต่างกันของค่าสเปคตัมจะมีค่าที่ลดลง สเปคตัมของวงจรเฟสคอนโทรลจะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับฟันดาเมนทอลซึ่งมีค่ามากและจะมีค่าที่ลดลงเมื่ออยู่ห่างจากฟันดาเมนทอล ส่วนของวงจรพีดับบลิวเอ็มนอกจากจะมีสเปคตัมที่ใกล้กับฟันดาเมนทอลแล้วแล้วยังมีค่าสเปคตัมเกิดที่ความถี่ของการสวิทช์และจำนวนเท่าของการสวิทช์ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างสูง

เมื่อโหลดเป็นความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ (RL) พบว่าแรงดันทางด้านเอาท์พุตของวงจรเฟสคอนโทรลจะมีค่าแรงดันในส่วนลบด้วยอันเนื่องมาจากผลของค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโหลด ซึ่งถ้าปรับแรงดันเอาท์พุตสูงขึ้นแรงดันส่วนลบก็จะหายไป ลักษณะของสเปคตัมของฮาร์มอนิกส์จะคล้ายกับโหลดความต้านทานเพียงแต่ค่าของสเปคตัมของวงจรทั้งสองมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นโดยของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าที่ต่ำกว่าแบบเฟสคอนโทรลมาก แรงดันทางด้านอินพุตจะมีลักษณะเดียวกับโหลดความต้านทาน ส่วนกระแสอินพุตนั้นเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำทำให้กระแสมีความต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล จึงทำให้สเปคตัมของกระแสมีค่าลดลงแต่ลักษณะของสเปคตัมคล้ายกับของโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียว

จากการทดลองที่ 2 ทดลองวัดค่าของกำลังงานไฟฟ้าและเพาเวอร์เฟคเตอร์จะได้ว่าเมื่อโหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียวพบว่าค่าของแรงดันทางด้านอินพุตของทั้งสองวงจรจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่ว่าแรงดันเอาท์พุตจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม กระแสอินพุตและเอาท์พุตของวงจรพีดับ บลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าที่ต่ำกว่าวงจรเฟสคอนโทรล ค่าของวีเอ (VA) กำลังงานไฟฟ้าและค่าของเพาเวอร์เฟคเตอร์ ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าสูงกว่าของวงจรเฟสคอนโทรล ค่าของกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าสูงกว่าของวงจรเฟสคอนโทรล

ที่โหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียวค่าของค่า $\%THD_V$ ของวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์จะมีค่าต่ำกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์เนื่องจากผลของความถี่ในการสวิตซ์ชิ่งของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์ เข้าไปกวนสัญญาณอินพุตส่วนค่า $\%THD_I$ ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์จะมีค่าต่ำกว่าวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์เนื่องจากโหลดที่เป็นความต้านทานกระแสจะมีเฟสตามแรงดันเมื่อวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์ทำงานโดยการปรับมุมนำกระแสของโหลดทำให้รูปคลื่นสัญญาณของกระแสถูกตัดออกไปบางส่วนตามแรงดันแต่วงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์นั้นรูปคลื่นสัญญาณกระแสจะถูกซอยออกยังคงแต่อยู่ในรูปใกล้เคียงกับสัญญาณอิพุตมากกว่า

เมื่อโหลดเป็นความต้านทานและความเหนี่ยวนำพบว่าค่าของแรงดันทางด้านอินพุตของทั้งสองวงจรจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่ว่าแรงดันเอาท์พุตจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม กระแสอินพุตของวงจรเฟสคอนโทรลจะมีค่าสูงกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล กระแสเอาท์พุตของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าที่สูงกว่าวงจรเฟสคอนโทรล ค่ากำลังงานไฟฟ้าของวงจรเฟสคอนโทลจะมีค่าน้อยกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล และค่าของเพาเวอร์เฟคเตอร์ ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าสูงกว่าของวงจรเฟสคอนโทรล ค่าของกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลจะมีค่าสูงกว่าของวงจรเฟสคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่โหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำพบว่าค่าของค่า %THD_V ของวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์จะมีค่าสูงกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์พุตส่วนค่า %THD_I ของวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเรคติไฟเออร์จะมีค่าต่ำกว่าวงจรเฟสคอนโทรลเรคติไฟเออร์

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าวงจร 3 เฟสคอนโทรลเร็คติไฟเออร์เมื่อนำไปจ่ายโหลดความต้านทานแล้วค่าของ %THDv จะมีค่าที่ดีกว่าวงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรล ค่าของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีน้อย แต่จะมีข้อเสียในเรื่องของกระแส ค่าของ %THDi จะมีค่าที่ค่อนข้างสูงเพราะกระแสมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เกิดกระแสของฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบ เป็นผลทำให้ค่าของเพาเวอร์เฟคเตอร์มีค่าที่ต่ำลง ถ้านำไปจ่ายโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำแล้วพบว่าค่าของ %THDv จะมีค่าที่สูงกว่าการจ่ายโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียวและค่าของ %THDv นี้จะไม่คงที่ แต่ค่าของ %THDi ลดลงมากเนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำทำให้กระแสมีความต่อเนื่องมากขึ้นมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยลง ค่าของกระแสฮาร์มอนิกส์น้อยลง แต่ค่าของเพาเวอร์เฟคเตอร์ลดลงเพราะค่าของความเหนี่ยวนำทำให้เกิดค่า Q ขึ้นในระบบ

วงจรพีดับบลิวเอ็มคอนโทรลเมื่อนำไปจ่ายโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียวแล้วจะทำให้ค่าของ %THDv มีค่าที่สูงกว่าวงจรเฟสคอนโทรล อีกทั้งยังเกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิทช์ที่ความถี่สูง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรจะมีค่าที่สูง แต่ก็มีข้อดีที่ค่าของ %THDi มีค่าที่ต่ำ แต่เป็นค่าที่คงที่ ค่าเพาเวอร์เฟคเตอร์ก็มีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับวงจรเฟสคอนโทรล เมื่อนำไปจ่ายโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำแล้วพบว่าค่าของ %THDv จะมีค่าที่สูงกว่าการจ่ายโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียวเล็กน้อยและค่าของ %THDv นี้จะคงที่ ส่วนค่าของ %THDi จะมีค่าไม่คงที่ จะลดลงเมื่อแรงดันเอาท์พุตเพิ่มขึ้น แต่ค่าจะไม่แตกต่างจากการจ่ายโหลดความต้านทานมากนัก ค่าของการสูญเสียเนื่องจากสวิทช์ที่ความถี่สูงยังคงมีสูงอยู่ ค่าของเพาเวอร์เฟคเตอร์จะสูงกว่าการจ่ายโหลดความต้านทานเพียงอย่างเดียวเล็กน้อย

การเลือกนำวงจรทั้งสองไปใช้งานต้องดูความเหมาะสมว่าต้องการกระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านอินพุตต่ำ หรือกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ต่ำนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆอีก เช่น พิกัดของอุปกรณ์ การติดตั้ง ราคา ความคงทน ความปลอดภัย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่พบและการแก้ไข

ในส่วนของวงจรควบคุมชุด Phase Control Rectifier ถ้าหากสัญญาณที่ใช้ทริกให้ไทริสเตอร์ทำงานนั้นมีค่าไม่เหมาะสมกับ Load จะทำให้ไทริสเตอร์ทำงานได้ในช่วงแคบๆ ดังนั้นจึงควรศึกษา Load ที่จะใช้ก่อนทำการกำหนดความกว้างของสัญญาณทริก

ในส่วนของวงจรควบคุมชุด PWM Control Rectifier ปัญหาจะพบในส่วนของการสร้างสัญญาณ PWM เนื่องจากสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น จะถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอก ทำให้วงจรในส่วนของ Comparator ทำงานผิดพลาด วิธีการแก้ไข โดยการต่อคาปาซิเตอร์เข้าที่แหล่งจ่ายให้ใกล้วงจรทำงานมากที่สุด และต่อคร่อมแหล่งจ่ายที่ขาไอซีทุกตัว โดยเฉพาะ ออปแอมป์ และส่วนของการนำสัญญาณมาทำการ AND กันนั้นควรใช้ IC ประเภท CMOS เนื่องจากมีความไวสูงและทนแรงดันได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องของพวกกระผมทุกคน ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของทุนการศึกษา รวมทั้งกองทุนกู้ยืมของรัฐบาล ที่สร้างโอกาสให้พวกกระผมมาศึกษาต่อ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนได้ทำโครงงานนี้ ต้องขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ร่วมห้องโครงงานทุกคน ที่ให้คำแนะนำ ให้ยืมเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาของพวกกระผม คือ อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงงานและแนะนำให้แง่คิดต่างๆ ตลอดมา

นาย กฤษดา กันทาสืบ
นาย ชัยรัตน์ กันทา
นาย เพ็ญชาติ ประไพทอง
นาย วันชัย แป้นทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Masauki Morimoto,Katsumi Oshitani,Kiyotaka Sumito,Shiji Sato,Muneaki Ishida and Shigeru Okuma, "New Single Phase Unity Power PWM Converter Inverter System" IEEE Power Electronic Specialist conf(Pesc) Rec,1989, pp.585-589.
2. Ned Mohan,Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronics converter application and design", Jonh Wiley and Son,Inc,1995.
3. นภัทร วัจนเทพินทร์, ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลซ์มบริษัทสกายบุกส์ จำกัด,2538.
4. การเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีอินทิกัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล,วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้