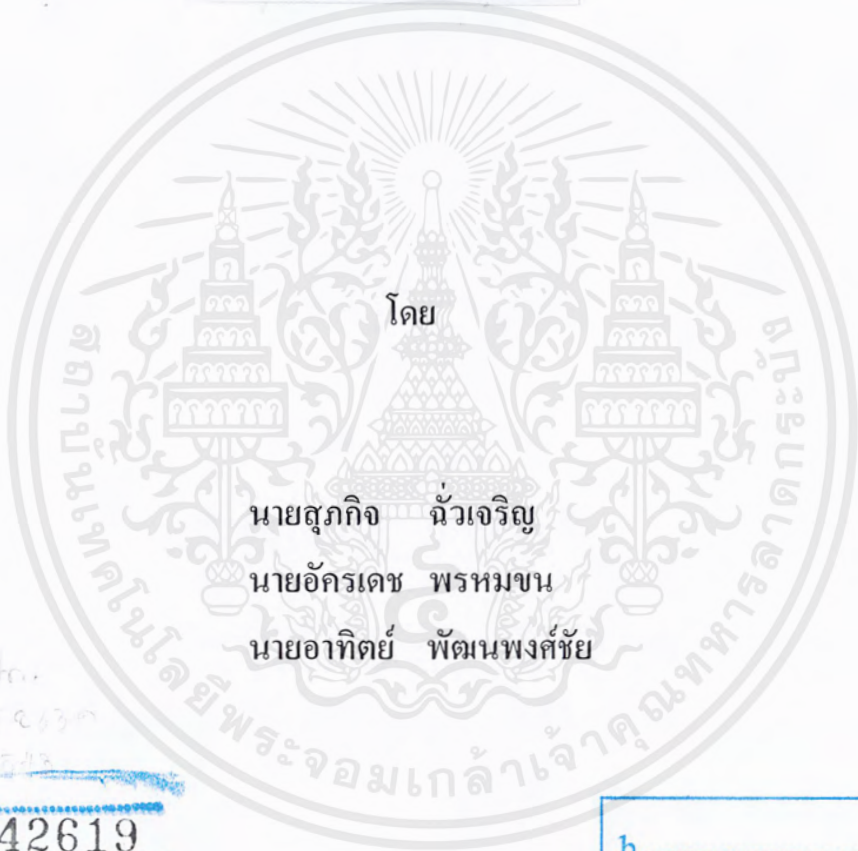


การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ
HARMONIC PASSIVE FILTER STUDY AND DESIGN



โดย
นายสุภกิจ นัวเจริญ
นายอักรเดช พรหมขน
นายอาทิตย์ พัฒนพงศ์ชัย

รศ.
จ. ๔๕๖๓
๒๕๕๓

เลขหนังสือ.....
เลขทะเบียน..... 42619
วัน, เดือน, ปี..... 4 ส.ย. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2543

การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ
HARMONIC PASSIVE FILTER STUDY AND DESIGN



โดย
นายสุภกิจ นัวเจริญ
นายอัครเดช พรหมขน
นายอาทิตย์ พัฒนพงศ์ชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศุภี บรรจงจิตร
อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว
อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

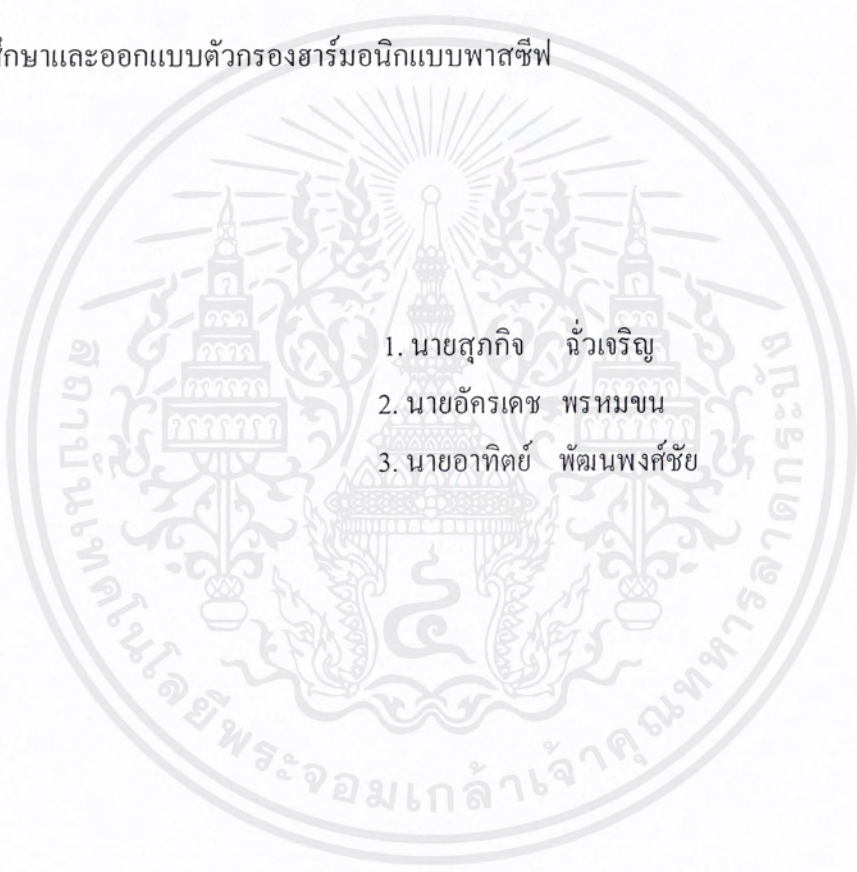
ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ

ผู้จัดทำ

- 
1. นายสุภกิจ น้วเจริญ
 2. นายอัครเดช พรหมจน
 3. นายอาทิตย์ พัฒนพงศ์ชัย

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศุติ บรรจงจิตร)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HARMONIC PASSIVE FILTER STUDY AND DESIGN

Supakij Chuacharoen

Akkradet Promkhon

Artite Pattanapongchai

Assoc.Prof Sulee Banjongjit Advisor

Chai Chompoo-inwai Advisor

Chow Chompoo-inwai Advisor

2000

ABSTRACT

This project is study and design of harmonic passive filter. The main part of this project based on 2 parts. The first part justify to examine of harmonic passive filter design that can refer to IEEE journal used Pspice program. The second part duplicate harmonic source by using 6-pulse converter and analysis spectrum harmonic current and harmonic voltage. This analysis use MATLAB program and take the result to compare with result from Pspice program.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ.....	3
1.5 เนื้อหาของปริิญาานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ.....	4
2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก.....	6
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	6
2.3.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	8
2.3.2 ความไม่สมดุลย์ของเฟส.....	11
2.3.3 กระแสเอ็กไซต์และเฟอโรเรโซแนนซ์.....	11
2.4 เรโซแนนซ์.....	12
2.5 ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก.....	15
2.5.1 สกินเอฟเฟค.....	16
2.5.2 มอเตอร์.....	17
2.5.3 หม้อแปลง.....	18
2.5.4 สวิตช์เกียร์.....	18
2.5.5 คาปาซิเตอร์.....	19
2.5.6 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิก.....	20
2.7 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก.....	20
2.7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์.....	21
2.7.2 การใส่ LC ฟิลเตอร์.....	22
2.7.3 การเพิ่มรีแอกเตอร์.....	23
บทที่ 3 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	25
3.1 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	25
3.1.1 ไทริสเตอร์.....	25
3.1.2 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์.....	26
3.1.3 การนำกระแสของไทริสเตอร์.....	28
3.1.4 การป้องกัน di/dt	30
3.1.5 การป้องกัน dv/dt	31
3.1.6 การหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์.....	32
3.2 วงจรจุดชนวนเกตของไทริสเตอร์.....	34
3.2.1 คุณสมบัติของวงจรรวม TCA 785.....	34
3.2.2 การทำงานของวงจรรวม TCA 785.....	34
3.2.3 ลักษณะของพัลส์ด้านออกชนิดต่างๆ.....	37
3.3 วงจรจุดชนวนเกตที่ใช้.....	39
3.3.1 วงจรรวม TCA 785.....	39
3.3.2 วงจรแยกกราวด์และขยายกระแส.....	40
3.4 การทำงานของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	41
3.5 ลักษณะการใช้งานของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	44
3.5.1 เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	44
3.5.2 เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ.....	46
บทที่ 4 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	50
4.1 ปัญหาฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า.....	50
4.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า.....	50
4.2.1 กำจำกัดความเบื้องต้นของตัวกรอง (Filter).....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2	ปัจจัยที่มีผลกระทบในการปรับตัวกรอง.....	53
4.2.3	ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว.....	53
4.2.4	ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก.....	53
4.3	แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ.....	57
4.3.1	การใช้งานโปรแกรม PSpice.....	58
4.3.2	การทดสอบการออกแบบโดยโปรแกรม PSpice.....	61
4.3.3	การออกแบบ และคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรตัวกรอง.....	63
4.3.3.1	การจำลองระบบที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	63
4.3.3.2	ขั้นตอนการคำนวณค่าของไลเนอร์แอกเตอร์.....	63
4.3.3.3	ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบ ของวงจรกรองฮาร์มอนิก.....	64
4.3.3.4	การคำนวณหาค่าไลเนอร์แอกเตอร์.....	67
4.3.3.5	การคำนวณหาค่าตัวกรอง.....	69
4.3.4	การทดสอบตัวกรองฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม PSpice	73
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง.....	83
5.1	ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	83
5.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	83
5.1.2	ขั้นตอนในการทดลอง.....	84
5.1.3	วิธีการทดลอง.....	85
5.1.4	ผลการทดลอง.....	87
5.2	หลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	109
5.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	109
5.2.2	ขั้นตอนในการทดลอง.....	109
5.2.3	วิธีการทดลอง.....	110
5.2.4	ผลการทดลอง.....	111
บทที่ 6	บทสรุป.....	198
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	198
6.2	วิจารณ์ผลการทดลอง.....	199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	199
6.4 แนวทางในการดำเนินงานต่อไป.....	200

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	แผนภาพแสดงขอบเขตในการทำโครงงาน.....	2
รูปที่ 2.1	วงจรและสัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์.....	10
รูปที่ 2.2	วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.3	วงจรเรโซแนนซ์.....	14
รูปที่ 2.4	ฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก.....	22
รูปที่ 3.1	วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	25
รูปที่ 3.2	แสดงสัญลักษณ์และรอยต่อพี – เอ็นทั้งสาม.....	26
รูปที่ 3.3	แสดงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของไทรสเตอร์.....	28
รูปที่ 3.4	แสดงคุณลักษณะของเวลาในการนำกระแสของไทรสเตอร์ (Turn – on characteristic)	29
รูปที่ 3.5	วงจรสับไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำจำกัดค่า di/dt	30
รูปที่ 3.6	วงจรป้องกัน dv/dt ด้วยสแน็บเบอร์.....	32
รูปที่ 3.7	แสดงถึงกระบวนการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์.....	33
รูปที่ 3.8	แสดงโครงสร้างภายในของวงจรรวมเบอร์ TCA 785.....	35
รูปที่ 3.9	แสดงรูปคลื่นสัญญาณด้านเข้า และด้านออกที่สำคัญ ของวงจรรวมเบอร์ TCA 785.....	36
รูปที่ 3.10	ลักษณะของพัลส์จุดชนวนเกิดของไทรสเตอร์แบบต่างๆ.....	38
รูปที่ 3.11	แผนภาพแสดงวงจรจุดชนวนเกิดให้กับ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์.....	39
รูปที่ 3.12	วงจรรวม TCA 785.....	39
รูปที่ 3.13	วงจรแยกกราวด์และขยายกระแส.....	40
รูปที่ 3.14	(a) วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ (b) รูปคลื่นแรงดันและลำดับสัญญาณจุดชนวนเกิด ของไทรสเตอร์ทั้ง 6 ตัว.....	41
รูปที่ 3.15	การปรับมุมจุดชนวนเกิดที่มุมต่างๆ โดยดูจากสัญญาณพัลส์แรก ของไทรสเตอร์ตัวที่ 1 เทียบกับแรงดันเฟสของเฟส A.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 (a) วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน	
(b) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด.....	44
รูปที่ 3.17 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือ	
ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ.....	46
รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ	
และจุดชนวนเกตที่มุม $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$	47
รูปที่ 3.18 (ต่อ) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อ	
โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ และจุดชนวนเกตที่มุม $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$	48
รูปที่ 4.1 การไหลกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ.....	50
รูปที่ 4.2 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก	
ในระบบไฟฟ้า.....	51
รูปที่ 4.3 (a) วงจรฟิลเตอร์ ชิงเกิลจูน (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่.....	52
รูปที่ 4.4 (a) รูปตัวกรองผ่านความถี่สูง (b) กราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่.....	53
รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดเดี่ยว.....	54
รูปที่ 4.6 Flow Chart แสดงแนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	57
รูปที่ 4.7 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	61
รูปที่ 4.8 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	62
รูปที่ 4.9 วงจรซิงเกิลไลน์โคเอแกรมของการจำลองระบบที่กำจัดฮาร์มอนิก	
โดยการต่อฟิลเตอร์และไลน์รีแอกเตอร์.....	63
รูปที่ 4.10 รูปของไลน์รีแอกเตอร์ที่ใช้งานจริง.....	68
รูปที่ 4.11 รูปตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และฮาร์มอนิกที่ 7.....	73
รูปที่ 4.12 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	74
รูปที่ 4.13 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	75
รูปที่ 4.14 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	76
รูปที่ 4.15 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	77
รูปที่ 4.16 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ขณะใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	78
รูปที่ 4.17 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	79

รูปที่ 4.18 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ขณะใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7	80
รูปที่ 4.19 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	81
รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการทดลอง.....	84
รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนต่างๆในการทดลองก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	86
รูปที่ 5.3 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 0°	88
รูปที่ 5.4 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 0°	89
รูปที่ 5.5 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 30°	91
รูปที่ 5.6 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 30°	92
รูปที่ 5.7 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 60°	94
รูปที่ 5.8 กราฟกระแสและสเปกตรัมแรงดันขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 60°	95
รูปที่ 5.9 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 0°	97
รูปที่ 5.10 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 0°	98
รูปที่ 5.11 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมทริก 0°	100
รูปที่ 5.12 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมทริก 0°	101
รูปที่ 5.13 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 30°	103
รูปที่ 5.14 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 30°	104
รูปที่ 5.15 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมทริก 30°	106
รูปที่ 5.16 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมทริก 30°	107
รูปที่ 5.17 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการทดลอง.....	109
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงกระแส.....	112
รูปที่ 5.19 กราฟสเปกตรัมกระแส.....	113
รูปที่ 5.20 กราฟแรงดัน.....	114
รูปที่ 5.21 กราฟสเปกตรัมแรงดัน.....	115
รูปที่ 5.22 กราฟกระแสขณะ : ใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	116
รูปที่ 5.23 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	117
รูปที่ 5.24 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	118

รูปที่ 5.25	กราฟแสดงสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5	119
รูปที่ 5.26	กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	120
รูปที่ 5.27	กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	121
รูปที่ 5.28	กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5	122
รูปที่ 5.29	กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5.....	123
รูปที่ 5.30	กราฟแสดงกระแสที่ : โหลด 50%.....	126
รูปที่ 5.31	กราฟสเปกตรัมกระแสที่ : โหลด 50%	127
รูปที่ 5.32	กราฟแรงดันที่ : โหลด 50%.....	128
รูปที่ 5.33	กราฟสเปกตรัมแรงดันที่ : โหลด 50%	129
รูปที่ 5.34	กราฟแสดงกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	130
รูปที่ 5.35	กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%	131
รูปที่ 5.36	กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	132
รูปที่ 5.37	กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%	133
รูปที่ 5.38	กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	134
รูปที่ 5.39	กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	135
รูปที่ 5.40	กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	136
รูปที่ 5.41	กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50%.....	137
รูปที่ 5.42	กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	140
รูปที่ 5.43	กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7	141
รูปที่ 5.44	กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	142
รูปที่ 5.45	กราฟแสดงสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7	143
รูปที่ 5.46	กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	144
รูปที่ 5.47	กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7	145
รูปที่ 5.48	กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7	146
รูปที่ 5.49	กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7.....	147
รูปที่ 5.50	กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.51 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	151
รูปที่ 5.52 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	152
รูปที่ 5.53 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	153
รูปที่ 5.54 กราฟกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	154
รูปที่ 5.55 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	155
รูปที่ 5.56 กราฟแรงดันขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	156
รูปที่ 5.57 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	157
รูปที่ 5.58 กราฟแสดงกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	161
รูปที่ 5.59 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	162
รูปที่ 5.60 กราฟแสดงแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	163
รูปที่ 5.61 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	164
รูปที่ 5.62 กราฟแสดงกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	165
รูปที่ 5.63 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	166
รูปที่ 5.64 กราฟแสดงแรงดันขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	167
รูปที่ 5.65 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50%.....	168
รูปที่ 5.66 กราฟแสดงกระแส : โหลด 50%.....	179
รูปที่ 5.67 กราฟสเปกตรัมกระแส : โหลด 50%.....	170
รูปที่ 5.68 กราฟแสดงแรงดัน : โหลด 50%.....	171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.69 กราฟสเปกตรัมแรงดัน : โหลด 50%.....	172
รูปที่ 5.70 กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ที่มุมทริก 30.....	175
รูปที่ 5.71 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ที่มุมทริก 30.....	176
รูปที่ 5.72 กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ที่มุมทริก 30.....	177
รูปที่ 5.73 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ที่มุมทริก 30.....	178
รูปที่ 5.74 กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	181
รูปที่ 5.75 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	182
รูปที่ 5.76 กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	183
รูปที่ 5.77 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	184
รูปที่ 5.78 กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ที่มุมทริก 30.....	187
รูปที่ 5.79 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ที่มุมทริก 30.....	188
รูปที่ 5.80 กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ที่มุมทริก 30.....	189
รูปที่ 5.81 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ที่มุมทริก 30.....	190
รูปที่ 5.82 กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	193
รูปที่ 5.83 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	194
รูปที่ 5.84 กราฟแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....	195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.85 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โลนรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7
: โหลด 50% : ที่มุมทริก 30.....196



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบของกระแสลับที่จ่ายให้กับโหลด ที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ.....	9
ตารางที่ 2.2	ผลของสกินเอฟเฟกต์ที่มีต่อความต้านทานสายในรูป ของแฟคเตอร์คูณที่ความถี่ต่างๆกัน เมื่อเทียบกับความ ต้านทานของสายเมื่อความหนาแน่นกระแสที่.....	16
ตารางที่ 2.3	ผลของสกินเอฟเฟกต์ที่มีผลต่อความต้านทานสาย ในรูปของแฟคเตอร์คูณที่ขนาดสายต่างๆกัน เมื่อเทียบ กับความต้านทานของสายเมื่อความหนาแน่นกระแสที่.....	16
ตารางที่ 2.4	ผลของความไม่สมดุลย์ของศักดาไฟฟ้าเมื่อโหลดมอเตอร์เต็มที.....	17
ตารางที่ 3.1	แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของพัลส์ด้านออกกับค่า C_{12}	37
ตารางที่ 5.1	ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 0°	87
ตารางที่ 5.2	ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 30°	90
ตารางที่ 5.3	ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 60°	93
ตารางที่ 5.4	ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 0°	96
ตารางที่ 5.5	ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 0°	99
ตารางที่ 5.6	ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 30°	102
ตารางที่ 5.7	ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 30°	105
ตารางที่ 5.8	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5 th filter) และ Line Reactor.....	111
ตารางที่ 5.8.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด Rated Load.....	124
ตารางที่ 5.9	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5 th filter) และ Line Reactor.....	125
ตารางที่ 5.9.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7.....	138
ตารางที่ 5.10	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7 th filter) และ Line Reactor : ที่ 50%พิกัด Rated Load.....	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด Rated Load.....	148
ตารางที่ 5.11	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7 th filter) และ Line Reactor.....	149
ตารางที่ 5.11.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตัวกรอง 5 และ 7 : ที่ 50%พิกัด Rated Load.....	158
ตารางที่ 5.12	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5 th filter) + ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7(7 th filter) และ ไลน์รีแอคเตอร์ (Line Reactor).....	159
ตารางที่ 5.12.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50%พิกัด Rated Load.....	173
ตารางที่ 5.13	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5 th filter) และ Line Reactor ที่มุมทริก SCR 30°.....	174
ตารางที่ 5.13.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°	179
ตารางที่ 5.14	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5 th filter) และ Line Reactor ที่โหลด 50 % ที่มุมทริก SCR 30°	180
ตารางที่ 5.14.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50%พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°	185
ตารางที่ 5.15	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7 th filter) และ Line Reactor ที่มุมทริก SCR 30°	186
ตารางที่ 5.15.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°	191
ตารางที่ 5.16	เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7 th filter) และ Line Reactor ที่โหลด 50 % ที่มุมทริก SCR 30°	192
ตารางที่ 5.16.1	แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50%พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°	197

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก การนำเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ในสำนักงาน การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กำลังไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีความเป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดัน เพราะความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของกระแสและแรงดันไม่คงที่ โหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลันเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกหรือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้า และความไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเกิดการผิดเพี้ยนไป ดังนั้นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกให้แก่ระบบ

อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกก็ได้รับการพัฒนาปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและกำเนิดฮาร์มอนิกที่จะเกิดผลเสียต่อระบบน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกก็ยังมีอยู่และในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอุปสรรคดังกล่าวนี้ก็มีความแตกต่างกันไปจึงไม่มีวิธีการแก้ไขปัญหาแบบสูตรสำเร็จที่สามารถใช้ได้ทุกระบบ แต่ละระบบที่มีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกก็ต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการแตกต่างกันออกไป

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นไม่ได้มีปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกเสมอไปทุกระบบ ดังนั้นการพิจารณาว่าควรมีการศึกษาถึงปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกหรือไม่นั้นอาจพิจารณาคร่าวๆ ดังนี้

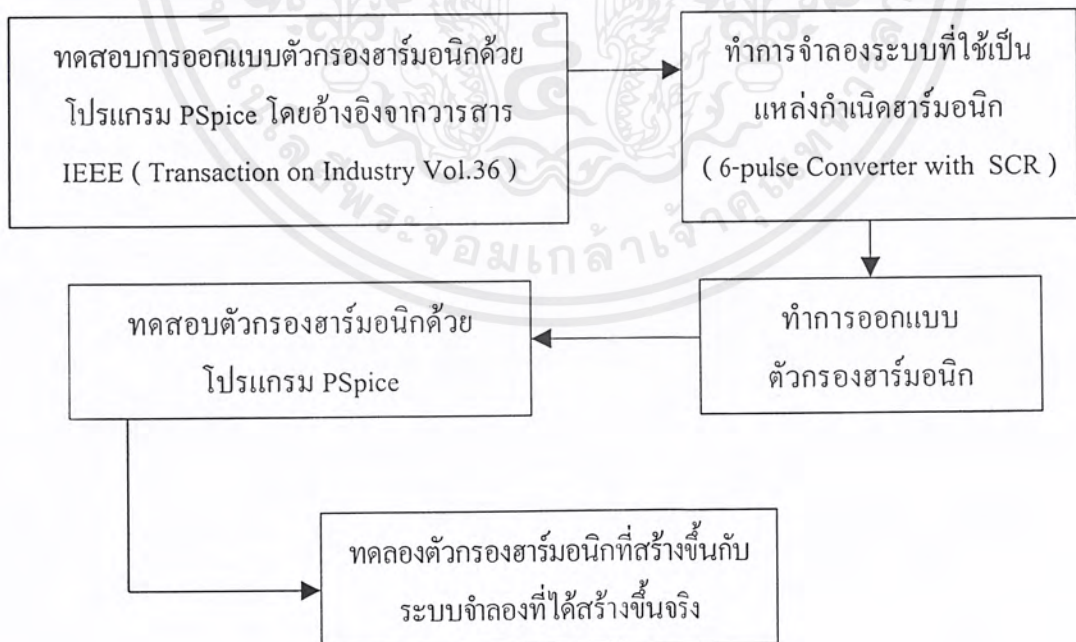
- ก) ต้องการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่มีขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 20% ของกำลังของระบบ
- ข) พิวส์ของคาปาซิเตอร์ขาดบ่อยหรือปัญหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก
- ค) ในชั้นออกแบระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์และอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิก
- ง) ระบบที่ต้องการจำกัดฮาร์มอนิกให้มีขนาดต่ำมาก
- จ) การขยายระบบซึ่งต้องการเพิ่มอุปกรณ์ที่สามารถกำเนิดฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบเดิมที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. เพื่อศึกษาถึงฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาถึงผลของฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดจำลองแบบ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์
3. เพื่อศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ ให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตในการทำโครงการ

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาถึงฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ โดยในการศึกษานั้นจะทำการจำลองระบบไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นมาซึ่งก็คือ วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์โดยอ้างอิงมาจากวารสาร IEEE และทำการวิเคราะห์ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่จำลองขึ้นมา นั้น สร้างฮาร์มอนิกใดที่เป็นปัญหาต่อระบบไฟฟ้าบ้าง หลังจากนั้นจะทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ตรวจสอบการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม PSpice หลังจากนั้นจะทำการสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกแล้วใส่ตัวกรองเข้าไปในระบบเพื่อดูว่าสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยขอบเขตในการทำโครงการสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขอบเขตของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ

จากการทำโครงการทำให้สามารถออกแบบและสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟได้ และสามารถพัฒนาให้ใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้าต่อไป

1.5 เนื้อหาของปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปเกี่ยวกับฮาร์มอนิก เช่น คำอธิบายศัพท์และปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิก ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า ตลอดจนถึงวิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโครงการนี้

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ และวิธีการออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวกรองที่ใช้ รวมไปถึงรายละเอียดการใช้งานและการทดสอบความถูกต้องของตัวกรองที่ได้ออกแบบไว้ผ่านทางโปรแกรม Pspice ทั้งหมดในโครงการนี้

บทที่ 5 เป็นวิธีการทดลองและผลการทดลองต่างๆ ในโครงการนี้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก และหลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าไปแล้ว

บทที่ 6 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้ทั้งก่อนการใส่ตัวกรองและหลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

ภาคผนวก ประกอบด้วยภาพของวงจรที่ใช้ในการทดลอง วงจรวัดสัญญาณกระแส ค่าที่หามาของอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง วารสาร IEEE ที่ใช้อ้างอิง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ในเรื่องของศัพท์และปริมาณต่างๆ ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เรโซแนนซ์ ผลกระทบของฮาร์มอนิก และวิธีแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

2.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1) ฮาร์มอนิก (Harmonic)

วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์มอนิก คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 เฮิร์ตซ์ ฮาร์มอนิก คือ 100 , 200 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วิธีวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ กัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมและความเพี้ยนของฮาร์มอนิกแต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

2) กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ขยายตัวอย่างมาก เป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นอย่างมากมาย

3) แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ

(รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่าย ของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.1)$$

เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์มอนิก
 I_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ
 Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

4.) ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor : DF)

ตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor : HF)

ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion: THD)

ความหมายทั้งสามตัวนั้นตามมาตรฐาน IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูลคั้งสมการ 2.2 และ 2.3 ซึ่งเป็นมาตรฐาน IEEE 519-1992

$$DVF = HFV = THDV = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} V_n^2}}{V_1} \times 100 \% \quad (2.2)$$

$$DFI = HFI = THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} I_n^2}}{I} \times 100 \% \quad (2.3)$$

5) ลำดับฮาร์มอนิก (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์มอนิก คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์มอนิก และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 3 เป็น 150 Hz

6) ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W, kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA , kVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า อาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ฮาร์มอนิก (Harmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล

2) อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์มอนิกนี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้กระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิด Interharmonic ขึ้นนอกจากนี้ก็จะพบ Interharmonic ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle หรือ Burst firing

3) ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าหรือคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ซึ่งแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไคโอด , SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส ในสภาวะการทำงานปกติ ลำดับของฮาร์มอนิกคุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1 \quad (2.4)$$

เมื่อ

n = ลำดับฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3...)

p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของคอนเวอร์เตอร์

6) ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่น คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37,... ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

7) ฮาร์มอนิกลำดับที่สามหารลงตัว

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,6,9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้เช่นสายนิวทรัลร้อนจนฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายอย่าง ทั้งจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท static power converter ที่เริ่มนำมาใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมและเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่างๆที่มีใช้กันมานานแล้ว กล่าวคือได้รวบรวมสรุปแหล่งที่มาทั้งหมดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นมาในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งกล่าวถึงรายละเอียดของการเกิดและขนาดของฮาร์มอนิกว่ามีมากน้อยเพียงใดที่จะมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์หรือไม่

แหล่งกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิก สามารถแยกออกได้หลายประเภทดังนี้

ก. โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

- เรกติไฟเออร์ (rectifier)
- เรกติไฟเออร์แบบมีการควบคุม (controlled rectifier)
- คอนเวอร์เตอร์แบบความถี่ (static frequency converter)
- รีแอกเตอร์แบบอิ่มตัว (saturable reactor)
- เตาหลอมแบบอาร์ค (arc furnace)
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค

ข. แหล่งกำเนิดเฟสไม่สมดุล (phase unbalance sources)

- โหลดแบบเชิงเส้นเฟสเดียว (single phase linear load)
- โหลดแบบไม่เชิงเส้นเฟสเดียว (single phase nonlinear load)
- หม้อแปลงเดลต้าเปิด (open delta transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบสายจำหน่ายแบบวางนอนและไม่มีกรสลับสาย (untransposed flat configuration of conductors)

ค. กระแสกระตุ้น (exciting currents)

- กรณีปกติ (normal condition)
- กรณีกระตุ้นมากเกินไป (overexcited conditions)
- เรโซแนนซ์กับแกนเหล็ก (ferroresonance)

จ. แหล่งกำเนิดอื่นๆ

- สวิตชิงเสิร์จ
- ไฟฟ้า
- ฟอลต์
- กระแสตรงในวงจรกระแสสลับ

รายละเอียดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในหัวข้อข้างต้นนี้จะได้กล่าวไว้เป็นข้อๆถึงการกำเนิดฮาร์มอนิกและผลที่มีต่อระบบมากน้อยเพียงใดเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเรื่องของแหล่งกำเนิดและวิธีการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในโอกาสต่อไป

2.3.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load)

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ โหลดที่รับไฟผ่านเรกติไฟเออร์มา โหลดซึ่งรับไฟรวมทั้งระบบการเรกติไฟร์ซึ่งมีผลต่อแหล่งจ่ายไฟหรือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรทางด้านกระแสตรง ความเหนี่ยวนำซึ่งมีหน้าที่ทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้นในวงจรทรานซิสเตอร์เป็นตัวต้นเหตุที่ทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีรูปคลื่นใกล้เคียงคลื่นสแควร์ (square wave) มาก ในเรกติไฟเออร์แบบไม่มีการควบคุม (uncontrolled rectifier) และในคอนเวอร์เตอร์แบบความถี่ (frequency converter) ก็มีผลแบบเดียวกันเกิดขึ้น ถ้าหากมีการใช้ความเหนี่ยวนำสำหรับทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น

ถ้าหากกระแสทางด้านโหลดใช้ความจุสำหรับทำให้สัญญาณเรียบขึ้นแทนที่จะใช้ความเหนี่ยวนำ กระแสสลับทางด้านอินพุทจะไหลเฉพาะช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (peak voltage) เท่านั้น ในช่วงครึ่งไซเคิล สัญญาณกระแสแบบตัด (chopped current wave) เกิดขึ้นเพราะกระแสไหลได้เฉพาะช่วงของไซเคิลที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับแหล่งจ่ายมากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมความจุ ช่วงระยะที่กระแสไหลในแต่ละครึ่งไซเคิลขึ้นอยู่กับขนาดของความจุ ความจุยิ่งขนาดใหญ่ก็ทำให้กระแสตรงที่ออกมาเรียบมากขึ้นและพัลส์ (pulse) กระแสสลับมีระยะเวลาสั้นแต่มีขนาดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ ไม่ได้มีการใช้ทั้งความเหนี่ยวนำและความจุเพื่อทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบ นั้นทำให้กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟก็มีการเบี่ยงเบนจากไซน์ (distort) น้อย เเรคตีไฟเออร์แบบคลื่นเต็มเฟสเดียว (full wave single phase) เมื่อจ่ายกระแสให้โหลดที่เป็นความต้านทานอย่าง เดียวก็ไม่ได้มีการเบี่ยงเบนของไซน์เกิดขึ้นทางด้านกระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟ อย่างไรก็ตามถ้าแบบ เป็นสามเฟสการเบี่ยงเบนของไซน์ทางด้านกระแสของแหล่งจ่ายก็เกิดขึ้น

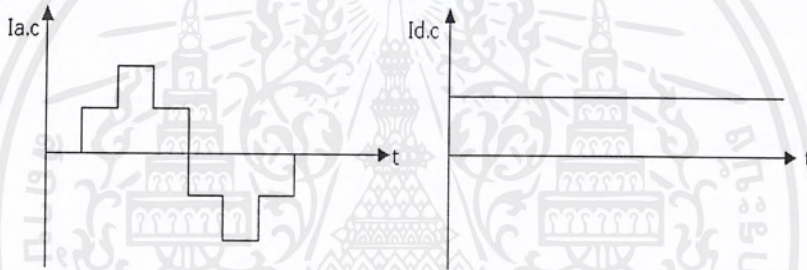
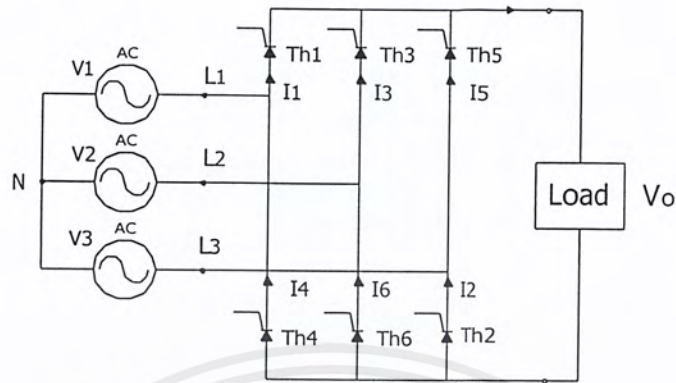
การเบี่ยงเบนจากไซน์เนื่องจากมีการใช้เรคตีไฟเออร์ที่มากที่สุดก็คือสัญญาณสามเฟส กระแสสลับแบบคลื่นสแควร์ที่ผ่านเรคตีไฟเออร์สามเฟสโดยมีความเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เพื่อทำให้ สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น ขนาดของฮาร์โมนิกได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าขนาดสูงสุดที่ สามารถเกิดขึ้นได้จากสัญญาณคลื่นสแควร์ทางด้านกระแสสลับของแหล่งจ่าย

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ

ฮาร์โมนิก	ขนาด (pu.)
ความถี่ปกติ (fundamental)	1.0
5	0.2
7	0.143
11	0.077
13	0.059
17	0.053

รูปที่ 2.1 เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ เปลี่ยนแปลงกระแสสลับเป็น กระแสตรงโดยจ่ายกระแสตรงออกมาเรียบ ส่วนกระแสสลับมีลักษณะเป็นคลื่นสแควร์ กระแสสแควร์ทางด้านอินพุตที่มาจากแหล่งจ่ายไฟนี้ก็คือคลื่นที่เบี่ยงเบนจากไซน์ซึ่งเมื่อแยกคลื่น ออกโดยใช้ Fourier Analysis จะได้

$$I_{a.c} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \theta - \frac{1}{5} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \cos 7\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \cos 13\theta \dots) \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 วงจรและสัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์

การเบี่ยงเบนจากไซน์ของสัญญาณที่แหล่งจ่ายไฟอันเนื่องมาจากวงจรไทรสเตอร์ก็มีสาเหตุอีกประการที่เรียกว่าคอมมิวเตชันนอช (commutation notches) มันจะเกิดขึ้นทุกๆครึ่งไซเคิลในแต่ละเฟสของระบบ 6 พัลส์ สาเหตุเกิดเนื่องจากการควบคุมศักดาไฟฟ้าเอาท์พุทนั้นไทรสเตอร์บางขณะก็อยู่ในช่วงเป็นตัวนำและบางขณะก็ไม่เป็นตัวนำ (conducting and nonconducting) การที่ทำเช่นนี้ได้นั้น การคอมมิวเตทกระแสกับไทรสเตอร์ตัวถัดไปจำเป็นต้องลดวงจรทางด้านกระแสกลับชั่วขณะเป็นไมโครวินาที การจำกัดกระแสลดวงจรให้มียังค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดความเหนี่ยวนำในสายและระบบ ความเหนี่ยวนำยิ่งมากกระแสลดวงจรน้อยและระยะเวลาที่เกิดก็ต้องให้นานพอควรในการทำให้เกิดคอมมิวเตชันที่สมบูรณ์ คอมมิวเตชันนอชอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจากไซน์ เช่น มอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า อาจมีขนาดคอมมิวเตชันนอชเกิดขึ้นขนาด 70% เป็นเวลา $\frac{1}{4}$ m/s โดยเกิด 6 ครั้ง ภายในครึ่งไซเคิลซึ่งก็คือ 1.5 m/s ภายในหนึ่งไซเคิลหรือประมาณ 10% ของเวลา และถ้าหากมีมอเตอร์ดังกล่าวหลายๆชุดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บัสเดียวกันก็อาจทำให้มีผลเสียมากขึ้น ความถี่ของคอมมิวเตชันขออยู่ในย่านความถี่ mid-audio หรือสูงกว่าที่ทำให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุและเกิดการเบี่ยงเบนจากไซน์ในสัญญาณจากแหล่งจ่ายไฟ

2.3.2 ความไม่สมดุลของเฟส (phase unbalance)

ความไม่สมดุลของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบก็มีผลต่อระบบเช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนจากไซน์เพราะมันมีผลต่อมอเตอร์เช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนของความถี่ สาเหตุของการเกิดความไม่สมดุลของเฟสก็เนื่องมาจากโหลดไม่สมดุลหรืออิมพีแดนซ์ของเฟสไม่สมดุลหรืออาจเกิดเนื่องมาจากมีโหลดแบบเฟสเดียวที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น เช่นการขับเคลื่อนแบบใช้ไทรสเตอร์เฟสเดียวเป็นต้น ซึ่งทำให้มีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกเกิดขึ้นนอกเหนือจากเฟสไม่สมดุล

สาเหตุของความไม่สมดุลของเฟสที่คาดไม่ถึงอีกประการก็คือ เมนพิวส์เฟสหนึ่งของคาปาซิเตอร์ขาดและพิวส์ที่ขาดแบบนี้โดยทั่วไปก็ไม่ทราบว่ามันเกิดขึ้น ดังนั้นทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส ถ้าคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 4% ของระบบเมื่อพิวส์ขาดไปหนึ่งเฟสจะเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2% ทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์ประมาณ 8% ดังตารางที่แสดงไว้ในหัวข้อเรื่อง ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกในหัวข้อย่อยของมอเตอร์

2.3.3 กระแสเอ็กไซตและเฟอโรเรโซแนนซ์ (exciting current and ferroresonance)

กระแสเอ็กไซตโดยปกติไม่ได้ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่น (wave distortion) แต่ปัญหาเกิดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเพราะกระแสเอ็กไซตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้วหม้อแปลงที่แรงดันไฟฟ้า 110% ของอัตรากระแสไม่ควรเกิดความร้อนมากเกินไป (overheat) เมื่อไม่มีโหลดนั่นก็คือที่ 110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าความสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็กไซตมีค่าเท่ากับความสูญเสียในหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดเต็มที่ที่ 130% ของอัตราแรงดันไฟฟ้ากระแสเอ็กไซตอาจมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสโหลดเต็มที่ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยฮาร์มอนิกที่ 3 หรือมากกว่ามีขนาดมากกว่า 50 % และทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่น

เฟอโรเรโซแนนซ์เป็นสิ่งผิดปกติอีกอย่างที่เกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนักแต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่นและเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้น (overvoltage) เฟอโรเรโซแนนซ์อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเฟสหนึ่งเปิดวงจรออกและเฟสหนึ่งของหม้อแปลงถูกจ่ายไฟผ่านทางความจุ เกล็บลยาว 30 – 60 เมตร สามารถให้ความจุมากพอที่จะทำให้เกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ สาเหตุที่เกิดอาจเป็นได้ว่าพิวส์ต้นทางตัวหนึ่งของสายที่จ่ายมายังหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 5000 KVA ขนาดลง ขนาดของกระแส

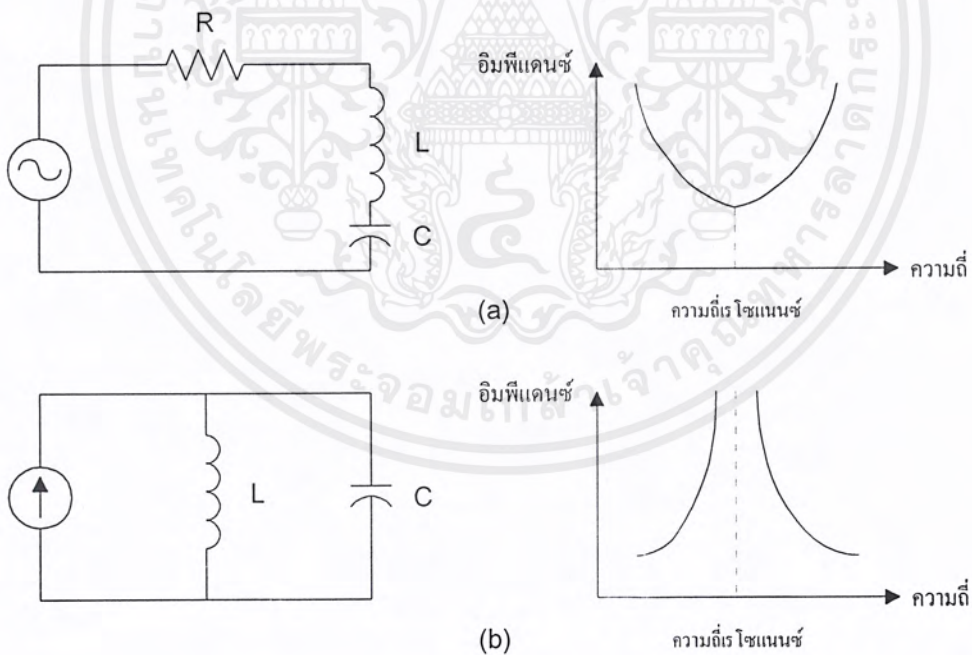
คาปาซิเตอร์แม้เพียง 1% ของกระแสเอ็กไซตของหม้อแปลงก็สามารถทำให้เกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ได้กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงที่ไม่ได้จ่ายโหลด โดยทั่วไปเฟอโรเรโซแนนซ์ไม่เกิดขึ้นถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดมากกว่า 30% ของอัตราป้องกันระบบก็คือพยายามไม่ให้เกิดการเอ็กไซต์หม้อแปลงผ่านความจุที่ต่ออนุกรมและพยายามให้หม้อแปลงจ่ายโหลดเสมอ เมื่อเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ขึ้นให้รีบปลดเฟสอื่นๆ ของหม้อแปลงทันที

2.4 เรโซแนนซ์

เมื่อทราบสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกแล้ว ปัญหาต่อไปที่ต้องศึกษาก็คือฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีกระแสฮาร์มอนิกไหลไปในระบบแล้วเกิดอะไรตามมา สำหรับผลเสียอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกจะกล่าวไว้ในภายหลังแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบกรณีที่มีความถี่ตรงกับเรโซแนนซ์ของระบบ

เรโซแนนซ์ในระบบมี 2 แบบ คือ เรโซแนนซ์ขนานและเรโซแนนซ์อนุกรม วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

a) เรโซแนนซ์อนุกรม

b) เรโซแนนซ์ขนาน

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขนานกระแสเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ส่วน วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเมื่อเกิดแล้วแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดกระแสไหลสูงที่ ความถี่เรโซแนนซ์ถ้าไม่มีการเบี่ยงเบนของคลื่นหรือไม่มีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นเรโซแนนซ์ ที่มีอยู่ในระบบก็ไม่สร้างปัญหาแต่อย่างใด

ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จาก

$$F_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} \quad (2.6)$$

$$= 50 \sqrt{\frac{KVA_{sc}}{KVA_c}} \quad (2.7)$$

$$= \frac{50}{\sqrt{\Delta e}} \quad (2.8)$$

L = ความเหนี่ยวนำของระบบ

C = ความจุของระบบหรือคาปาซิเตอร์

KVA_{sc} = KVA ลัดวงจรของระบบตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

KVA_c = KVA ของคาปาซิเตอร์

Δe = การเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าเนื่องจากการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ

(per unit)

เช่น ระบบไฟฟ้า 5 Hz ที่มี KVA ลัดวงจร 20000 และขนาดคาปาซิเตอร์ที่ใช้ 800

KVA

$$\text{ความถี่เรโซแนนซ์} = 50 \sqrt{\frac{20000}{800}} = 50 \sqrt{25} = 250 \text{ Hz}$$

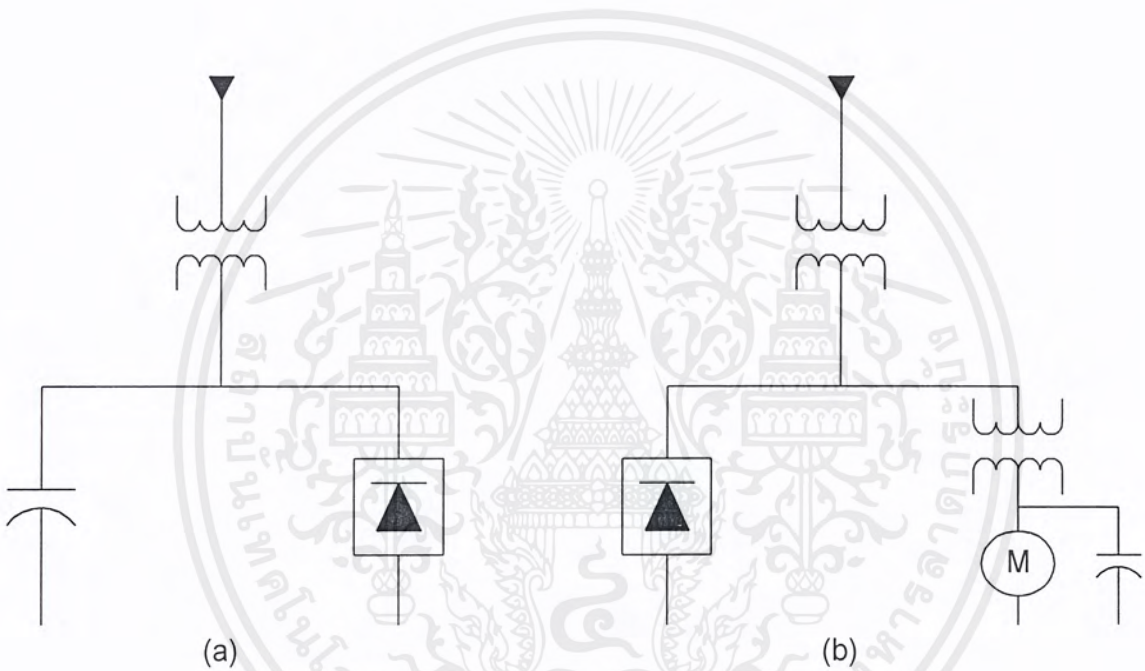
$$\text{หรือ } \frac{50}{\sqrt{0.04}} = \frac{50}{0.2} = 250 \text{ Hz}$$

เรโซแนนซ์อนุกรมโดยปกติเป็นวงจรที่ถูกออกแบบไว้ คือ ตั้งใจทำขึ้นเพื่อป้องกันการเกิด ปัญหาเนื่องจากเรโซแนนซ์ขนาน โดยใช้เรโซแนนซ์อนุกรมเป็นทางผ่านสำหรับฮาร์มอนิกที่ ต้องการ เรโซแนนซ์อนุกรมประกอบด้วยความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับความจุหรือคาปาซิเตอร์เพื่อ ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่หนึ่งและอิมพีแดนซ์รวมของความเหนี่ยวนำและความจุมิค่าต่ำมาก ทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ดังกล่าวไหลเข้าไปในวงจรเรโซแนนซ์ที่ทำต่อไว้เพื่อไม่ให้เข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบไฟฟ้า บางครั้งก็เรียกวจรเรโซแนนซ์ที่ทำได้ว่าแตรป (trap) วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงมากๆ ดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่สูงๆ นี้ เมื่อเพิ่มวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเข้าไป การต่อความเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าไปทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ขนานต่ำลง

ตัวอย่างการเกิดเรโซแนนซ์ขนานและอนุกรมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ในรูปที่ 2.3 (a) เกิดเรโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์และความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเมื่อมองจากรกติไฟเออร์



รูปที่ 2.3 วงจรเรโซแนนซ์

(a) เรโซแนนซ์ขนาน (b) เรโซแนนซ์อนุกรม

ส่วนในรูปที่ 2.3(b) เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมระหว่างความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่จ่ายให้กับมอเตอร์และคาปาซิเตอร์เมื่อมองจากรกติไฟเออร์

สำหรับกรณีการทำงานปกติของคอนเวอร์เตอร์พารามิเตอร์ของวงจรซึ่งได้แก่ ความเหนี่ยวนำ ความจุ และความต้านทานไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์เข้ากับความถี่ที่กำเนิดจากคอนเวอร์เตอร์ ความจุของหม้อแปลง เคเบิลและสายมีค่าน้อยมากและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง เคเบิลและสายทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้แต่เป็นที่ความถี่สูงมาก ๆ ซึ่งไม่มีปัญหาต่อระบบ แต่ถ้าเติมคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบมีโอกาสที่จะตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ และเป็นปัญหาต้องแก้ไขเมื่อจะใช้คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก

ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกอาจพิจารณาได้เป็นสองขั้นตอน คือในระบบไฟฟ้าเมื่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นทำให้เกิดผลเสียโดยเฉพาะทางด้านความสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในตอนนี้ และในระบบที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมักมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการปรับเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้สูงขึ้นโดยใส่คาปาซิเตอร์ก็ต้องระวังปัญหาความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรไปใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกเข้า ดังที่ได้กล่าวไว้ในเรื่องเรโซแนนซ์เพราะทำให้มีกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงในระบบ จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นต้องแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ดังที่ได้กล่าวและสรุปไว้ดังนี้

ก) ฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบทำให้เกิดปัญหาเรื่องความสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในระบบ

ข) เมื่อต้องการปรับเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้สูงขึ้นในระบบที่มีฮาร์มอนิกโดยใช้คาปาซิเตอร์ก็อาจพบกับปัญหาเรื่องของเรโซแนนซ์ของวงจรตรงกับความถี่ฮาร์มอนิก

สำหรับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกอันเนื่องมาจากการใช้คาปาซิเตอร์ในระบบจะกล่าวไว้ในตอนต่อไป ส่วนในตอนต่อไปนี้จะกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิกแล้วมีผลเสียต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบ

ไม่ว่าจะเป็นปัญหาของคลื่นเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกหรือเนื่องจากความไม่สมดุลของเฟสก็ทำให้ค่าใช้จ่ายในระบบสูงขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะ

- ก) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง
- ข) ความสูญเสียของมอเตอร์สำรอง (standby motor) เพิ่มขึ้น
- ค) ความสูญเสียในหม้อแปลงคาปาซิเตอร์ สายและสวิตช์เกียร์สูงขึ้น
- ง) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มขึ้น
- จ) เพิ่มเงินลงทุนระบบมากขึ้น
- ฉ) คุณภาพของผลผลิตลดลง
- ช) ค่าบำรุงรักษาเพิ่มมากขึ้น
- ซ) ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

รายละเอียดที่ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นเนื่องจากความสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุของสกินเอฟเฟค (skin effect) มอเตอร์ หม้อแปลง คาปาซิเตอร์ และโหลดแบบไม่

2.5.1 สกินเอฟเฟค (skin effect)

ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นส่วนมากเนื่องมาจากการเบี่ยงเบนของคลื่นและความไม่สมดุลของเฟส ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสกินเอฟเฟค เพราะสกินเอฟเฟคทำให้ค่าความต้านทานของสายเพิ่มมากขึ้น เมื่อความถี่มากขึ้น ที่ความถี่ปกติ 50-60 Hz สกินเอฟเฟคไม่ค่อยมีปัญหาเท่าใดนัก สกินเอฟเฟคเกิดขึ้นเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายเอง (Self-inductance) ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของสาย กระแสไหลทางด้านนอกของสายมาก ส่วนตรงกลางสายมีกระแสไหลน้อยทำให้ความต้านทานของสายเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 ผลของสกินเอฟเฟคที่มีต่อความต้านทานสายในรูปของแฟคเตอร์คูณที่ความถี่ต่างๆกัน เมื่อเทียบกับความต้านทานของสายเมื่อความหนาแน่นกระแสคงที่

ความถี่ (Hz)	ฮาร์มอนิกที่	แฟคเตอร์คูณ
60	1	1.01
300	5	1.21
420	7	1.35
660	11	1.65

ตารางที่ 2.3 ผลของสกินเอฟเฟคที่มีผลต่อความต้านทานสายในรูปของแฟคเตอร์คูณที่ขนาดสายต่างๆกัน เมื่อเทียบกับความต้านทานของสายเมื่อความหนาแน่นกระแสคงที่

ขนาดสาย (MCM)	60 Hz	ฮาร์มอนิกที่ 5
300	1.01	1.21
450	1.02	1.35
600	1.03	1.50
750	1.04	1.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 มอเตอร์

สายตัวนำที่มีวัสดุสนามแม่เหล็ก (magnetic material) เข้ามาเกี่ยวข้องเช่น ในมอเตอร์หรือแม้กระทั่งท่อโลหะร้อยสายทำให้ผลเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์มีมากขึ้น เช่น โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแสดงผลอย่างรุนแรงเนื่องจากปัญหาดังกล่าว ความต้านทานภายในโรเตอร์มีค่าต่างกันขณะหมุนอยู่และขณะเริ่มสตาร์ททั้งนี้เนื่องจากสกินเอฟเฟกต์ที่มีค่าต่างกันอันเกิดจากความถี่ในโรเตอร์ไม่เหมือนกัน

กรณีแหล่งจ่ายไฟป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตรสามเฟส (unsymmetrical 3 phase voltage) ให้กับมอเตอร์จะเกิดกระแสช็ววนลพเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์และเกิดความถี่ขึ้นในโรเตอร์ 60 – 118 Hz ความต้านทานของโรเตอร์ที่ความถี่สูงนี้เนื่องจากสกินเอฟเฟกต์มีค่าสูงกว่าเมื่อที่ล๊อคโรเตอร์บางที่อาจถึง 5-6 เท่าของค่าที่ความถี่ต่ำตอนหมุนปกติ ความไม่สมดุลย์ของเฟสเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์เพิ่มขึ้น

สำหรับความถี่ฮาร์โมนิกที่ 5,7, ความต้านทานโรเตอร์ก็มีค่าสูงมาก ผลของฮาร์โมนิกก็เกิดขึ้นเนื่องจากความเบี่ยงเบนของคลื่นก็คล้ายกับความไม่สมดุลย์ของศักดาไฟฟ้าในมอเตอร์เหนี่ยวนำและดังนั้นอาจถือว่าเป็นปัญหาแบบเดียวกันที่แก้ไขด้วยวิธีเดียวกันได้

ตารางที่ 2.4 ผลของความไม่สมดุลย์ของแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดมอเตอร์เต็มที่

	ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า (%)			
	0	2	3.5	5
กระแสช็ววนลพ (%)	0	15	27	38
กระแสเดเตอร์ (rms%)	100	101	104	107.5
ความสูญเสียที่เพิ่มขึ้น (%)	0	8	25	50
ในสเตเตอร์ – ค่าเฉลี่ย (%)	0	2	8	15
ในสเตเตอร์ – ค่าสูงสุด (%)	0	33	63	93
ในโรเตอร์ (%)	0	12	39	76
ในมอเตอร์ทั้งหมด (%)	0	8	25	50
อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (%)				
class A	60	65	75	90
class B	80	86	100	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้านี้ถ้าเกิดขึ้นมากก็ทำให้มอเตอร์เสียหายได้ เช่น การเกิดความไม่สมดุลของเฟส 3.5 % อาจทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้น 25 % และทำให้อายุขณไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่ง ตัวอย่างแสดงความสูญเสียอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลตามมาตรฐานมอเตอร์ MG-1 ของ NEMA ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

จากตารางที่ 2.4 สังเกตพบว่าเมื่อเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าขึ้นกระแสในสเตเตอร์ไม่ได้มีค่าต่างกันมากนัก ซึ่งไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความร้อนมากเกินไป (overheat) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลเลย และการใช้ตัววัดอุณหภูมิฝังไว้หรือใช้อุปกรณ์ป้องกัน โหลดเกินก็ไม่สามารถป้องกันได้ดีนักเมื่อเกิดความไม่สมดุลทั้งนี้เพราะความสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กระจายทั่วไปภายใน ดังนั้นตัววัดอุณหภูมิแบบฝังอาจจะไม่สามารถตอบสนองได้ถูกต้องกับความร้อนมากเกินไปที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุดังกล่าว ความสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่สามารถทราบล่วงหน้าได้นอกจากมีการเปิดวงจรออก เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกัน เมื่อมีการเปิดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันโดยส่วนใหญ่ มักไม่ทราบสาเหตุและไม่สามารถอธิบายได้ทำให้เกิดการตั้งการtripของอุปกรณ์ป้องกันสูงขึ้นไปอีกและเมื่อตั้งการtripสูงมากเกินไปมอเตอร์ก็ไหม้เสียหายได้

2.5.3 หม้อแปลง

สกินเอฟเฟกต์ทำให้หม้อแปลงเกิดความร้อนมากเกินไปได้ในทำนองเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้การเบี่ยงเบนของคลื่นทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กมากขึ้นด้วยเนื่องจากความถี่ฮาร์โมนิกที่สูงกว่าความถี่ปกติ ผลของความเบี่ยงเบนของคลื่นในหม้อแปลงมีมากกว่าในสายนำขนาดใหญ่แต่มีผลน้อยกว่าแบบในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสตรงถือว่าเป็นความเบี่ยงเบนของคลื่น ชนิดหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาน้อย ถ้าหากมีส่วนหนึ่งของกระแสตรงไหลในหม้อแปลงก็อาจทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปในหม้อแปลงได้ เพราะกระแสตรงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก หม้อแปลงขนาด 1000 แอมป์ ซึ่งมีกระแสเอ็คไซค์ 10 – 30 แอมป์ อาจมีความร้อนมากเกินไปเกิดขึ้นด้วยกระแสตรงเพียง 2-3 แอมป์ไหลผ่านเท่านั้น

2.5.4 สวิตช์เกียร์ (switch gear)

ความสูญเสียในสวิตช์เกียร์เนื่องจากความเบี่ยงเบนของคลื่นเทียบได้กับความสูญเสียในสายตัวนำดังที่ได้กล่าวมา นอกจากนี้อุปกรณ์ใดๆที่มีค่าของความเหนี่ยวนำเป็นสำคัญจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก proximity effect หม้อแปลงกระแสจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหนียวนำโคๆที่มีอยู่ภายในหม้อแปลงกระแสจะมีผลต่อ burden ของหม้อแปลงกระแสมากที่สุด ความถี่ฮาร์โมนิกและทำให้ความสูญเสียในแกนเพิ่มขึ้น

เบรกเกอร์ที่มีขดลวดทรูปอยู่ในตัวมันเองก็มีปัญหาเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากปัญหาของ สกินเอฟเฟคและ proximity effect ซึ่งทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปในอุปกรณ์ที่นำกระแส ความร้อนมากเกินไปที่เกิดขึ้นทำให้อุณหภูมิรอบด้านภายในเบรกเกอร์สูงขึ้นและทำให้การตั้ง การทรูปของเบรกเกอร์ผิดไป อุปกรณ์การทรูปภายในเบรกเกอร์ไวต่อคลื่นประเภทฮาร์โมนิกเพราะ ประสิทธิภาพของการส่งกำลังไปยังอุปกรณ์การทรูปเพิ่มขึ้นตามความถี่ ถึงแม้มาตรฐานหรือกฎใดๆ จะไม่มีการใช้หรือตั้งขึ้นมาสำหรับการนี้ก็ตาม แต่จากรายงานของการทรูปของเบรกเกอร์อื่นเนื่อง มาจากความเบี่ยงเบนของคลื่น โดยทั่วไปมักพบว่าเบรกเกอร์ที่ทรูปนั้นร้อนมาก

2.5.5 คาปาซิเตอร์

ความสูญเสียภายในคาปาซิเตอร์มีค่าน้อย ความสูญเสียไดอิเล็กตริกขนาดหนึ่งวัตต์ต่อ KVA ที่ความถี่ปกตินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกับความถี่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ววงที่ ส่วนความสูญเสียอื่นเนื่องจากความต้านทานภายในของคาปาซิเตอร์มีค่าไม่สูงมากนัก รวมแล้ว ความสูญเสียทั้งหมดภายในคาปาซิเตอร์เนื่องจากความเบี่ยงเบนของคลื่นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ KVA ของตัวมันเอง แต่ถ้ามองในอีกด้านของคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดเล็กๆ ต่อ KVA ของมัน ความ สูญเสียอาจทำให้อุณหภูมิภายในคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นและอายุการใช้งานสั้นลง

2.5.6 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load)

โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดความเบี่ยงเบนของคลื่นและทำให้ต้องใช้กำลังไฟฟ้า แบบรีแอกตีฟเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วย โหลดที่ต้องใช้เรกติไฟเออร์ไทรสเตอร์หรือ เครื่องเปลี่ยนแปลงความถี่อาจมีเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงที่โหลดเต็มที แต่ถ้าเป็นกรณีโหลด 50% เพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟอาจตกลงไปถึง 0.5

กรณีของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนไม่มากต่ออยู่กับที่บัสความเบี่ยงเบนของคลื่นก็ ไม่มากและไม่ก่อให้เกิดปัญหามากมายนัก เมื่อมีโหลดประเภทนี้มากขึ้นความเบี่ยงเบนของคลื่น ภายในระบบก็มากขึ้นและอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นทำงานผิดปกติทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการ ซ่อมแซมหรือบำรุงรักษามากขึ้น

2.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ระบบเพื่อดูผลเนื่องจากเรโซแนนซ์ต้องอาศัยการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกต่างๆที่ไหลในระบบและคำนวณแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสนี้ เรคตีไฟเออร์และอุปกรณ์อย่างอื่นที่คล้ายคลึงกันแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแส (current source) และเตาหลอมแบบอาร์คแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า (voltage source)

การวิเคราะห์ผลจากฮาร์มอนิกควรมีค่าต่างๆ ดังนี้ประกอบการพิจารณา

$$KVA_c = \sum V_h I_h = (V_h^2 / y_h) \quad (2.9)$$

$$V_p = \sum V_{hm} \quad (2.10)$$

$$I_{rms} = (\sum I_h^2)^{1/2} \quad (2.11)$$

$$V_{rms} = (\sum V_h^2)^{1/2} \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.9 มีไว้เพื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่คาปาซิเตอร์เนื่องจากฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เกิดขึ้น สมการที่ 2.10 มีไว้เพื่อหาขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากฮาร์มอนิกทั้งหมด และ I_{rms} , V_{rms} คือค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ที่รวมผลของฮาร์มอนิกทั้งหมดและอื่นๆที่ทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปเนื่องจากการไหลของกระแสฮาร์มอนิก

แรงดันไฟฟ้าและกระแสตามสมการข้างต้นมีไว้เพื่อพิจารณาว่าจะมีผลต่อคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระบบหรือไม่เพราะคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันนั้นถูกออกแบบให้มีอัตราดังนี้ (ANSI C55.1)

KVA สูงสุด	135% ของอัตรากำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์
กระแสไฟฟ้าสูงสุด	160% ของอัตรากระแสไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์

และคาปาซิเตอร์ที่ถูกออกแบบและสร้างจากผู้ผลิตดังนี้ก็เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์ความปลอดภัยเพื่อไว้สำหรับแรงดันไฟฟ้าเกินและหรือแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่อาจเกิดขึ้น

2.7 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกเมื่อใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบอาจเกิดเรโซแนนซ์ในระบบที่ความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก ในกรณีดังกล่าวเกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงในระบบซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายประการดังนี้

ก) เปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก

ข) ใส่ LC ฟิลเตอร์ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและจูน (tune) ให้เข้ากับฮาร์มอนิกที่เกิดปัญหา LC ฟิลเตอร์ดังกล่าวจะให้อิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่มีปัญหา ในกรณีที่ใส่ฟิลเตอร์เข้าไปแล้วต้องตรวจสอบเช็คต่อไปว่าอาจเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ตรงกับฮาร์มอนิกตัวอื่นหรือไม่ ถ้าเป็นอย่างนั้นก็ต้องใส่ LC ฟิลเตอร์กรองฮาร์มอนิกที่มีปัญหาตัวต่อไปอีก

ค) ใส่ L อุปกรณ์เข้าไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ไม่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกหรือใส่ C เข้าไปในอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นฟิลเตอร์เลย

2.7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์

ปัญหาของเรโซแนนซ์ที่ความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิด สมควรให้มีการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์ก่อนเป็นอันดับแรกเพราะเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด พิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นตามสมการอีกครั้ง

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{KVA_{SC}}{KVA_C}} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ f_p เปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ L หรือ C ดังนั้นในการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของคาปาซิเตอร์ในระบบก็เพื่อเปลี่ยนค่า L ที่จะมาอนุกรมหรือขนานกับคาปาซิเตอร์ในการเกิดเรโซแนนซ์อนุกรมหรือขนานตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติโอกาสที่จะแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าวอาจไม่ประสบผลสำเร็จนัก เพราะการเปลี่ยนแปลงของ L จะมีน้อยแต่ถ้าหากเปลี่ยนตำแหน่งคาปาซิเตอร์จากต้นทางของระบบไปติดตั้งที่โหลดหรือจากโหลดเปลี่ยนไปติดตั้งที่ต้นทางของระบบในกรณีเช่นนี้อาจแก้ไขได้ แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับขนาดโหลดด้วยมีฉะนั้นการนำคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ไปติดตั้งที่โหลดขนาดเล็กอาจมีปัญหาทางด้านแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดขึ้น ซึ่งจะกลายเป็นแก้ปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกได้แต่ไปสร้างปัญหาอย่างอื่นไว้อีก

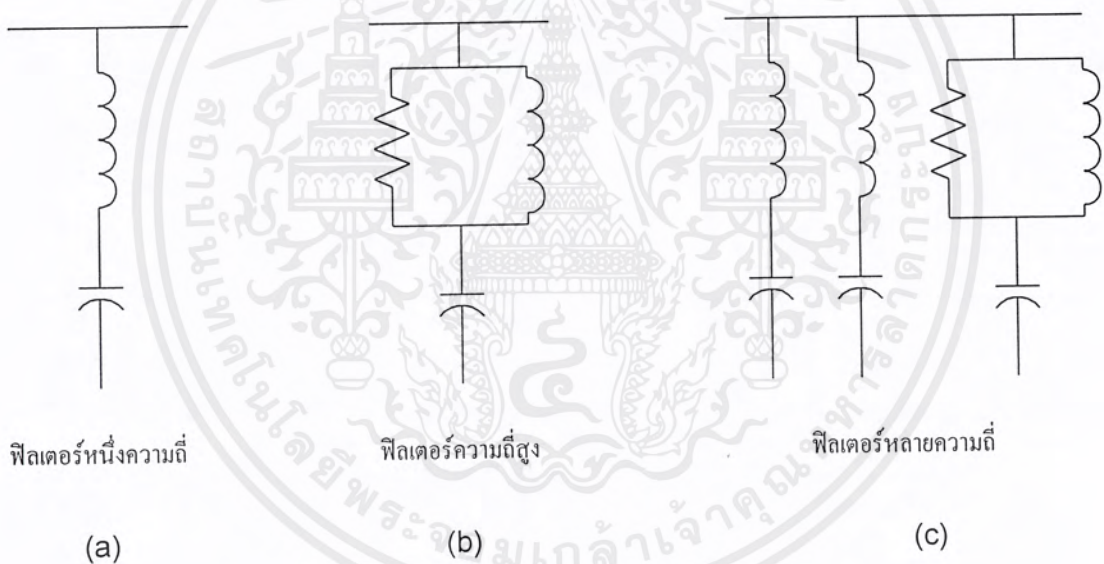
ในการเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ก็ช่วยแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกเพราะทำให้ f_p ในสมการที่ 2.13 เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์นั้นต้องคิดไว้เสมอว่าถ้าเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ไปมากเกินไปอาจทำให้การแก้ไขปัญหาเพาเวอร์แฟกเตอร์ด้วยคาปาซิเตอร์มีผลไม่ดีขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ต้องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ว่าไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียผลทางด้านการแก้ไขเพาเวอร์แฟกเตอร์จนอยู่นอกเกณฑ์ที่จะยอมรับได้ เช่น จุดประสงค์ต้องการปรับปรุงระบบให้มีเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงกว่า 0.85 แต่เมื่อมีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกและเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์จนกระทั่งเพาเวอร์แฟกเตอร์จำเป็นต้องต่ำกว่า 0.85 ก็ถือว่าการแก้ไขปัญหาดังกล่าวใช้ไม่ได้

2.7.2 การใส่ LC ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์เพื่อเลือกใช้สำหรับเป็นทางผ่านให้ฮาร์มอนิกไหลออกจากระบบได้ง่ายโดยไม่เข้าไปรบกวนในระบบมิได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเลือกใช้ชนิดของฟิลเตอร์ดังในรูปที่ 2.4 นั้น อยู่กับความต้องการที่จะกำจัดฮาร์มอนิกมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.4 ฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

- ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะความถี่
- ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกความถี่สูง
- ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกหลายๆความถี่

รูปที่ 2.4 (a) เป็นฟิลเตอร์ประเภทแบบถูกที่สุดและใช้แพร่หลายมากที่สุด แต่ถ้าใช้รีแอกเตอร์ไม่ถูกต้องความถี่ฮาร์มอนิกที่จูนไว้อาจลดลงในระดับที่ยอมรับได้แต่อาจจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอื่นๆ ฟิลเตอร์ในรูปที่ 2.4 (b) ใช้เมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่สูง ส่วนฟิลเตอร์ในรูปที่ 2.4 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยฟิลเตอร์ที่กำจัดฮาร์มอนิกที่รุนแรง 2 ความถี่และฟิลเตอร์ทางขาสุดของรูปมีไว้เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่สูงๆ

2.7.3 การเพิ่มรีแอคเตอร์

การแก้ปัญหาระบบฮาร์มอนิกที่ใช้กันและได้ผลก็คือการเพิ่มรีแอคเตอร์เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยจูน ให้มีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 ใช้ได้กับระบบที่มีฮาร์มอนิกตั้งแต่ที่ 5 ขึ้นไปเกิดขึ้น วงจรดังกล่าวทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หรือสูงกว่า ดังนั้นการเรโซแนนซ์เข้ากับความเหนี่ยวนำของระบบไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่กำเนิดจากอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิก

ต่อมาพิจารณาว่ารีแอคเตอร์ที่ใส่อนุกรมกับคาปาซิเตอร์นั้นควรมีขนาดเท่าใดเพื่อจูนให้มีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5

ขนาดของรีแอคเตอร์เพื่อจูนให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หาได้จาก

$$2\pi f_5 L = \frac{1}{2\pi f_5 C} \quad (2.14)$$

$$2\pi \times 5 \times f_1 L = \frac{1}{2\pi \times 5 \times f_1 C}$$

$$5X_L = \frac{X_C}{5}$$

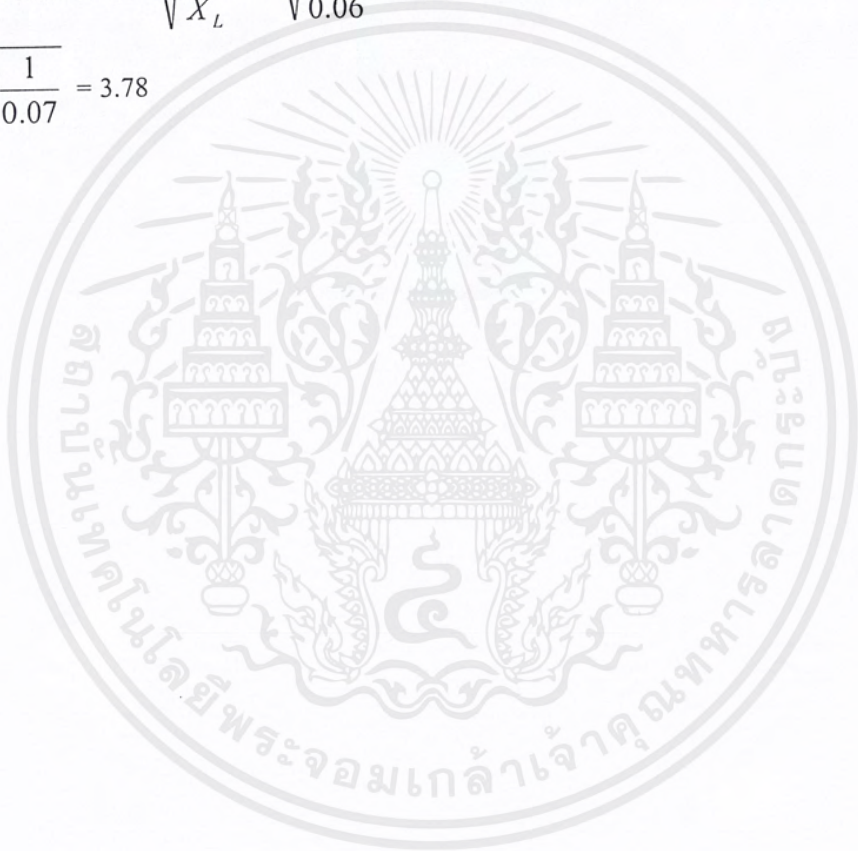
$$\frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{25} = 0.04 \quad (2.15)$$

f_1 คือความถี่ฮาร์มอนิกที่ 1, f_5 คือความถี่ฮาร์มอนิกที่ 5, X_L คือรีแอคเตอร์ที่ความถี่ปกติ X_C คือรีแอคเตนซ์คาปาซิเตอร์ที่ความถี่ปกติ

จากสมการที่ 2.12 พบว่ารีแอคเตอร์ขนาด 4% ของรีแอคเตนซ์ของคาปาซิเตอร์เมื่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 5 และจากสมการที่ 2.12 ถ้าใส่รีแอคเตอร์มากกว่า 4% ก็ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 ถ้าใส่รีแอคเตอร์น้อยกว่า 4% ก็อาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่ 7,9 หรือ 11 เป็นต้น

ดังนั้นในการหลีกเลี่ยงเพื่อไม่ให้คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ไปเรโซแนนซ์กับความเหนี่ยวนำของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกก็สามารถทำได้โดยเพิ่มรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมเข้าไป ขนาดของรีแอคเตอร์ที่เพิ่มเข้าไปนั้นต้องมากกว่า 4% เป็นอย่างน้อย เพื่อไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างรีแอคเตอร์ที่ใส่เข้าไปกับคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันมีตั้งแต่ 4.5 – 7% การใช้ขนาด % ของรีแอคเตอร์ซึ่งมากกว่า 4% ขึ้นไปก็มีผลดีในกรณีที่คาปาซิเตอร์บางหน่วยลัดวงจรจะทำให้ X_C มากขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์ก็มากขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกได้ยากขึ้น เช่น ถ้าใช้รีแอคเตอร์ขนาด 4.5% ลำดับความถี่เรโซแนนซ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์เกิดที่ $\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = 4.71$ ถ้าหากบางหน่วยของคาปาซิเตอร์ลดลง
 เนื่องจากกรณีใดก็ตาม สมมติว่าเสียไป 12% ค่า X_C เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ลำดับความถี่เรโซแนนซ์
 ระหว่างรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์เกิดที่ $\sqrt{\frac{X_C}{0.88 \times X_L}} = 5.02$ ซึ่งใกล้กับฮาร์มอนิกที่ 5 ด้วยเหตุผล
 ดังกล่าวจึงใช้รีแอกเตอร์ที่สูงกว่า 4.5% เช่นที่ใช้กันมากก็คือ 6% หรือ 7% รีแอกเตอร์ 6% ทำให้เกิด
 เรโซแนนซ์ที่ลำดับความถี่ $\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{1}{0.06}} = 4.08$ และ 7% ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ลำดับความถี่
 $\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{1}{0.07}} = 3.78$

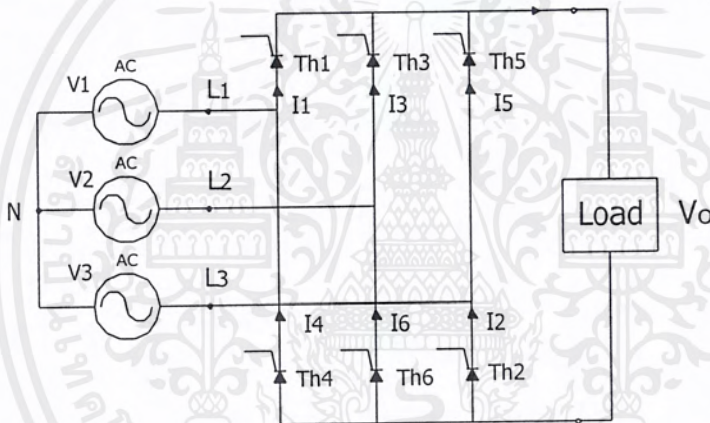


บทที่ 3

วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

ในการทำโครงงานนี้ได้ใช้ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ ของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

3.1 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ประกอบไปด้วยไทรสเตอร์ทั้งหมดจำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ไทรสเตอร์ (Thyristors)

ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง มีใช้อย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ไทรสเตอร์มีหลักการทำงานเหมือนกับสวิตช์ 2 สถานะ คือ นำกระแสกับไม่นำกระแส จึงสามารถสมมติได้ว่าเป็นสวิตช์ในอุดมคติสำหรับงานทั่วไป แต่ในทางปฏิบัติไทรสเตอร์ยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่ตายตัวและมีข้อจำกัดในการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น คือ P-N-P-N จึงมีรอยต่อพี-เอ็นอยู่ 3 รอยต่อ ไทรสเตอร์มีขาใช้งาน 3 ขา คือ แอนโอด แคโทด และเกต ดังรูป ที่ 3.2 แสดงสัญลักษณ์ และภาพตัดแสดงรอยต่อพี-เอ็นทั้งสามรอยต่อ ไทรสเตอร์สร้างมาจากกระบวนการ Diffusion



รูปที่ 3.2 แสดงสัญลักษณ์และรอยต่อพี-เอ็นทั้งสาม

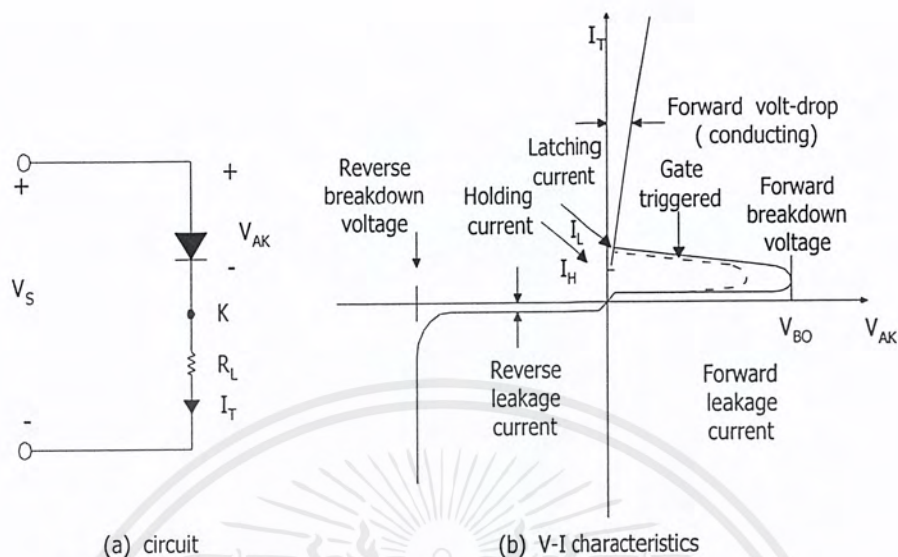
เมื่อแรงดันที่ขาแอนโอดเป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทดรอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสตรงและ J_2 จะเป็นไบแอสกลับ โดยมีกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากแอนโอดไปแคโทดไทรสเตอร์ที่สถานะนี้เรียกว่า สถานะบล็อกกิง (Forward blocking หรือ Off - state) ขณะไบแอสตรงหรือสถานะออฟและเรียกกระแสรั่วไหลว่า กระแสออฟสเตต (Off - state current, I_D) ถ้าแรงดันที่แอนโอดเทียบกับแคโทด (V_{AK}) มีค่าสูงขึ้นถึงจุดจุดหนึ่ง จนทำให้รอยต่อ J_2 พัง เราเรียกว่า การพังแบบอวาลานซ์ และเรียกแรงดันขณะนั้นว่า แรงดันพังขณะไบแอสตรง (V_{BO}) เนื่องจากรอยต่อ J_1 และ J_3 มีการไบแอสตรงอยู่แล้วจึงมีประจุกอิสระเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อทั้งสามส่งผลให้มีกระแสแอนโอดไหลเป็นจำนวนมาก ไทรสเตอร์

จะอยู่ในสถานะนำกระแสหรือ ON แรงดันตกคร่อมเนื่องจากความต้านทานในชั้นทั้ง 4 ชั้นที่มีค่าน้อยประมาณ 1 V สถานะนำกระแส กระแสแอมป์จะถูกจำกัดโดยความต้านทานภายนอก R_L ดังรูปที่ 3.3 (a) กระแสแอมป์ต้องมีค่ามากกว่าค่าหนึ่งคือกระแสเลตชิ่งหรือกระแสค้าง (Latching) I_L เพื่อที่จะรักษาปริมาณประจุที่ไหลผ่านรอยต่อให้เพียงพอ นอกจากนี้ไทรสเตอร์จะกลับไปสู่สถานะบล็อกกิง เมื่อแรงดันระหว่างแอมป์กับแคโทดมีค่าลดลง กระแสเลตชิ่ง (I_L) คือกระแสแอมป์ต่ำสุดที่ยังทำให้ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะนำกระแสทันทีภายหลังที่ไทรสเตอร์นำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณที่เกด ลักษณะสมบัติทั่วไปทางกระแสและแรงดันของไทรสเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.3 (a)

ครั้งแรกที่ไทรสเตอร์นำกระแส มันจะมีลักษณะเหมือนกับการนำกระแสของไดโอดและไม่สามารถควบคุมได้ จะยังคงนำกระแสต่อไป เพราะไม่มีชั้นของดีพลีชันของรอยต่อ J_2 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ อย่างไรก็ตาม ถ้ากระแสแอมป์เมื่อได้รับไบแอสตรงลดลงจนต่ำกว่าระดับหนึ่งซึ่งเรียกว่า กระแสโฮลดิ้งหรือกระแสยึด (Holding Current, I_H) จะเกิดช่วงดีพลีชันรอบรอยต่อ J_2 เนื่องจากการลดจำนวนลงของประจุ และไทรสเตอร์จะอยู่ในสถานะบล็อกกิง กระแสโฮลดิ้งอยู่ในหน่วยมิลลิแอมป์ และน้อยกว่ากระแสเลตชิ่ง I_L นั่นคือ $I_L > I_H$ กระแสโฮลดิ้ง (I_H) คือกระแสแอมป์ที่น้อยที่สุด ที่ยังทำให้ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะนำกระแสปกติค่ากระแสโฮลดิ้งน้อยกว่ากระแสเลตชิ่ง

เมื่อแรงดันแคโทดเป็นบวก เมื่อเทียบกับแอมป์ รอยต่อ J_2 เป็นไบแอสตรง แต่ J_1, J_2 เป็นไบแอสกลับเหมือนกับไดโอด 2 ตัวต่ออนุกรมกัน มีแรงดันกลับตกคร่อมอยู่ ทำให้ไทรสเตอร์จะต้องอยู่ในสถานะบล็อกกิง และกระแสรั่วไหลย้อนกลับเรียกว่า กระแสย้อนกลับ I_R ไหลผ่านไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์สามารถจะนำกระแสโดยการเพิ่มแรงดันไบแอสตรง V_{AK} ให้มากกว่า V_{BO} แต่สถานะนี้อาจทำให้ไทรสเตอร์ถูกทำลายได้โดยในทางปฏิบัติ ดังนั้นแรงไบแอสตรงจะต้องต่ำกว่า V_{BO} ไทรสเตอร์จะนำกระแสโดยการป้อนแรงดันบวกที่เกิดเมื่อเทียบกับแคโทด ดังแสดงในรูป 3.3 (b) โดยเส้นประ ครั้งแรกที่ไทรสเตอร์นำกระแส โดยสัญญาณเกดและกระแสแอมป์มากกว่ากระแสโฮลดิ้ง ไทรสเตอร์ยังคงนำกระแสเนื่องจากการป้อนกลับแบบบวก แม้ว่าจะนำสัญญาณเกดออกไปแล้วก็ตาม ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์แบบเลตชิ่ง



รูปที่ 3.3 แสดงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของไทรสเตอร์

3.1.3 การนำกระแสของไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์อาจจะนำกระแสโดยการเพิ่มกระแสแอโนด ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้
 อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิของไทรสเตอร์สูงขึ้น จะทำให้จำนวนของอิเล็กตรอน - โฮลสูงขึ้น จะทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ α_1 และ α_2 เพิ่มขึ้น และเนื่องจากปรากฏการณ์ รีเจนเนอเรทีฟ ($\alpha_1 + \alpha_2$) มีแนวโน้มเท่ากับ 1 และไทรสเตอร์นำกระแสเนื่องจากอุณหภูมินี้ ทำให้เกิดความร้อนสูง ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด

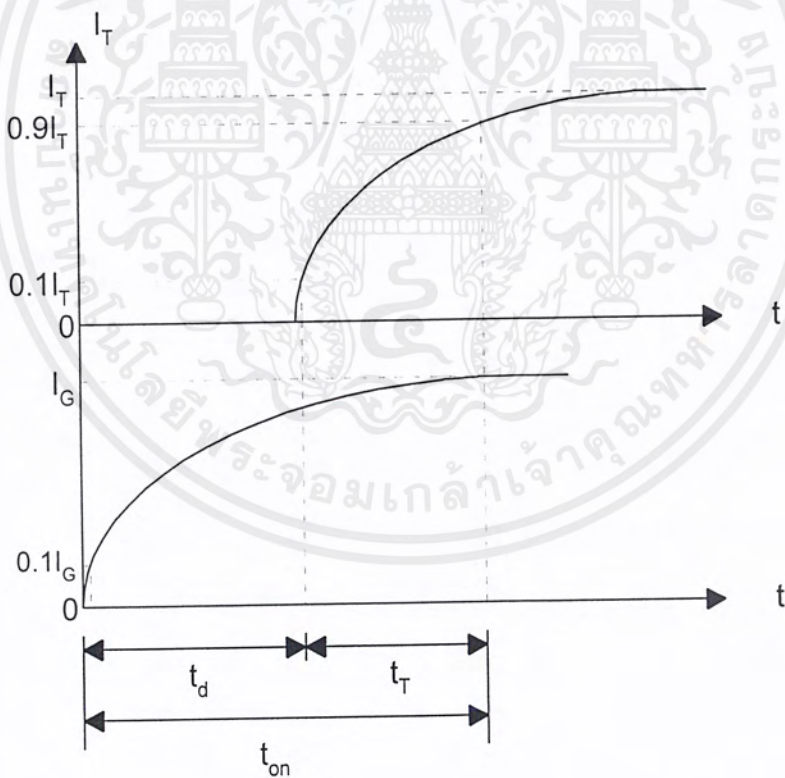
แสง ถ้ามีแสงตกบนรอยต่อของไทรสเตอร์ ทำให้คู่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ไทรสเตอร์อาจนำกระแสได้ ซึ่งเกิดจากแสงกระทบชั้นซิติคอนของไทรสเตอร์

แรงดันสูง ถ้าแรงดันไบแอสตรงที่จ่ายให้กับแอโนด - แคโทด มีค่าสูงกว่าแรงดันพังทลาย V_{BO} ค่ากระแสรั่วไหลจะกระตุ้นให้เกิดนำกระแสแบบรีเจนเนอเรทีฟ การนำกระแสแบบนี้อาจทำให้ไทรสเตอร์เสียหาย ควรหลีกเลี่ยง

dv/dt อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันแอโนดแคโทดมีค่าสูง กระแสซาร์จของตัวเก็บประจุที่รอยต่ออาจมีค่าสูงจนทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสได้ และอาจทำให้ไทรสเตอร์เสียหาย และไทรสเตอร์ต้องป้องกัน dv/dt ที่มีค่าสูงมาก ผู้ผลิตควรระบุค่า dv/dt ของไทรสเตอร์สูงสุดที่ยินยอมได้

กระแสเกต ถ้าทรานซิสเตอร์มีการไบแอสตรง และมีกระแสเกตไหลโดยการป้อนแรงดันบวกที่เกตเมื่อเทียบกับแคโทด จะเป็นการทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสขณะที่กระแสเกตเพิ่มขึ้น กระแสเบสล็อกกิง ไบแอสตรงจะลดลง ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสเอโบนตามด้วย เมื่อป้อนกระแสเกตจะมีช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่าช่วงเวลานำกระแส t_{on} ระหว่างเวลาการป้อนสัญญาณเกต และการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ t_{on} นิยามว่า เป็นช่วงเวลาระหว่าง 10 % ของกระแสเกตที่สถานะคงตัว ($0.1 I_G$) กับ 90 % ของกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ที่สถานะคงตัว ($0.9 I_T$) t_{on} คือผลบวกของเวลาประวิง t_d และเวลาช่วงขึ้น t_r โดย t_d คือช่วงเวลาระหว่าง 10% ของกระแสเกต ($0.1 I_G$) และ 10% ของกระแสที่สถานะออนของทรานซิสเตอร์ ($0.1 I_T$) t_r คือเวลาที่ใช้สำหรับกระแสเอโบนในการเพิ่มจาก 10% ของกระแสสถานะ ON ($0.1 I_T$) ไปถึง 90% ของกระแสสถานะ ON ($0.9 I_T$) ซึ่งเวลาทั้งหมดได้แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงคุณลักษณะของเวลาในการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ (Turn – on characteristic)

จุดต่อมาที่ควรพิจารณาในการออกแบบวงจรควบคุมเกด คือ

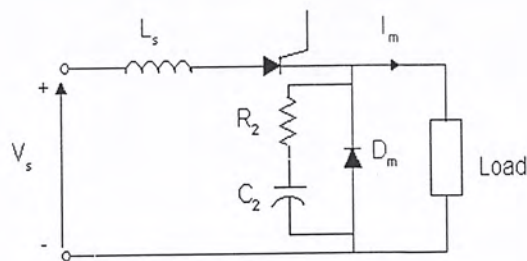
1. สัญญาณเกดควรถูกปลดออกเมื่อไทรสเตอร์นำกระแสแล้ว สัญญาณเกดที่มีต่อไปจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรอยต่อเกด
2. ขณะที่ไทรสเตอร์ไบแอสกลับไม่ควรมียสัญญาณเกด นอกจากนี้ไทรสเตอร์อาจจะเสียหายเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลมากเกินไป
3. ความกว้างของพัลส์เกด t_G ต้องยาวกว่าช่วงเวลาที่ใช้สำหรับกระแสแอนโอด ในการเพิ่มถึงกระแสโหด I_H ในทางปฏิบัติความกว้างพัลส์จะยาวกว่าเวลานำกระแส t_{on} ของไทรสเตอร์

3.1.4 การป้องกัน di/dt

ไทรสเตอร์ใช้เวลาน้อยที่สุดในการแพร่กระแสไฟฟ้าให้ทั่วทั้งรอยต่อ ถ้าอัตราการเพิ่มของกระแสแอนโอดเร็วมาก เมื่อเทียบกับความเร็วของการแพร่ในขบวนการนำกระแส จะเกิดจุดของความร้อน (Hot-Spot) ความร้อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นกระแสมีค่ามาก ไทรสเตอร์อาจเสียหายได้เนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลามากเกินไป

ในทางปฏิบัติต้องป้องกันค่า di/dt ที่สูงเกินไป ดังในตัวอย่าง พิจารณาวงจรรูปที่ 3.5 ภายใต้สถานะคงตัว D_m นำกระแสเมื่อไทรสเตอร์ T_1 ไม่นำกระแส ถ้า T_1 ใหม่ เมื่อ D_m ยังคงนำกระแส di/dt จะมีค่าสูงมาก และสามารถจำกัดได้โดยเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ของวงจร ในทางปฏิบัติ di/dt จะลดลงโดยการอนุกรมตัวเหนี่ยวนำ L_S ดังรูปที่ 3.5

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_S}{L_S} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.5 วงจรสับไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำจำกัดค่า di/dt

3.1.5 การป้องกัน dv/dt

dv/dt หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมไทรสเตอร์ต่อเวลา ถ้าสวิทช์ S_1 ดังรูปที่ 3.6 (a) ปิดที่เวลา $t=0$ จะมีแรงดันสแตปป์อนคร่อมไทรสเตอร์ v_1 และ dv/dt อาจมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้นำกระแสได้ dv/dt จะถูกจำกัดโดยการต่อ C_S ดังรูปที่ 3.6 (a) เมื่อไทรสเตอร์ T_1 นำกระแส กระแสคิซาร์จของ C_S จะถูกจำกัดโดย R_S ดังรูปที่ 3.6(b) การต่อ R_S และ C_S เข้าไปขนานกับไทรสเตอร์ เรียกว่า วงจรสแนบเบอร์ (Snubber circuit)

เมื่อนำวงจร RC ที่รู้จักในนามวงจรสแนบเบอร์เพิ่มเข้าไปป้องกันไทรสเตอร์ แรงดันคร่อมไทรสเตอร์จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังรูป 3.6 (c) และวงจร dv/dt หาได้จาก

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.632V_S}{\tau} = \frac{0.632V_S}{R_S \cdot C_S} \quad (3.2)$$

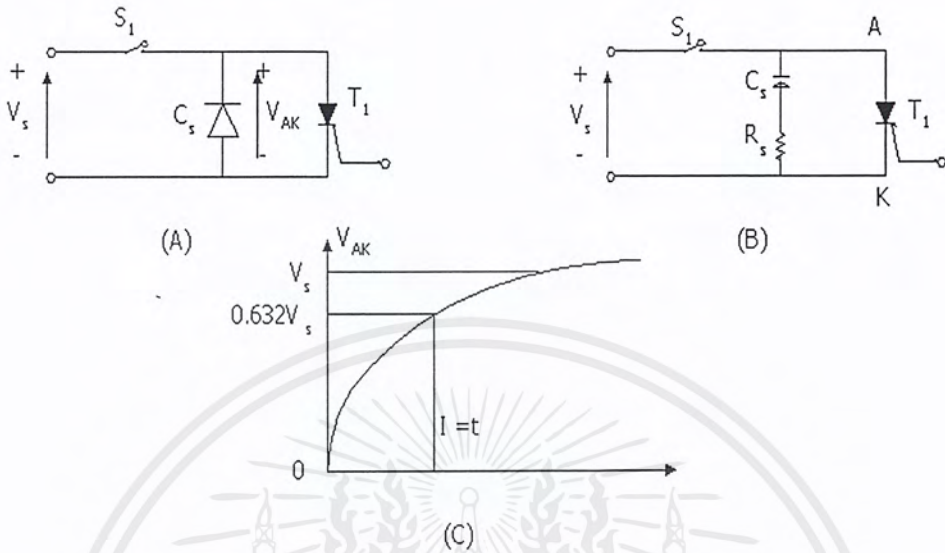
ค่าคงที่เวลาสแนบเบอร์ $t = R_S C_S$ หาได้จากสมการ 3.2 สำหรับค่า dv/dt ค่า R หาจากกระแสคิซาร์จ I_{TD}

$$R_S = \frac{V_S}{I_{TD}} \quad (3.3)$$

เป็นไปได้ที่จะใช้ความต้านทานมากกว่า 1 ตัว สำหรับ dv/dt และคิซาร์จ ค่า dv/dt จำกัดโดยค่า R_1 และ $C_S(R_1 + R_2)$ จำกัดกระแสคิซาร์จ เพื่อให้โหลดสามารถอนุกรมกับวงจรสแนบเบอร์ ค่า I_{TD} หาได้จากสมการ (4.10) และอัตราการหน่วง δ ของสมการอันดับสองคือ สมการ 3.5 เมื่อ L_S คือตัวเหนี่ยวนำรวม และ L คือตัวเหนี่ยวนำโหลด

$$I_{TD} = \frac{V_S}{R_1 + R_2} \quad (3.4)$$

$$\delta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \sqrt{\frac{C_S}{L_S + L}} \quad (3.5)$$

รูปที่ 3.6 วงจรป้องกัน dv/dt ด้วยสแน็บเบอร์

3.1.6 การหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์

หลักการที่จะทำให้ไทรสเตอร์หยุดการนำกระแสได้ คือ ลดกระแสที่ผ่านแอนโอดให้ต่ำกว่ากระแสโฮลดีง (I_H) เทคนิคต่าง ๆ ที่จะใช้หยุดนำกระแสของไทรสเตอร์มีหลายวิธี แต่สามารถสรุปรวมได้ 2 หลักการ คือ

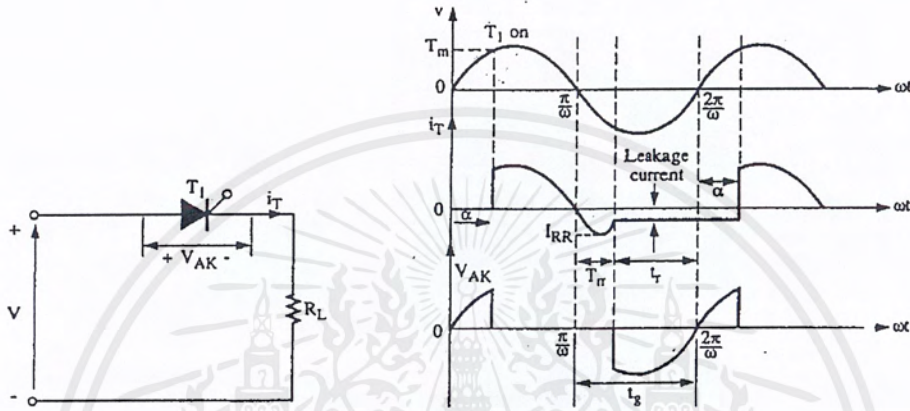
1. การหยุดนำกระแสด้วยวิธี **Line commutation** คือการใช้ไทรสเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายลดลงเป็นศูนย์ ก็จะทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสโดยธรรมชาติ วิธีนี้อาจเรียกว่าการสับเปลี่ยนแบบธรรมชาติ (Natural Commutation) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (a)

2. การหยุดนำกระแสด้วยวิธี **Forced commutation** คือ การใช้เทคนิคการตัดต่อกระแสหรือแรงดันไปยังขั้วการไบแอสไทรสเตอร์ เพื่อให้กระแสแอนโอดลดลงให้น้อยกว่ากระแสโฮลดีง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (b)

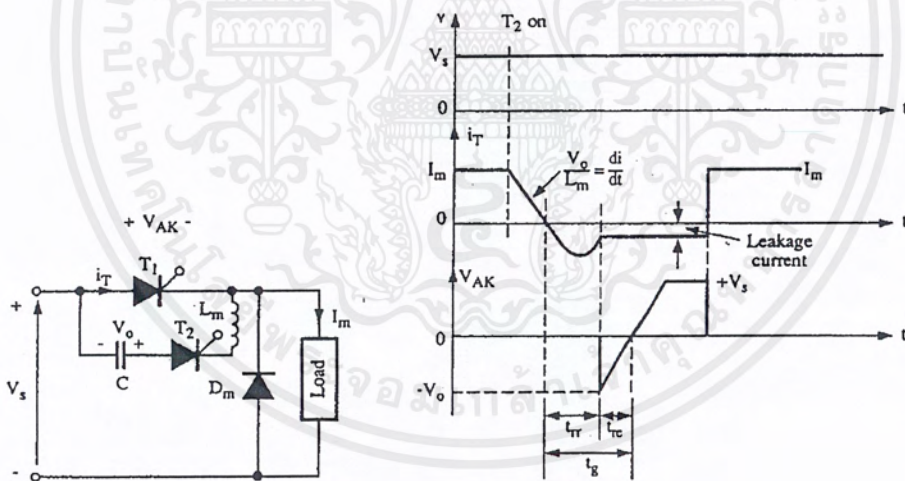
ไม่ว่าจะใช้วิธีใดทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแส ควรคำนึง 2 สิ่งต่อไปนี้ คือ

1. ต้องทำให้กระแสแอนโอดต่ำกว่าค่ากระแสโฮลดีง
2. เมื่อกระแสไหลต่ำกว่ากระแสโฮลดีงแล้วต้องให้กินเวลานานกว่าเวลาหยุดนำกระแส (Turn - off time) ของไทรสเตอร์แต่ละตัวตามที่กำหนดในคู่มือ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.7 จะพบว่า Turn-off time (t_q) มีค่าเท่ากับ $t_{rr} + t_{rc}$ เมื่อ t_{rr} คือ reverse recovery time และ t_{rc} คือ Recombination time ภายในรอยต่อของไทรสเตอร์ค่า t_q นี้จะบอกถึงคุณสมบัติความเร็วในการสวิตช์ของไทรสเตอร์



(ก) Line-commutated thyristor circuit



(ข) Forced-commutated thyristor circuit

รูปที่ 3.7 แสดงถึงกระบวนการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์

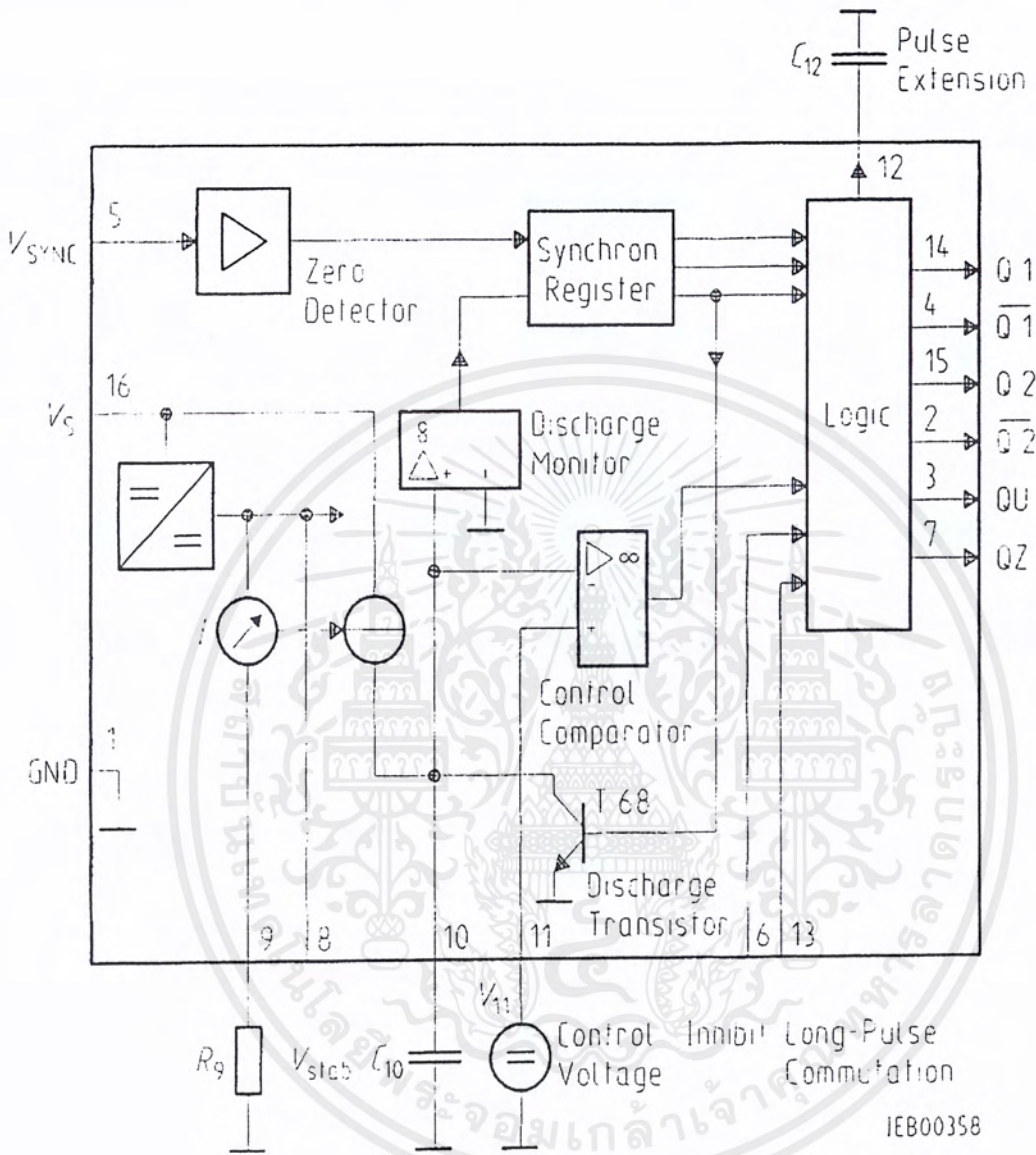
การที่จะทำให้ไทรสเตอร์ทำงานได้นั้น มีหลักการ คือใช้พัลส์จุดชนวนที่สามารถจ่ายกระแสให้กับเกตของไทรสเตอร์อย่างเพียงพอและเป็นเวลานานกว่าช่วงเวลาไทรสเตอร์ต้องการในเวลาทำงาน จนกระทั่งกระแสไหลลดไหลผ่านแอนโอดของไทรสเตอร์เกินกว่าค่ากระแสค้าง(IL) ไทรสเตอร์จึงจะทำงานได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีการใช้วงจรรวมสำหรับงานการควบคุมเฟสที่สร้างขึ้นมาจากใช้งานเฉพาะ เช่น วงจรรวมเบอร์ TCA 780 หรือ TCA 785 ก็จะสามารถสร้างการจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงๆได้

3.2.1 คุณสมบัติของวงจรรวม TCA 785

วงจรรวมเบอร์ TCA 785 ผลิตโดยบริษัท siemens ประเทศเยอรมัน ใช้ในงานควบคุมเฟสโดยเฉพาะ หรือใช้ได้กับวงจร Line commutated converter ใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส สามารถปรับมุมจุดชนวนเกตได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา และสามารถสร้างลักษณะพัลส์ได้หลายรูปแบบตามลักษณะของโหลด และสามารถใช้งานได้ดีในย่านความถี่ระหว่าง 10 Hz ถึง 500 Hz ต้องการไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 8 โวลต์ดีซี ถึง 18 โวลต์ดีซี ใช้งานได้ดีในย่านอุณหภูมิ -25 ถึง +85 องศาเซลเซียส กินกระแสไฟฟ้าประมาณ 4.5 มิลลิแอมป์ ถึง 10 มิลลิแอมป์ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้านอกของวงจรที่ขา 14 และ 15 ได้ประมาณ 250 มิลลิแอมป์ โดยที่สัญญาณด้านออกมีทั้งแบบปกติและแบบกลับสัญญาณ มี Inhibit Function ควบคุมการกำเนิดสัญญาณ และสามารถใช้งานในลักษณะ Zero crossing ได้ด้วย

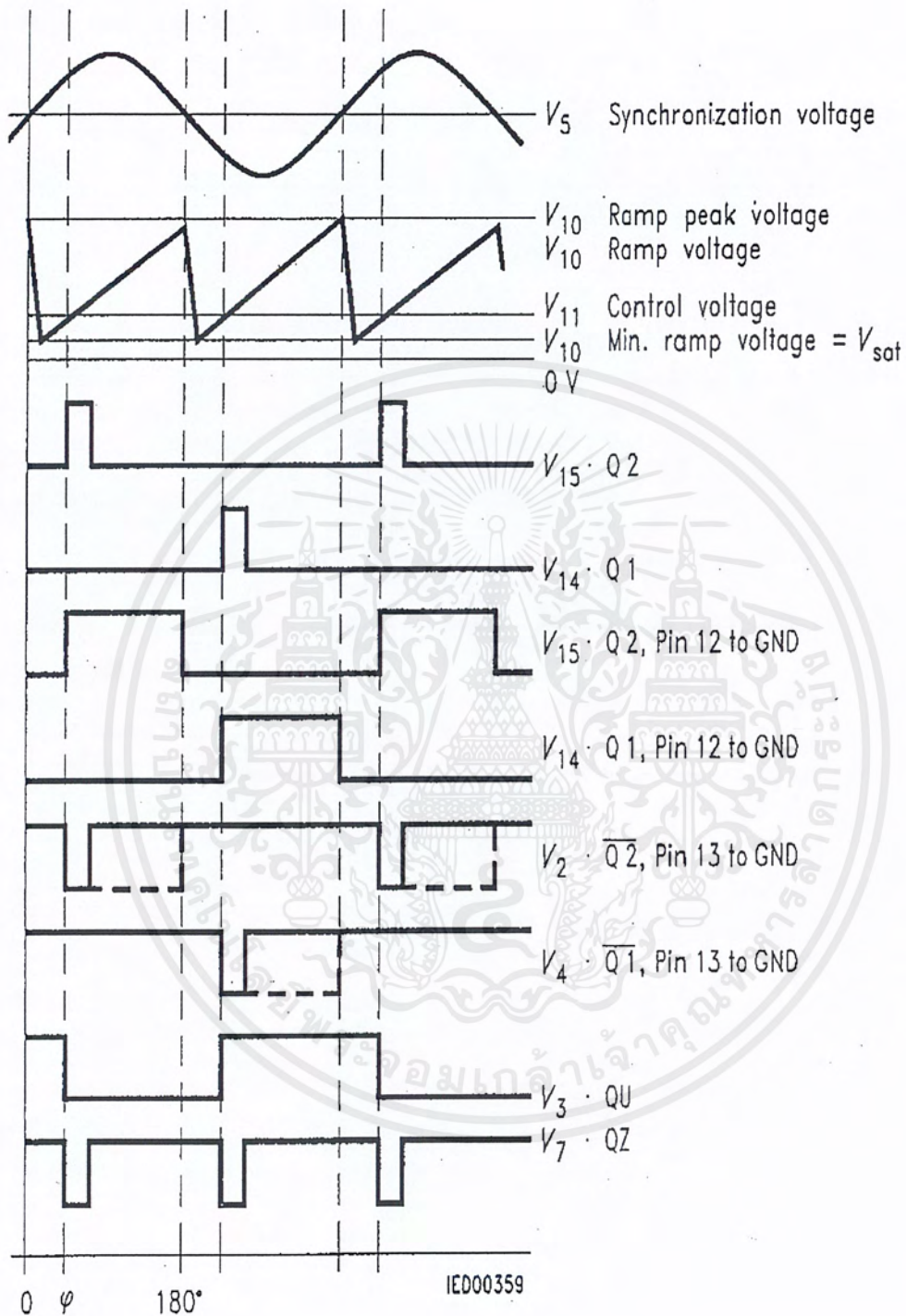
3.2.2 การทำงานของวงจรรวม TCA 785

พิจารณาโครงสร้างภายในของ TCA 785 ซึ่งเป็นวงจรรวมแบบ LSI มี 16 ขา บรรจุด้วยตั้งถึงพลาสติก ดังรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าขา 16 คือ $+V_s$ รับแรงดันไบแอสในย่าน +8 โวลต์ดีซี ถึง +18 โวลต์ดีซี โดยที่ขา 1 เป็นกราวด์ แรงดันควบคุมภายในเป็นแรงดันอ้างอิง คือ $V_{ref} = 3.1$ โวลต์ วัดได้ที่ขา 8 โดย C_8 ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน ขา 5 คือ ขาที่รับแรงดันซิงโครไนซ์ ซึ่งเป็นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับที่ต่อกับวงจรภาคกำลัง โดยต่อนิวตรอนเข้าที่ขา 1, R_9 , ตัวสร้างสัญญาณลาดเอียง และ C_{10} คือ ตัวเก็บประจุสัญญาณลาดเอียงต่อกับขา 9 และขา 10 ตามลำดับ ค่าของ C_{10} อยู่ในย่าน 500 pF ถึง 1 uF และ R_9 มีค่าเหมาะสมในย่าน $3k\Omega$ ถึง $300k\Omega$



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างภายในของวงจรรวมเบอร์ TCA 785

ค่า R_9 และ C_{10} จะเป็นตัวกำหนดของสัญญาณลาดเอียง (V_{10}) ถ้า R_9 และ C_{10} มีค่ามาก ความลาดเอียงของ V_{10} จะมีค่ามากตามไปด้วย ขา 11 ของ TCA 785 คือค่าที่ต่อแรงดันควบคุม เป็นแรงดันไฟตรงปรับค่าได้ แรงดันควบคุม (V_{11}) นี้จะป้อนเข้าขาบวกของออมแอมป์



รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นสัญญาณด้านเข้า และด้านออกที่สำคัญของวงจรรวมเบอร์ TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบสัญญาณควบคุมได้ดังรูปที่ 3.8 โดยเทียบแรงดันกับ V_{10} เพื่อกำหนดมุมจุดชนวนที่ด้านออกของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าสัญญาณด้านออกของวงจรอยู่ที่ขา 14 และ ขา 15 โดยพัลส์ที่ขา 15 จะทำงานช่วงเวลา $\omega t = 0^\circ$ ถึง 180° และพัลส์ที่ขา 14 จะทำงานที่ช่วงเวลา $\omega t = 180^\circ$ ถึง 360° ขนาดความกว้างของพัลส์ด้านออกคือ β ปกติถ้าไม่ต่อ C_{12} จะมีค่า $\beta = 30 \mu\text{s}$ แต่สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยใช้ค่า C_{12} ต่อเข้าที่ขา 12 ดังแสดงความสัมพันธ์ของค่า C_{12} กับค่า β ในตารางที่ 3.1 สำหรับขาที่ 2 และ 4 คือสัญญาณกลับของ V_{15} และ V_{14} สัญญาณลักษณะพัลส์เดียวที่มี $\beta = 30\mu\text{s}$ จะเกิดได้เมื่อไม่มีการต่อ C_{12} เข้าที่ขา 12 แต่ถ้าต้องการให้พัลส์ออกมีลักษณะเป็นพัลส์แบบยาว ทำได้โดยต่อขาที่ 12 กับกราวด์ แต่ถ้าต้องการให้สัญญาณออกที่ขา 2 และ 4 เป็นพัลส์แบบยาวด้วยจะต้องต่อขา 13 เข้ากับกราวด์ด้วยดังที่แสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของพัลส์ด้านออกกับค่า C_{12}

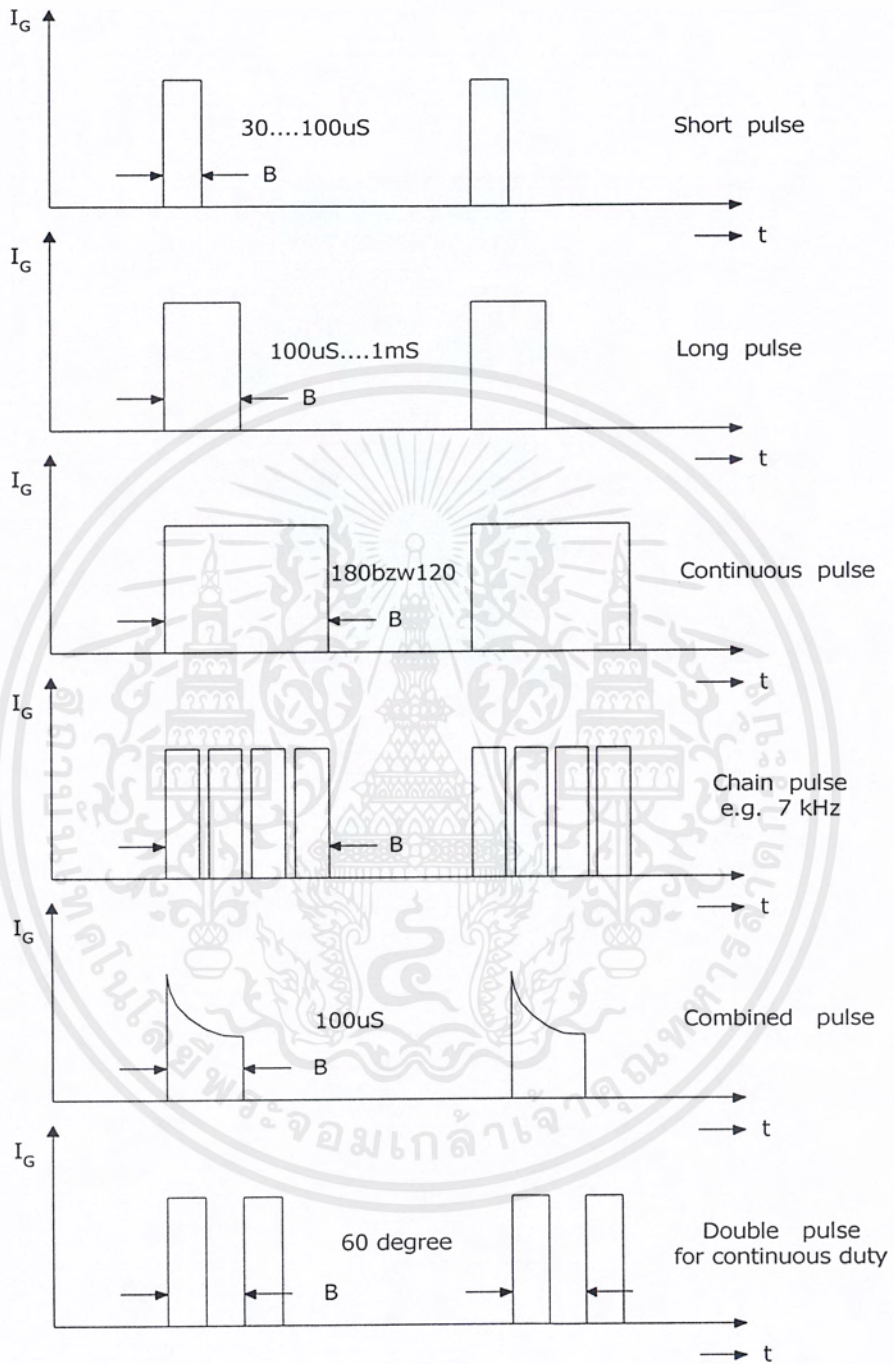
C_{12} (pF)	0	150	220	330	680	1000
ความกว้างพัลส์ (μs)	30	93	137	205	422	620

3.2.3 ลักษณะของพัลส์ด้านออกชนิดต่างๆ

การสร้างพัลส์ด้านออกให้มีรูปร่างแตกต่างกันนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดในวงจรกำลังที่ ไทริสเตอร์นั้นต่อควบคุมโหลดอยู่ ลักษณะของพัลส์มีหลายแบบดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- Short Pulse ($\beta = 30 - 100 \mu\text{s}$) สำหรับโหลดตัวต้านทาน
- Long Pulse ($\beta = 100 \mu\text{s} - 1 \text{ ms}$) สำหรับโหลดตัวต้านทานที่ดึงกระแสสูงๆหรือโหลดตัวเหนี่ยวนำ
- Continuous Pulse ($\beta = 180^\circ - \alpha$) สำหรับโหลดตัวเหนี่ยวนำที่ค่าสูงๆ
- Combined pulse สำหรับวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกต ($di/dt = 1$ ถึง $3 \text{ A ต่อ } \mu\text{s}$) หรือสำหรับจุดชนวนเกต ไทริสเตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน
- Double pulse ใช้สำหรับจุดชนวน ไทริสเตอร์ในวงจร 3 เฟส (6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

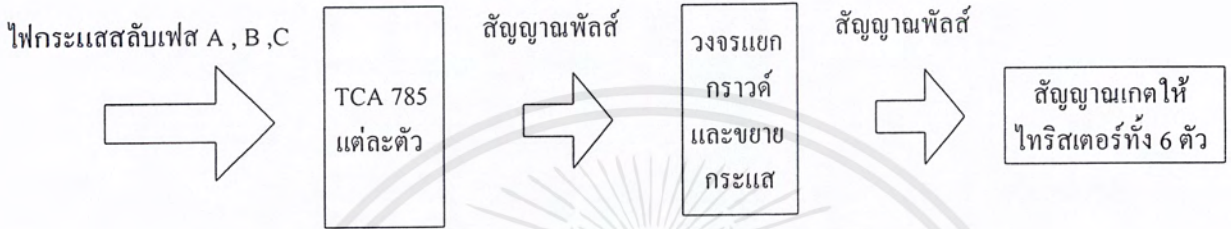


รูปที่ 3.10 ลักษณะของพัลส์จุดชนวนเกตของไทรสเตอร์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรจุดชนวนเกตที่ใช้

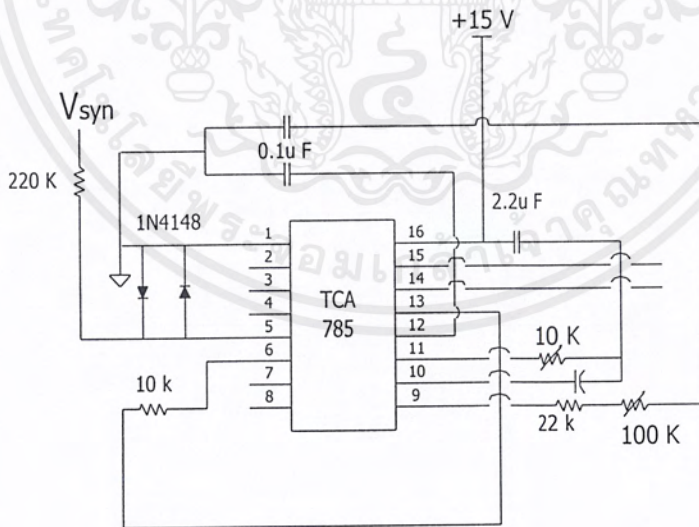
ในการจุดชนวนเกตให้กับ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์นั้น ต้องใช้ไฟกระแสสลับ 3 เฟสจ่ายเข้า วงจรรวม TCA 785 จำนวน 3 ตัว เพื่อใช้เป็นสัญญาณเกตให้กับไทรสเตอร์ทั้ง 6 ตัว ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงวงจรจุดชนวนเกตให้กับ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

โดยแต่ละส่วนใช้วงจรดังนี้

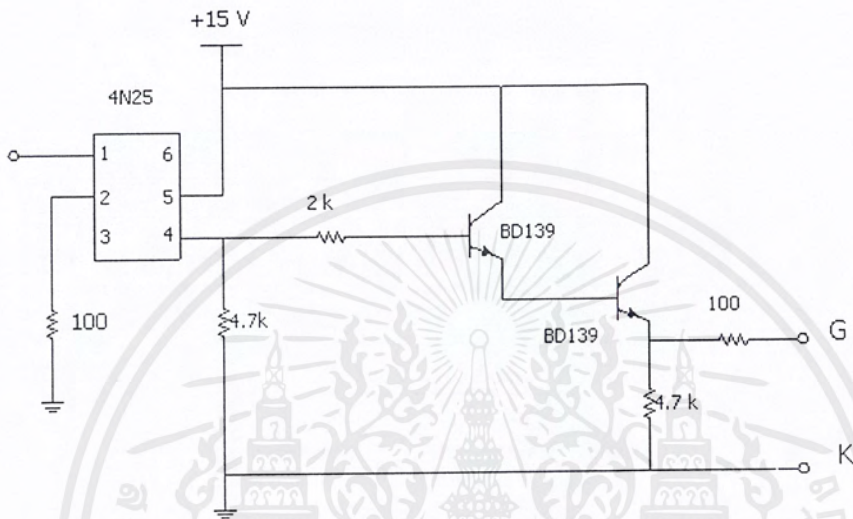
3.3.1 วงจรรวม TCA 785



รูปที่ 3.12 วงจรรวม TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วงจรแยกกราวด์และขยายกระแส

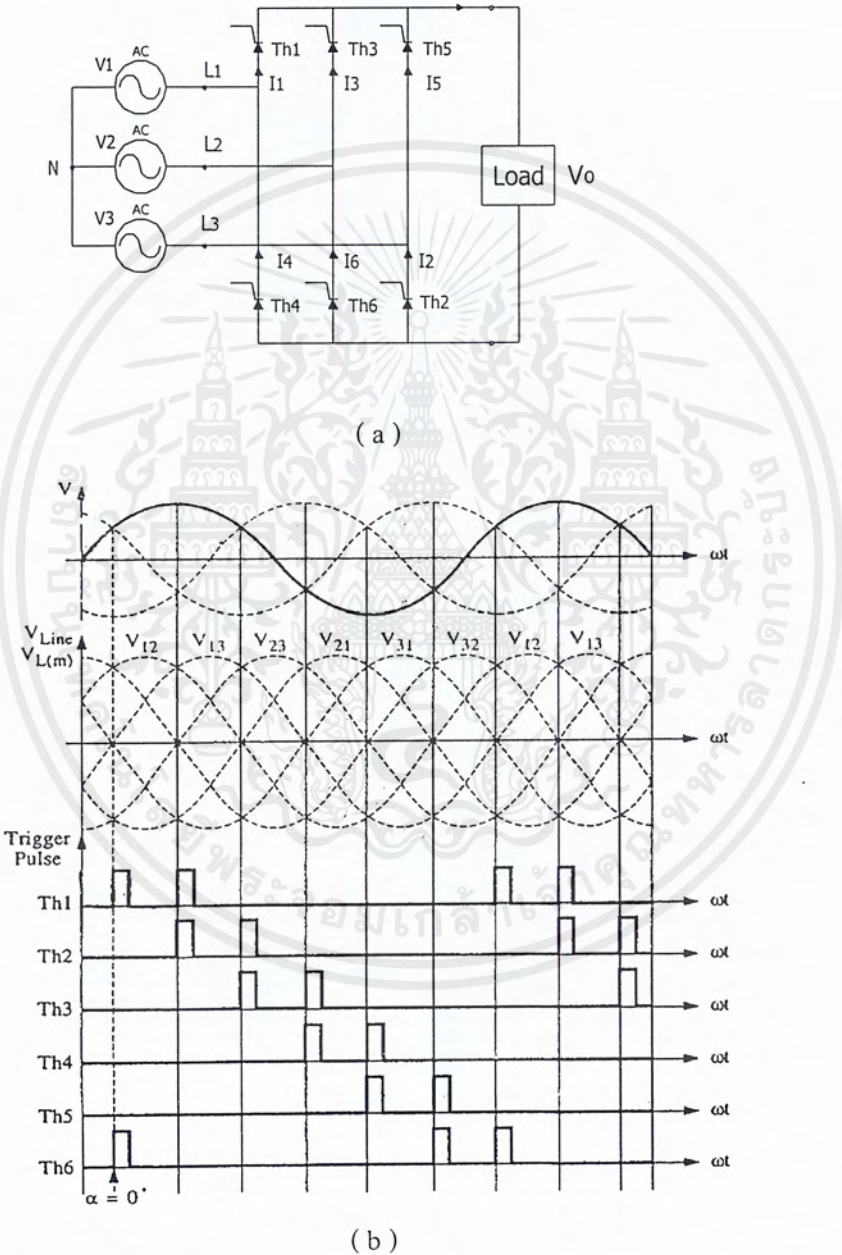


รูปที่ 3.13 วงจรแยกกราวด์และขยายกระแส

จากรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 วงจรรวม TCA 785 จะสร้างสัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา 15 และขา 14 มาเข้าที่ขา 1 ของออปโตเบอร์ 4N25 เพื่อทำการแยกกราวด์ หลังจากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ออกจากขา 4 ของ ออปโตเบอร์ 4N25 จะถูกขยายกระแสโดยทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 139 ที่ต่อคาร์ลิงตันกันอยู่ เพื่อจุดชนวนเกิดให้ทรินสเตอร์ทั้ง 6 ตัว สามารถทำงานได้

3.4 การทำงานของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

ในการทำงานของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ ไทริสเตอร์ทั้ง 6 ตัว จะทำงานเป็นคู่โดยที่แต่ละคู่จะทำงานพร้อมกันตามลำดับการป้อนสัญญาณจุดชนวนแสดงในรูปที่ 3.14(a) และ 3.14(b)



รูปที่ 3.14 (a) วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

(b) รูปคลื่นแรงดันและลำดับสัญญาณจุดชนวนของไทริสเตอร์ทั้ง 6 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 (b) จะพบว่าลำดับชั้นการจุดชนวนของไตรสเตอร์ทั้ง 6 ตัว จะเป็นไปตามลำดับ ดังนี้ คือ (พิจารณาที่มุม $\alpha = 0^\circ$)

ไตรสเตอร์ตัวที่ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\alpha = 0^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ทำงานที่มุม $\alpha = 60^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 2 และ 3 ทำงานที่มุม $\alpha = 120^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 3 และ 4 ทำงานที่มุม $\alpha = 180^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 4 และ 5 ทำงานที่มุม $\alpha = 240^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 5 และ 6 ทำงานที่มุม $\alpha = 300^\circ$

ไตรสเตอร์ตัวที่ 6 และ 1 ทำงานที่มุม $\alpha = 360^\circ$

จะเห็นว่าที่จำนวนมุมจุดชนวน $\alpha = 0^\circ$ ไตรสเตอร์แต่ละตัวจะนำกระแสเป็นมุมเท่ากับ 60° และที่มุม α โตขึ้น จำนวนมุมนำกระแสก็จะลดลง

และจากรูปที่ 3.14 (b) จะเห็นว่าเมื่อปรับมุมจุดชนวนที่มุม $\alpha = 0^\circ$ สัญญาณพัลส์แรกของ ไตรสเตอร์ตัวที่ 1 จะล่าหลังแรงดันเฟสของเฟส A อยู่ 30° ดังนั้นสัญญาณพัลส์แรกของ ไตรสเตอร์ตัวที่ 1 ที่มุมจุดชนวนเกิดใดๆ เมื่อเทียบกับแรงดันเฟสของเฟส A จะล่าหลังอยู่เป็นมุมเท่ากับมุมจุดชนวนนั้นบวก อีก 30° เช่น

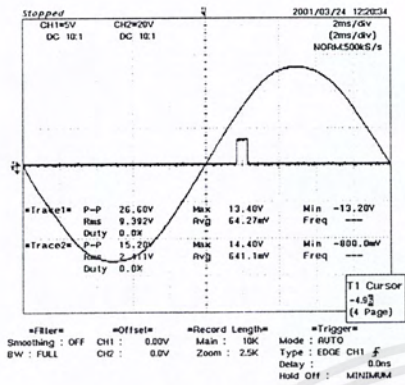
ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 0^\circ$ จะล่าหลังเป็นมุมเท่ากับ $0^\circ + 30^\circ = 30^\circ$

ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 30^\circ$ จะล่าหลังเป็นมุมเท่ากับ $30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$

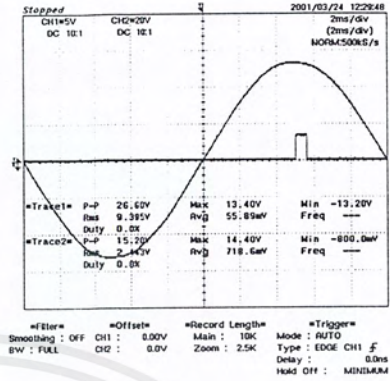
ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 60^\circ$ จะล่าหลังเป็นมุมเท่ากับ $60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$

ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 90^\circ$ จะล่าหลังเป็นมุมเท่ากับ $90^\circ + 30^\circ = 120^\circ$

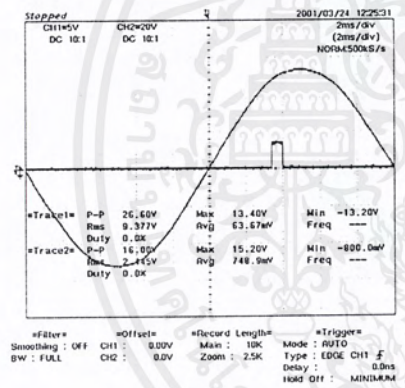
ดังแสดงในรูปที่ 3.15



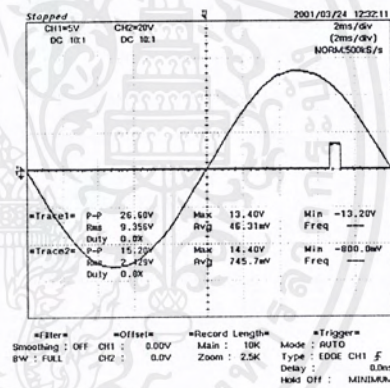
(a)



(c)



(b)



(d)

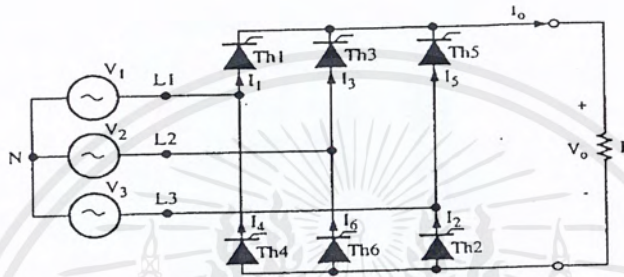
รูปที่ 3.15 การปรับมุมจุดชนวนเกตที่มุมต่างๆ โดยดูจากสัญญาณพัลส์แรกของทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 เทียบกับแรงดันเฟสของเฟส A

- (a) ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 0^\circ$
- (b) ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 30^\circ$
- (c) ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 60^\circ$
- (d) ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 90^\circ$

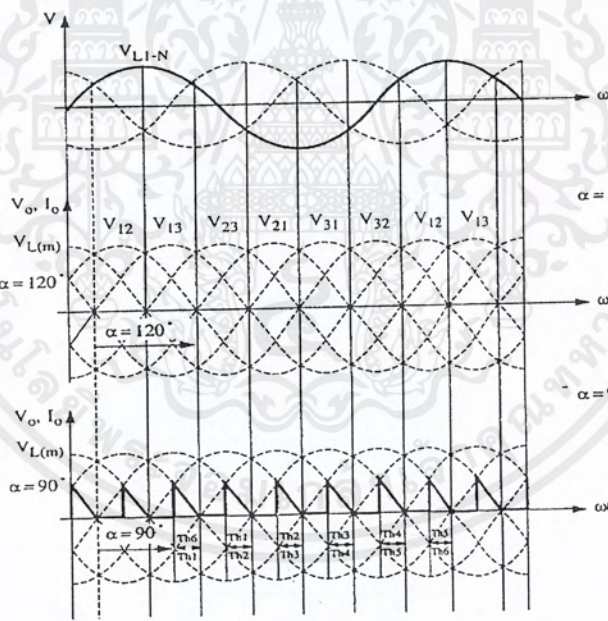
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ลักษณะการใช้งานของวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

3.5.1 เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน การทำงานของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวให้พิจารณาในรูปที่ 3.16 (a) และรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_o) และกระแสที่ไหลผ่านโหลด (I_o) ในรูปที่ 3.16 (b)



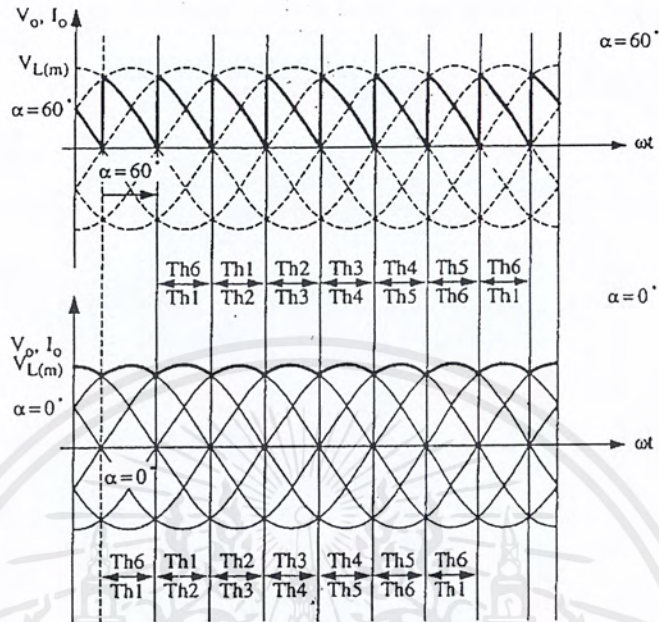
(a) วงจรควบคุมเต็มบริดจ์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน



(b) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด

รูปที่ 3.16 (a) วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน

(b) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด



(b) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโพลดและกระแสโพลดผ่านโพลด (ต่อ)

รูปที่ 3.16 (ต่อ)

จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโพลด (V_o) จะปรากฏเมื่อมุม α มีค่าระหว่าง 0° ถึง 120° เท่านั้น และที่มุมจุดชนวนเกด α มีค่าระหว่าง 0° ถึง 60° ($0^\circ < \alpha < 60^\circ$) กระแสโพลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าจุดชนวนเกดที่มุม α มากกว่า 60° แต่ไม่เกิน 120° ($0^\circ < \alpha < 120^\circ$) กระแสโพลดจะไหลไม่ต่อเนื่อง ทำให้การพิจารณาหาสมการแรงดันตกคร่อมโพลดเกิดขึ้น 2 กรณี

1. เมื่อจุดชนวนเกดที่มุม $0^\circ < \alpha < 60^\circ$

- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โพลด คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} (\cos \alpha) \tag{3.6}$$

- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์.เอ็ม.เอส.ที่โพลด คือ

$$V_{o(RMS)} = \sqrt{3} \cdot V_m \sqrt{\left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} (\cos 2\alpha) \right]} \tag{3.7}$$

2. เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม $60^\circ < \alpha < 120^\circ$

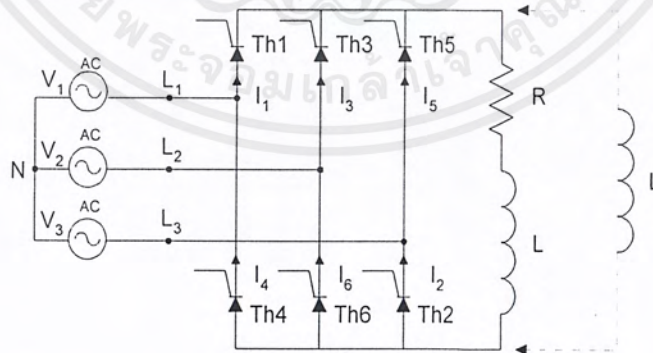
- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right] \quad (3.8)$$

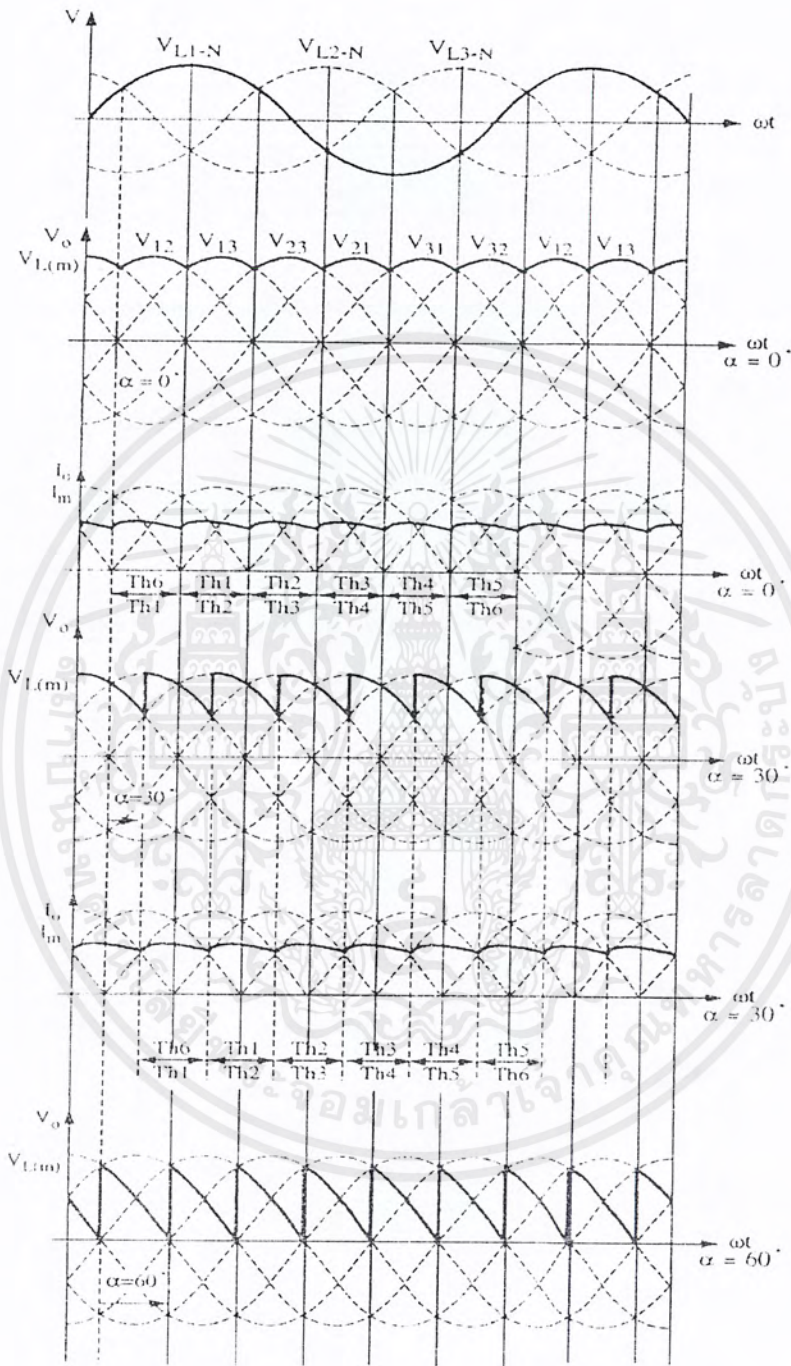
- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์.เอ็ม.เอส.ที่โหลด คือ

$$V_{o(RMS)} = \frac{3V_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2\pi}{3} - \alpha + \frac{1}{4} \left[\sqrt{3} \cos 2\alpha + \sin 2\alpha \right]} \quad (3.9)$$

3.5.2 เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำนี้ รวมถึงเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำที่ค่า ωL สูงมากๆ ($\omega L \gg R$) อีกด้วย ซึ่งลักษณะการควบคุมวงจรดังกล่าว จะแตกต่างจากกรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน กล่าวคือเมื่อจุดชนวนเกตที่มุม α มากกว่า 60° จะเกิดรูปคลื่นด้านลบตกคร่อมโหลด และเมื่อมุม α มีค่ามากกว่า 90° จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์ ลักษณะของวงจรเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำแสดงในรูปที่ 3.17 (a) และรูปคลื่นกระแสและแรงดันขาออกของวงจรแสดงในรูปที่ 3.17 (b)

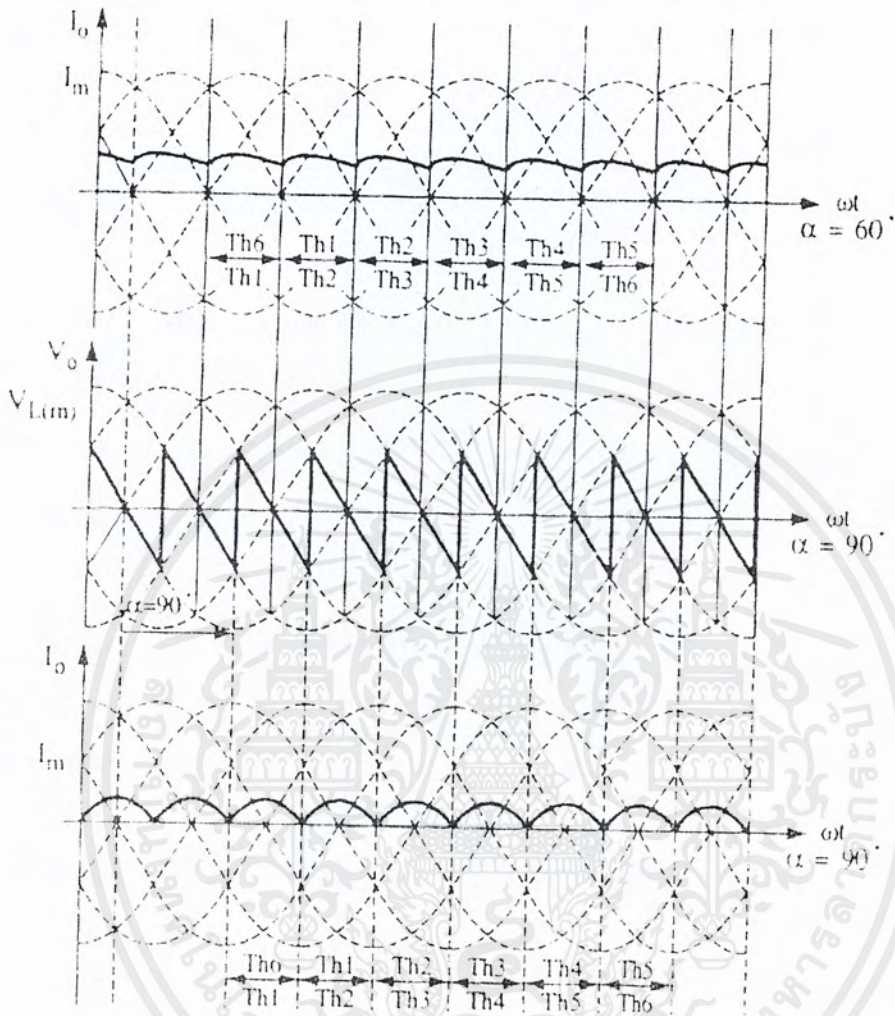


รูปที่ 3.17 วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ เมื่อ โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ และจุดชนวนเกตที่มุม $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 (ต่อ) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสโหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ และจุดชนวนเกตที่มุม $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อมุมจุดชนวนมีค่าระหว่าง 0° ถึง 90° เท่านั้น ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) และถ้าจุดชนวนมากกว่ามุม 90° จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเป็น ศูนย์ และลักษณะการไหลของกระแสเมื่อมุม α โดกว่า 90° จะไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง สมการคำนวณหา ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเกิดขึ้น 2 กรณี คือ

1. เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ กระแสไหลดไหลอย่างต่อเนื่อง

- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} (\cos \alpha) \quad (3.10)$$

- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์.เอ็ม.เอส.ที่โหลด คือ

$$V_{o(RMS)} = \sqrt{3} \cdot V_m \sqrt{\left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} (\cos 2\alpha) \right]} \quad (3.11)$$

2. เมื่อจุดชนวนเกตที่มุม $90^\circ < \alpha < 120^\circ$ กระแสไหลดไหลไม่ต่อเนื่อง

- สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด คือ

$$V_{o(avg)} = 0 \quad (3.12)$$

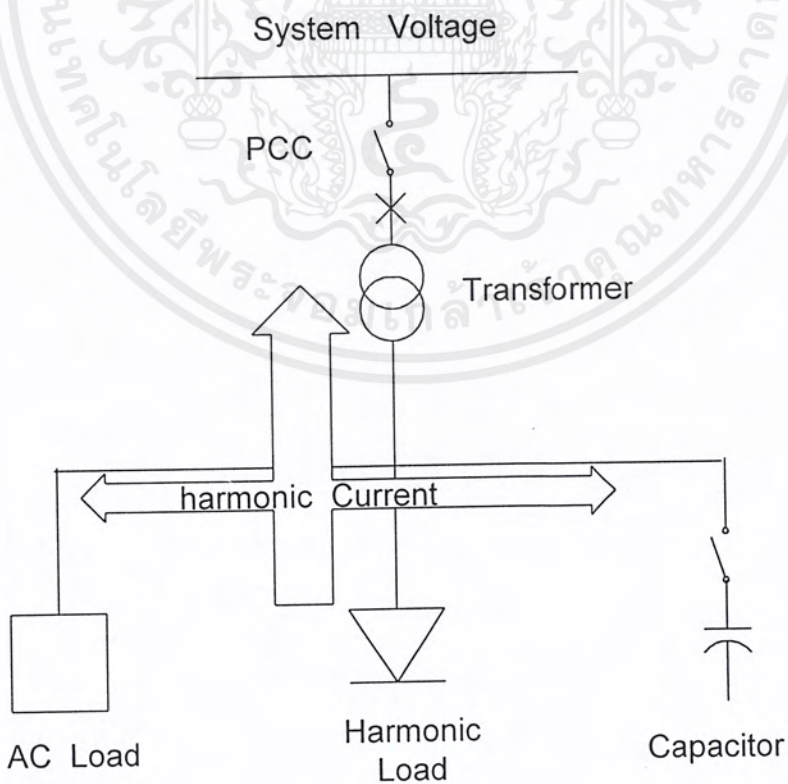
บทที่ 4

ตัวกรองและการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า ตัวกรองฮาร์มอนิก แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟตลอดจนถึงการคำนวณค่าส่วนประกอบต่างๆของตัวกรองฮาร์มอนิก และการทดสอบตัวกรองฮาร์มอนิกกับ โปรแกรม PSpice

4.1 ปัญหาฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า

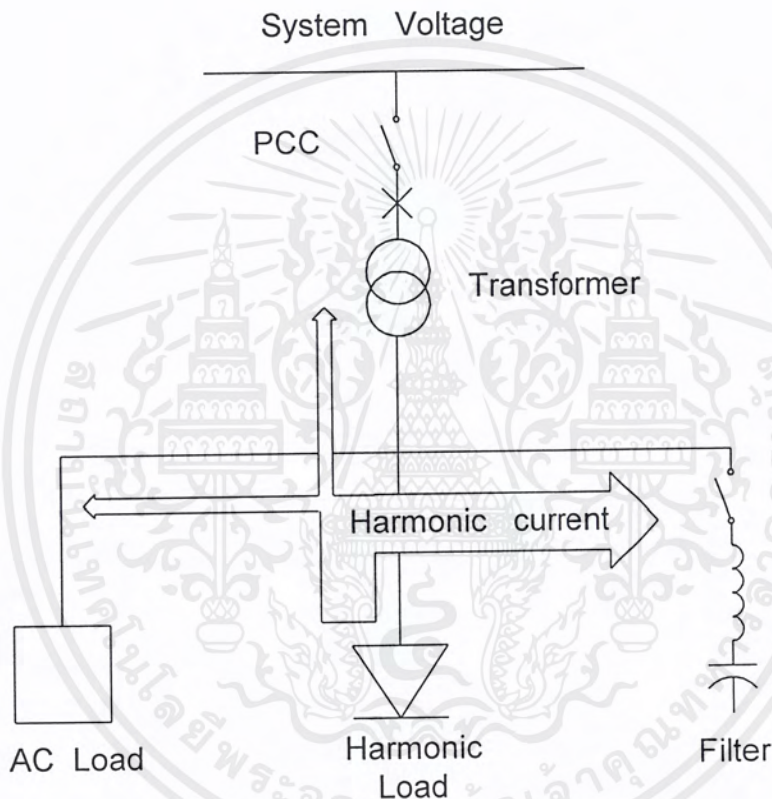
ระบบไฟฟ้าทั่วไปที่มีการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดสภาวะการเท่ากันของความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลังกับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบทำให้เกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ จนเกินค่ากระแสพิคคของอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายหรือเกิดระเบิดได้ และยังทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าไปในระบบดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปเนื้อหาหรือคัดลอกเนื้อหาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดเดียวเข้ากับระบบไฟฟ้าซึ่งทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลในระบบไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานฮาร์มอนิกกำหนดไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

4.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

4.2.1 คำจำกัดความเบื้องต้นของตัวกรอง (Filter)

ฟิลเตอร์เป็นตัวกรองที่ทำงานโดยอาศัยการปรับความถี่เพื่อให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

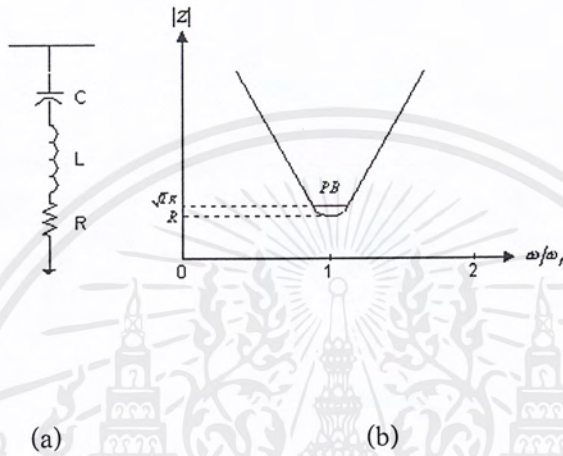
คุณภาพของตัวกรอง(Q) เป็นตัวที่ใช้บอกค่าความคม ความเที่ยงตรง ในการปรับตัวกรอง โดยที่เราจะสามารถอาศัยคุณภาพของตัวกรองเป็นเกณฑ์แบ่งชนิดของตัวกรองได้เป็นตัวกรองโดย

ที่ เราจะสามารถอาศัยคุณภาพของตัวกรองเป็นเกณฑ์แบ่งชนิดของตัวกรองๆ ได้เป็น 2 แบบดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชนิดที่มีคุณภาพของตัวกรอง(Q)สูง

โดยปกติจะมีคุณภาพอยู่ในช่วง 30-60 และใช้ในกรณีที่ปรับเพื่อกำจัดฮาร์โมนิกที่ความถี่หนึ่งซึ่งมีความถี่ต่ำ

วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (band pass filter)



รูปที่4.3 (a) วงจรฟิลเตอร์ ซิงเกิลจูน (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

$$Q = X_0/R = \omega_n/PB \quad (4.1)$$

โดยที่

X_0	เป็นค่าเอกแทนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือเอกแทนซ์ของตัวเก็บประจุ
R	เป็นค่ารีซิสแตนซ์
ω_n	เป็นค่าความถี่ที่เราปรับในหน่วยเรเดียนต่อวินาที
PB	เป็นช่วงความถี่ผ่าน(Pass Band)

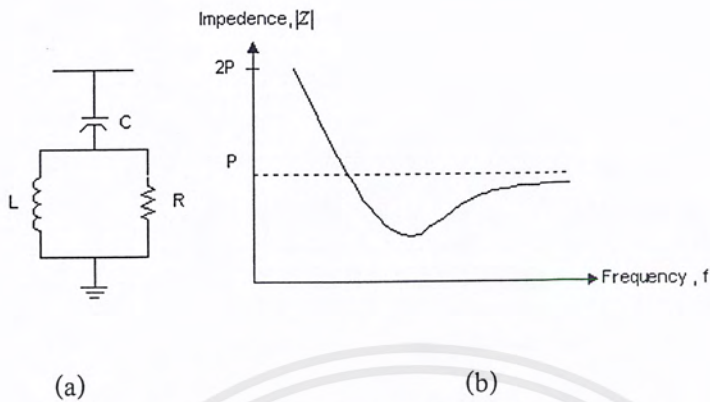
2. ชนิดที่มีค่าคุณภาพของตัวกรอง(Q)ต่ำ

โดยปกติจะคุณภาพอยู่ในช่วง 0.5-5.0 และใช้ในกรณีที่กำจัดฮาร์โมนิกที่ความถี่สูงๆ เช่น ฮาร์โมนิก ที่17 ขึ้นไป

วงจรกรองผ่านความถี่สูง (High Pass Filter)

$$Q = X_0/R \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 (a)รูปตัวกรองผ่านความถี่สูง (b) กราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

4.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบในการปรับตัวกรอง

1. การเปลี่ยนแปลงความถี่หลักมูล
2. การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ และค่าเหนี่ยวนำของตัวกรองตามอายุการใช้งานและอุณหภูมิ
3. ความคาดเคลื่อนจากการผลิตและขนาดที่จำกัดของลำดับชั้นการจูนความถี่การจูนของดีจูน แสดงตามสมการ

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega \quad (4.3)$$

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของ L และ C ไป 2% เหมือนการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไป 1% แสดงตามสมการเป็น

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (4.4)$$

4.2.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว

ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ซึ่งใช้ในโรงงานนี้มีหน้าที่หลักสำคัญ 2 ประการ คือ

1. จ่ายกำลังงานรีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลให้ระบบไฟฟ้า
2. กรองกระแส และ ลดแรงดันฮาร์มอนิก ในระบบไฟฟ้าให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยวจะใช้ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน มาต่อเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม เพื่อให้ตัวกรองมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับความต้านทาน



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดเดี่ยว

จากรูปที่ 4.5 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z_f = R + j \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \right) \quad (4.5)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.6)$$

ในสมการจะเห็นว่าค่า Z_f จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับค่า R เมื่อค่าความถี่ f มีค่าเป็น f_n

ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว ที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าควรมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในย่านความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการจะกรองทิ้ง
2. ค่าความกว้างแถบการกรองกระแสฮาร์โมนิกของตัวกรองฮาร์โมนิกชนิดเดี่ยวควรมีความกว้างของแถบการกรองกว้างพอสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

1. ฟิวเตอร์ที่ออกแบบสำหรับงานหนึ่งๆ ไม่ใช่แบบที่สามารถใช้กับงานทุกงานได้ ถ้าจะให้ฟิวเตอร์ทำงานได้ จะต้องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบทุกครั้งที่จะออกแบบ ค่ากระแสฮาร์มอนิก และข้อมูลต่างๆ ต้องใช้ค่าจริงที่ได้วัดเสมอ
2. ข้อมูลที่สำคัญที่ต้องทราบมีดังต่อไปนี้
 - กระแสฮาร์มอนิกต่างๆ จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก
 - แรงดันอิมพีแดนซ์ (Impedance Voltage)
 - วัดค่ากระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากโหลดที่อาจจะเพิ่มเข้าไปในระบบในอนาคต

4.2.4.1 ข้อคำนึง เกี่ยวกับตัวเก็บประจุที่ใช้ในตัวกรอง

1. ต้องมีการลดพิกัด (derate) สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้เนื่องมาจากฮาร์มอนิก
2. ในการออกแบบตัวกรองต้องคำนวณค่ารีโซแนนซ์ขนานใหม่ และต้องให้แน่ใจว่าไม่ไปตรงที่ระดับฮาร์มอนิกที่มีในระบบ
3. แรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสูงกว่าปกติเนื่องจากมีรีแอกเตอร์ต่ออยู่ เช่น ถ้าปรับตั้งที่ระดับฮาร์มอนิก 4.5 (225Hz) แรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5% ดังนั้น สำหรับระบบไฟฟ้า 415Hz ตัวเก็บประจุควรออกแบบสำหรับการทำงานที่ $415/0.95 = 440V$

4.2.4.2 ข้อคำนึงเกี่ยวกับรีแอกเตอร์

1. สำหรับดีจูนฟิวเตอร์ต้องปรับตั้งรีแอกเตอร์ให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีในระบบ เช่น ถ้าระบบมีระดับฮาร์มอนิกที่ 5 อยู่ ต้องปรับตั้งให้ต่ำกว่า 5 เป็นต้น
2. ถ้าปรับตั้งไปที่ระดับความถี่ 4.5 (225Hz) ฟิวเตอร์จะมีค่ารีแอกเตอร์เป็นอินดักทีฟ (ดูคล้ายมีอินดักแตนซ์ต่ออยู่อย่างเดียว) ที่ระดับฮาร์มอนิกที่ 5 และสูงกว่า ดังนั้นจึงเกิดรีโซแนนซ์ขนานที่ระดับฮาร์มอนิก 5 และสูงกว่าไม่ได้ นั่นคือกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 และสูงกว่าจะไหลเข้าตัวกรองน้อย
3. ระบบรีแอกเตอร์แรงดันต่ำ (LV reactor) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยอากาศ (iron-cored, air cooled) รีแอกเตอร์แรงดันสูง (HV reactor) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยน้ำมัน (iron-cored, oil-cooled)

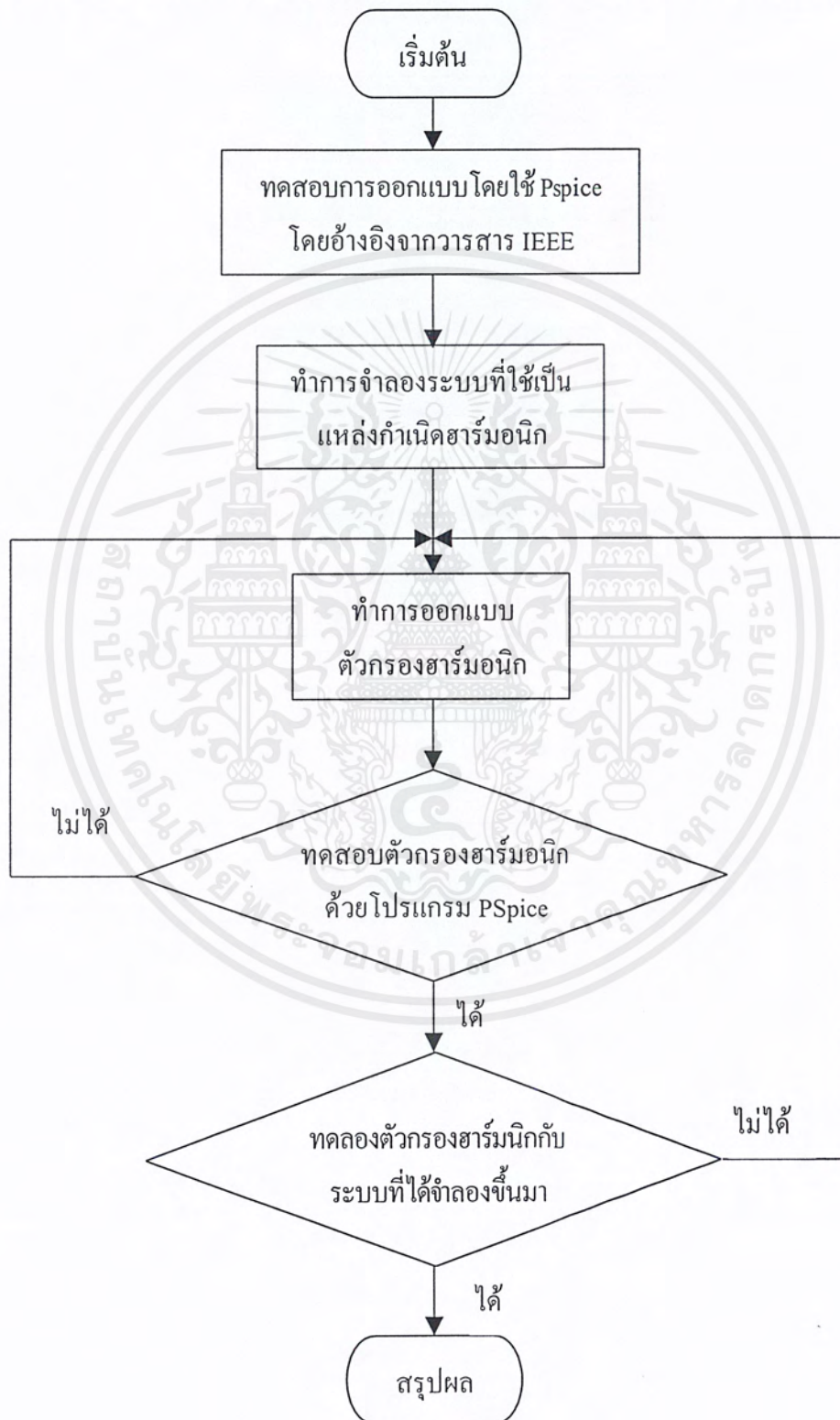
4. ระบบแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ใช้แบบหลายชั้นและควบคุมแบบอัตโนมัติแต่ละชั้น จะต้องมียรีแอกเตอร์ในทุกชั้นเพื่อให้ได้ว่าการเปิดปิดวงจร (switching)จะเป็นอย่างไร
5. การกรองแบบรีแอกเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุขนาด 50KVA ต้องระวังให้มาก ถ้าระบบมีกระแสฮาร์โมนิกสูงและอินดักแตนซ์ในการผลิตอาจทำให้เกิดรีโซแนนซ์ใกล้ระดับฮาร์โมนิกที่ 5 มาก ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะโหลดเกินมากในตัวเก็บประจุและรีแอกเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ

แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ใช้ในโครงการนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Flow Chart แสดงแนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Flowchart มีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

4.3.1 การใช้งานโปรแกรม PSpice

บทนำ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในงานหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะในด้านวิศวกรรม ได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ ออกแบบและจำลองการทำงานในทุกสาขา ในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้มีการนำเอาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบและจำลองการทำงานมาใช้ อย่างกว้างขวาง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะช่วยประหยัดเวลาในการออกแบบหรือทดสอบวงจรภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งค่าที่ได้จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองหรือเป็นตัวอ้างอิงกับผลการทดลองในกรณีที่มีการทดลองงานจริงมีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

โปรแกรม PSpice เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์และออกแบบวงจรไฟฟ้า แต่โปรแกรม PSpice นี้ไม่สามารถออกแบบวงจรให้เราได้เอง แต่เราจะใช้ในการตรวจสอบการออกแบบของวงจรที่เราออกแบบไว้ เราสามารถใช้ PSpice เพื่อทำการจำลองการทำงาน (Simulate) ของวงจรเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณออกแบบ ค่าที่ได้จะมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกันเพื่อยืนยันถึงความถูกต้อง แต่ถ้าผลลัพธ์ที่คำนวณไม่ตรง หรือเกิดการผิดพลาดในการจำลองการทำงาน (Simulate) แสดงว่าวงจรของเราไม่สามารถทำงานได้จริงในห้องปฏิบัติการหรือแสดงว่าต้องมีการแก้ไขในวงจรที่ออกแบบ

ประวัติความเป็นมาของ PSpice

ในสมัยก่อนวิศวกรผู้ออกแบบวงจรไฟฟ้าต้องทำงานหนัก เพื่อให้แน่ใจว่าวงจรไฟฟ้าที่ออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพถูกต้อง แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในงานด้านต่างๆ มากมาย ขณะเดียวกันก็นำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีชื่อเสียงมากในการจำลองการทำงาน (Simulate) ของวงจรไฟฟ้า ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรไฟฟ้าได้แก่ โปรแกรม PSpice

ในยุคแรกของการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ได้มีการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาที่มีชื่อว่า ECAP (Electronic Circuit Analysis Program) ของบริษัท IBM เป็นโปรแกรมที่ทำงานได้ดีในขณะนั้น แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ในระดับเมนเฟรมเท่านั้น ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และมีการพัฒนาเป็น โปรแกรมต่างๆ เช่น SPECTRE , TRAC , NET , CIRCUS , SPICE เรื่อยมาจนถึง PSpice ซึ่งมีชื่อเสียงและใช้งานได้ดีในระดับเครื่องพีซีในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSpice เป็น โปรแกรมจำลองการทำงาน (Simulation) วงจรไฟฟ้า อยู่ในตระกูล SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) โดยที่เวอร์ชันเดิมของ SPICE พัฒนามาจากวงจรจำลองการทำงาน (Simulator) ที่ถูกเรียกว่า CANCER มันถูกพัฒนาขึ้นในต้นปี ค.ศ. 1970 SPICE ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการค้นคว้าวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ University of California Berkeley ประเทศสหรัฐอเมริกา

PSpice สามารถนำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1984 โดยบริษัท MicroSim และเป็นโปรแกรมจำลองทำงานในตระกูล SPICE โปรแกรมที่สามารถนำมาใช้บนเครื่อง IBM PC (เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลตระกูล IBM หรือเครื่องเลียนแบบ) ต่อมาในปี ค.ศ. 1991 บริษัท ไมโครซอฟท์ได้วางตลาดไมโครซอฟท์วินโดวส์ 3.0 (Microsoft Windows 3.0) ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่จะนำมาใช้แทนระบบปฏิบัติการ (DOS: Disk Operating System) โดยมีรูปแบบการใช้งานที่ง่ายอยู่ในรูปแบบกราฟฟิกที่เรียกว่า Graphic User Interface (GUI) มีโปรแกรมสำเร็จรูปชนิดต่างๆ รองรับเป็นจำนวนมาก ให้เป็นที่นิยมของผู้ใช้เป็นจำนวนมากทั่วโลก ดังนั้น บริษัท MicroSim จึงได้พัฒนาโปรแกรม The Design Center ที่ประกอบด้วยโปรแกรม Schematics, PSpice และ Probe ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนวงจร จำลองการทำงาน และแสดงผล ที่สามารถใช้งานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows)

เวอร์ชันต่างๆ ของ SPICE

ในส่วนของโปรแกรม SPICE นั้นยังคงมีการพัฒนามาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งานให้มากขึ้น แต่ละบริษัทได้มีการพัฒนาโปรแกรมจาก SPICE โดยใช้ชื่อต่างกันเพื่อจำหน่ายให้กับวิศวกรและผู้ที่สนใจอย่างกว้างขวางทั่วโลก PSpice ตั้งแต่เวอร์ชัน 5.0 ขึ้นมาจะเป็นเวอร์ชันที่สามารถใช้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ได้

SPICE แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เวอร์ชันที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับเมนเฟรมคอมพิวเตอร์ และเวอร์ชันที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ในระดับเครื่อง PC หรือที่เรียกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งจะแบ่งออกได้ดังนี้

Mainframe Version ได้แก่

SPICE 2G.6	ถือลิขสิทธิ์โดย	University of California (Berkeley)
HSPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	Meta-Software
RAD-SPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	Meta-Software
IG-SPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	A.B. Associates
I-SPICE NCSS	ถือลิขสิทธิ์โดย	Time Sharing
Precise	ถือลิขสิทธิ์โดย	Electronic Engineering Software

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSpice	ถือลิขสิทธิ์โดย	MicroSim
PC-base Version	ได้แก่	
AllSpice	ถือลิขสิทธิ์โดย	Acotech
IS-SPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	Intusoft
Z-SPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	Z-Tech
SPICE-Plus	ถือลิขสิทธิ์โดย	Analog Design Tools
DSPICE	ถือลิขสิทธิ์โดย	Daisy
PSpice	ถือลิขสิทธิ์โดย	MicroSim

เวอร์ชัน The Design Center เป็นเวอร์ชันที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลตระกูล IBM ที่ใช้งานได้ทั้งระบบปฏิบัติการ DOS และ Windows โดยถูกพัฒนาให้ใช้งานได้ง่ายและสะดวกขึ้น โดยใช้โปรแกรม Schematics สร้างไฟล์อินพุต (Input Files) ด้วยรูปภาพ ทำการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรม PSpice และดูผลลัพธ์ที่เป็นรูปคลื่นด้วย โปรแกรม Probe

ขั้นตอนการใช้โปรแกรมเบื้องต้น

ในการเริ่มต้นการใช้โปรแกรมการจำลองการทำงานของวงจร ไฟฟ้าเบื้องต้นเราจะต้องทราบถึงลำดับขั้นตอนในการทำงานก่อน โดยแบ่งเป็นลำดับขั้นตอน ดังนี้

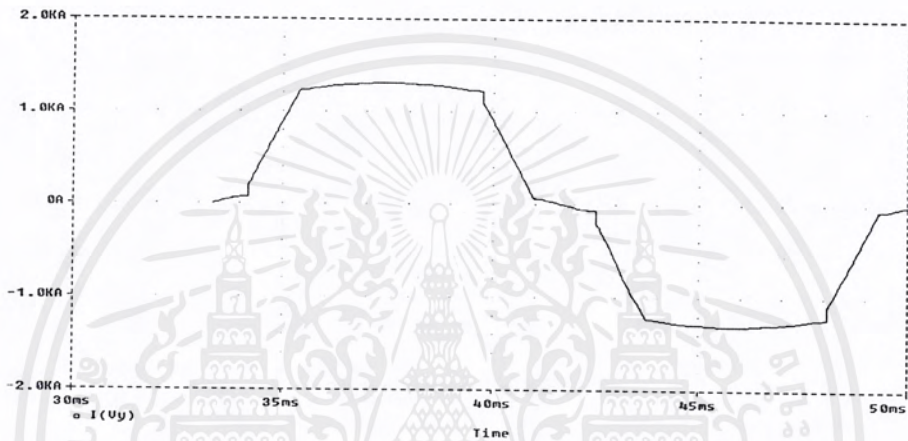
1. เราต้องการออกแบบว่าเราจะใช้โปรแกรมชนิดใดใช้อุปกรณ์ชนิดใดบ้าง
2. สร้างไฟล์อินพุต (Input Files) (*.SCH) โดยใช้โปรแกรม Schematic สร้างวงจร โดยการดึงอุปกรณ์จากไลบรารี (Library) แล้วใส่ค่าพารามิเตอร์ให้แก่อุปกรณ์ ต่อสายไฟให้กับอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อสร้างเป็นวงจรที่ต้องการ
3. ทำการกำหนดค่าต่างๆ ของการวิเคราะห์วงจร โดยเลือกว่าจะวิเคราะห์แบบใด
4. ทดสอบวงจรด้วย PSpice โปรแกรมจะสร้างไฟล์เอาต์พุต เพื่อแสดงผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของวงจร
5. ถ้าต้องการดูผลลัพธ์จากการพล็อตกราฟ ให้รัน Probe
6. เมื่อผลลัพธ์ได้ตามต้องการ ก็สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือโดยการพิมพ์ออกมาทางเครื่องพิมพ์

ซึ่งการใช้งานโปรแกรม PSpice โดยละเอียดสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง

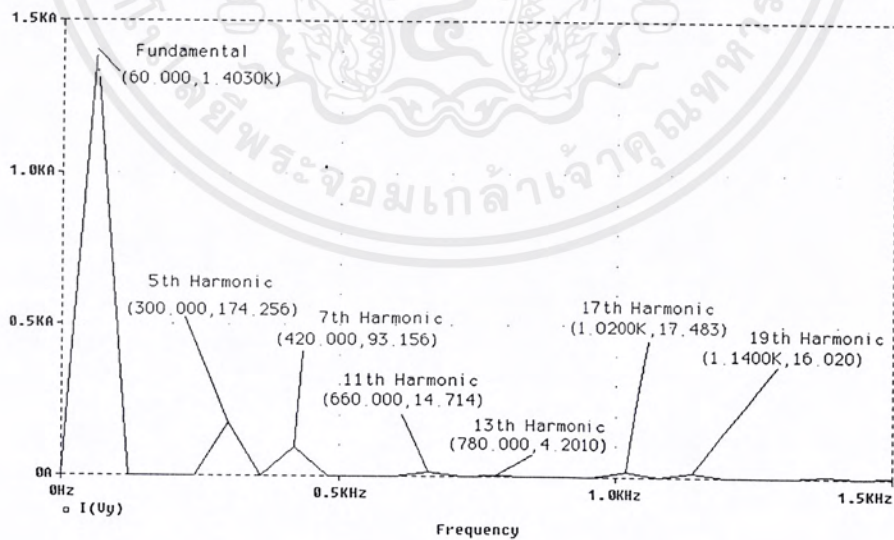
[9], [10]

4.3.2 การทดสอบการออกแบบโดยใช้โปรแกรม PSpice

การทดสอบการออกแบบโดยใช้โปรแกรม PSpice โดยการใช้โปรแกรม PSpice จำลองระบบตามวารสาร IEEE หัวข้อ SWITCHING OF POWER HARMONIC FILTERS (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก) ได้ผลดังต่อไปนี้

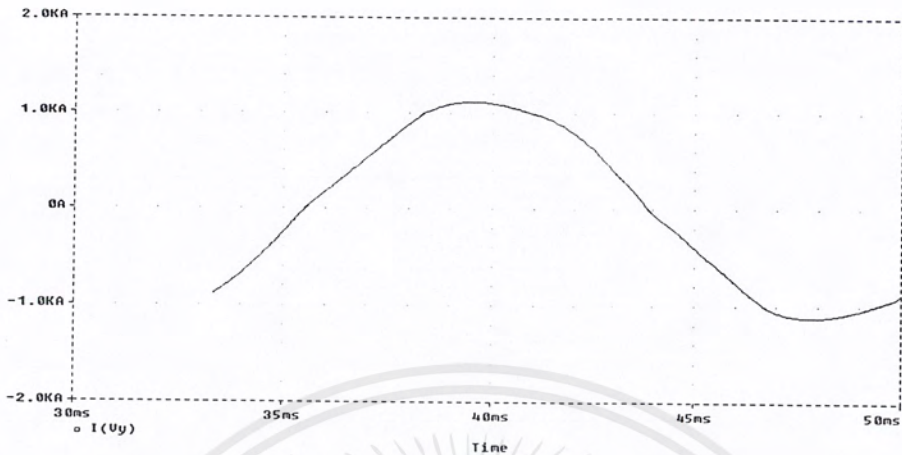


รูปที่ 4.7.1 กราฟกระแส

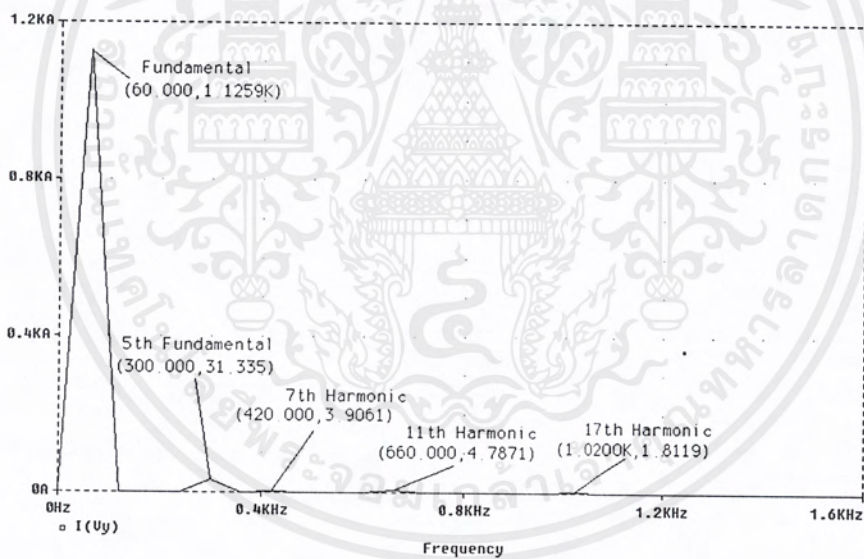


รูปที่ 4.7.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 4.7 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8.1 กราฟกระแส



รูปที่ 4.8.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

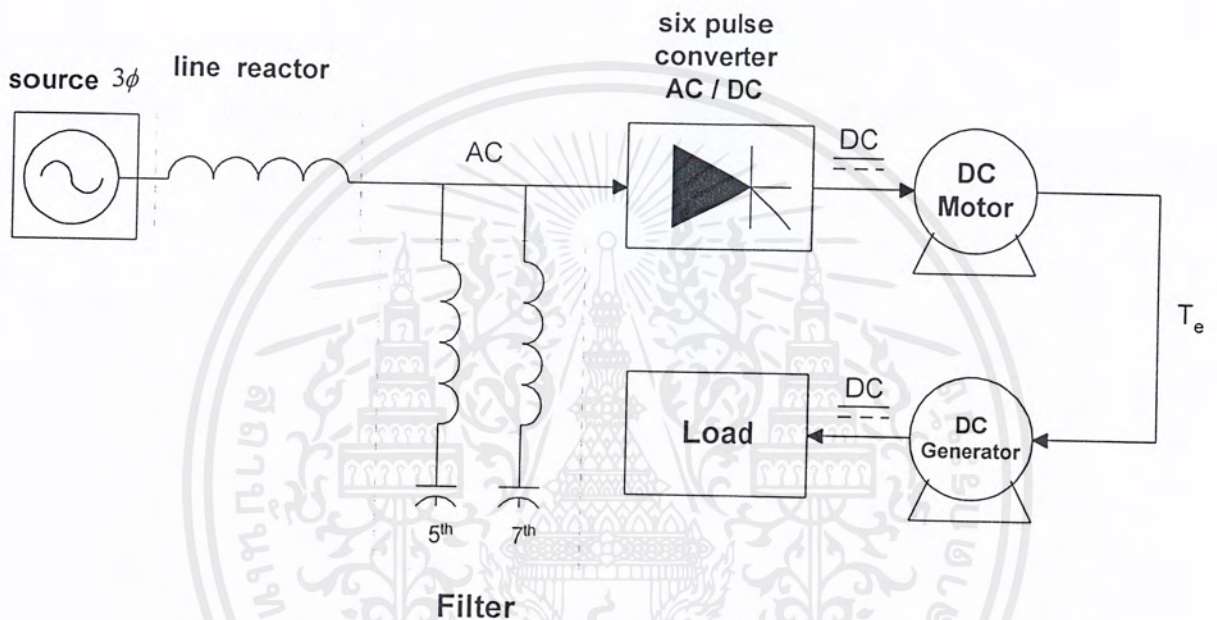
รูปที่ 4.8 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

จากการใช้โปรแกรม PSpice จำลองระบบตามวารสาร IEEE พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน
 ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลองการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกได้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การออกแบบ และคำนวณค่าส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก

4.3.3.1 การจำลองระบบที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ในระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นการใช้วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ในการขับ ดีซี มอเตอร์ เพื่อนำกำลังไปทำการปั่นเจเนอเรเตอร์(generator)ในการขับโหลดซึ่งในที่นี้กำหนดให้โหลดที่ใช้ในการทดลองเป็นโหลดหลอดไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 วงจรซิงเกิลไลน์โคอะแกรมของการจำลองระบบที่กำจัดฮาร์มอนิก โดยการต่อ วงจรฟิลเตอร์ และ ไลน์รีแอกเตอร์

4.3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าของไลน์รีแอกเตอร์

ไลน์รีแอกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยวงจรฟิลเตอร์ในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยไลน์รีแอกเตอร์นั้นจะสามารถช่วยลดฮาร์มอนิกลำดับที่สูงๆ ได้โดยค่าหรือขนาดของไลน์รีแอกเตอร์นั้นสามารถคำนวณค่าได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ต้องรู้ว่าค่าพิกัดกำลังที่ใช้ในการขับโหลดมีค่าขนาดเท่าไร (kVA) และ ขนาดของแรงดันที่ใช้ในการขับโหลดมีค่าขนาดเท่าไร (โวลต์)

ขั้นที่ 2 เมื่อรู้ค่าพิกัดกำลังและขนาดแรงดันที่ใช้ในระบบแล้วนำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในระบบได้จากสมการ

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V} \quad (4.7)$$

ขั้นที่ 3 เมื่อได้กระแสไฟฟ้าในระบบแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณอิมพีแดนซ์ของระบบโดยสมการ

$$Z = \frac{V/\sqrt{3}}{I} \quad \text{หรือ} \quad Z = \frac{V^2}{VA} \quad (4.8)$$

ขั้นที่ 4 เมื่อได้อิมพีแดนซ์ของระบบแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณค่ารีแอกเตอร์โดยที่ค่ารีแอกเตอร์นั้นประมาณ 3% → 5% ของอิมพีแดนซ์ของระบบดังนี้

$$\%X_L = 3\% \rightarrow 5\%(Z) \quad (4.9)$$

ขั้นที่ 5 เมื่อได้ค่ารีแอกเตอร์ของระบบแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอินดักเตอร์(L)ได้จากสมการ

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (H) \quad (4.10)$$

4.3.3.3 ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์มอนิก การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดเดียวมีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกว่ามีค่าเท่าใด

ขั้นที่ 2 กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$$Q_{Com} = kW(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	Q_{Com}	คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ
	kW	คือ กำลังงานจริงของระบบของโหลดรวมทั้งหมด
	θ_1	คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม
	θ_2	คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ ที่ได้จากการวัดจริงในโรงงาน หรือการประเมิน และทำการกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกในระบบ

ขั้นที่ 4 ทำการแบ่งค่า Q_{Com} ออกเป็นส่วนตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกที่ได้กำหนดไว้ โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ และขนาดของภาระในระบบไฟฟ้า

ขั้นที่ 5 กำหนดจุดปรับคลื่น (Tuning Point) ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ

ขั้นที่ 6 กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุหลักมูลดังนี้

$$V_{Cr} \geq \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_{Sys} \quad (4.12)$$

โดยที่ V_{Sys} คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

V_{Cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 7 กำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละลำดับ

$$Q_{Cr} = \frac{Q_{Com}}{\left[\frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right] \times \left[\frac{V_{Sys}}{V_{Cr}} \right]^2} \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	V_{sys}	คือ	แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่
	n_h	คือ	ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง
	V_{Cr}	คือ	แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ
	Q_{Com}	คือ	กำลังงานรีแอกทีฟขดลวดที่จ่ายให้ระบบ
	Q_{Cr}	คือ	กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 8 การหาค่าตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ดังสมการดังนี้

$$X_C = \frac{V_{Cr}^2}{Q_{Cr} \times 10^3} \quad (4.14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_C} \quad (4.15)$$

$$L = \frac{X_C}{2\pi f \times n_h^2} \quad (4.16)$$

$$R = \frac{X_L \text{ at } n_h}{Q_F} \quad (4.17)$$

โดยที่	V_{Cr}	คือ	แรงดันที่พิกัดของตัวเก็บประจุ
	Q_{Cr}	คือ	กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ
	n_h	คือ	ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง
	Q_F	คือ	ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

หมายเหตุ ค่า C , L และ R เป็นค่าต่อเฟส

ขั้นที่ 9 ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเข้าระบบแล้ววิเคราะห์การไหลกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้าใหม่ และตรวจสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

1. ตรวจสอบตัวเก็บประจุว่าทำงานเกินพิกัดหรือไม่
2. ตรวจสอบขนาดกระแสรวมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{RMS,Li} = \sqrt{(I_{Fi,1} \times 1.1)^2 + \sum_{h=2}^n I_{Fi,h}^2} \quad (4.18)$$

- โดยที่ $I_{Fi,1}$ คือ กระแสไหลผ่านตัวกรองที่ i ที่ความถี่หลักมูล
 $I_{Fi,h}$ คือ กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวกรองที่ i ที่ความถี่ฮาร์มอนิก
 $I_{RMS,Li}$ คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านตัวกรองทั้งหมด

3. ตรวจสอบขนาดกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานฮาร์มอนิกหรือไม่
4. ทดสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเมื่อตัวแปรต่างๆของระบบเปลี่ยนไป

4.3.3.4 การคำนวณค่าไลน์รีแอกเตอร์

- ผลจากการทดลอง

แรงดันที่ใช้ในระบบนี้ (V)

102

โวลต์

พิกัดกำลังที่ปรากฏในระบบนี้ (S)

3300

โวลต์-แอมป์

$$\begin{aligned} \therefore I &= \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \\ &= \frac{3300}{\sqrt{3} \times 102} \\ &= 18.68 \end{aligned}$$

A

$$\begin{aligned} \therefore Z &= \frac{V/\sqrt{3}}{I} \\ &= \frac{102/\sqrt{3}}{18.68} \\ &= 3.15 \quad \Omega \end{aligned}$$

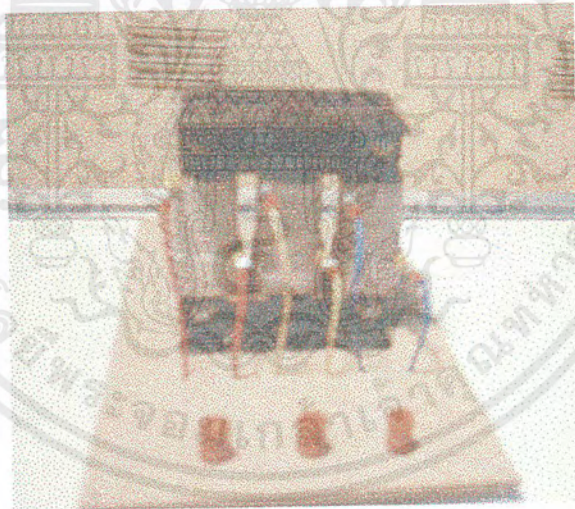
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \therefore \text{คิด } \%X_L \text{ ที่ } 3\% &= 3\%(Z) \\ &= 3\%(3.15) \\ &= 0.095 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{0.095}{2 \times \pi \times 50} \\ &= 3.01 \times 10^{-4} \\ &= 0.30 \quad mH \end{aligned}$$

\therefore ค่าไลน์รีแอคเตอร์ที่ใช้มีขนาด 0.30 mH

- ข้อมูลของค่าอินดักเตอร์ที่ใช้ทำไลน์รีแอคเตอร์



รูปที่ 4.10 รูปของไลน์รีแอคเตอร์ที่ใช้งานจริง

ไลน์รีแอคเตอร์ที่ใช้มีขนาด (L)	0.30	mH
ใช้ลวดเบอร์	SWG # 13	
จำนวนรอบพันแกนเหล็ก (N)	39	รอบ
ขนาดแกนเหล็ก (A)	2.5"×2.5"	
ระยะเก็บ(gap)	10	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.5 การคำนวณค่าตัวกรอง

- จากผลการทดลอง

พิกัดแรงดันที่ใช้ในระบบนี้	102	โวลต์
พิกัดกำลังที่ใช้ในระบบนี้	2.07	กิโลวัตต์
กระแสที่ใช้ในระบบนี้	10.63	แอมป์

$$\therefore P = 3 VI \cos \phi$$

$$2.07 \times 10^3 = 3 (102) (10.63) \cos \phi$$

$$\cos \phi = \frac{2.07 \times 10^3}{3(102)(10.63)} = 0.63$$

$$\phi = 56.10$$

- ต้องการค่าตัวประกอบกำลัง (P.F) 0.95

$$\cos \phi = 0.95$$

$$\phi = 20.22$$

- ค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_{com} (kVA) ที่ต้องใช้

$$\therefore Q_{com} = kW (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$= (2.07 \times 10^3) (\tan 56.10 - \tan 20.22)$$

$$= 1.83 \times 10^3 \quad kVAr$$

- กำหนดจำนวนชุดของวงจรกรอง

$$\therefore I_5 : I_7 = 65.06 : 34.94$$

$$\therefore \text{เลือกตัวกรอง 2 ชุด เป็น } 5^{\text{th}} + 7^{\text{th}}$$

- แบ่งค่า Q_{com} ออกเป็นส่วนๆตามจำนวนชุดของตัวกรอง

$$Q_{com} \text{ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ } 65\% , 35\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่า $I_{/p}$ ประมาณ 60% ของ $I_{/p}$ เดิม หรือ คัด Q Factor ที่ 60%

$$\begin{aligned}\therefore Q_F &= 60\% \times Q_{com} \\ &= 60\% \times 1.83 \\ &= 1.098 \quad kVAr\end{aligned}$$

ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore Q_{F5} = 65\% \times 1.098 = 0.7137 \quad kVAr$$

ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore Q_{F7} = 35\% \times 1.098 = 0.3843 \quad kVAr$$

- กำหนดจุดปรับคลื่น n_h ของตัวกรองแต่ละชุด

$$n_5 = 4.8 \quad (240 \text{ Hz})$$

$$n_7 = 6.8 \quad (340 \text{ Hz})$$

- ตรวจสอบแรงดันที่จะตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์ของตัวกรอง และเลือกแรงดันพิกัดของตัวคาปาซิเตอร์

$$V_c = \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_s \quad \text{โดยเลือกค่า } V_{cr} \geq V_c$$

ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore V_{c5} = \left(\frac{4.8^2}{4.8^2 - 1} \right) \times 102 = 106.63 \quad \text{โวลต์}$$

ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore V_{c7} = \left(\frac{6.8^2}{6.8^2 - 1} \right) \times 102 = 104.25 \quad \text{โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดขนาดกำลังรีแอกทีฟที่พิกัด Q_{cr} (kVar) ของตัว คาปาซิเตอร์ ในแต่ละชุด

$$Q_{cr} = Q_F \left(\frac{V_{cr}}{V_s} \right)^2 \frac{n_h^2 - 1}{n_h^2}$$

ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore Q_{cr5} = 0.7137 \left(\frac{200}{102} \right)^2 \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} = 2.6248 \text{ kVar}$$

ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore Q_{cr7} = 0.3843 \left(\frac{200}{102} \right)^2 \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} = 1.4455 \text{ kVar}$$

$$\therefore \text{ฮาร์มอนิกที่ 5 เลือก } Q_{cr5} = 3 \text{ kVar}$$

$$\therefore \text{ฮาร์มอนิกที่ 7 เลือก } Q_{cr7} = 2 \text{ kVar}$$

- หาค่าคาปาซิเตอร์ และ อินดักเตอร์ ที่ใช้

$$C = \frac{Q_{cr} \times 10^9}{2\pi f V_{cr}^2} \quad (\mu F)$$

$$L = \frac{10^9}{(2\pi f n_h)^2 C} \quad (mH)$$

ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore C_5 = \frac{3 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times 200^2} = 238.73 \quad (\mu F)/\text{phase}$$

$$\therefore L_5 = \frac{10^9}{(2\pi \times 50 \times 4.8)^2 \times 238.73} = 1.84 \quad (mH)/\text{phase}$$

ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore C_7 = \frac{2 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times 200^2} = 159.15 \quad (\mu F)/\text{phase}$$

$$\therefore L_7 = \frac{10^9}{(2\pi \times 50 \times 6.8)^2 \times 159.15} = 1.38 \quad (mH)/\text{phase}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดกระแสพิคค์ของตัว L

$$I_L = 1.3I_{cr}$$

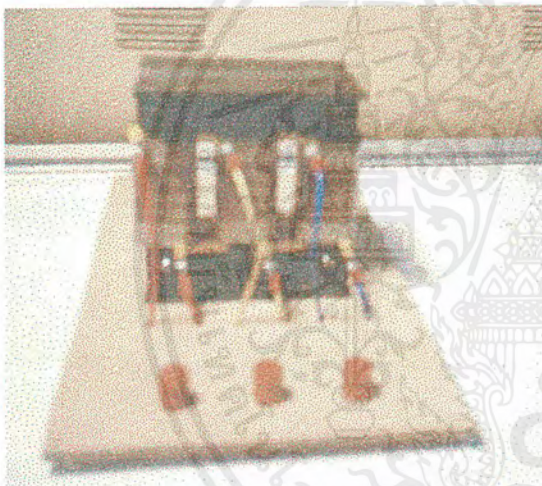
ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore I_{cr5} = \frac{3 \times 1000}{\sqrt{3} \times 200} = 8.66 \quad \therefore I_L = 1.3 \times 8.66 = 11.26 \text{ A}$$

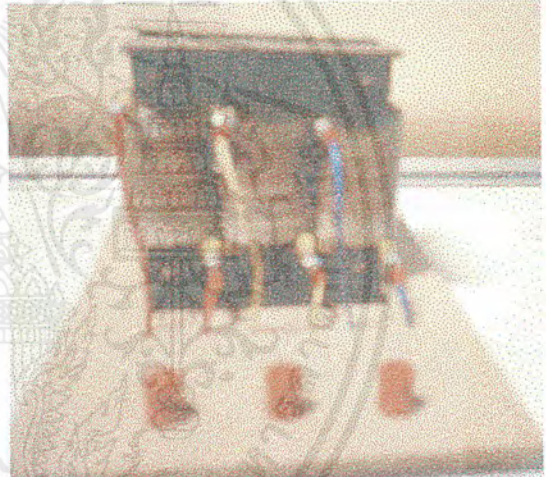
ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore I_{cr7} = \frac{2 \times 1000}{\sqrt{3} \times 200} = 5.77 \quad \therefore I_L = 1.3 \times 5.77 = 7.5 \text{ A}$$

- ข้อมูลค่าต่างๆของตัวกรอง



(a)



(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 รูปตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ ฮาร์มอนิกที่ 7

- (a) ตัวเหนี่ยวนำของฮาร์มอนิกที่ 5
- (b) ตัวเหนี่ยวนำของฮาร์มอนิกที่ 7
- (c) ตัวเก็บประจุของฮาร์มอนิกที่ 5 และ ฮาร์มอนิกที่ 7

ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

ตัวเก็บประจุขนาด	240	$(\mu F)/ phase$	ตัวเก็บประจุขนาด	150	$(\mu F)/ phase$
ตัวเหนี่ยวนำขนาด	1.84	$(mH)/ phase$	ตัวเหนี่ยวนำขนาด	1.38	$(mH)/ phase$

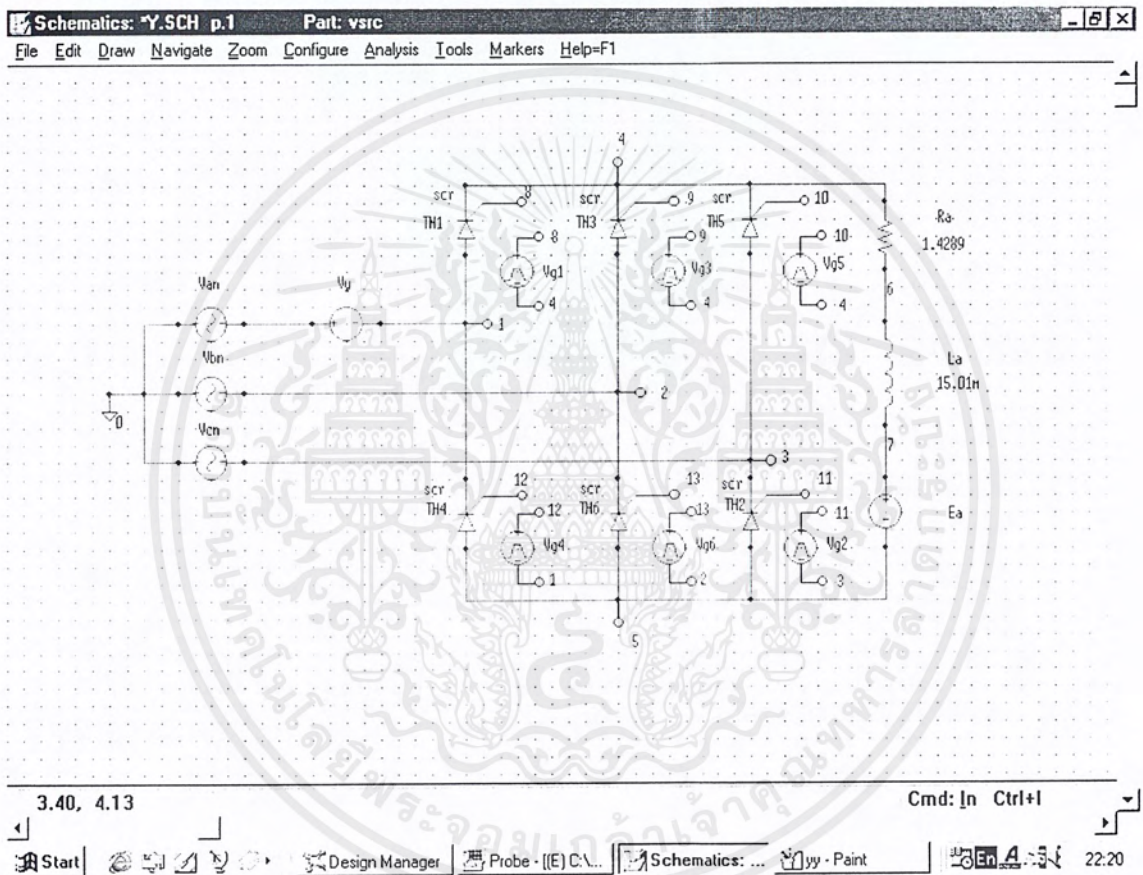
หมายเหตุ ในการคำนวณหาค่าต่างๆของตัวกรองฮาร์มอนิกนั้น ค่าความต้านทาน (R) นั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้น การคำนวณตัวกรองจึงเป็นการคำนวณค่าตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ

4.3.4 การทดสอบตัวกรองฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม PSpice

จากการออกแบบค่าต่างๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกในหัวข้อ 4.3.3 นำตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้มาจำลองด้วยโปรแกรม PSpice ว่าสามารถกรองฮาร์มอนิกได้หรือไม่โดยทำตามกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก
2. หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5
3. หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7
4. หลังจากใส่ทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

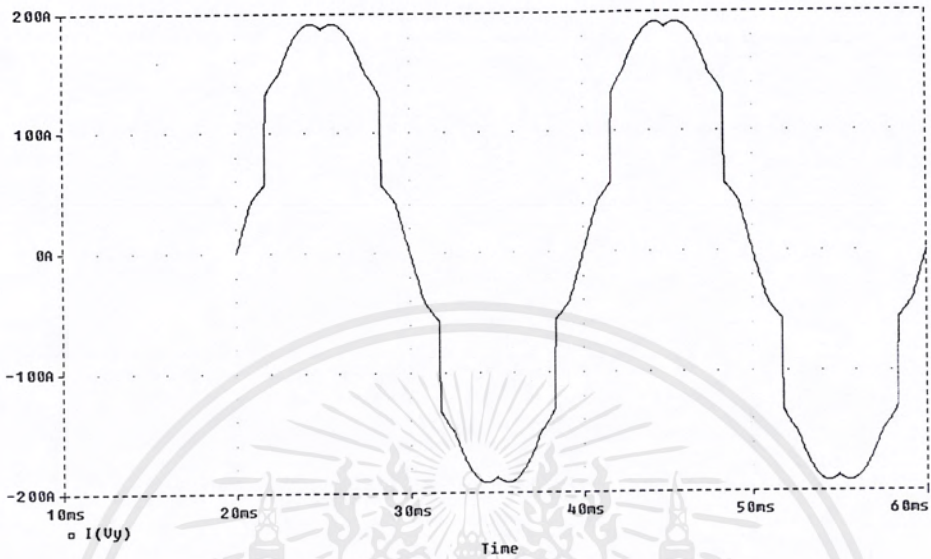
1. ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก



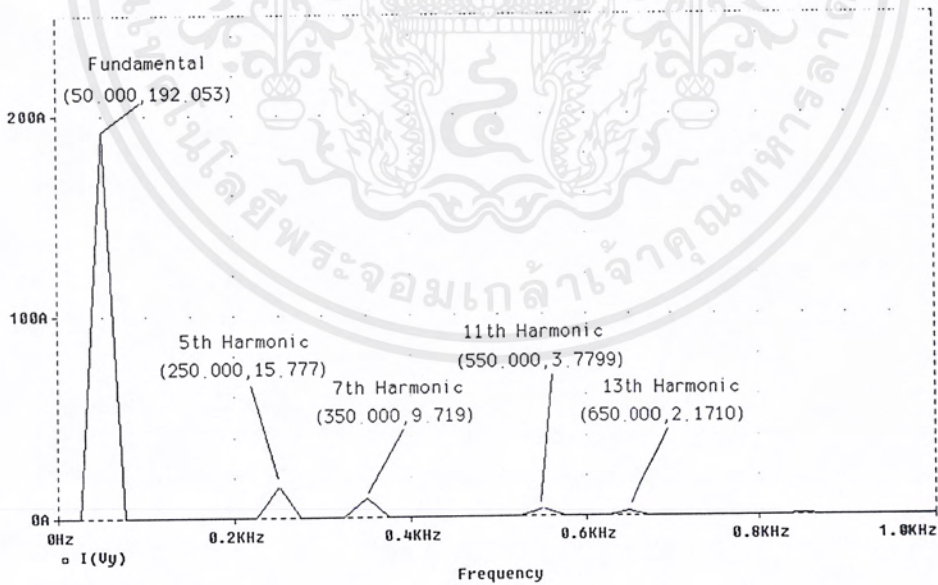
รูปที่ 4.12 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13.1 กราฟกระแส

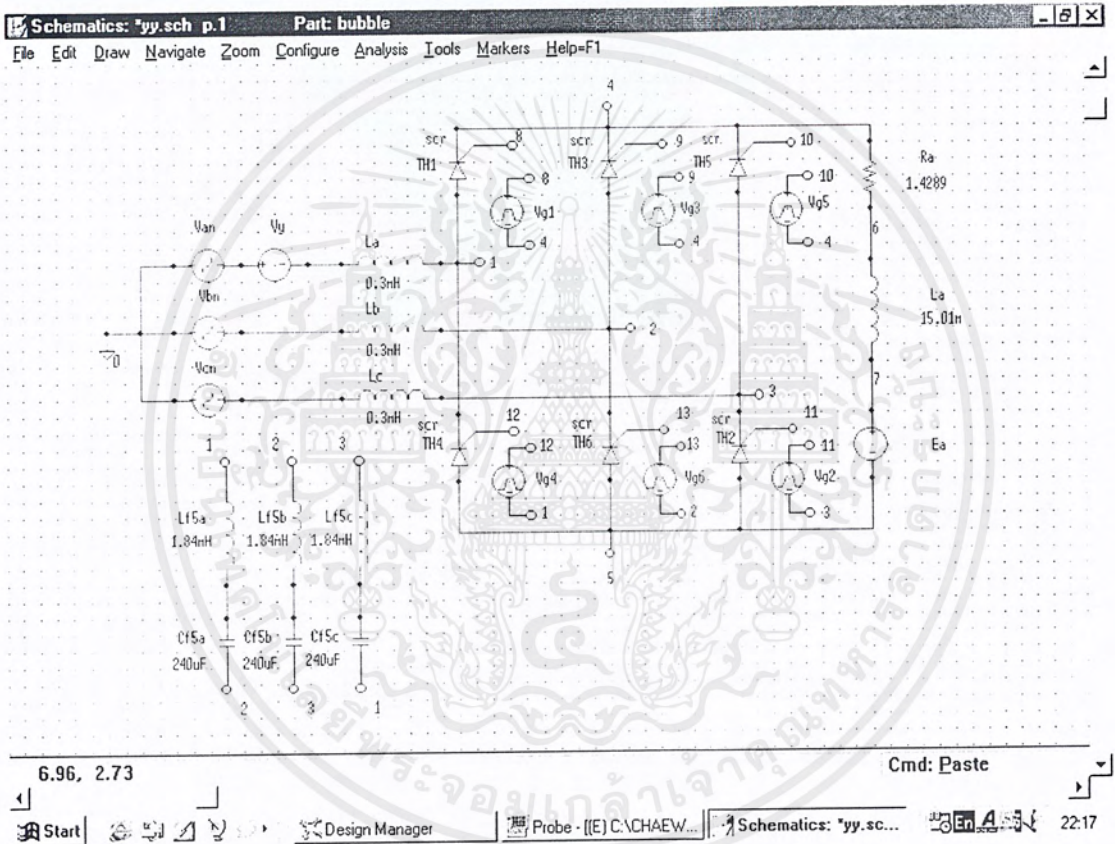


รูปที่ 4.13.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 4.13 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสไลน์ ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

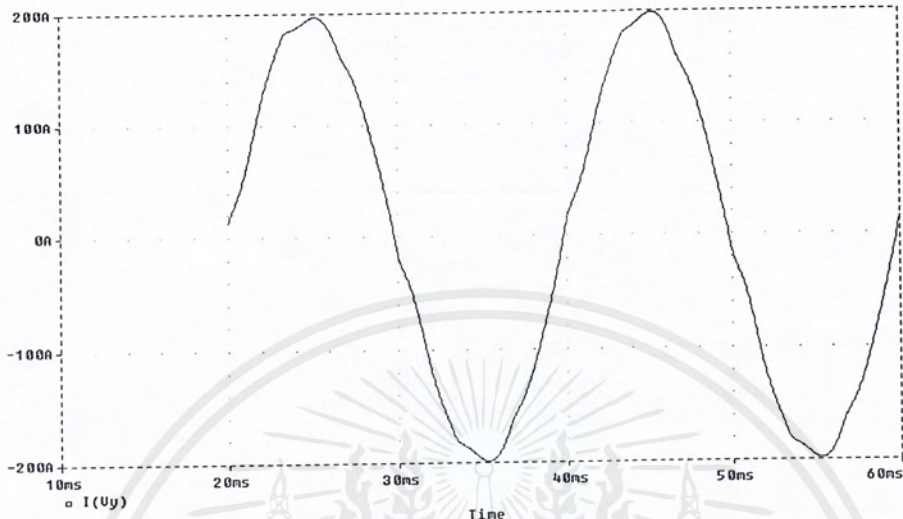
2. หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5



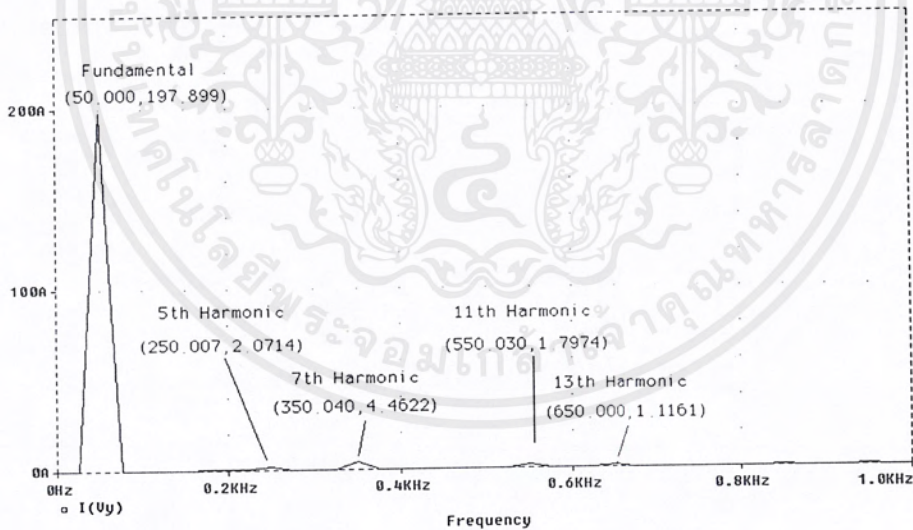
รูปที่ 4.14 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15.1 กราฟกระแส

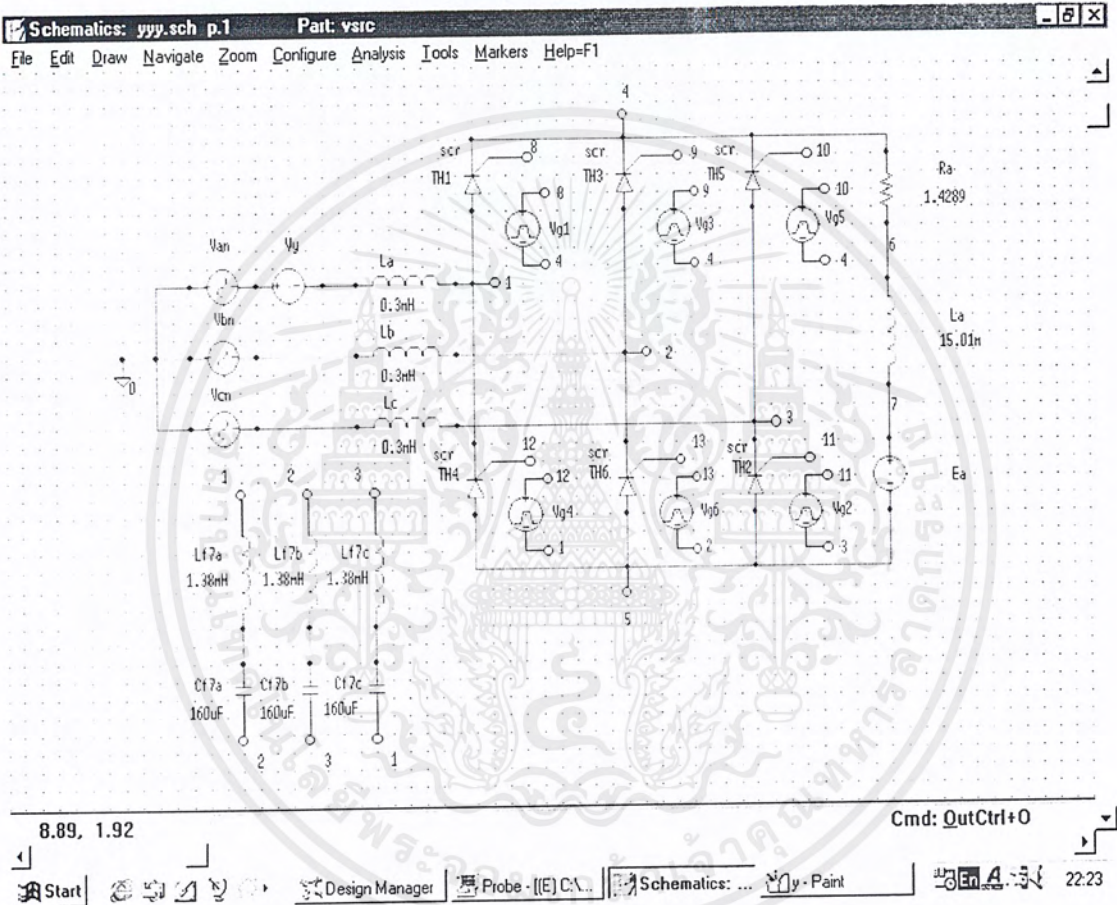


รูปที่ 4.15.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 4.15 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

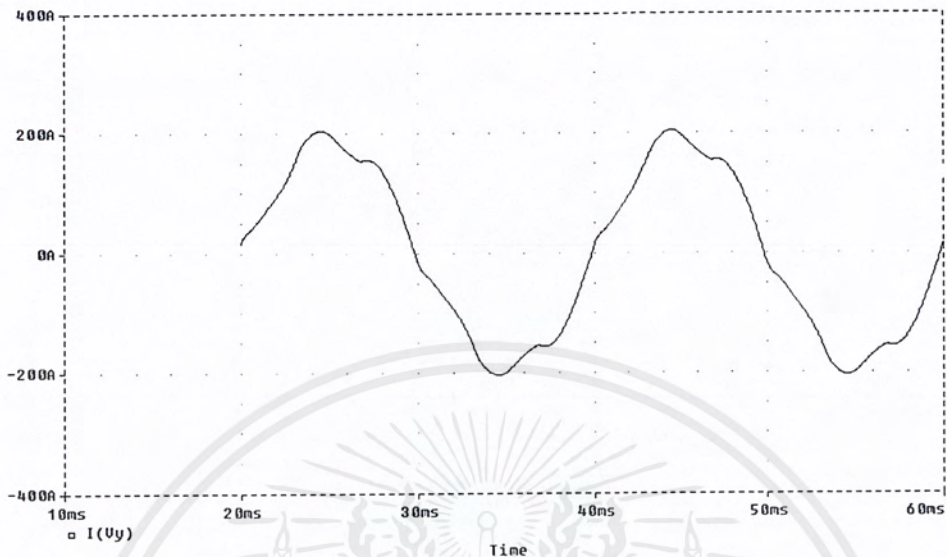
3. หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7



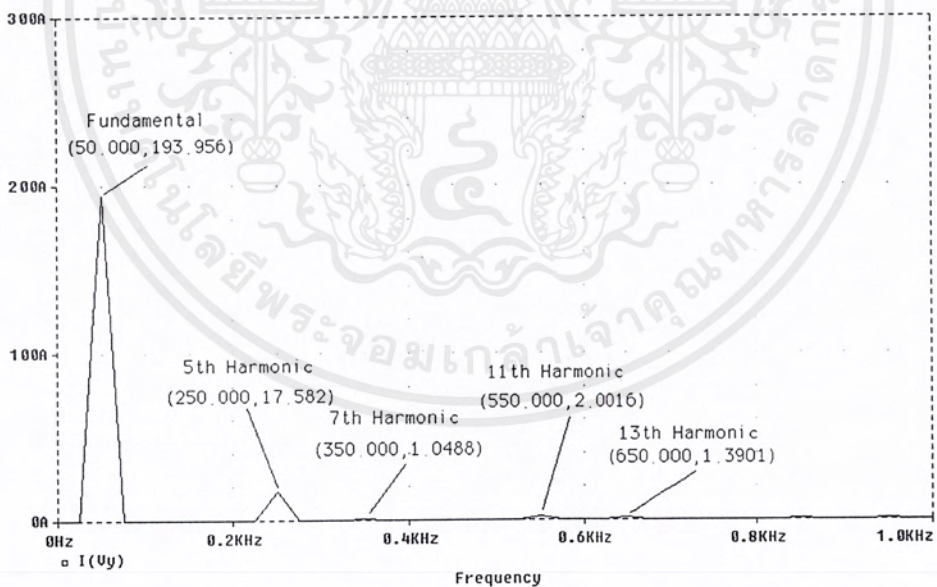
รูปที่ 4.16 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ขณะใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17.1 กราฟกระแส

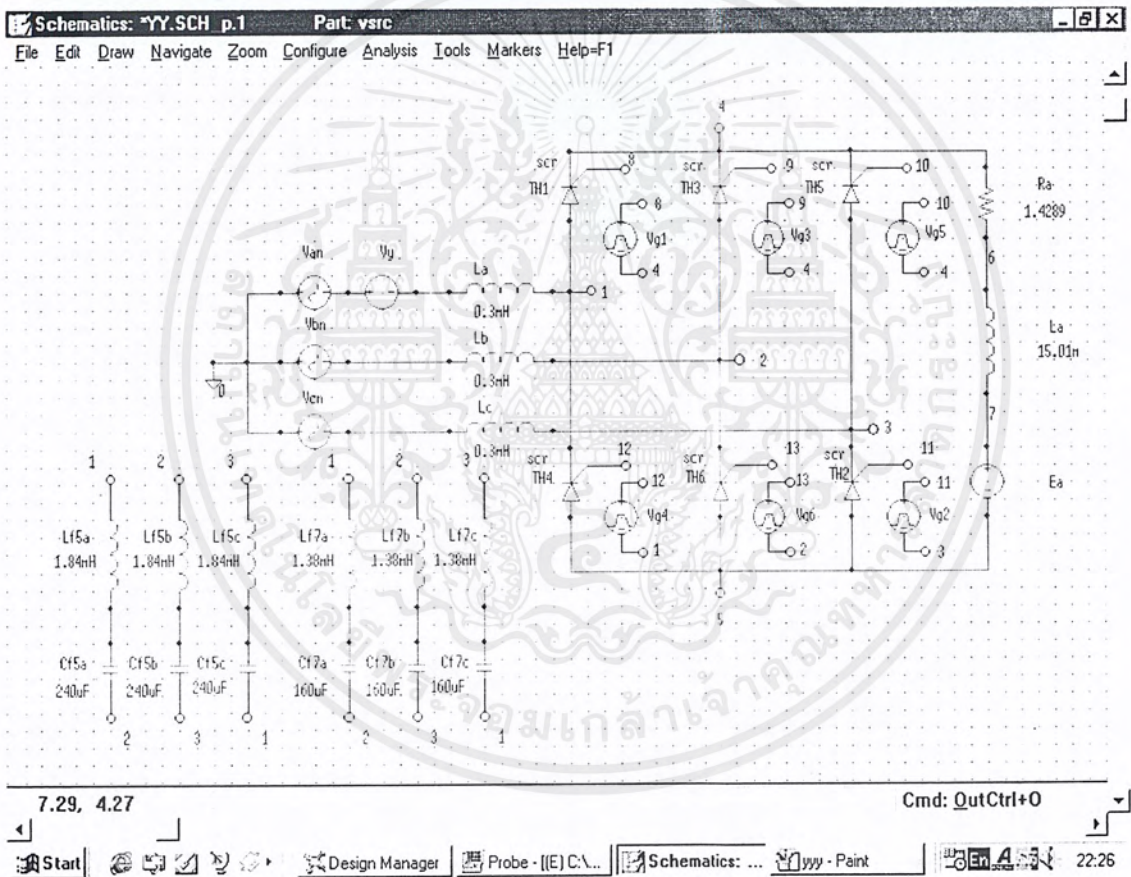


รูปที่ 4.17.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 4.17 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

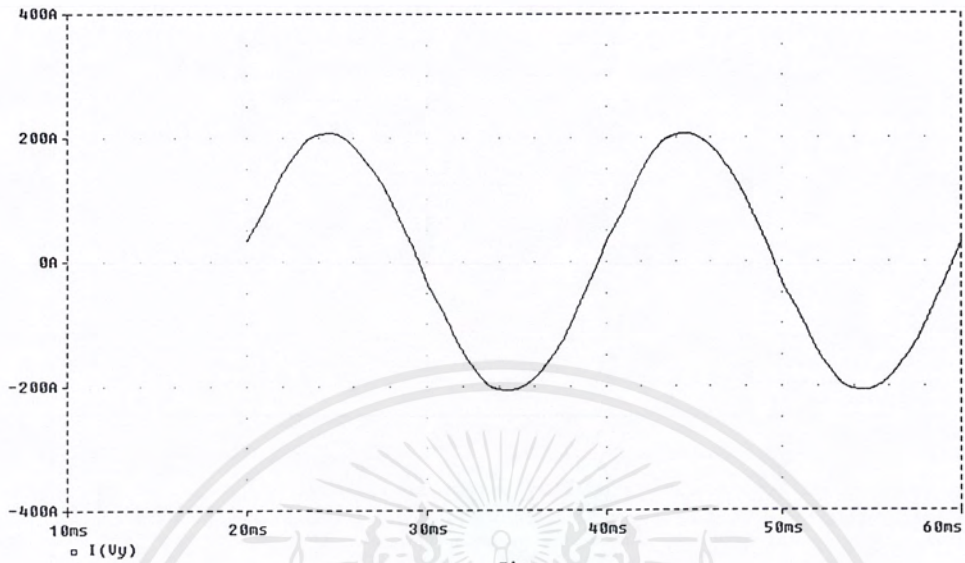
4. หลังจากใส่ทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 พร้อมกัน



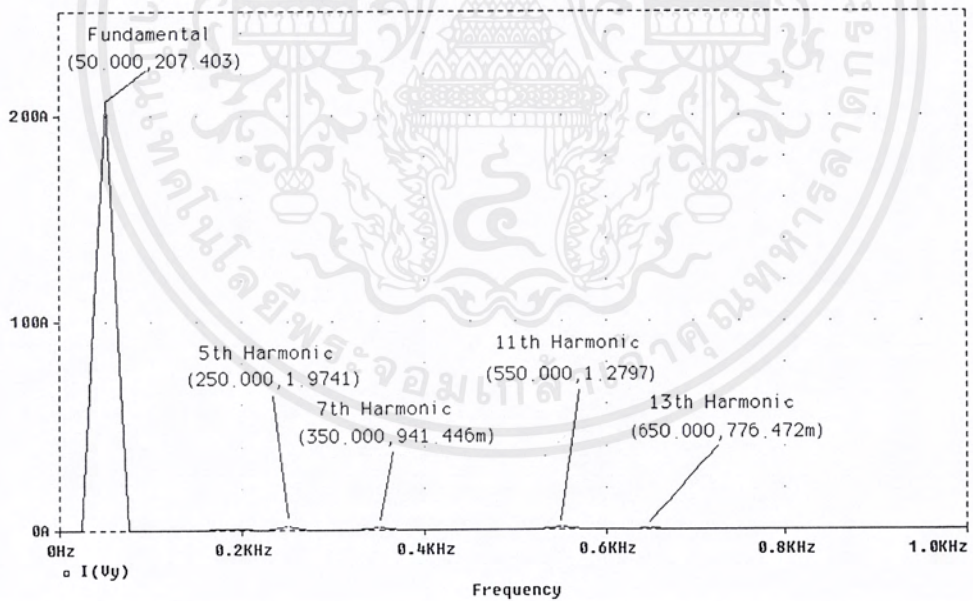
รูปที่ 4.18 รูปวงจรที่ใช้ในโปรแกรม PSpice ขณะใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19.1 กราฟกระแส



รูปที่ 4.19.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

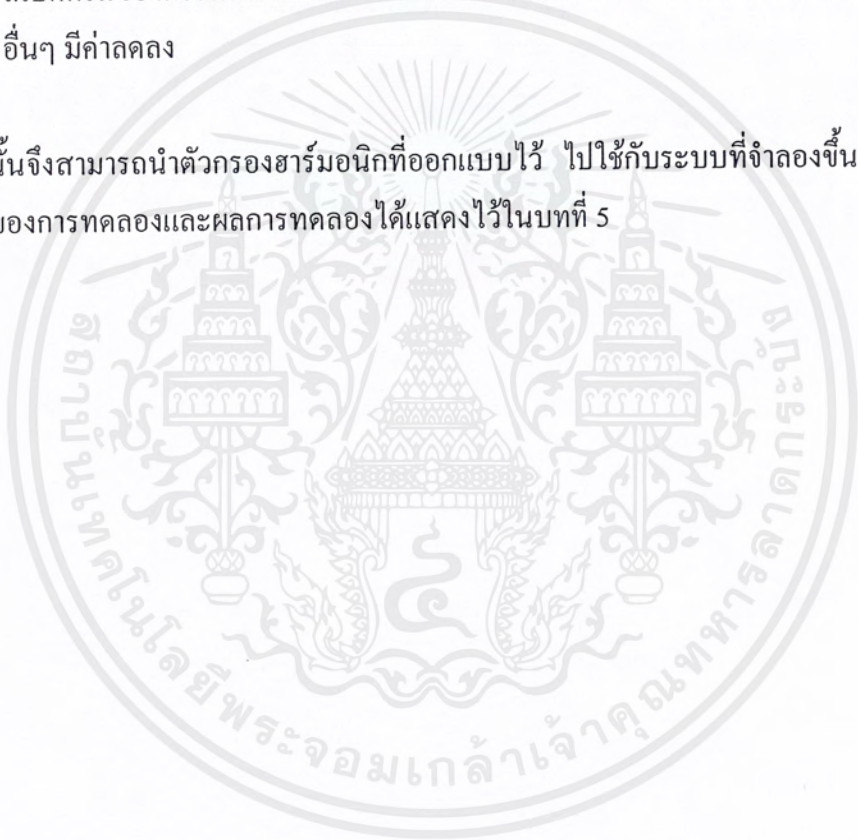
รูปที่ 4.19 กราฟกระแสและสเปกตรัมของกระแสไลน์ หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSpice จำลองการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกทั้ง 4 กรณี พบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้สามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบได้เป็นที่น่าพอใจโดยดูได้จาก

- กราฟกระแสไลน์ที่ได้หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์มากขึ้น
- สเปกตรัมของกระแสไลน์ที่ได้ ฮาร์มอนิกที่ 5 และฮาร์มอนิกที่ 7 ตลอดจนฮาร์มอนิกอื่นๆ มีค่าลดลง

ดังนั้นจึงสามารถนำตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้ ไปใช้กับระบบที่จำลองขึ้นมาได้โดยรายละเอียดของการทดลองและผลการทดลองได้แสดงไว้ในบทที่ 5



บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองจะศึกษาฮาร์มอนิกที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ซึ่งจะดูจากกระแสไลน์และแรงดันไลน์ที่ด้านอินพุทของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อศึกษาฮาร์มอนิกต่างๆ ที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์
2. หลังการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อดูว่าตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้หรือไม่

5.1 ก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

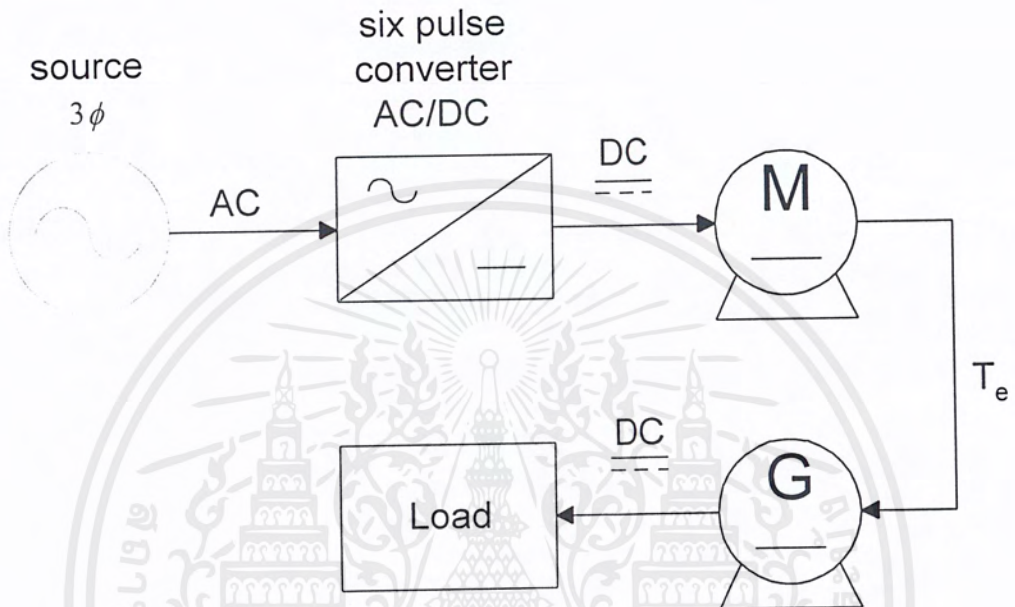
เพื่อศึกษาฮาร์มอนิกที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล	1 เครื่อง
2. โพรบ ×100	1 เส้น
3. คีมวัด	1 ตัว
4. คีมวัดแรงดัน	1 ตัว
5. แผงโพลลวดไฟฟ้า	2 แผง
6. วาริแอก 3 เฟส	1 ตัว
7. วาริแอก 1 เฟส	1 ตัว
8. ชุดคีมตัด	1 ชุด
9. ดิจิตอลมิเตอร์	3 ตัว
10. แอมป์มิเตอร์	5 ตัว
11. วัตต์มิเตอร์ 3 เฟส	1 ตัว
12. เครื่องวัดสัญญาณกระแส (LEM)	1 ตัว
13. Junction Box	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ขั้นตอนในการทดลอง



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการทดลอง

โดยละเอียดบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มี 2 แบบ คือ ใช้ไดโอดกำลัง 6 ตัว และ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ไทรสเตอร์ ซึ่งสามารถปรับมุมทริกได้
- ดีซีมอเตอร์ มีพิกัดดังนี้

Output 1.5 kW Volt. 130 V

Amps. 15 A R.P.M. 1800

Fld.Volts. 180 V Fld.Amps. -

Duty Cont. Wound Shunt Wt. - kg.

Type KC-150T No. 5680993

และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ (วัดจากเครื่องวัดพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์

ของ SIEMENS)

$$R_a = 1.429 \, \Omega \quad L_a = 15.01 \, \text{mH}$$

$$R_s = 180 \, \Omega \quad J = 0.15 \, \text{kg-m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนขึ้นสำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ดีซี เจนเนอเรเตอร์ มีพิกัดดังนี้**

D14-25	Rating Cont.
Speed 1000 rpm	Output 700 W
Field Volt. 80 V	Current 1.6 A
Arm. Volt 70 V	Current 13 A
Torque 68 kg-cm	Weight 12 kg
No. 4060	

- **โหลดความต้านทาน ใช้โหลดหลอดไฟ 2 แฉง โดยมีหลอดไฟทั้งหมด 46 หลอด**

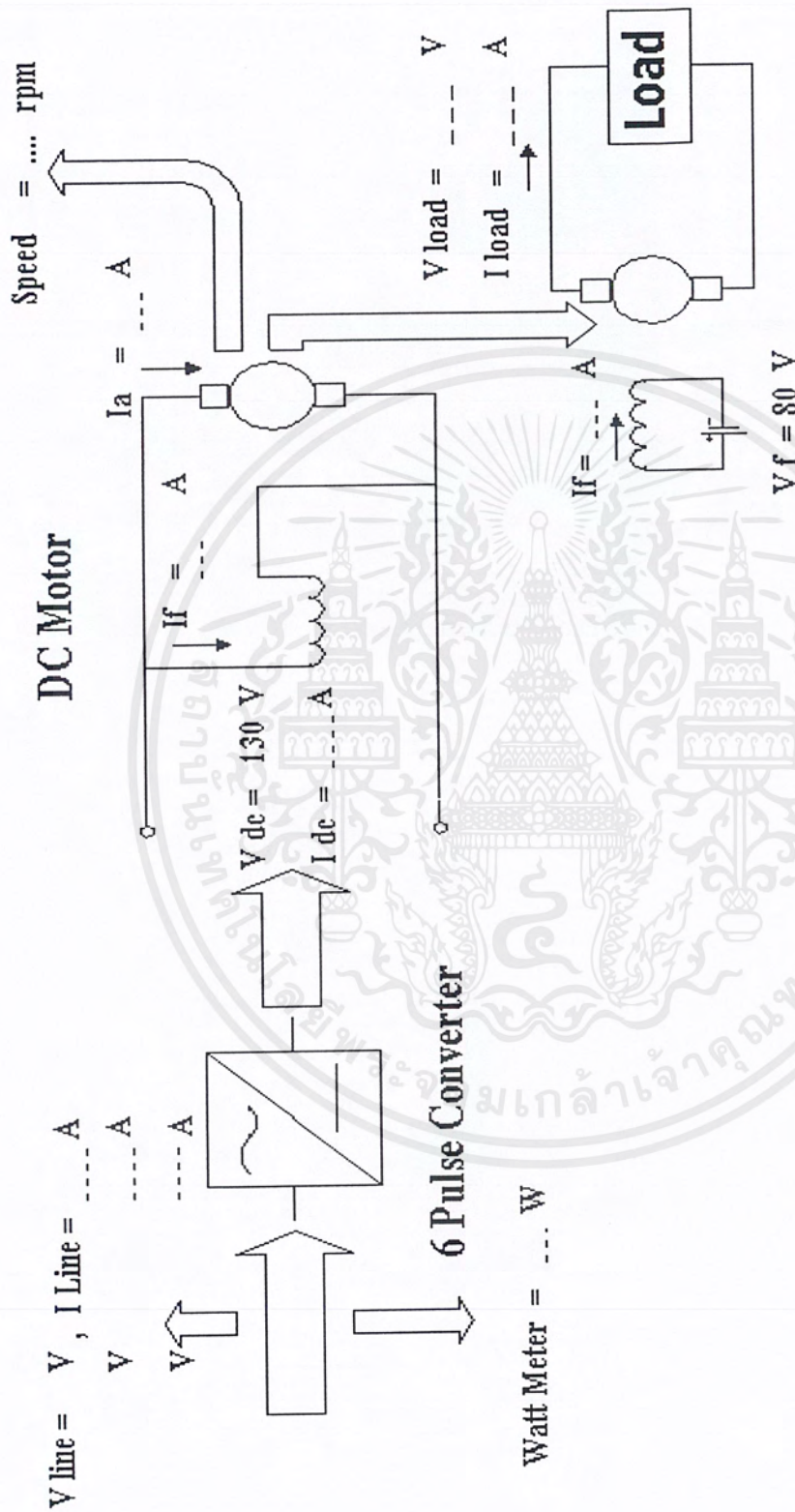
5.1.3 วิธีการทดลอง

สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1) จ่ายไฟกระแสลับ 3 เฟส เข้า 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ โดยผ่านวาริแอก 3 เฟส
 2) จากเอาต์พุทของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ ต่อเข้ากับดีซีมอเตอร์ทำการทดลองที่
 สภาวะ No load และใส่โหลดโดยไปปั่นดีซีเจนเนอเรเตอร์จ่ายไฟกระแสตรงให้แก่โหลดหลอดไฟ
 โดยการปรับแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้ดีซีมอเตอร์ให้คงที่ 130 โวลท์ และปรับแรงดันกระแสตรง
 ที่จ่ายเข้าที่ขดลวดฟิลด์ของดีซีเจนเนอเรเตอร์ให้คงที่ 80 โวลท์ วัดสัญญาณแรงดันโวลท์และกระแส
 โวลท์ทางด้านอินพุทของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์

3) บันทึกผลการทดลองค่าต่างๆ ตามรูปที่ 5.2 ในกรณีดังต่อไปนี้

- 3.1 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 0°
- 3.2 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 30°
- 3.3 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 60°
- 3.4 ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 0°
- 3.5 ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 0°
- 3.6 ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 30°
- 3.7 ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 30°
- 3.8 ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 60°
- 3.9 ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 60°



รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนต่างๆในการทดลองก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

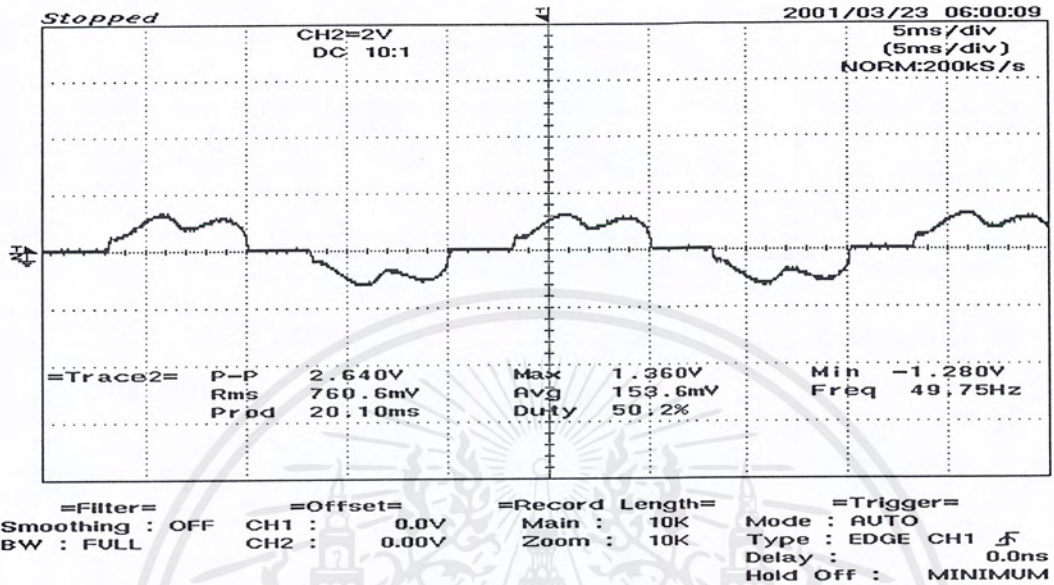
5.1.4 ผลการทดลอง

1. ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 0° ตารางที่ 5.1 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 0°

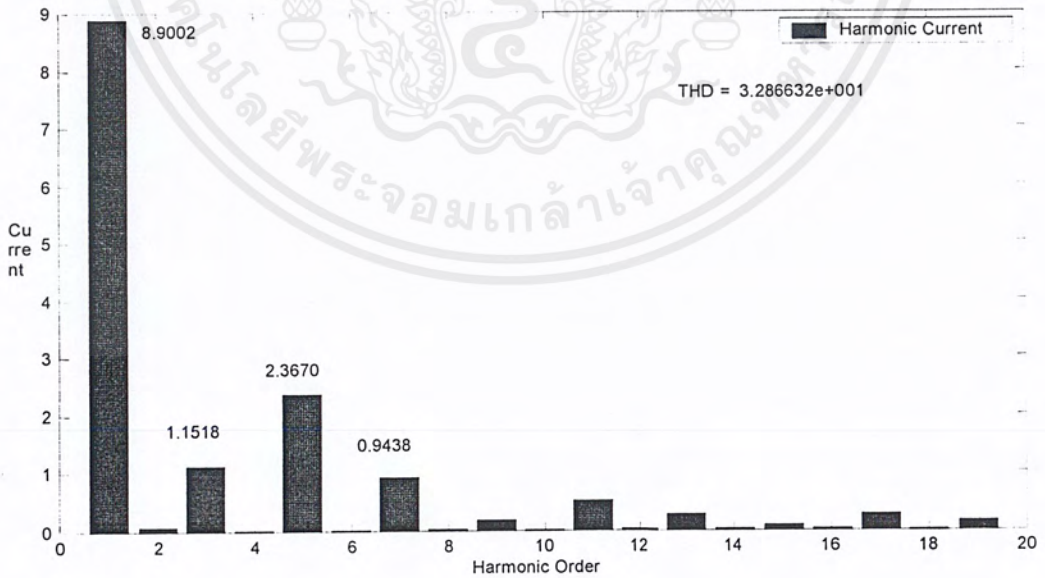
การทดลอง	I (line) (A)			V (line-line) (V)			N(rpm) (รอบ/นาที)		
	Phase			Phase			ครั้งที่		
	A	B	C	AB	BC	AC	1	2	3
สภาวะ No-load	0.9	0.9	0.9	108	105	105	2015	2011	2009

การทดลอง	DC MOTOR											
	V_{dc} (V)			I_{dc} (A)			I_f (A)			I_a (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
สภาวะ No-load	130	130	130	1.4	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

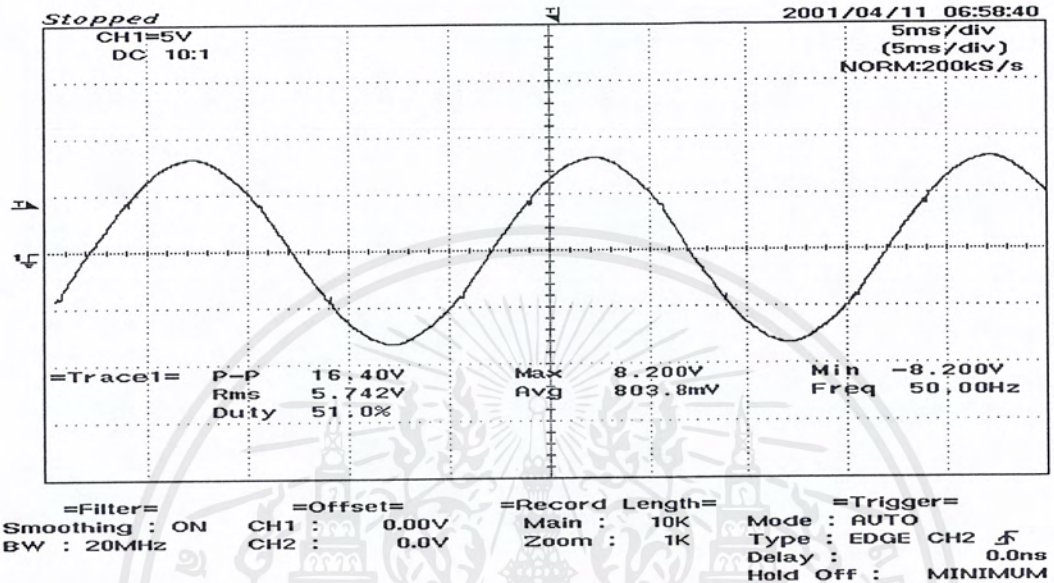


รูปที่ 5.3.1 กราฟกระแส

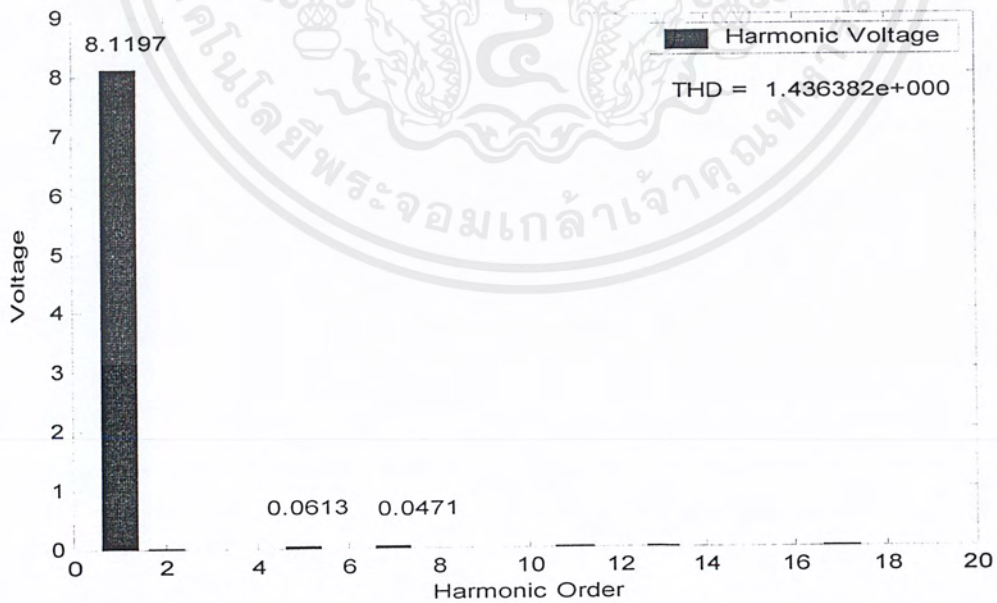


รูปที่ 5.3.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 รูปที่ 5.3 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแส ณ สถานะ No-Load : ที่มุมทริก 0°
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4.1 กราฟแรงดัน



รูปที่ 5.4.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน

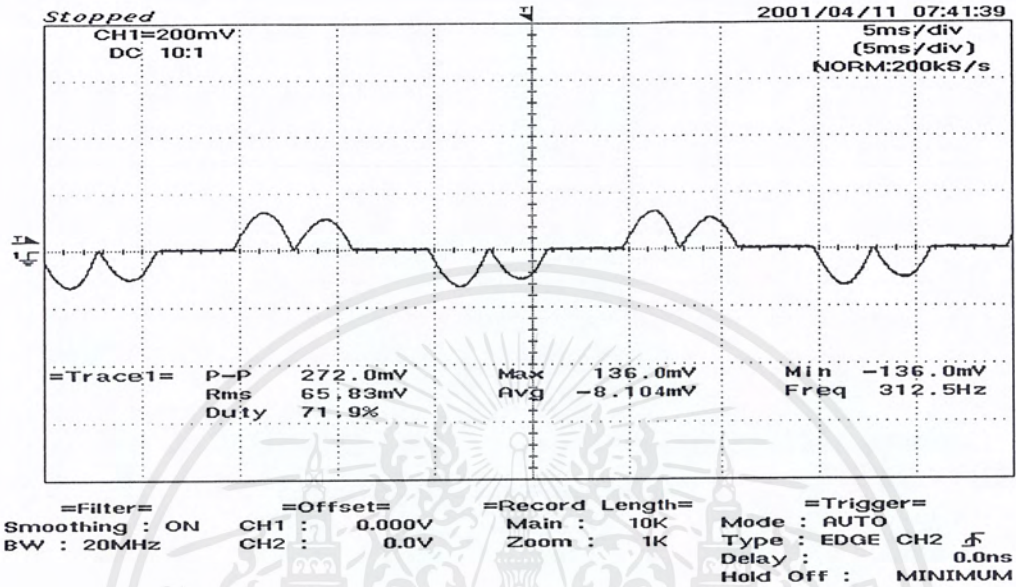
รูปที่ 5.4 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : *สถานะ No-Load : ที่มุมตริก 0*
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 30° ตารางที่ 5.2 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 30°

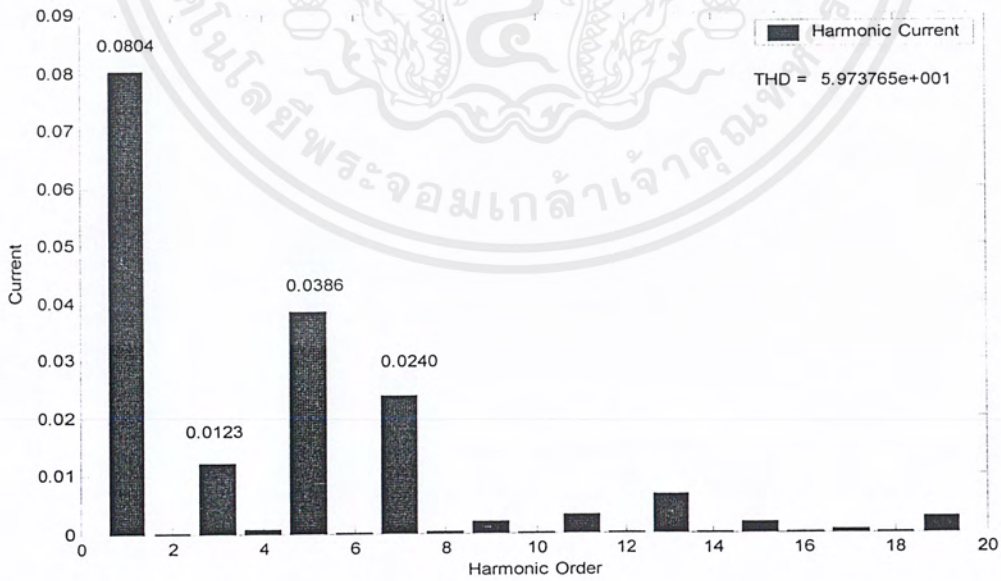
การทดลอง	I (line) (A)			V (line-line) (V)			N(rpm) (รอบ/นาที)		
	Phase			Phase			ครั้งที่		
	A	B	C	AB	BC	AC	1	2	3
สภาวะ No-load	0.9	0.9	0.9	109	105	106	2010	2011	2015

การทดลอง	DC MOTOR											
	V_{dc} (V)			I_{dc} (A)			I_r (A)			I_a (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
สภาวะ No-load	130	130	130	1.4	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

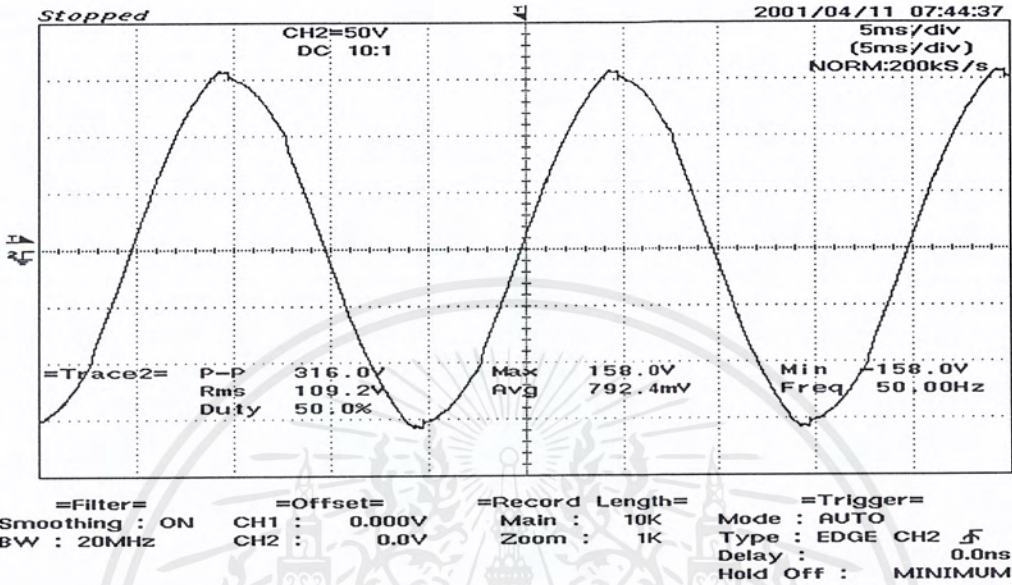


รูปที่ 5.5.1 กราฟกระแส

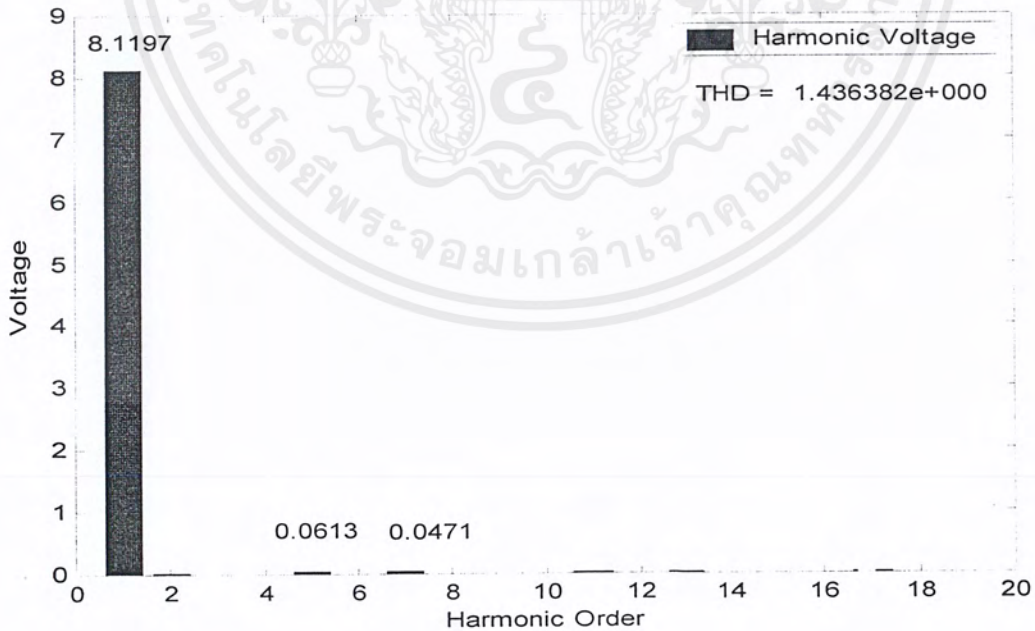


รูปที่ 5.5.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 5.5 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมตริก 30°
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6.1 กราฟแรงดัน



รูปที่ 5.6.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 รูปที่ 5.6 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 30 องศา
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

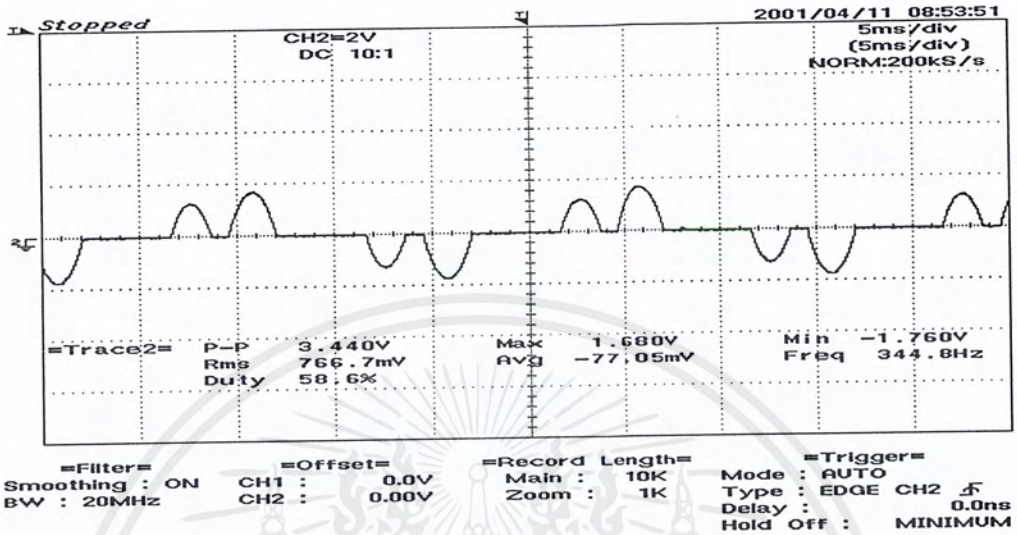
3 . ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 60°

ตารางที่ 5.3 ทดลองที่สภาวะ No load ที่มุมทริก SCR 60°

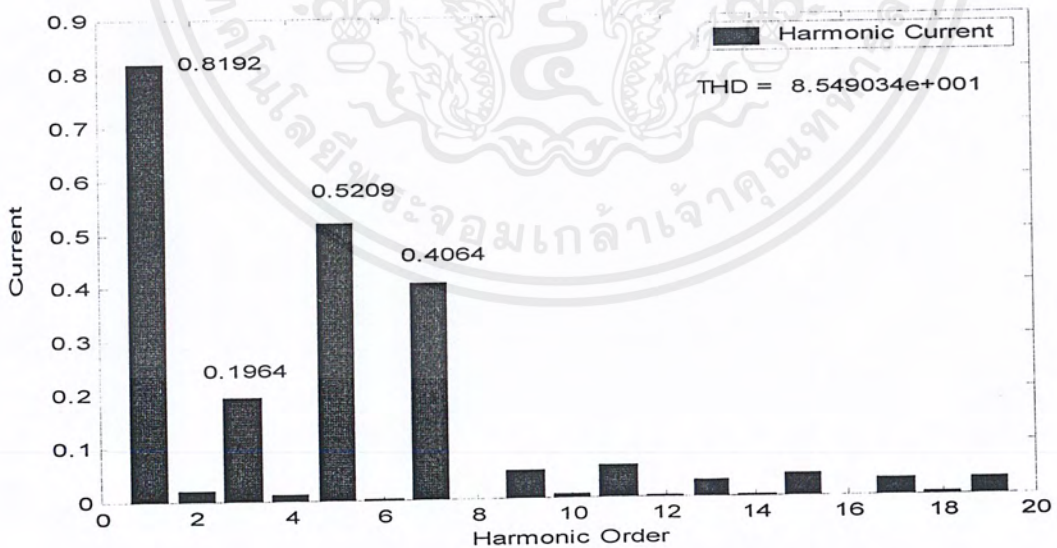
การทดลอง	I (line) (A)			V (line-line) (V)			N(rpm) (รอบ/นาที)		
	Phase			Phase			ครั้งที่		
	A	B	C	AB	BC	AC	1	2	3
1.สภาวะ No-load	1.0	0.8	1.0	150	142	146	1986	1985	1987

การทดลอง	DC MOTOR											
	V _{dc} (V)			I _{dc} (A)			I _f (A)			I _a (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.สภาวะ No-load	130	130	130	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



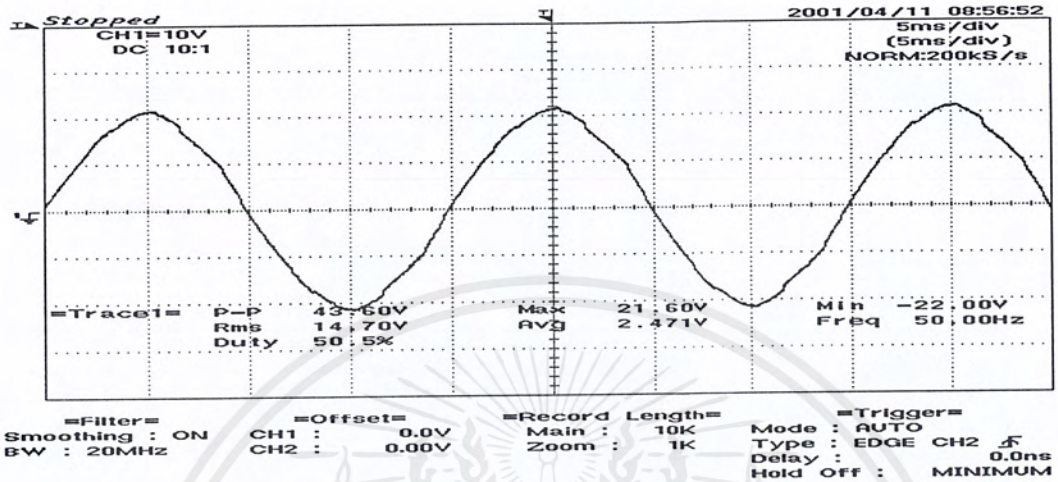
รูปที่ 5.7.1 กราฟกระแส



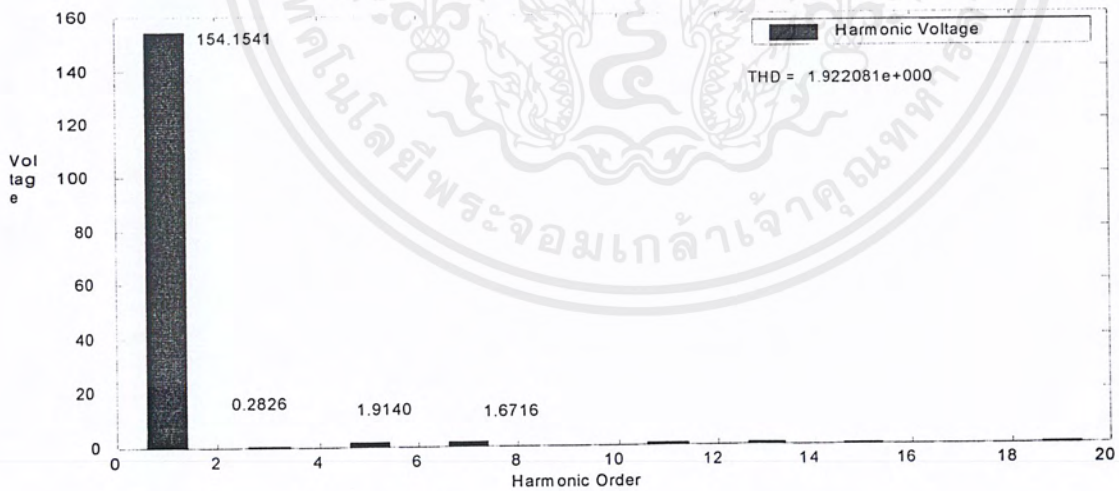
รูปที่ 5.7.2 กราฟสเปกตรัมกระแส

รูปที่ 5.7 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8.1 กราฟสเปกตรัมแรงดัน



รูปที่ 5.8.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน

รูปที่ 5.8 กราฟกระแสและสเปกตรัมแรงดันขณะ : สภาวะ No-Load : ที่มุมทริก 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 0° ตารางที่ 5.4 ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 0°

ที่คอนเวอร์เตอร์

V line (V)	I line (A)	Power (W)	Idc (A)
101.4	10.4	2070	14.6
101.7	10.5		
104.7	11.0		

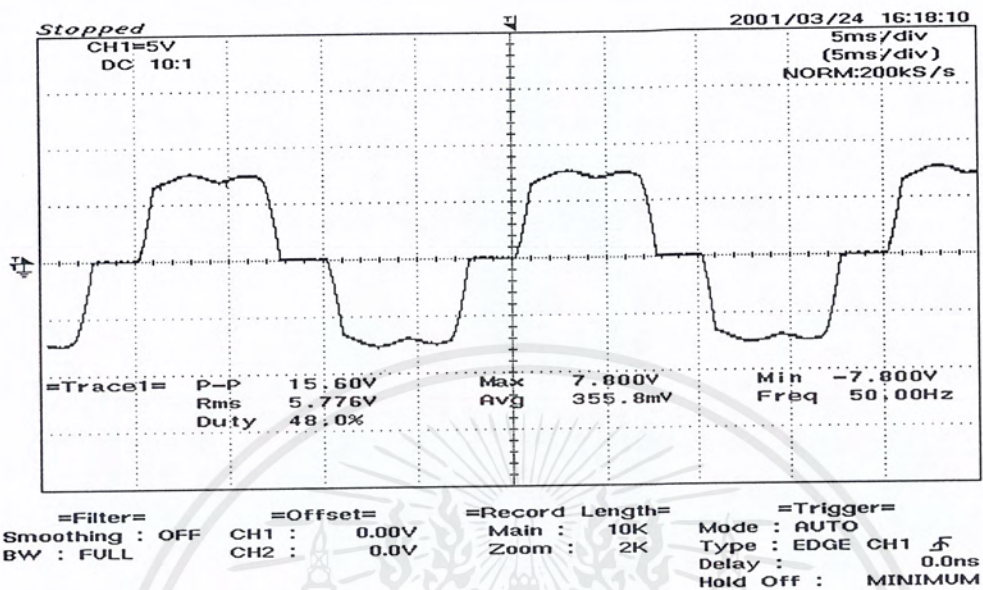
ที่คัสซิมอเตอร์

If (A)	Ia (A)	Torque (N-m)	Speed (rpm)
0.4	14.2	4.9	1900

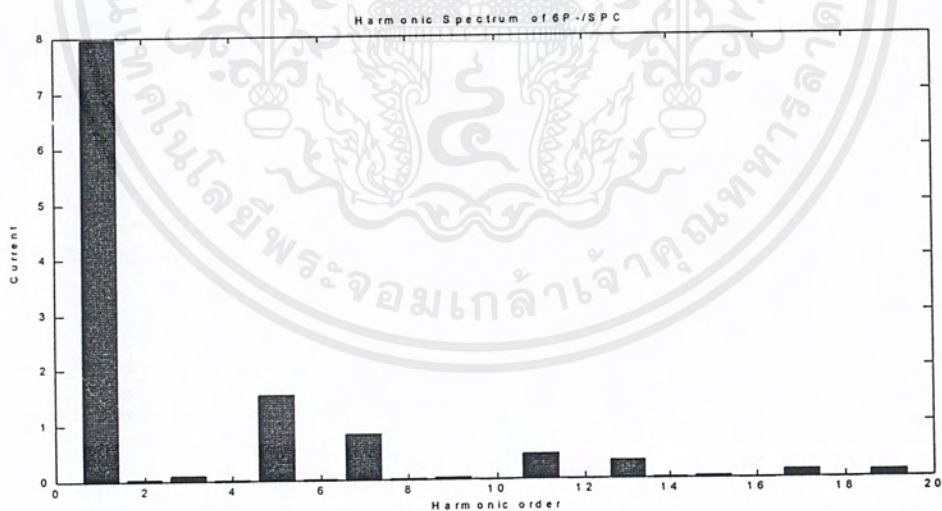
ที่คัสซีเจเนอเรเตอร์และโหลด

If (A)	V load (V)	I load (A)
0.77	95	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



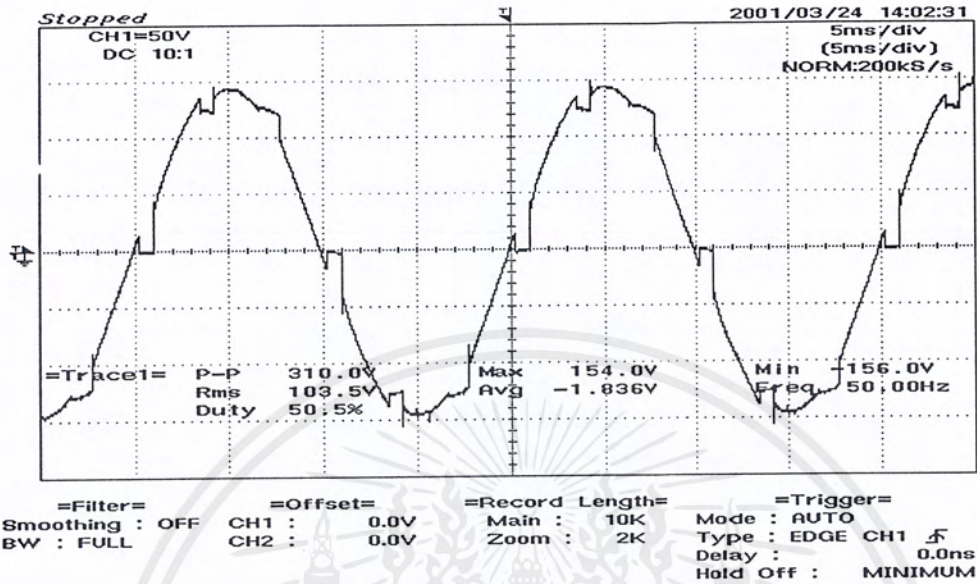
รูปที่ 5.9.1 กราฟกระแส



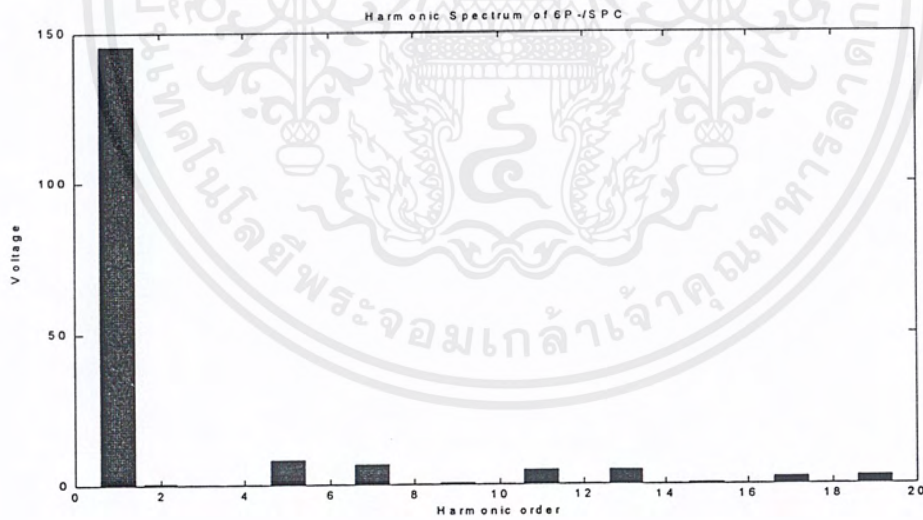
รูปที่ 5.9.2 กราฟสเปกตรัมกระแส ค่า THD = 23.20%

รูปที่ 5.9 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมตริก 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10.1 กราฟกระแส



รูปที่ 5.10.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน ค่า THD = 9.33%

รูปที่ 5.10 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 0°

ตารางที่ 5.5 ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 0°

ที่คอนเวอร์เตอร์

V line (V)	I line (A)	Power (W)	Power Factor	Idc (A)
99.6	5.7	1010	0.592	7.9
100.0	5.7			
102.5	5.8			

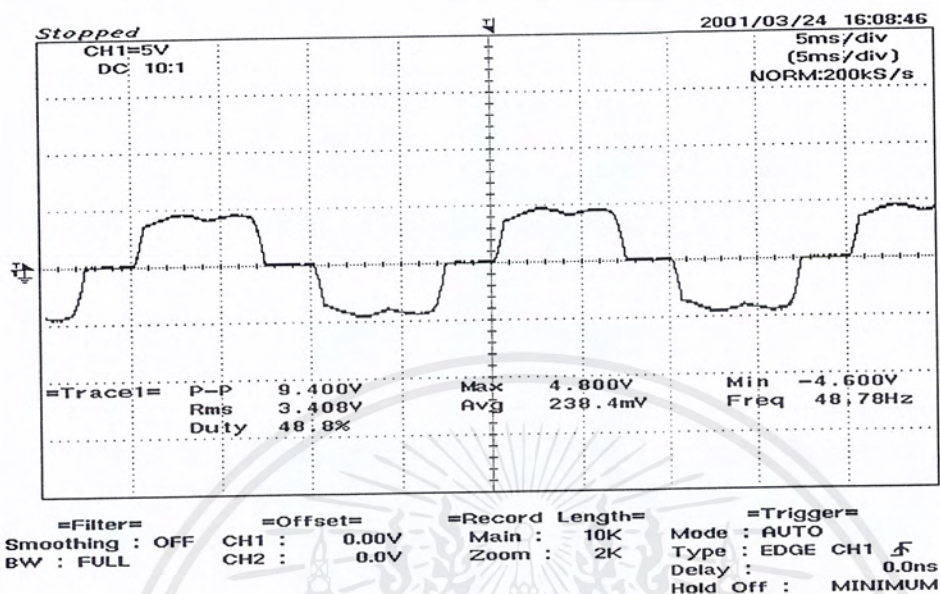
ที่ตีซีมอเตอร์

If (A)	Ia (A)	Torque (N-m)	Speed (rpm)
0.4	7.5	2.8	1946

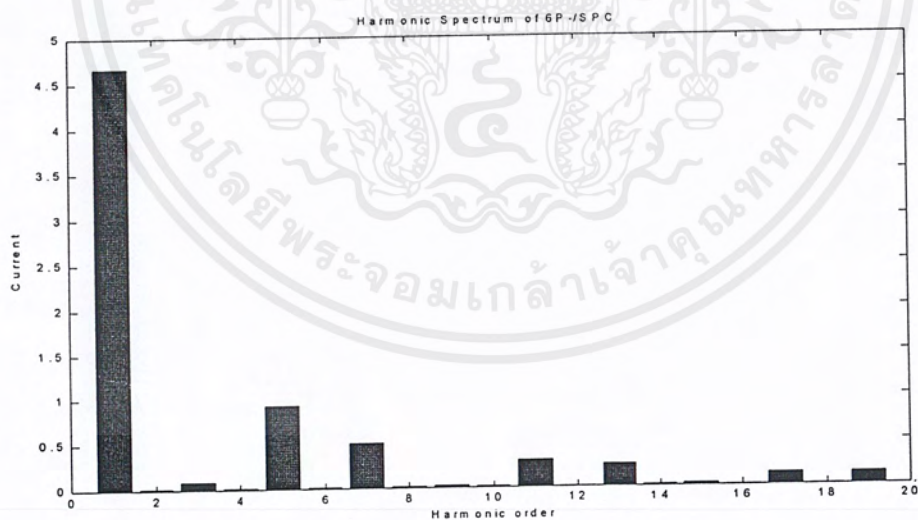
ที่ตีซีเจนเนอเรเตอร์และโหลด

If (A)	V load (V)	I load (A)
0.77	150.8	4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



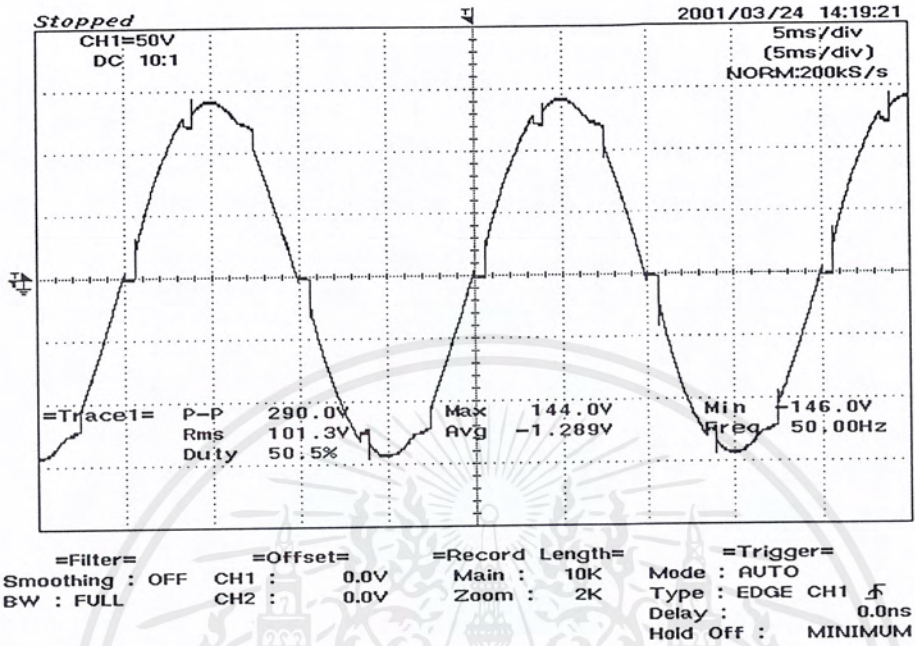
รูปที่ 5.11.1 กราฟกระแส



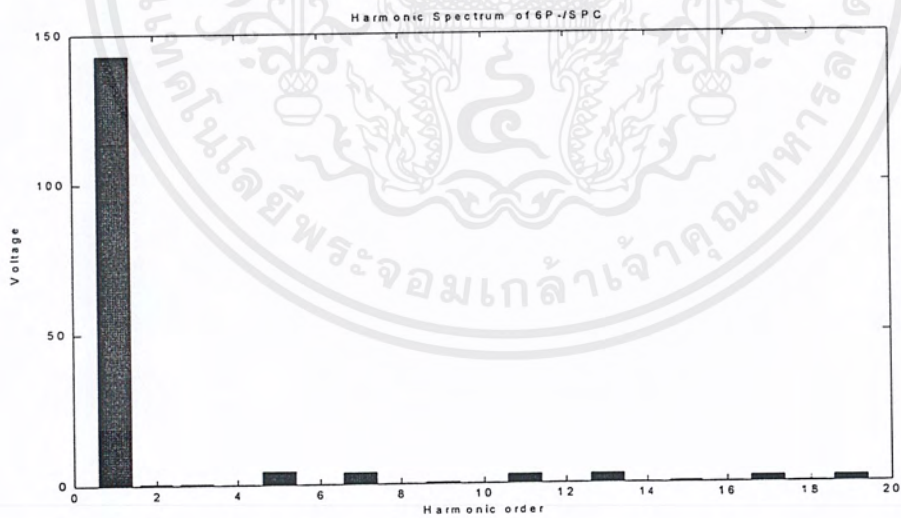
รูปที่ 5.11.2 กราฟสเปกตรัมกระแส ค่า THD = 24.61%

รูปที่ 5.11 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมตริก 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12.1 กราฟแรงดัน



รูปที่ 5.12.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน ค่า THD = 5.67%

รูปที่ 5.12 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมตริก 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 30°

ตารางที่ 5.6 ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 30°

ที่คอนเวอร์เตอร์

V line (V)	I line (A)	Power (W)	Power Factor	Idc (A)
150.2	9.0	2050	0.45	15.2
151.4	10.4			
155.6	11.2			

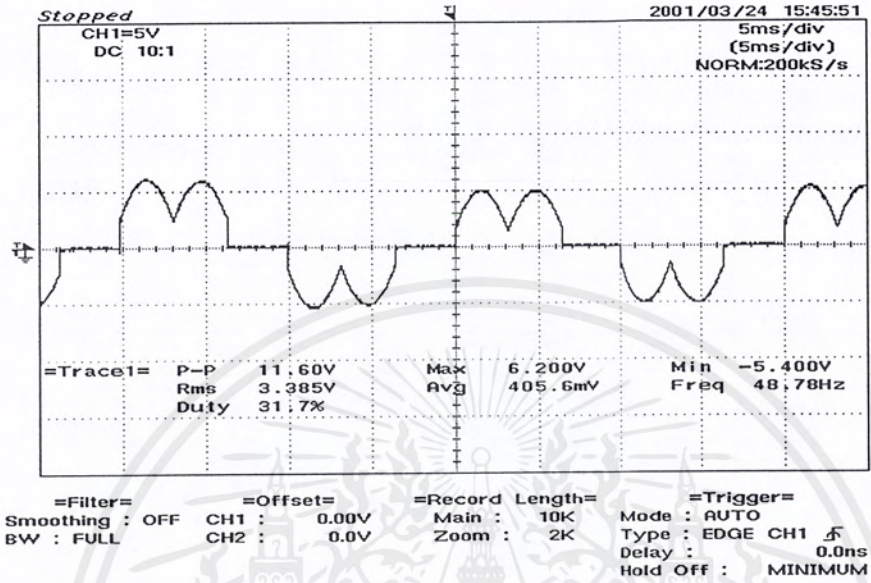
ที่คีมอเตอร์

If (A)	Ia (A)	Torque (N-m)	Speed (rpm)
0.4	14.8	4.7	1921

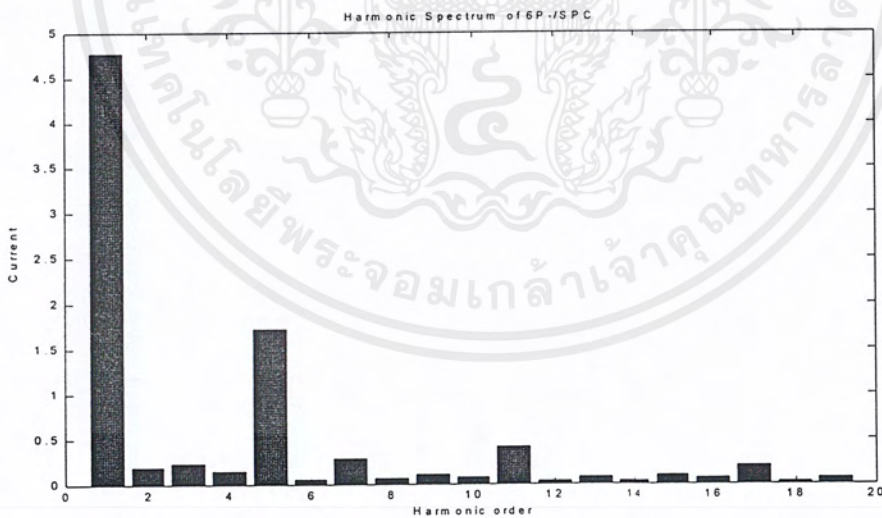
ที่คีมอเตอร์และโหลด

If (A)	V load (V)	I load (A)
0.73	89.2	11.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



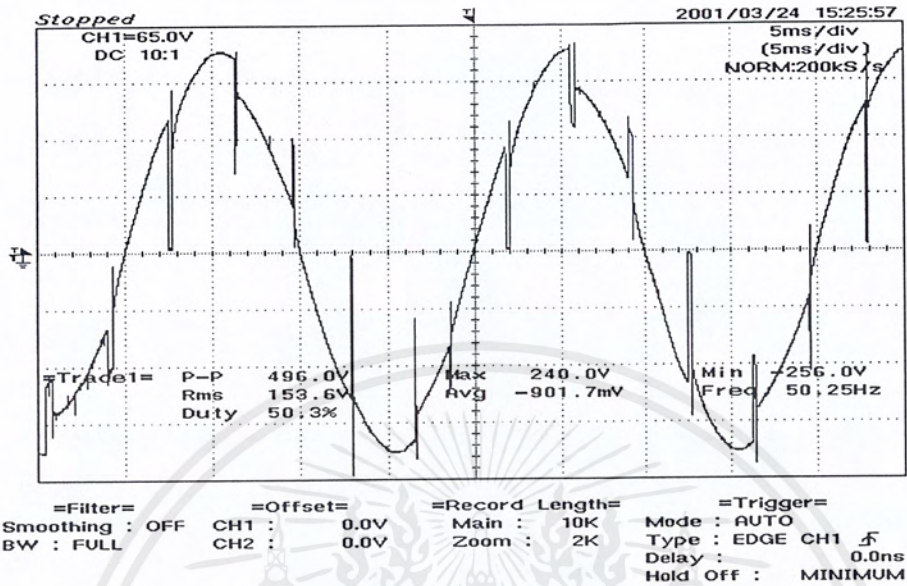
รูปที่ 5.13.1 กราฟกระแส



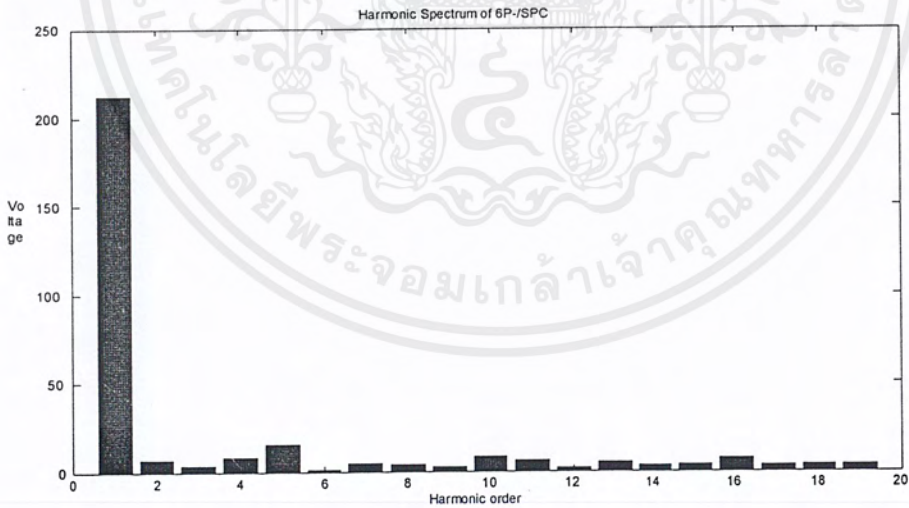
รูปที่ 5.13.2 กราฟสเปกตรัมกระแส ค่า THD = 39.16%

รูปที่ 5.13 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14.1 กราฟแรงดัน



รูปที่ 5.14.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน ค่า THD = 15.60%

รูปที่ 5.14 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่พิกัด Rated load : ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 30°

ตารางที่ 5.7 ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 30°

ที่คอนเวอร์เตอร์

V line (V)	I line (A)	Power (W)	Power Factor	Idc (A)
113.0	5.5	1100	0.558	7.8
113.8	5.7			
116.8	6.0			

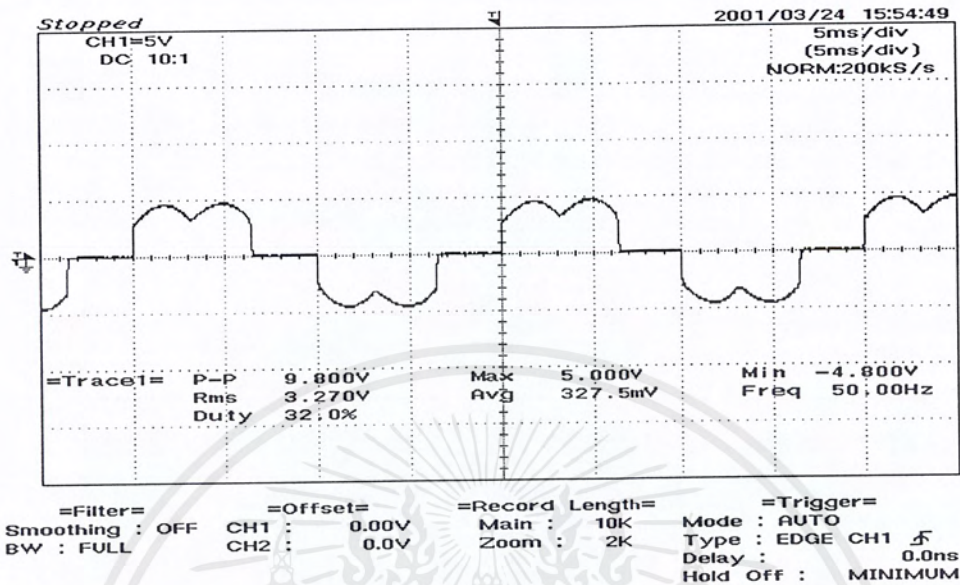
ที่คิซิมอเตอร์

If (A)	Ia (A)	Torque (N-m)	Speed (rpm)
0.4	7.4	2.7	1942

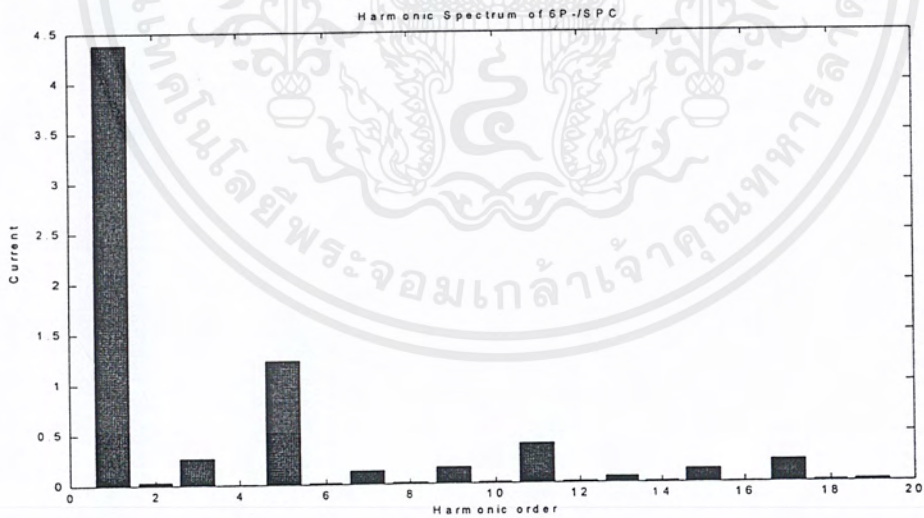
ที่คิซิจেনเนอเรเตอร์และโหลด

If (A)	V load (V)	I load (A)
0.74	147.7	4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



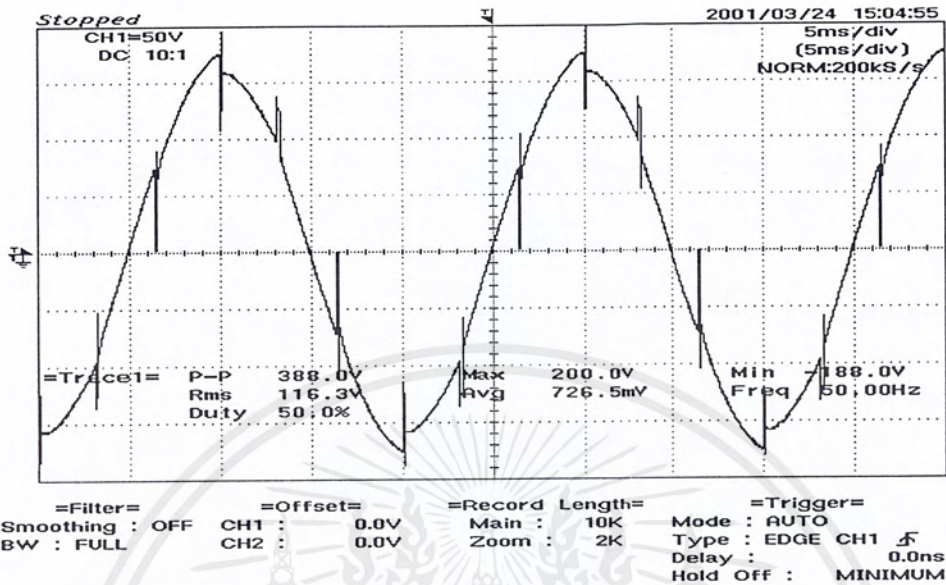
รูปที่ 5.15.1 กราฟกระแส



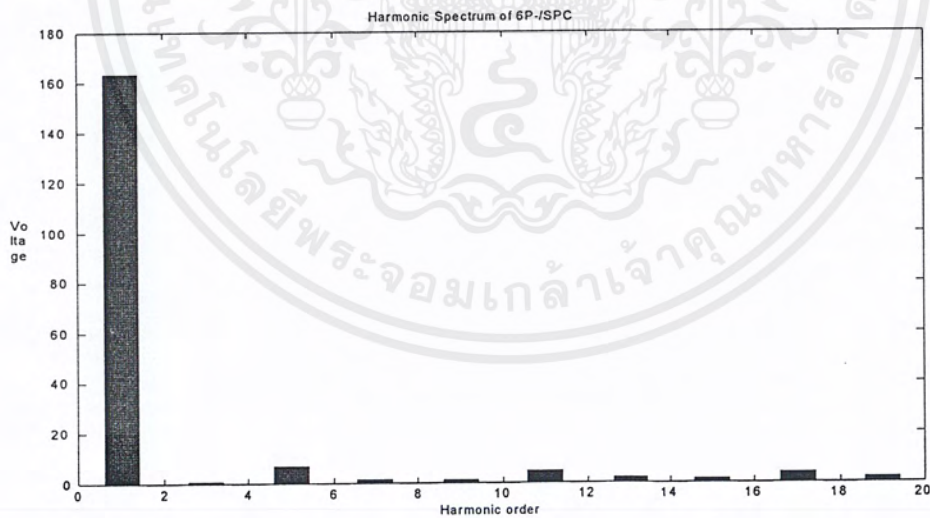
รูปที่ 5.15.2 กราฟสเปกตรัมกระแส ค่า THD = 32.03%

รูปที่ 5.15 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมตริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16.1 กราฟแรงดัน



รูปที่ 5.16.2 กราฟสเปกตรัมแรงดัน THD = 9.01%

รูปที่ 5.16 กราฟแรงดันและสเปกตรัมแรงดันขณะ : ที่ 50% Rated load : ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทดลองที่พิกัด Rated load ที่มุมทริก SCR 60°
9. ทดลองที่พิกัด 50% Rated load ที่มุมทริก SCR 60°

เมื่อทำการทดลองที่มุมทริก 60° จะพบว่า 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ทำงานผิดปกติเพี้ยนไป คือ จะเกิดการไม่สมดุลย์ของกระแสทั้ง 3 เฟส จึงไม่ได้ทำการบันทึกผลการทดลองที่สภาวะนี้

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่าฮาร์มอนิกที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์มีแนวโน้ม เป็นไปตามสมการคุณลักษณะ $n = pk \pm 1$ โดยแยกเป็นกรณีได้ดังนี้

- ขณะ No load กระแสฮาร์มอนิกจะมีฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 เด่นชัด และมีฮาร์มอนิกที่ 3 ปนออกมาด้วย แต่แรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าน้อย
- ขณะมีโหลด กระแสและแรงดันฮาร์มอนิก จะเป็นไปตามสมการคุณลักษณะโดยจะ เห็นได้ชัดเจนที่มุมทริก 0° ส่วนที่มุมทริก 30° มีฮาร์มอนิกอื่นปนออกมาบ้าง

5.2 หลังการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

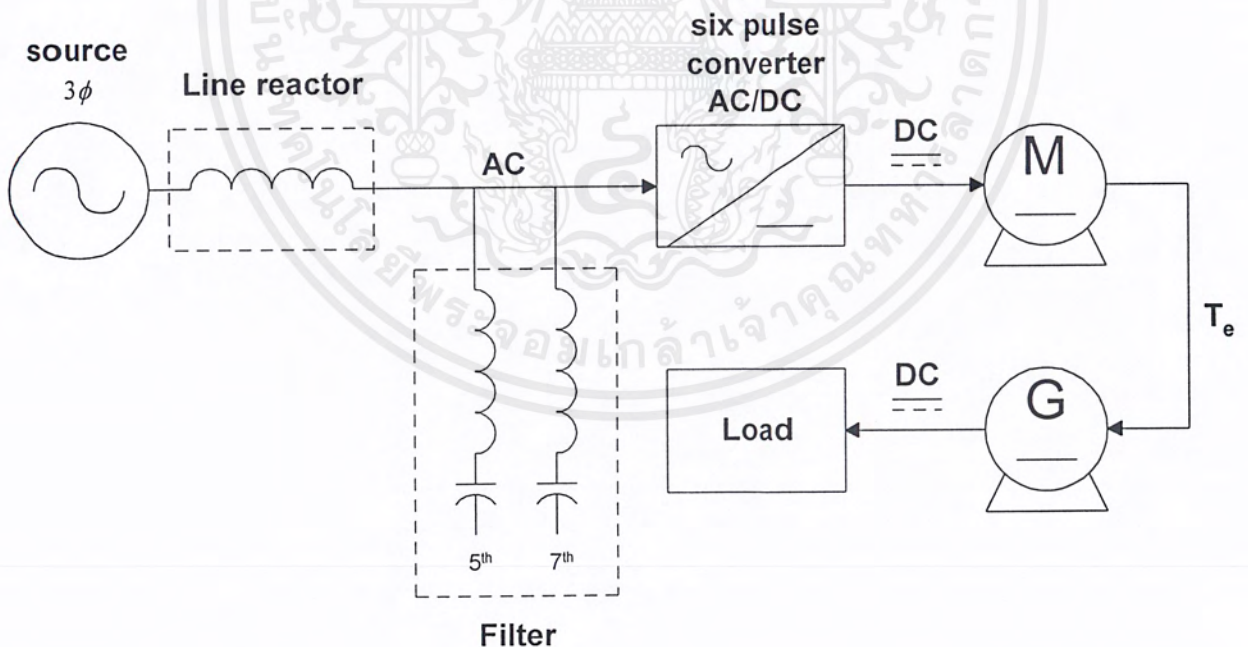
เพื่อศึกษาฮาร์มอนิกที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ หลังจากการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 และคุณผลของไลน์รีแอกเตอร์ที่ช่วยในการกรองฮาร์มอนิก

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองชุดเดียวกับการทดลองก่อนการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก โดยการเพิ่มสิ่งต่อไปนี้เข้าไป ดังในรูปที่ 5.17

1. ชุดตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5
2. ชุดตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7
3. ชุดไลน์รีแอกเตอร์

5.2.2 ขั้นตอนในการทดลอง



รูปที่ 5.17 แสดงขั้นตอนการทดลองหลังใส่ตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 วิธีการทดลอง

ต่อวงจรตามรูปที่ 5.2 เหมือนเดิม แต่เพิ่มชุดวงจรตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5,7 และชุดไลน์รีแอกเตอร์ ตามกรณีการทดลองต่างๆดังนี้

1. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมทริก SCR 0°
2. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 0°
3. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมทริก SCR 0°
4. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 0°
5. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 , 7 : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 0°
6. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมทริก SCR 30°
7. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 30°
8. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมทริก SCR 30°
9. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 30°

1. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมพรีก SCR 0°

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) และ Line Reactor

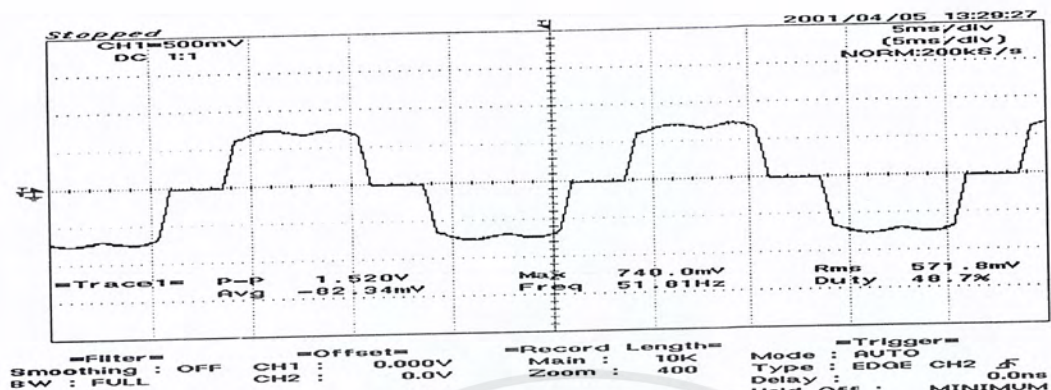
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1. ไม่ใส่	-	-	-	-	-	-	9.8	9.7	9.4	106.3	103.2	103.1
2. ใส่ 5 th filter	17.4	17.3	17.2	14.8	15.7	15.0	9.30	9.10	9.0	104.2	101.1	97.5
3. Line Reactor + 5 th filter	17.2	17.1	17.3	14.9	16.0	15.1	9.2	9.0	8.5	100.1	97.3	95.9

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. ไม่ใส่	1883	1880	1874	4.65	4.55	4.60	130	130	130	14.1	13.8	13.6
2. ใส่ 5 th filter	1880	1890	1889	4.40	4.45	4.50	130	130	130	13.6	13.2	13.2
3. Line Reactor + 5 th filter	1903	1888	1908	4.30	4.35	4.15	130	130	130	13.0	12.8	12.8

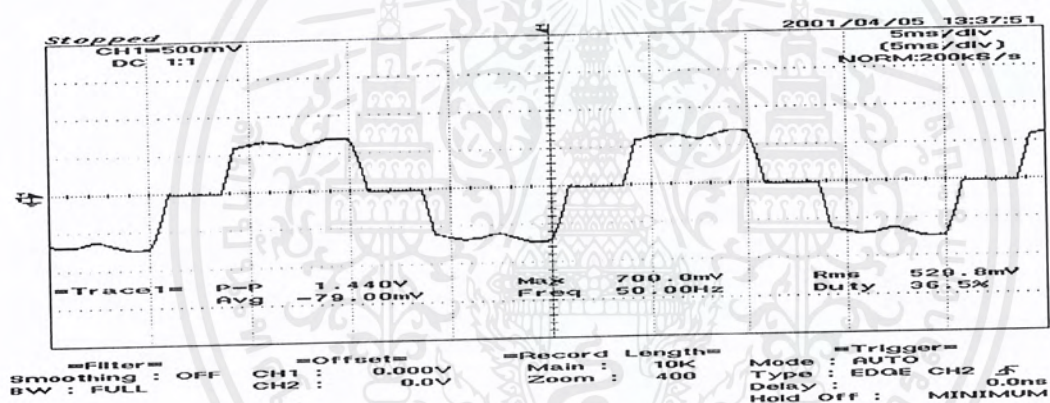
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. ไม่ใส่	0.7	0.7	0.7	12.9	13.1	13.4	11.5	11.7	11.6	78	78.8	80.6
2. ใส่ 5 th filter	0.7	0.7	0.7	12.5	12.5	12.9	11.4	11.5	11.4	76.4	76.7	77.4
3. Line Reactor + 5 th filter	0.7	0.7	0.7	12.1	12.1	12.3	11.2	11.4	11.2	73.5	72.6	75.7

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80 V : I_r = 0.77 A

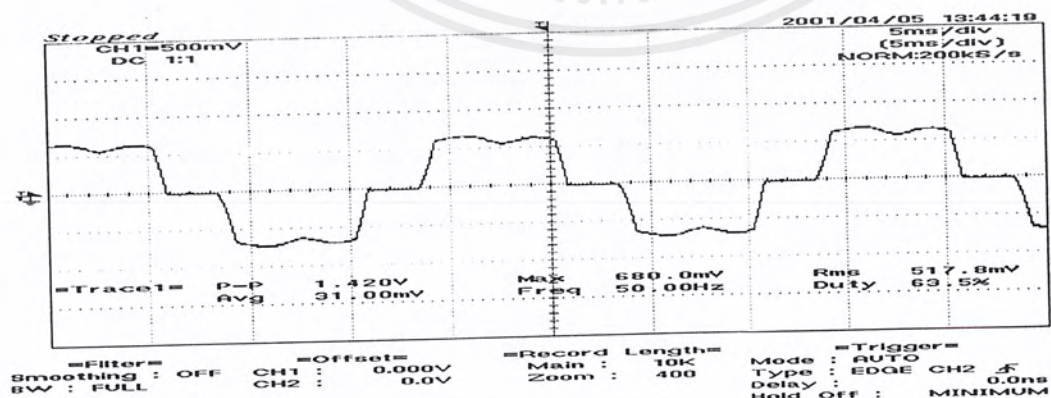
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18.1 กระแสเฟส A



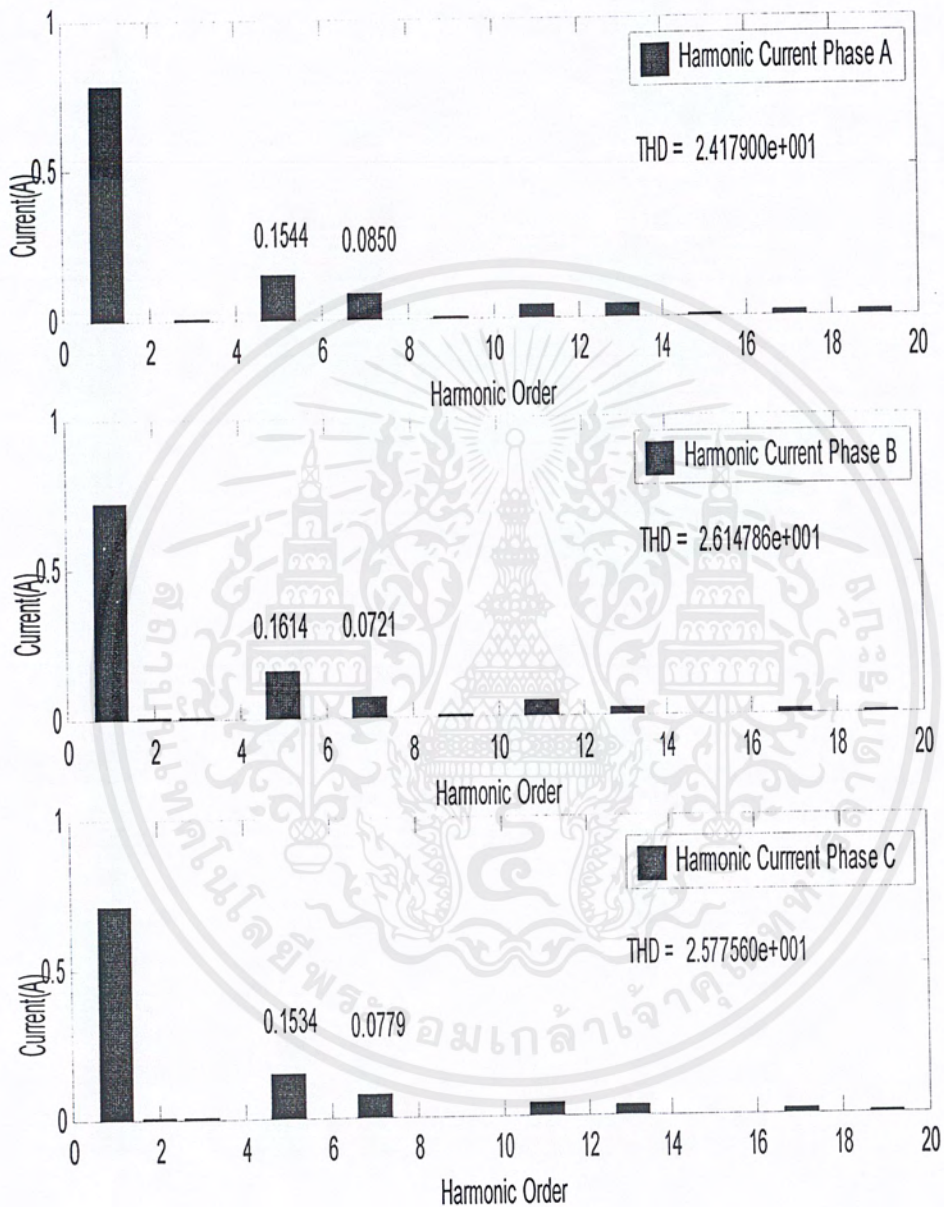
รูปที่ 5.18.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.18.3 กระแสเฟส C

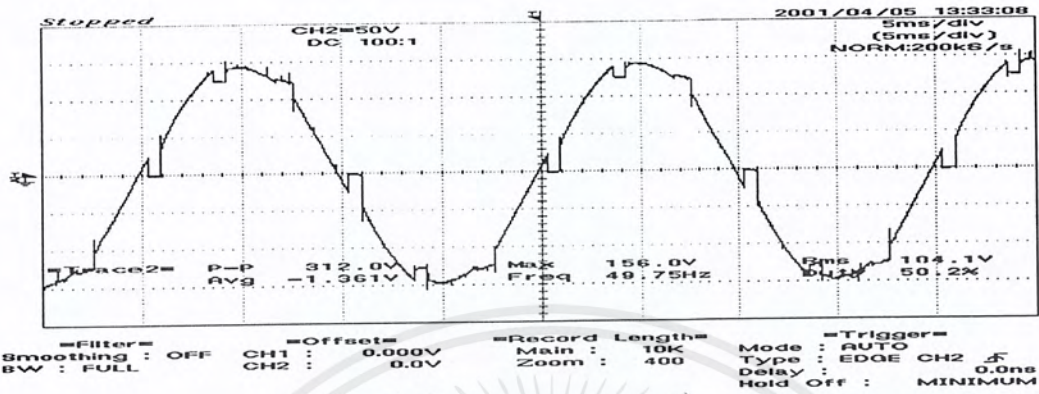
รูปที่ 5.18 แสดงกราฟกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

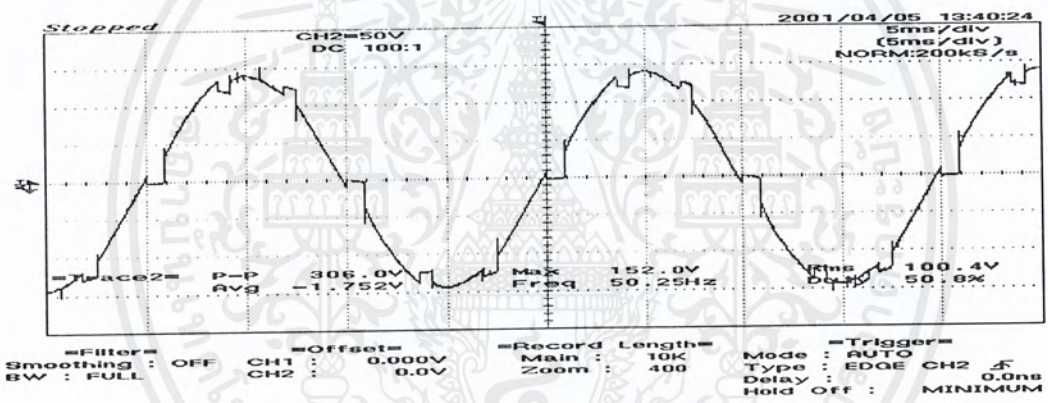


รูปที่ 5.19 กราฟสเปกตรัมกระแส

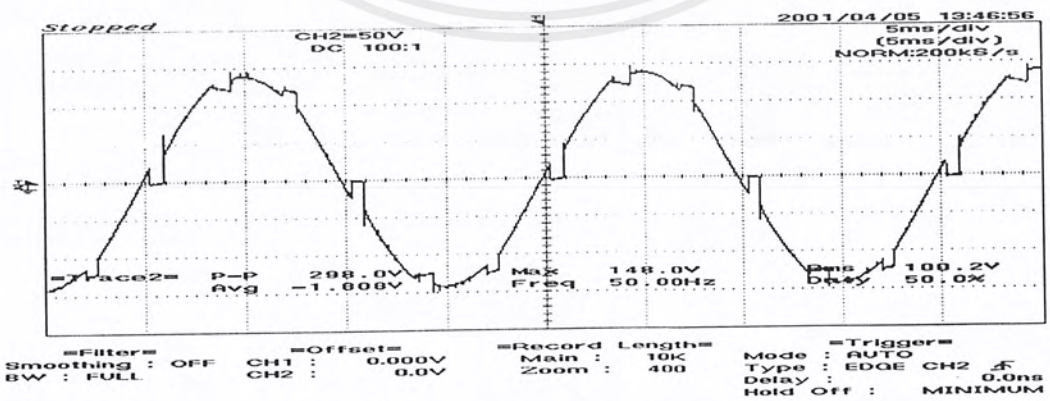
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20.1 แรงดันเฟส A



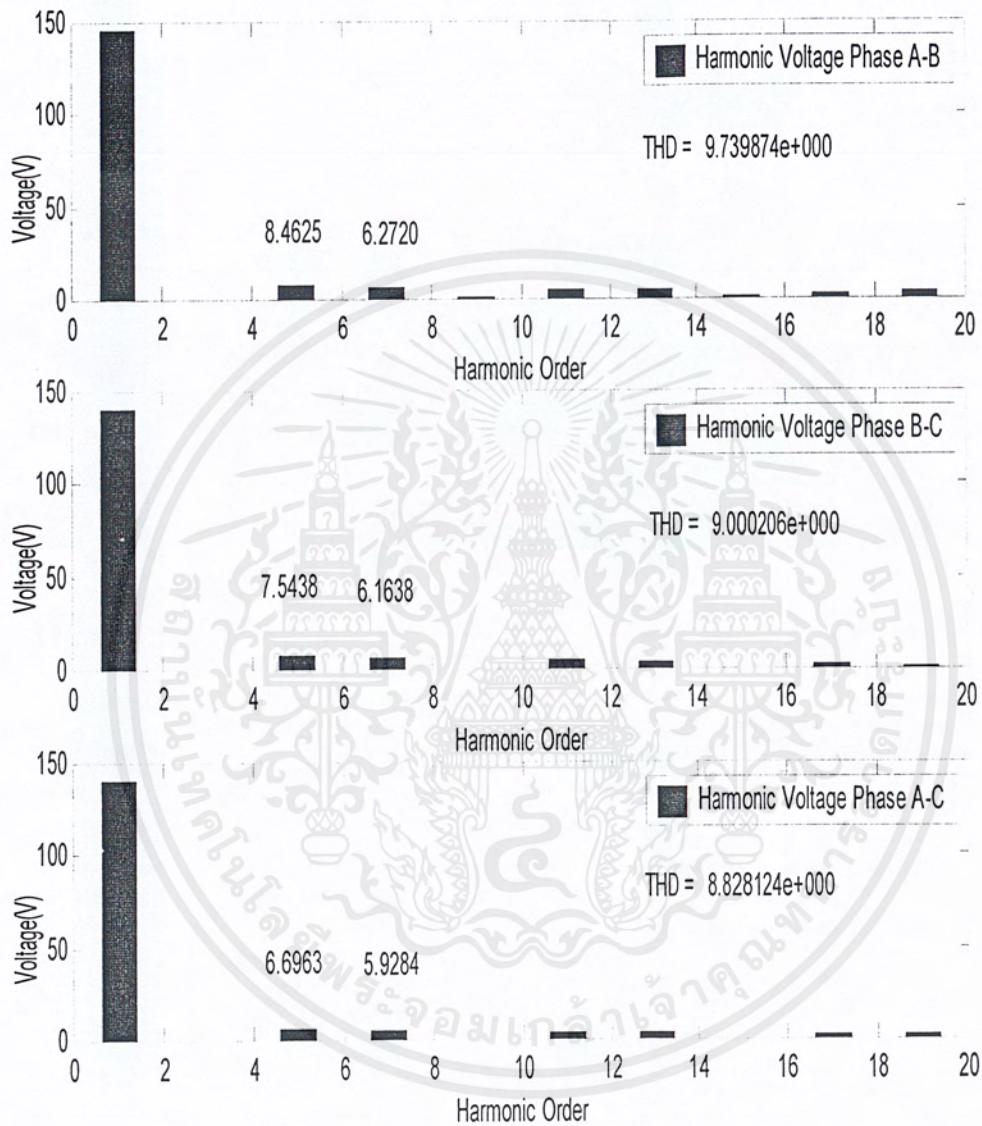
รูปที่ 5.20.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.20.3 แรงดันเฟส C

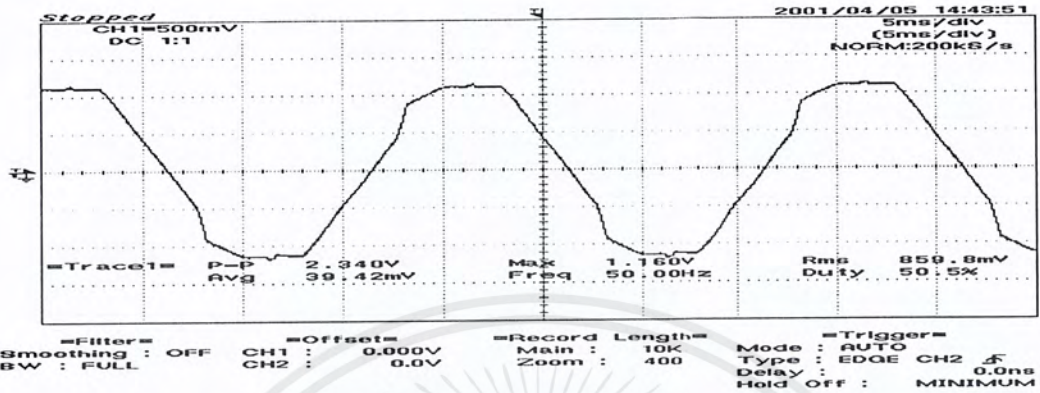
รูปที่ 5.20 กราฟแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

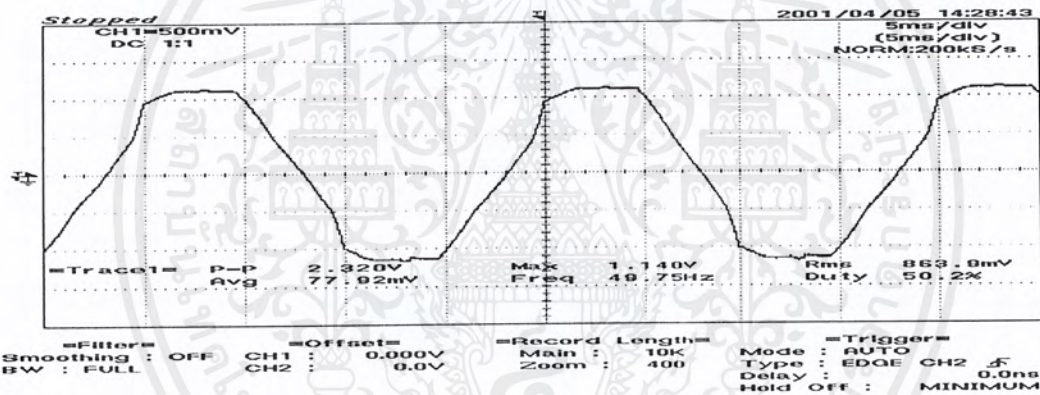


รูปที่ 5.21 กราฟสเปกตรัมแรงดัน

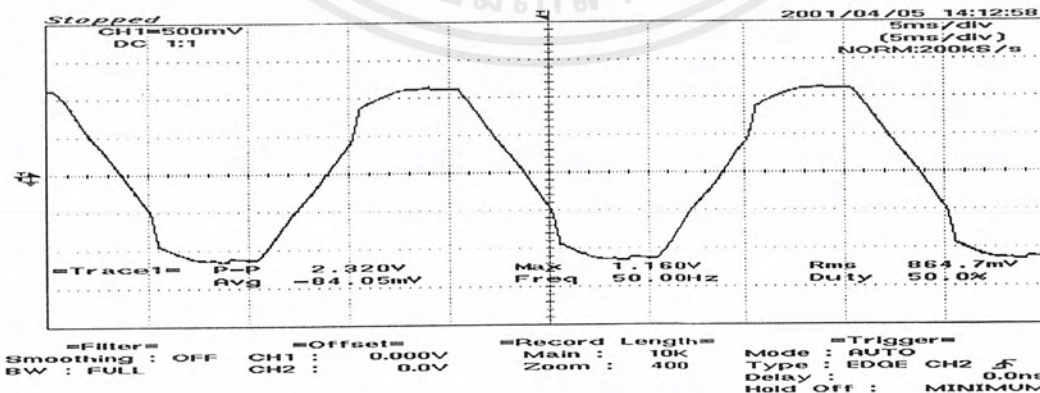
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22.1 กระแสเฟส A



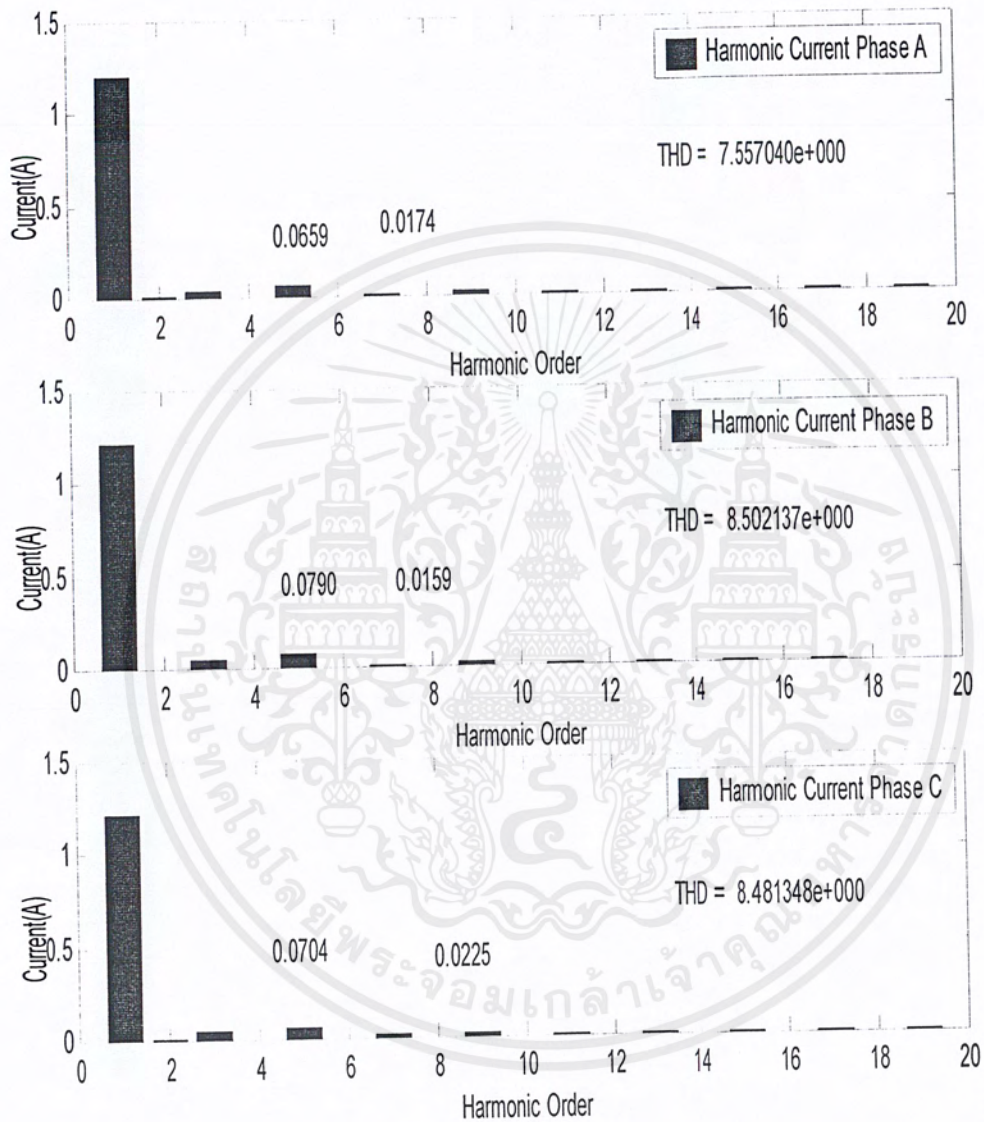
รูปที่ 5.22.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.22.3 กระแสเฟส C

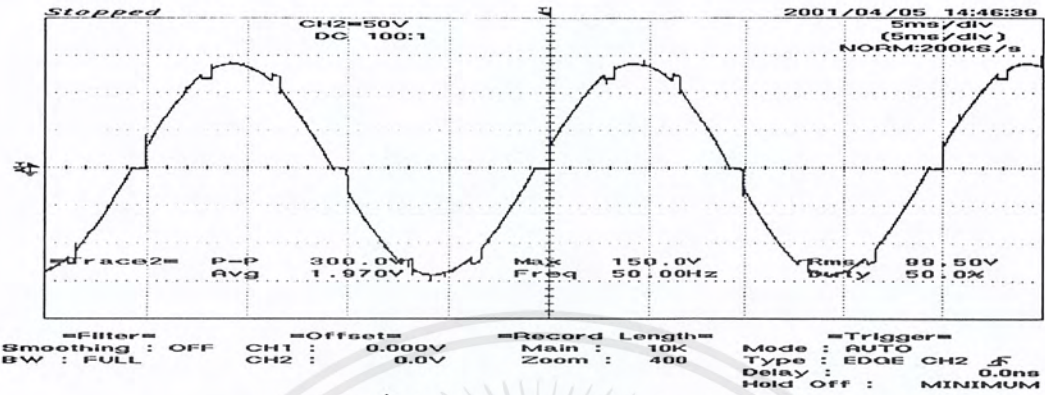
รูปที่ 5.22 กราฟกระแสขณะ : ใต้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

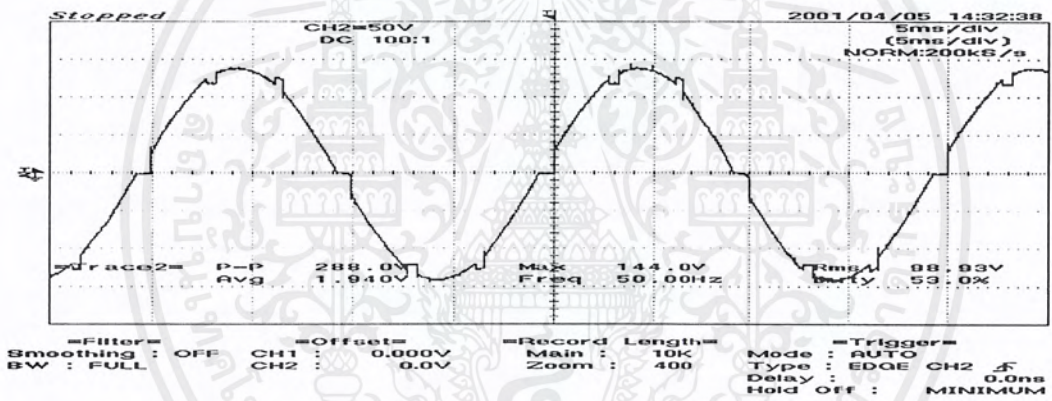


รูปที่ 5.23 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

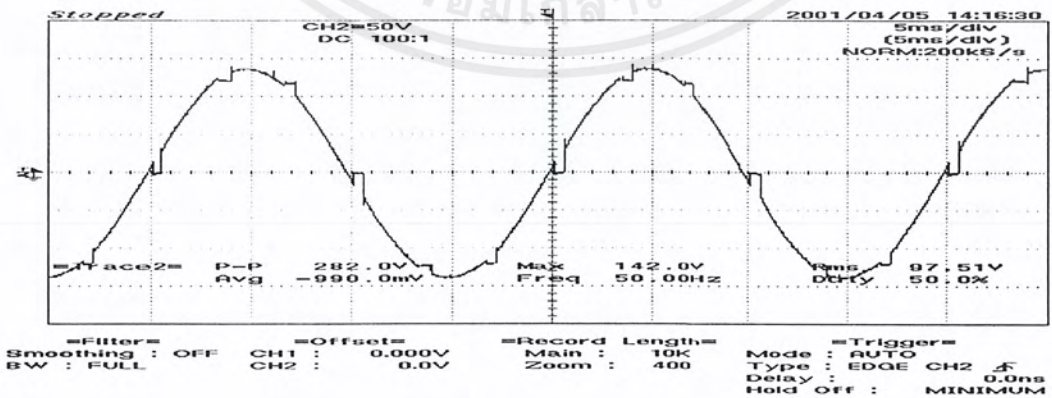
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24.1 แรงดันเฟส A



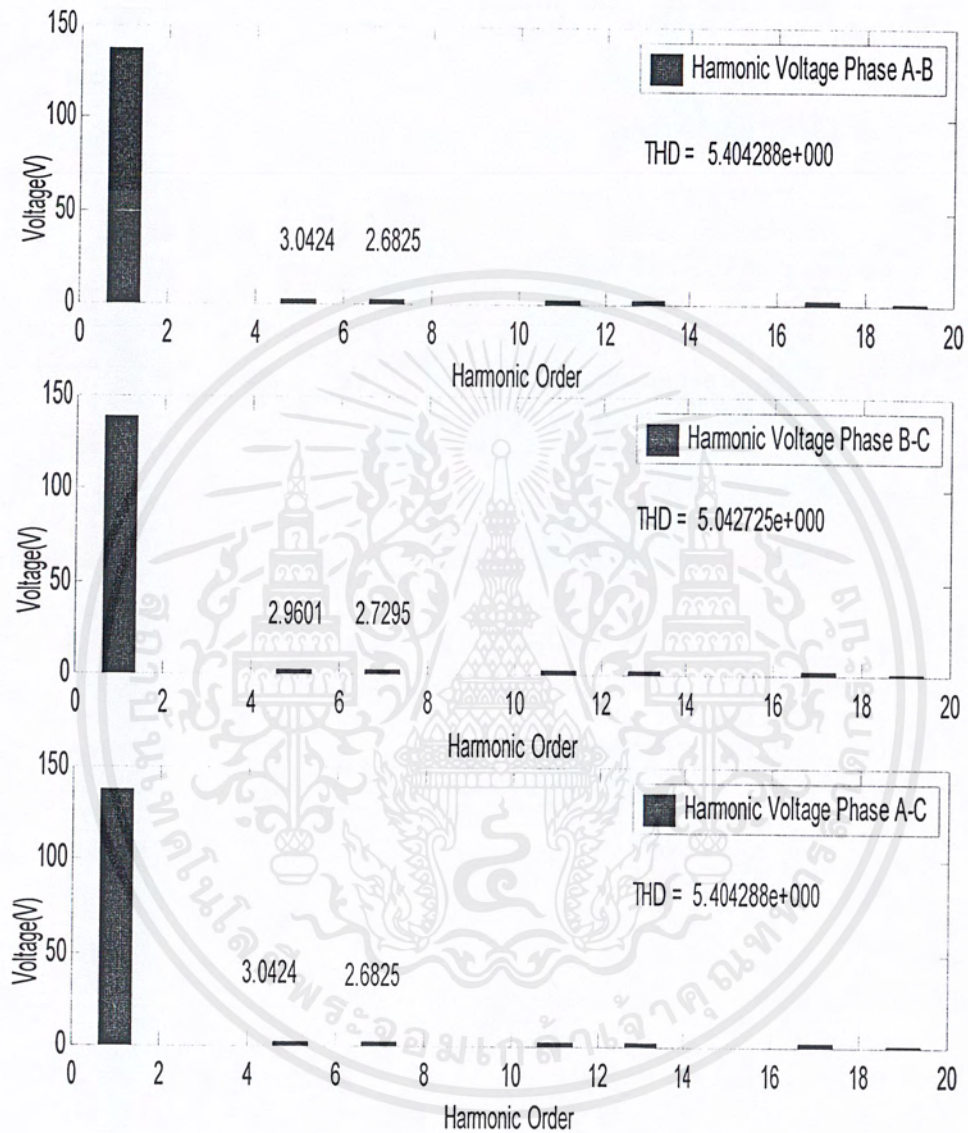
รูปที่ 5.24.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.24.3 แรงดันเฟส C

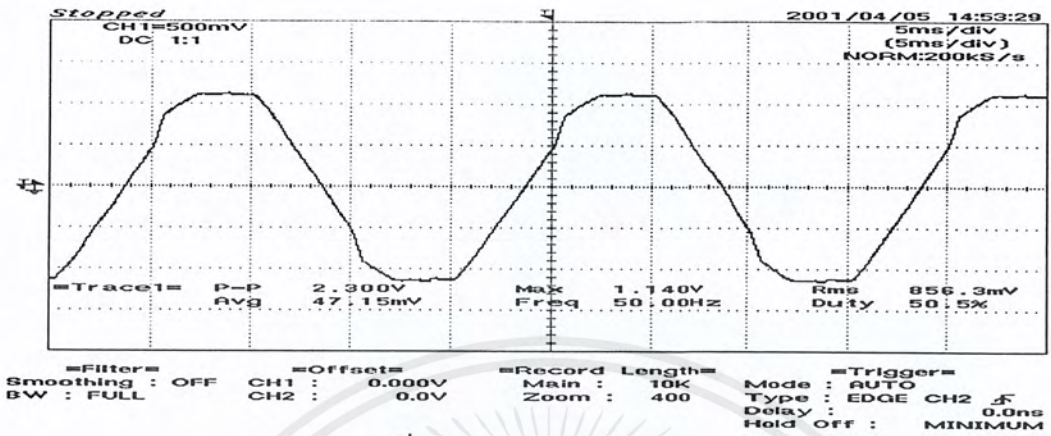
รูปที่ 5.24 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

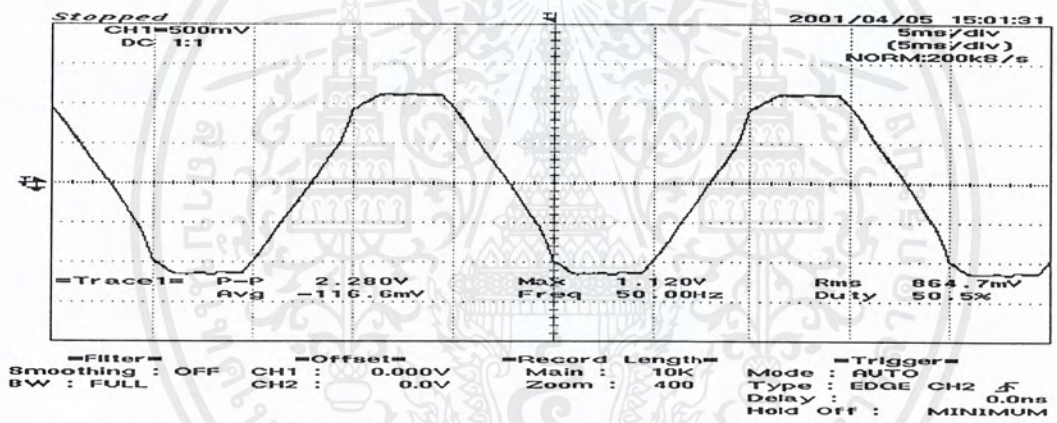


รูปที่ 5.25 แสดงกราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

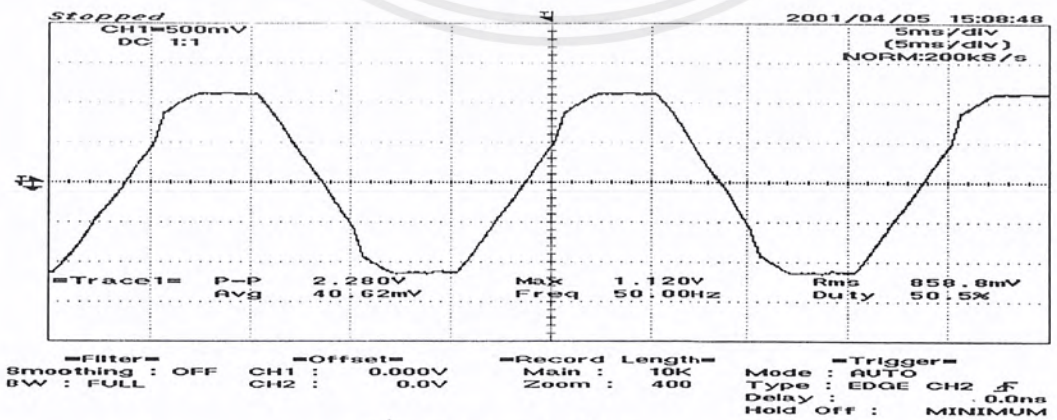
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26.1 กระแสเฟส A



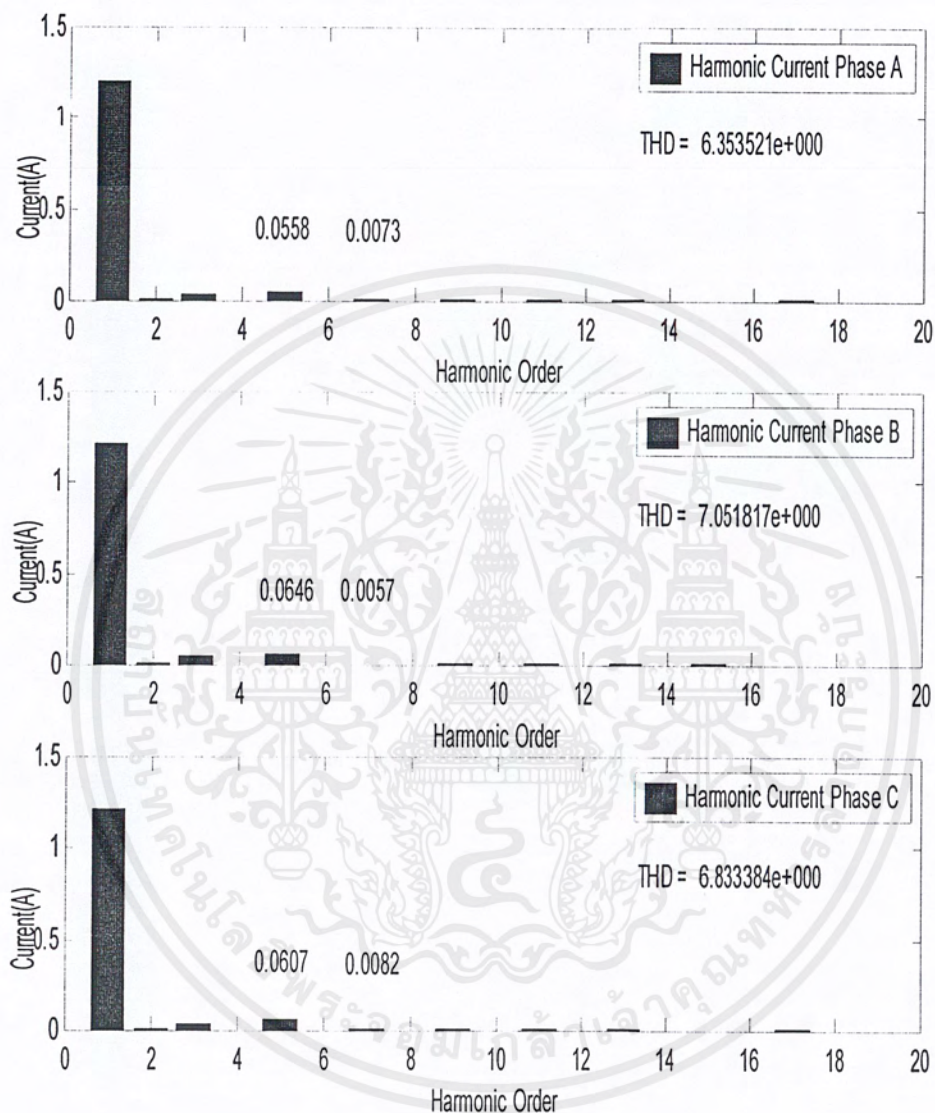
รูปที่ 5.26.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.26.3 กระแสเฟส C

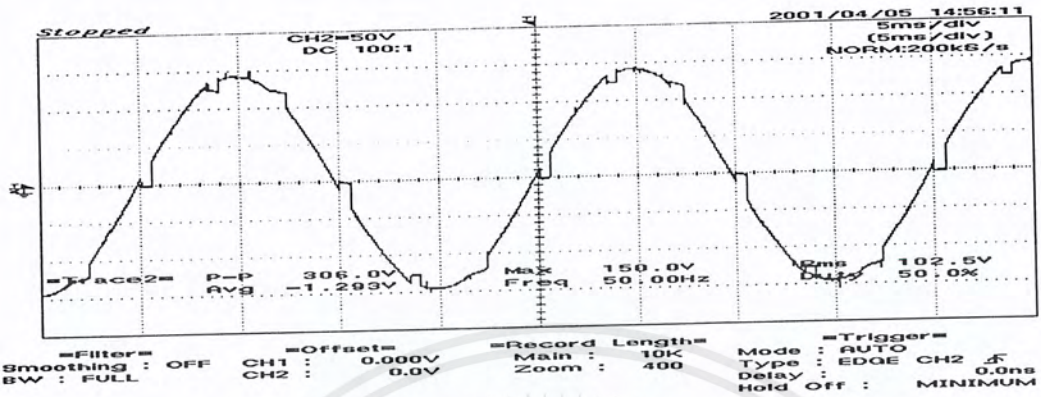
รูปที่ 5.26 กราฟกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

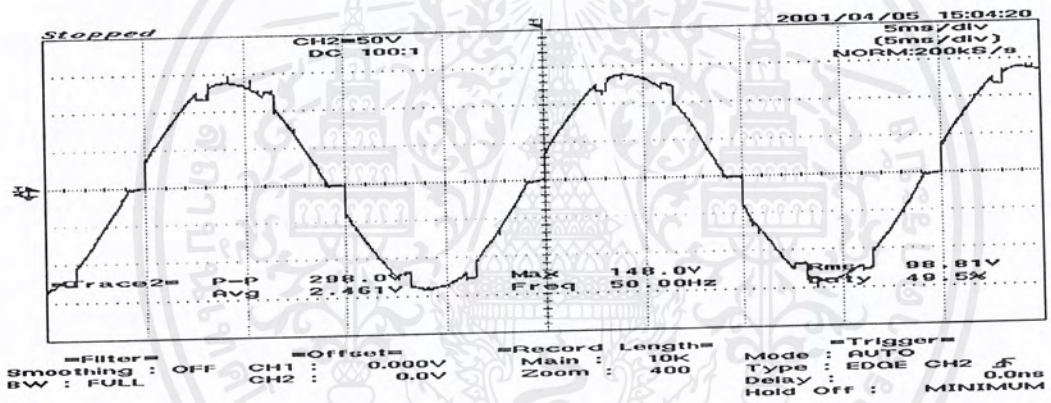


รูปที่ 5.27 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

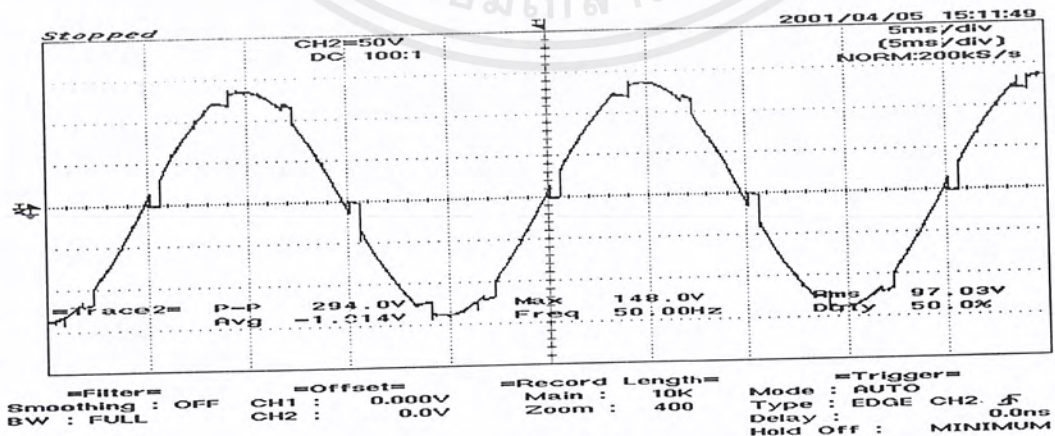
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28.1 แรงดันเฟส A



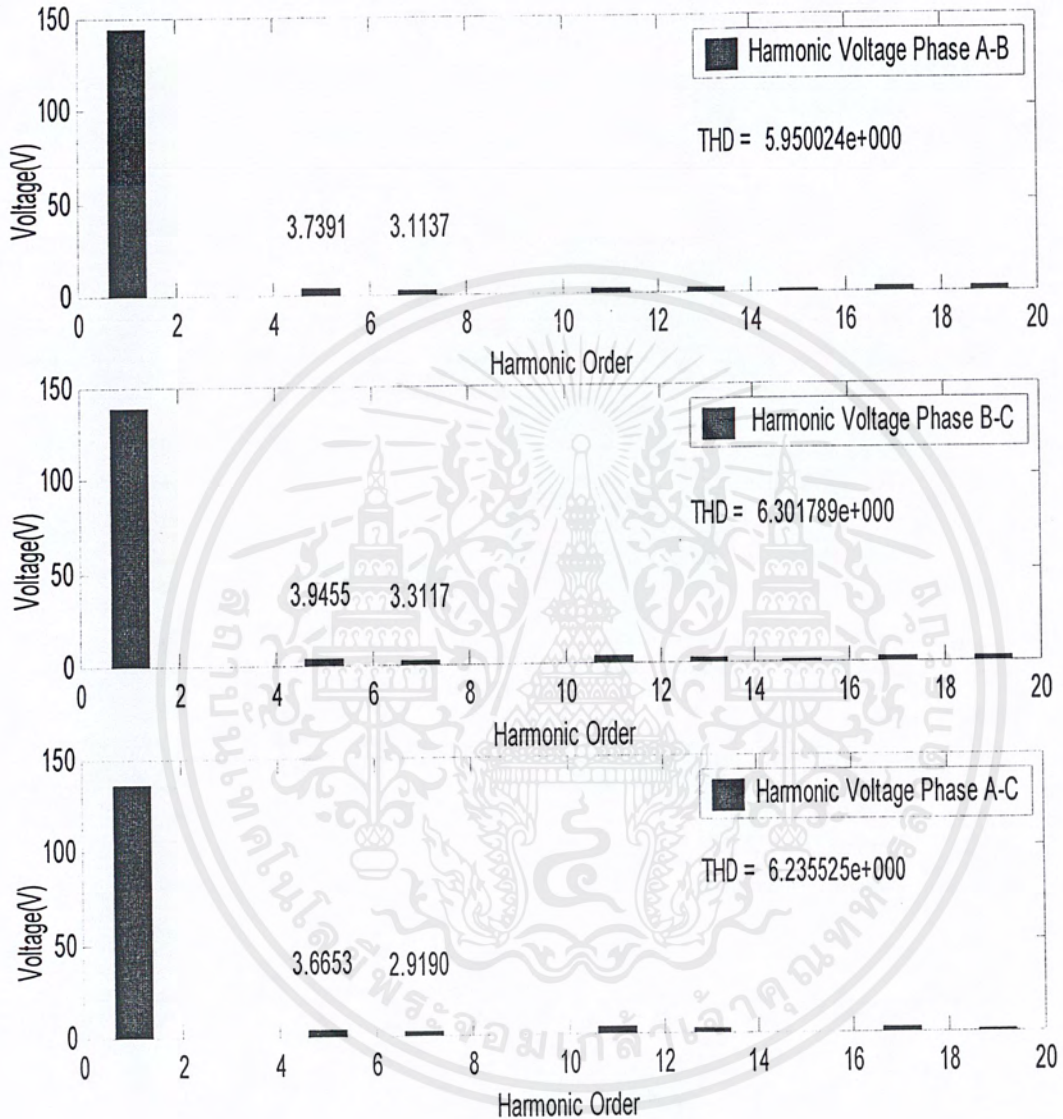
รูปที่ 5.28.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.28.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.28 กราฟแรงดันขณะใส่ : ไลนรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด *Rated Load*

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแสลำดับ ที่ 7(%)	THD _i (%)
1.ไม่ใส่	19.3	10.6	24.18
2.ใส่ 5 th filter	5.50	1.45	7.56
3.LineReactor+5 th filter	4.57	0.60	6.35

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.ไม่ใส่	5.84	4.33	9.74
2.ใส่ 5 th filter	2.20	1.94	5.40
3.LineReactor+5 th filter	2.58	2.15	5.95

1. จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 สามารถลดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 , 7 และค่า THD ลงได้
2. เมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่าTHD ได้มากกว่าเมื่อใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 อย่างเดียว แต่ค่าแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และ THD_v เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
3. จากผลการทดลองทั้ง 3 พบพบว่าให้ค่าผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

2. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 0°

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) และ Line Reactor

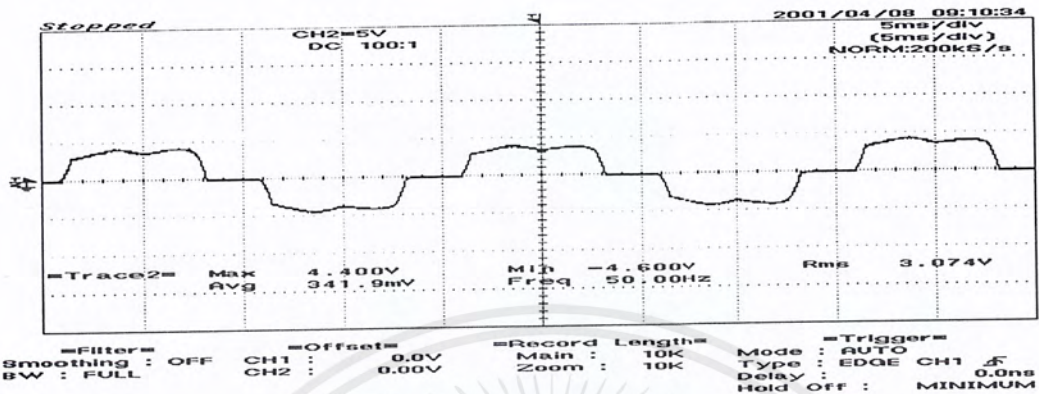
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.ไม่ใส่	-	-	-	-	-	-	5	4.7	4.7	103	98.3	98.5
2.ใส่ 5 th filter	15.7	15.9	15.8	15.5	15.6	15.3	5.05	4.7	4.7	103	100	99
3.Line Reactor +5 th filter	15.6	15.9	15.7	15.0	16	14.9	4.9	4.8	4.8	97.3	94.6	93.27

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	1949	1945	1944	2.25	2.25	2.25	153	154	154	7.1	7	7
2.ใส่ 5 th filter	1923	1920	1921	2.3	2.3	2.3	154	155	155	7.1	7.1	7.2
3.Line Reactor +5 th filter	1970	1979	1968	2.2	2.2	2.2	130	130	130	6.6	7	7

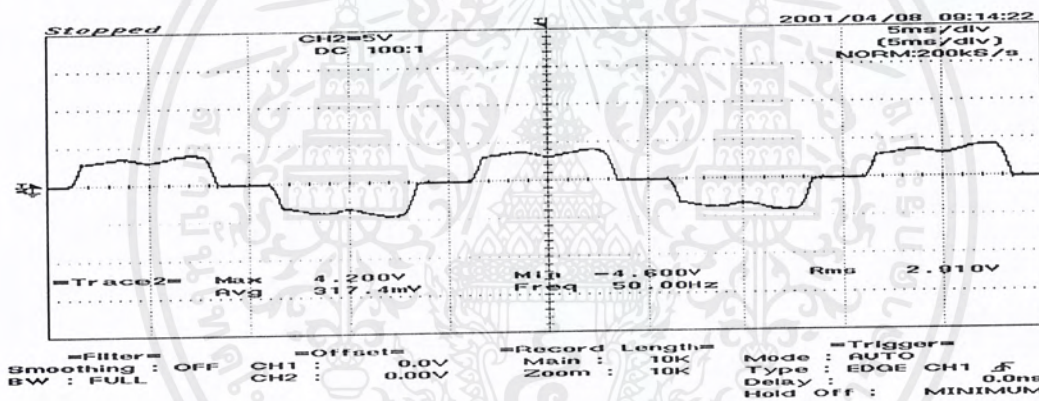
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	0.44	0.44	0.44	6.66	6.56	6.56	3.6	3.6	3.6	153.1	154.2	153
2.ใส่ 5 th filter	0.44	0.44	0.44	6.66	6.66	6.76	3.6	3.6	3.7	154.8	155.3	155
3.Line Reactor +5 th filter	0.44	0.44	0.44	6.16	6.56	6.56	3.6	3.6	3.6	153.6	152.6	152

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80V : I_r = 0.73 A

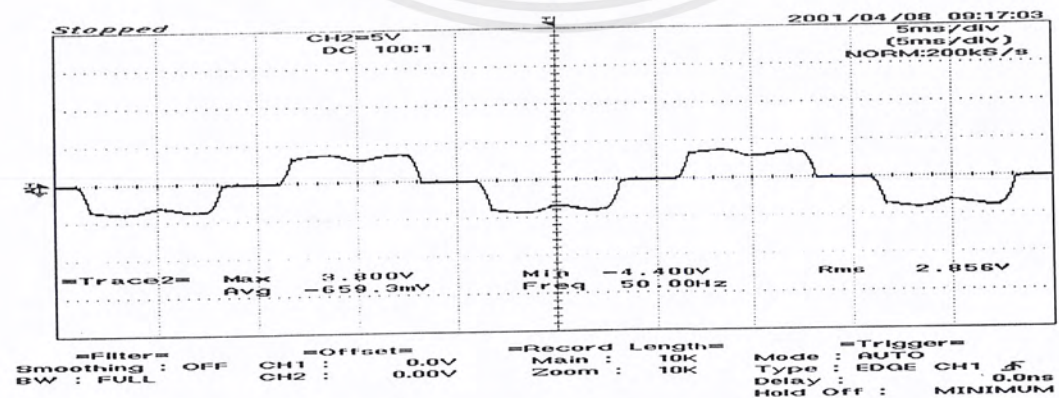
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30.1 กระแสเฟส A



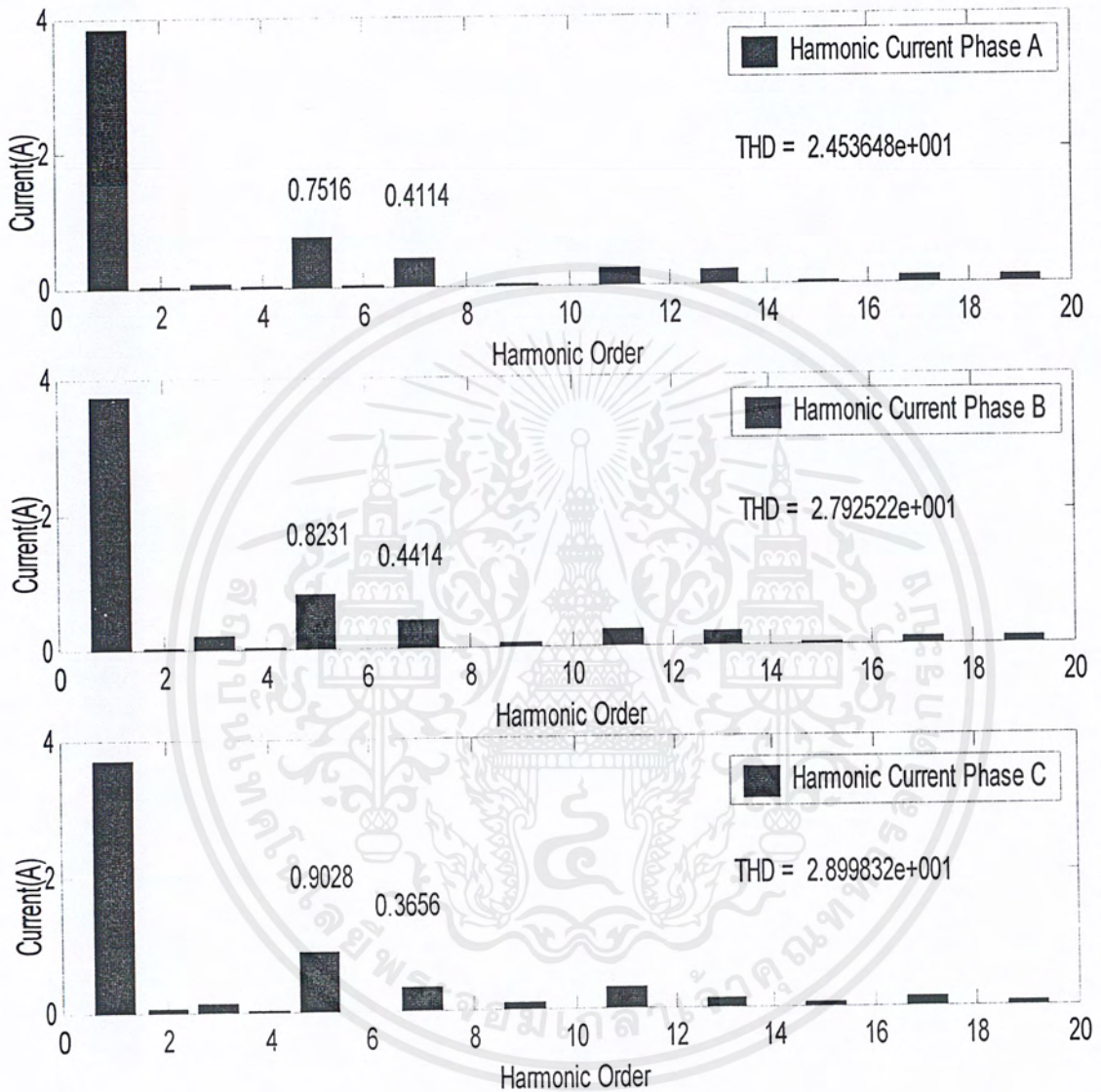
รูปที่ 5.30.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.30.3 กระแสเฟส C

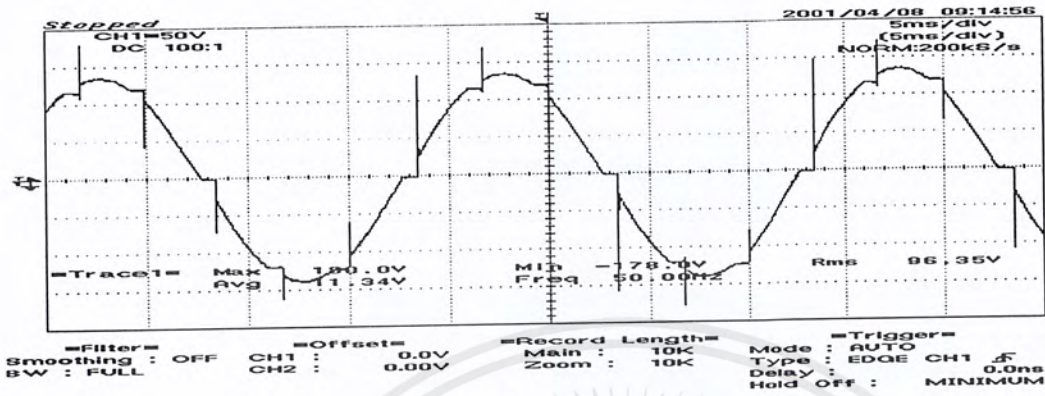
รูปที่ 5.30 แสดงกราฟกระแสที่ : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

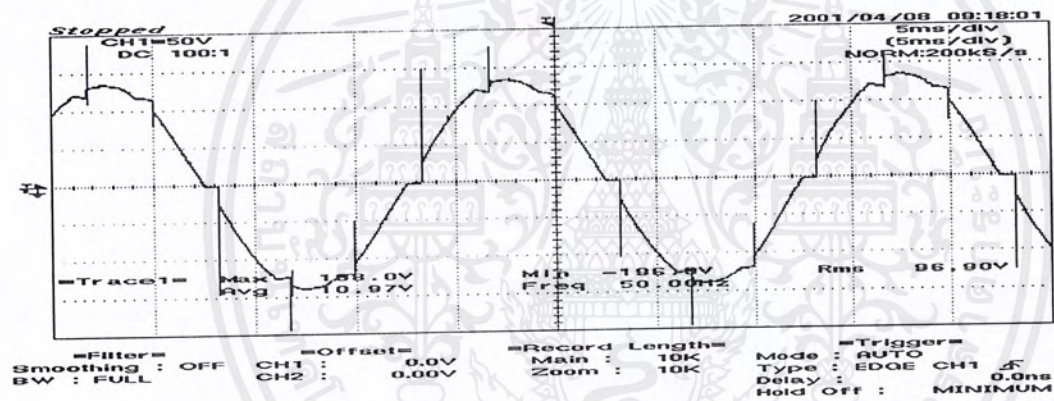


รูปที่ 5.31 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลด 50 %

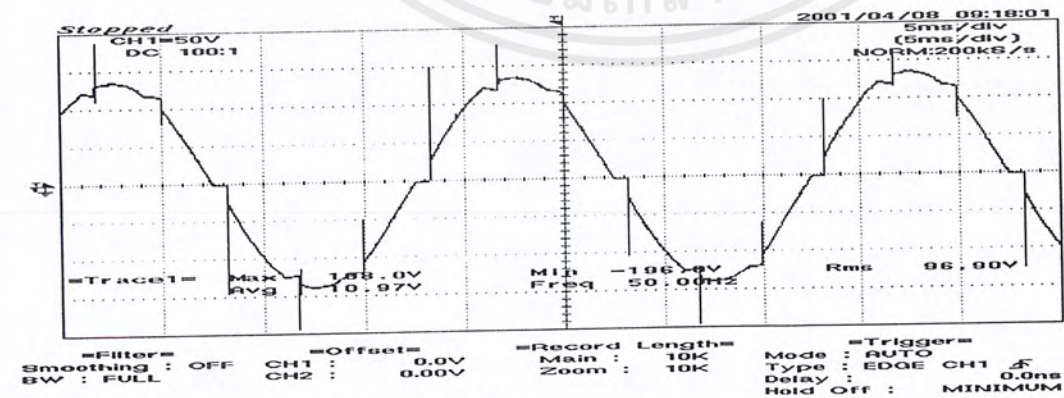
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32.1 แรงดันเฟส A



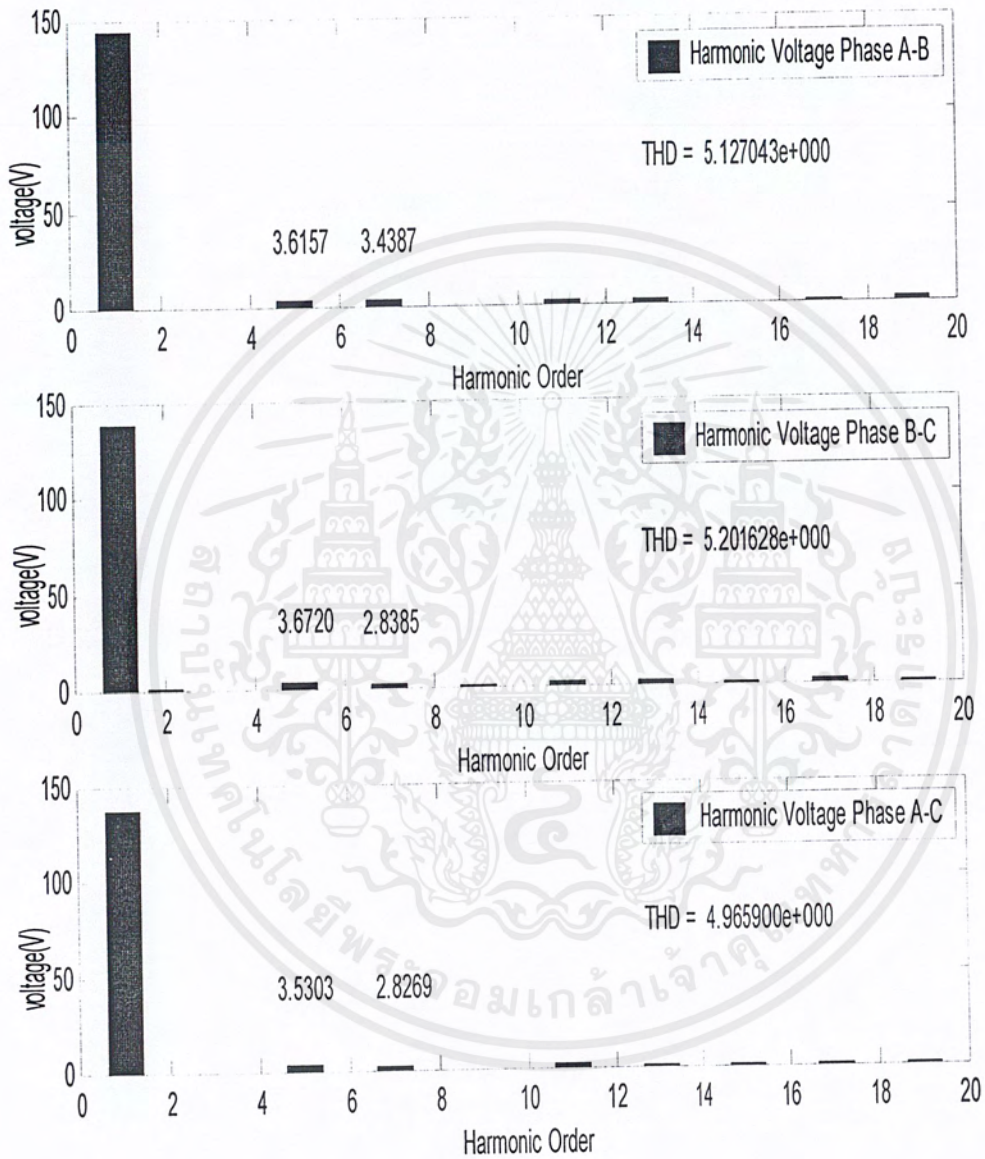
รูปที่ 5.32.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.32.3 แรงดันเฟส C

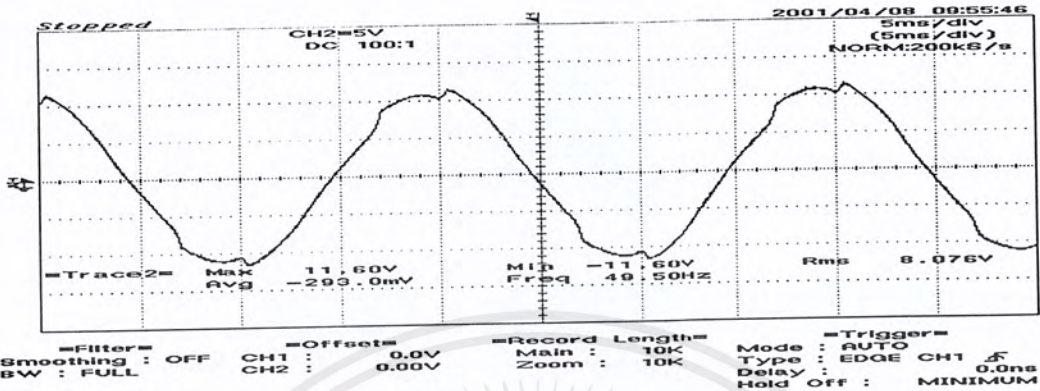
รูปที่ 5.32 กราฟแรงดัน : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

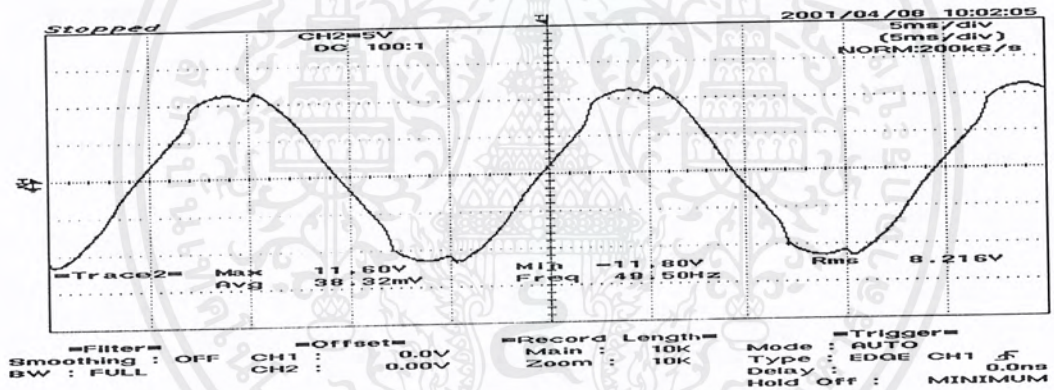


รูปที่ 5.33 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะ : โหลด 50 %

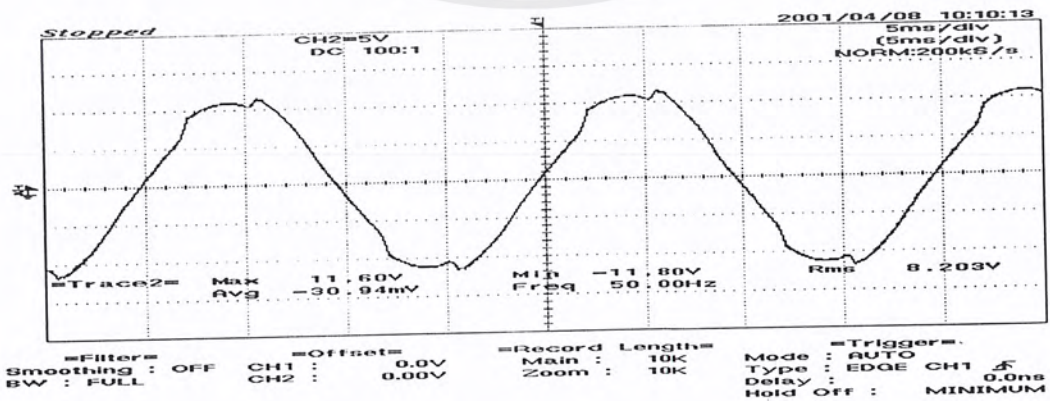
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34.1 กระแสเฟส A

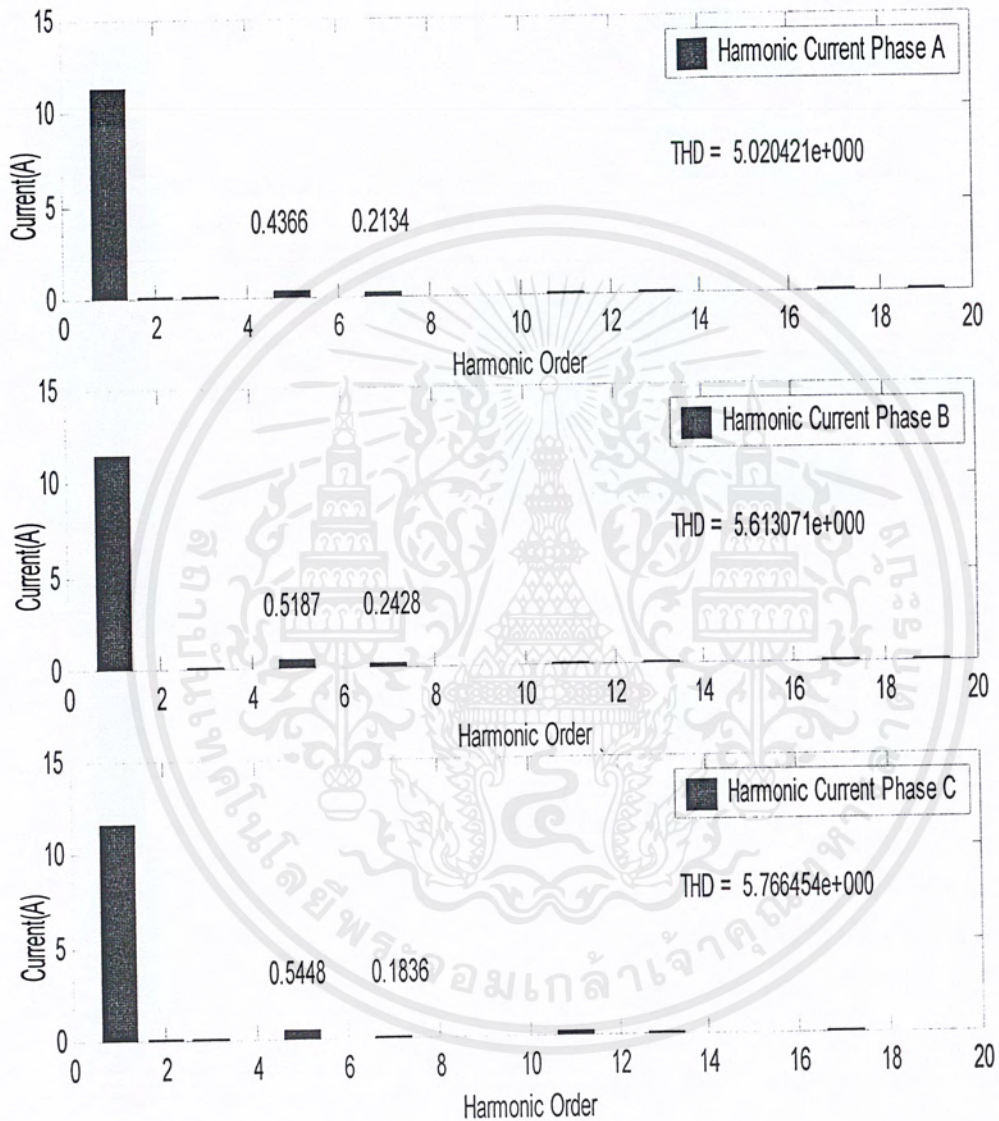


รูปที่ 5.34.2 กระแสเฟส B



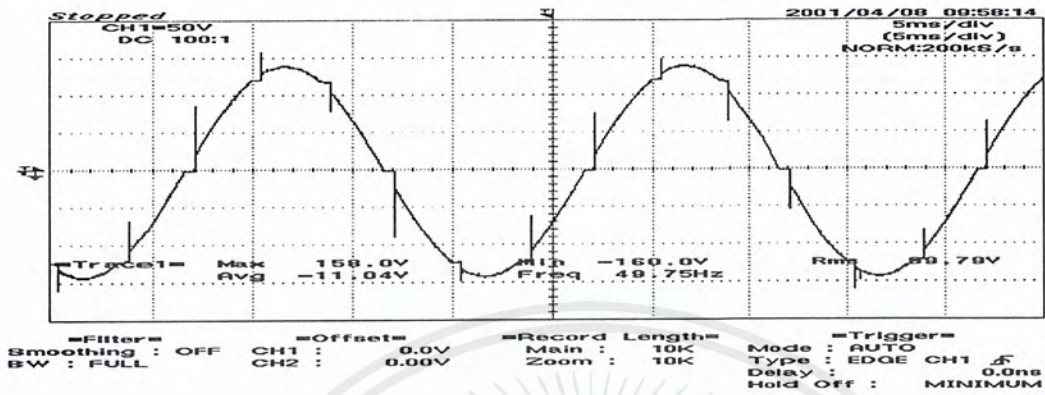
รูปที่ 5.34.3 กระแสเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.34 แสดงกราฟกระแสขณะใด : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50 %
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

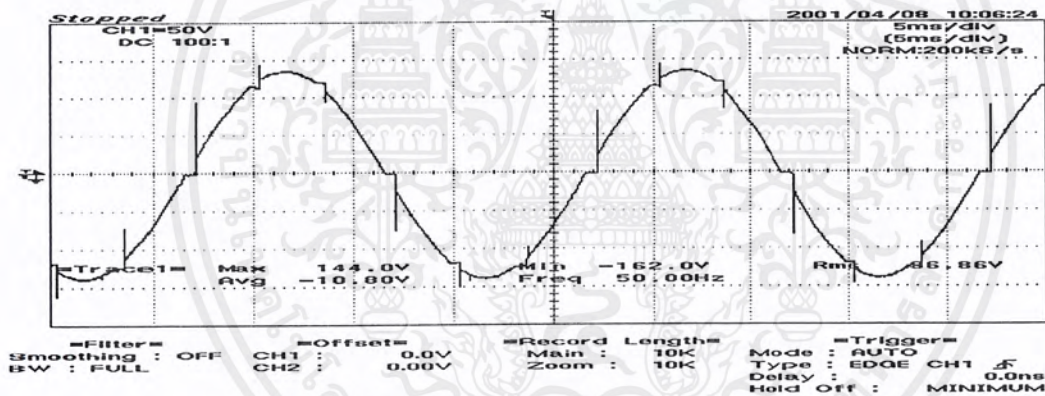


รูปที่ 5.35 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 : โหลด 50 %

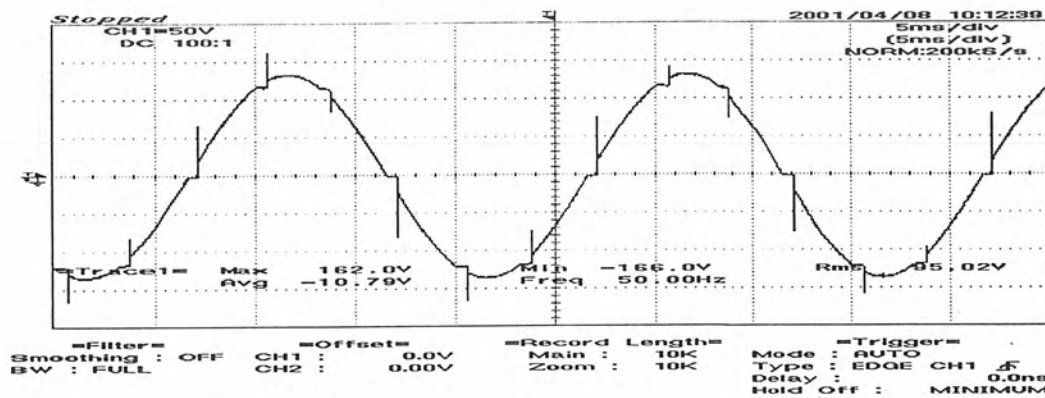
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36.1 แรงดันเฟส A

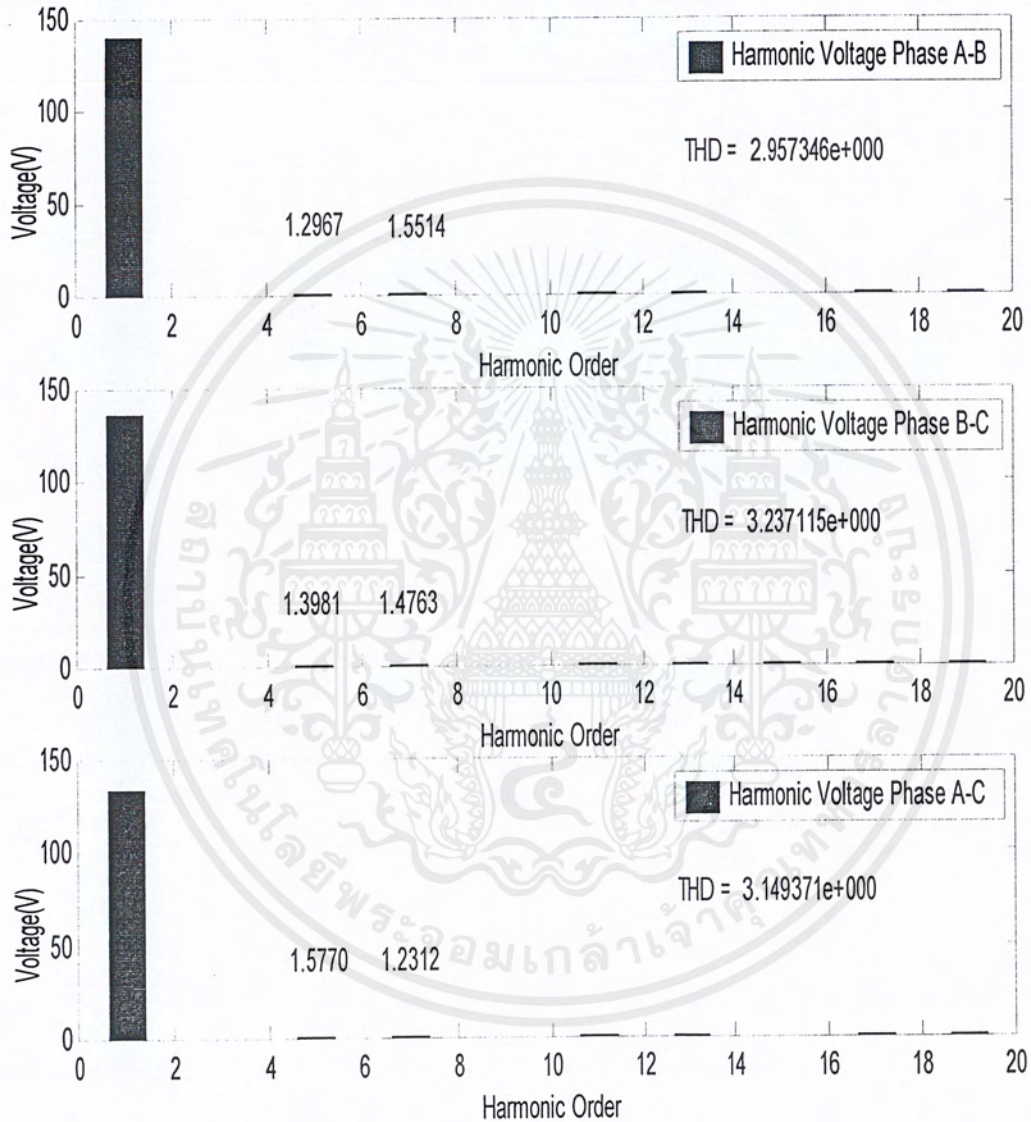


รูปที่ 5.36.2 แรงดันเฟส B



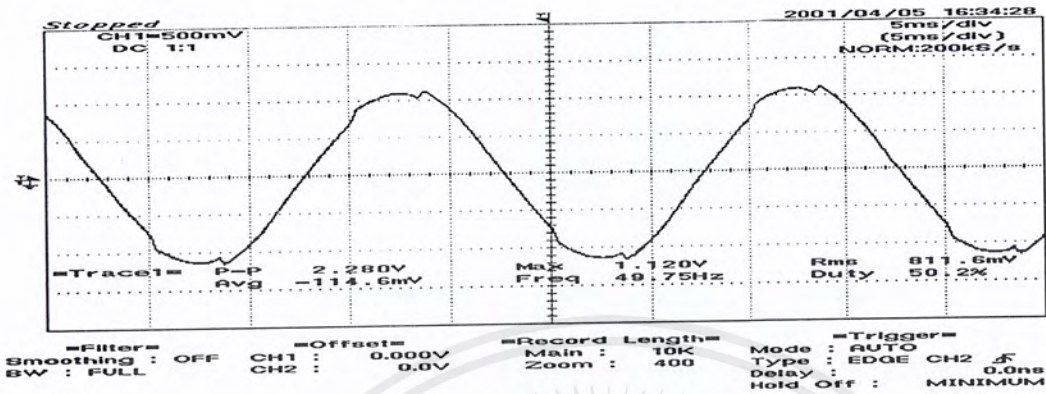
รูปที่ 5.36.3 แรงดันเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.36 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50 %
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

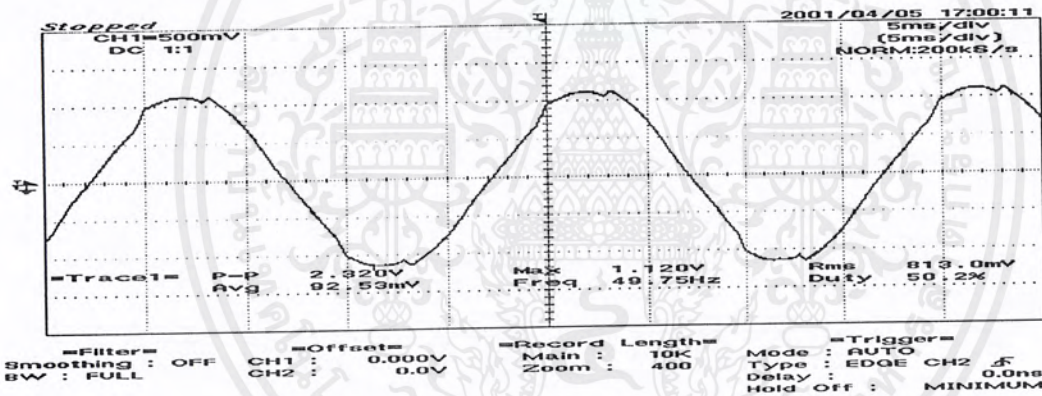


รูปที่ 5.37 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50 %

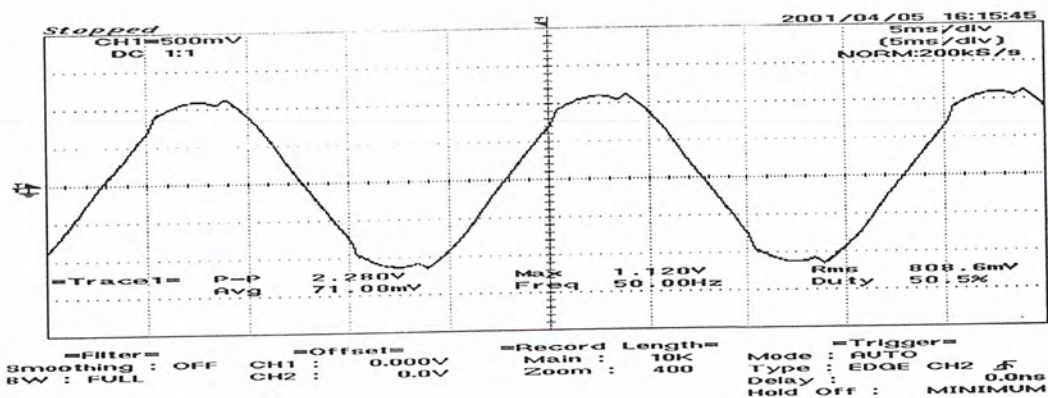
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38.1 กระแสเฟส A

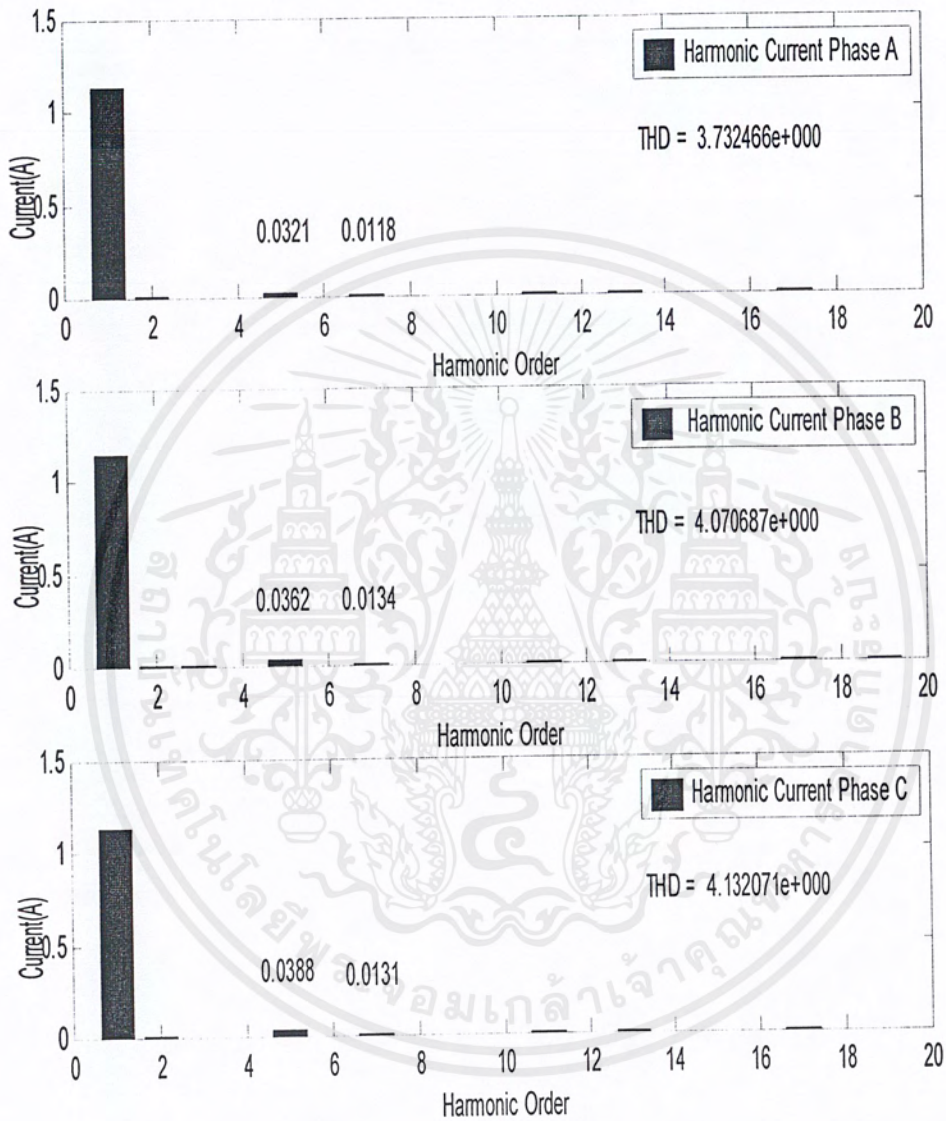


รูปที่ 5.38.2 กระแสเฟส B



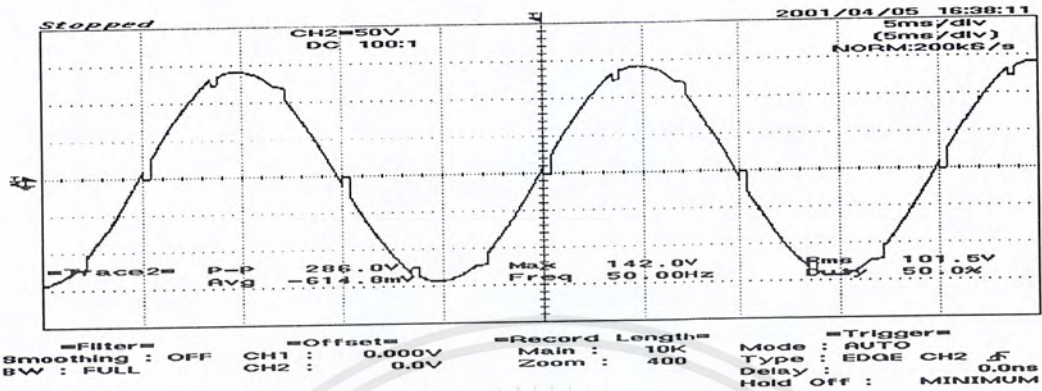
รูปที่ 5.38.3 กระแสเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานของบริษัทเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เจ้าของเอกสารจะฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

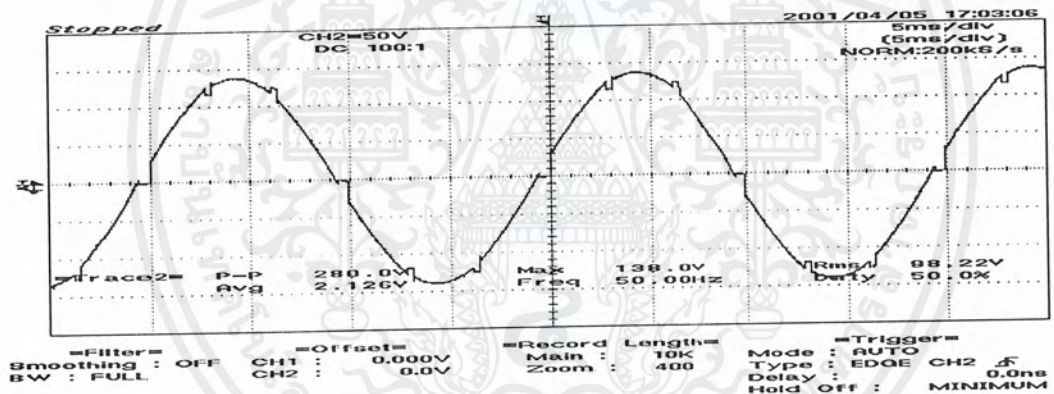


รูปที่ 5.39 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใต้ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50 %

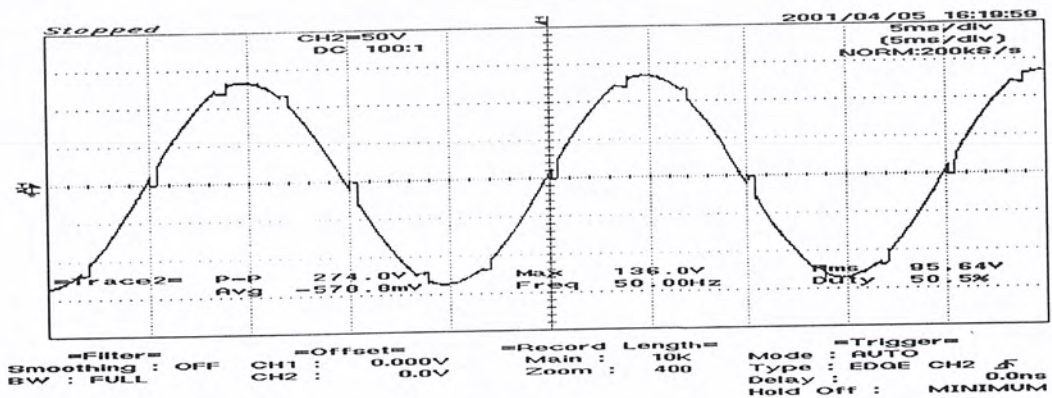
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.40.1 แรงดันเฟส A

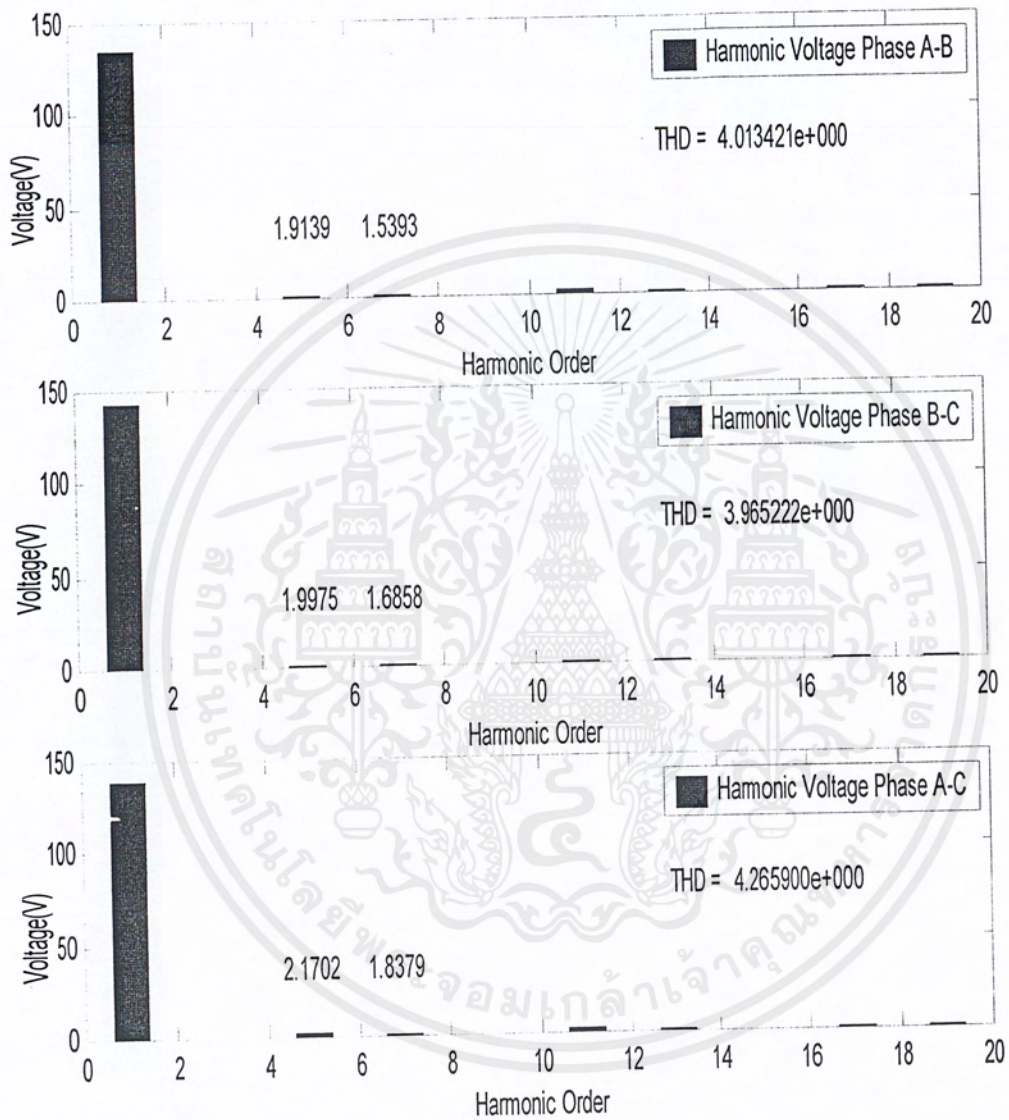


รูปที่ 5.40.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.40.3 แรงดันเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใต้ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50% พิกัด *Rated Load*

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1. ไม่ใส่	19.80	10.83	24.54
2. ใส่ 5 th filter	3.80	1.86	5.02
3. LineReactor+5 th filter	2.47	0.91	3.73

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1. ไม่ใส่	2.50	2.40	5.13
2. ใส่ 5 th filter	0.93	1.11	2.95
3. LineReactor+5 th filter	1.42	1.14	4.01

จากผลการทดลองที่ *Rated Load* 50% ปรากฏว่า สามารถกรองกระแสฮาร์โมนิกที่ 5,7 ได้ แต่ค่าแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และ THD_v เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เหมือนกับที่พิกัด *Rated Load*

3. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7^{th} filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมพรีก SCR 0°

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7^{th} filter) และ Line Reactor

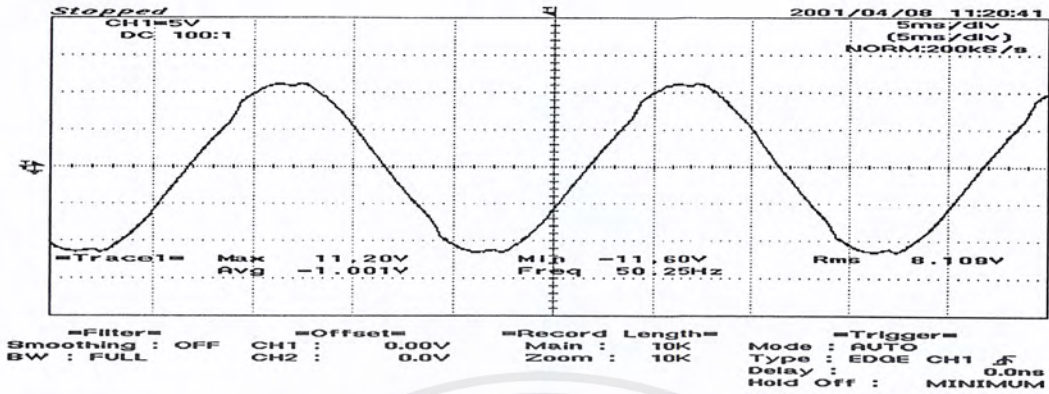
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.ไม่ใส่	-	-	-	-	-	-	9.8	9.7	9.4	106.3	103	103.1
2. 7^{th} filter	12.8	12.7	12.2	9.1	10.2	8.5	9.2	8.8	8.6	102.7	98.6	98.9
3.Line Reactor + (7^{th} filter)	13.3	12.8	12.5	9.1	9.8	8.3	9.8	9.2	9.1	100.4	96.8	96.7

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V_{dc} (V)			I_{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	1874	1880	1883	4.65	4.55	4.60	80.6	78.8	78	11.7	11.6	11.5
2. 7^{th} filter	1880	1900	1915	43.5	42.5	40.5	75.1	73.8	73	11.3	11.2	11.1
3.Line Reactor + (7^{th} filter)	1870	1872	1880	4.25	4.4	4.5	78.1	78	77	11.5	11.5	11.4

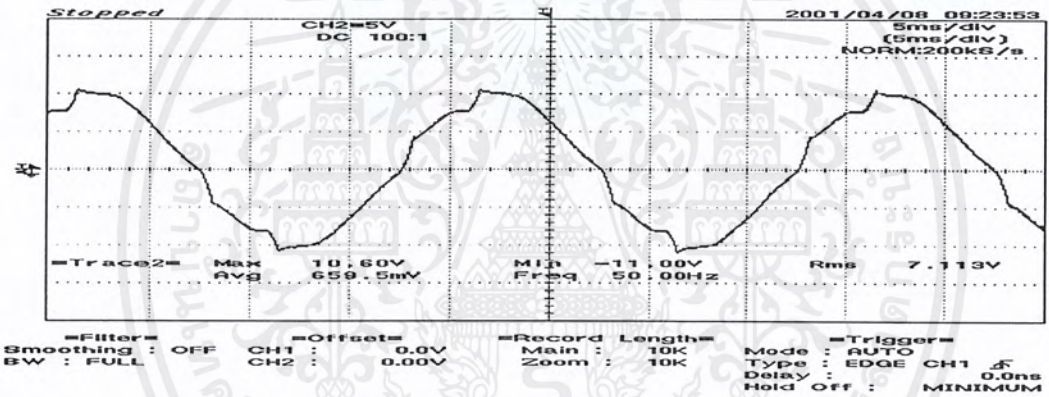
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I_r (A)			I_a (A)			I_{dc} (o/p)(A)			V_{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	0.7	0.7	0.7	13.4	13.1	12.9	11.6	11.7	11.5	80.6	78.8	78
2.ใส่ 7^{th} filter	0.7	0.7	0.7	12.2	11.9	11.7	11.3	11.2	11.1	75.1	73.8	72.9
3.Line Reactor + (7^{th} filter)	0.7	0.7	0.7	12.9	12.7	12.6	11.5	11.5	11.4	78.1	78	77

*พิกัด GENERATOR : $V_f = 80 \text{ V}$: $I_f = 0.70 \text{ A}$

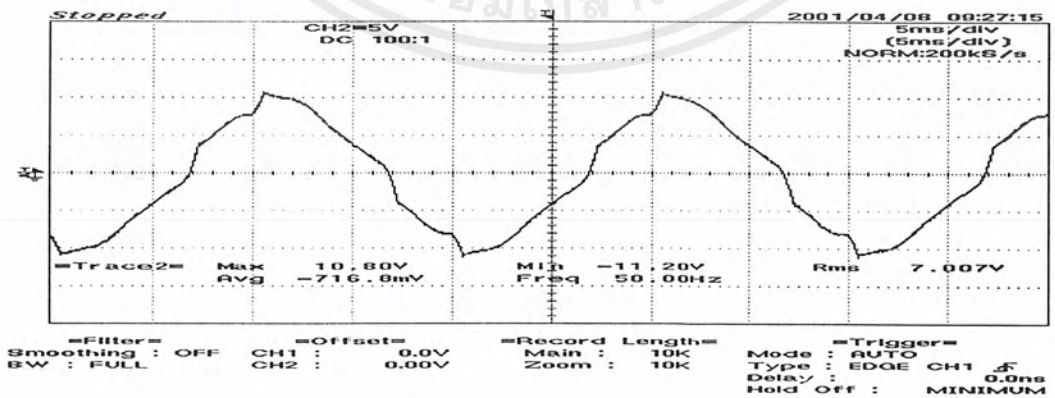
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42.1 กระแสเฟส A



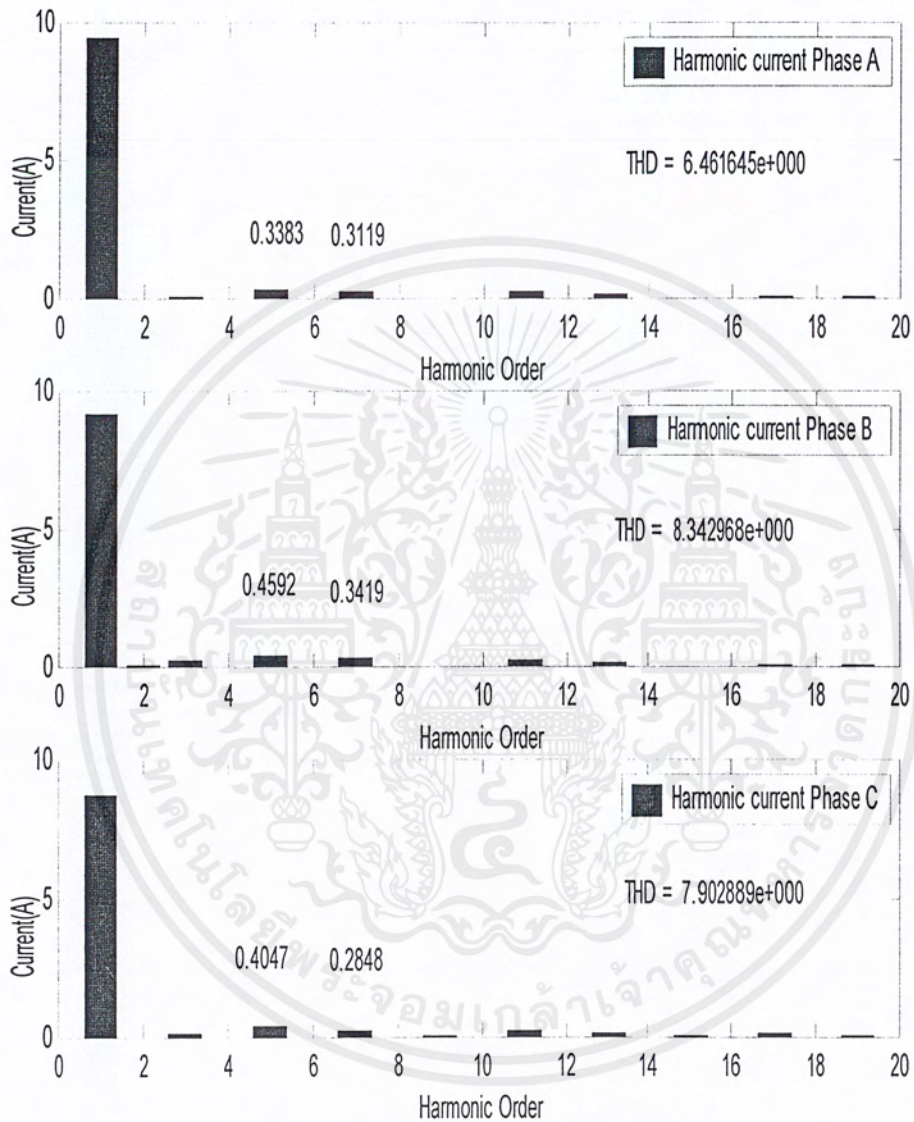
รูปที่ 5.42.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.42.3 กระแสเฟส C

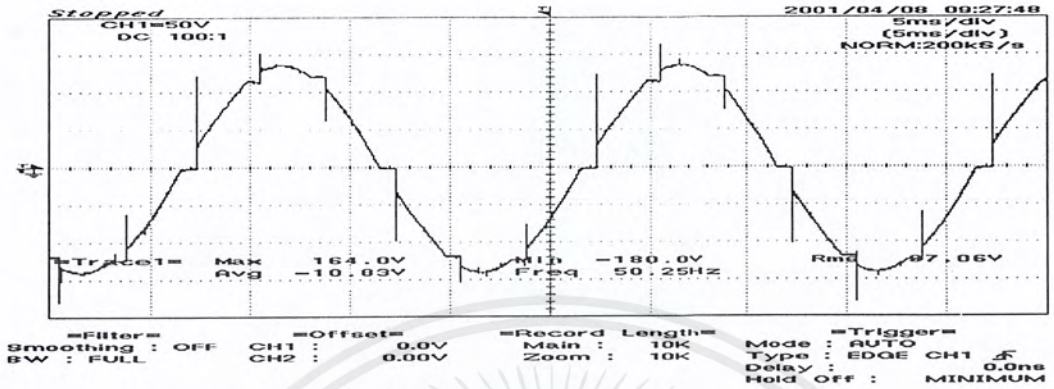
รูปที่ 5.42 กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

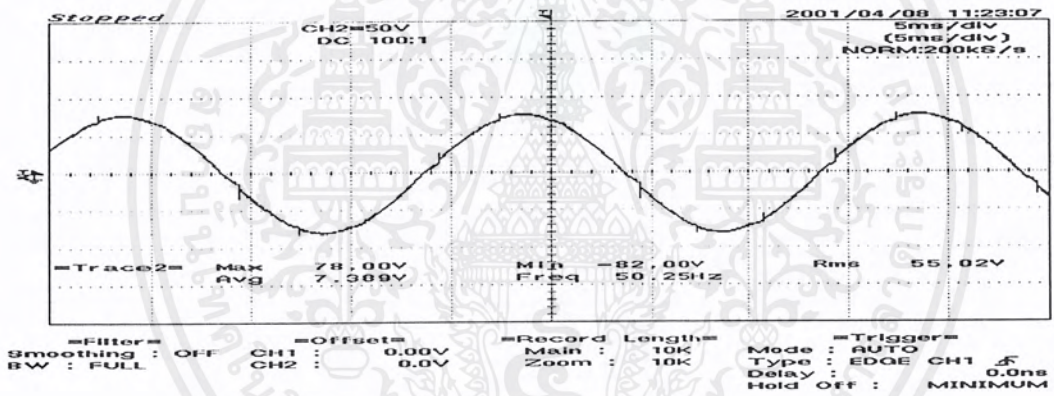


รูปที่ 5.43 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

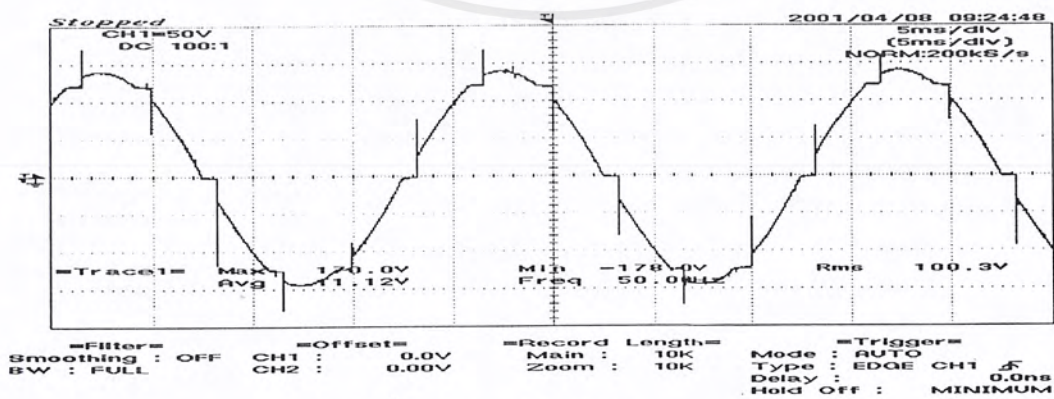
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44.1 แรงดันเฟส A



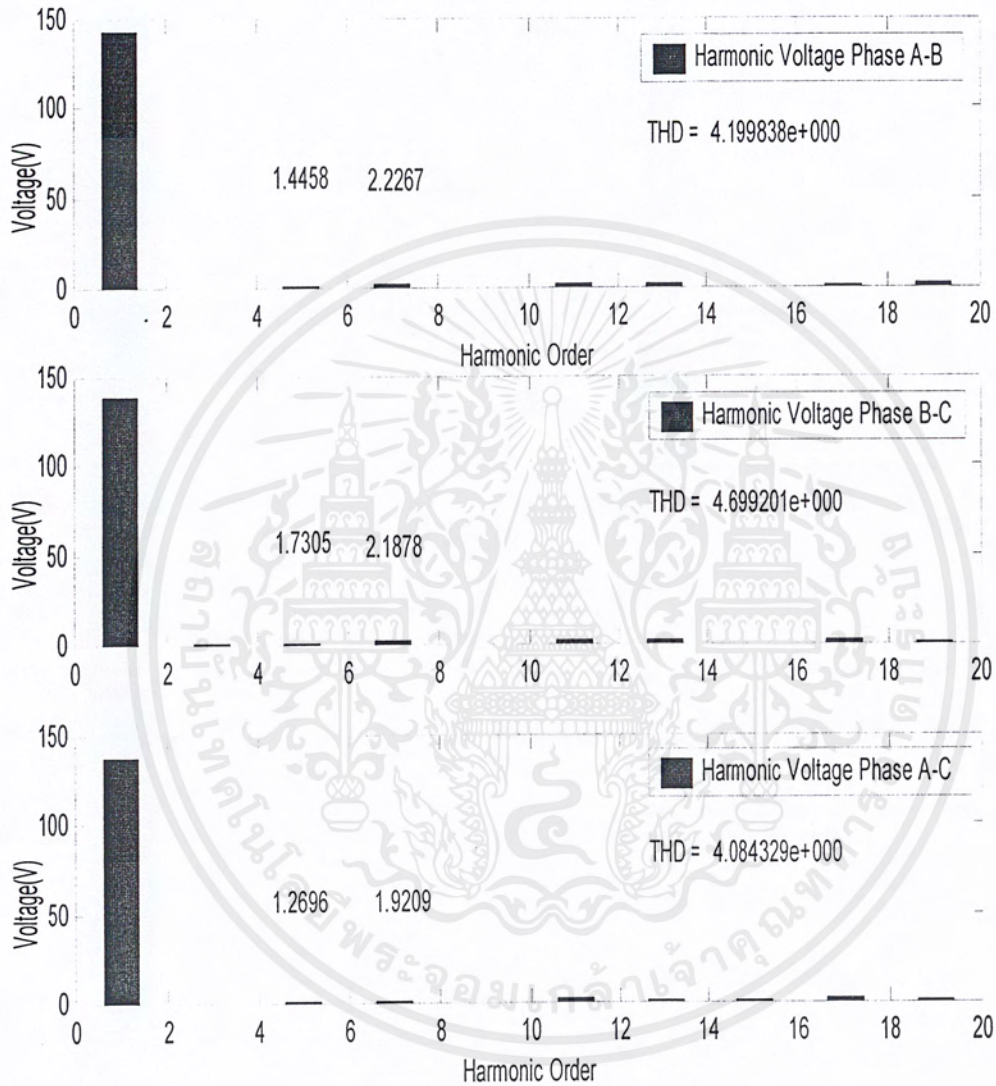
รูปที่ 5.44.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.44.3 แรงดันเฟส C

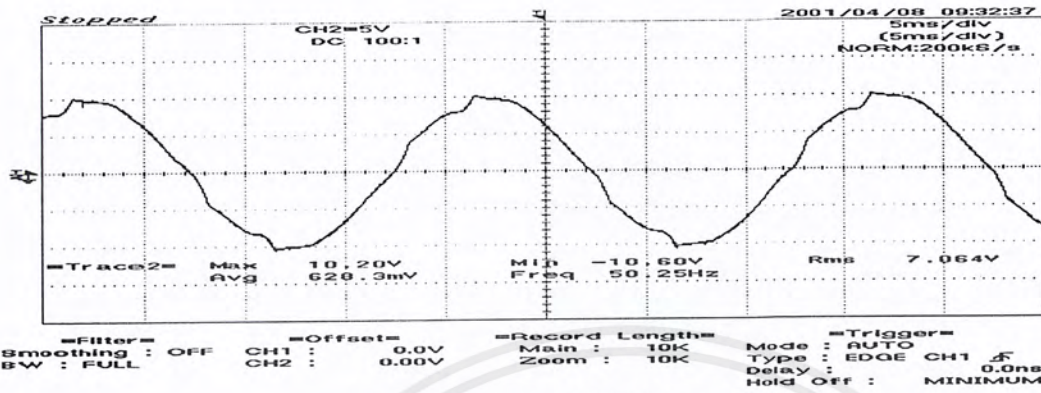
รูปที่ 5.44 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

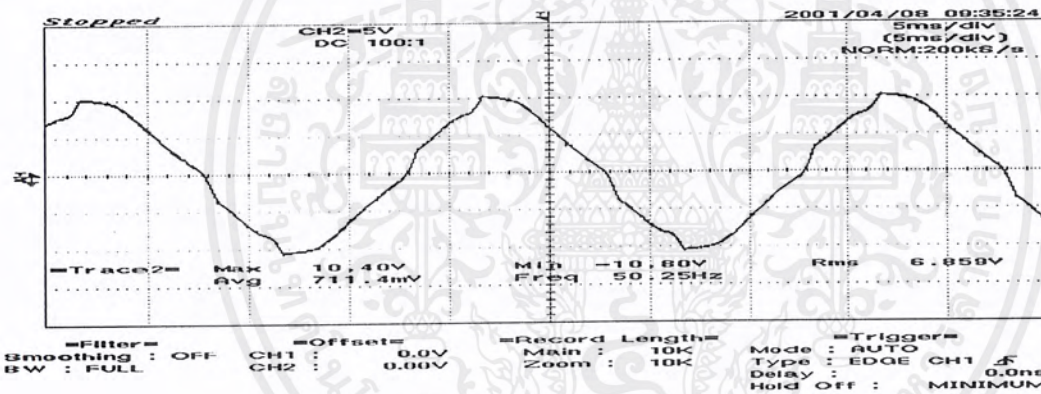


รูปที่ 5.45 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

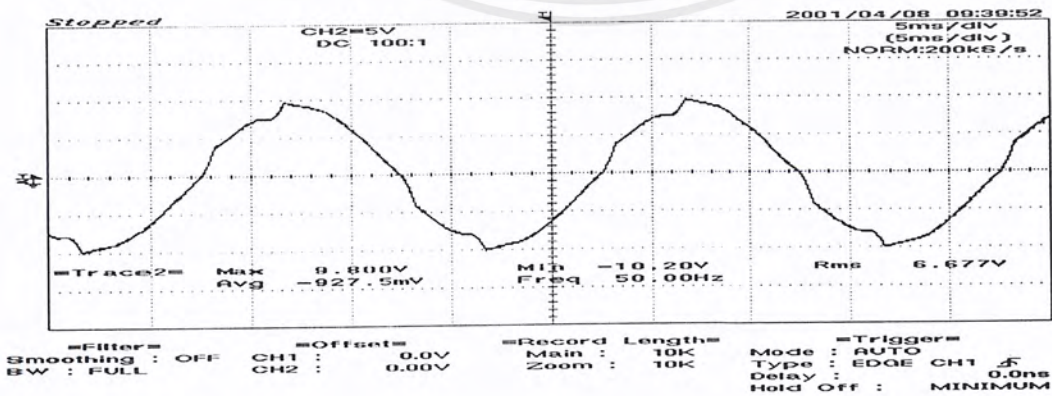
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.46.1 กระแสเฟส A

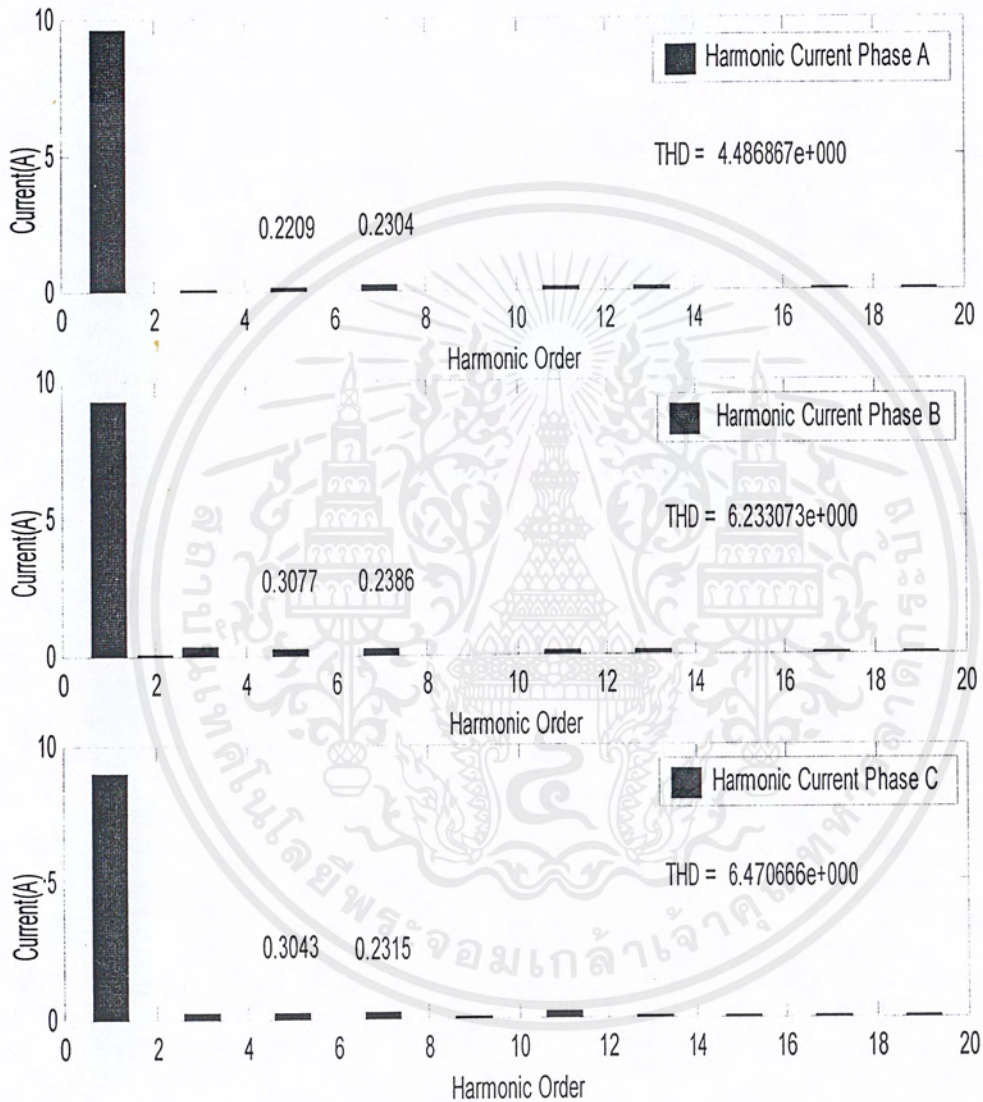


รูปที่ 5.46.2 กระแสเฟส B



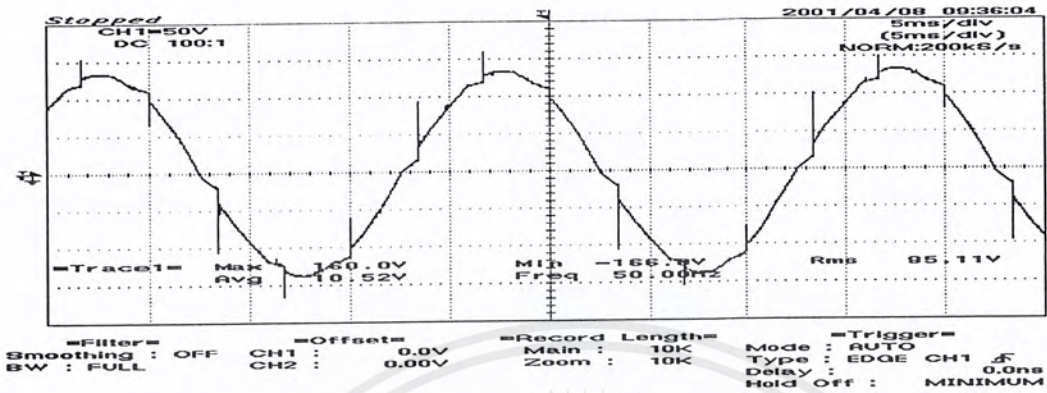
รูปที่ 5.46.3 กระแสเฟส C

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.46 กราฟกระแสแต่ละสาย: ไฉนรีแอกเตอร์: ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

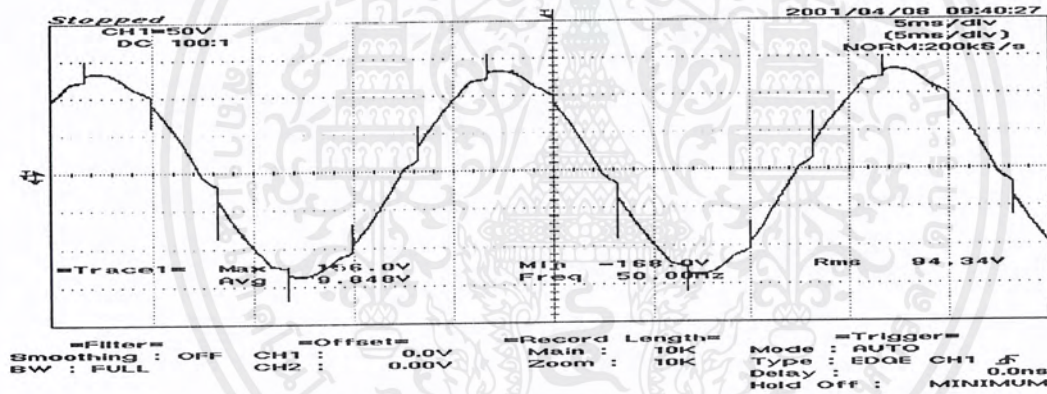


รูปที่ 5.47 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

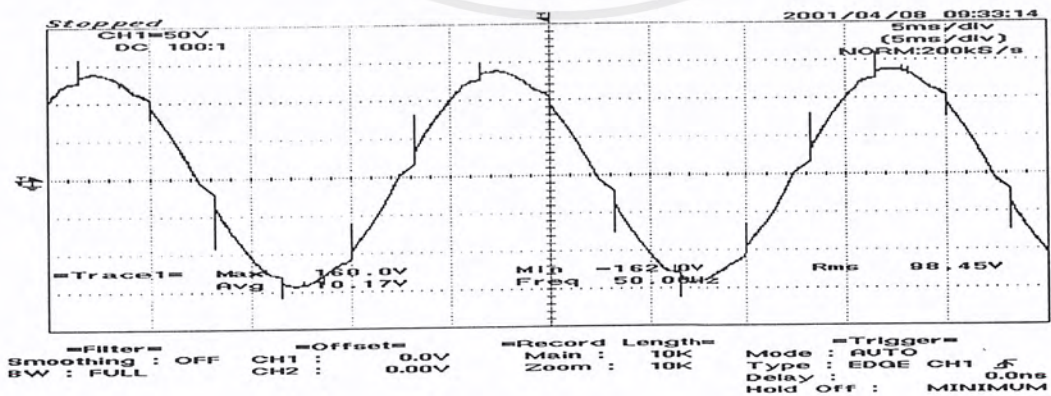
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.48.1 แรงดันเฟส A

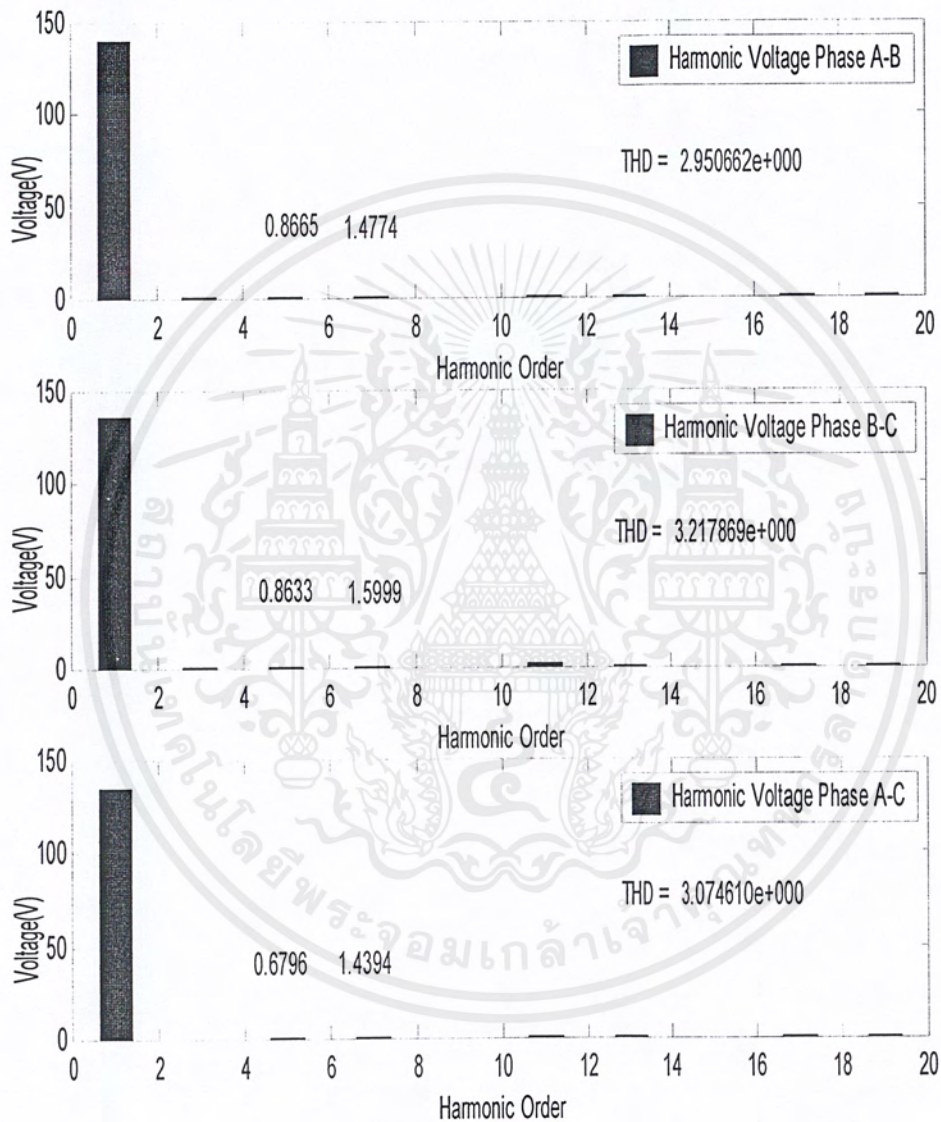


รูปที่ 5.48.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.48.3 แรงดันเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ โดยไม่คิดค่าตอบแทน
รูปที่ 5.48 กราฟแรงดันขณะใส่ โหลดรีแอกเตอร์: ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 ระยะเวลาด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.49 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด *Rated Load*

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1.ไม่ใส่	19.30	10.60	24.18
2.ใส่ 7 th filter	3.56	3.28	6.46
3.LineReactor+7 th filter	2.33	2.43	4.48

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.ไม่ใส่	5.84	4.33	9.74
2.ใส่ 7 th filter	1.0	1.54	4.19
3.LineReactor+7 th filter	0.62	1.06	2.95

1. จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 สามารถลดกระแส และแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่า THD ลงได้
2. เมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 สามารถลดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิก และค่า THD ได้มากกว่าเมื่อใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 อย่างเดียว
3. จากผลการทดลองทั้ง 3 เฟสพบว่าให้ค่าผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

4.ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCRO^o

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 (7th filter) และ Line Reactor

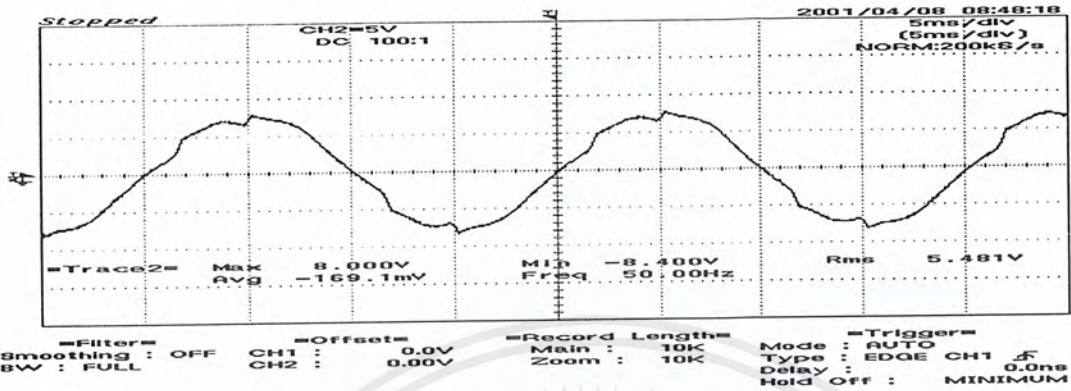
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.ไม่ใส่	-	-	-	-	-	-	5	4.7	4.8	102	98.3	99.0
2. 7 th filter	10.2	9.7	9.7	8.9	10.1	8.4	5.07	4.8	4.7	101	97.6	97.6
3.LineReactor +(7 th filter)	10.4	9.8	9.7	8.8	9.4	8.2	5.2	4.9	4.7	98.7	95.2	95.2

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	1949	1945	1944	2.3	2.2	2.3	130	130	130	7	7	7.1
2. 7 th filter	1925	1937	1925	2.3	2.3	2.3	130	130	130	7.1	7	7
3.LineReactor +(7 th filter)	1925	1930	1933	2.3	2.3	2.3	130	130	130	7.1	7.2	7.1

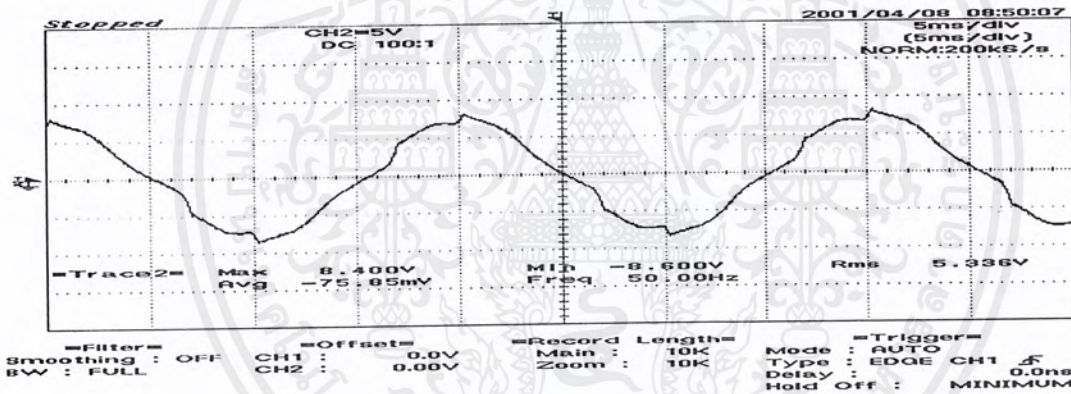
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	0.4	0.4	0.4	6.6	6.6	6.7	3.6	3.6	3.6	153.1	154	154
2. 7 th filter	0.4	0.4	0.4	6.7	6.6	6.6	3.6	3.6	3.6	155	154	155
3.LineReactor +(7 th filter)	0.4	0.4	0.4	6.7	6.8	6.7	3.6	3.6	3.6	154.4	154.6	154

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80V : I_r = 0.73 A

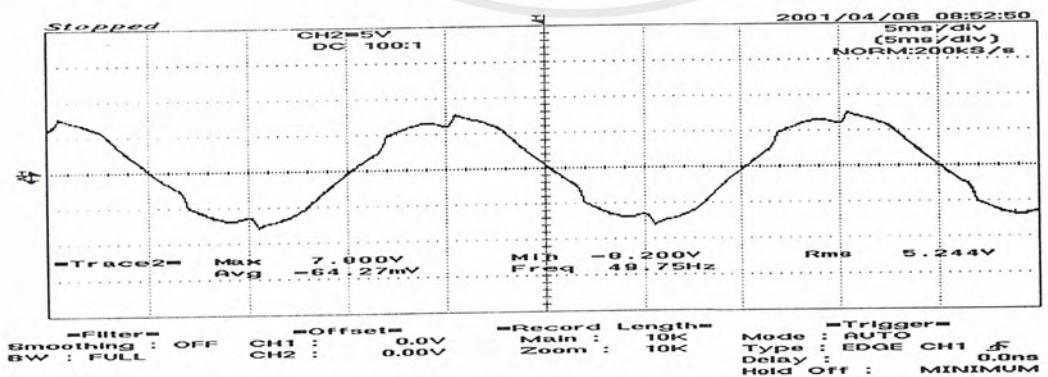
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.50.1 กระแสเฟส A



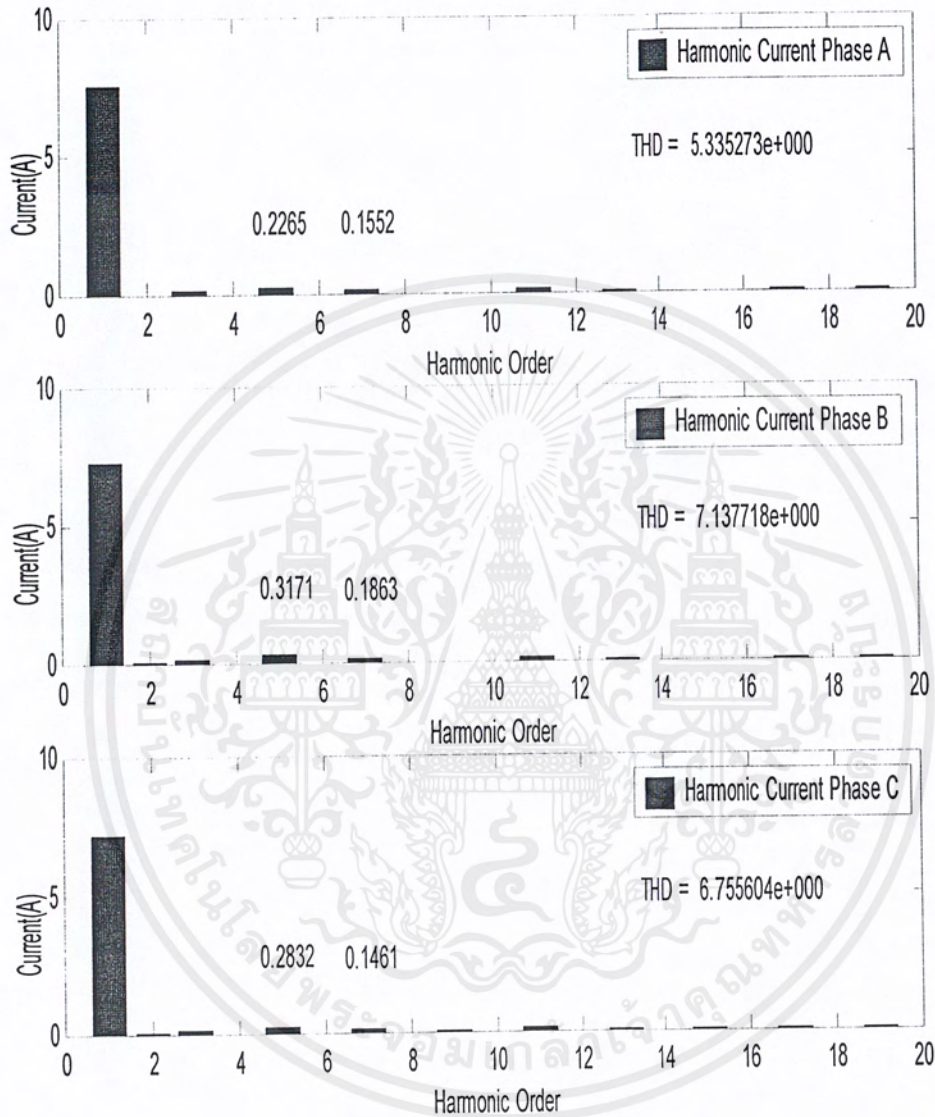
รูปที่ 5.50.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.50.3 กระแสเฟส C

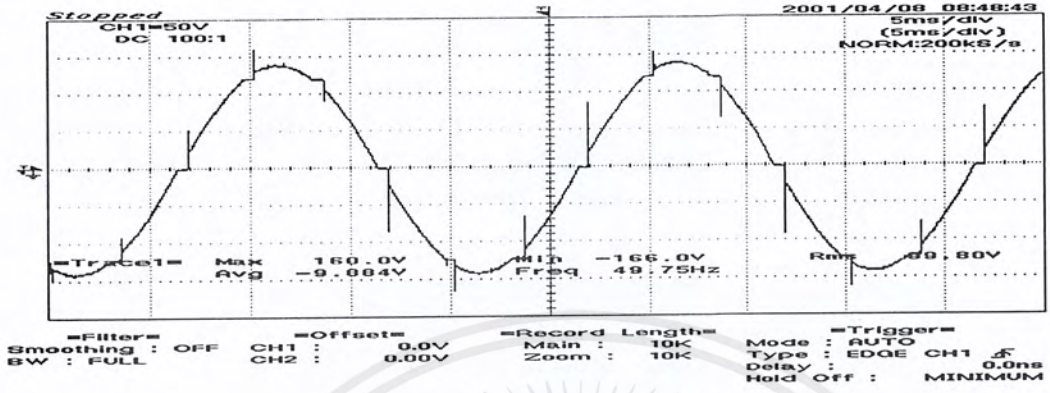
รูปที่ 5.50 กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

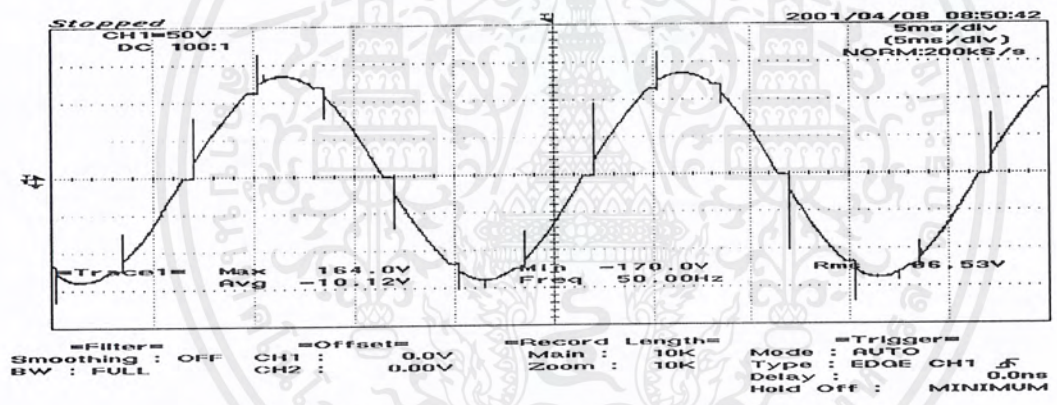


รูปที่ 5.51 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

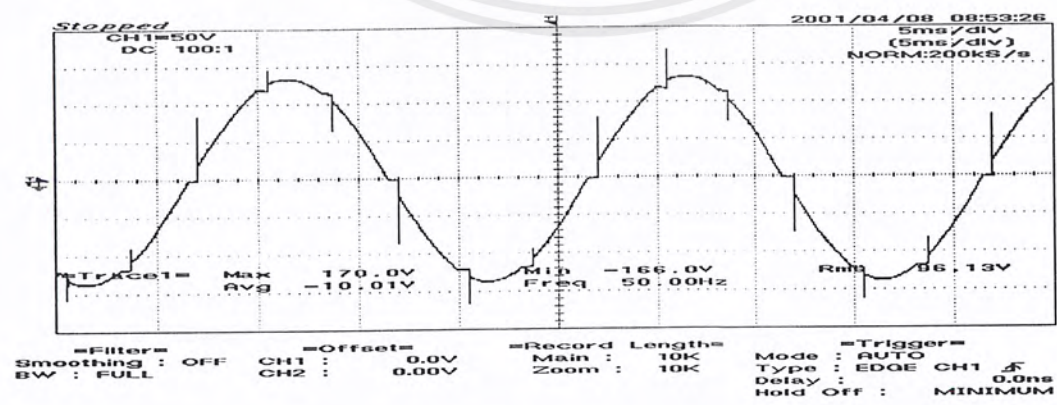
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.52.1 แรงดันเฟส A

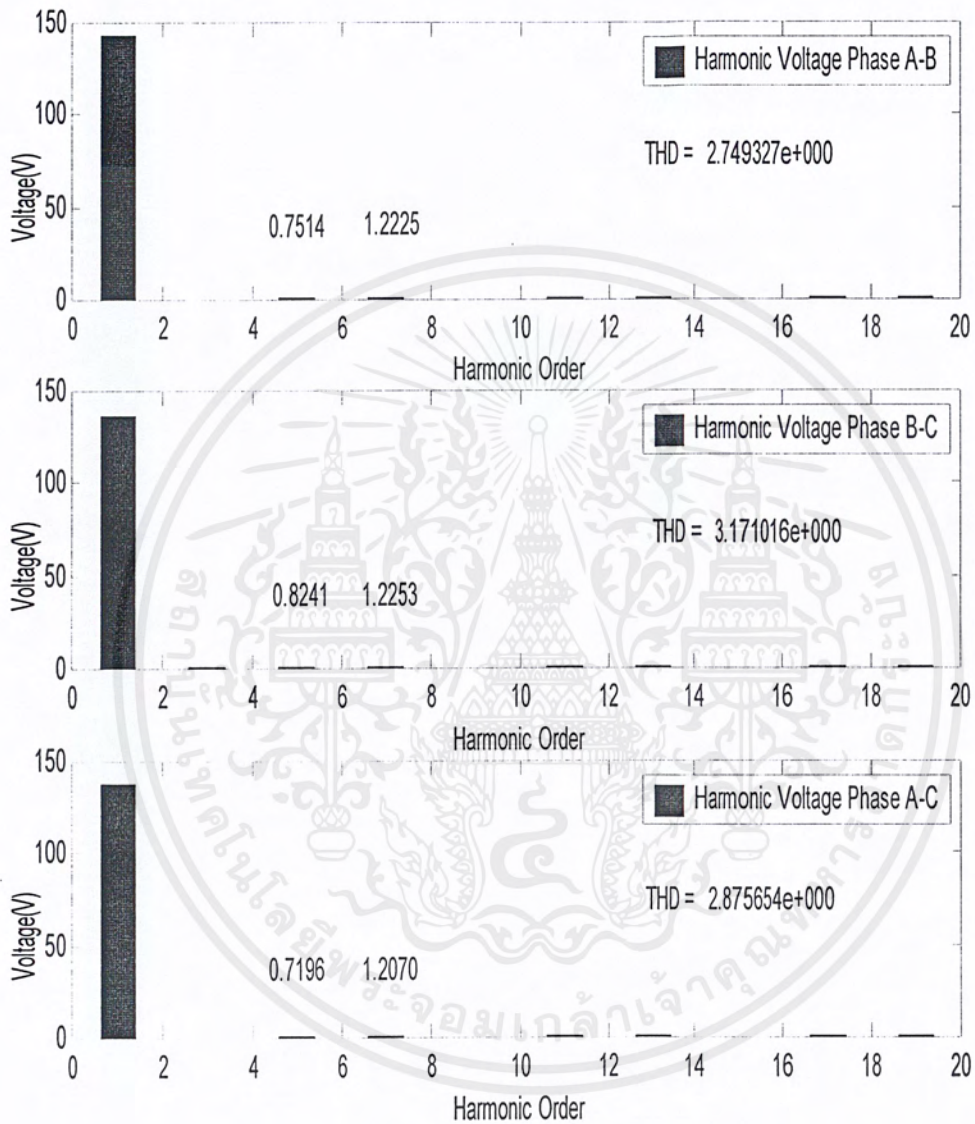


รูปที่ 5.52.2 แรงดันเฟส B



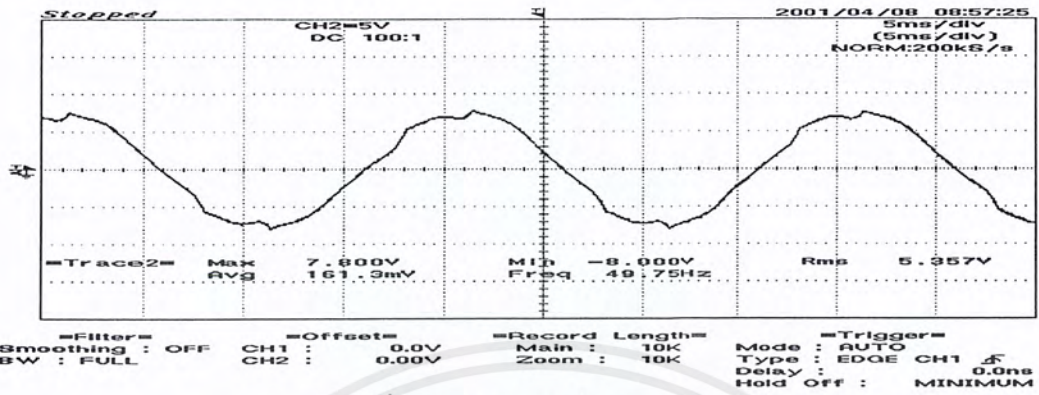
รูปที่ 5.52.3 แรงดันเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.52 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

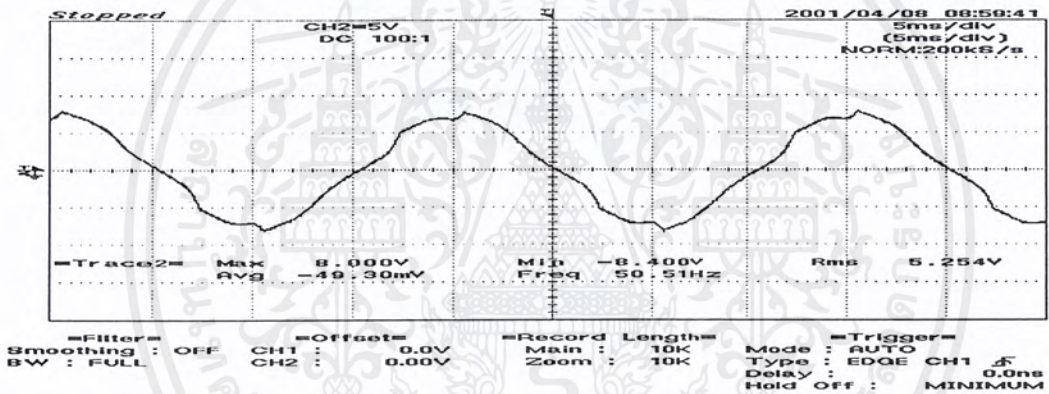


รูปที่ 5.53 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใต้ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

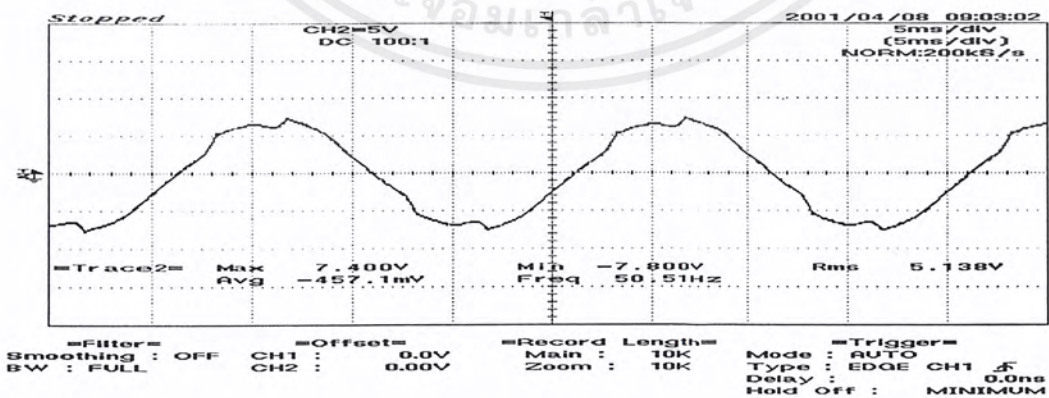
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54.1 กระแสเฟส A



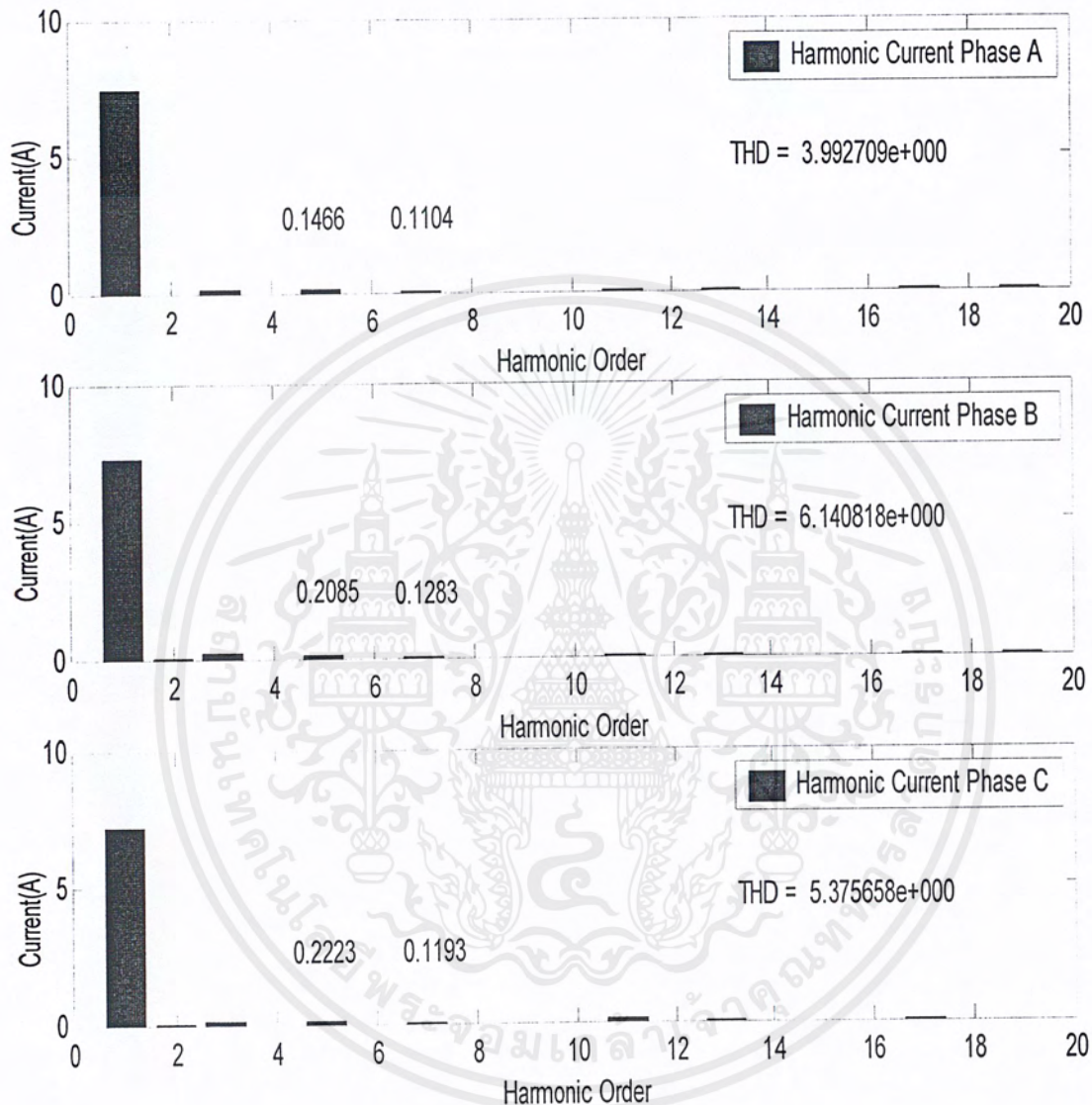
รูปที่ 5.54.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.54.3 กระแสเฟส C

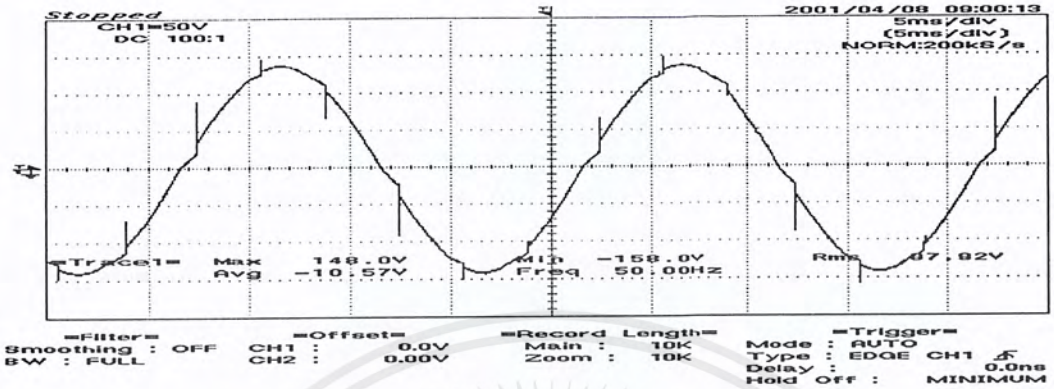
รูปที่ 5.54 กราฟกระแสขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

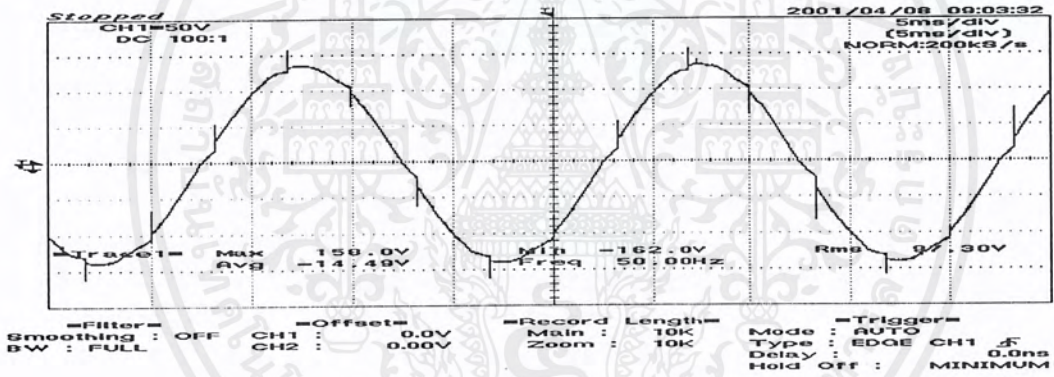


รูปที่ 5.55 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

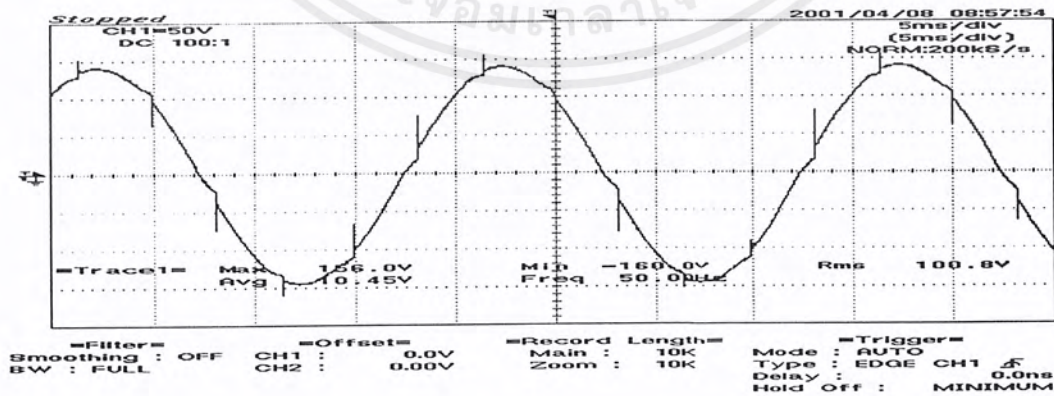
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.56.1 แรงดันเฟส A



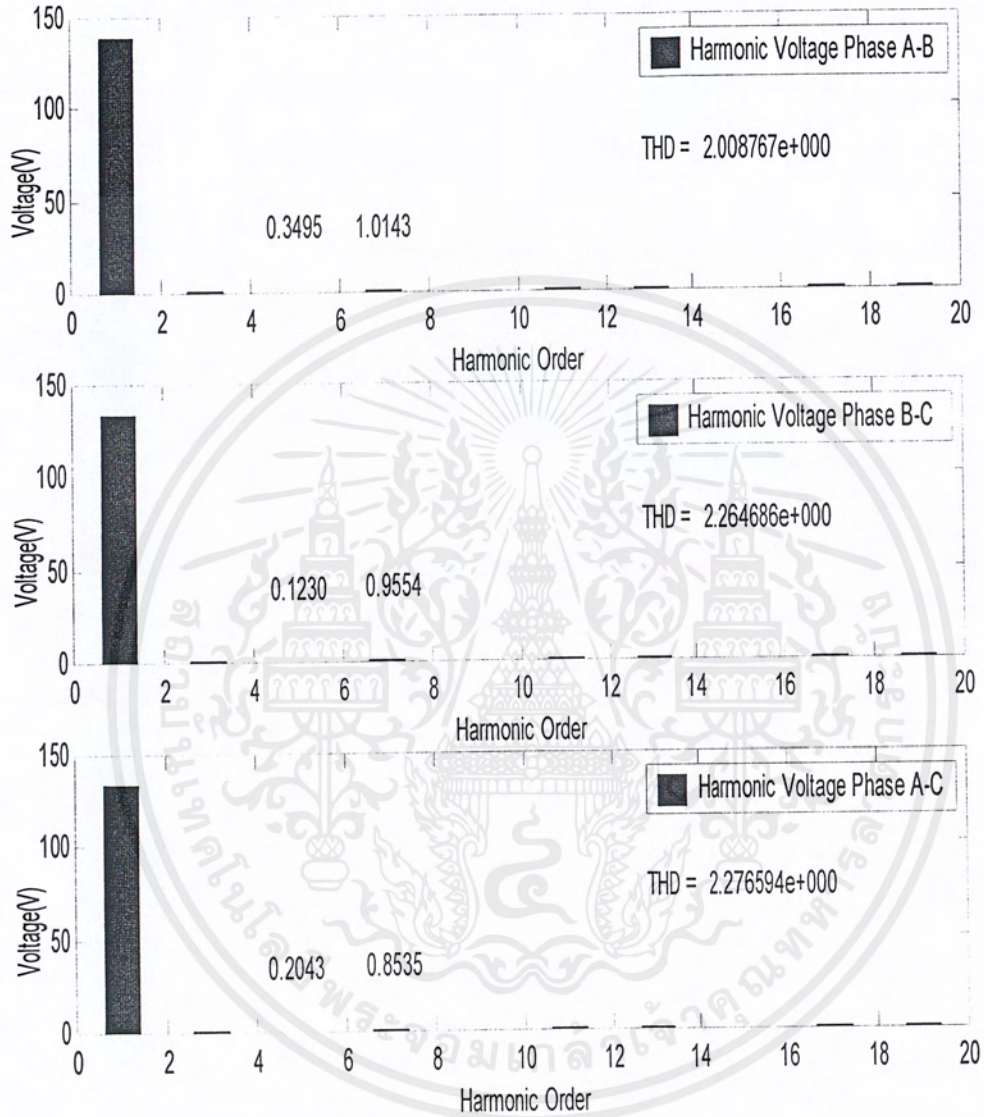
รูปที่ 5.56.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.56.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.56 กราฟแรงดันขณะใส่ โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.57 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ไลน์รีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตัวกรอง 5 และ 7 : ที่ 50% พิกัด Rated Load

การทดลอง	Harmonic Current ที่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5(%)	Harmonic Current ที่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7(%)	THD _i (%)
1. ไม่ใส่	19.80	10.83	24.54
2. ใส่ 7 th filter	3.02	2.07	5.33
3. Line Reactor+7 th filter	1.95	1.47	3.99

การทดลอง	Harmonic Voltage ที่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5(%)	Harmonic Voltage ที่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7(%)	THD _v (%)
1. ไม่ใส่	2.50	2.40	5.13
2. ใส่ 7 th filter	0.52	0.84	2.74
3. Line Reactor+7 th filter	0.25	0.72	2.00

จากผลการทดลองที่ Rated Load 50% ปรากฏว่า สามารถกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ได้เหมือนกับที่ 100% Rated Load

5. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5,7 : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load : มุมทริก SCR 0°
 ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) + ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) และ ไลน์รีแอคเตอร์ (Line Reactor)

การทดลอง	I (line reactor) (A)			I (5 th filter) (A)			I (7 th filter) (A)			I (line) (A)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1.ไม่ใส่	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.1	4.9	5.1
2. (5 th + 7 th) filter	16	16	15.7	9.67	10.3	8.9	5.5	5.7	5.5	5.1	5.0	4.8
3.LineReactor (5 th + 7 th)filter	15.8	16.3	15.4	9.5	10.5	8.5	5.6	7.0	4.5	5.0	5.3	4.8

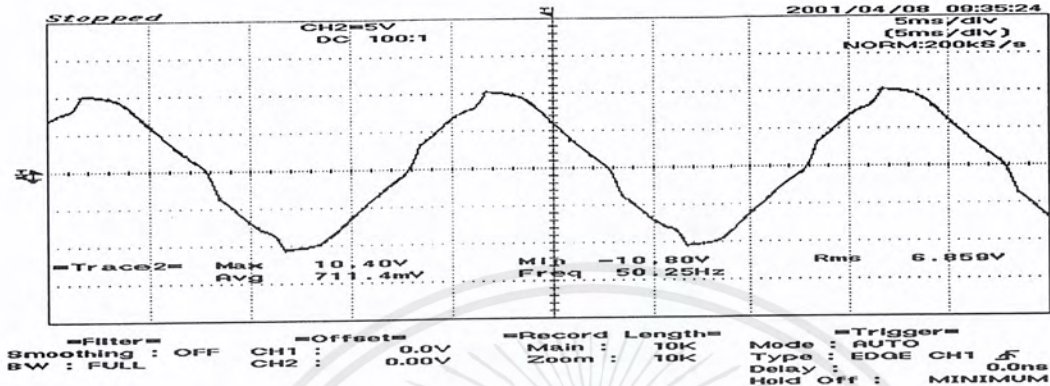
การทดลอง	N(rpm) (รอบ/นาที)			Torque (N.m)			DC MOTOR					
	ครั้งที่			ครั้งที่			V _{dc} (V) ครั้งที่			I _{dc} (A) ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	1456	1475	1455	2	2	2	82.2	82.9	85.2	7.2	7.3	7.3
2. (5 th + 7 th) filter	1449	1447	1493	2.0	2.1	2.1	118	118	120	3.2	3.2	3.2
3.LineReactor (5 th + 7 th)filter	1452	1426	1474	2	2	2	78.9	82	83	7.3	7.3	7.2

การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.ไม่ใส่	0.4	0.4	0.4	6.8	6.9	6.9	3.2	3.2	3.2	118.1	118.9	118.1
2. (5 th + 7 th)filter	0.4	0.4	0.4	6.8	7.0	6.8	3.2	3.2	3.21	118.3	117.8	120.8
3.LineReactor (5 th + 7 th)filter	0.4	0.4	0.4	6.8	6.9	6.9	3.1	3.2	3.21	118	116	119

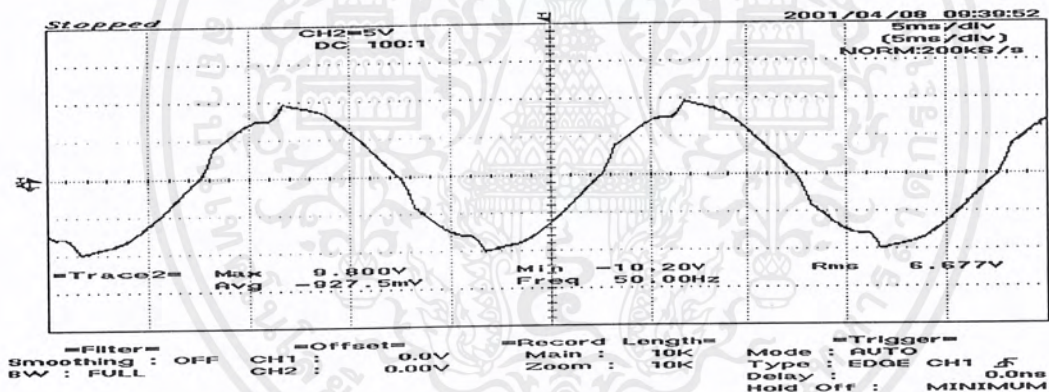
(ต่อ) ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter)
+ ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) และ ไลน์รีแอคเตอร์ (Line Reactor)

การทดลอง	V(line-line)		
	(V)		
	Phase		
	AB	BC	AC
1.ไม่ใส่	65.3	63.4	62.2
2. (5 th +7 th)filter	65.4	63.6	61.8
3.LineReactor(5 th +7 th)filter	60.1	58.4	56.5

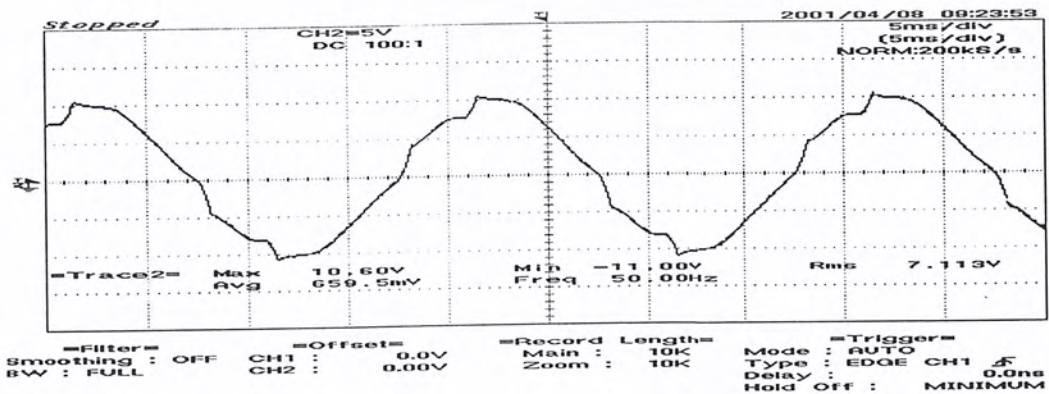
*พิกัด GENERATOR : $V_f = 80V$: $I_f = 0.70 A$



รูปที่ 5.58.1 กระแสเฟส A

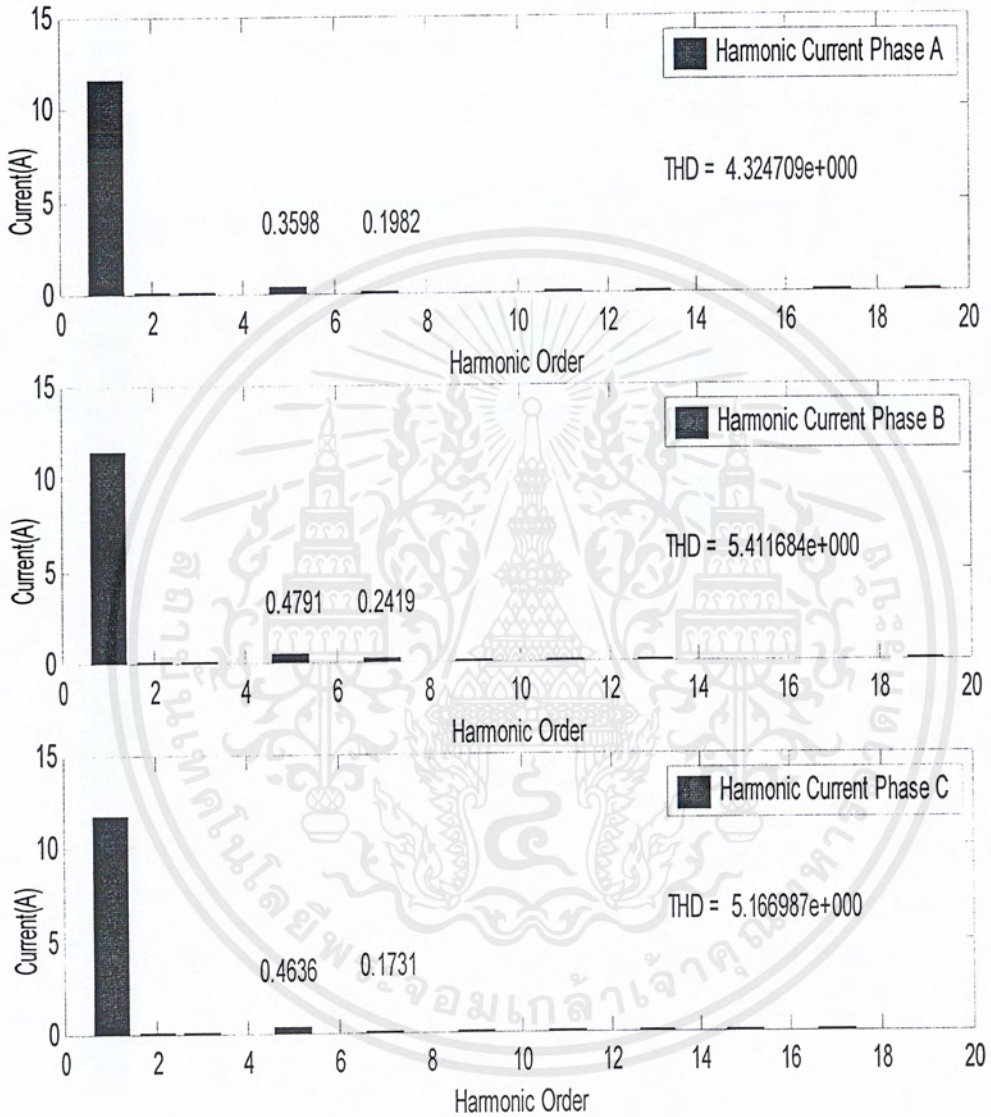


รูปที่ 5.58.2 กระแสเฟส B



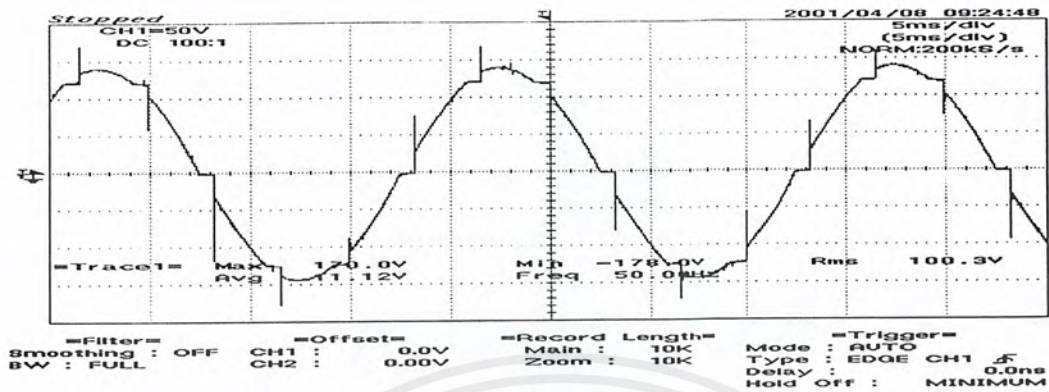
รูปที่ 5.58.3 กระแสเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย

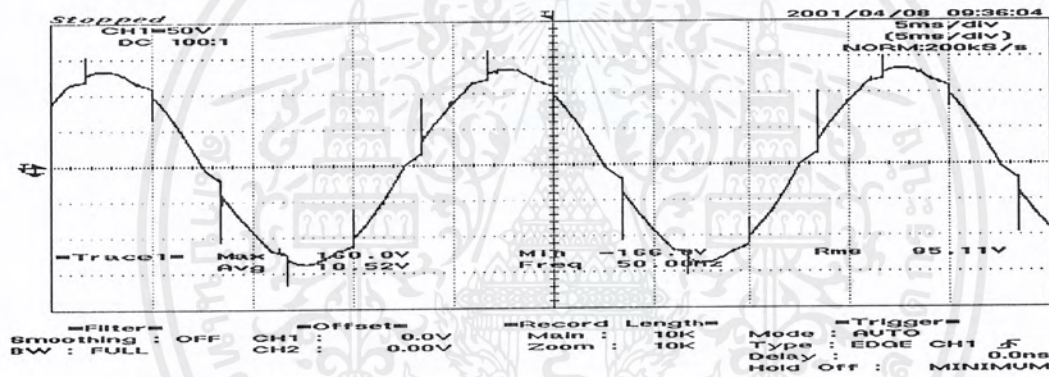


รูปที่ 5.59 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

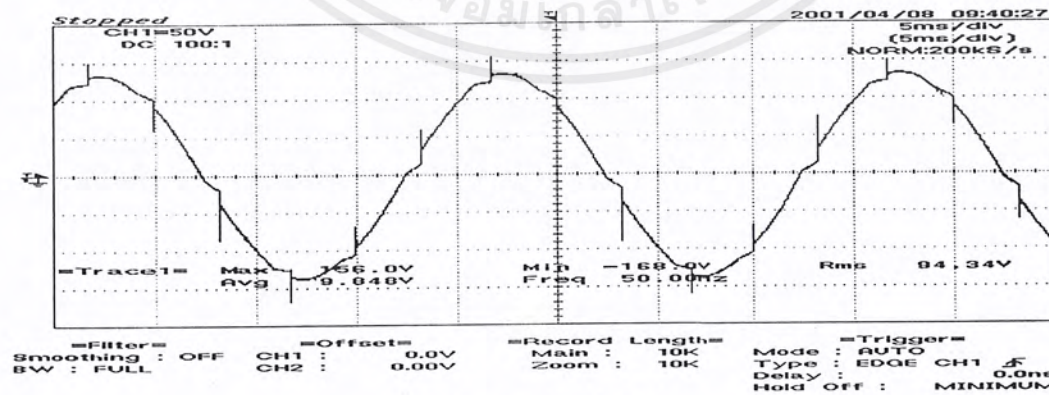
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.60.1 แรงดันเฟส A



รูปที่ 5.60.2 แรงดันเฟส B

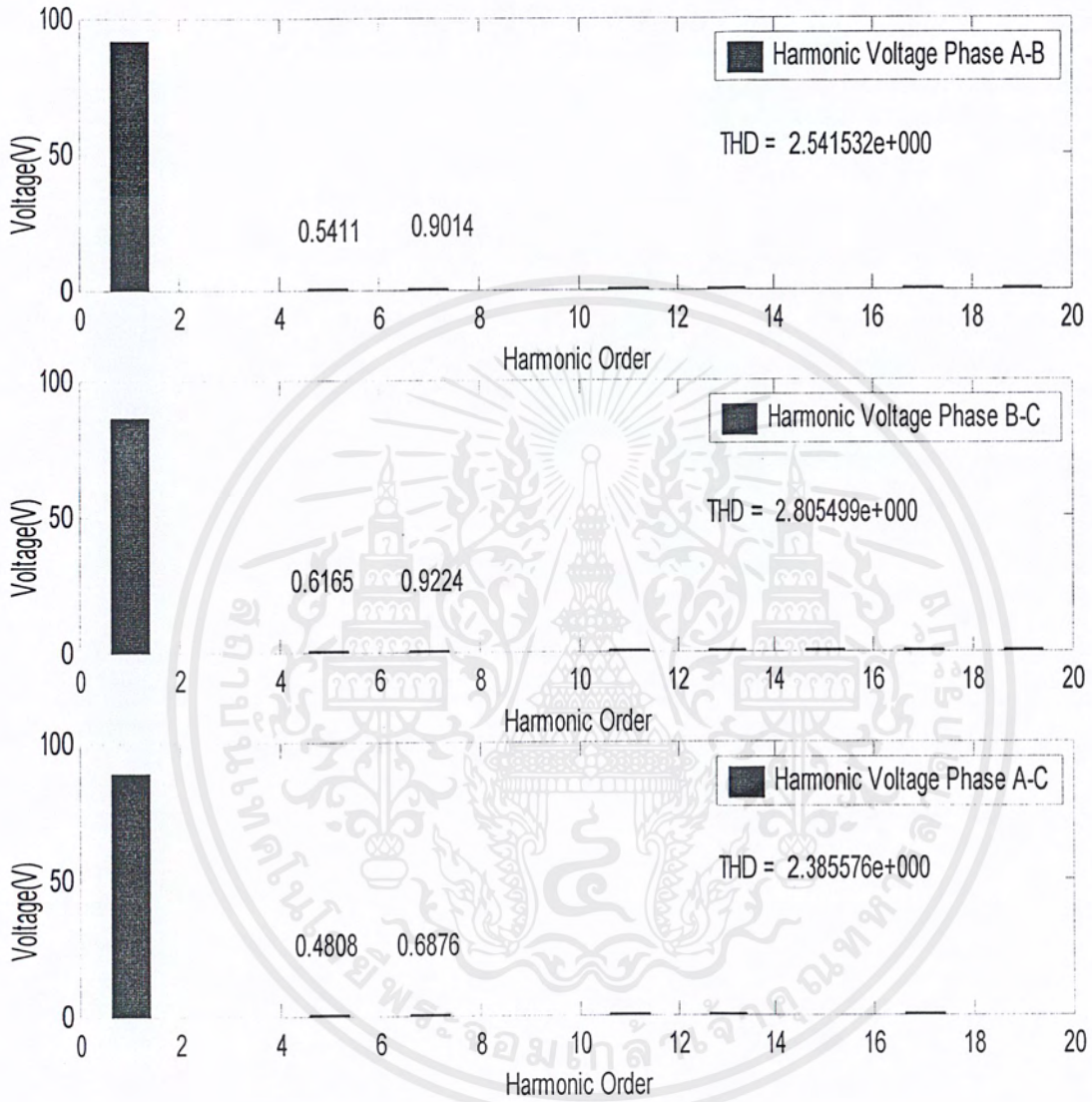


รูปที่ 5.60.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.60 แสดงกราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

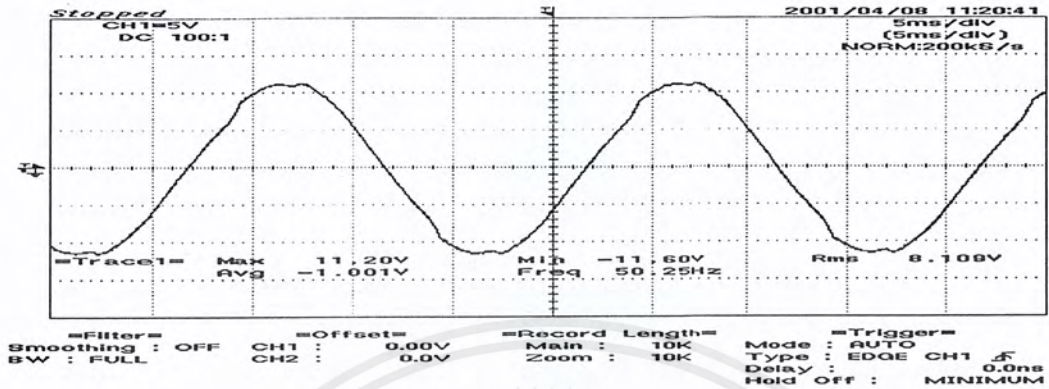
: โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

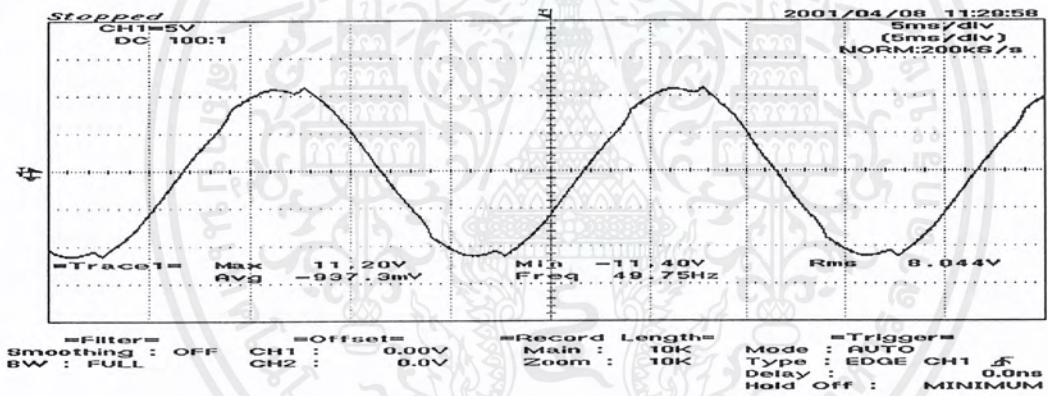


รูปที่ 5.61 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใต้ : ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 : โหลด 50%

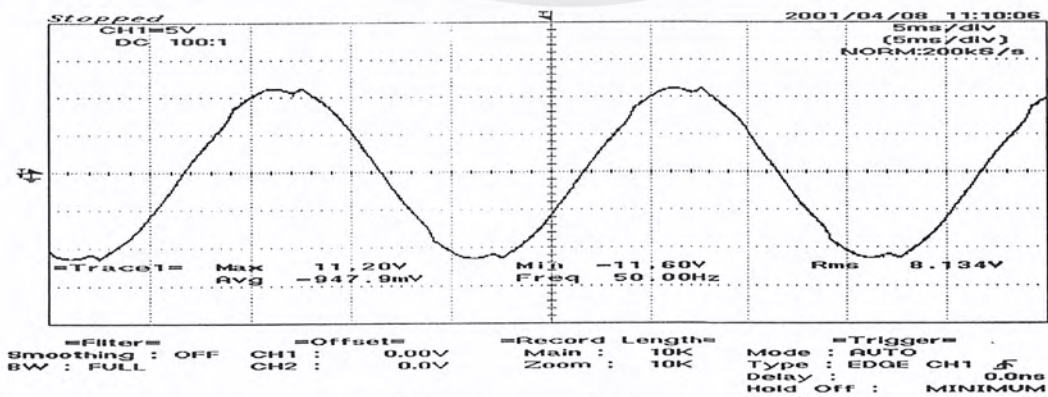
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.62.1 กระแสเฟส A

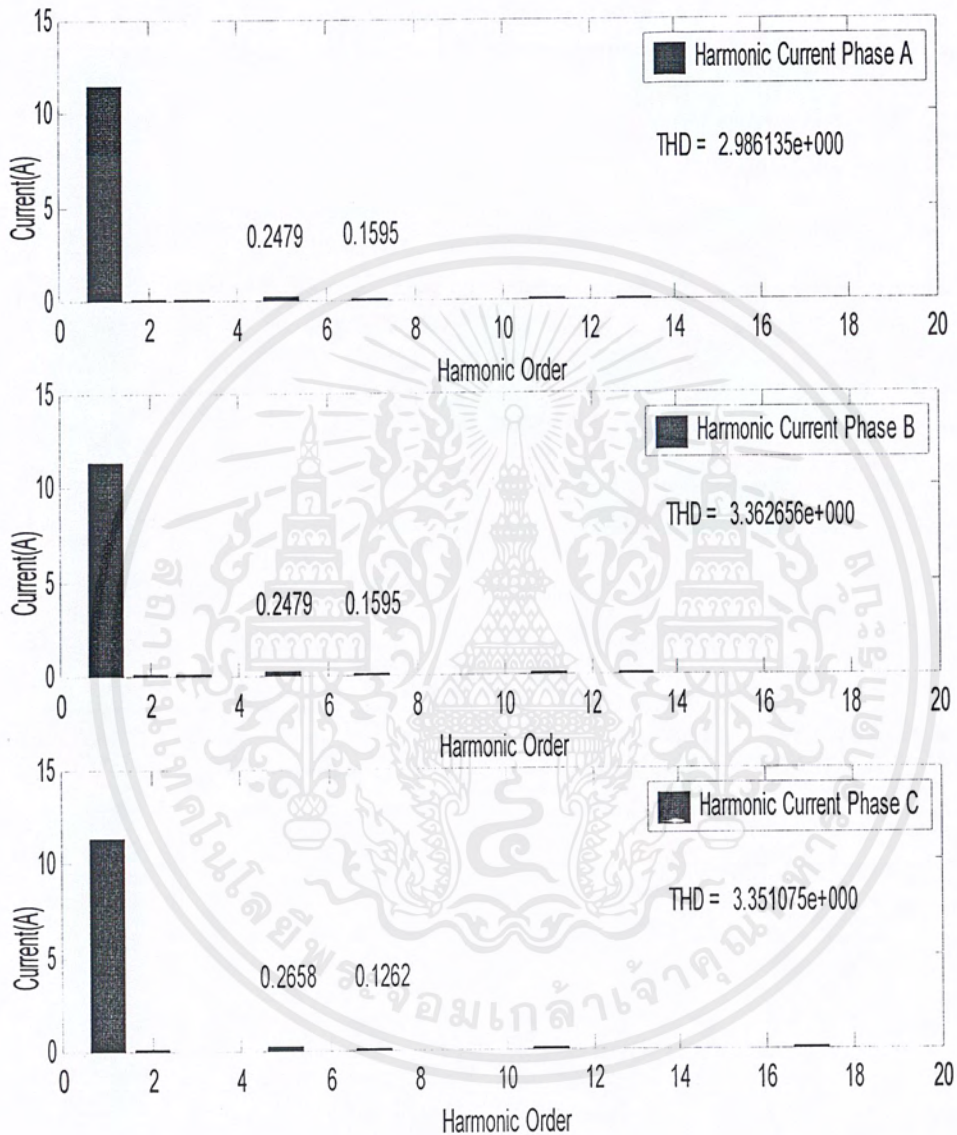


รูปที่ 5.62.2 กระแสเฟส B



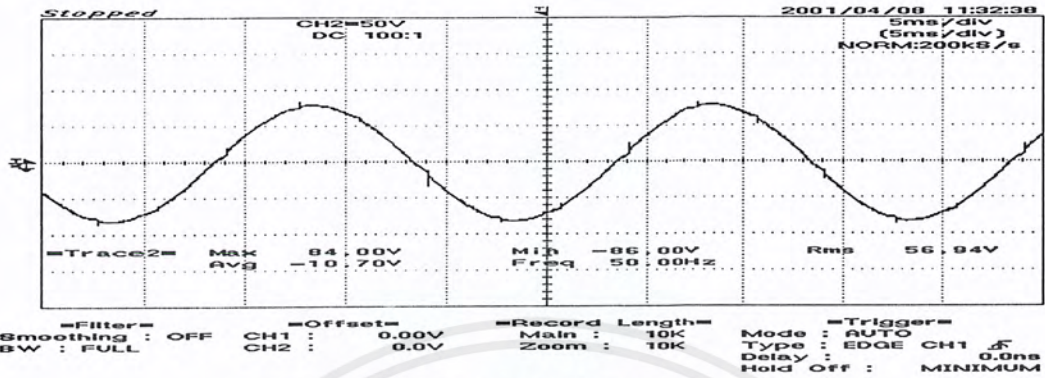
รูปที่ 5.62.3 กระแสเฟส C

รูปที่ 5.62 แสดงกราฟกระแสขณะใส่ : ไนร์เอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
: โหลด 50 %
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

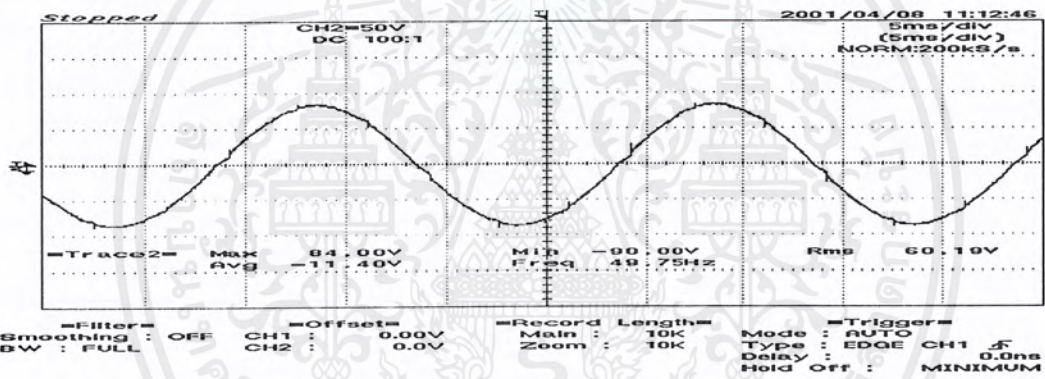


รูปที่ 5.63 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ไลนรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

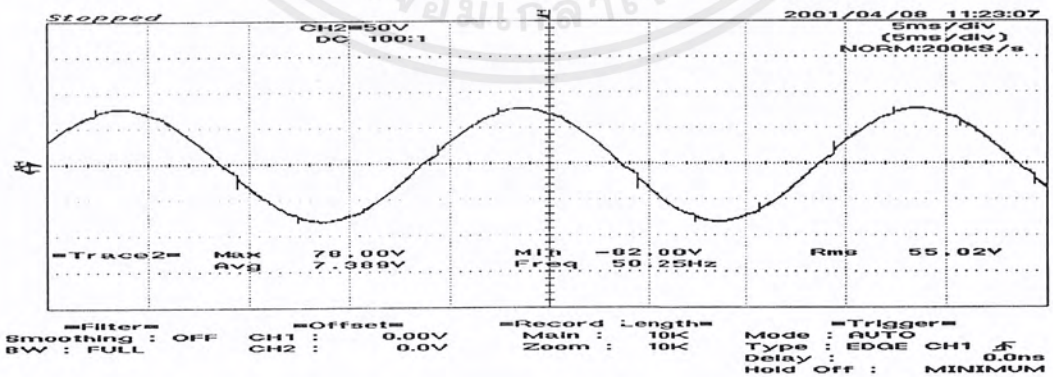
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.64.1 แรงดันเฟส A



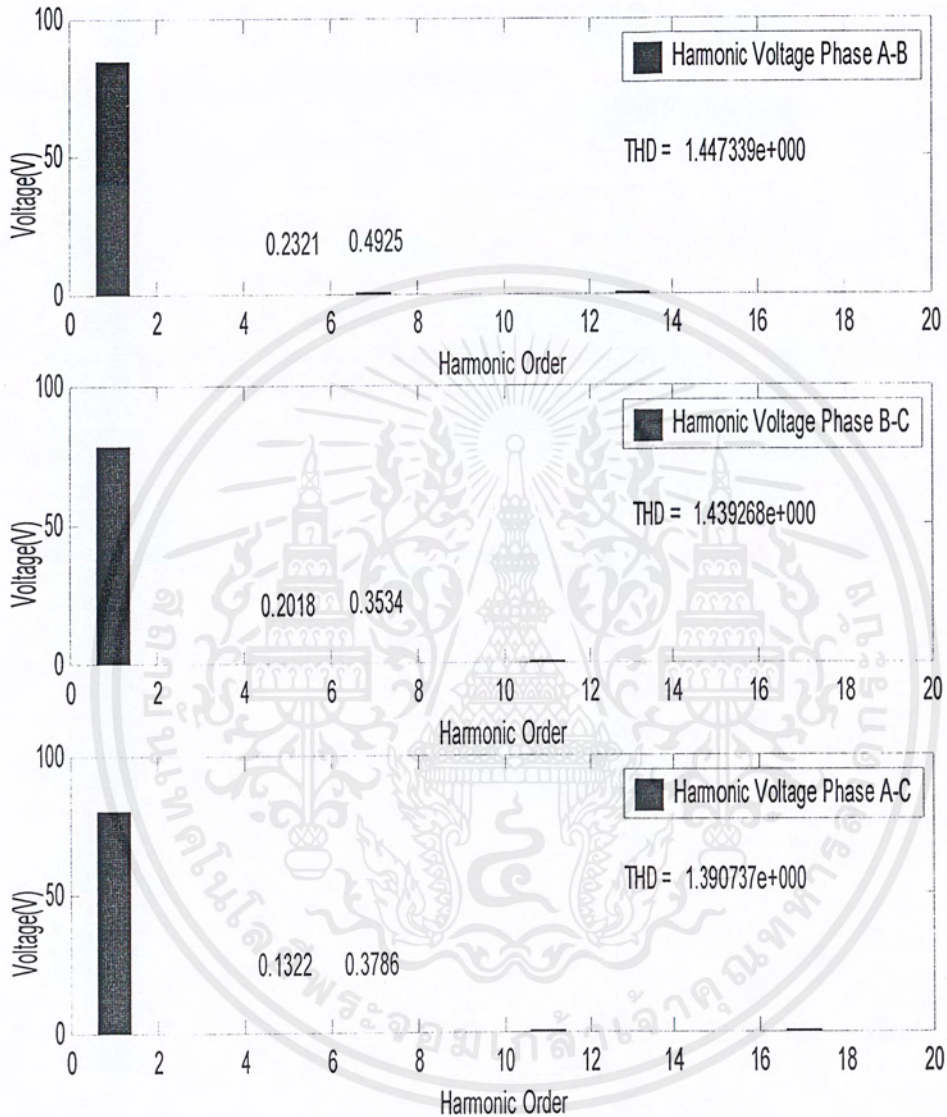
รูปที่ 5.64.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.64.3 แรงดันเฟส C

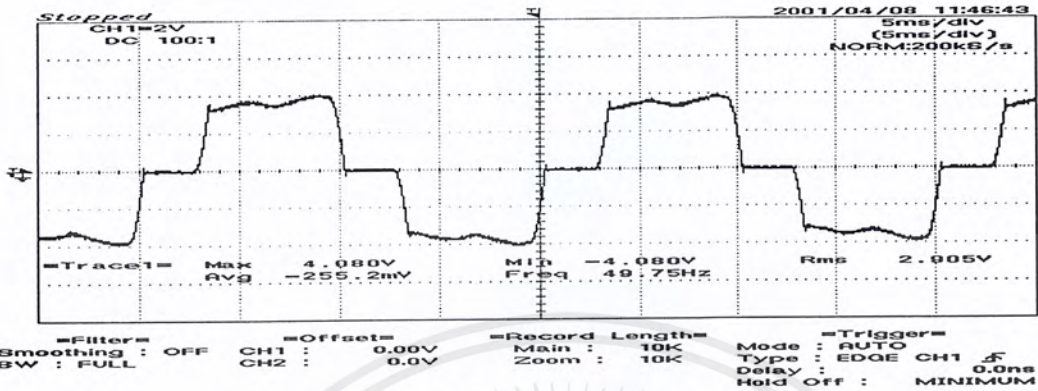
รูปที่ 5.64 แสดงกราฟแรงดันขณะใส่ : ไลนรีแอกเตอร์ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7

: โหลด 50 %
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

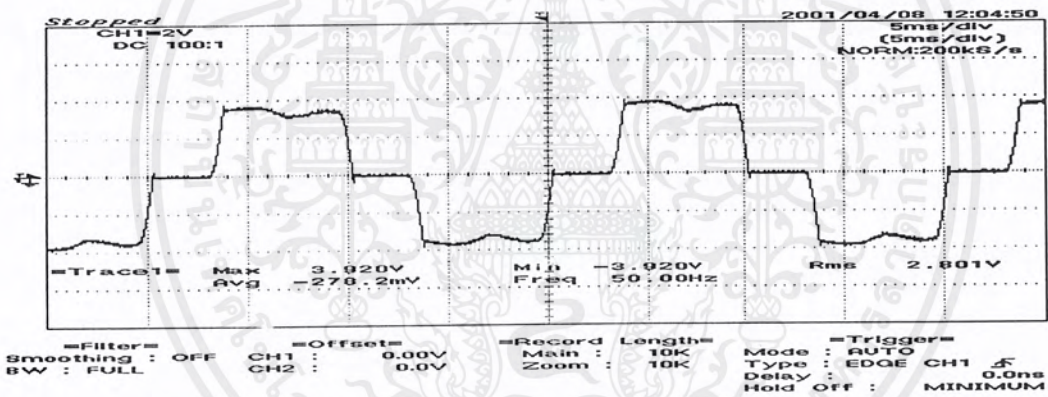


รูปที่ 5.65 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : โหลดรีแอกเตอร์ : ใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลด 50 %

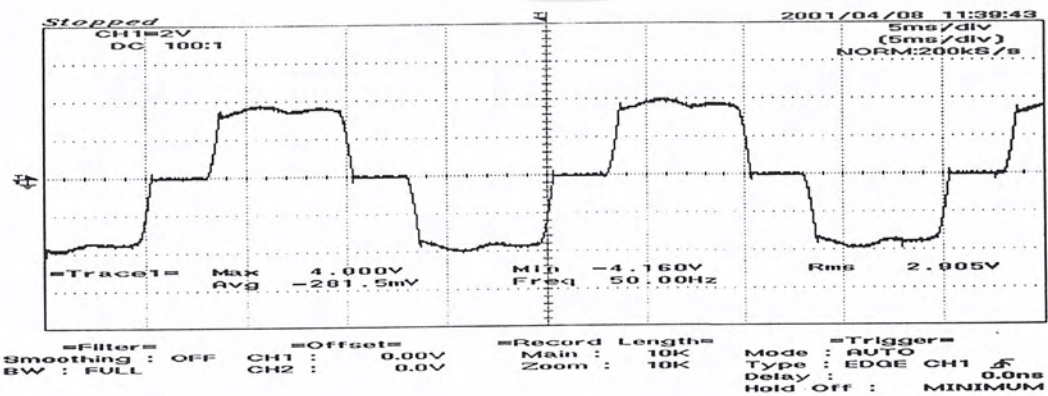
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.66.1 กระแสเฟส A

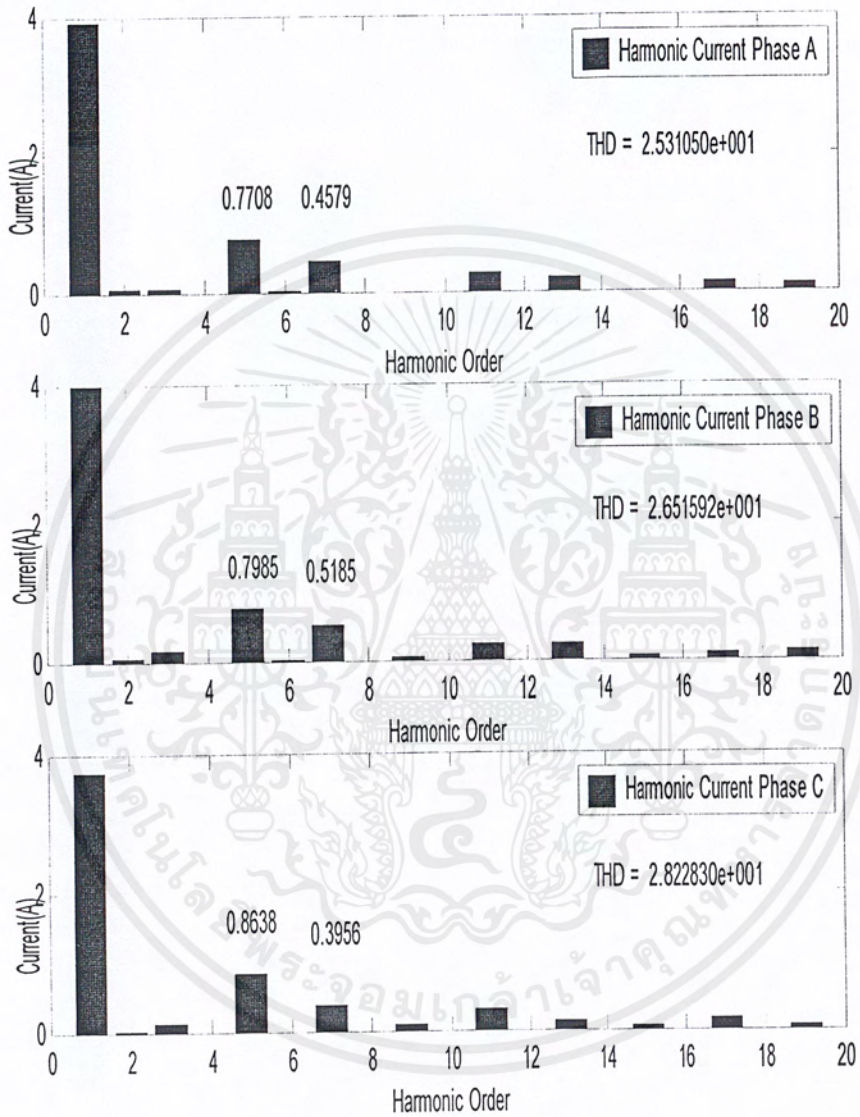


รูปที่ 5.66.2 กระแสเฟส B



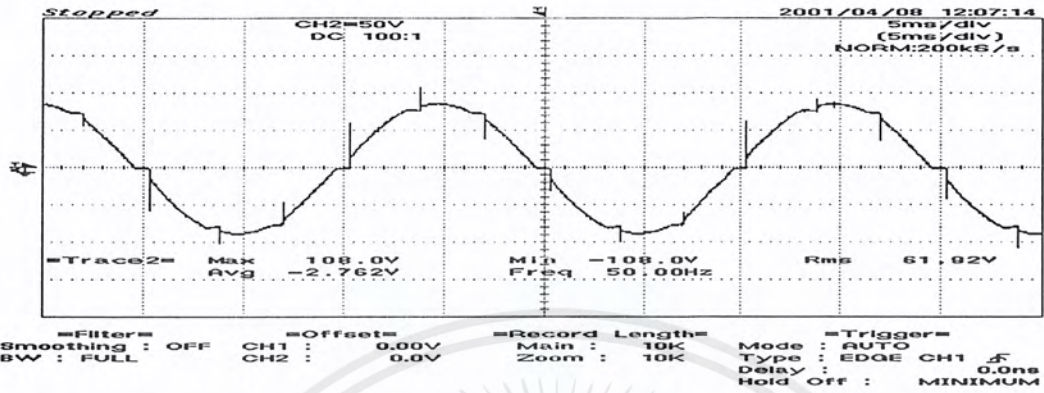
รูปที่ 5.66.3 กระแสเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.66 แสดงกราฟกระแส : โหลด 50 %
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

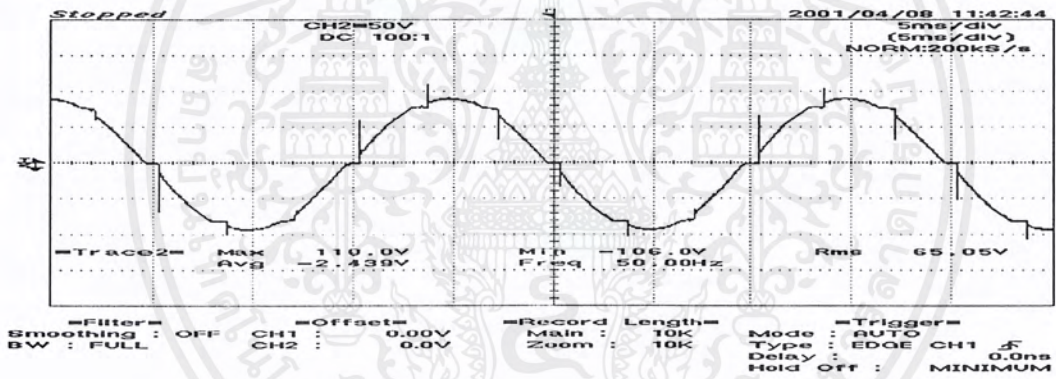


รูปที่ 5.67 กราฟสเปกตรัมกระแส : โหลด 50 %

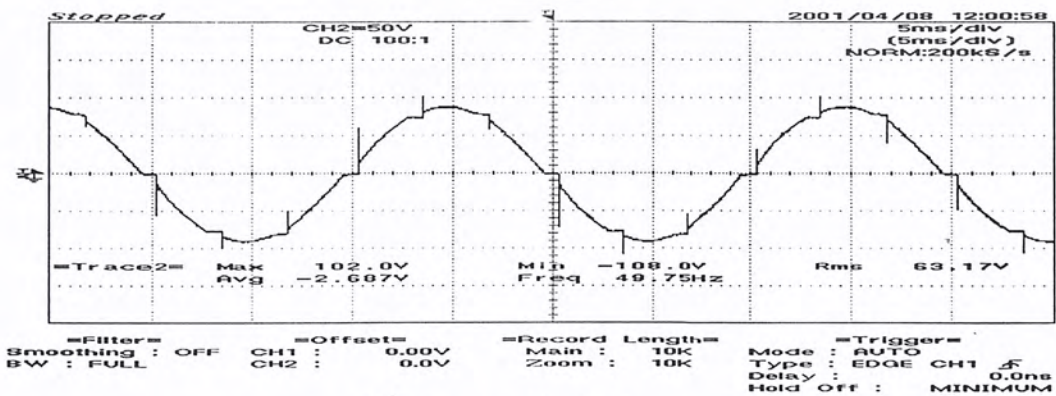
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.68.1 แรงดันเฟส A



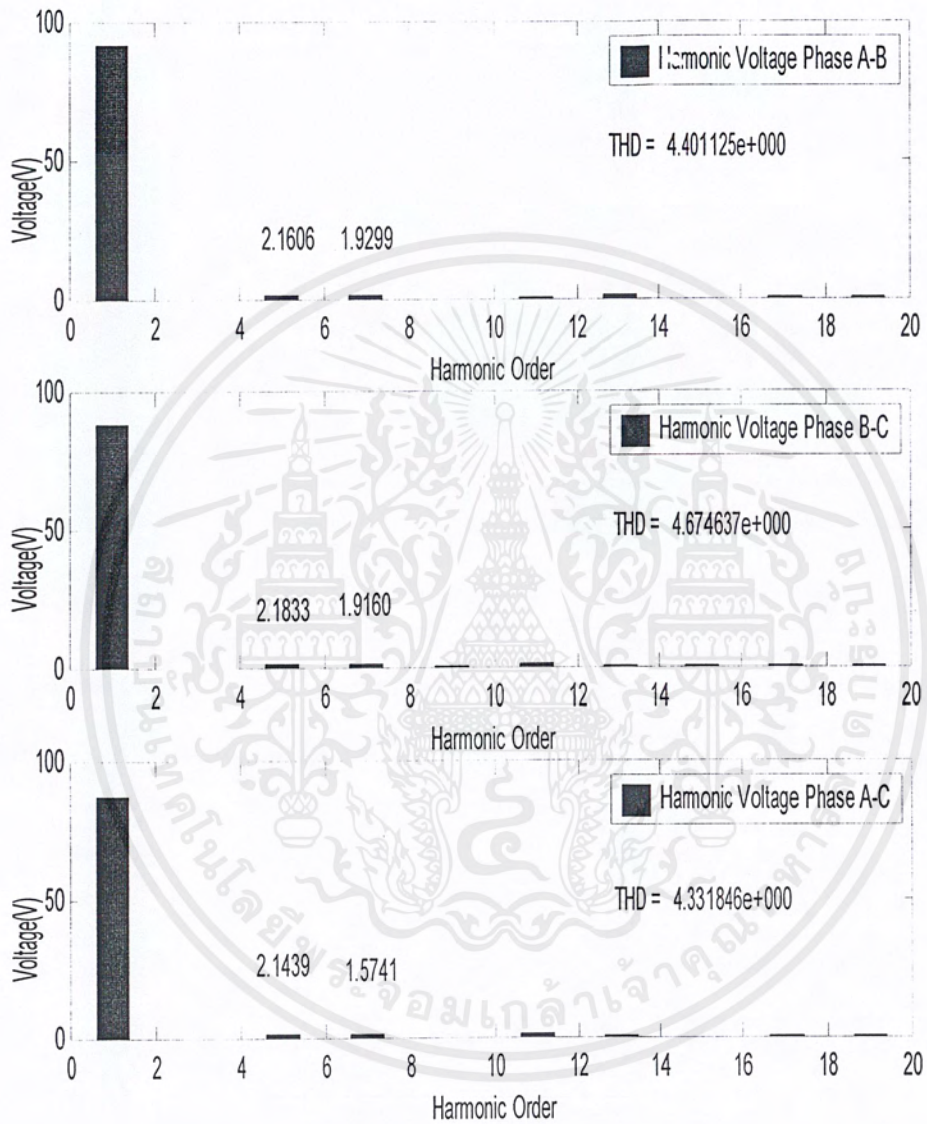
รูปที่ 5.68.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.68.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.68 แสดงกราฟแรงดัน : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.69 กราฟสเปกตรัมแรงดันที่ : โหลด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50% พิกัด *Rated Load*

การทดลอง	ฮาร์มอนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์มอนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1. ไม้ใส่	19.80	10.83	24.54
2. (5 th +7 th)filter	3.08	1.70	4.32
3.LineReactor + (5 th +7 th)filter	2.24	1.31	3.23

การทดลอง	ฮาร์มอนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์มอนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1. ไม้ใส่	2.50	2.40	5.13
2. (5 th +7 th)filter	0.72	1.07	2.80
3.LineReactor + (5 th +7 th)filter	0.23	0.50	1.43

1. จากผลการทดลองที่ *Rated Load* 50% ปรากฏว่า สามารถกรองกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5,7 ได้
2. จากผลการทดลองทั้ง 3 พบว่าให้ค่าผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

หมายเหตุ ที่พิกัด *Rated Load* 100% ไม่สามารถที่จะทำการทดลองได้ เนื่องจากมีปัญหาที่กระแสที่จ่ายเข้าไปในระบบมีค่ามากกว่าพิกัดของอุปกรณ์วัดกระแส (LEM) จะสามารถจับสัญญาณได้

6. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมพรีกริก SCR 30°
 ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 (5th filter) และ Line Reactor ที่มุมพรีกริก SCR 30°

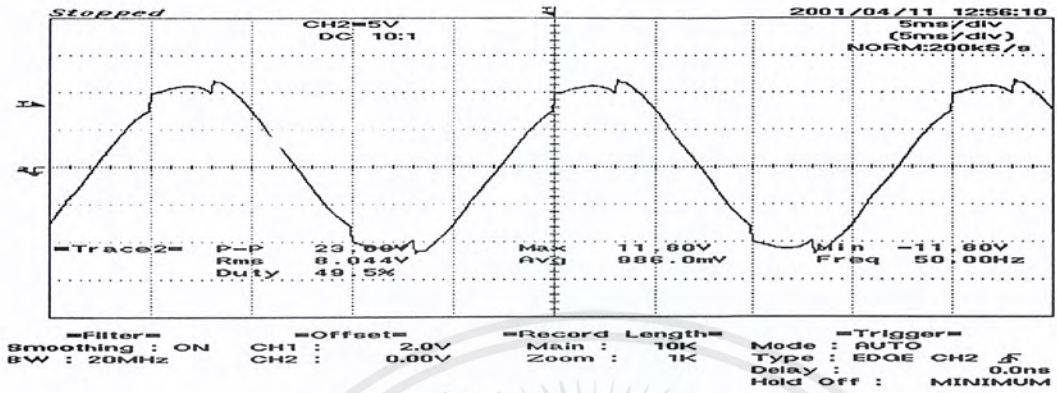
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.LineReactor + 5 th filter	15.1	15.0	17.3	16.6	17.0	15.6	10.0	8.5	8.3	107.6	104.6	102.1

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +5 th filter	1752	1766	1761	4.25	4.25	4.25	130	130	130	13.5	13.5	13.5

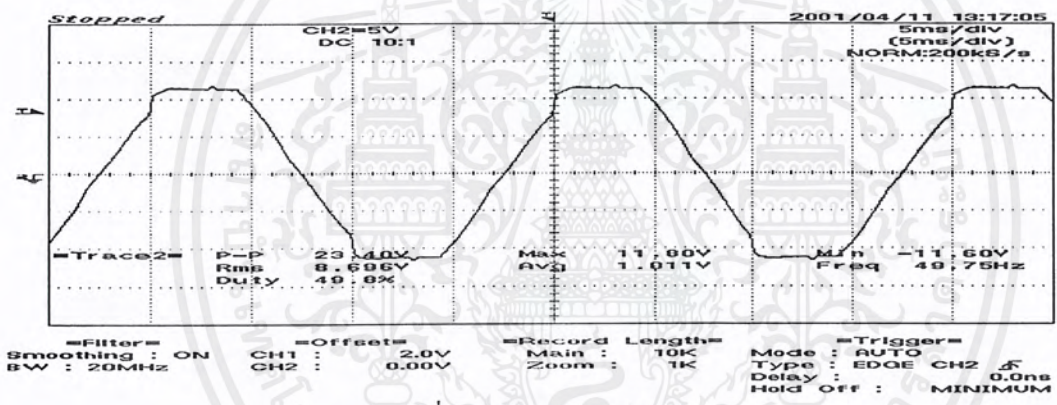
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +5 th filter	0.7	0.7	0.7	12.8	12.8	12.8	10.4	10.4	10.4	84.5	84.5	84.5

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80 V : I_r = 0.7 A

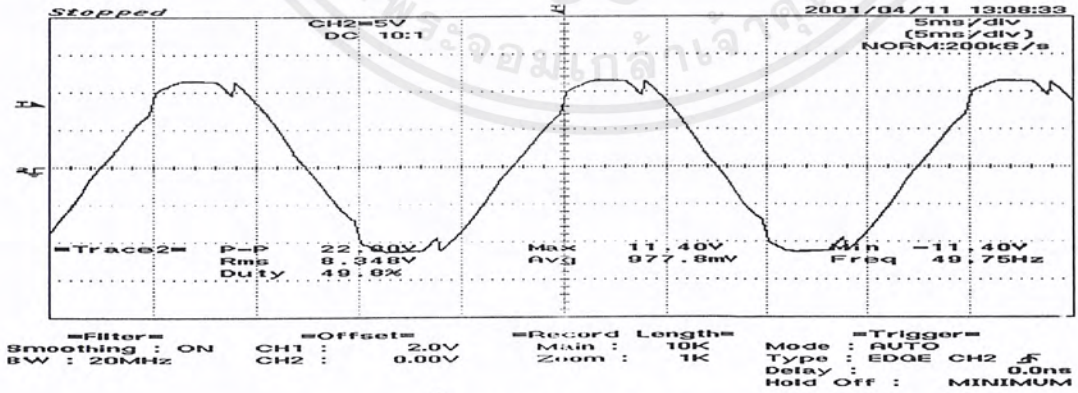
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.70.1 กระแสเฟส A



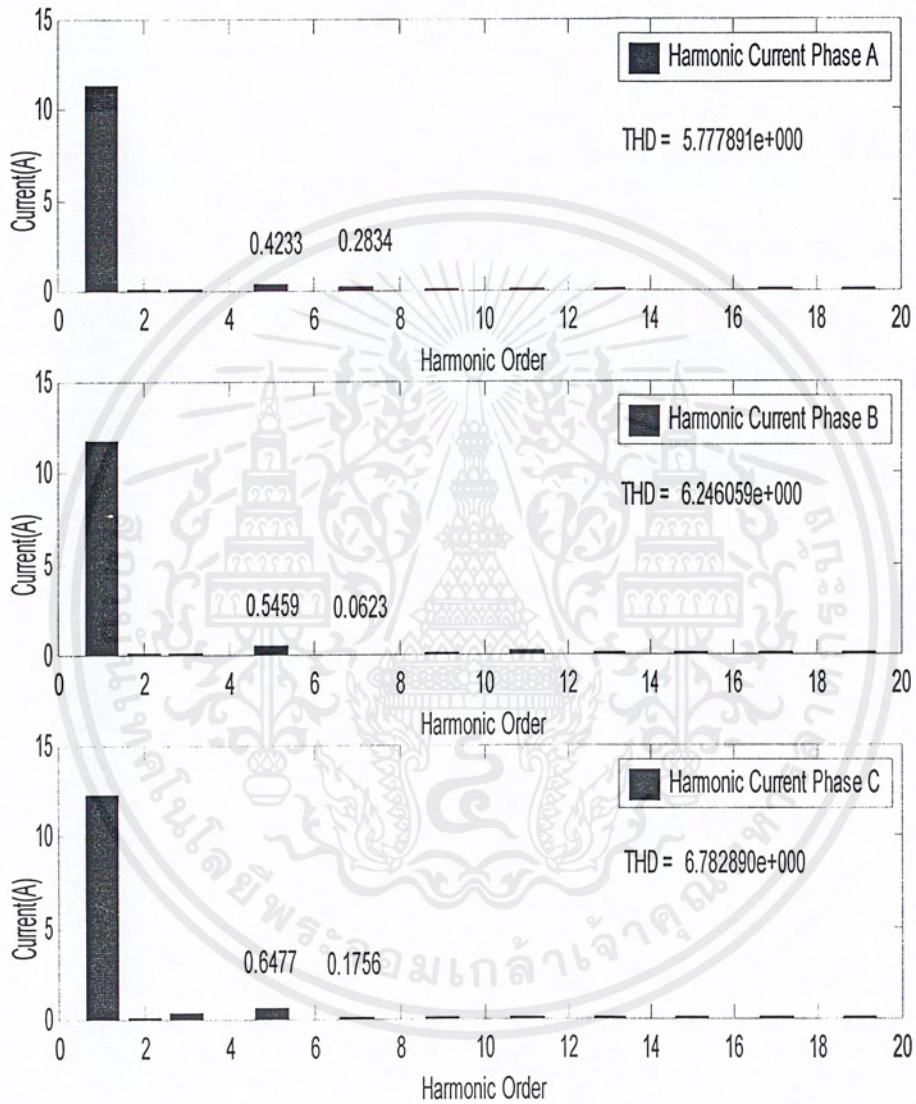
รูปที่ 5.70.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.70.3 กระแสเฟส C

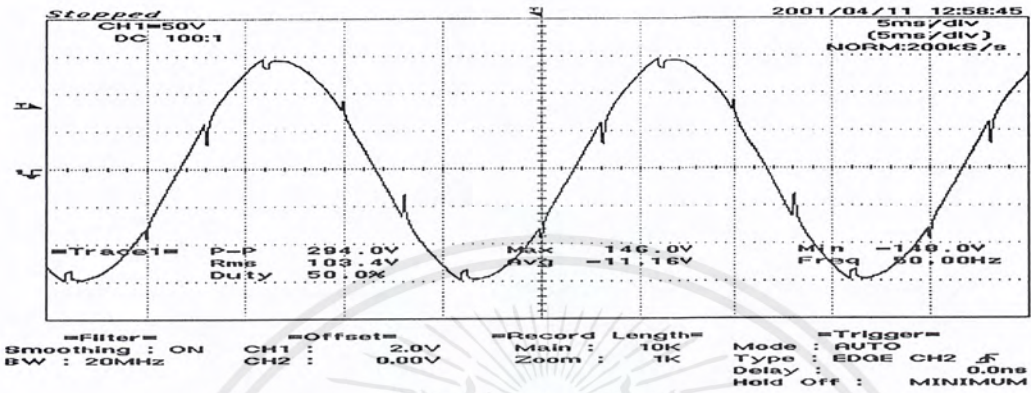
รูปที่ 5.70 กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไตน์รีแอกเตอร์ : ที่มุมตริค 30 °

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

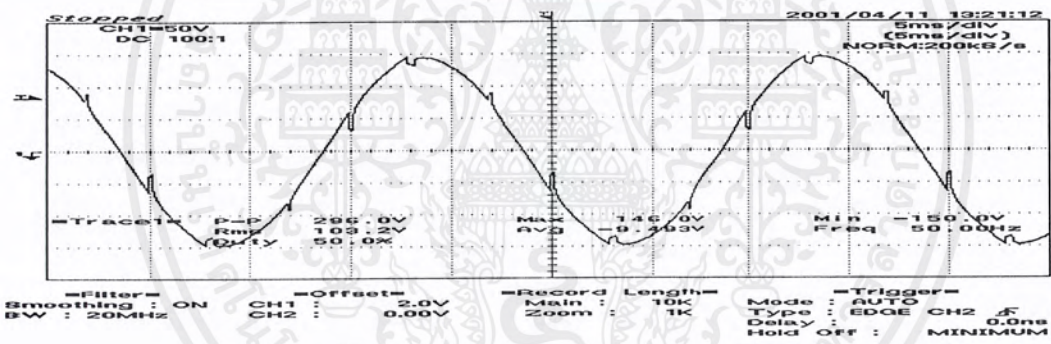


รูปที่ 5.71 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไลน์รีแอกเตอร์ :
ที่มุมตริก 30°

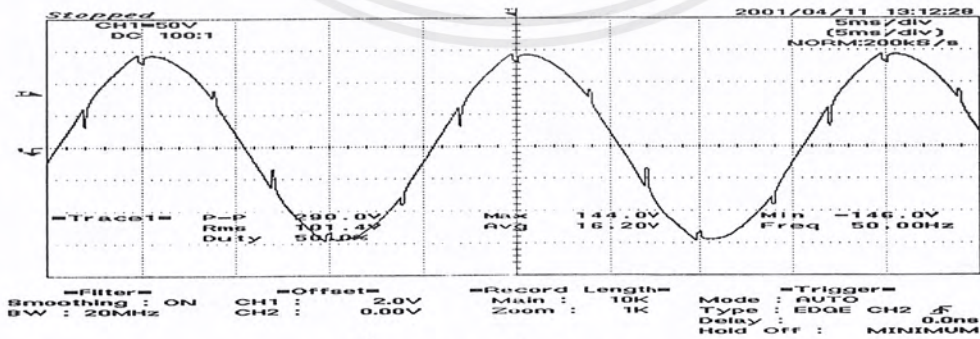
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.72.1 แรงดันเฟส A



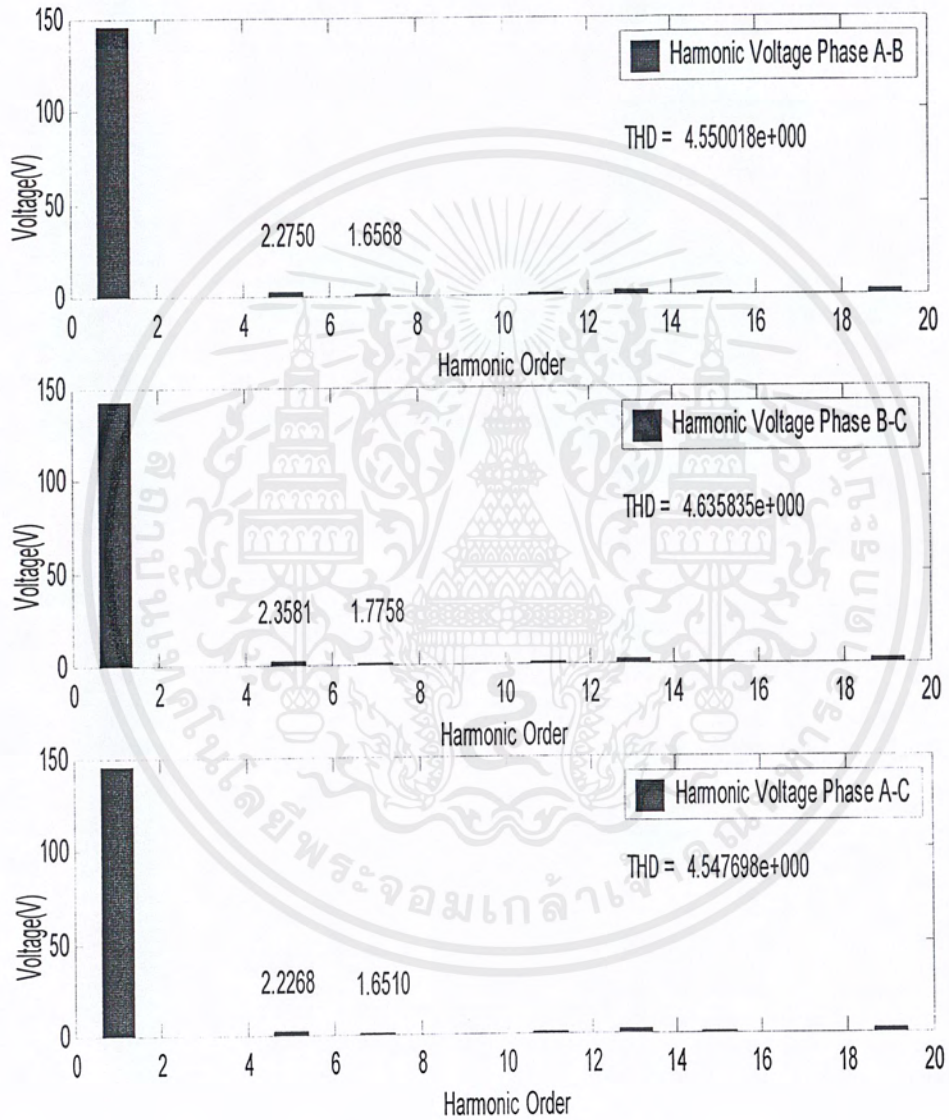
รูปที่ 5.72.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.72.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.72 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ไลน์รีแอกเตอร์ : ที่มุมตริก 30 °

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.73 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใต้ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไลน์รีแอกเตอร์ :
ที่มุมตริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด *Rated Load*
: มุมพรีก $SCR\ 30^\circ$

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1.LineReactor+5 th filter	3.76	2.52	5.77

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.LineReactor+5 th filter	1.57	1.14	4.55

- เมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์ และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 ที่มุมพรีก $SCR\ 30^\circ$ ที่พิกัด *Rated Load* จะมีผลทำให้กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่า THD ลดลง
- จากผลการทดลองทั้ง 3 พบว่าให้ค่าผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

7. ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 (5th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load :

มุมทริก SCR 30°

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 (5th filter)

และ Line Reactor ที่โหลด 50 % ที่มุมทริก SCR 30°

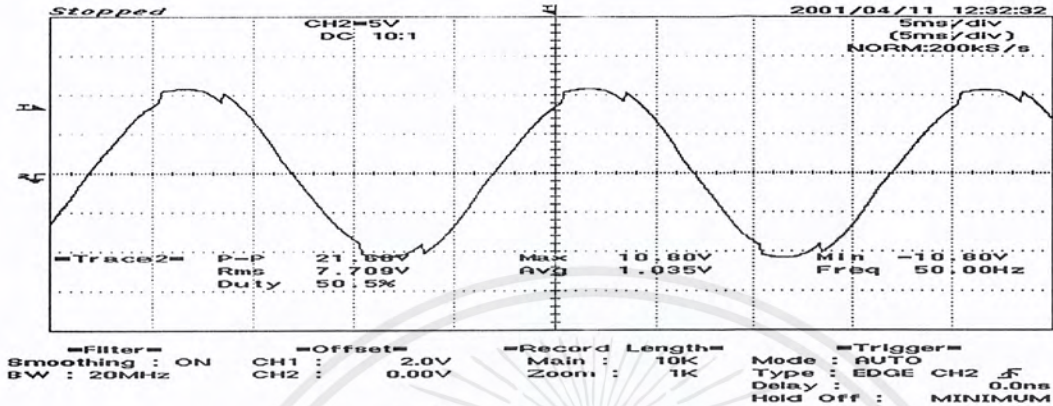
การทดลอง	I (line reactor) (A)			I (filter) (A)			I (line) (A)			V(line-line) (V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.LineReactor +5 th filter	14.1	15.7	16.3	16.0	16.8	15.4	7.0	7.5	4.8	107	103.9	101.5

การทดลอง	N(rpm) (รอบ/นาที)			Torque (N.m)			DC MOTOR					
	ครั้งที่			ครั้งที่			V _{dc} (V) ครั้งที่			I _{dc} (A) ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +5 th filter	1934	1936	1933	2.8	2.7	2.9	130	130	130	7.5	7.5	7.5

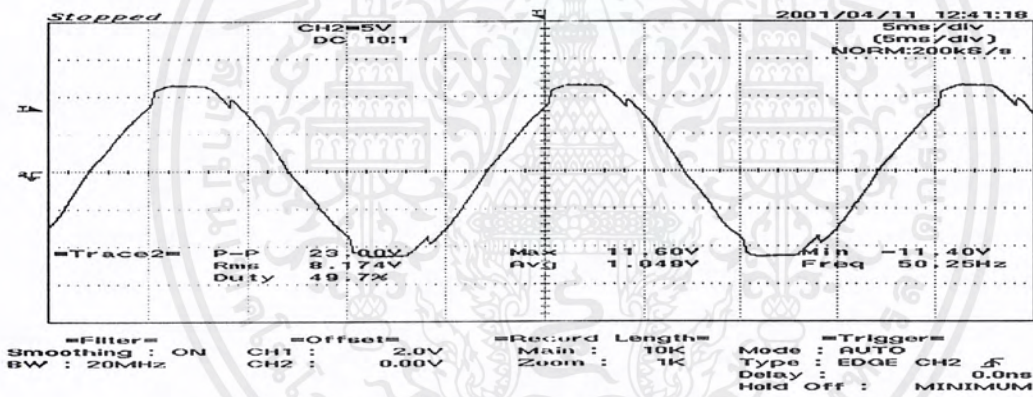
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A) ครั้งที่			I _a (A) ครั้งที่			I _{dc} (o/p)(A) ครั้งที่			V _{dc} (o/p) ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +5 th filter	0.44	0.44	0.44	7.06	7.06	7.06	4.8	4.8	4.8	143.6	143.3	143

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80 V : I_r = 0.70 A

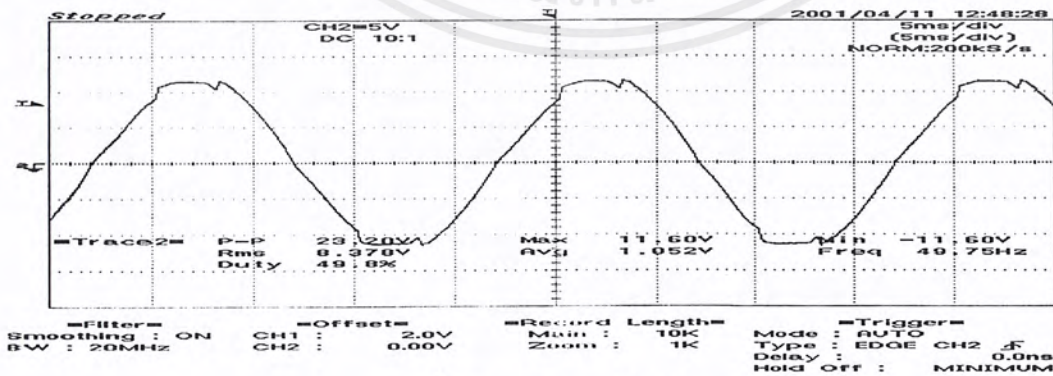
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.74.1 กระแสเฟส A



รูปที่ 5.74.2 กระแสเฟส B

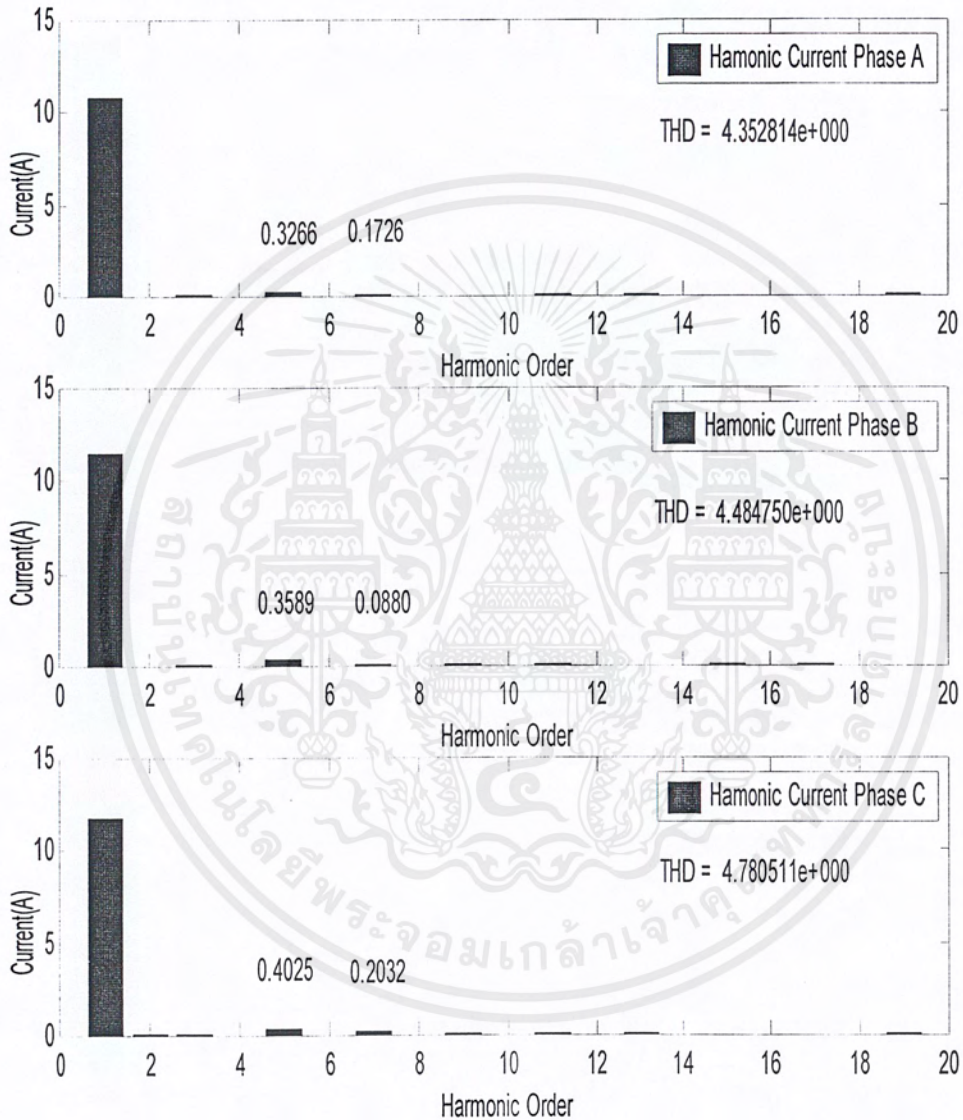


รูปที่ 5.74.3 กระแสเฟส C

รูปที่ 5.74 กราฟกระแสขณะใต้ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไลน์รีแอกเตอร์ : โหลด 50 % :

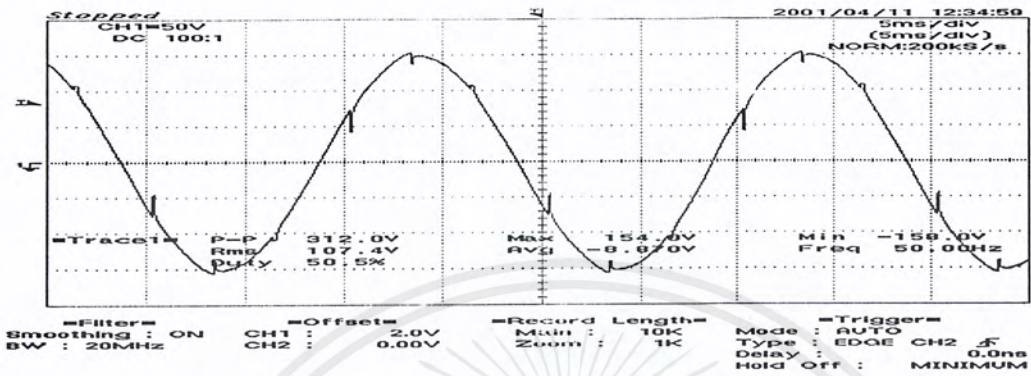
ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

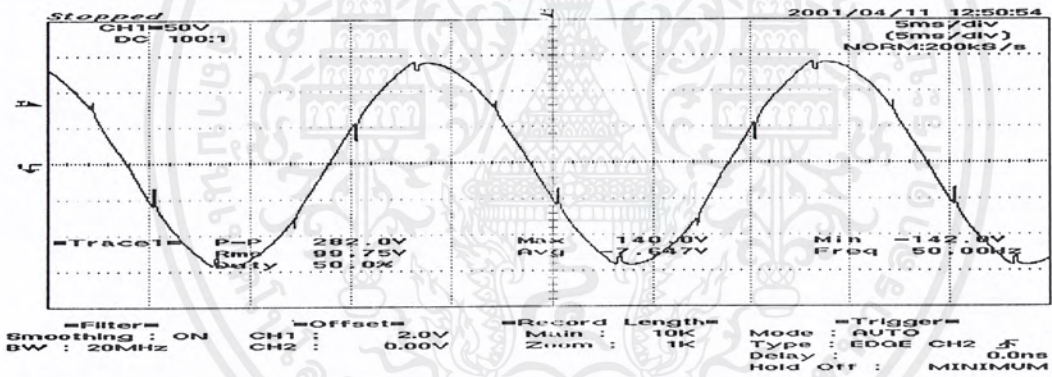


รูปที่ 5.75 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใต้ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไลน์รีแอกเตอร์ : โหลด 50% : ที่มุมตริก 30°

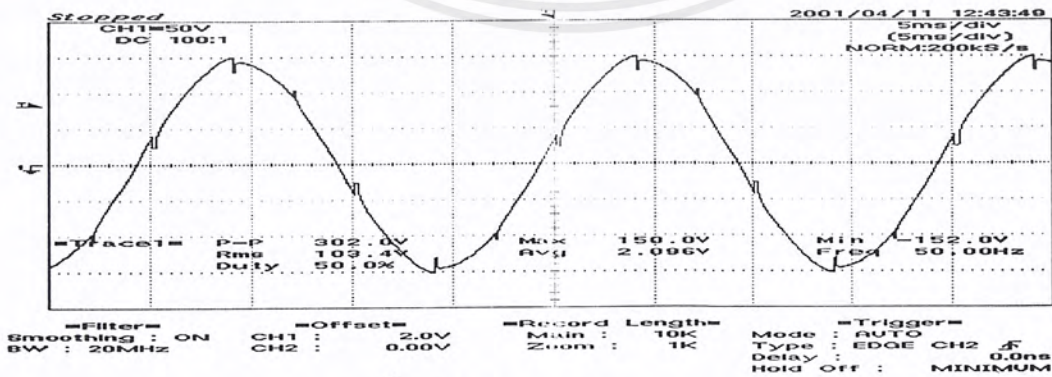
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.76.1 กระแสเฟส A



รูปที่ 5.76.2 กระแสเฟส B

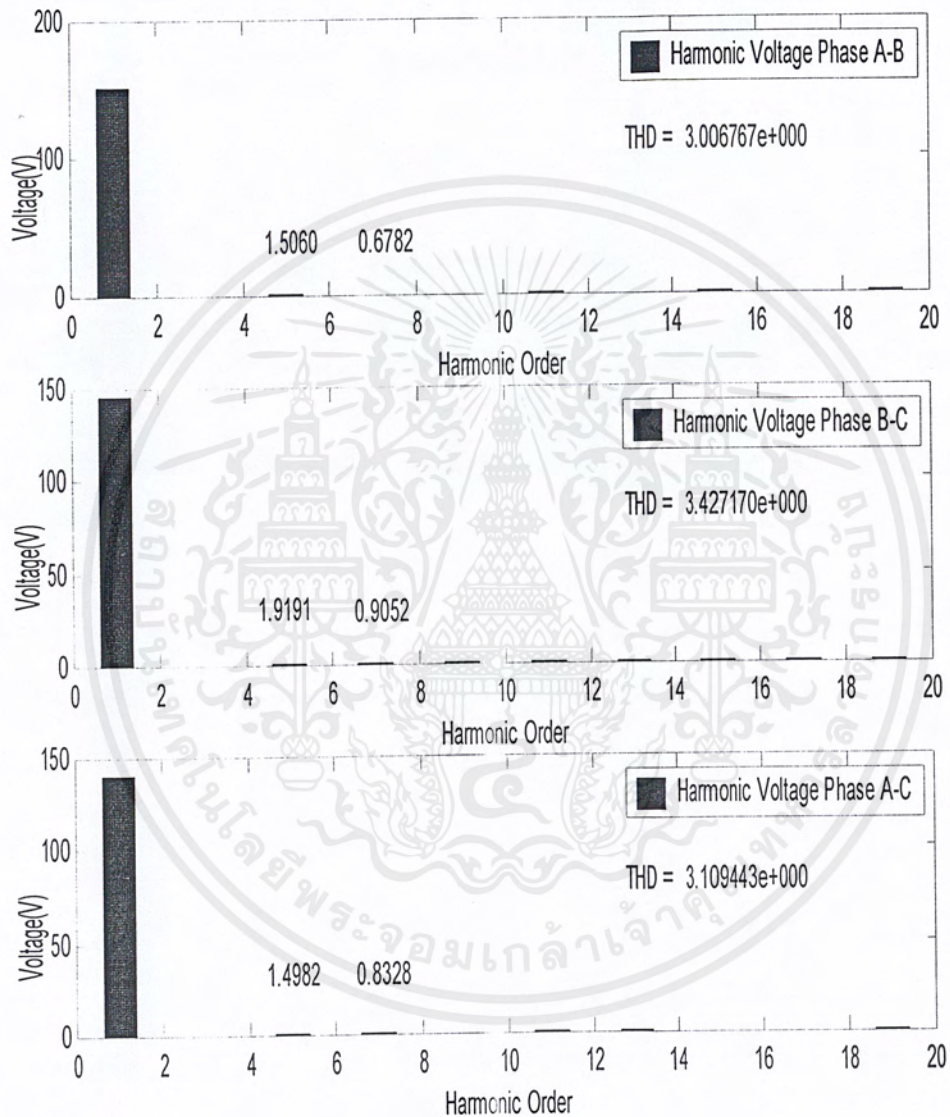


รูปที่ 5.76.3 กระแสเฟส C

รูปที่ 5.76 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : ไลน์รีแอกเตอร์ : โหลด 50 % :

ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.77 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 : โหลดรีแอกเตอร์ : โหลด 50% : ที่มุมตริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50% พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1.LineReactor+5 th filter	3.02	1.60	4.35

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.LineReactor+5 th filter	0.98	0.44	3.00

เมื่อใส่ไดโอดรีแอคเตอร์ และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 ที่มุมทริก SCR 30° จะมีผลทำให้กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่า THD ลดลงได้เหมือนกับที่ พิกัด Rated Load

8. ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด Rated load : มุมทริก SCR 30°
 ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 (7th filter) และ LineReactor
 ที่มุมทริก SCR 30°

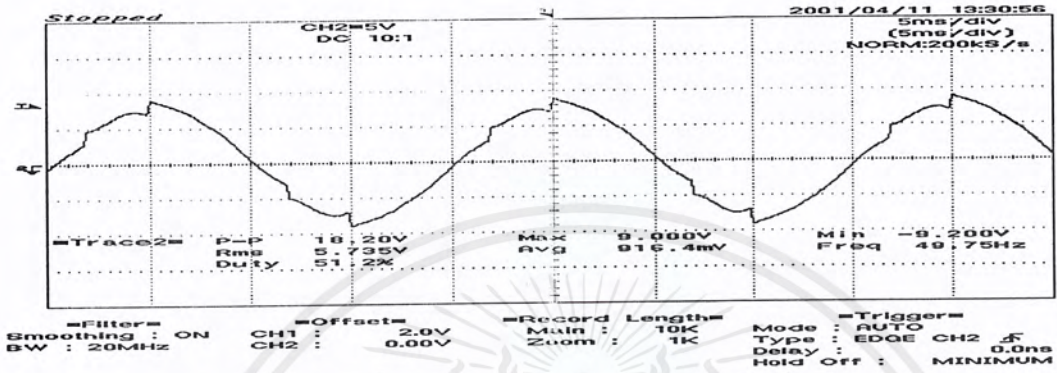
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.LineReactor +(7 th filter)	10.5	10.3	11.7	9.4	9.8	8.8	10.0	8.40	8.20	109.4	106	104.5

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +(7 th filter)	1890	1873	1875	4.2	4.3	4.2	130	130	130	11.5	11.5	11.5

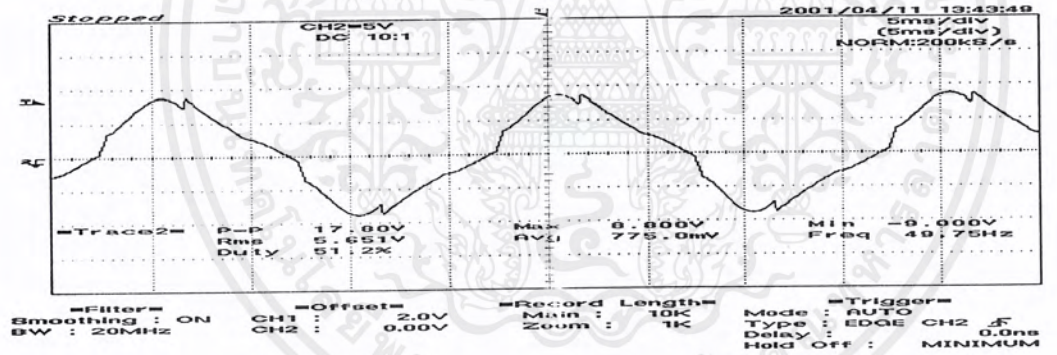
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +(7 th filter)	0.7	0.7	0.7	10.8	10.8	10.8	10.4	10.4	10.4	84.0	84.0	84.0

*พิกัด GENERATOR : V_f = 80 V : I_f = 0.70 A

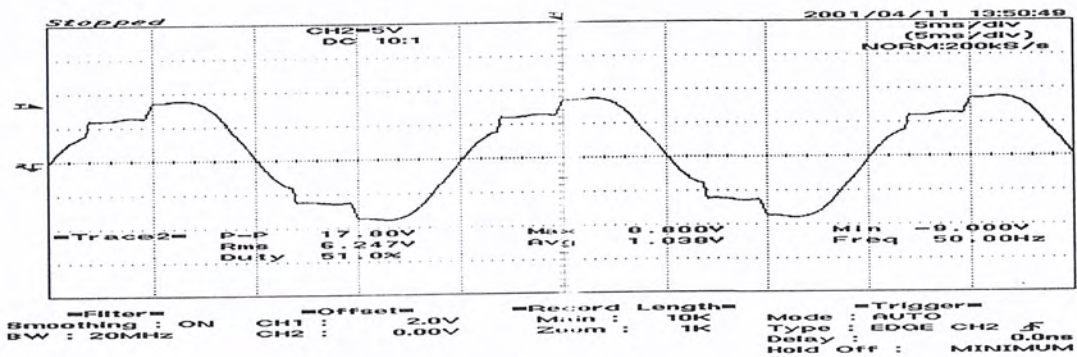
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.78.1 กระแสเฟส A

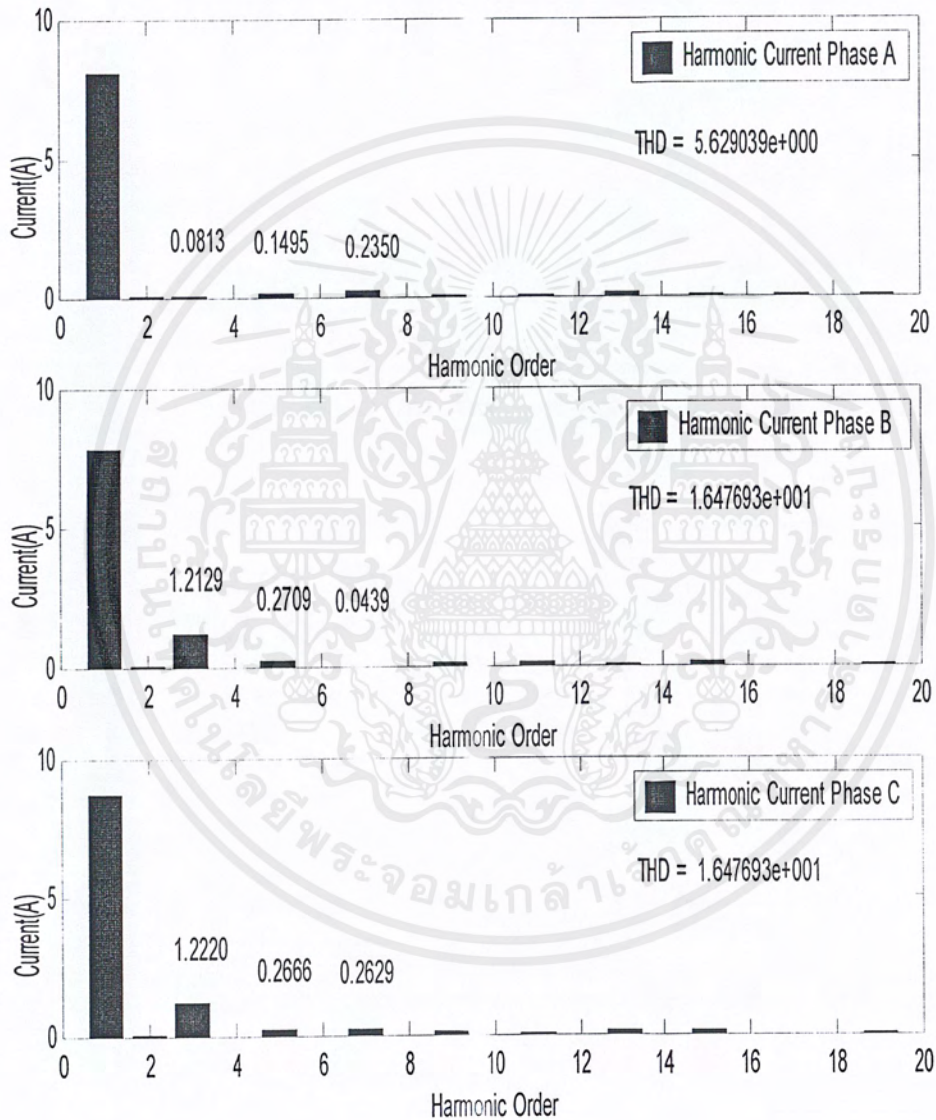


รูปที่ 5.78.2 กระแสเฟส B



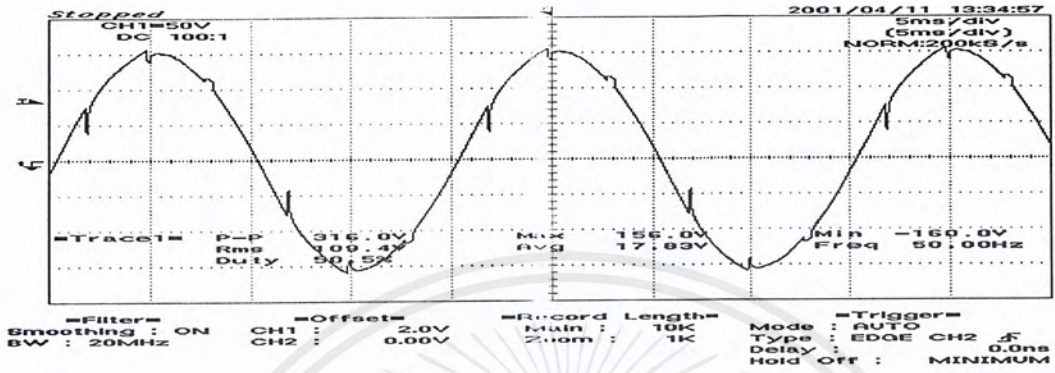
รูปที่ 5.78.3 กระแสเฟส C

เอกสารรูปที่ 5.78 กราฟที่กระแสนัดจะได้อีก : ตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 : ไนน์รีแอกเตอร์ : ที่มุมตริก 30°
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

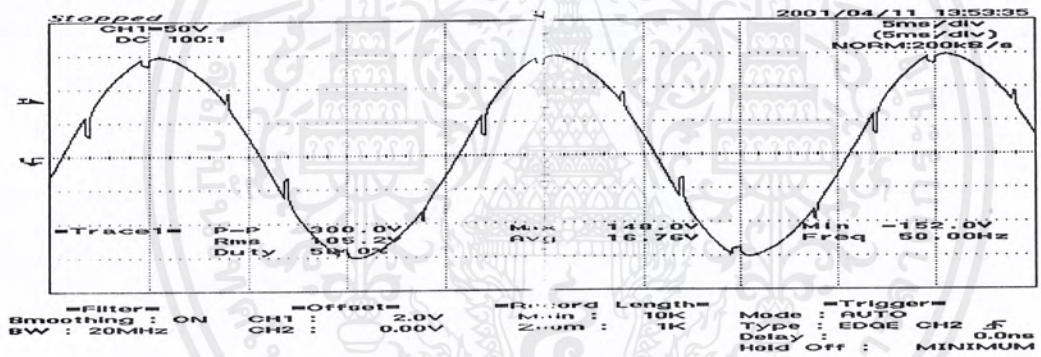


รูปที่ 5.79 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลดรีแอกเตอร์ : ที่มุมทริก 30°

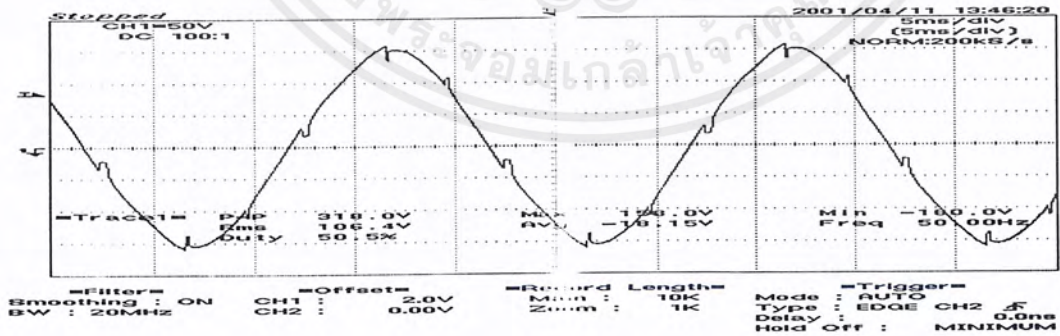
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.80.1 แรงดันเฟส A



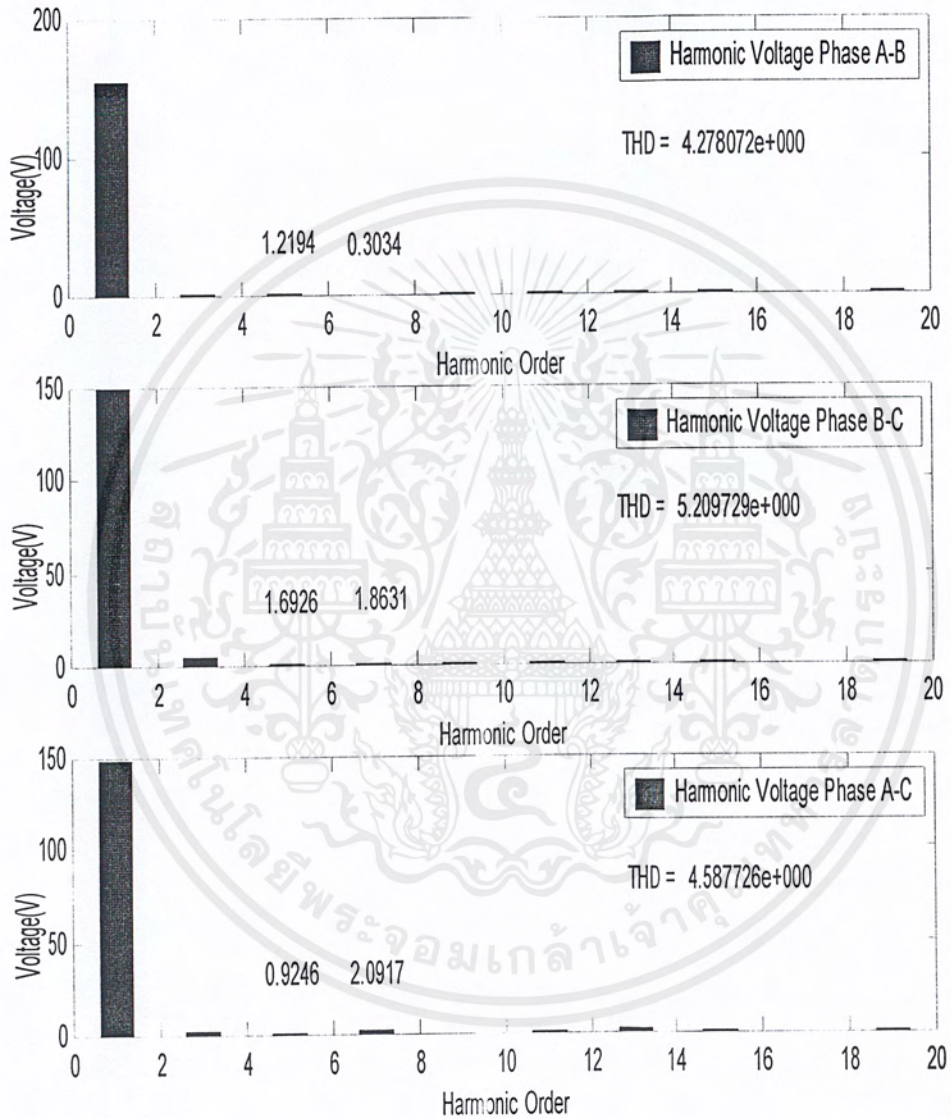
รูปที่ 5.80.2 แรงดันเฟส B



รูปที่ 5.80.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.80 กราฟแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองสารมอนิกที่ 7 : ไนรีแอกเตอร์ : ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.81 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ไลน์รีแอกเตอร์ : ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.15.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่พิกัด *Rated Load*
: มุมทริก SCR 30°

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 3(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1.LineReactor+7 th filter	15.47	3.62	0.56	16.5

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 3(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรง ดันลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.LineReactor+7 th filter	9.56	1.13	1.24	5.21

- เมื่อใส่ไดโอดรีแอคเตอร์ และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 ที่มุมทริก SCR 30° จะมีผลทำให้กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่า THD ลดลงได้ แต่จะมีผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้นมาในระบบ
- เฉพาะที่เฟส B และเฟส C จะเกิดฮาร์โมนิกที่ 3 เกิดขึ้นมาอย่างเด่นชัดกว่าเฟส A

9. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) : Line Reactor : ทดลองที่พิกัด 50% Rated load
: มุมทริก SCR 30°

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบผลของการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 (7th filter) และ Line Reactor
ที่โหลด 50 % ที่มุมทริก SCR 30°

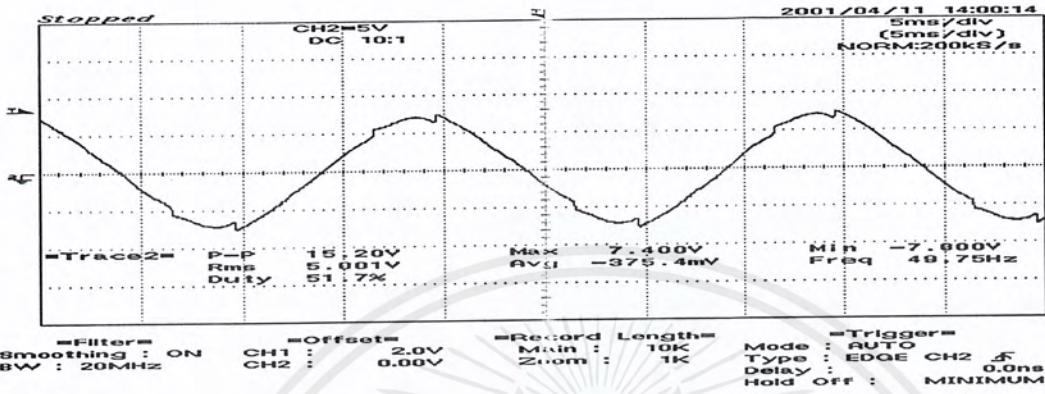
การทดลอง	I (line reactor)			I (filter)			I (line)			V(line-line)		
	(A)			(A)			(A)			(V)		
	Phase			Phase			Phase			Phase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	AB	BC	AC
1.LineReactor +(7 th filter)	9.0	8.9	10.2	9.8	9.5	8.8	6.3	5.1	5.1	106.8	103.6	102.8

การทดลอง	N(rpm)			Torque			DC MOTOR					
	(รอบ/นาที)			(N.m)			V _{dc} (V)			I _{dc} (A)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +(7 th filter)	1946	1945	1944	2.7	2.8	2.7	130	130	130	7.7	7.7	7.7

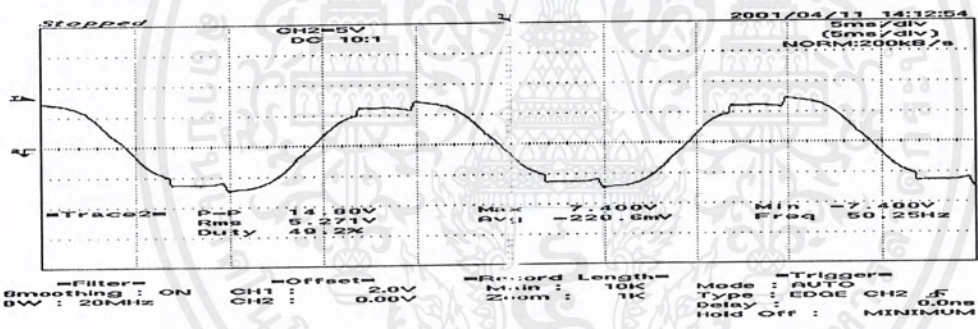
การทดลอง	DC MOTOR						LOAD					
	I _r (A)			I _a (A)			I _{dc} (o/p)(A)			V _{dc} (o/p)		
	ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.LineReactor +(7 th filter)	0.5	0.5	0.5	7.2	7.2	7.2	4.8	4.8	4.8	138.7	138.7	139

*พิกัด GENERATOR : V_r = 80 V : I_r = 0.7 A

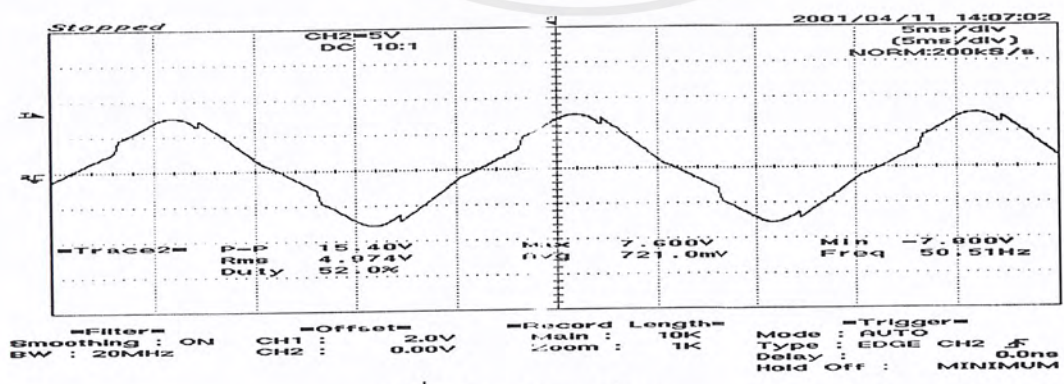
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.82.1 กระแสเฟส A



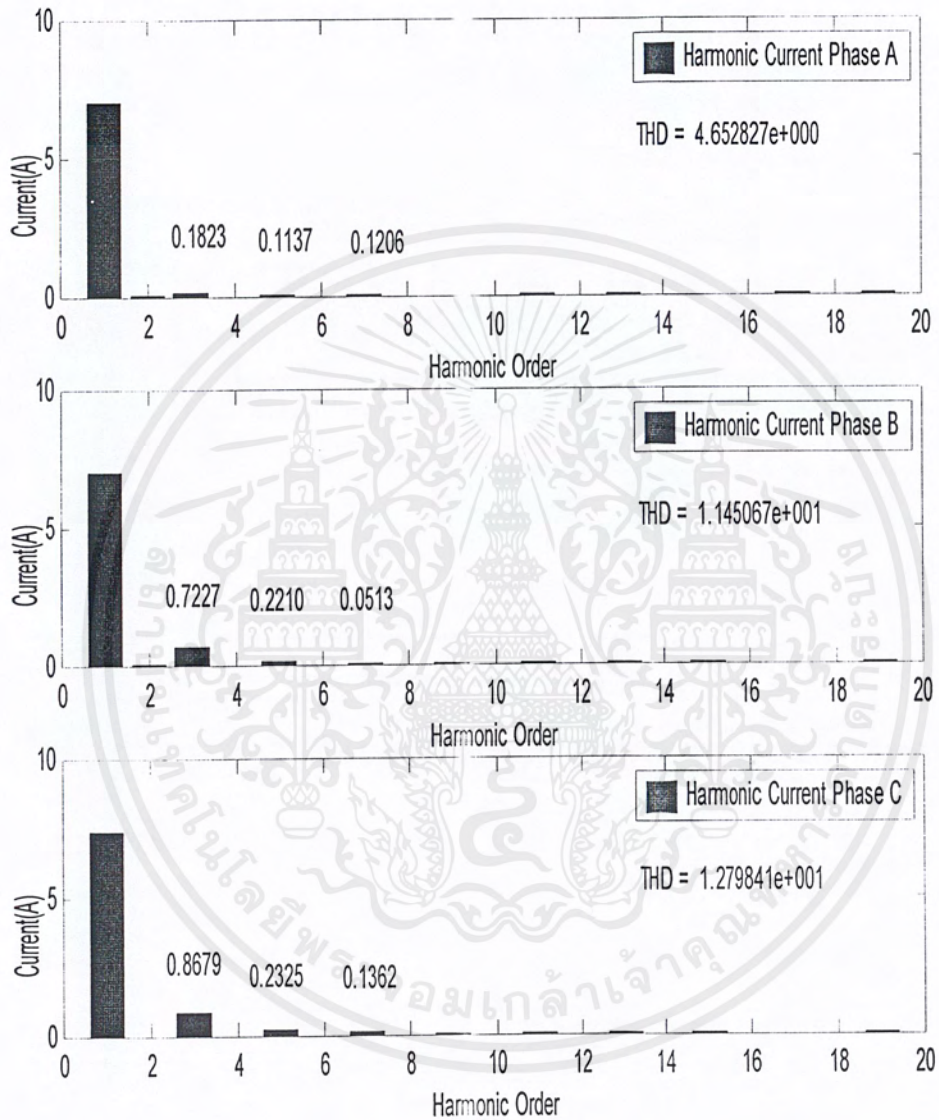
รูปที่ 5.82.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.82.3 กระแสเฟส C

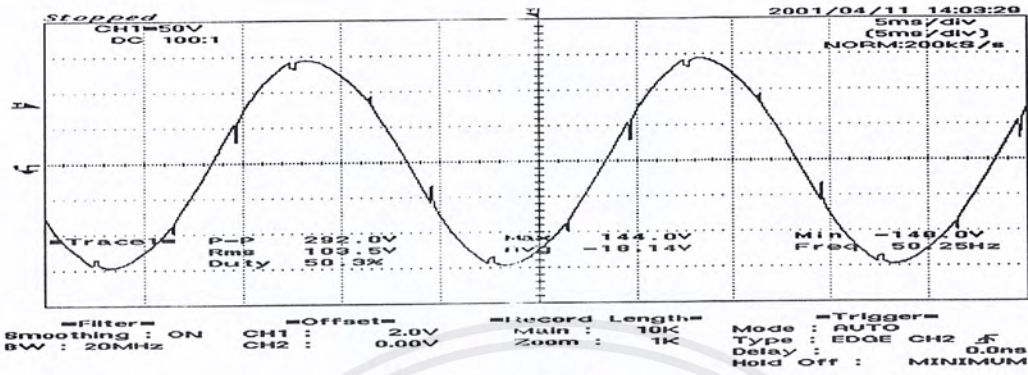
รูปที่ 5.82 กราฟกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลดรีแอกเตอร์ : โหลด 50% : ที่มุมตริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

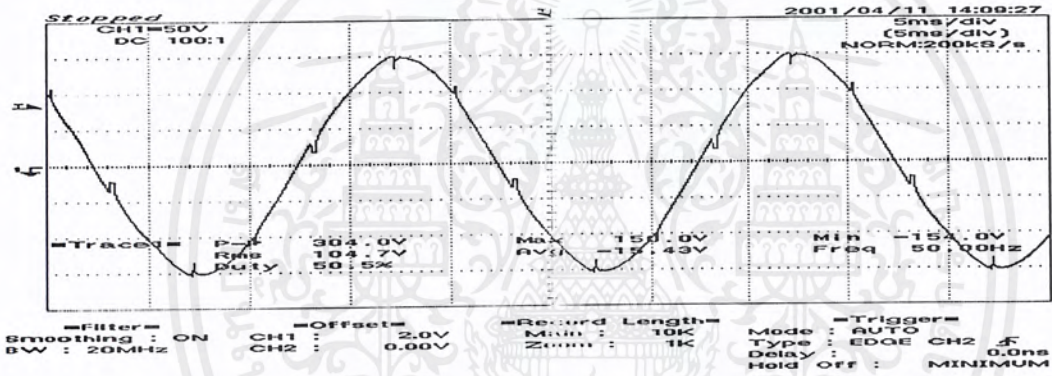


รูปที่ 5.83 กราฟสเปกตรัมกระแสขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลดรีแอกเตอร์ : โหลด 50% : ที่มุมตริก 30°

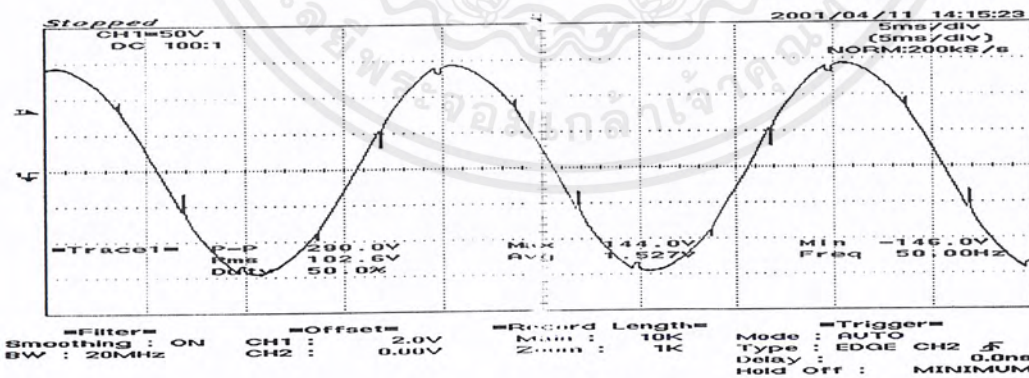
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.84.1 แรงดันเฟส A

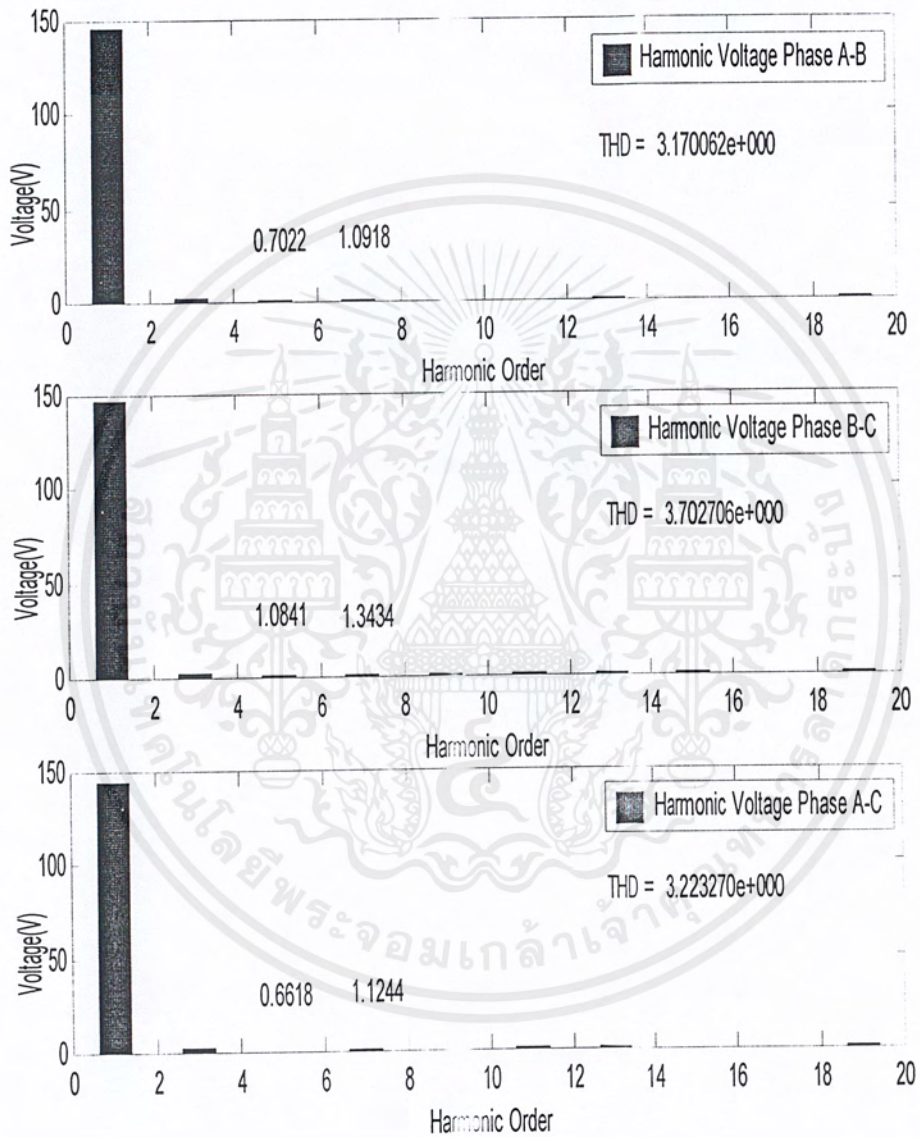


รูปที่ 5.84.2 กระแสเฟส B



รูปที่ 5.84.3 แรงดันเฟส C

รูปที่ 5.84 กราฟแรงดันขณะไ้ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : ไลน์รีแอกเตอร์ : โหลด 50 % : ที่มุม
ทริก 30°



รูปที่ 5.85 กราฟสเปกตรัมแรงดันขณะใส่ : ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 : โหลดรีแอกเตอร์ : โหลด 50%
: ที่มุมทริก 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16.1 แสดง % ของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 : ที่ 50% พิกัด Rated Load : มุมทริก SCR 30°

การทดลอง	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 3(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกกระแส ลำดับที่ 7(%)	THD _i (%)
1.LineReactor+7 th filter	10.25	3.13	0.73	11.50

การทดลอง	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 3(%)	ฮาร์โมนิกแรงดัน ลำดับที่ 5(%)	ฮาร์โมนิกแรง ดันลำดับที่ 7(%)	THD _v (%)
1.LineReactor+7 th filter	0.95	0.47	0.75	3.17

1. เมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์ และตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 7 ที่มุมทริก SCR 30° จะมีผลทำให้กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5,7 และค่า THD ลดลงได้ แต่จะมีผลทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้นมาในระบบเหมือนกับที่ Rated Load

2. เฉพาะที่เฟส B และเฟส C จะเกิดกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 เกิดขึ้นมาอย่างเด่นชัดกว่าเฟส A เช่นเดียวกับที่พิกัด Rated Load

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก
2. หลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงฮาร์มอนิกที่เกิดจาก 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองพบว่า 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ที่จำลองขึ้นมา สามารถขับคิซิมอเตอร์ได้โดยอยู่ในช่วงมุมจุดชนวนเกด (มุมทริก) $0^\circ - 90^\circ$ และ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เป็นไปตามสมการคุณลักษณะ $n = pk \pm 1$ คือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ 5,7,11,13,17,19,... แต่จะเป็นเช่นนี้เฉพาะช่วงมุมจุดชนวนเกดระหว่าง $0^\circ - 30^\circ$ เท่านั้น เมื่อมุมจุดชนวนเกดมากกว่า 30° ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามสมการคุณลักษณะ คือ มีฮาร์มอนิกอื่นเด่นชัดออกมาด้วย เช่น ฮาร์มอนิกที่ 3 และในช่วงนี้เกิดการไม่สมดุลย์ของกระแสทั้ง 3 เฟสอีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้อาจจะเนื่องมาจากวงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นมา ในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนเกดยังไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อปรับมุมจุดชนวนเกดมากกว่า 30° อาจจะมีสัญญาณรบกวนไปทำให้สร้างสัญญาณพัลส์ผิดเพี้ยนไป ส่งผลให้วงจร 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ไม่ถูกต้อง

- 2) หลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาว่าตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้หรือไม่ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- การใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 , การใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 และการใส่ทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ขนานกัน เข้าไปในระบบสามารถลดฮาร์มอนิกลงได้ โดยสามารถลดได้ทั้งกระแสฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิก และค่า THD ซึ่งกรณีที่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด คือ การใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 ร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะดึงกระแสเข้าระบบมากเกินไป

- เมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์ร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกพบว่า สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกแรงดันฮาร์มอนิก และค่า THD ลงได้ดีกว่าการใส่เฉพาะตัวกรองฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว
- ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกนั้นได้ออกแบบจากการใช้งาน 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ที่มุมจุดชนวนเกด 0° ขั้วโหลดที่พิกัดของมอเตอร์ และเมื่อนำตัวกรองฮาร์มอนิกไปใช้ที่มุมจุดชนวนเกด 30° พบว่าสามารถลดฮาร์มอนิกลงได้
- เมื่อนำตัวกรองฮาร์มอนิกไปใช้ในสภาวะการขั้วโหลด 50 % ของพิกัดของมอเตอร์ก็พบว่าสามารถลดฮาร์มอนิกลงได้เช่นเดียวกัน

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้ออกแบบขึ้นนั้น สามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบได้ โดยสามารถลดได้ทั้งกระแสฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิก และค่า THD แต่ผลการทดลองที่ได้ยังไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ถึงแม้ว่าตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบนั้นสามารถลดกระแสฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิก และค่า THD ลงได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงกระแสที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกพบว่า กระแสไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากเกินไป

ระบบที่จำลองขึ้นมายังไม่สามารถใช้งานได้จริงในระบบไฟฟ้า เนื่องจากการทดลองใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสป้อนเข้า 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์เพียงประมาณ 100 โวลต์ และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้าดีซีมอเตอร์ให้คงที่ 130 โวลต์ เมื่อปรับมุมจุดชนวนเกดเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุทของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไป แต่ในระบบไฟฟ้าจริงนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุทจะคงที่ 380 โวลต์

6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์และเครื่องมือในการวัดฮาร์มอนิกโดยตรง ต้องใช้การบันทึกรูป

กระแสและแรงดันจากดิจิตอลออสซิลโลสโคป แล้วใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของฮาร์มอนิก ซึ่งยุ่งยากและใช้เวลานาน ถ้าเป็นไปได้ควรจัดหาเครื่องมือที่สามารถวัดฮาร์มอนิกได้โดยตรงจะเป็นการทุ่นเวลาได้มาก

- เนื่องจากไม่ได้ทำเครื่องวัดสัญญาณกระแสขึ้นมาเอง ต้องใช้ของส่วนกลาง ทำให้เสียเวลาในการรอของ และเครื่องวัดสัญญาณกระแสที่ใช้มีข้อจำกัด คือ สามารถวัดได้เพียง 15 A จึงไม่สามารถทำการทดลองที่กระแสเกินกว่านี้ได้ จึงควรจะทำเครื่องวัดสัญญาณกระแสขึ้นมาเอง (ดูรายละเอียดในภาคผนวก)
- ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ไม่สามารถปรับค่าได้ จึงต้องใช้การปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ทำให้ออกแบบได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงควรใช้ตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าได้

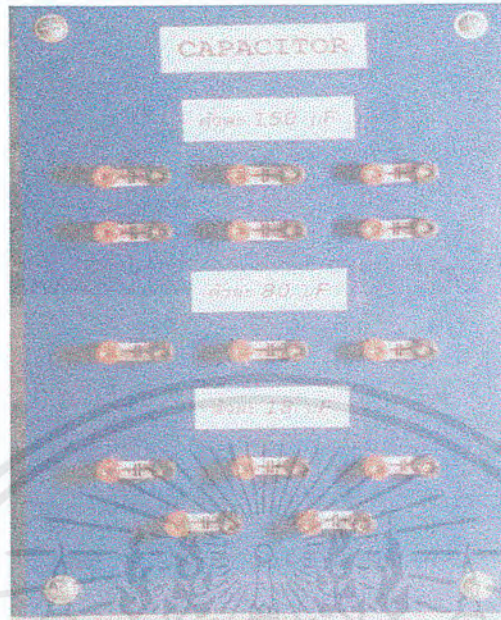
6.4 แนวทางในการดำเนินงานต่อไป

1. ในส่วนวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนเกิดของ 6 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ควรพัฒนาให้สามารถใช้ได้ในทุกช่วงของการใช้งาน
2. ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในตัวกรองฮาร์มอนิกควรทำให้สามารถปรับค่าได้ หรือทำหลายๆค่าเพื่อที่จะสามารถทดลองปรับเปลี่ยนให้ได้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด
3. ควรทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกโดยให้กระแสไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกไม่มากเกินไป
4. ควรพัฒนาระบบให้ใช้ได้จริงกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์

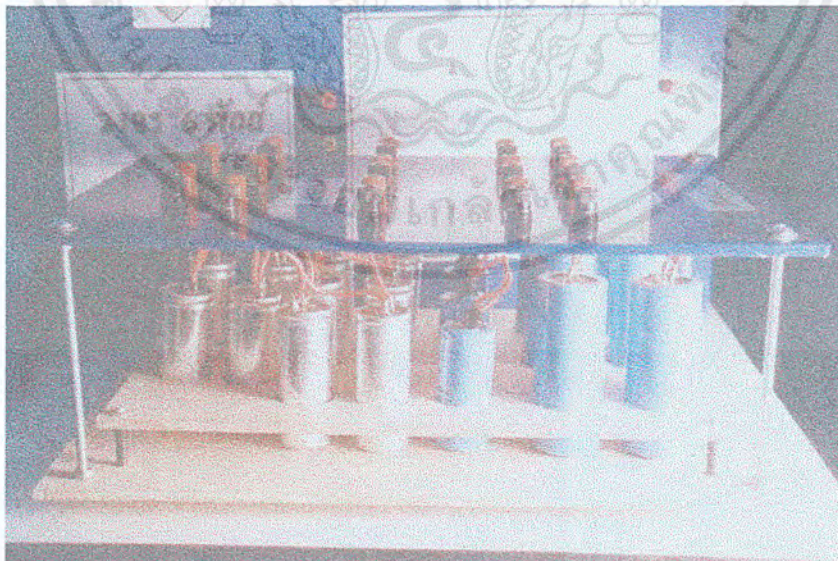
The seal of the National Library of Thailand is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered stupas or pagodas, flanked by ornate floral and scrollwork patterns. The entire design is enclosed within a circular border containing Thai text. The text at the top reads "สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) and the text at the bottom reads "หอสมุดแห่งชาติ" (National Library).

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปด้านหน้าของชุดตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก

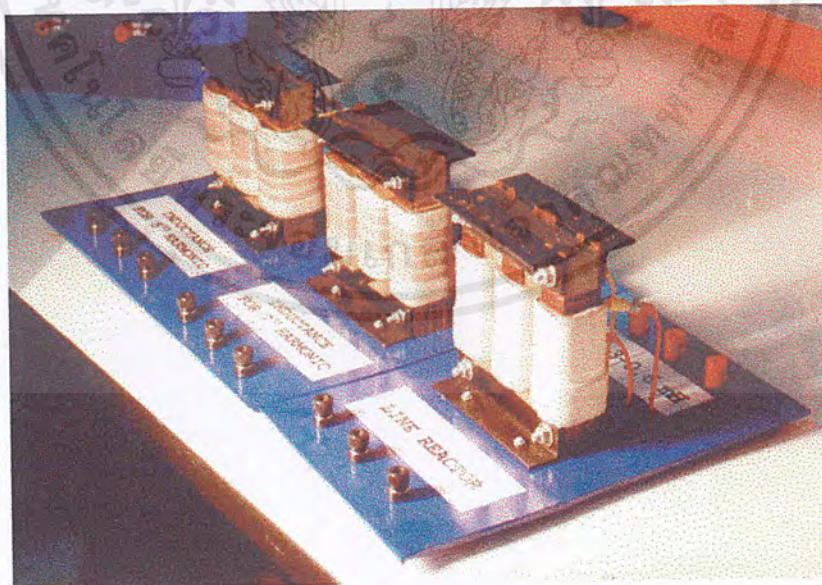


รูปด้านข้างของชุดตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

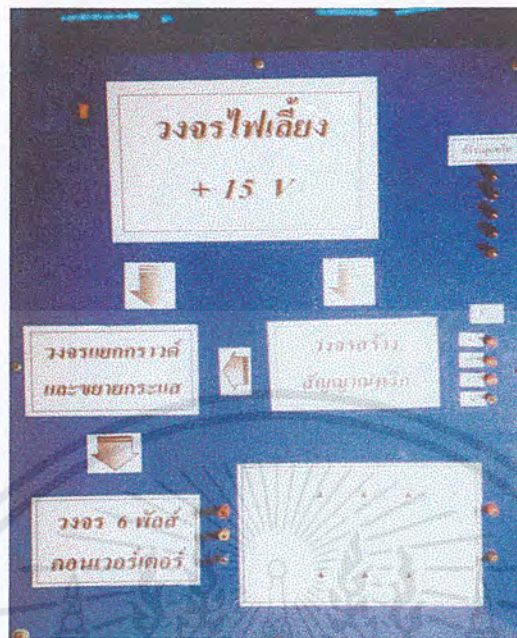


รูปแสดงตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก



รูปแสดงตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5, 7 และ ไลน์รีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

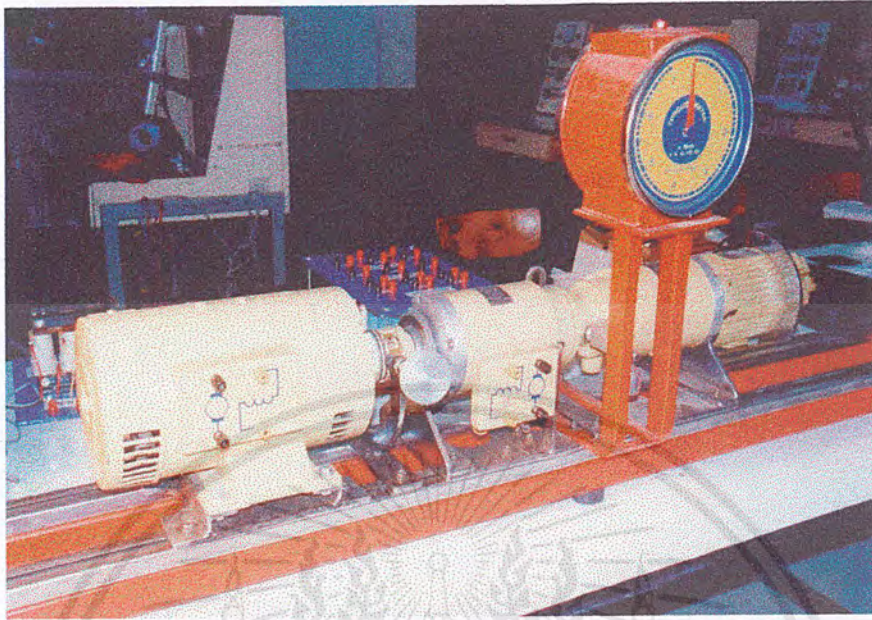


รูปชุดทดลองของวงจร 6-Pulse Converter ด้านหน้า

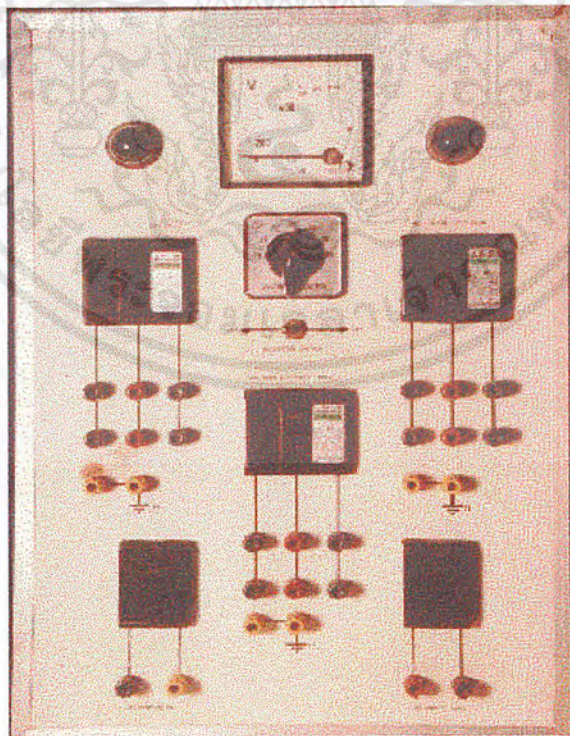


รูปแสดงแผงหลอดไฟที่ใช้เป็นโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงชุดของคีมอเตอร์และคีมอเตอร์ที่ใช้ในการขับโหลด



รูปแสดงแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส 380 โวลต์และ 1 เฟส 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

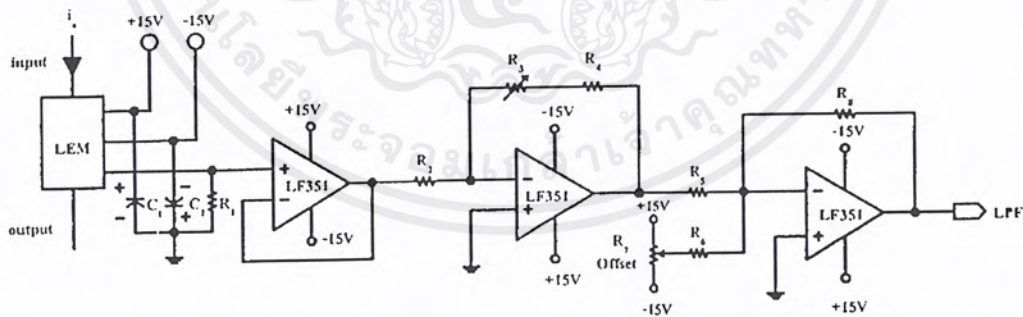
การวัดสัญญาณกระแส

ข้อมูลของสัญญาณกระแสถือได้ว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากว่าฮาร์มอนิกกระแสเป็นสิ่งที่เราพิจารณาเป็นอันดับแรกในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดข้อมูลสัญญาณกระแสจะต้องไม่มีผลต่อสัญญาณกระแสที่วัดได้หรือมีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด

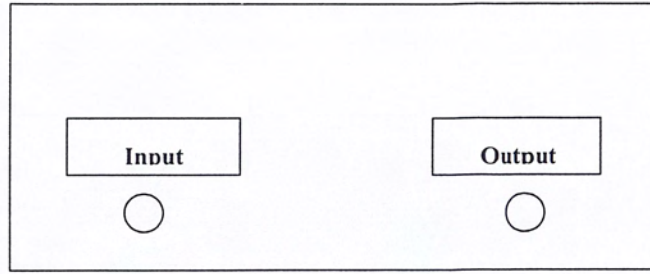
วงจรตรวจจับกระแส

วงจรที่จะใช้ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสในที่นี้ได้ใช้ LEM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ hall-effect เนื่องจากมีข้อดีกว่าหม้อแปลงกระแส (current transformer) คือสามารถตรวจจับได้ทั้งรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ตอบสนองความถี่สูงได้ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ได้มีค่าต่ำ มีให้เลือกใช้ได้หลายขนาดและใช้งานง่าย ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ LEM เพื่อตรวจจับกระแสไลน์ในแต่ละเฟส (I_a, I_b, I_c) เพื่อนำสัญญาณกระแสมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้งาน LEM จะต้องมีวงจรสนับสนุนการทำงานด้วย เช่น แหล่งจ่ายไฟคิซีขนาด $\pm 15V$ วงจรบัฟเฟอร์เพื่อทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสูงขึ้นและวงจรปรับค่าออฟเซตสัญญาณ

ส่วนประกอบของวงจรตรวจจับกระแส ตาม รูปที่ 1



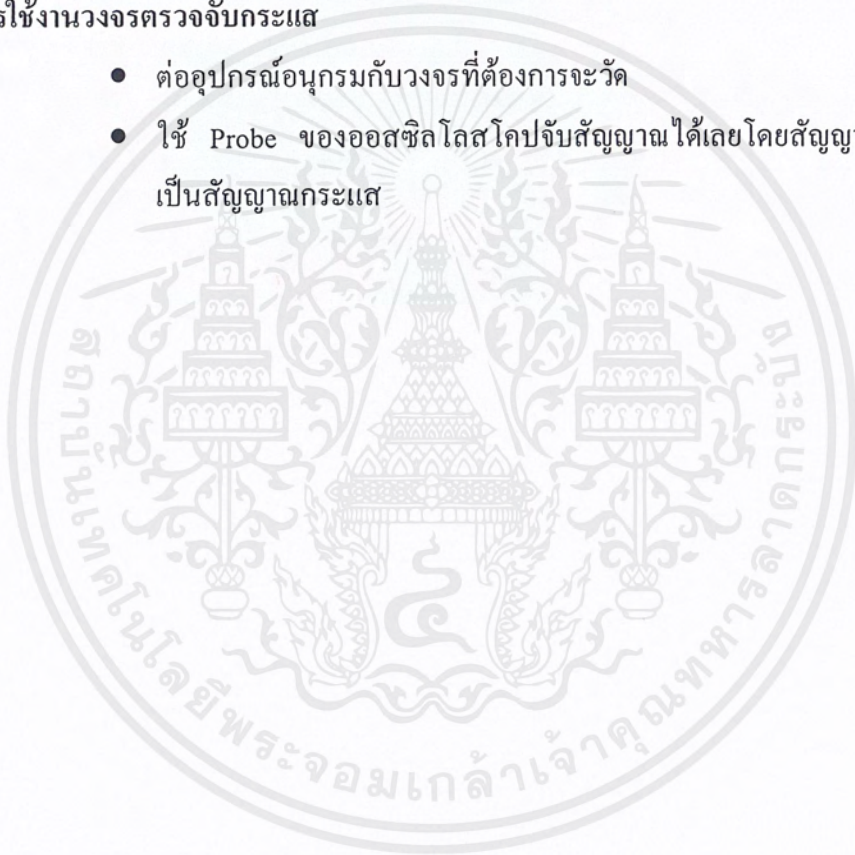
รูปที่ 1 วงจรตรวจจับกระแส



รูปแสดงตัวตรวจจับกระแจากภายนอก (LEM)

การใช้งานวงจรตรวจจับกระแส

- ต่ออุปกรณ์อนุกรมกับวงจรที่ต้องการจะวัด
- ใช้ Probe ของออสซิลโลสโคปจับสัญญาณได้เลยโดยสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณกระแส



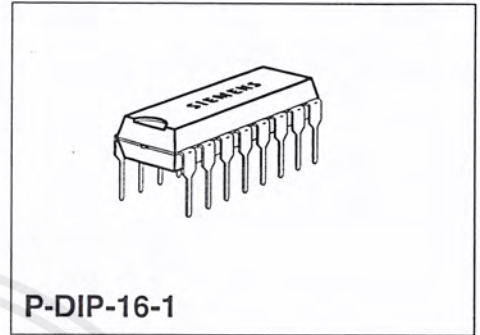
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

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

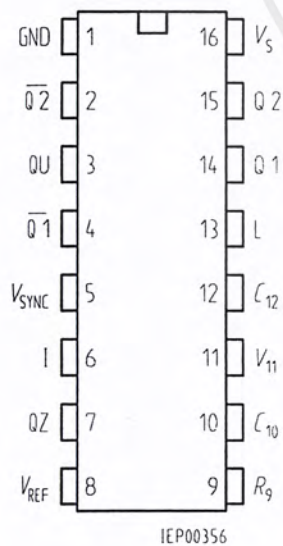


Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

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

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

Pin Definitions and Functions



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

Pin Configuration

(top view)

Functional Description

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

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

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

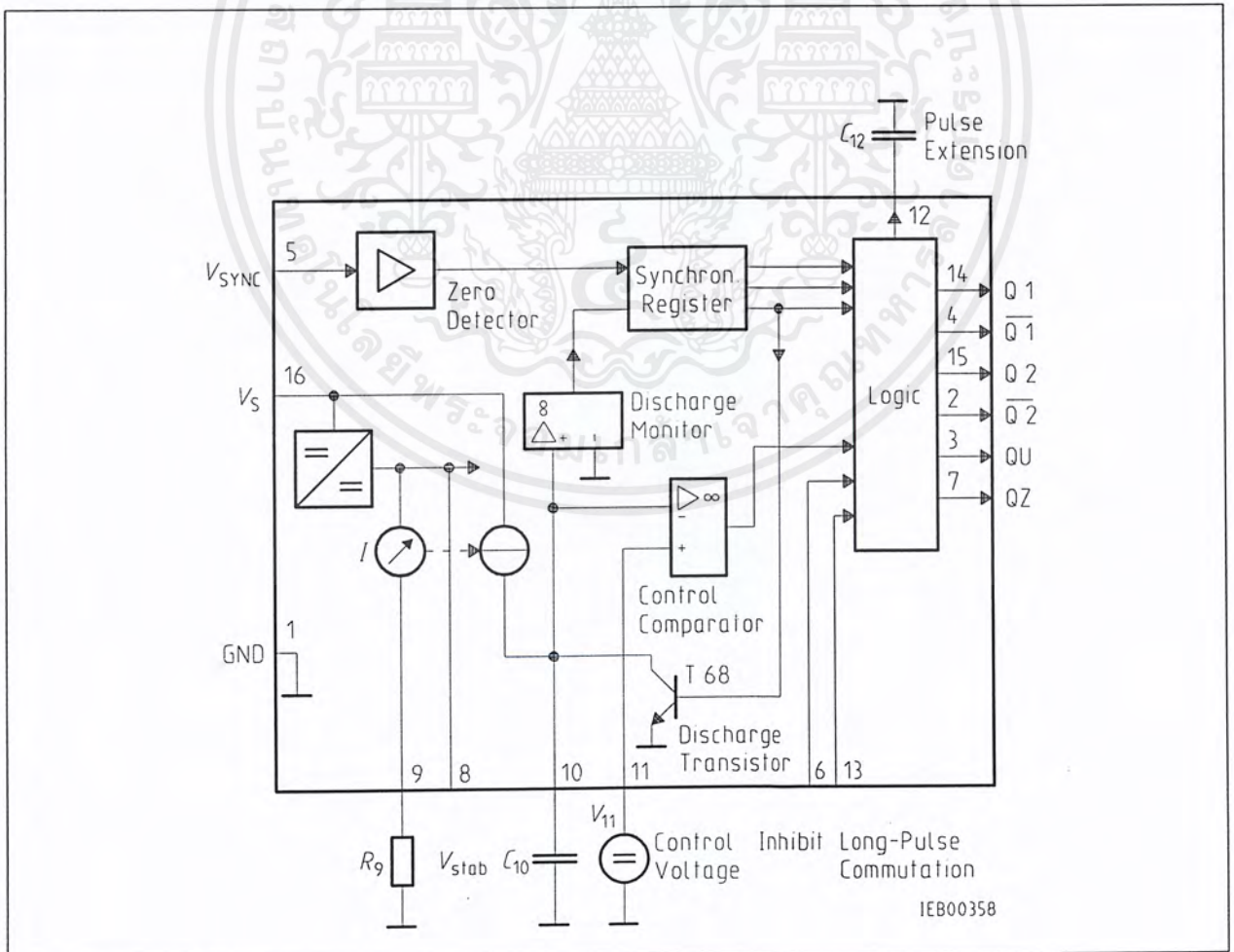
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

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

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

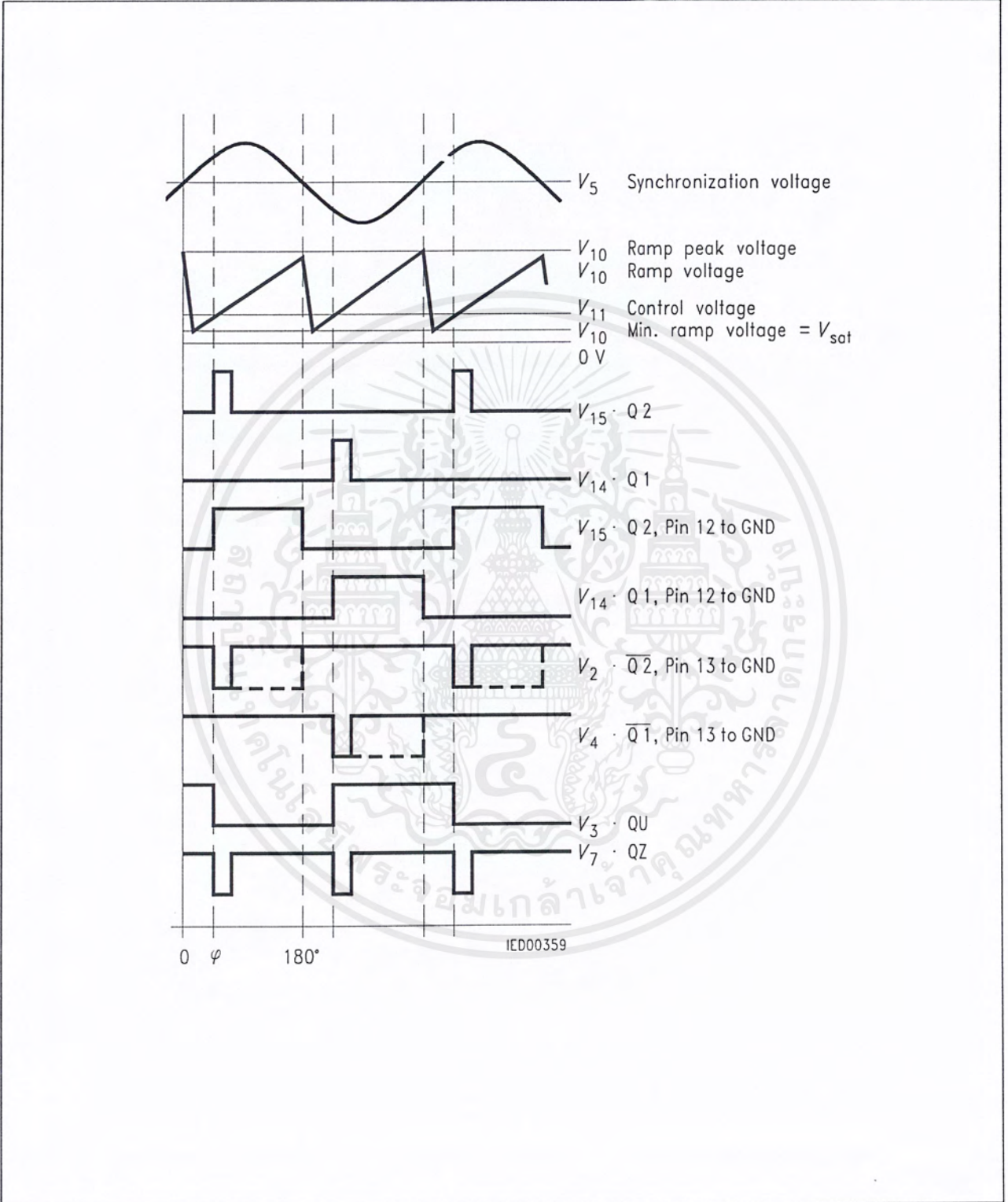
The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and $\overline{Q1}$, $\overline{Q2}$.

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



Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Semiconductor Group ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pulse Diagram

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	V_s	- 0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	I_Q	- 10	400	mA
Inhibit voltage	V_6	- 0.5	V_s	V
Control voltage	V_{11}	- 0.5	V_s	V
Voltage short-pulse circuit	V_{13}	- 0.5	V_s	V
Synchronization input current	V_5	- 200	± 200	μA
Output voltage at pin 14, 15	V_Q		V_s	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	I_Q		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	V_Q		V_s	V
Junction temperature	T_j		150	$^{\circ}C$
Storage temperature	T_{stg}	- 55	125	$^{\circ}C$
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

Operating Range

Supply voltage	V_s	8	18	V
Operating frequency	f	10	500	Hz
Ambient temperature	T_A	- 25	85	$^{\circ}C$

Characteristics

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

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 V$ $C_{10} = 47 \text{ nF}$; $R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	I_s	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current R_2 varied	$I_{5 rms}$	30		200	μA	1
Offset voltage	ΔV_5		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range Input resistance	V_{11} R_{11}	0.2	15	$V_{10 peak}$	V $k\Omega$	1 5

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics (cont'd)

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

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator						
Charge current	I_{10}	10		1000	μA	
Max. ramp voltage	V_{10}			$V_2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	V_{10}	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	R_9	3		300	$\text{k}\Omega$	1
Sawtooth return time	t_r		80		μs	1
Inhibit pin 6						
switch-over of pin 7						
Outputs disabled	V_{6L}		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	V_{6H}	4	3.3		V	1
Signal transition time	t_r	1		5	μs	1
Input current	I_{6H}		500	800	μA	1
$V_6 = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{6L}$	80	150	200	μA	1
$V_6 = 1.7 \text{ V}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-5		5	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 12 \text{ V}; C_{10} = 47 \text{ nF}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-20		20	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$						
Deviation of the ramp voltage						
between 2 following						
half-waves, $V_s = \text{const.}$	$\Delta V_{10 \text{ max}}$		± 1		%	
Long pulse switch-over						
pin 13						
switch-over of S8						
Short pulse at output	V_{13H}	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	V_{13L}		2.5	2	V	1
Input current	I_{13H}			10	μA	1
$V_{13} = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{13L}$	45	65	100	μA	1
$V_{13} = 1.7 \text{ V}$						
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current	I_{CEO}			10	μA	2.6
$V_0 = V_s$						
Saturation voltage	V_{sat}	0.1	0.4	2	V	2.6
$I_0 = 2 \text{ mA}$						

Characteristics (cont'd)
 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

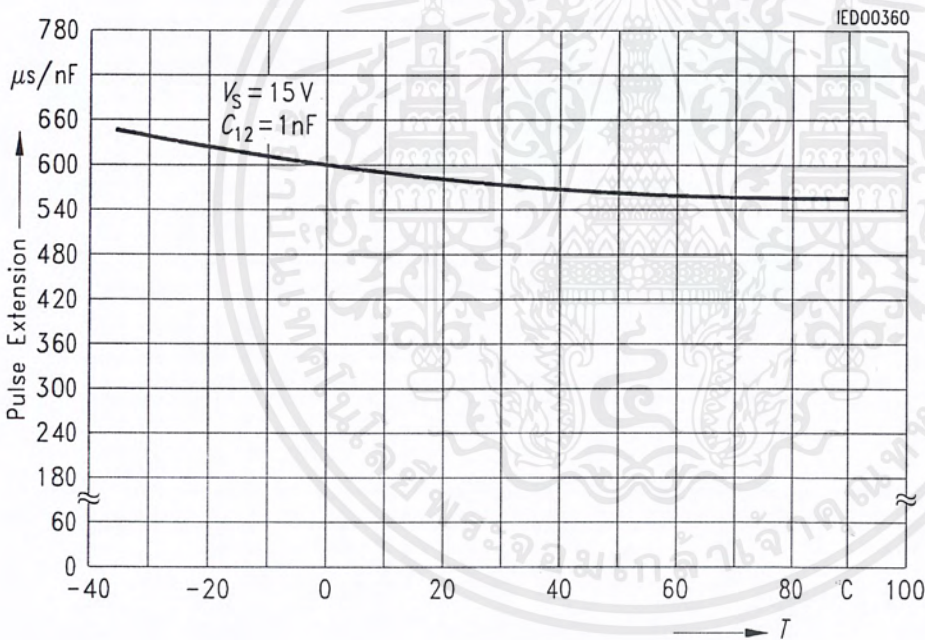
Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15 H-output voltage $-I_Q = 250 \text{ mA}$	$V_{14/15H}$	$V_s - 3$	$V_s - 2.5$	$V_s - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_Q = 2 \text{ mA}$	$V_{14/15L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	t_p	20	30	40	μs	1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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints for External Components

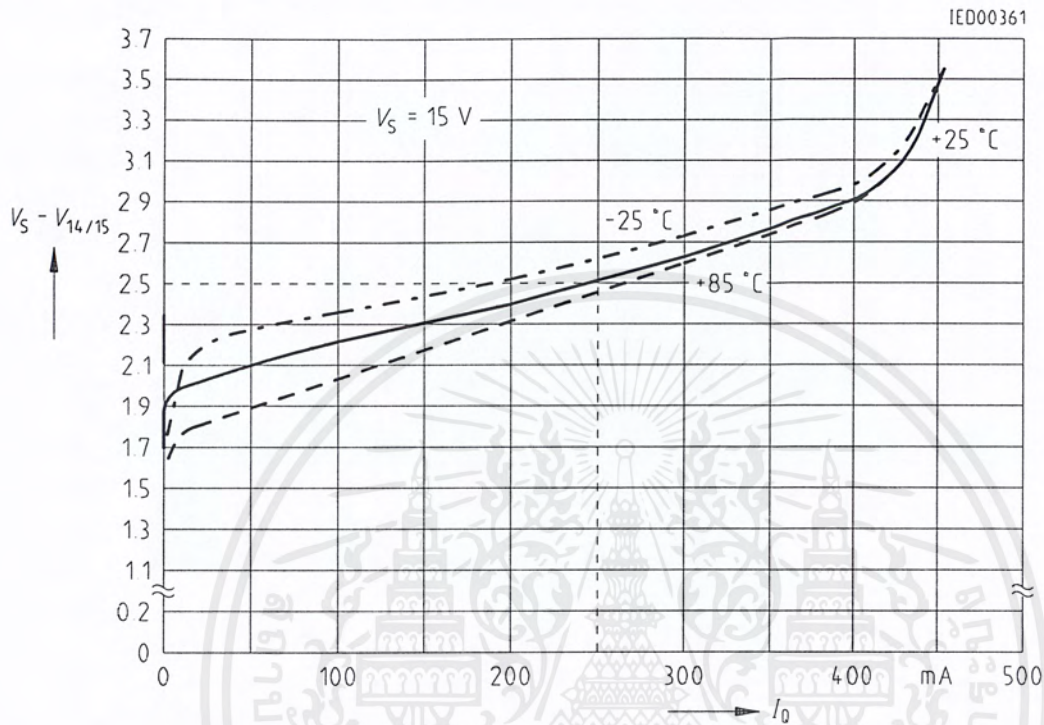
		min		max	
Ramp capacitance	C_{10}	500 pF		$1 \mu F^1)$	The minimum and maximum values of I_{10} are to be observed
Triggering point	$t_{Tr} =$	$\frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K}$		2)	
Charge current	$I_{10} =$	$\frac{V_{REF} \times K}{R_9}$		2)	Ramp voltage $V_{10 \max} = V_S - 2 V$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}}$ 2)

Pulse Extension versus Temperature

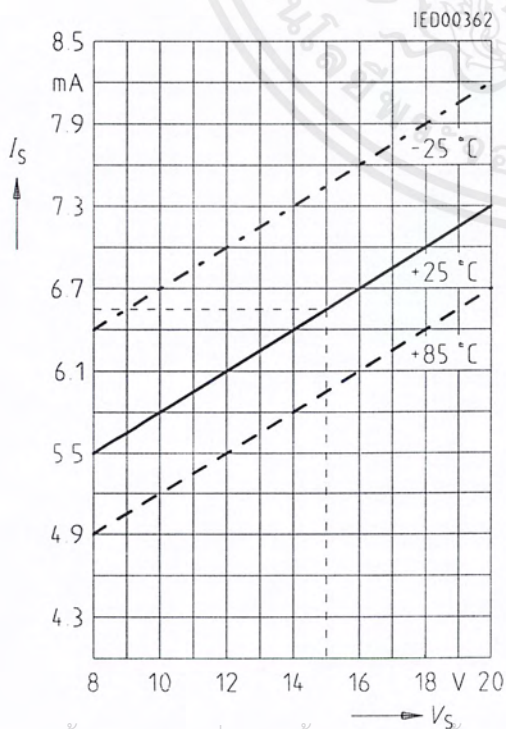


1) Attention to flyback times
 2) $K = 1.10 \pm 20 \%$

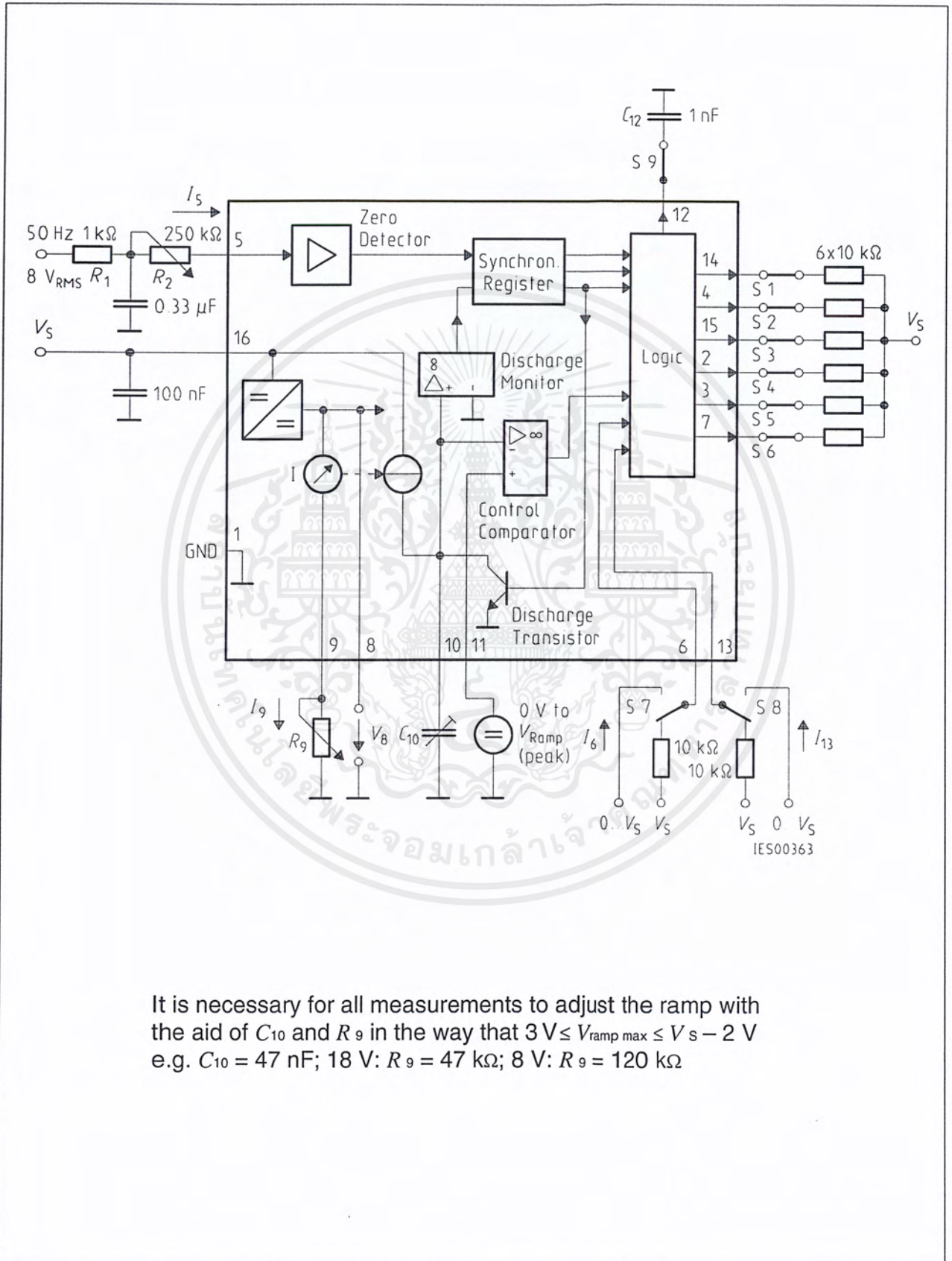
Output Voltage measured to + V_S



Supply Current versus Supply Voltage



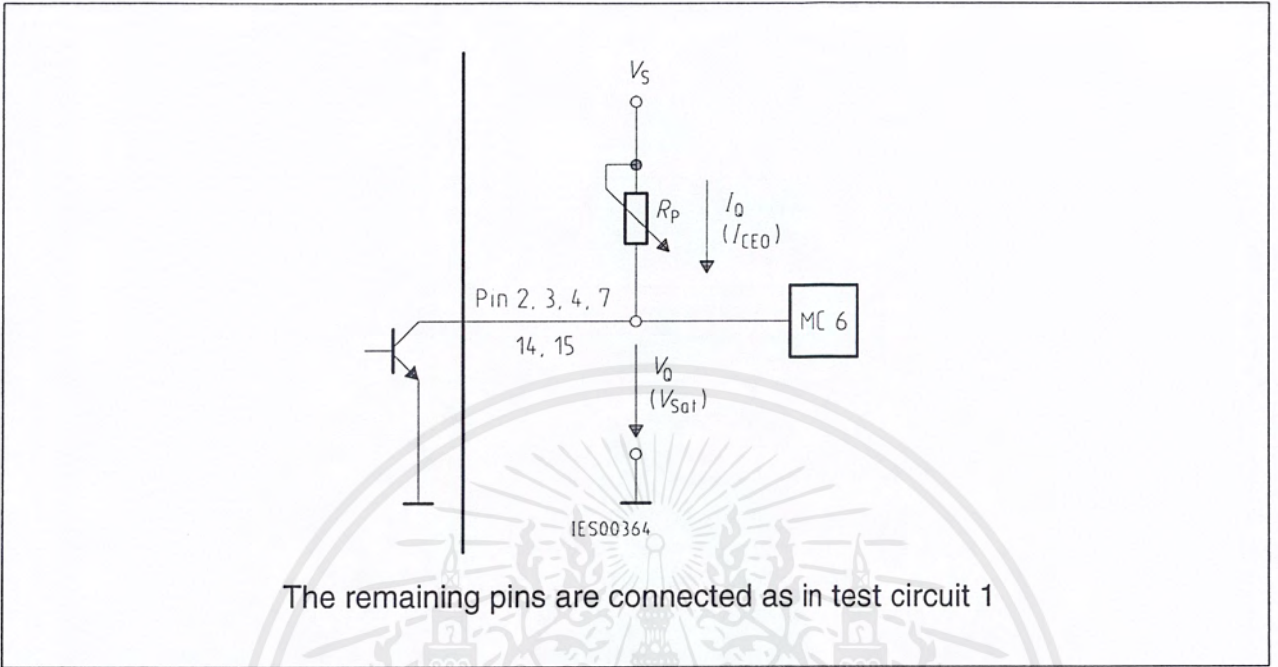
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



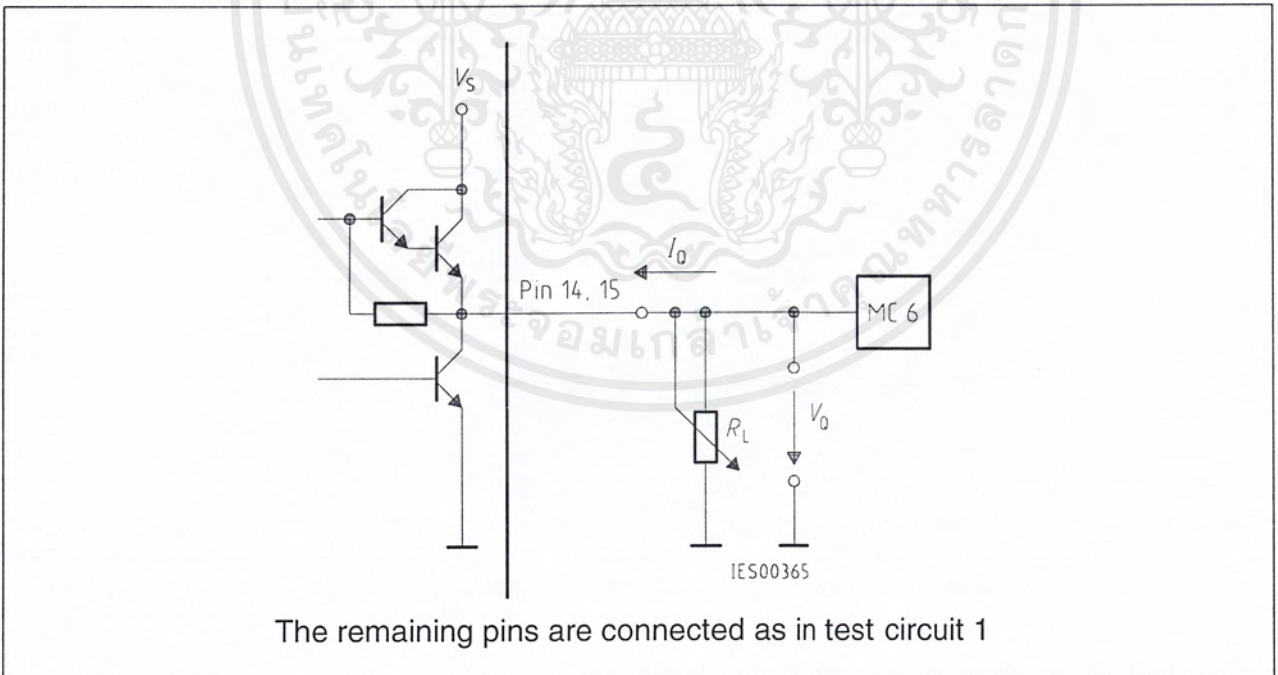
It is necessary for all measurements to adjust the ramp with the aid of C_{10} and R_9 in the way that $3\text{ V} \leq V_{ramp\ max} \leq V_s - 2\text{ V}$ e.g. $C_{10} = 47\text{ nF}$; 18 V : $R_9 = 47\text{ k}\Omega$; 8 V : $R_9 = 120\text{ k}\Omega$

Test Circuit 1 เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

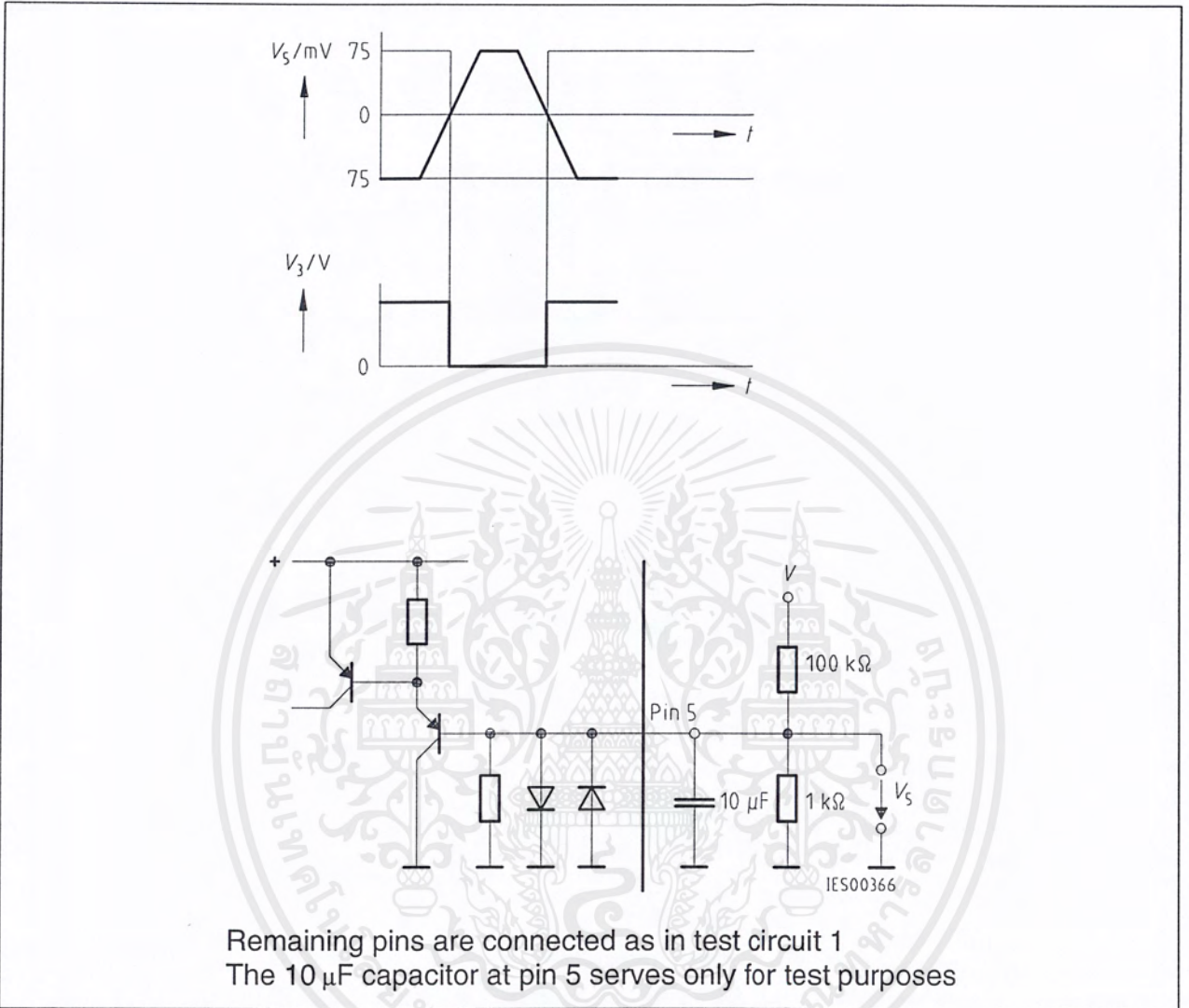
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



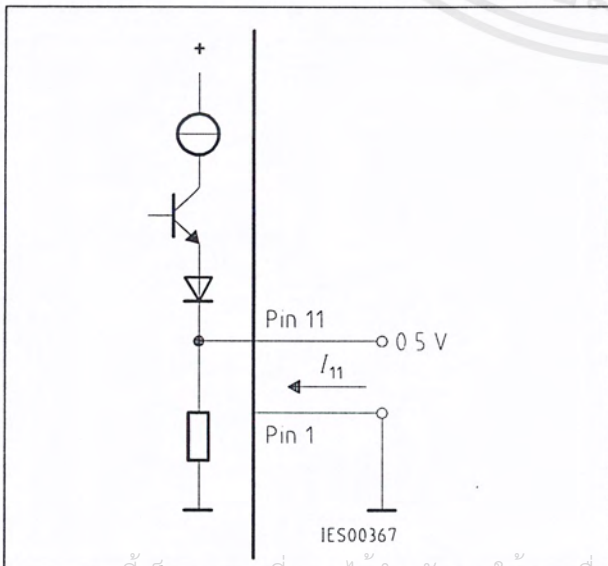
Test Circuit 2



Test Circuit 3

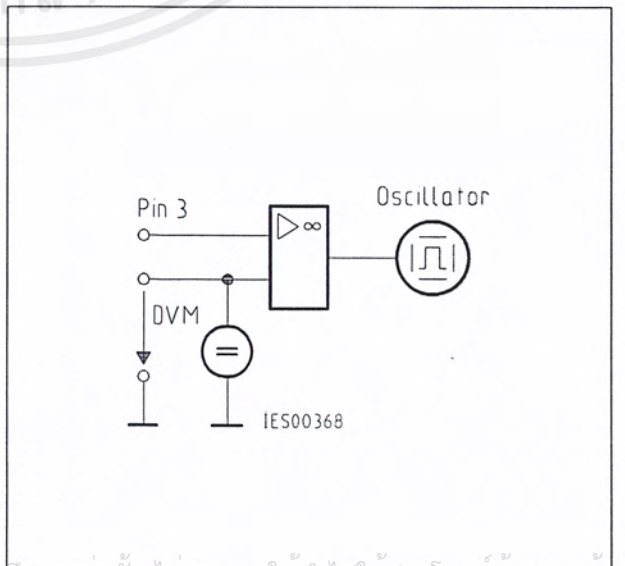


Test Circuit 4



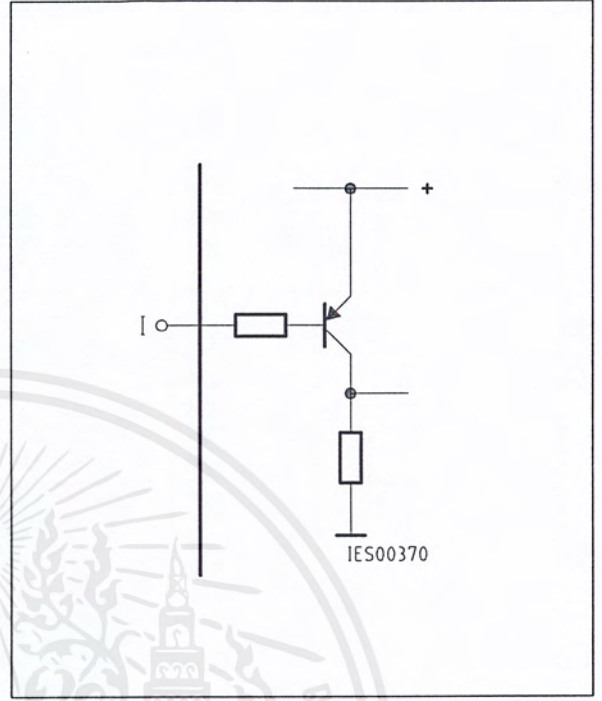
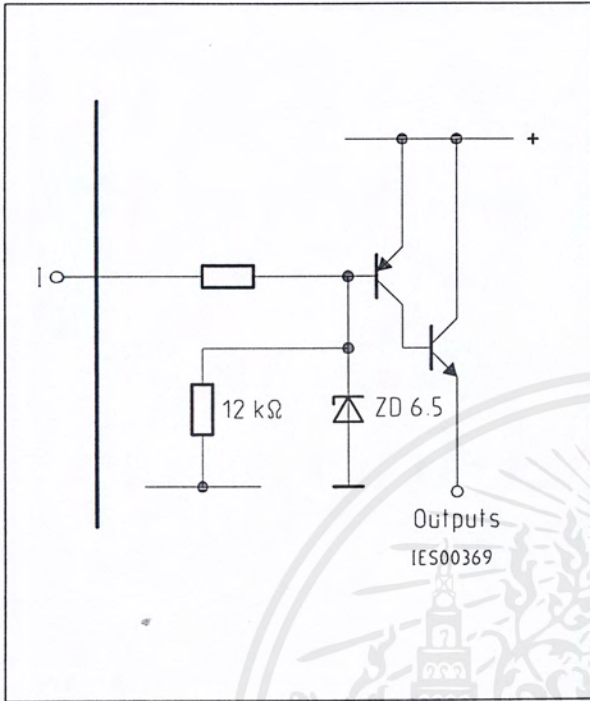
Test Circuit 5

Semiconductor Group



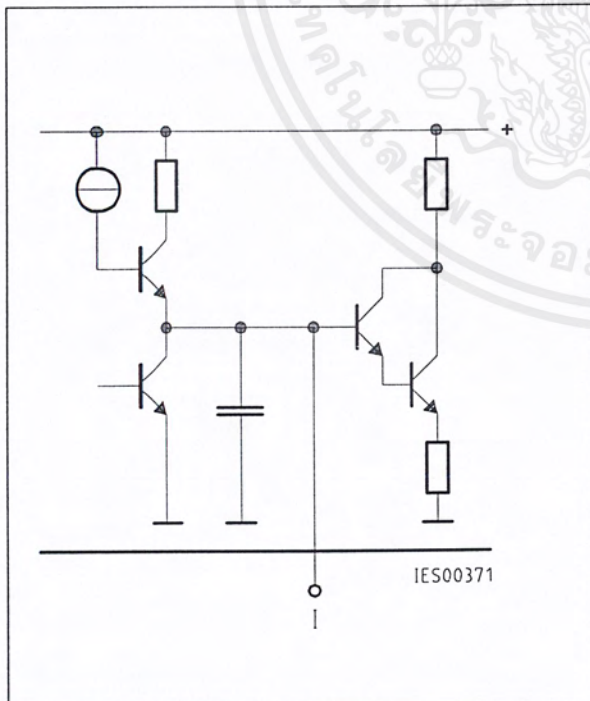
Test Circuit 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

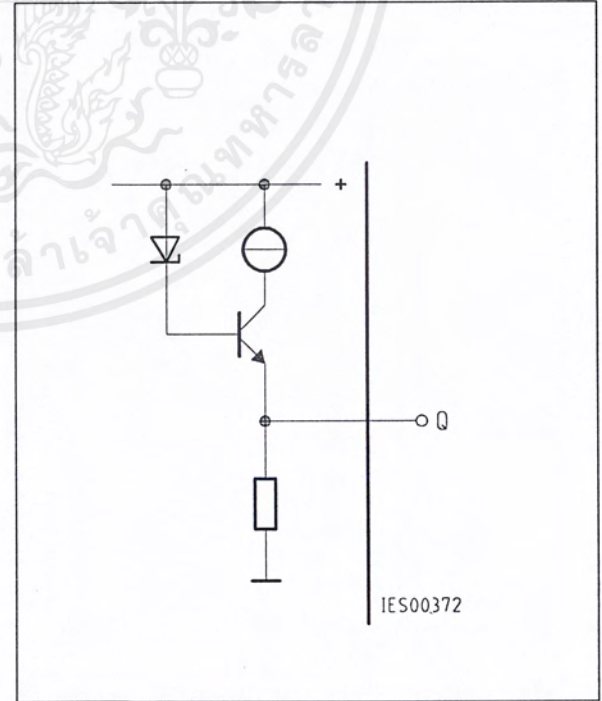


Inhibit 6

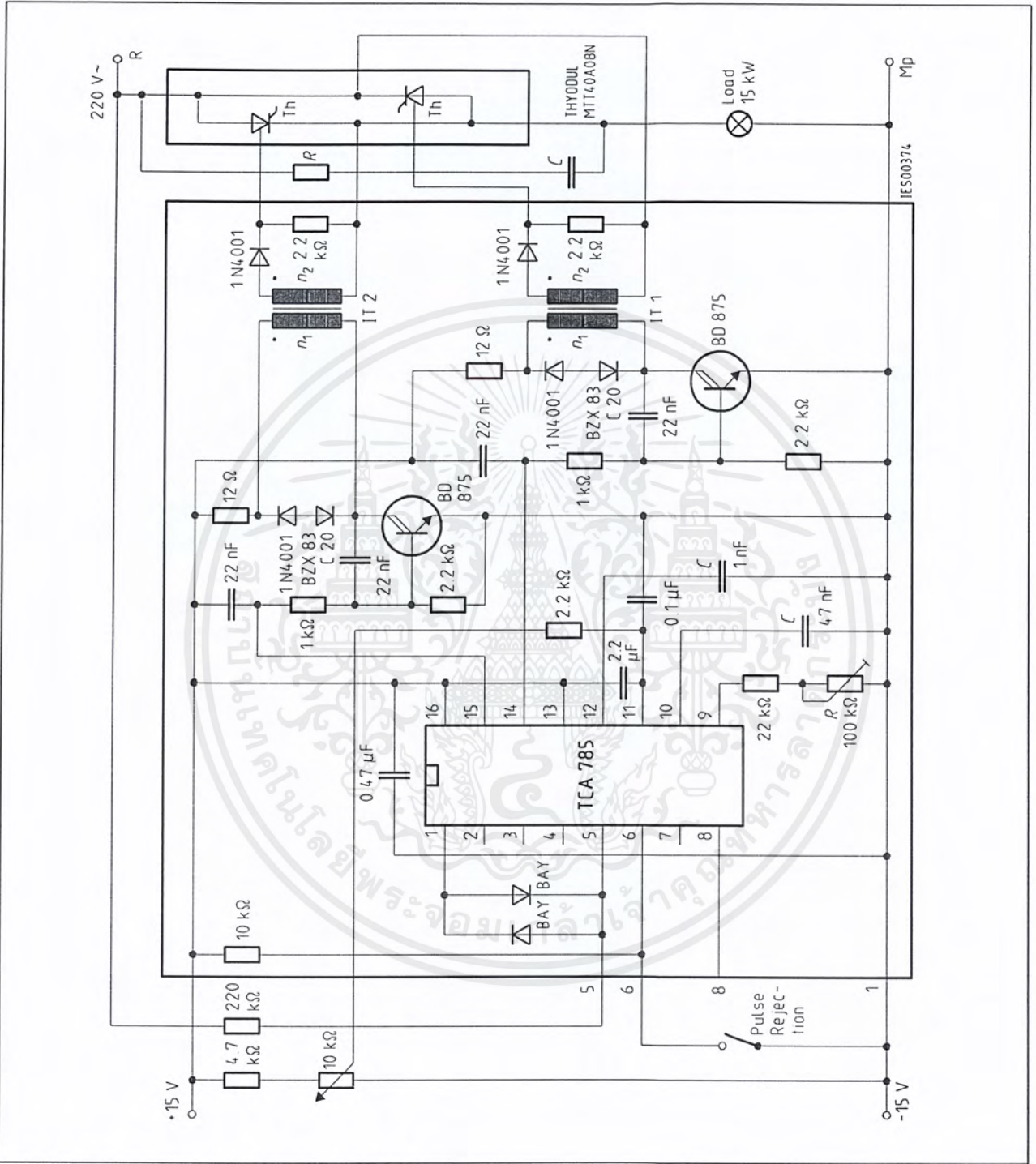
Long Pulse 13



Pulse Extension 12



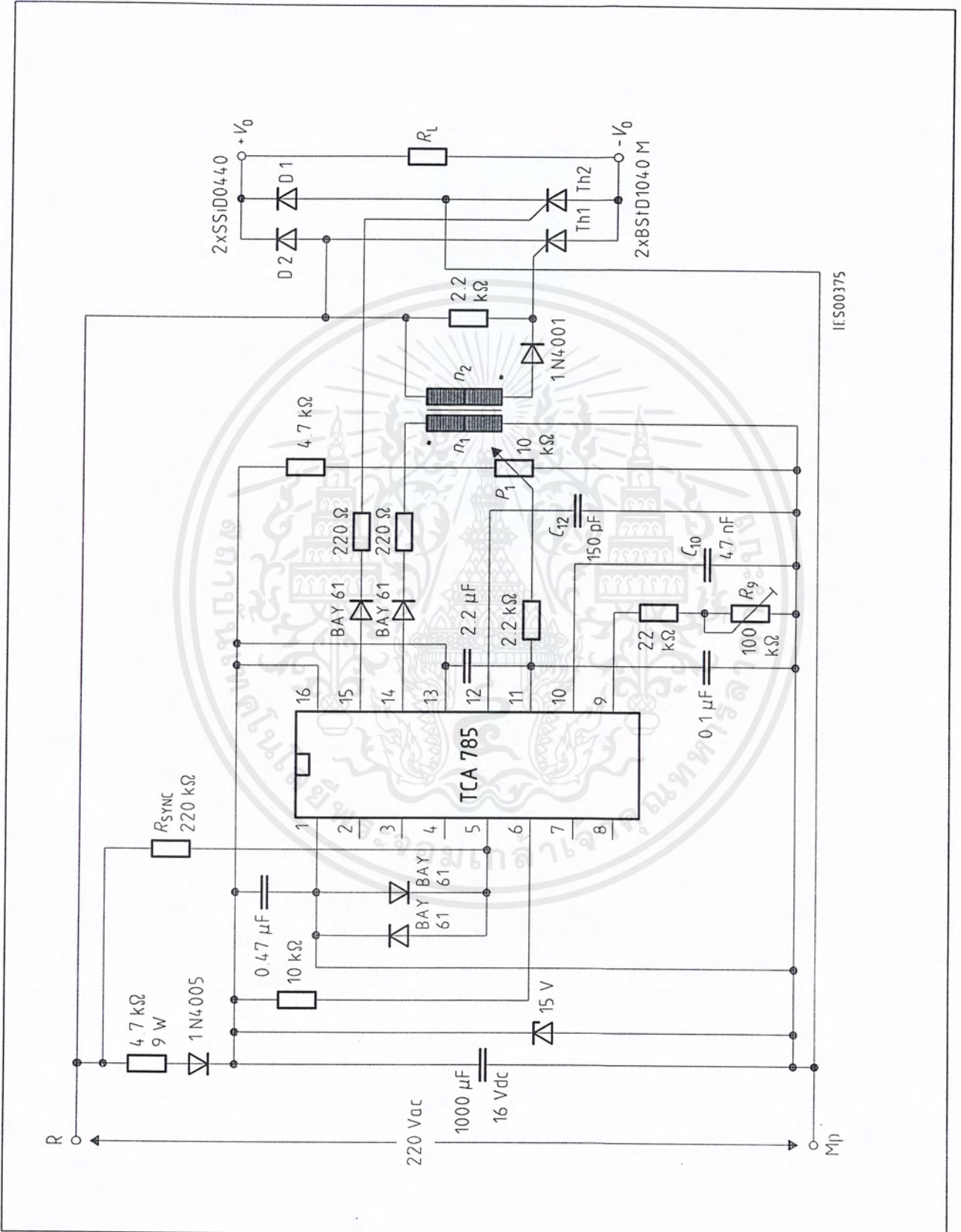
Reference Voltage 8



**Fully Controlled AC Power Controller
Circuit for Two High-Power Thyristors**

Shown is the possibility to trigger two antiparalleled thyristors with one IC TCA 785. The trigger pulse can be shifted continuously within a phase angle between 0° and 180° by means of a potentiometer. During the negative line half-wave the trigger pulse of pin 14 is fed to the relevant thyristor via a trigger pulse transformer. During the positive line half-wave, the gate of the second thyristor is triggered by a trigger pulse transformer at pin 15.

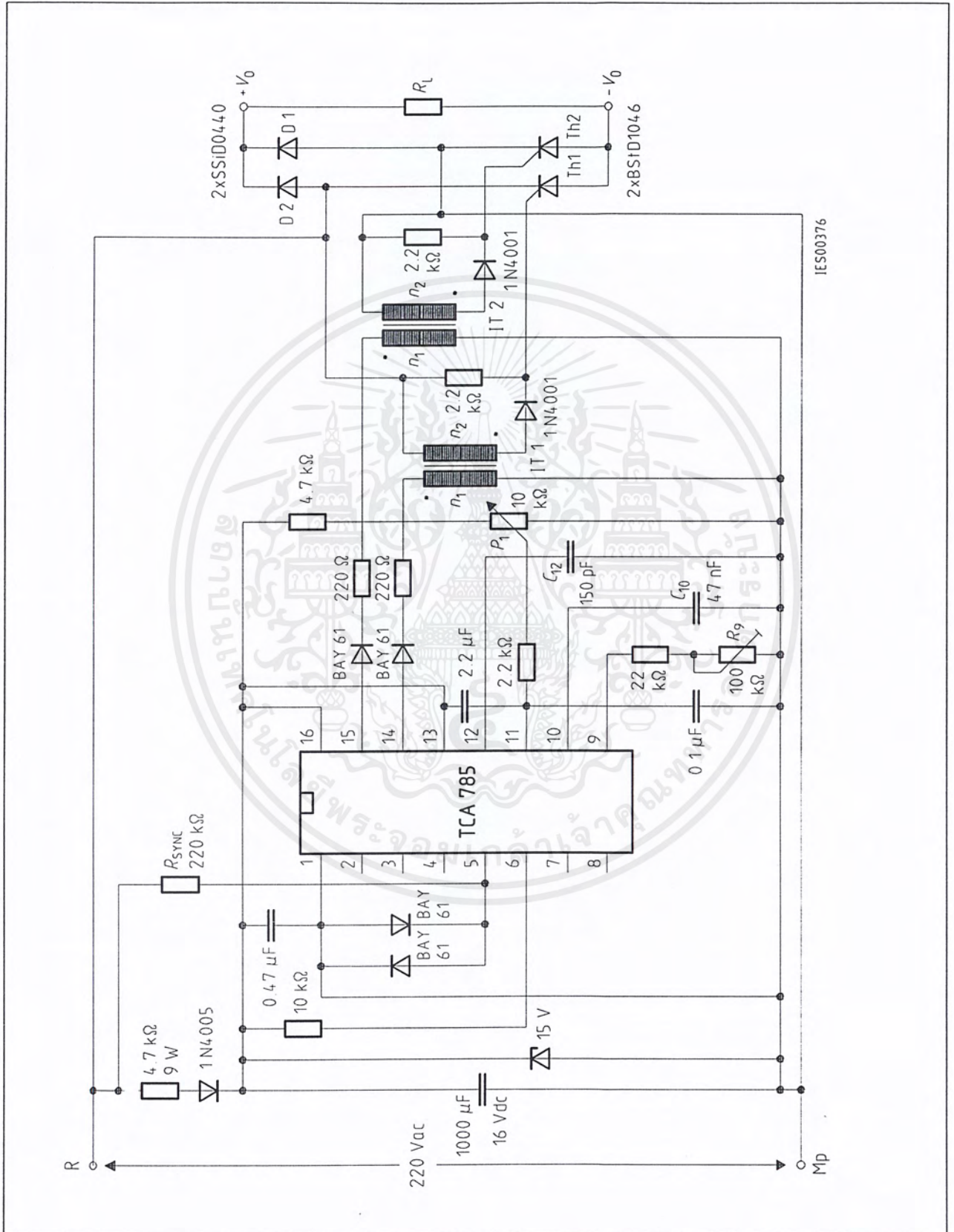
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IES00375

Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Trigger Pulse Transformer and Direct Control for Low-Power Thyristors

ไม่ถาวรคือได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Two Trigger Pulse Transformers for Low-Power Thyristors

International IOR Rectifier

25RIA SERIES

MEDIUM POWER THYRISTORS

Stud Version

Features

- Improved glass passivation for high reliability and exceptional stability at high temperature
- High di/dt and dv/dt capabilities
- Standard package
- Low thermal resistance
- Metric threads version available
- Types up to 1600V V_{DRM}/V_{RRM}

25A

Typical Applications

- Medium power switching
- Phase control applications
- Can be supplied to meet stringent military, aerospace and other high-reliability requirements

Major Ratings and Characteristics

Parameters	25RIA		Units
	10 to 120	140 to 160	
$I_{T(AV)}$	25	25	A
@ T_C	85	85	°C
$I_{T(RMS)}$	40	40	A
I_{TSM}	@50Hz	398	A
	@60Hz	415	A
I^2t	@50Hz	795	A ² s
	@60Hz	725	A ² s
V_{DRM}/V_{RRM}	100 to 1200	1400 to 1600	V
t_q typical	110		µs
T_J	- 65 to 125		°C



Case Style
TO-208AA (TO-48)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Voltage Ratings

Type number	Voltage Code	V_{DRM}/V_{RRM} , max. repetitive peak and off-state voltage (1) V	V_{RSM} , maximum non-repetitive peak voltage (2) V	I_{DRM}/I_{RRM} max. @ $T_J = T_J$ max. mA
25RIA	10	100	150	10
	20	200	300	
	40	400	500	
	60	600	700	
	80	800	900	
	100	1000	1100	
	120	1200	1300	
	140	1400	1500	
	160	1600	1700	

- (1) Units may be broken over non-repetitively in the off-state direction without damage, if di/dt does not exceed $20A/\mu s$
(2) For voltage pulses with $t_p \leq 5ms$

On-state Conduction

Parameter	25RIA		Units	Conditions
	10 to 120	140 to 160		
$I_{T(AV)}$ Max. average on-state current @ Case temperature	25	25	A	180° sinusoidal conduction
	85	85	°C	
$I_{T(RMS)}$ Max. RMS on-state current	40	40	A	
I_{TSM} Max. peak, one-cycle non-repetitive surge current	420	398	A	t = 10ms No voltage
	440	415		t = 8.3ms reapplied
	350	335		t = 10ms 100% V_{RRM}
	370	350		t = 8.3ms reapplied
I^2t Maximum I^2t for fusing	867	795	A ² s	t = 10ms No voltage
	790	725		t = 8.3ms reapplied
	615	560		t = 10ms 100% V_{RRM}
	560	510		t = 8.3ms reapplied
I^2t Maximum I^2t for fusing	8670	7950	A ² √s	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied, $T_J = T_J$ max.
$V_{T(TO)1}$ Low level value of threshold voltage	0.99	0.99	V	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
$V_{T(TO)2}$ High level value of threshold voltage	1.40	1.15		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
r_{T1} Low level value of on-state slope resistance	10.1	11.73	mΩ	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
r_{T2} High level value of on-state slope resistance	5.7	10.05		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
V_{TM} Max. on-state voltage	1.70	—	V	$I_{pk} = 79A$, $T_J = 25^\circ C$
	—	1.80		
I_H Maximum holding current	130		mA	$T_J = 25^\circ C$. Anode supply 6V, resistive load,
I_L Latching current	200			

Switching

Parameter	25RIA	Units	Conditions
di/dt Max. rate of rise of turned-on current V _{DRM} ≤ 600V V _{DRM} ≤ 800V V _{DRM} ≤ 1000V V _{DRM} ≤ 1600V	200 180 160 150	A/μs	T _J = T _J max., V _{DM} = rated V _{DRM} Gate pulse = 20V, 15Ω, t _p = 6μs, t _r = 0.1μs max. I _{TM} = (2x rated di/dt) A
t _{gt} Typical turn-on time	0.9		T _J = 25°C, at = rated V _{DRM} , V _{RRM} , T _J = 125°C
t _{rr} Typical reverse recovery time	4	μs	T _J = T _J max., I _{TM} = I _{T(AV)} , t _p > 200μs, di/dt = -10A/μs
t _q Typical turn-off time	110		T _J = T _J max., I _{TM} = I _{T(AV)} , t _p > 200μs, V _R = 100V, di/dt = -10A/μs, dv/dt = 20V/μs linear to 67% V _{DRM} , gate bias 0V-100V

(*) t_q = 10μs up to 600V, t_q = 30μs up to 1600V available on special request.

Blocking

Parameter	25RIA	Units	Conditions
dv/dt Max. critical rate of rise of off-state voltage	100 300 (*)	V/μs	T _J = T _J max. linear to 100% rated V _{DRM} T _J = T _J max. linear to 67% rated V _{DRM}

(**) Available with: dv/dt = 1000V/μs, to complete code add S90 i.e. 25RIA160S90.

Triggering

Parameter	25RIA	Units	Conditions	
P _{GM} Maximum peak gate power	8.0	W	T _J = T _J max.	
P _{G(AV)} Maximum average gate power	2.0			
I _{GM} Max. peak positive gate current	1.5	A	T _J = T _J max.	
-V _{GM} Maximum peak negative gate voltage	10	V	T _J = T _J max.	
I _{GT} DC gate current required to trigger	90 60 35	mA	T _J = -65°C T _J = 25°C T _J = 125°C Max. required gate trigger current/ voltage are the lowest value which will trigger all units 6V anode-to-cathode applied	
V _{GT} DC gate voltage required to trigger	3.0 2.0 1.0			V
I _{GD} DC gate current not to trigger	2.0			
V _{GD} DC gate voltage not to trigger	0.2	V T _J = T _J max. V _{DRM} = rated value Max. gate current/ voltage not to trigger is the max. value which will not trigger any unit with rated V _{DRM} anode-to-cathode applied		

25RIA Series

Bulletin I2402 rev. A 07/00

International
IRF Rectifier

Thermal and Mechanical Specification

Parameter	25RIA	Units	Conditions
T_J Max. operating temperature range	- 65 to 125	°C	
T_{stg} Max. storage temperature range	- 65 to 125	°C	
R_{thJC} Max. thermal resistance, junction to case	0.75	K/W	DC operation
R_{thCS} Max. thermal resistance, case to heatsink	0.35	K/W	Mounting surface, smooth, flat and greased
T Mounting torque	to nut	to device	Lubricated threads
	20(27.5)	25	
	0.23(0.32)	0.29	kgf·m
	2.3(3.1)	2.8	
wt Approximate weight	14 (0.49)	g (oz)	
Case style	TO-208AA (TO-48)		See Outline Table

ΔR_{thJC} Conduction

(The following table shows the increment of thermal resistance R_{thJC} when devices operate at different conduction angles than DC)

Conduction angle	Sinusoidal conduction	Rectangular conduction	Units	Conditions
180°	0.17	0.13	K/W	$T_J = T_J \text{ max.}$
120°	0.21	0.22		
90°	0.27	0.30		
60°	0.40	0.42		
30°	0.69	0.70		

Ordering Information Table

Device Code
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">25</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">RIA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">160</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">M</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">S90</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> ① ② ③ ④ ⑤ </div>
<p>1 - Current code</p> <p>2 - Essential part number</p> <p>3 - Voltage code: Code x 10 = V_{RRM} (See Voltage Rating Table)</p> <p>4 - None = Stud base TO-208AA (TO-48) 1/4" 28UNF-2A M = Stud base TO-208AA (TO-48) M6 X 1</p> <p>5 - Critical dv/dt: None = 300V/μs (Standard value) S90 = 1000V/μs (Special selection)</p>

Outline Table

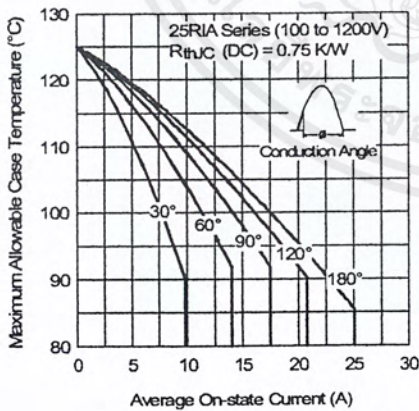
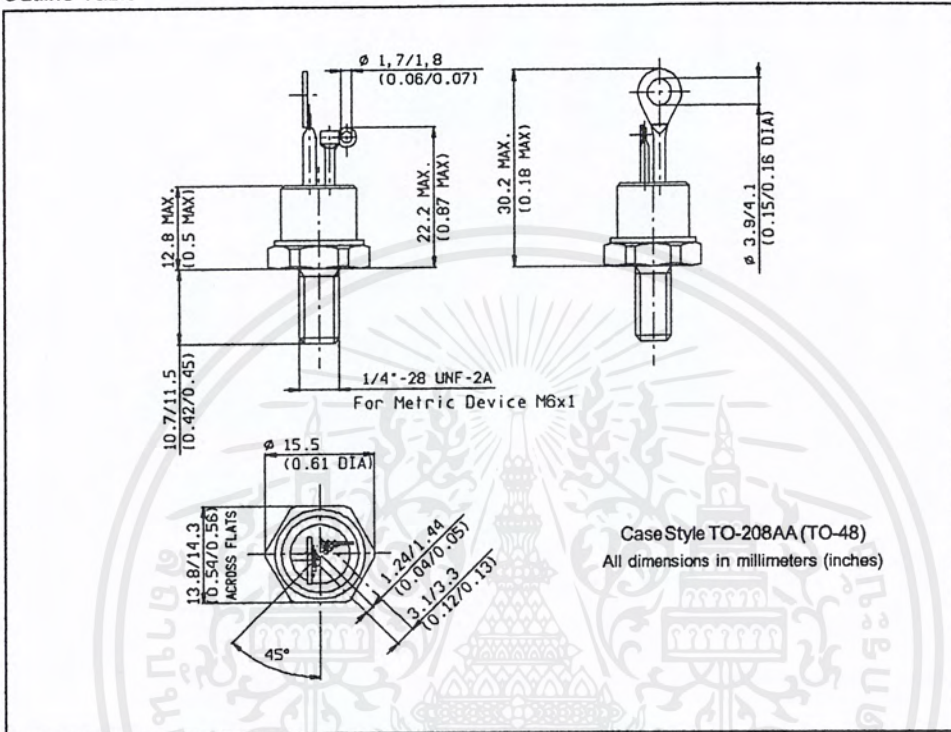


Fig. 1 - Current Ratings Characteristic

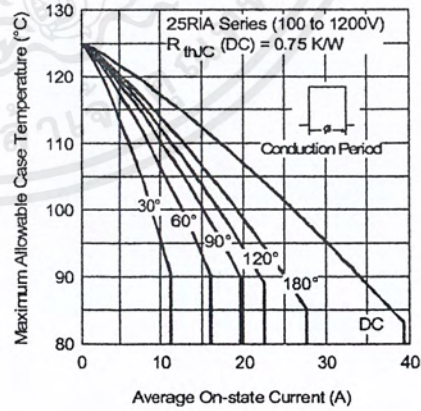


Fig. 2 - Current Ratings Characteristic

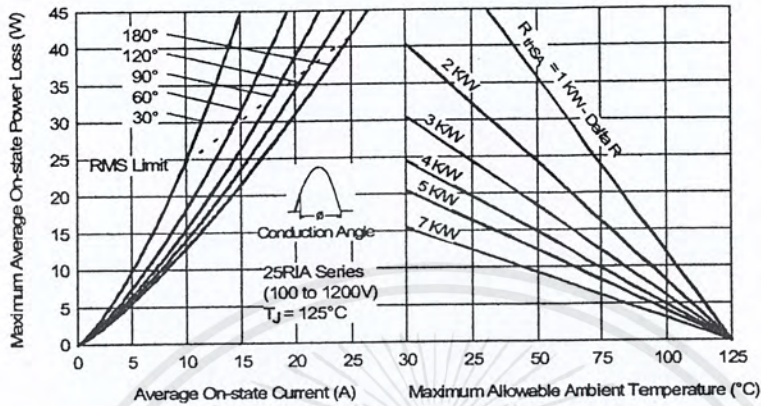


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

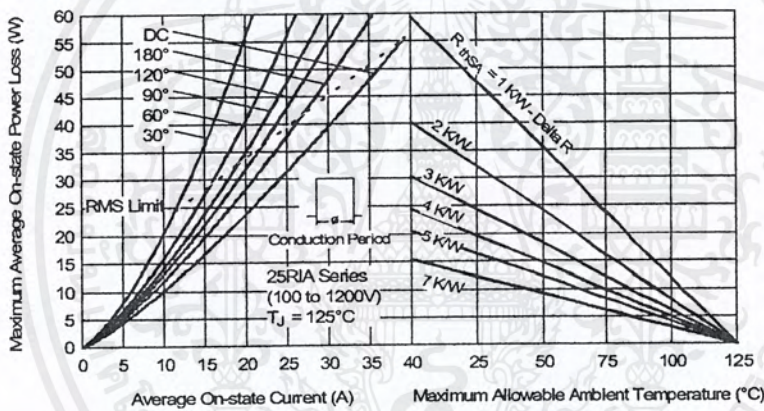


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

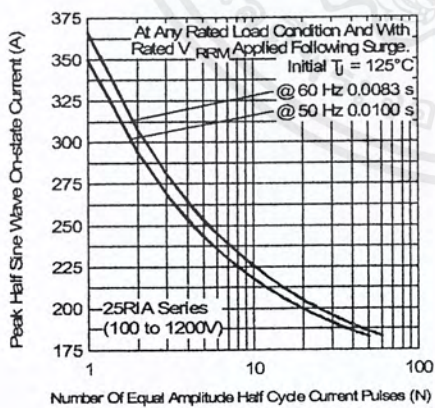


Fig. 5 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

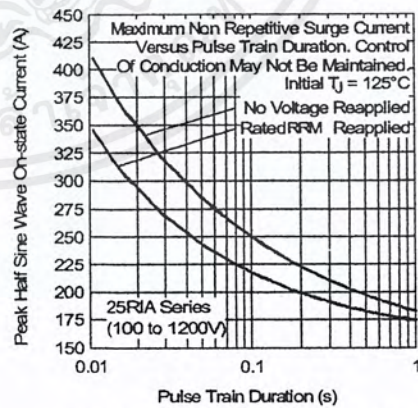


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

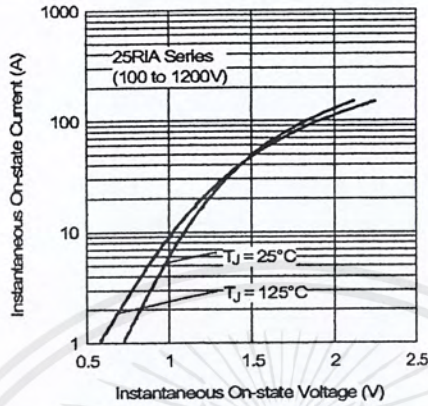


Fig. 7 - Forward Voltage Drop Characteristics

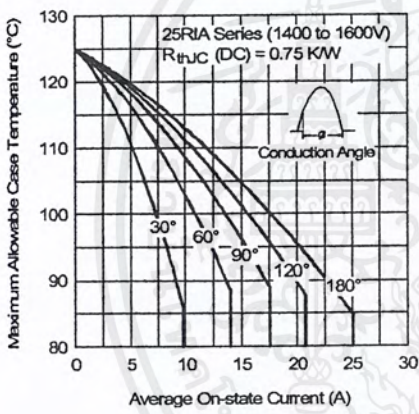


Fig. 8 - Current Ratings Characteristics

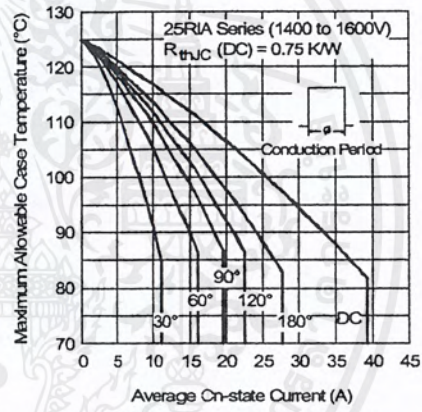


Fig. 9 - Current Ratings Characteristics

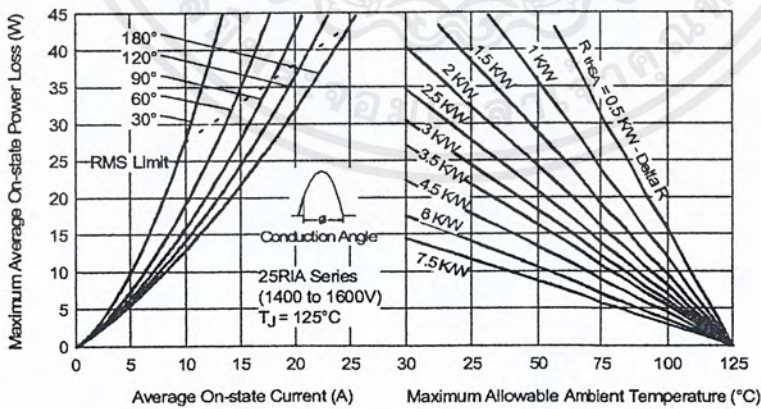


Fig. 10 - On-state Power Loss Characteristics

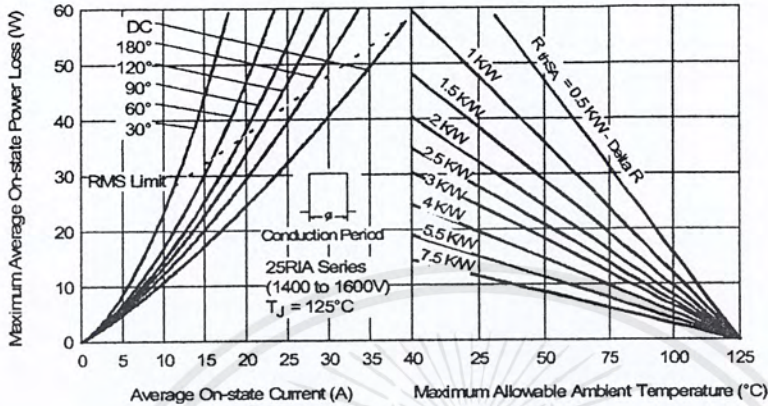


Fig. 11 - On-state Power Loss Characteristics

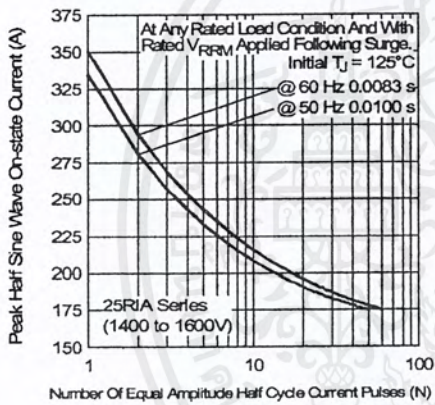


Fig. 12 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

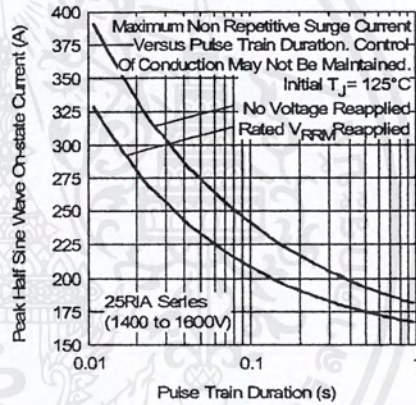


Fig. 13 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

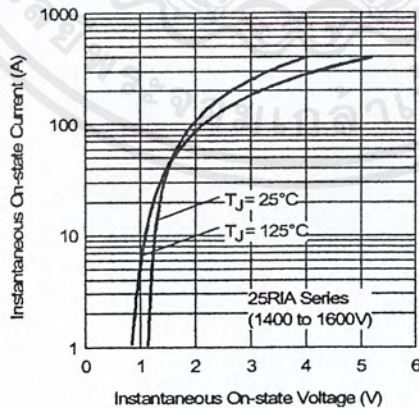


Fig. 14 - Forward Voltage Drop Characteristics

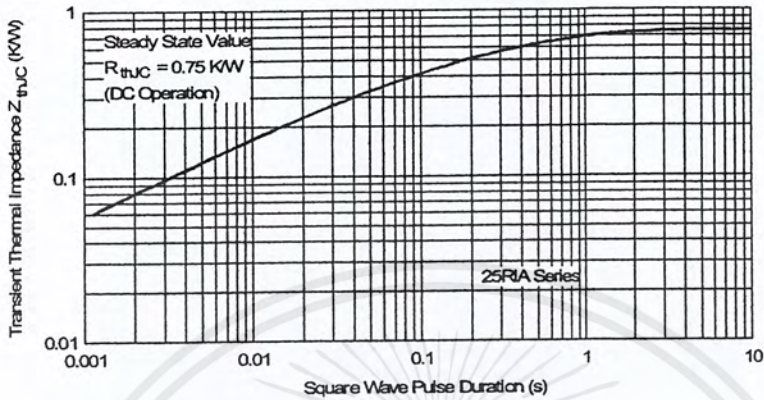


Fig. 15 - Thermal Impedance Z_{thJC} Characteristics

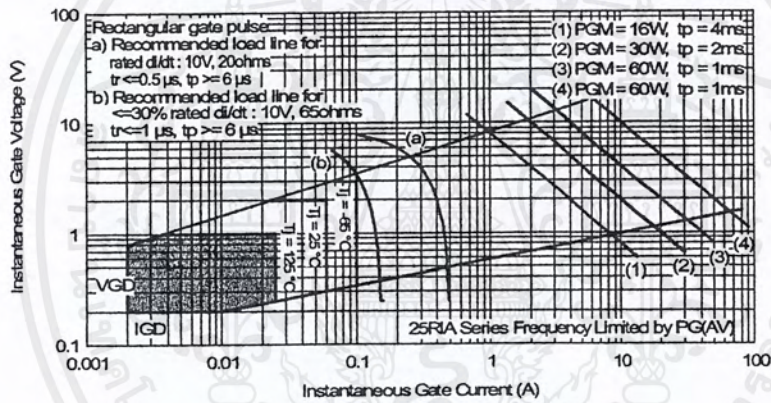


Fig. 16 - Gate Characteristics

SWITCHING OF POWER HARMONIC FILTERS

ALEXANDER KUSKO AND NOSHIRWAN K. MEDORA
Life Fellow, IEEE Member, IEEE

Failure Analysis Associates, Inc.
Electrical Division
Three Speen Street
Framingham, MA 01701

Abstract—Power harmonic filters are installed at the ac input terminals of rectifiers, motor drives, UPS, and other non-linear loads to reduce the distortion of the terminal voltage at the point of connection. The design guide for these filters, such as IEEE Std. 519, assumes a fixed load condition, and does not focus on switching of the filters. In actual operation, this is not usually the case, and the filters are switched as a function of the operating system conditions. Power harmonic filters can be switched by contactors or thyristors to control overvoltages, reduce losses, and limit harmonic currents from other sources. Examples are shown of switched filters on elevator drives, adjustable speed pump drives, and reactive-power compensators. PSpice generated waveforms for the 5th harmonic section for the elevator drive are included. Parametric calculation of the capacitor kvar on no load and full load is investigated.

I. INTRODUCTION

The purpose for power harmonic filters is two-fold. First, the filters are used to protect reactive power sources such as capacitor banks from potential resonance conditions. These resonance conditions produce excessive current in the capacitors, excessive voltage, and subsequent voltage distortion at the capacitors, and elsewhere in the system. Second, the power harmonic filters are used to attenuate harmonic currents produced by various types of non-linear load equipment. The resultant harmonic currents and voltages interfere with computers and telecommunications equipment operating in the system. The power harmonic filters usually consist of shunt-connected harmonic traps at each of the offending harmonic frequencies, e.g., 5th harmonic, 7th harmonic. The capacitors of the filter sections also serve as sources of 60-Hz reactive power for the system.

The accepted guide for the design and installation of power harmonic filters is IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems." [1] [2] As is typical in most references on power harmonic filters, the standard does not focus on switching of the filters. However, in practice, it is well known that filters are switched by sections or completely as a function of the operation of the system to which they are connected.

Switching of power harmonic filters entails two problems. First, when should a filter be switched on and off with respect to the condition of the load that it serves. Second, what is of the means for switching the filter, that is, either by contactors, semiconductor devices, or by other means.

In this paper, we will describe three typical installations of power harmonic filters and the requirements for switching them, (1) solid state elevator drive; (2) ac adjustable speed pump drive; (3) var compensator.

II. TYPES OF LOADS

The types of loads for which power-harmonic filters have been installed include the following:

- Converters (rectifiers, cycloconverters).
- Ac and dc solid state motor drives.
- Uninterruptible power systems (UPS).
- Var compensators.

Loads which require power harmonic filters operate in the following fashions:

- Continuously, with a steady load on the supply system.
- Varying, such as when the requirements for the load device fluctuate in accordance with its function.
- On and off in a switched mode.

There is little benefit to an electric power system for a power harmonic filter to be connected when it is not required. First, it entails a certain degree of power loss. Second, it entails a possible failure of one of the components. Third, it serves as a sink for harmonic current generated in other parts of the system. Fourth, its filter capacitors at no load can raise the voltage at the point of connection above an acceptable limit.

III. MEANS FOR SWITCHING

Power harmonic filters can be switched by contactors and by semiconductor devices such as thyristors. The inductors in series with the capacitors in each filter section insure that the capacitor and the switch device are

not subjected to a large inrush current, caused by the difference between the source voltage and the capacitor voltage. Various combinations of thyristors and diodes are also used to switch power harmonic filters or individual filter sections to minimize the transient to the system.

IV. NEED FOR FILTER

Capacitor banks must frequently be operated as part of a power harmonic filter. When the capacitor sections are tuned with appropriate inductors to harmonics of the power system, then the opportunity for resonance between a non-linear load, the capacitor bank, and the system inductance, is eliminated. This type of tuning is becoming more and more common as engineers understand the hazard of creating the condition for resonance when specifying and installing capacitor banks, and when loads become more "non-linear."

A second need for power harmonic filters is to attenuate the harmonic current produced by non-linear loads such as switched mode power supplies in computer equipment and six-pulse converters in motor drives and UPS. The power harmonic filters, in those cases, are designed to attenuate the rms harmonic current to a level given in a specification, or to a voltage level that will not produce interference in other equipment served by the same power source. IEEE Std. 519-1992 deals in depth with the latter requirements [1].

The source impedance is a key element in determining the tolerable level of harmonic current in a system. This source impedance typically consists of a primary distribution line and a service transformer. However, in many facilities, equipment such as elevators, UPS, and emergency lighting, are required to operate from an emergency generator [3]. The generator source impedance, represented by the sub-transient reactance, is usually several times greater than the source impedance from the utility system. Consequently, for the same level of load harmonic currents, the harmonic voltages produced by those currents will also be several times greater when the load is supplied from the emergency generator. Consequently, in some installations, there is a greater need for a power harmonic filter for operation of the loads from the emergency generator than from the normal utility supply. This also entails possibly switching the power harmonic filter off for normal operation and connecting it for generator operation.

V. ELEVATOR DRIVES

An example of an elevator drive system is shown in Fig. 1. The system consists of three six-pulse semiconductor elevator drive controllers with their connected motors. The system is installed in a high-rise building and is supplied from a transformer in the basement and a 480-V feeder extending up to the elevator room. The source impedance to the elevator controllers is relatively high; the harmonic currents produced by the six-pulse converters create substantial voltage distortion at the terminals of the elevator controller. The distortion can interfere with the controls and firing circuits for the

elevator converters [4].

The design of a proposed filter for the system is shown in Fig. 2. Only the 5th-harmonic section is shown. One design parameter is the total reactive power kvar at 60-Hz for the aggregate of capacitors in the filter. The waveforms as generated by a PSpice program, are shown in Fig. 3 for the system with filters.

One limitation in setting the total 60-Hz reactive power of the capacitors in the filter is the voltage at the elevator controllers when no elevators, or only one elevator, is operating and loading the system. A parametric calculation of the impact of the 60-Hz capacitor kvar on the no load and full load voltage at the elevator controllers is shown in Fig. 4.

Switching of this filter was considered as a function of several variations of operation. One manner of operation would be to install one filter for each elevator controller and to switch it on and off with a signal from the elevator controller. This is an expensive manner of installing the filter and the switching means. A second method for switching that was considered is to switch on a voltage signal at the 480-V bus in the elevator room. A third method of switching that was considered was to switch on a line current signal, which would indicate the degree of elevator load carried by the feeder. The elevator load represents a difficult requirement for switching power harmonic filters.

VI. AC PUMP DRIVE

A 600-hp adjustable speed ac pump drive has been installed with the filter shown in Fig. 5. The filter consists of 5th and 7th harmonic sections to reduce the harmonic current reflected back into the supply system at the site. The supply system has a relatively high source impedance and requires a filter to attenuate the harmonic voltages at the bus.

This filter is switched by the contactors as shown in Fig. 6 in accordance with a start-up signal generated by the pump drive controller. The filter is thus either on or off depending upon the operation of the pump drive. This type of switching is relatively simple to design and install. The filter manufacturer provided the cabinet with the contactors in place, so that only the control signal had to be provided.

VII. VAR COMPENSATOR

A var compensator system is shown in Fig. 7. In this case the capacitors are divided into groups and tuned for harmonic frequencies [5].

The sections are switched with thyristors. This same type of system has been used for attenuating harmonics and also providing reactive power compensation in large dc motor drives on electric shovels.

Var compensators and reactive power sources, of this kind, are usually switched in

accordance with reactive power sensing signals.

VIII. CONCLUSIONS

With regard to switching power harmonic filters, we conclude the following:

- Filters are needed to protect capacitors such as in kvar control systems, or to suppress harmonics, which may be damaging to other equipment.
- It is not advantageous to leave power harmonic filters connected to a system when they are not required for their special function.
- Each installation of power harmonic filters must be analyzed for the nature of the load and the manner in which the load generates its harmonics which must be suppressed.
- It is advantageous to incorporate some type of switching in power harmonic filters to insure best operation with regard to the system.

REFERENCES

- [1] *IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, New York: IEEE, 1993.
- [2] A. Kusko and S.M. Peeran, "Design of Power Harmonic Filters," *Power Quality Conference*, November 13-15, 1990.
- [3] A. Kusko and S.M. Peeran, "Nonlinear Loading of Static and Rotating Uninterruptible Power Supplies (UPS)," *1990 IPEC Conference*, Tokyo, Japan, April 1990.
- [4] A. Kusko and S.M. Peeran, "Application of 12-Pulse Converters to Reduce Electrical Interference and Audible Noise from DC-Motor Drives," *1989 IEEE-IAS Annual Meeting*, San Diego, CA, October 1989.
- [5] A. Kusko and T.H. Putman, "VAR Compensator Correction of Gross Voltage Fluctuations," *First International Disaster Avoidance Conference*, June 30, 1992.

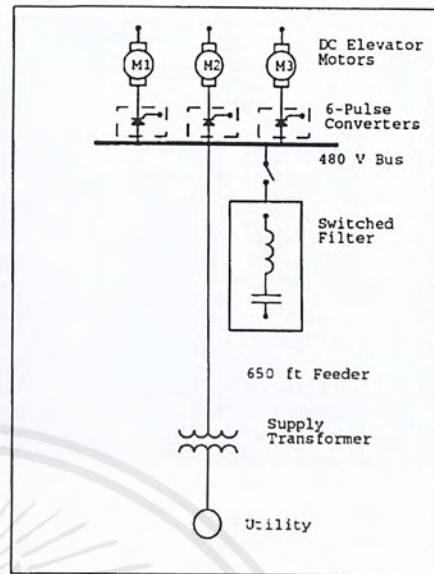


Fig. 1. Three-Car Solid State Converter Elevator System

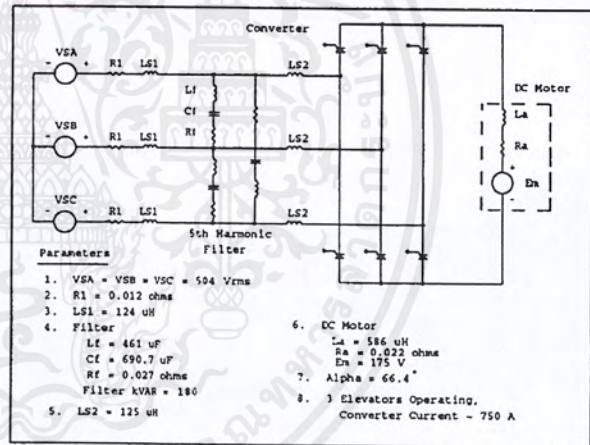


Fig. 2. Converter with One 5th Harmonic Filter Section, 180 kVAR Filter Capacitors Three DC Elevator Motors Running

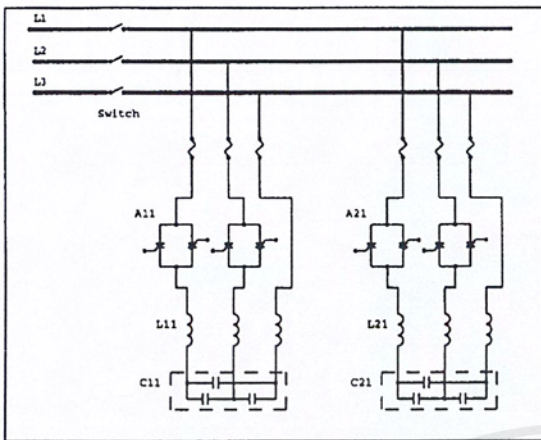


Fig. 7. Two Sections of Switched Var Compensator and Filter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filters

Noshirwan K. Medora, *Senior Member, IEEE* and Alexander Kusko, *Life Fellow, IEEE*

Abstract—Power-harmonic filters for rectifiers, motor drives, and uninterruptible power systems are usually designed by characterizing currents and voltages by their harmonic components. Usually, no attempt is made to determine the effect of switching of the filters, or of the system operation during a fault in the filter. A superior design method is to use modeling tools to characterize the currents and voltages by their instantaneous values as a function of time. Computer modeling using PSpice is a suitable alternative. In the computer modeling approach, the filter load, for example, a six-pulse phase-controlled converter can be represented accurately. Switching of the power-harmonic filters can be accurately represented to determine the turn-on transients. The effect of unbalanced system operation with one filter phase open can be determined. A computer model of an elevator drive system using a full-compliment six-pulse phase-controlled converter with fifth and seventh harmonic tuned filters, connected to an enhanced dc machine model is presented. Resulting waveforms show that the computer model can accurately simulate the static and dynamic characteristics of the entire elevator drive system for four test conditions in just one simulation run.

Index Terms—Computer modeling, converters, filter capacitors, harmonic filter design.

I. INTRODUCTION

NONLINEAR loads generate harmonics, a source of concern to the utility and the customer. Harmonics are usually generated by three-phase converters such as variable-frequency drives (VFD's), dc-adjustable speed drives, and switch-mode power supplies (SMPS's). These nonlinear loads result in voltage and current distortion in the line. The voltage distortion at a typical site may be approximately 5%. However, with typical nonlinear loads, the current distortion may exceed 40% [1]. These nonlinear loads result in triplen harmonic currents, neutral conductor problems, and transformer overheating and can also result in unexplained tripping of motor drives, power-factor capacitor failures, and nuisance tripping of circuit breakers and fuses. Consideration of these harmonics includes impact on equipment and, if necessary, suppression or prevention of their generation. Consequently, tuned harmonic filters are often used to attenuate the harmonics.

Paper IPCSD 99-78, presented at the 1998 Industry Applications Society Annual Meeting, St. Louis, MO, October 12-16, and approved for publication in the IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS by the Power Electronics Devices and Components Committee of the IEEE Industry Applications Society. Manuscript submitted for review October 15, 1998 and released for publication December 6, 1999.

N. K. Medora is with Exponent Failure Analysis Associates, Phoenix, AZ 85027 USA.

A. Kusko is with Exponent Failure Analysis Associates, Natick, MA 01760 USA.

Publisher Item Identifier S 0093-9994(00)02408-7.

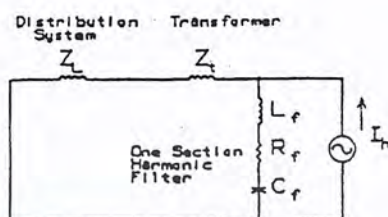


Fig. 1. Conventional design methodology of power-harmonic filter.

The conventional method for designing power-harmonic filters for rectifiers, motor drives, and uninterruptible power supplies (UPS's), characterizes the currents and voltages by their harmonic components. An extensive reference is Kimbark's work on power-harmonic filters for dc transmission-line terminals [2]. IEEE Standard 519-1992 provides a more recent reference [3]. An alternative method presented in this paper utilizes computer simulation to characterize the currents and voltages as instantaneous quantities versus time.

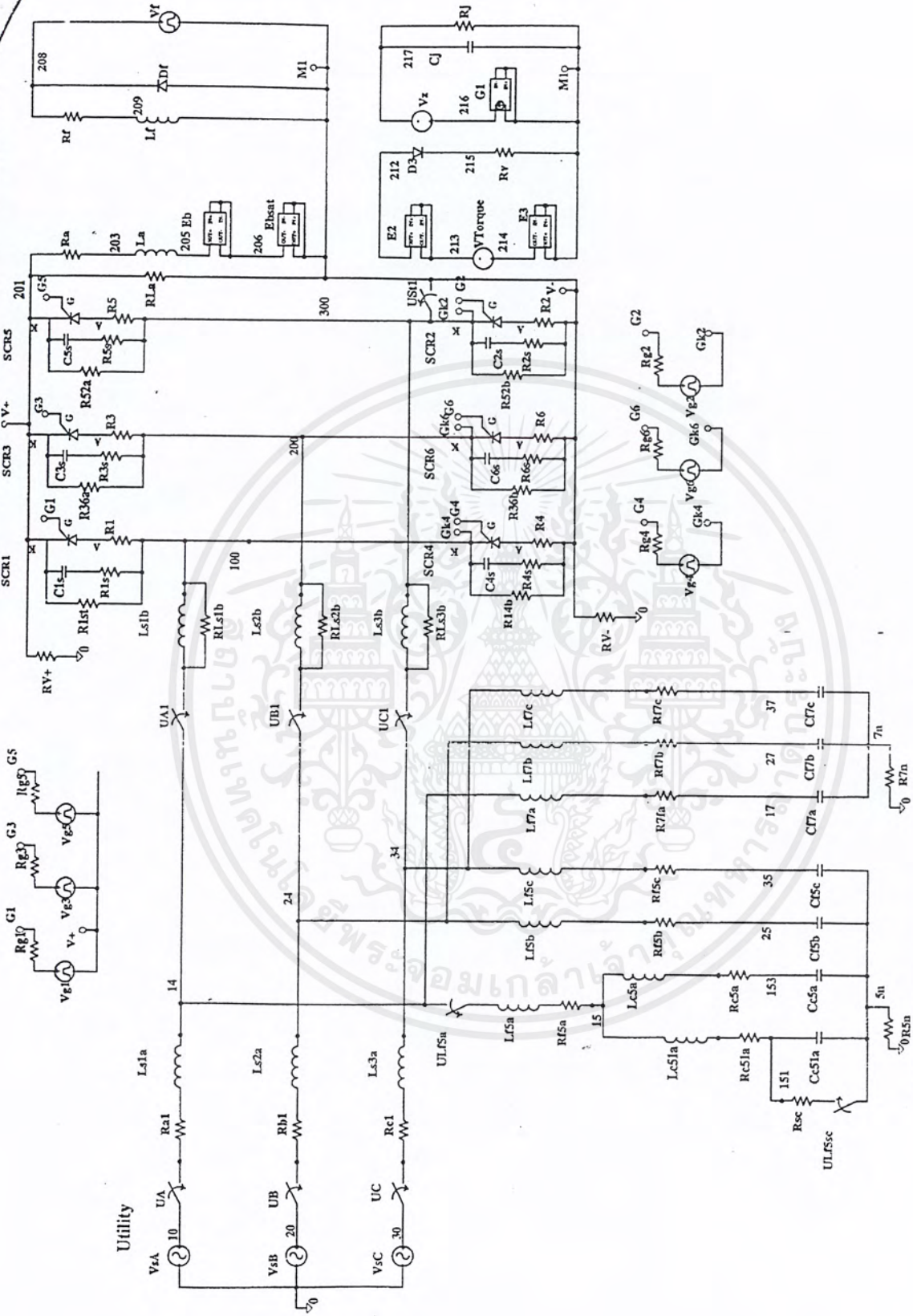
II. CONVENTIONAL METHOD

In the conventional method of power-harmonic filter design, the circuit shown in Fig. 1 is used to characterize a one-section filter. The load, for example, a phase-controlled rectifier, is represented as a harmonic current source. The filter section, comprising elements R , L , and C , is tuned to, or close to, the harmonic order of the source. The system is represented as impedance Z_s . The value of the harmonic current source is derived from an ideal line-current waveform, or from a reference such as IEEE Standard 519-1992 [3]. The filter elements R , L , and C are calculated to obtain the required level of the harmonic current in the supply line. The results based on approximation to the harmonic source current I_h , and the system impedance Z_s , are certainly inexact.

The filter design also involves overcurrent protection of the capacitor. This usually involves selection of a fuse or circuit breaker with high-energy capability. The high-energy capability is required, since when one capacitor in a large bank fails, the $1/2 CV^2$ stored energy of the other capacitors in the bank is dissipated through the protection element into the failed unit. It is imperative that the total stored energy during the discharge not exceed the capacitor tank rupture energy. The calculated value of energy should not exceed 10 kJ for paper/film capacitors and 15 kJ for conventional all-film capacitors. However, with expulsion fuses, selected capacitors can have a withstand energy of up to 30 kJ [4].

Dynamic DC Motor Model

6-Pulse Thyristor Converter



7th Harmonic Filter

5th Harmonic Filter

Fig. 2. PSpice computer model of the six-pulse phase-controlled converter powering the elevator drive with the fifth and seventh harmonic filters and dynamic motor model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the conventional method of designing power-harmonic filters using a single-phase steady-state circuit representation, the following information is not obtained:

- startup transient currents in the filters;
- effect of detuning one or more filter sections;
- effect of actual load operations.

When a fault occurs in the filter, such as a capacitor short circuit and subsequent fuse clearing, the following information is also not obtained:

- voltage and currents in the unfaulted components;
- effect on the load voltage;
- effect on the harmonic content of line current.

The information listed above can be determined by representing all three phases of the filter and the load. This paper describes how advanced simulation programs can be used to analyze the power-harmonic filter on a three-phase basis.

III. PSpice METHOD

Simulation programs such as PSpice [5] program can be used to analyze electric circuits for the behavior of currents and voltages as functions of time. In PSpice, circuit models are employed for the typical components of R , L , and C , as well as for thyristors, transistors, and diodes. The degree of complexity of the circuit models is limited only by the details necessary for the implementation in the specific analysis. The design of a power-harmonic filter is based on a three-phase representation of the system, including the load equipment, for example, a phase-controlled rectifier, as shown in Fig. 2. A simplified approach can be used to generate the inductance and capacitance values for each filter. These values may now be entered into the program. Cost tradeoffs, availability, or size are factors that may dictate selected parameter values, which can be judiciously selected and entered into the program file.

PSpice can assist in verifying the filter design and analysis, and may be used to determine the effect of detuning when there is a loss of capacitance due to a blown fuse. The simulation may also be used to determine the increase in capacitor voltage and the actual capacitor operating kilovars, and may also be used to generate the waveform of the fault current, and compute the total stored energy prior to the discharge. This computation is necessary in order to ensure that the total stored energy during the discharge does not exceed the capacitor tank rupture energy. The simulation can also be used to perform a parametric calculation of the impact of the 60-Hz capacitor kilovars for no-load and full-load conditions [6]. Computer simulation may also be used to simulate isolated and back-to-back switching of large banks of power-factor-correction capacitors. This switching, which may cause resonance conditions, has been the subject of extensive study [7].

IV. CASE STUDY

This paper presents a case study of an elevator drive system described by the authors in a previous paper [6]. The elevator drive system consists of three six-pulse phase-controlled converters powering three dc motors. The system is installed in a high-rise building. The source impedance to the elevator drives

is relatively high and consequently, the harmonic currents produced by the six-pulse converters create substantial voltage distortion at the terminals of the elevator controllers. This distortion can interfere with the controls and firing circuits for the elevator converters. The proposed fifth and seventh harmonic filters are used to reduce the harmonic currents to acceptable levels. Fig. 2 shows the computer model, which includes a three-phase representation of the fifth and seventh harmonic filters, an equivalent six-pulse phase-controlled converter, and a dynamic dc motor model with load torque, viscous torque, and field saturation effects. In Fig. 2, an equivalent six-pulse converter and a dc motor replace the three six-pulse converters and the three dc motors.

Table I presents the four test conditions evaluated in this paper. The Appendix presents a brief synopsis of the PSpice modeling of the elevator drive system.

V. COMPUTER SIMULATION

The computer model is used to evaluate the elevator drive system, which is the case study for this paper. Voltage and current waveforms are plotted for the four test conditions, depicted in Table I. The waveforms developed for the six-pulse phase-controlled elevator drive system for four different test conditions are shown in Figs. 3–11. It is observed that once a system is implemented into the computer, extensive system information is available, and only the knowledge and ingenuity of the operator limits the use of the computer as a design and analysis tool.

The computer model shown in Fig. 2 consists of the following components.

- **Source:** The source is a three-phase wye-connected transformer and the impedances of the feeder conductors.
- **Filter:** The fifth and seventh harmonic filters are represented as tuned L - C sections per phase with the typical resistance elements. One phase of the fifth harmonic filter is subdivided so that a section of the capacitor bank can be faulted and switched.
- **Converter:** Each of the six thyristors is represented including R - C snubbers and gate firing circuits.
- **DC Motor:** The armature circuit is represented by the R - L parameters and the armature generated voltage (back EMF). Two separate loops calculate torque and speed. The dc motor model also includes stator field saturation effects.

The load on the converter could be an inverter for an ac drive or a UPS. The dc motor represented the load in the case study of the elevator drive system [6].

VI. SIMULATION RESULTS

The simulation results of the four test conditions of Table I are summarized here. Case 1 presents the filter inrush current; Case 2 presents selected waveforms for normal operation. Case 3 presents waveforms for a possible abnormal operating condition, with a fault in one capacitor of one phase. Case 4 presents the voltages and currents when the fuse protecting the faulted phase opens. For each case, the computer simulation was used to determine the pertinent voltage and current waveforms. In selected cases, the frequency spectrum of the current waveform is

TABLE I
SUMMARY OF FOUR OPERATING TEST CONDITIONS FOR THE PSpice SIMULATION OF THE ELEVATOR DRIVE SYSTEM

Case No.	Test Condition	System Operation	Time
1	Filter Inrush Current during Start Up for 5 th and 7 th Tuned Harmonic Filters.	Circuit of Fig. 2. Input line circuit breakers closed at 2 ms	0-50 ms
2	Normal Operation of 6-Pulse Converter connected to Elevator DC Motor	Circuit of Fig. 2. Converter circuit breakers closed at 51 ms	100-151 ms
3	Dielectric breakdown of one capacitor in phase A of 5 th harmonic filter capacitor bank.	Circuit of Fig. 2. Fault Condition at 152 ms	152-192 ms ¹
4	Fuse of phase A of 5 th harmonic tuned filter opens.	Circuit of Fig. 2. Unbalanced Operation for > 193 ms	193-300 ms

¹ Expected fuse clearing time is > 1 s. Simulation time deliberately decreased to reduce the computer run time.

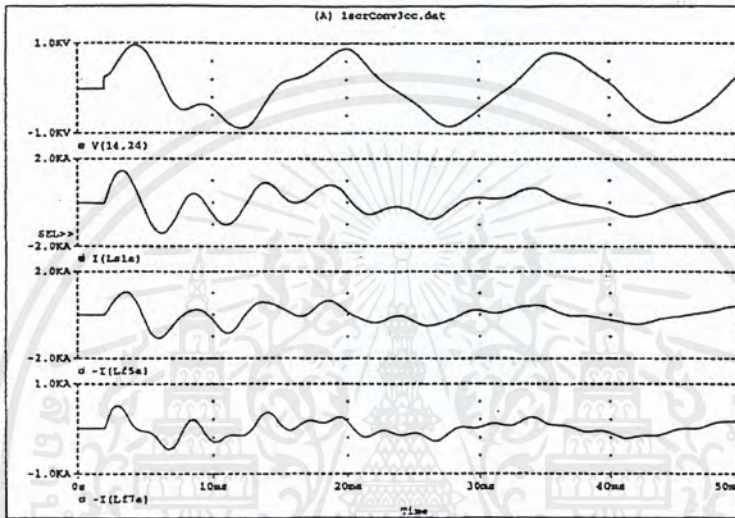


Fig. 3. Case 1—Filter inrush current during startup of circuit of Fig. 2. Top waveform: filter voltage; second waveform: line current; third waveform: fifth harmonic filter current; bottom waveform: seventh harmonic filter current.

also presented. It is observed that the computer model generates the voltage and current information for the four test conditions of Table I from just one simulation run.

Case 1—Filter Inrush Current During Startup: Computer simulation may be used to determine the harmonic filter voltage and current magnitudes during startup conditions. During startup, a high peak current flows into the uncharged filter capacitor bank in an attempt to instantaneously increase the capacitor voltage to the system voltage. The magnitude of the inrush current is dependent on the phase angle of the system voltage at the time of switch closure, the equivalent source and line impedance, and the magnitude and polarity of the voltage on the capacitor bank prior to switch closure. A similar event occurs during the switching of filters, where it is expected that under certain conditions, the switch recovery voltage can approach 2.0 per unit [8]. Computer simulation may be used to accurately depict these transients involved, and to design the system accordingly. Fuse selection for the filters also requires that this inrush current be taken into consideration.

Fig. 3 presents the voltage and current waveforms during a particular start up condition of the circuit of Fig. 2, where the three-phase input line circuit breaker is closed at 2.0 ms after time 0. The filter voltage, line current, and phase current of the

fifth and seventh harmonic filters are shown. A high peak inrush current is observed for both filters, decaying rapidly toward its steady-state value within a few cycles.

The maximum value for the peak line and filter inrush currents can be determined by running the computer program for steps in the circuit breaker closing time. The peak inrush current will appear in all three phases. Fig. 3 only shows the results for phase A.

Case 2—Normal Operation of Six-Pulse Converter Connected to Elevator DC Motor: PSpice computer simulation may be used to perform a comparison between normal and abnormal operating conditions. Case 2 presents selected waveforms for normal operation, and Case 3 presents waveforms for an abnormal operating condition.

Fig. 4 presents the line current, converter current, and the fifth and the seventh harmonic filter current waveforms for the six-pulse converter of Fig. 2 connected to the elevator dc motor. Fig. 5 presents the frequency spectrum of the currents of Fig. 4. As expected, the tuned harmonic filters supply the converter fifth and seventh harmonic currents.

Note in the waveforms of the fifth and seventh harmonic filter current in Fig. 4 and the spectra of Fig. 5, that the filter sections carry considerable fundamental frequency (60 Hz) current. This

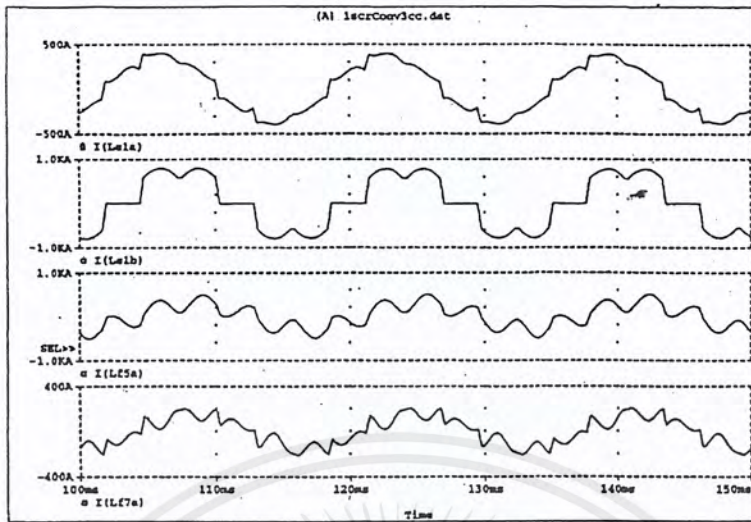


Fig. 4. Case 2—Normal operation for the circuit of Fig. 2. Top waveform: line current; second waveform: converter current; third waveform: fifth harmonic filter current; bottom waveform: seventh harmonic filter current.

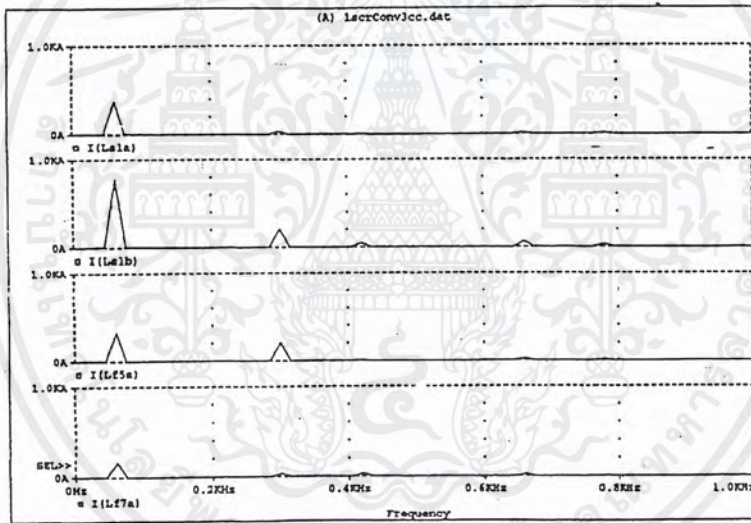


Fig. 5. Case 2—Normal operation for the circuit of Fig. 2. Frequency spectrum—top waveform: line current; second waveform: converter current; third waveform: fifth harmonic filter current; bottom waveform: seventh harmonic filter current.

60-Hz current can cause the 60-Hz voltage at the terminals of the converter to rise at light load. Switching of the filters may be required.

Case 3—Short Circuit of One Capacitor in Phase A of Fifth Harmonic Tuned Filter: Case 3 shows the effects of a component failure in the fifth harmonic filter. One filter capacitor in phase A of the fifth harmonic filter capacitor bank is assumed to have failed as a short circuit. PSpice readily permits simulating this fault condition, with the resulting waveforms shown as Figs. 6–8. These figures also present current and voltage waveforms for: 1) normal operation and 2) when the phase A fuse of the fifth harmonic filter opens. Normal operation is depicted from 120 to 150 ms. Capacitor failure in phase A of the fifth harmonic filter is simulated at 152 ms. Fig. 6 shows that, during the fault condition, the phase A tuned filter current peaks

at almost 2 kA, decaying to 1.2 kA. Fig. 7 shows the filter currents for phase A and phase B for the fifth and seventh harmonic tuned filters. Fig. 8 shows an increase in the armature current and motor torque during this fault condition. The fuse begins to open at approximately 193 ms, and clears the fault after 10 ms. In a real-world condition, the expected fuse clearing time for a low per-unit fault current of this nature is >1 s. However, the simulation time has been deliberately decreased to reduce the computer run time.

The filter for each harmonic is usually designed in multiple three-phase sections, depending upon the rating. Each section can also be connected to the line with three-pole contactors. The contactors can be used to connect the filters after the main contactor is closed to energize the load. The contactors can be used to match the number of filter sections to the load level. The ca-

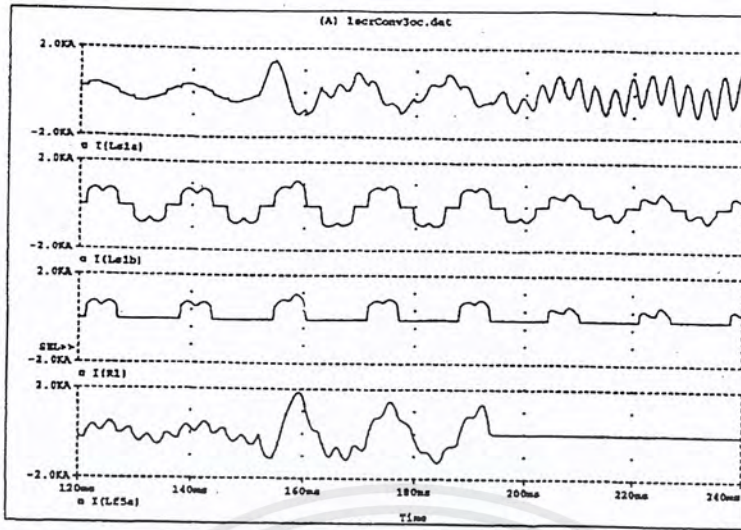


Fig. 6. Case 3—Short circuit of one capacitor in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Short circuit occurs at 152 ms. Top waveform: line current; second waveform: converter current; third waveform: thyristor current; bottom waveform: fifth harmonic filter current in phase A.

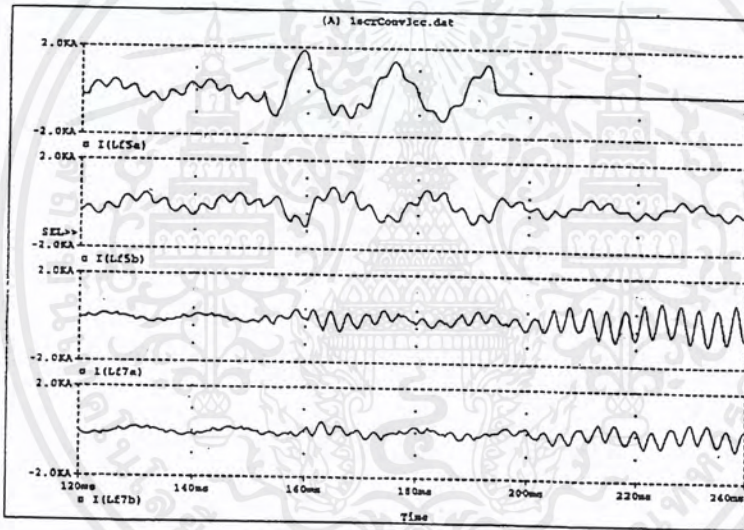


Fig. 7. Case 3—Short circuit of one capacitor in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Short circuit occurs at 152 ms. Top waveform: fifth harmonic filter current in phase A; second waveform: fifth harmonic filter current in phase B; third waveform: seventh harmonic filter current in phase A; bottom waveform: seventh harmonic filter current in phase B.

capacitors are usually protected by indicator fuses. The signal that a fuse had blown can be used to disconnect all three capacitors of the one section to preserve the balance.

Case 4—Fuse Open in Phase A of Fifth Harmonic Tuned Filter: PSpice may also be used to determine the effect of a loss of one phase of a tuned filter or the loss of all three phases of a tuned harmonic filter bank. Typically, in the latter case, the next higher order filter will conduct the harmonic current of the lost tuned filter bank. For example, the loss of all three phases of a fifth harmonic filter will cause the seventh harmonic filter bank to conduct the fifth harmonic current. This emphasizes the need to have filters tuned to lower order harmonics; if higher order filters are installed.

A more complex condition exists with the loss of one phase of a lower order tuned filter bank. In this unbalanced fault condition, the corresponding phase of the next higher order filter may be subjected to relatively large currents. Moreover, this unbalanced nature can result in unanticipated lower order harmonics. For example, in the case of a six-pulse converter, the unbalance condition may cause third-order harmonics to be generated. Such an unbalance condition may also cause problems in the phase-controlled rectifiers. Some aspects of the unbalanced input voltage conditions including the generation of triplen harmonics by phase-controlled rectifiers has been investigated [9].

Case 4 shows the effect of the loss of one phase of a tuned filter, where the phase A fuse of the fifth harmonic filter capac-

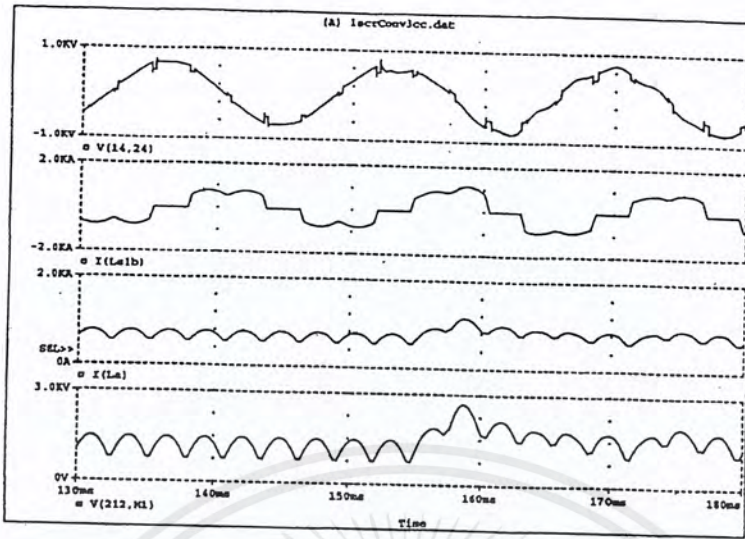


Fig. 8. Case 3—Short circuit of one capacitor in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Short circuit occurs at 152 ms. Top waveform: filter voltage; second waveform: converter current; third waveform: armature current; bottom waveform: motor torque (1 V = 1 N-m).

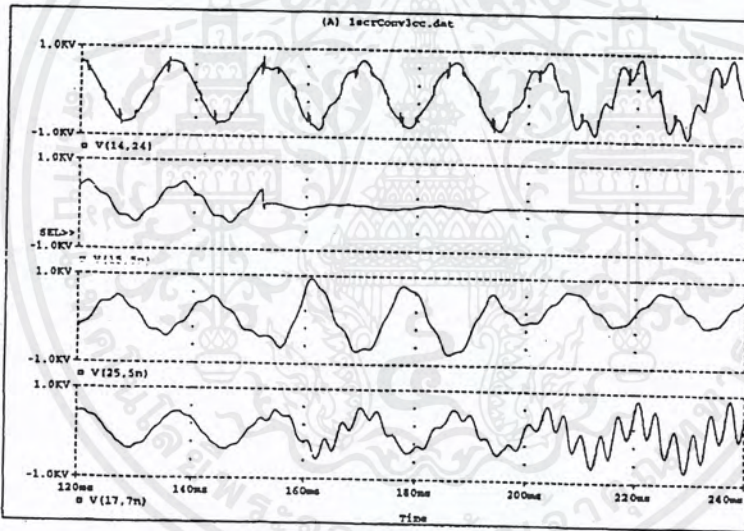


Fig. 9. Case 4—Fuse opens at 193 ms in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Top waveform: filter line voltage; second waveform: voltage of phase A capacitor bank of fifth harmonic filter; third waveform: voltage of phase B capacitor bank of fifth harmonic filter; bottom waveform: voltage of phase A capacitor bank of seventh harmonic filter.

itor bank is assumed to have opened, resulting in an unbalanced condition. PSpice readily permits simulating this unbalanced abnormal condition, with the waveforms shown in Figs. 6–11. As stated in Table I, the simulation time for Case 4 is from 193 to 300 ms. Fig. 6 shows that the thyristor current and the converter current decreases after the phase A fuse opens. Relatively large values of harmonics are observed on the input ac line. Fig. 7 presents the currents in phase A and phase B of the fifth and seventh harmonic tuned filters. It is observed that phase A of the seventh harmonic filter has a large fifth harmonic component. Fig. 10 is a frequency spectrum of the fifth and seventh filters. Considerable fifth harmonic current is in the seventh harmonic filters. Comparison filter current values of Fig. 10 for the

abnormal condition and of Fig. 5 for normal operation are presented in Table II.

Three phenomena can occur as a result of the fuse opening in phase A of the fifth harmonic filter.

- First, the voltages applied to the converter terminals are unbalanced. As shown in Table II, this results in third harmonic currents in the filters and the line.
- Second, the filter and the line impedance, as shown in Table II, resonate at the seventh harmonic. The large seventh harmonic component is shown in the line current of Fig. 6 and the seventh harmonic filter currents of Fig. 7.
- Third, the motor armature current increases until the fuse blows, then declines as shown in Fig. 11. In an actual

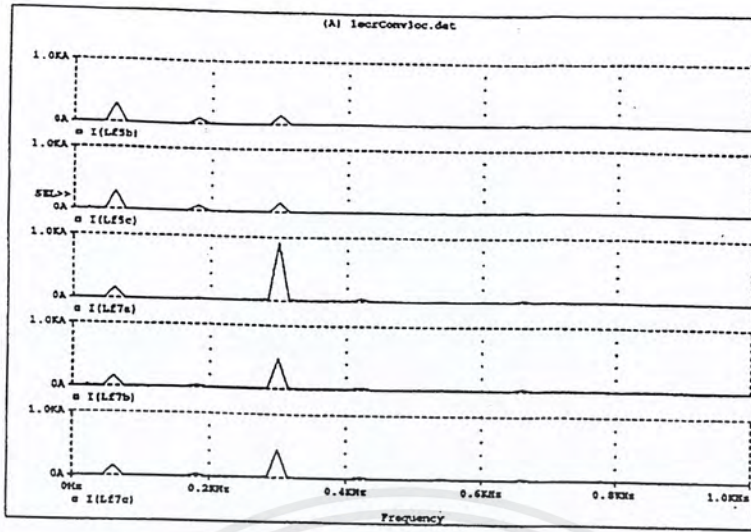


Fig. 10. Case 4—Fuse opens at 193 ms in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Frequency spectrum—top waveform: fifth harmonic filter current, phase B; second waveform: fifth harmonic filter current, phase C; third waveform: seventh harmonic filter current, phase A; fourth waveform: seventh harmonic filter current, phase B; bottom waveform: seventh harmonic filter current, phase C.

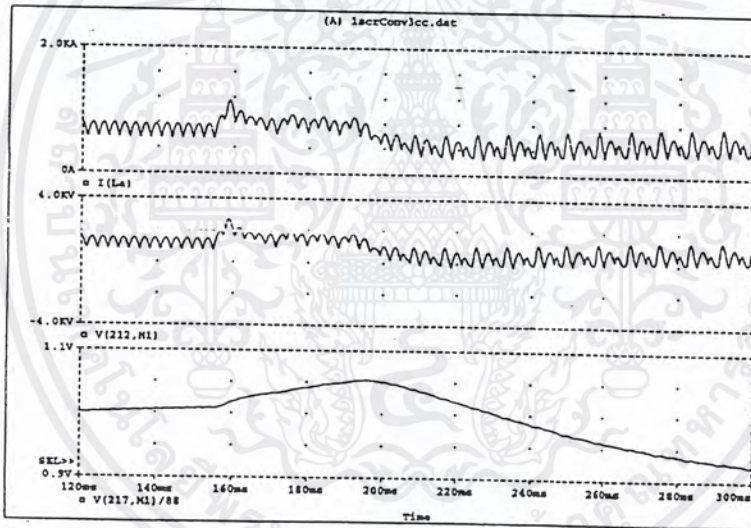


Fig. 11. Case 4—Fuse opens at 193 ms in phase A of fifth harmonic tuned filter of circuit of Fig. 2. Top waveform: armature current; second waveform: motor torque (1 V = 1 N·m); bottom waveform: normalized motor speed.

dc motor drive, the regulator would attempt to shift the thyristor firing angles to restore speed to preset values. The resulting increased high ripple current in the armature would result in increased vibration, increase winding losses, and possible overheating of the armature.

It is observed from Table II that the unbalanced fault condition results in appreciable third harmonic currents. Further, the high fifth harmonic currents now in the seventh harmonic filters can result in high losses in the filters, with overheating and fuse opening, resulting in the loss of the seventh harmonic filters, also.

VII. EFFECT OF FAULT CONDITION ON MOTOR TORQUE AND SPEED

Fig. 11 presents the armature current, motor torque, and normalized shaft speed. During normal operation, the armature current is relatively constant, the motor torque is constant, and, consequently, the dc motor operates at constant speed. During the fault condition, when the capacitor on phase A of the fifth harmonic filter shorted, the armature current peaks, and the speed rapidly increases. After the fuse clears the fault, the phase A fifth harmonic filter is no longer in service. The armature current, which now has a large ripple, is reduced from its previous value.

TABLE II
NORMAL OPERATION/FAULT CONDITION
FIFTH AND SEVENTH HARMONIC RMS FILTER CURRENTS PRIOR TO THE FAULT
AND AFTER FUSE IN PHASE A OF FIFTH HARMONIC FILTER OPENS

Filter Section	Phase A Current			Phase B Current		
	3	5	7	3	5	7
Harmonic Number	3	5	7	3	5	7
Filter Currents for Normal Operation Prior to the Fault						
5 th Harmonic Tuned Filter	0	207	12	0	207	12
7 th Harmonic Tuned Filter	0	35	38	0	35	38
Filter Currents After Fuse in Phase A of 5 th Harmonic Filter Opens						
5 th Harmonic Tuned Filter	0	0	0	92	154	5
7 th Harmonic Tuned Filter	20	923	60	40	433	39

Due to the reduced armature current, the motor torque correspondingly decreases, and the motor starts to slow down. The high ripple current would result in increased vibration and audible noise. Investigation to determine if the high ripple current in the armature would also result in excessive winding losses, high temperatures, and overheating of the armature may also be necessary, if this abnormal condition is not remedied.

VIII. SUMMARY

The computer modeling was performed for four test conditions listed under Table I. The results of the four test conditions indicate that the conventional modeling technique does not achieve the level of sophistication that the computer modeling does. It is also observed that the enhanced dc machine model connected to the full-compliment six-pulse three-phase phase-controlled converter with fifth and seventh harmonic tuned filters permits accurately simulating the static and dynamic characteristics of the elevator drive system for four test conditions in one simulation run. In addition, the computer simulation permits addressing each phase individually, which cannot be accomplished with the conventional design methodology.

Computer modeling can also readily accommodate various nonideal design parameters that are not present in the ideal circuit modeling techniques, but are present and operate in a real-world situation. These parameters may include inductor dc resistance losses, hysteresis, and eddy-current losses. These parameters may also include capacitor dielectric losses that are proportional to frequency, and at the n th harmonic, are n times the losses at the fundamental frequency.

We conclude that a personal computer would be a powerful tool in the design of power-harmonic filters, to determine the filter parameters under various operating conditions. These conditions include normal operation of the system at nominal line voltage. Additionally, this modeling technique permits the filter designer to rapidly simulate transient operation, such as startup conditions, and abnormal operation, such as loss of a filter on one phase in one simulation run. The computer modeling is also

useful for reconstruction of a short circuit or other fault conditions.

APPENDIX

PSpice COMPUTER MODEL OF SIMULATED TEST SYSTEM

A computer model of a six-pulse phase-controlled elevator drive was generated using MicroSim Corporation's PSpice computer simulation program. Where appropriate, existing library models were used for the computer model system. For selected system components, the conventional models were modified using the building blocks to design more intricate models to meet the simulation requirements.

The computer model system includes line impedances ($R-L$) to the utility and to the six-pulse converter. The fifth and seventh harmonic tuned filters were represented by their respective $R-L-C$ component values. The phase A of the fifth harmonic filter, which subsequently has a capacitor failure, was represented by $R-L$ values indicative of the equivalent series resistance (ESR) and equivalent series inductance (ESL) of the capacitor bank. The six-pulse converter was depicted as in the real world, with dedicated snubbers for each thyristor. The converter gate drive uses a global parameter design to allow a simulation to be run for multiple values of specific system variables, such as thyristor firing angle α . Line and converter breakers were also incorporated into the system to simulate the operation for various times of breaker closure.

Additionally, an advanced, dynamic dc machine model was incorporated into the computer modeling system. Typically, a dc machine model includes a fixed inductor and resistor, with a fixed voltage source simulating the back EMF. Such a simplistic model is inadequate to determine the change in the motor torque or speed when a fault occurs on the harmonic filter connected to the converter. To accurately investigate the torque speed changes, the conventional dc machine model was replaced by a dynamic motor model, which includes motor parameters such as motor torque constant, viscous torque, load torque, and inertia. A comprehensive reference for this model is presented by Rashid [10]. The dynamic motor model of Rashid was further modified to include stator field saturation effects to enhance the accuracy of the model. This refined dc machine model connected to the full-compliment six-pulse phase-controlled converter with fifth and seventh harmonic tuned filters permits accurately simulating the static and dynamic characteristics of the elevator drive system for four test conditions in one simulation run.

Fig. 2 presents the computer model system. The model system was used to predict the operation of the elevator drive system for four test conditions as listed in Table I. Selected voltage and current waveforms for the conditions of Table I are presented.

REFERENCES

- [1] T. S. Key and J. S. Lai, "Comparison of standards and power system design options for limiting harmonic distortion in power systems," *Trans. Ind. Applicat.*, vol. 29, pp. 688-695, July/Aug. 1993.
- [2] E. W. Kimbark, *Direct Current Transmission*. New York: Wiley, vol. 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะ ได้รับการสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจจากบุคคลต่างๆหลายท่าน ดังรายนามดังต่อไปนี้

อาจารย์ สุทธิ บรรจงจิตร

อาจารย์ ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์ เชาวน์ ชมภูอินไหว

อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำแนวทางในการทำโครงการนี้ด้วยดีตลอดเวลา
ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา
ขอขอบคุณ พี่ๆปริญญาโท ดิ็ก L ที่คอยให้ความช่วยเหลือ แก้ไข เมื่อมีปัญหา
ขอขอบคุณ พี่ตัวเล็ก, พี่แก้ว สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้
ขอขอบคุณ เพื่อนๆ 4B ที่ทำให้ไม่รู้สึกลัว ต้องทำ Project อยู่ลำพัง
ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ช่วยวาดรูปและพิมพ์งาน
ขอขอบคุณ น้องๆ 3B ที่มีน้ำใจมาช่วยทำโครงการ
ขอขอบคุณ เวลาดีๆ 4ปี สำหรับความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า
ขอขอบคุณ บ้านหม้อ ที่สำหรับเป็นแหล่งทรัพยากรในการทำโครงการนี้
หากมิได้กล่าวนามผู้ใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย
สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คณะวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุกๆอย่างตลอดระยะเวลา 4 ปี

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมพร สะวังจู และ ไชยะ แซ่มซ้อย, “การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว” *เอกสารประกอบการสัมมนา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลังปี 2000*, พฤศจิกายน 24-26, 2542
- [2] ชัยยงค์ แก้วมงคล, นภัทร วัจนเทพินทร์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 (วงจรคอนเวอร์เตอร์)” บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด, 335 หน้า, พฤษภาคม 2540.
- [3] อุดมศักดิ์ ชัยยีน, “ *Power Eletronics I* ”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี.
- [4] พิเชิต ถ้ายอง, “ *เครื่องจักรไฟฟ้า 1* ”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] ดร. ชำนาญ ห่อเกียรติ, นาย ชาญวิทย์ คล่องพิทยาพงษ์, “ *บทความที่ใช้บรรยายที่การไฟฟ้านครหลวง* ”, พฤศจิกายน 2528.
- [6] รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์, วรวัตร ภัทรอมรกุล, “ *คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์* ”, อินโฟเพรส, 508 หน้า, เมษายน 2543.
- [7] ชีรภัทร พัฒนานิติ, บรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่, ฤทธิชัย ภูภิรมย์, “ *การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก* ”, ปรินญาณิพนธ์ปีการศึกษา 2538, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สัตยญา ตาปราบ, สัตติ ศิริสัมพันธ์, สันติ รัตนรงค์, “ *ชุดศึกษาทดลองการกรองฮาร์มอนิก* ”, ปรินญาณิพนธ์ปีการศึกษา 2541, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] อำนวย สกุลสุกใส, “ *โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์* ”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 368 หน้า, มีนาคม 2541.
- [10] M. H. Rashid, *Spice for Power Electronics and Electric Power*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [11] Alexander Kusko and NoshIrwan K. Medora , “ Switching of Power Harmonic Filters ”, in *Conf. Rec. 29th IEEE-IAS Annu. Meeting*, Denver, CO, Oct. 2-5, 1994, pp. 941-951
- [12] NoshIrwan K. Medora and Alexander Kusko, “ Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filters”, *IEEE Trans. Ind. Appl. Cat.*, vol.36, pp. 604-613, Mar/Apr. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะผู้จัดทำ

ชื่อ นาย สุภกิจ นัวเจริญ รหัสประจำตัว 40010786
ที่อยู่ 204 ซ.โชคชัยร่วมมิตร ถ.วิภาวดี-รังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร
กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ (02) 276-1705

ชื่อ นาย อัครเดช พรหมขน รหัสประจำตัว 40010978
ที่อยู่ 29 ถ.ราชดำเนิน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช 80000
โทรศัพท์ (075) 320837 , (01) 3191627

ชื่อ นาย อาทิตย์ พัฒนพงศ์ชัย รหัสประจำตัว 40010995
ที่อยู่ 99/274 หมู่บ้าน ร่มทิพย์ ถ.หทัยราษฎร์ เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
โทรศัพท์ (02) 9158408 , (142) 4068170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้