สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรกรองแบบแอคทีฟ

ACTIVE FILTER

โดย

นายกอบพล หทัยอารีย์รักษ์

นายไกรสร ทองศรีสุพรรณ

นายเขตต์ สันธนะพันธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 36988
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

วงจรกรองแบบแอคทีฟ
ACTIVE FILTER

โดย

นายกอบพล หทัยอารีย์รักษ์

นายไกรสร ทองศรีสุพรรณ

นายเขตต์ สันธนะพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ดร.วิจิตร กิณเรศ

อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรกรองแบบแอคทีฟ

ผู้จัดทำ

นายกอบพล หทัยอารีย์รักษ์

นายไกรสร ทองศรีสุพรรณ

นายเขตต์ สันธนะพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐำเริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.วิริยะ กิณเรศ)

อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองแบบแอคทีฟ

นายกอบพล หทัยอารีย์รักษ์
นายไกรสร ทองศรีสุพรรณ
นายเขตต์ สันธนะพันธ์
รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการศึกษาการแก้ปัญหากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากโหลดไม่เชิงเส้น โดยอาศัยวงจรกรองแบบแอคทีฟ แบบฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งในเนื้อหาจะประกอบด้วย การศึกษาและออกแบบวงจรกรองแบบแอคทีฟ การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Simulink และการสร้างวงจรต้นแบบขึ้นมา เพื่อแก้ปัญหากระแสฮาร์โมนิกส์ในโหลดแบบไม่เชิงเส้น โดยการควบคุมกระแสที่จะนำไปชดเชยในวงจรจะเป็นการนำเทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซีสมาประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACTIVE FILTER

Korbphol	Hataiareereg	
Kraisorn	Thongsrisuphan	
Khet	Suntanaphan	
Assoc. Prof. Dr. Viriya Pichetjamroen		Advisor
Dr.Vijit	Kinnares	Advisor
Surin	Khomfoi	Advisor

ABSTRACT

Attention in this thesis is to study the harmonic current correction by using active filter with harmonic current injection technique. The details are composed of the studying and designing active filter, the simulation by Simulink program, and prototype active filter construction for harmonic current compensation. The hysteresis current control will be applied for harmonic current compensation in the case.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหา และที่มา	2
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ฮาร์โมนิกส์ และเพาเวอร์แฟคเตอร์	4
2.1 ฮาร์โมนิกส์	4
2.1.1 ลักษณะและพฤติกรรมของฮาร์โมนิกส์	4
2.1.2 สมการทั่วไปของรูปคลื่น	5
2.1.3 แหล่งกำเนิดและชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	6
2.2 การวัดค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น	8
2.3 เพาเวอร์แฟคเตอร์	9
2.4 ผลกระทบจากการมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ต่ำ	10
บทที่ 3 แอคทีฟฟิลเตอร์	11
3.1 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน	11
3.2 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม	12
บทที่ 4 ทฤษฎี และหลักการ	14
4.1 การวิเคราะห์กระแส	14
4.2 การควบคุมกระแสโดยใช้วงจรควบคุมแบบฮิสเตอร์ริซีส	16
4.2.1 เทคนิคการควบคุมกระแส	16
4.2.2 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์ริซีส	17
4.2.3 การทำงาน	19
บทที่ 5 การสร้าง และการออกแบบ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยอ้างอิง 22
5.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 22
5.1.2 วงจรคูณ 23
5.1.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ 23
5.1.4 วงจรลบ 24
5.2 ส่วนที่ทำการควบคุม และสร้างกระแสชดเชย 24
5.2.1 วงจรแบง แบง 25
5.2.2 วงจรเดดไทม์ 25
5.2.3 วงจรขับเกท 26
5.2.4 วงจรตรวจจับกระแส 27
5.2.5 วงจรกำลัง 27
5.2.6 วงจรไฟเลี้ยง 28
บทที่ 6 ผลการทดลอง 29
6.1 การจำลองวงจรชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ 29
6.2 การชดเชยในวงจรต้นแบบ 31
6.3 การทดลองในวงจรต้นแบบ 34
6.3.1 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R 35
6.3.2 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R, L 38
6.3.3 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด L 41
6.3.4 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R, C 44
6.3.5 เมื่อโหลดเป็นบริดจ์เร็กติไฟร์ 47
6.4 การทดสอบการตอบสนองเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง 50
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง 51
ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงกระแส i_s ที่เกิดจากกระแสที่ความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 2

รูปที่ 2.1 แสดงคลื่น Sinusoidal ที่ความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ 5

รูปที่ 2.2 แสดงแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส 7

รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน 8

รูปที่ 2.4 แสดงกำลังไฟฟ้า 9

รูปที่ 3.1 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ 11

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ 12

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ 12

รูปที่ 3.4 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ 13

รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกรองแอคทีฟ แบบฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 14

รูปที่ 4.2 แสดงบล๊อกไดอะแกรมการหากระแสชดเชย 16

รูปที่ 4.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมของการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีส 17

รูปที่ 4.4 แสดงการทำงานของวงจรฮีสเตอร์รีซีสเพื่อควบคุมกระแส 17

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรฮีสเตอร์รีซีส 18

รูปที่ 4.6 การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซีส 18

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟแรงดันระหว่าง V0 และ I ที่มีลักษณะเป็นฮีสเตอร์รีซีส 19

รูปที่ 5.1 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ แบบฉีดกระแส 20

รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ 21

รูปที่ 5.3 วงจรส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า cos (ωt) 22

รูปที่ 5.4 แสดงวงจรคูณ 23

รูปที่ 5.5 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำ 23

รูปที่ 5.6 แสดงวงจรลบ 24

รูปที่ 5.7 แสดงวงจรแบง แบง 25

รูปที่ 5.8 แสดงวงจรเผื่อเวลา 25

รูปที่ 5.9 แสดงวงจรขับเกท 26

รูปที่ 5.10 แสดงวงจรตรวจจับกระแส 27

รูปที่ 5.11 แสดงวงจรกำลัง 27

รูปที่ 5.12 แสดงวงจรไฟเลี้ยง 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่วิเคราะห์แบบลูปเปิด 29
รูปที่ 6.2 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$ กับ $v_s(t)$ 30
รูปที่ 6.3 แสดงกระแสแอคทีฟ $i_p(t)$ 30
รูปที่ 6.4 แสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ $i_f(t)$ 30
รูปที่ 6.5 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$ กับ $v_s(t)$ 30
รูปที่ 6.6 แสดงกระแสแอคทีฟ $i_p(t)$ 30
รูปที่ 6.7 แสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ $i_f(t)$ 31
รูปที่ 6.8 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$ 31
รูปที่ 6.9 สัญญาณ Ip คูณกับ cos (ωt) 32
รูปที่ 6.10 กระแสชดเชยโหลดโดโอด 32
รูปที่ 6.11 แสดงกระแสของโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ 33
รูปที่ 6.12 สัญญาณ $I_p\cos(\omega t)$ 33
รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณกระแสชดเชยสำหรับโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ 34
รูปที่ 6.14 แสดงวงจรที่ทำการทดลอง 35
รูปที่ 6.15 แสดง กระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 36
รูปที่ 6.16 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนแก้ไข 36
รูปที่ 6.17 แสดง กระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 37
รูปที่ 6.18 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 37
รูปที่ 6.19 แสดงโหลดไดโอด R, L 38
รูปที่ 6.20 แสดง กระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 39
รูปที่ 6.21 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 39
รูปที่ 6.22 แสดง กระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 40
รูปที่ 6.23 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 40
รูปที่ 6.24 แสดงโหลดไดโอด L 41
รูปที่ 6.25 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 42
รูปที่ 6.26 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 42
รูปที่ 6.27 แสดงกระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 43
รูปที่ 6.28 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 43
รูปที่ 6.29 แสดงโหลดไดโอด R, C 44
รูปที่ 6.30 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.31 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 45
รูปที่ 6.32 แสดงกระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 46
รูปที่ 6.33 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 46
รูปที่ 6.34 แสดงโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ 47
รูปที่ 6.35 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 48
รูปที่ 6.36 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 48
รูปที่ 6.37 แสดงกระแส Is หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 49
รูปที่ 6.38 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ 49
รูปที่ 6.39 แสดงการตอบสนองเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น จาก 300 วัตต์ เป็น 600 วัตต์ 50
รูปที่ 6.40 แสดงการตอบสนองเมื่อโหลดลดลงจาก 600 วัตต์ เป็น 300 วัตต์ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน และแบบอนุกรม 13

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข
และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด R 38

ตารางที่ 6.2 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข
และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด R , L 41

ตารางที่ 6.3 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข
และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด L 44

ตารางที่ 6.4 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข
และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด R, C 47

ตารางที่ 6.5 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข
และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

นับตั้งแต่มีการคิดค้นเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำขึ้นมา การใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตลอดมา ตั้งแต่เครื่องรับโทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การใช้งานในวงการอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งวงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ (bridge rectifier) ที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ การใช้อุปกรณ์เหล่านี้ก่อให้เกิดประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ความสะดวกสบายในชีวิตประจำวัน ฯลฯ แต่กลับก่อให้เกิดปัญหาแก่ระบบไฟฟ้าอย่างมากมาย นอกจากนี้ยังทำให้รบกวนการทำงานของอุปกรณ์หลายประเภทที่อยู่ในระบบไฟฟ้าเดียวกันอีกด้วย

เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นโหลดไม่เชิงเส้น (Nonlinear load) เหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนจากฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) นั่นคือโหลดไม่เชิงเส้นเหล่านี้จะทำให้รูปคลื่นของกระแส และแรงดันมีความผิดเพี้ยนไปจาก sinusoidal ซึ่งฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ก่อให้เกิดผลอันไม่เป็นที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพของ power factor ที่แย่ลง ฟิวส์ขาด รบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวต่อความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น

ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ ที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไปคือ การใช้วงจร LC passive filter ในการกรองฮาร์โมนิกส์ออกไป แต่อย่างไรก็ตาม LC passive filter ก็ยังไม่สามารถใช้แก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น Active Filter จึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว การจำแนกประเภทของ Active Filter ซึ่งจำแนกตามลักษณะของการต่อวงจรและลักษณะการทำงานของ Active Filter นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ Active Filter ชนิดแหล่งจ่ายกระแสแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายกระแสแบบอนุกรม ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบขนาน และชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบอนุกรม

การออกแบบ Active Filter นั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัย 3 ประการ คือ หลักการทำงานที่เหมาะสมกับชนิดของโหลด วิธีการควบคุม และวิธีการสร้างกระแสอ้างอิงให้มีความถูกต้อง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำงานของ Active Filter จะทำงานได้ดีเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับการเลือกปัจจัยทั้ง 3 ชนิดให้ถูกต้องเหมาะสม

อุปกรณ์ Active Filter นั้นเป็นอุปกรณ์ประเภทที่อาศัยอุปกรณ์การสวิตชิ่ง โดยอาศัยหลักการ bi-directional power flow ไปมากับโหลดไม่เชิงเส้น โดยผ่านทางอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ที่มีการควบคุมแบบ PWM ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการทำงานชนิดที่ใช้ลักษณะการควบคุมแบบ Hysteresis โดยเป็น Active Filter ประเภทแหล่งจ่ายกระแสแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ปัญหา และที่มา

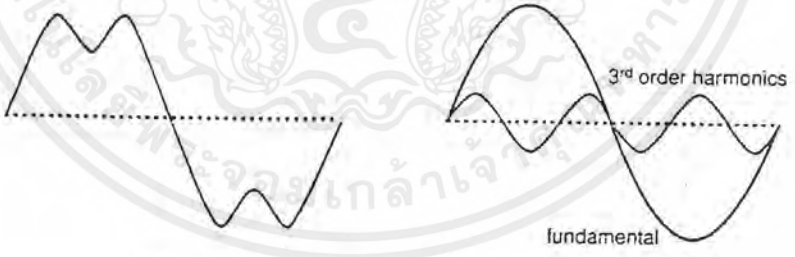
เนื่องจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์เพื่อการใช้งาน มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งในวงการอุตสาหกรรม การสื่อสาร ฯลฯ เป็นผลให้กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonics current) ในระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพราะการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้น (Nonlinear load) ทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์สู่ระบบไฟฟ้า จนกลายเป็นปัญหาใหญ่ที่หลายประเทศต้องหาทางแก้ไข แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active filter) จึงถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยอาศัยหลักการสร้างกระแสขึ้นมาชดเชยกับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดไม่เชิงเส้นสร้างขึ้น เพื่อให้กระแสที่แหล่งจ่ายมีคุณภาพที่ดีขึ้นโดยอาศัยเทคนิคต่างๆมาประกอบกัน

ตามปกติกระแสที่เกิดจากโหลดไม่เชิงเส้น (i_s) จะประกอบด้วย

1. กระแสที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Sinusoidal Current: i_{s1})
2. กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Sinusoidal Current: i_h)

$$i_s = i_{s1} + i_h \qquad \ldots (1.1)$$

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สร้างออกมาดังรูปที่ 1.1 จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยน (voltage distortion) ทำให้กลายเป็นปัญหาใหญ่ในหลายประเทศ ซึ่งจะต้องหาวิธีแก้ไข เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหานี้



(ก) (ข)

รูปที่ 1.1 (ก) แสดงกระแส i_s ที่เกิดจากกระแสที่ความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3
(ข) แสดงกระแสความถี่มูลฐาน i_{s1} และกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 i_h

การทำงานของแอคทีฟฟิลเตอร์ เพื่อการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ สามารถแบ่งได้เป็นประเภทที่มีการชดเชยรีแอคทีฟเพาเวอร์ (reactive power) และไม่ชดเชยรีแอคทีฟเพาเวอร์ ซึ่งในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะศึกษาแอคทีฟฟิลเตอร์ ที่ชดเชยทั้งกระแสฮาร์โมนิกส์ และรีแอคทีฟเพาเวอร์โดยอาศัยหลักการการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ (harmonic current injection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎี และหลักการของการแก้ไขปัญหากระแสฮาร์โมนิกส์ และปรับปรุงค่าอินพุทเพาเวอร์แฟคเตอร์
2. ออกแบบวงจร และจำลองการทำงาน (Simulation) ของวงจรที่ใช้ชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ ด้วยโปรแกรม Simulink
3. สร้างวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ ที่ใช้การฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ เพื่อแก้ไขกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่เกิดจากโหลดไม่เชิงเส้น
4. วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ ของวงจรต้นแบบ กับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย Simulink

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎี และออกแบบวงจรที่ใช้ในการแก้ไขปัญหากระแสฮาร์โมนิกส์ และจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink ว่าสามารถทำงานได้จริง หรือไม่ เพื่อนำไปสร้างวงจรต้นแบบ
2. สร้างวงจรต้นแบบ เพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเป็นการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ให้กับโหลดที่เป็น ไดโอดเร็กติไฟร์ และบริดจ์เร็กติไฟร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ฮาร์โมนิกส์ และเพาเวอร์แฟกเตอร์

2.1 ฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอันมีสาเหตุมาจากการนำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็น non-linear load มาประยุกต์เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น การนำไทริสเตอร์มาประยุกต์เพื่อการขับมอเตอร์ ตลอดจนการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ใช้งานในอาคารบ้านเรือน เช่น อุปกรณ์เครื่องรับโทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หรือแม้แต่ วงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ (bridge rectifier) 1 เฟส ก็สามารถก่อให้เกิดปัญหา ฮาร์โมนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้า ในการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์นั้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของฮาร์โมนิส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า รูปคลื่นของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น สมการของฮาร์โมนิกส์ในรูปทั่วไป คุณภาพและการวัดคุณภาพของรูปคลื่น

2.1.1 ลักษณะและพฤติกรรมของฮาร์โมนิกส์

โดยทั่วไปแล้ว ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับนั้น รูปคลื่นของกระแส และแรงดันจะถูกพิจารณาให้มีลักษณะเป็น sinusoidal ในอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติจริง เกือบเป็นไปไม่ได้ที่ลักษณะของรูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีความเป็น sinusoidal 100% เนื่องจากรูปคลื่นดังกล่าวนั้นจะมีความบิดเบือนไปจาก sinusoidal อันมีสาเหตุมาจาก การใช้งานกับโหลดไม่เชิงเส้น การรบกวนจากสัญญาณภายนอกหรือจากระบบอื่นๆ ทำให้ผลที่เกิดขึ้นคือ รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยน

หากนำรูปคลื่นผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ จะพบว่ารูปคลื่นนั้นสามารถแยกออกมาเป็นรูปคลื่นที่ความถี่ต่างๆกัน นั่นคือ รูปคลื่นผิดเพี้ยนเกิดขึ้นมาจาก ผลรวมของรูปคลื่นที่มีความถี่ต่างๆ กัน โดยรูปคลื่นจะประกอบไปด้วย

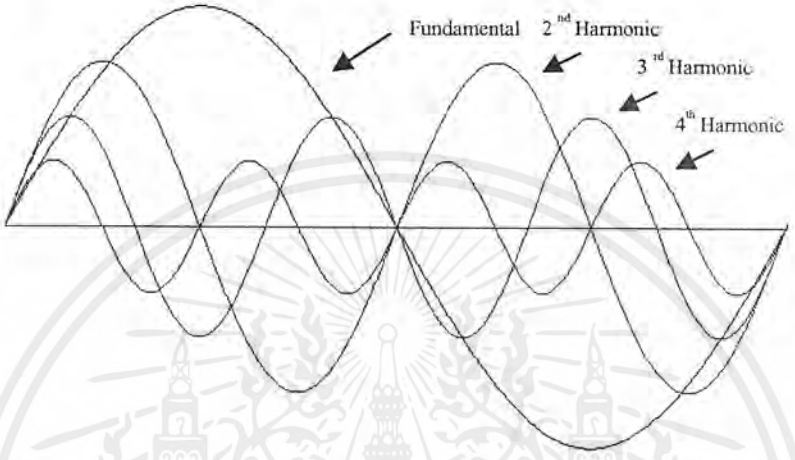
1. รูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่มูลฐาน
2. รูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

รูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่มูลฐานนั้น หมายถึง รูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่ต่ำสุดคือที่ความถี่ f และรูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ หมายถึงรูปคลื่นไซนูซอยดัลที่ความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐานคือ 2f, 3f, 4f, ... และนอกจากนี้ ยังสามารถจำแนกรูปคลื่นที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ได้เป็นอีกสองประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์โมนิกส์คู่ หมายถึง รูปคลื่นที่มีจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานเป็นเลขจำนวนเต็มคู่ที่มากกว่า 1 คือรูปคลื่นที่ความถี่ 2f, 4f, 6f, ...

ฮาร์โมนิกส์คี่ หมายถึง รูปคลื่นที่มีจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานเป็นเลขจำนวนเต็มคี่ที่มากกว่า 1 คือรูปคลื่นที่ความถี่ 3f, 5f, 7f, ...



รูปที่ 2.1 แสดงคลื่น Sinusoidal ที่ความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

2.1.2 สมการทั่วไปของรูปคลื่น

ในการหาสมการทั่วไปของรูปคลื่นนั้น หากพิจารณารูปคลื่นโดยทั่วไปพบว่าเกิดจาก รูปคลื่นที่ความถี่มูลฐาน และที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆมารวมกัน ซึ่งในแต่ละรูปคลื่นมีค่าสูงสุด และค่ามุมแตกต่างกัน ดังนั้น ที่ความถี่มูลฐานจะเขียนสมการได้คือ

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \theta_1) \quad \ldots (2.1)$$

เมื่อ e_1 คือ สมการของรูปคลื่นที่ความถี่มูลฐาน

E_{1m} คือ ค่าสูงสุดของรูปคลื่น

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมที่ความถี่มูลฐาน

θ_1 คือ ค่ามุมเฟสของรูปคลื่น

ในทำนองเดียวกันสามารถเขียนสมการของรูปคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ได้คือ

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \theta_1)$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(2\omega t + \theta_2)$$

$$\ldots$$

$$\ldots$$

$$e_n = E_{nm} \sin(n\omega t + \theta_n) \quad \ldots (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น สมการของรูปคลื่นโดยทั่วไปคือ

$$\begin{aligned} e &= e_1 + e_2 + e_3 + \ldots + e_n \\ &= E_{1m} \sin(\omega t + \theta_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \theta_2) + \ldots \\ &\quad + E_{nm} \sin(n\omega t + \theta_n) \end{aligned} \quad \ldots \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกัน รูปคลื่นกระแสโดยทั่วไปคือ

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + i_3 + \ldots + i_n \\ &= I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + \ldots \\ &\quad + I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \end{aligned} \quad \ldots \quad (2.4)$$

จากทั้งสองสมการ (2.3) และ (2.4) จะสามารถหาค่าความต่างเฟส ที่ความถี่ต่างๆได้คือ ค่า $(\theta_1 - \phi_1)$ จะเป็นค่าความต่างเฟสของความถี่ที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้น ในทำนองเดียวกัน ค่าความต่างเฟสที่ความถี่ $n\omega$ จะมีค่าเป็น $(\theta_n - \phi_n)$ นั่นเอง

2.1.3 แหล่งกำเนิดและชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

ในการพิจารณาปัญหาเรื่องฮาร์โมนิกส์นั้น เนื่องจากฮาร์โมนิกส์มีสาเหตุมาจาก การใช้อุปกรณ์โหลดไม่เชิงเส้นดังนั้นในการมองปัญหา จึงพิจารณาให้โหลดไม่เชิงเส้นเหล่านั้น ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ให้แก่ระบบ ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นตามคุณลักษณะได้เป็น 2 ประเภทคือ

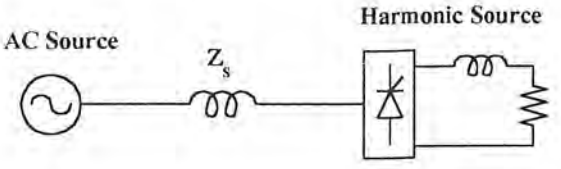
1. แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (แหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์)
2. แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์)

แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (แหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์)

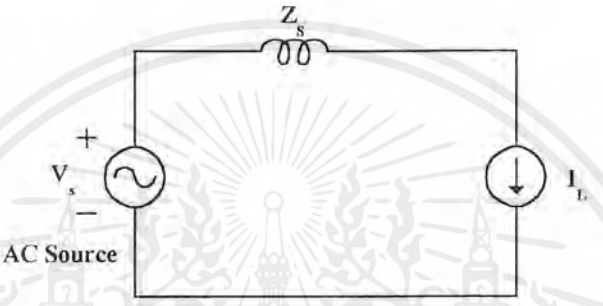
การเกิดฮาร์โมนิกส์ประเภทนี้มีสาเหตุมาจาก การทำงานที่มีลักษณะสวิตชิ่ง ที่รู้จักกันดีได้แก่ ไทริสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะวงจรการทำงานของวงจรเรียงกระแสโดยอาศัยไทริสเตอร์ที่มีตัวอินดักเตนท์ต่ออยู่ เพื่อให้กระแสไฟตรงมีลักษณะคงที่ ซึ่งวงจรนี้มีการกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นมา ทำให้รูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนจากความเป็นไซนูซอยดัล

เนื่องจากคุณลักษณะของกระแสที่เกิดขึ้นนี้ ประพฤติตัวเหมือนกับเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ ดังนั้นจึงเรียกลักษณะการเกิดฮาร์โมนิกส์ประเภทนี้ว่า แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส หรือแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

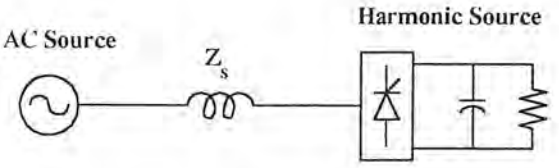
รูปที่ 2.2 แสดงแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส
(ก) วงจรไทริสเตอร์ที่ต่อกับโหลด RL ซึ่งทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์
(ข) วงจรสมมูลของรูป (ก)

แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน(แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์)

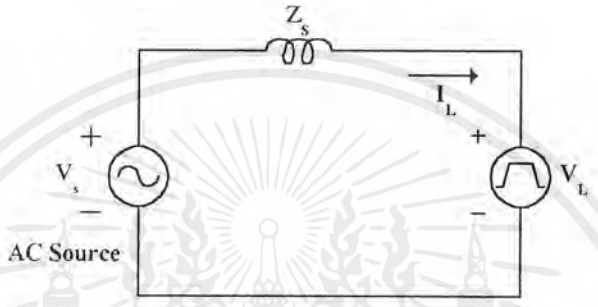
วงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ที่มีการต่อกับตัวคาปาซิเตอร์ แสดงวงจรโดยรูป 2.3 (ก) รูปคลื่นที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีความผิดเพี้ยน นอกจากนี้กระแสที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ก็ยังมีความผิดเพี้ยนสูงอีกมาก ดังนั้นค่าอิมพิแดนท์ทางด้านไฟสลับจึงมีผลอย่างมากต่อแอมปลิจูดของฮาร์โมนิกส์ ในขณะที่แรงดันมีคุณลักษณะขึ้นอยู่กับอิมพิแดนท์ทางด้านไฟสลับอยู่น้อย จึงทำให้มันประพฤติตัวเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันมากกว่าที่จะเป็นแหล่งจ่ายกระแส

ดังนั้นสามารถแสดงวงจรสมมูลของระบบวงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ได้ดังรูป 2.3(ข) และจากรูปจึงสามารถสรุปได้ว่า วงจรเรียงบริดจ์เร็กติไฟร์นี้ประพฤติตัวเป็น แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน หรือแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์ นอกจากนี้กระแสฮาร์โมนิกส์ที่กำเนิดขึ้นมาจากวงจรบริดจ์เร็กติไฟร์นั้น จะมีขนาดขึ้นอยู่กับวงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ที่ใช้ และขนาดอิมพิแดนท์ของไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งฮาร์โมนิกส์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน
(ก) วงจรบริดจ์เร็กติไฟร์ซึ่งทำตัวเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์
(ข) วงจรสมมูลของวงจรบริดจ์เร็กติไฟร์

2.2 การวัดค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น

ในการใช้งานอุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อินเวอร์เตอร์นั้น สัญญาณขาออกที่ได้ย่อมมีฮาร์โมนิกส์ประกอบอยู่ ดังนั้นเพื่อที่จะหาค่าคุณภาพของรูปคลื่นที่ได้ออกมา จะใช้คำนิยามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ

1. ฮาร์โมนิกส์แฟกเตอร์ ของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n ; HF_n (Harmonic factor of nth harmonic)

มีการนิยามโดย

$$HF = \frac{V_n}{V_1} \quad \ldots (2.5)$$

เมื่อ V_1 และ V_n เป็นค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน และที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าโททัลฮาร์โมนิกส์ดิสทรอชั่น ; THD (Total harmonic distortion)

แสดงการผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นระหว่างรูปคลื่นหนึ่ง กับองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานของรูปคลื่นนั้น มีการนิยามโดย

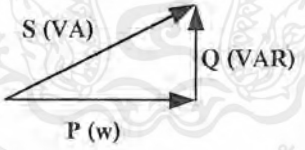
$$THD = \frac{1}{V}\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} V_n^2} \quad \ldots (2.6)$$

เมื่อ V1 และ Vn เป็นค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน และที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n ตามลำดับ

2.3 เพาเวอร์แฟกเตอร์

ในการนิยามค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นั้นสามารถนิยามได้โดยเพาเวอร์แฟกเตอร์คือ อัตราส่วนของกำลังงานที่จ่ายจริง ต่อค่ากำลังที่ปรากฏ แสดงดังรูปที่ 2.4 นั่นคือสามารถเขียนเป็นสูตรได้เป็น

$$p.f. = W / VA \quad \ldots (2.7)$$



รูปที่ 2.4 แสดงกำลังไฟฟ้า

หาก I_{S1} และ I_S แทนค่ากระแสประสิทธิผลของรูปคลื่นกระแสที่ความถี่มูลฐาน และกระแสขาเข้า ตามลำดับ และ V เป็นค่าแรงดันประสิทธิผล ดังนั้นจะได้ว่า

$$W = V_S I_{S1} \cos\theta \quad \ldots (2.8)$$

และ $$VA = V_S I_{S...} \quad \ldots (2.9)$$

นั่นคือ $$p.f. = \frac{I_{S1}}{I_S}\cos\theta \quad \ldots (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. Is1 / Is เป็นส่วนแสดงถึงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่เกิดจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส เรียกได้อีกอย่างว่า ค่าฟอร์มแฟกเตอร์

2. cos θ เป็นส่วนแสดงถึงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่เกิดจากรูปคลื่นของกระแส และแรงดันที่มีความต่างเฟสกัน

2.4 ผลกระทบจากการมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ

การเกิดค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำนั้น จะมีผลกระทบที่เกิดขึ้น 3 ทางคือ

1. ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายทองแดงจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากกระแสที่สูงขึ้น หมายความว่า ค่าความสูญเสียที่เกิดจะมีค่าแปรผันตาม ค่ากระแสกำลังสอง นั่นคือ มีค่าแปรผันตาม ($1/\cos^2 \theta$)
2. เนื่องจากค่าพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น แหล่งกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง ฯลฯ ปกติจะมีค่าแปรผันตามค่ากระแส นั่นคือ แปรตาม $1/\cos \theta$ ดังนั้นจึงต้องมีขนาดอุปกรณ์ที่ใหญ่ขึ้น
3. ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์แบบล้าหลังที่มีค่าต่ำๆ นั้น จะเป็นสาเหตุให้เกิด แรงดันดรอปมาก ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์เรกูเรชั่นชนิดพิเศษเพื่อให้แรงดันที่ดรอปอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แอคทีฟฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากปริมาณการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นแอคทีฟฟิลเตอร์จึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น แอคทีฟฟิลเตอร์นั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการต่อวงจรคือ

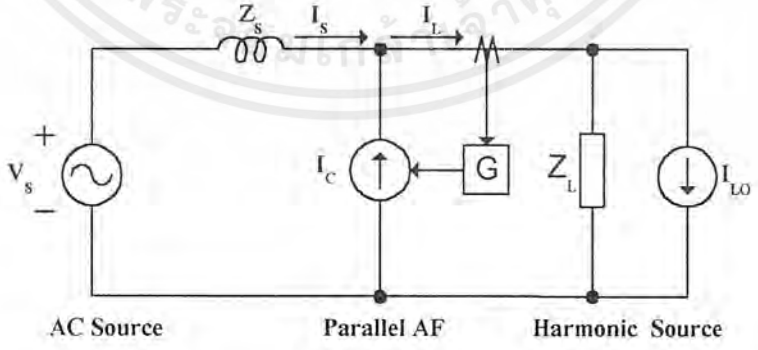
1. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน
2. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

3.1 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน

แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน เป็น อินเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการ พีดับบลิวเอ็ม ที่ต่อขนานกับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ เพื่อฉีดกระแสชดเชยฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเป็นกระแสที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีเฟสตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นที่ระบบไฟฟ้าฝั่งไฟสลับ ดังนั้นกลไกสำคัญของการทำงานจึงอยู่ที่ความสามารถในการตรวจจับ และคำนวณกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะทำการชดเชยให้ถูกต้อง ซึ่งเป็นส่วนของวงจรควบคุม

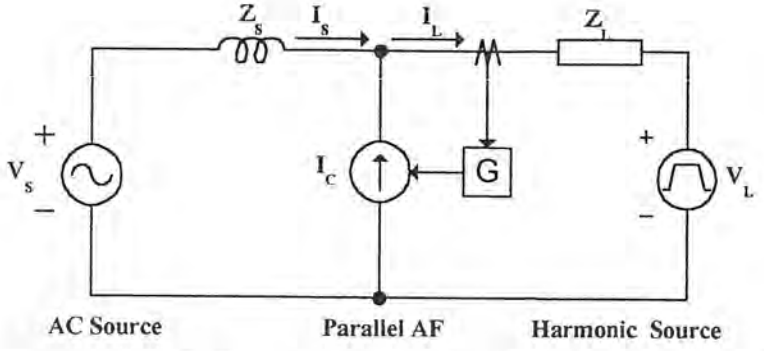
แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สามารถแบ่งตามประเภทการทำงานได้อีก 2 ประเภท คือ

1. ใช้สำหรับ แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 3.1
2. ใช้สำหรับ แหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



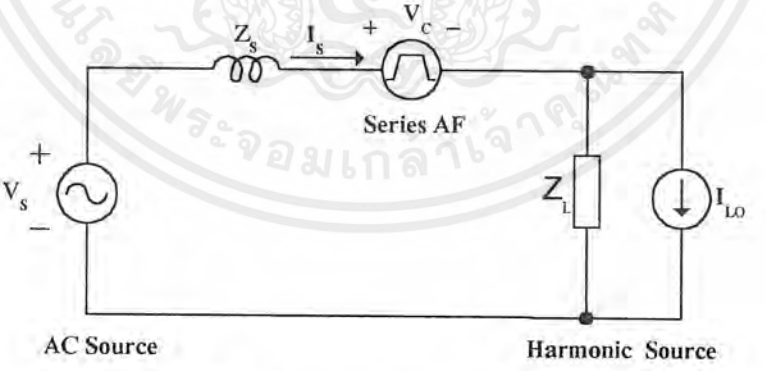
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์

3.2 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม จะเป็นการต่อวงจรแบบอนุกรมระหว่าง แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ กับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่เป็นโหลด เพื่อทำการบังคับกระแสแหล่งจ่ายให้มีความเป็น ไซนูซอยดัล โดยแอคทีฟฟิลเตอร์อนุกรมนี้ จะทำหน้าที่เป็นอิมพิแดนท์สูง กับกระแสฮาร์โมนิกส์ เพื่อกั้นขวางไม่ให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลจากโหลด ไปสู่แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับไปสู่โหลดได้

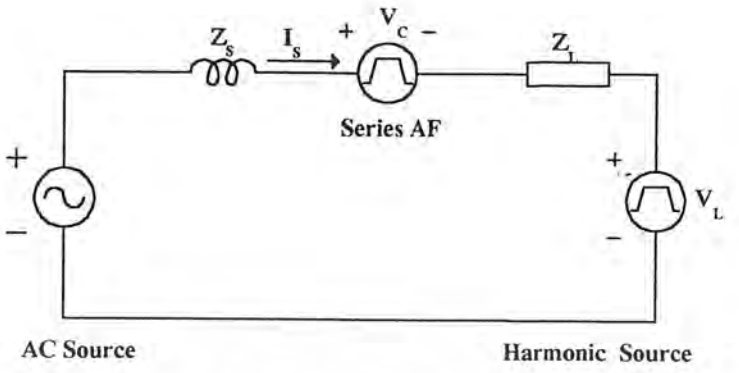
แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรมนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทเช่นกันคือ

1. ใช้สำหรับโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 3.3
2. ใช้สำหรับโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 3.4



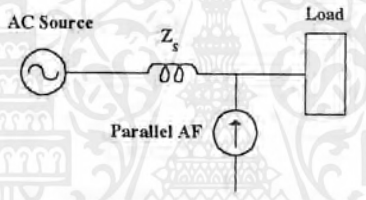
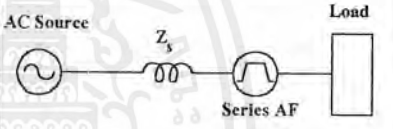
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน และแบบอนุกรม

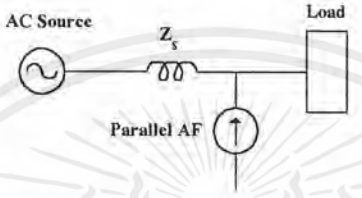
คุณลักษณะ	แอคทีฟฟิลเตอร์ แบบขนาน	แอคทีฟฟิลเตอร์ แบบอนุกรม
รูป		
หลักการทำงาน	ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส	ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน
โหลดที่ใช้งาน	- โหลดอินดักทีฟ - โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส - โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์	- โหลดคาปาซิทีฟ - โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน - โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์
คุณลักษณะการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์	ทำงานได้ดี และไม่ขึ้นกับอิมพิแดนท์ของแหล่งจ่าย (Z_S) ในกรณีที่โหลดเป็นแหล่งจ่ายกระแส	ทำงานได้ดี และไม่ขึ้นกับอิมพิแดนท์ของแหล่งจ่าย และ อิมพิแดนท์ของโหลด ในกรณีที่ใช้กับโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

แอคทีฟฟิลเตอร์ที่จะนำมาศึกษาใช้งานในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาแอคทีฟฟิลเตอร์ให้เป็น แหล่งจ่ายกระแสที่ต่อขนานอยู่กับโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ ซึ่งหลักการที่จะนำมาใช้งานจะเป็นหลักการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเป็นการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีขนาดเท่ากับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นแต่มีเฟสตรงข้ามกับกระแสฮาร์โมนิกส์นั้น เพื่อไปหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ทฤษฎี และหลักการ

แอคทีฟฟิลเตอร์ที่ทำการศึกษาในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นแอคทีฟฟิลเตอร์ที่ใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเป็นการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีขนาดเท่ากับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นแต่มีเฟสตรงกันข้ามเพื่อไปหักล้างกันกับกระแสฮาร์โมนิกส์นั้น



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกรองแอคทีฟ แบบฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

4.1 การวิเคราะห์กระแส

ในการหากระแสที่จะทำการชดเชยให้แก่ระบบนั้น ก่อนอื่นจำเป็นต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะ และพฤติกรรมของกระแสโดยทั่วๆไปก่อน ว่ากระแสที่เกิดนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบใดอยู่บ้าง เพื่อหาวิธีการในการสร้างกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่จะใช้ชดเชยกับกระแสฮาร์โมนิกส์ของระบบ

โดยทั่วไปแล้ว กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรสามารถที่จะแยกแยะได้เป็นองค์ประกอบต่างๆ คือ กระแสไฟตรง กระแสแอคทีฟ หรือกระแสที่ความถี่มูลฐาน กระแสรีแอคทีฟ และกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนได้ดังสมการคือ

$$i_l(t) = i_o(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad \ldots (4.1)$$

เมื่อ i_o คือ ไฟกระแสตรง (DC Component)

i_p คือ กระแสที่มีเฟสตรงกันกับแรงดันของแหล่งจ่าย

i_q คือ กระแสรีแอกทีฟ (Reactive current)

i_h คือ กระแสฮาร์โมนิกส์

จากสมการ (4.1) นำมาวิเคราะห์ให้ละเอียดจะได้ว่า องค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมี 2 องค์ประกอบย่อยๆ คือ ฮาร์โมนิกส์คู่ และ ฮาร์โมนิกส์คี่ สามารถขยายสมการ (4.1) ได้ดังสมการที่ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_L(t) = I_o + I_p\cos(\omega t) + I_q\sin(\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} I_{2j}\cos(2j\omega t + \phi_{2j}) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k+1}\cos((2k+1)\omega t + \phi_{2k+1}) \quad \ldots (4.2)$$

จากการพิจารณาสมการ (4.2) จะเห็นได้ว่า กระแสชดเชยที่จะต้องจ่ายเพื่อไปหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกส์ i_r คือ ค่ากระแสโหลด ลบด้วยค่ากระแสแอคทีฟนั่นเอง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$i_r(t) = i_L(t) - i_p(t) = i_L(t) - I_p\cos(\omega t) \quad \ldots (4.3)$$

จากสมการ (4.3) พบว่า องค์ประกอบที่ต้องทำการหาค่า เพื่อให้ได้กระแสชดเชย จะประกอบไปด้วย i_l, i_p, และ cos (ωt) ซึ่งองค์ประกอบ i_l และ cos (ωt) นั้นสามารถหาค่ามาได้ไม่ยากนัก แต่ค่า i_p นั้น ยังไม่อาจได้มาโดยตรง จึงต้องทำการวิเคราะห์ สมการที่ (4.2) โดย

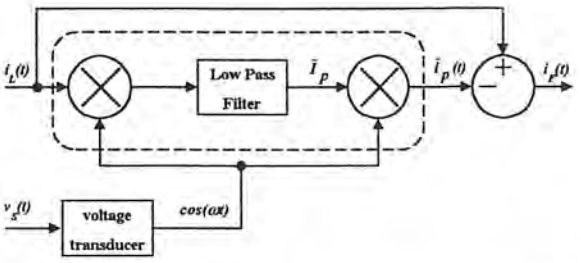
จากสมการที่ (4.2) นำ cos (ωt) มาคูณทั้งสมการ จะได้ว่า

$$i_L(t)\cos(\omega t) = I_o\cos(\omega t) + \frac{I_p}{2}[1+\cos(2\omega t)] + \frac{I_q}{2}\sin(2\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty}\frac{I_{2j}}{2}[\cos((2j\omega t+1)+\phi_{2j}) + \cos((2j\omega t-1)+\phi_{2j})] + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{I_{2k+1}}{2}[\cos((2k+2)\omega t+\phi_{2k+1}) + \cos(2\omega t+\phi_{2k+1})] \quad \ldots (4.4)$$

พิจารณาสมการ (4.4) พบว่า หากสามารถกำจัดพจน์ที่ขึ้นกับความถี่ทั้งหมด ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเหลือเพียง พจน์ $i_p/2$ นั่นคือสามารถหาค่า i_p ที่ต้องการได้ ซึ่งในทางปฏิบัติก็สามารถกระทำได้โดย นำสัญญาณ i_l มาผ่านวงจรคูณเพื่อทำการคูณกับ cos (ωt) จากนั้นจึงนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำที่มีความถี่คัทออฟที่ ω ก็จะสามารถได้ค่า i_p คือค่ากระแสแอคทีฟตามต้องการ

เมื่อสามารถหาค่าตัวแปรทั้งสามตัวครบแล้ว ก็สามารถหาค่ากระแสที่จะทำการชดเชยได้ หากนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังแสดงในรูป 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงบล๊อกไดอะแกรมการหากระแสชดเชย

แต่การทำงานในบล๊อกไดอะแกรมนี้ มีข้อควรพิจารณา คือ

1. ขนาดของสัญญาณแรงดันอ้างอิง และค่าเกณฑ์ของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำจะมีผลต่อขนาดของ $\bar{i}_p$
2. หากมีการเลื่อนเฟสเพียงเล็กน้อย ที่อุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน ก็จะมีผลต่อความแม่นยำของวงจร
3. หากแรงดันแหล่งจ่าย มีการผิดเพี้ยนเกิดขึ้น ก็จะมีผลทำให้ค่า cos ωt ที่ได้มา ซึ่งต้องนำไปใช้เพื่อการคำนวณสัญญาณอ้างอิง จะทำให้สัญญาณอ้างอิงที่ได้ มีความผิดเพี้ยนไป

4.2 การควบคุมกระแสโดยใช้วงจรควบคุมแบบฮิสเตอร์ริซีส

4.2.1 เทคนิคการควบคุมกระแส

เนื่องจากเทคนิค พีดับบลิวเอ็มนั้น เป็นการควบคุมแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้น ในการควบคุมกระแสขาออกโดยใช้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มนี้ จึงสามารถทำได้โดยอาศัยการป้อนกลับกระแส โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแส เพื่อป้อนสัญญาณกระแสเข้าสู่วงจรควบคุม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกระแสที่ทำการจ่ายจริงกับกระแสอ้างอิงและกระแสผิดพลาดเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกำหนดการสวิตชิ่งที่เหมาะสม จากนั้น จึงผ่านสัญญาณที่ได้ไปป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ ในที่สุด ทำให้กระแสผิดพลาด และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ก็จะเป็นพีดับบลิวเอ็มด้วย ซึ่งก็จะไปทำการควบคุมรูปคลื่นกระแสขาออกให้เหมือนกับกระแสอ้างอิงนั่นเอง

กลไกการควบคุมกระแสให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น ในทางปฏิบัติก็เป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก เนื่องจากในการใช้งานจริงไม่สามารถที่จะไปกำหนดลักษณะของโหลดที่ตายตัวได้ทำให้กระแสของโหลดก็เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย ดังนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นเพื่อให้การควบคุมกระแสได้ผลดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. มีคุณลักษณะยูติไลต์เซชั่นของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

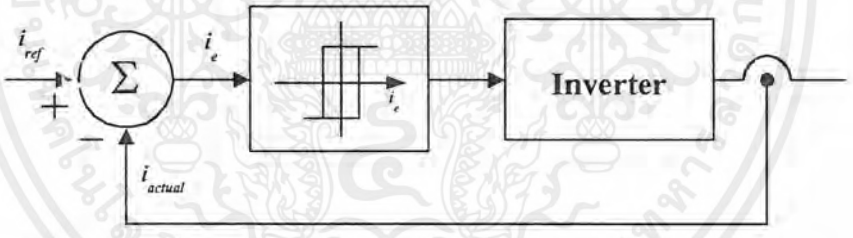
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2. มีกระแสเออเรอร์ที่มีค่าต่ำๆ ทั้งในสภาวะสแตติกและไดนามิก ซึ่งหมายถึงค่าผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบกระแสอ้างอิง และกระแสที่จ่ายจริงมีค่าต่ำทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะการทำงานแบบทรานเซียน
3. มีค่าการสูญเสียจากการสวิตชิ่งต่ำในวงจรอินเวอร์เตอร์
4. ต้องมีค่า เวลาที่เพียงพอ เพื่อให้ระบบควบคุมและการสวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างเหมาะสม

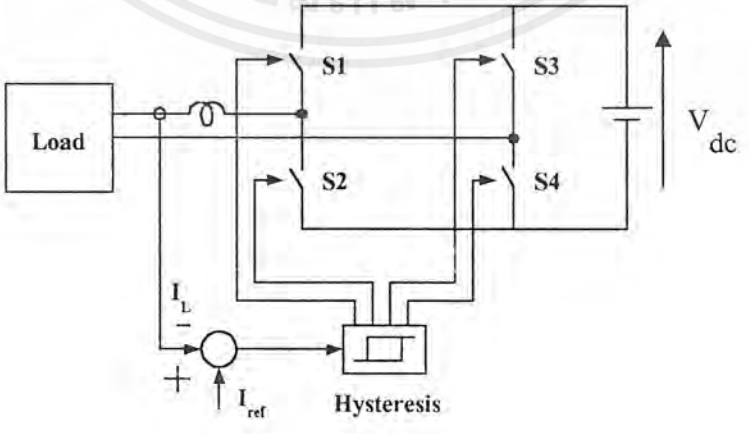
จากคุณลักษณะทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมา พบว่า ข้อ 1,3 และ 4 เกี่ยวข้องกับเทคนิคการควบคุมแรงดันแบบพีดับบลิวเอ็ม และยังเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับความถูกต้องของการทำงานของอุปกรณ์ เพราะฉะนั้น คุณลักษณะของอุปกรณ์ที่เชื่อถือได้และเทคนิคในการใช้อุปกรณ์เหล่านั้นให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงจึงมีความสำคัญมาก

4.2.2 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีส

ลักษณะของบล็อคไดอะแกรมแสดงดังรูป 4.3 และการทำงานของวงจรดังรูป 4.4 จะมีชื่อเรียกว่า การควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซีส



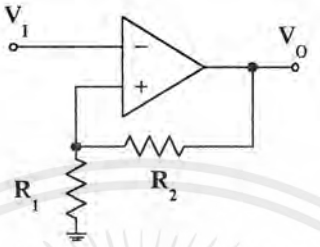
รูปที่ 4.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมของการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีส



รูปที่ 4.4 แสดงการทำงานของวงจรฮีสเตอร์รีซีสเพื่อควบคุมกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
36988

วงจรฮีสเตอร์รีซีส สามารถกำหนดขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสได้จากการเลือกค่า ความต้านทาน R1 และ R2 ตามรูปที่ 4.5 โดยถ้าขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสมีช่วงแคบ จะทำให้การควบคุมกระแสใกล้เคียงตามที่ต้องการมากที่สุด

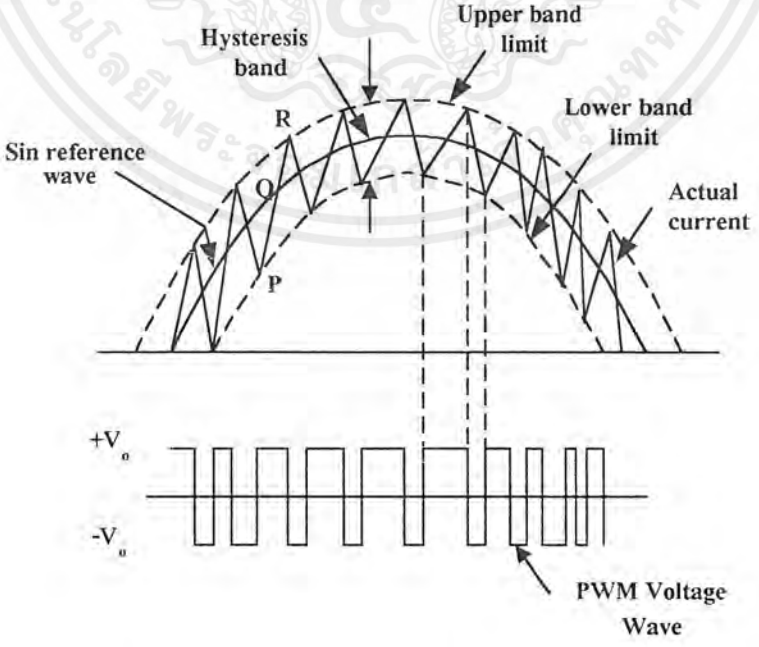


รูปที่ 4.5 แสดงวงจรฮีสเตอร์รีซีส

$$V_O = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad \ldots (4.5)$$

4.2.3 การทำงาน

กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์จะถูกตรวจจับ และถูกนำมาเปรียบเทียบกับลูกคลื่นของกระแสอ้างอิงที่ต้องการ จากนั้นผลของการเปรียบเทียบที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมกระแส ซึ่งตัวควบคุมกระแสนี้จะทำการผลิตสัญญาณ เพื่อป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.6

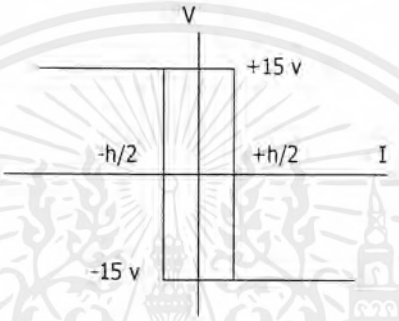


รูปที่ 4.6 การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.6 จะเห็นได้ว่า จะเป็นลักษณะสัญญาณควบคุมกระแสของสวิตช์ และคุณลักษณะของฮิสเตอร์รีซีสลูปนั้นจะเป็นดังสมการ

$$V_{out} = \begin{cases} -15V & \text{ถ้า } \Delta i < -\frac{h}{2} \\ 15V & \text{ถ้า } \Delta i > \frac{h}{2} \end{cases} \quad \ldots (4.6)$$



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟแรงดันระหว่าง V0 และ I ที่มีลักษณะเป็นฮีสเตอร์รีซีส

เมื่อ h แสดงความกว้างของลูป

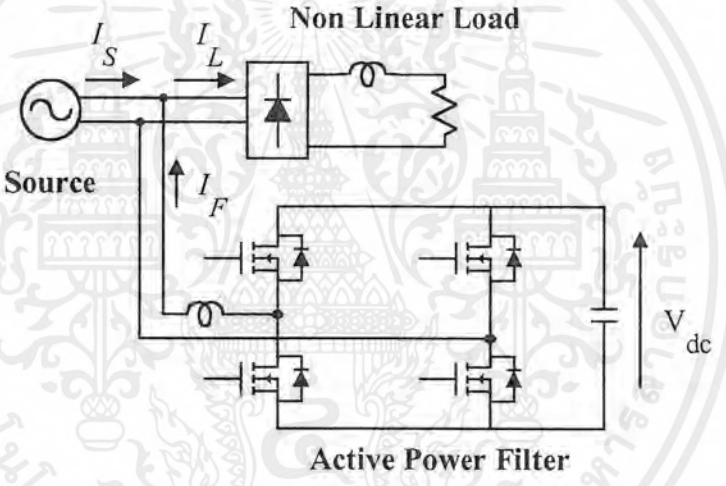
จากสมการถ้าค่าของ $-h/2 \le \Delta I \le h/2$ นั้น จะให้ค่าของ สัญญาณเอาท์พุทไม่เปลี่ยนแปลง ความกว้างของลูป h สามารถพิจารณาเป็นความกว้างของทอร์เลอร์แรนด์แบนของกระแส I เพราะตราบใดที่กระแสเออร์เรอร์ยังอยู่ในช่วงของแบนนี้ การทำงานของตัวควบคุมก็จะยังให้ค่าเอาท์พุทที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่หากค่าเออร์เรอร์ที่ได้มีค่าอยู่สูงเกินไป เช่นในกรณีกระแสที่จ่ายจริงอยู่ต่ำกว่าลูกคลื่นของกระแสอ้างอิงเกินค่า h/2 ผลลัพธ์ที่ได้จะกลายเป็น -15 ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากระแสขาออกมีค่าเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน จะได้ +15 เมื่อกระแสขาออกมีค่าเกิน –h/2 ซึ่งจะทำให้กระแส I ลดลง การทำงานทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูป 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การสร้าง และการออกแบบ

ปัญหาของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น จากการใช้งานทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์สวิตชิ่ง จะทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำลง และกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะมีปริมาณมากขึ้นซึ่งสร้างปัญหาแก่ระบบไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องแก้กระแสฮาร์โมนิกส์ และปรับปรุงเพาเวอร์แฟคเตอร์

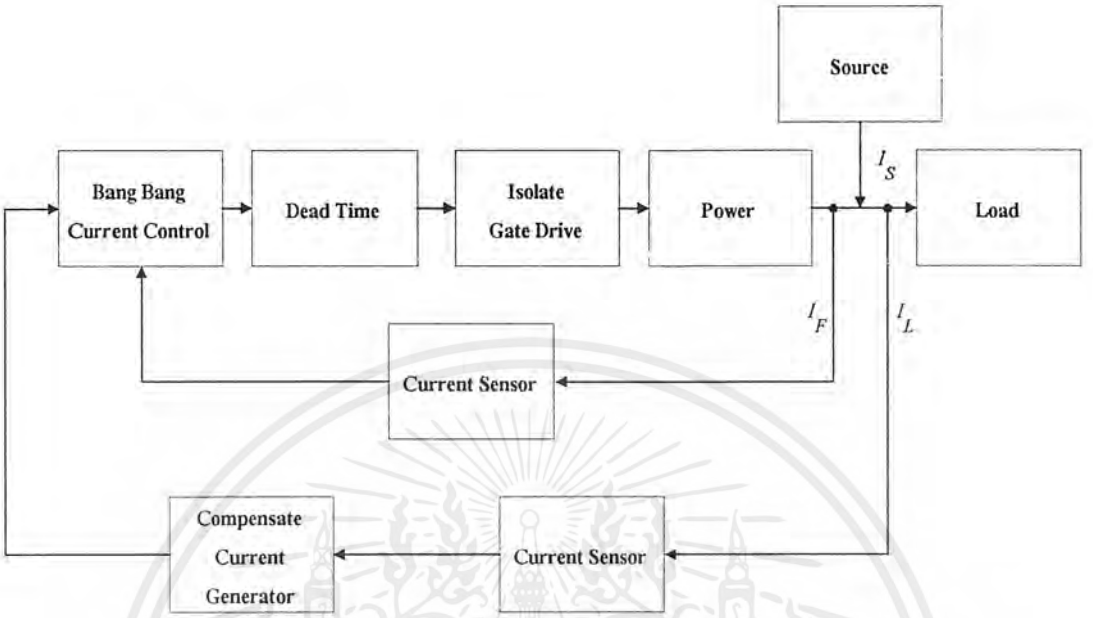
วงจรที่จะนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้คือ วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ แบบฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ แบบฉีดกระแส

การทำงานของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์จะประกอบไปด้วย ส่วนที่สร้างกระแสชดเชยเพื่อจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ชดเชยให้แก่ระบบ และส่วนของการควบคุมกระแส เพื่อให้จ่ายกระแสที่มีลักษณะตามที่ต้องการเพื่อชดเชยฮาร์โมนิกส์ โดยนำสัญญาณควบคุมที่ได้ไปควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์ ที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่เพื่อจ่ายพลังงานที่มีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ และส่วนกระแสรีแอคทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์

วงจร และส่วนประกอบต่างๆ

ในการทำงานของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์สามารถ แยกส่วนประกอบการทำงานได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณกระแสชดเชย

   การทำงานในส่วนนี้ประกอบด้วย

   - ส่วนที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า
   - วงจรคูณ
   - วงจรกรองความถี่ต่ำ
   - วงจรลบ

2. ส่วนที่ทำการควบคุม และสร้างกระแสชดเชย

   การทำงานในส่วนนี้ประกอบด้วย

   - วงจรแบง แบง
   - วงจรเผื่อเวลา (Dead Time)
   - วงจรขับเกท (Gate Drive)

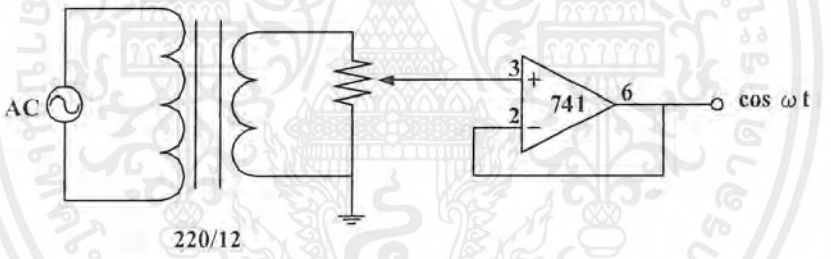
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรตรวจจับกระแส (Curretn Sensor)
- วงจรกำลัง
- วงจรไฟเลี้ยง

5.1 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชย

เป็นส่วนที่ทำการสร้างกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่แอกทีฟฟิลเตอร์ เพื่อทำการฉีดกระแสให้แก่โหลดฮาร์โมนิกส์ ในส่วนนี้มีส่วนที่เป็นอินพุตอยู่ 2 องค์ประกอบที่จะนำมาคำนวณในวงจรสร้างกระแสชดเชย คือ กระแสโหลด และ แรงดันของแหล่งจ่าย จึงต้องทำการป้อนสัญญาณทั้งสองเข้ามา จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะทำงานตามรูปที่ 4.2 ซึ่งวงจรทั้งหมดจะประกอบไปด้วยส่วนที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

5.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

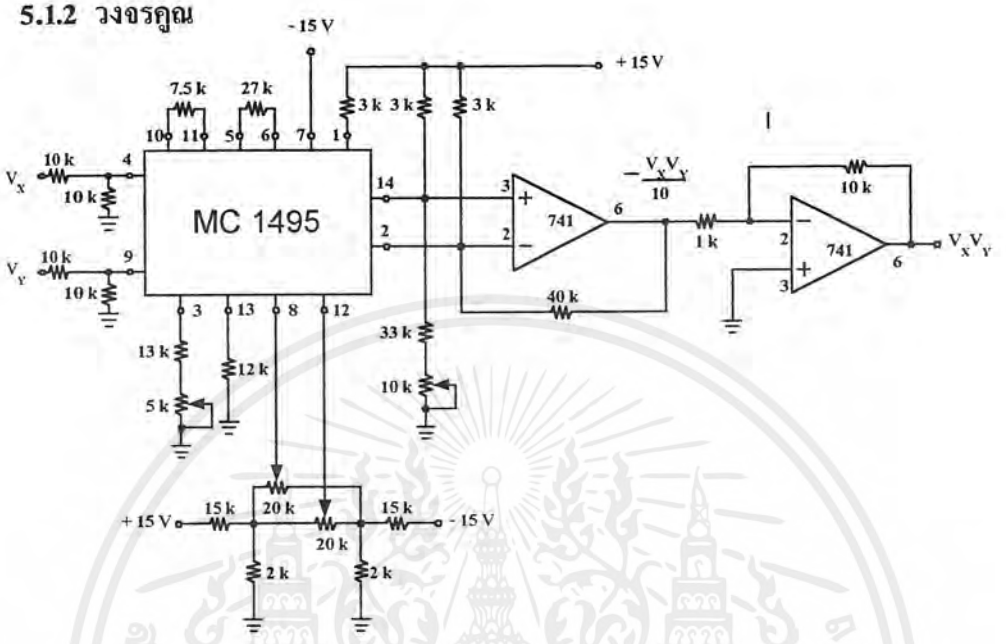


รูปที่ 5.3 วงจรส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า cos (ωt)

วงจรที่ใช้ในการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า cos (ωt) รูป 5.3 จะต้องมีเฟสตรงกับแหล่งจ่ายและแยกกราวนด์ ส่วนของวงจรกำลัง และวงจรควบคุม ด้วยการใช้ หม้อแปลง step down ให้มีแรงดัน 12 V แล้วเข้าตัวความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อเปลี่ยนแรงดันให้เหลือ 1 V จากนั้นป้อนเข้าวงจรบัฟเฟอร์ต่อไฟเลี้ยง ±15 V เพื่อนำสัญญาณไปใช้ในการหากระแสชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

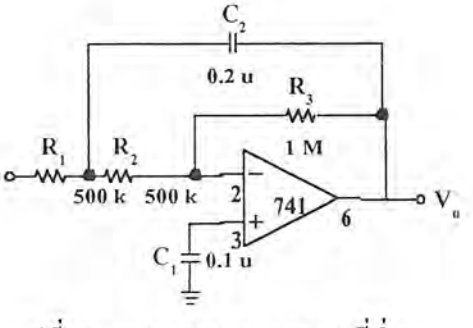
5.1.2 วงจรคูณ



รูปที่ 5.4 แสดงวงจรคูณ

การคำนวณหากระแสชดเชย จะต้องนำสัญญาณมาคูณกัน ซึ่งทำได้โดยใช้ไอซี MC 1495 ไอซีเบอร์นี้เป็นไอซีที่สามารถนำมาใช้ในการคูณ 4 – quadrant โดยการต่อดังรูป 5.4 ซึ่งการทำงานของวงจรประกอบด้วย ไฟเลี้ยงวงจร ±15 V สัญญาณอินพุท จะต้องไม่เกิน ±10 V และสัญญาณที่ออกจากไอซี MC 1495 จะมีขนาดลดลง10เท่า และมีลักษณะอินเวอร์ส ดังนั้นจึงนำสัญญาณที่ออกจาก MC 1495 นี้มาทำการขยายสัญญาณ 10 เท่าด้วยวงจรกลับเฟส เพื่อให้ได้ค่าเอาท์พุทที่ถูกต้อง

5.1.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ

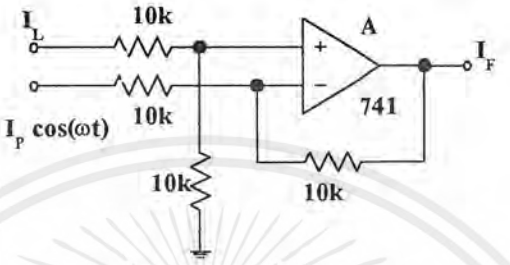


รูปที่ 5.5 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองความถี่ออกแบบให้มีความถี่คัทออฟที่ 25 Hz เพื่อให้ได้ขนาดของ IP ที่มีแต่ส่วนของ DC

5.1.4 วงจรลบ



รูปที่ 5.6 แสดงวงจรลบ

เมื่อได้สัญญาณ $I_P\cos(\omega t)$ จากการคำนวณ จะสามารถหา I_F ซึ่งเป็นกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะต้องชดเชย ได้จากวงจรลบดังรูป 5.6 โดยจ่ายไฟเลี้ยงออปแอมป์ ± 15 V

จากวงจรข้างต้น สามารถสร้างกระแสชดเชยได้ โดยการต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมรูป 4.1 โดยการนำสัญญาณ cos (ωt) จากหม้อแปลง step down และสัญญาณ i_L จากวงจรตรวจจับกระแส นำมาคูณกับ และผ่านวงจรส่วนกรองความถี่ต่ำ โดยออกแบบให้ความถี่คัทออฟที่ ωt เพื่อให้ได้สัญญาณส่วนของ DC ซึ่งเป็นขนาดของกระแส I_P เพื่อให้ผลที่ได้เป็นตามสมการ (4.4)

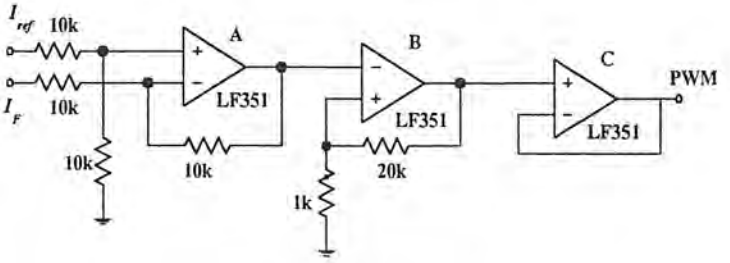
เมื่อได้ขนาดกระแส I_P นำมาคูณกับสัญญาณ cos (ωt) ได้เป็นสัญญาณของกระแสส่วนแอคทีฟ ดังนั้นจากสมการ (4.3) จะได้กระแสชดเชยโดยการนำเอาสัญญาณ i_L ลบกับ $i_P\cos(\omega t)$ ซึ่งกระแสชดเชยที่จะจ่ายให้กับระบบเพื่อแก้ไขกระแสฮาร์โมนิกส์จะประกอบด้วย กระแสรีแอคทีฟและกระแสฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

5.2 ส่วนที่ทำการควบคุม และสร้างกระแสชดเชย

การทำงานในส่วนนี้ จะเป็นการนำสัญญาณกระแสชดเชยที่ต้องทำการจ่ายจริง(กระแสชดเชยอ้างอิงซึ่งได้มาจากส่วนที่ 5.1) มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายอยู่ เพื่อไปคำนวณสร้างสัญญาณสวิตชิ่งโดยใช้วงจรแบงแบงหรือวงจรควบคุมแบบฮีสเตอร์ริซีส เพื่อนำไปป้อนเข้าสู่วงจรเผื่อเวลาและวงจรขับเกทเพื่อสร้างสัญญาณสวิตช์ไปป้อนอินเวอร์เตอร์ทำการสร้างกระแสชดเชยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 วงจรแบง แบง



รูปที่ 5.7 แสดงวงจรแบง แบง

- ส่วนวงจรลบ

โดยออปแอมป์ A เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณอ้างอิง (i_{ref}) กับสัญญาณกระแสที่ชดเชย (i_f) จะได้สัญญาณ error แล้วนำสัญญาณไปวงจรฮีสเตอร์รีซิส โดยจะจ่ายไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±15 V

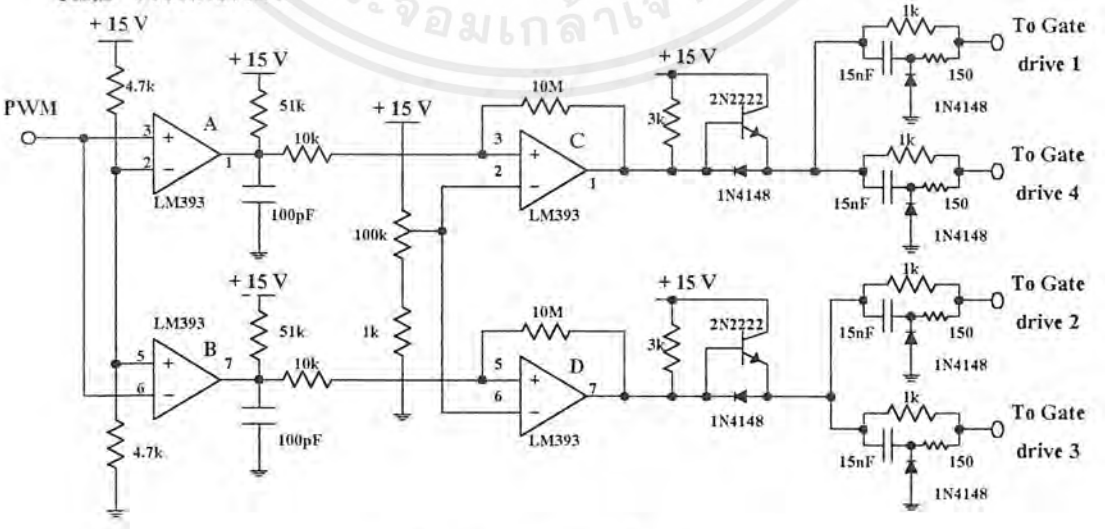
- ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมสวิตซ์

สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบของออปแอมป์ A มาผ่านวงจรฮีสเตอร์รีซิส คอมแพรเตอร์ ออปแอมป์ B โดยสัญญาณที่เข้ามาถ้ามากกว่าขอบเขตบน จะได้สัญญาณ +15 V แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาน้อยกว่าขอบเขตล่าง จะได้สัญญาณ –15 V โดยจะจ่ายไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±15 V

- ส่วนบัฟเฟอร์ (Buffer)

ออปแอมป์ C จะนำสัญญาณที่ผ่านจากออปแอมป์ B ผ่านออกไปโดยกันไม่ให้สัญญาณเกิดการผิดเพี้ยนมารบกวนทางออปแอมป์ C โดยจะจ่ายไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±15 V

5.2.2 วงจรเผื่อเวลา



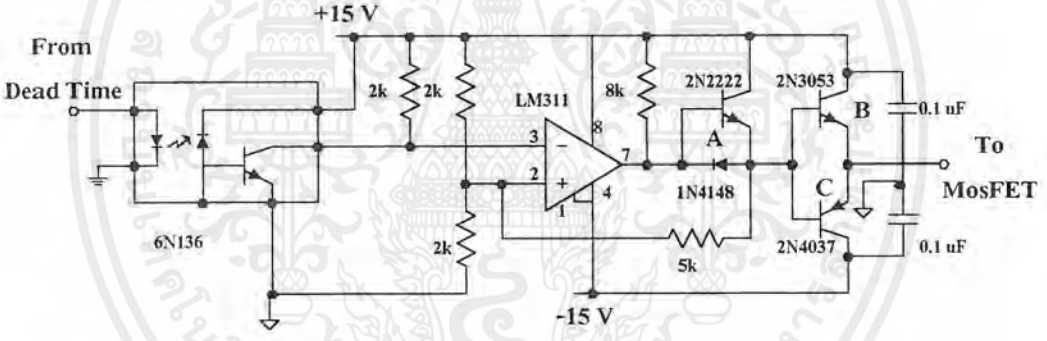
รูปที่ 5.8 แสดงวงจรเผื่อเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุมสวิตช์จะเข้ามาที่ออปแอมป์ A และ B จะมีลักษณะกลับกันเพื่อจะนำไปสวิตช์มอสเฟต 4 ตัว สัญญาณที่ออกมา จะมีลักษณะโค้งเล็กน้อย เมื่อผ่านออกไปจากออปแอมป์ A และ B เนื่องจากตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ทางเอาท์พุทของออปแอมป์ ลักษณะความโค้งที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่เลือกใช้จากค่าคงที่ทางเวลา (Time Constant) ไฟเลี้ยงที่จ่ายออปแอมป์ A และ B ±15 V

สัญญาณที่ได้จากออปแอมป์ A และ B จะนำไปเข้าที่ออปแอมป์ C และ D ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันที่สามารถปรับค่าได้จากตัวต้านทาน เพื่อปรับช่วงเวลาของเดทไทม์ (Dead Time) และนำสัญญาณไปขับทรานซิสเตอร์เพื่อขยายกระแส และผ่านส่วนสนับเบอร์ ก่อนที่จะได้สัญญาณไปวงจรขับเกท ไฟเลี้ยงที่จ่ายออปแอมป์ C และ D -15 V

5.2.3 วงจรขับเกท

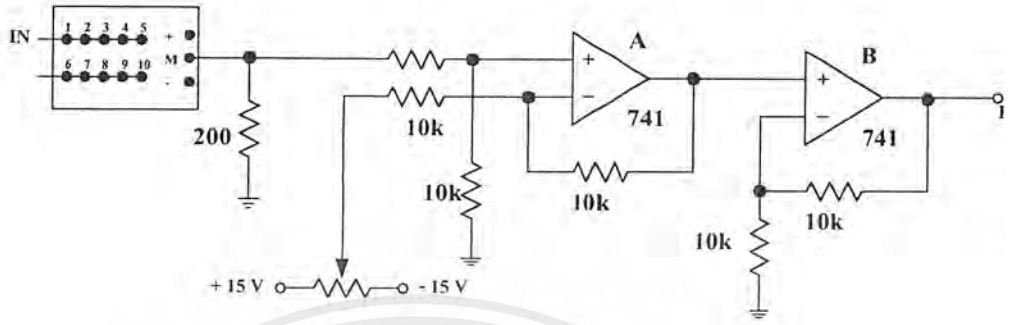


รูปที่ 5.9 แสดงวงจรขับเกท

สัญญาณที่จะนำไปขับวงจรเพาเวอร์ซึ่งเป็นสวิตช์ 4 ตัว จะต้องมีการแยกกราวนด์ระหว่างชุดควบคุม และชุดกำลังออกจากกัน โดยใช้ออปโต้ ไอโซเลทเตอร์ (Opto Isolator) ซึ่งนำสัญญาณที่ได้จากวงจรเผื่อเวลามาเข้า ออปโต้ ไอโซเลทเตอร์ 6N136 แล้วสัญญาณที่เข้าที่ออปแอมป์ ผ่านไปที่ทรานซิสเตอร์ A เพื่อขยายกระแสก่อน จึงนำไปขยายสัญญาณที่ทรานซิสเทตอร์ B และ C อีกทีหนึ่ง เพื่อที่จะสามารถนำสัญญาณไปขับมอสเฟตได้ ออปแอมป์จ่ายไฟเลี้ยง ±15 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 วงจรตรวจจับกระแส

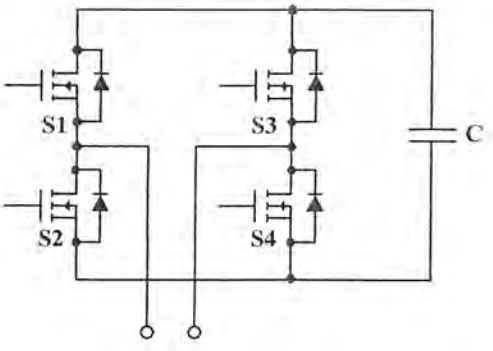


รูปที่ 5.10 แสดงวงจรตรวจจับกระแส

การควบคุมกระแสฮาร์โมนิกส์ เพื่อที่จะฉีดไปแก้ไขให้แก่ระบบ โดยใช้การควบคุมแบบแบง แบง จะทำให้สัญญาณของกระแสมีความถี่สูง จึงไม่สามารถใช้ Current Transformer ได้ เพราะไม่เหมาะสมที่วัดความถี่สูง อาจทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวได้ ดังนั้นในการตรวจจับสัญญาณของกระแสจะใช้วงจร Hall Effect ซึ่งสามารถวัดสัญญาณกระแสได้ตั้งแต่ 0 – 100 kHz ทำให้ได้สัญญาณของกระแสที่มีความถูกต้อง

ในวงจรนี้ จะต่อให้ Hall Effect มี turn ratio มีค่า 1:1000 ดังนั้น กระแสที่เข้ามา 1 A จะออกจาก Hall Effect 1 mA จากนั้นนำกระแสที่ได้ต่อกับตัวความต้านทาน 200 Ω จะได้สัญญาณขนาด 0.2 V สัญญาณที่ได้จะมีค่า offset จึงต้องแก้ไขด้วยวงจรลบ ออปแอมป์ A ให้สัญญาณที่ได้จาก Hall Effect เข้าที่ขาบวก แล้วไฟ ±15 V ขาลบ จากนั้นนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณ ออปแอมป์ B ที่มีค่า Gain = 5 เพื่อให้ได้สัญญาณขนาด 1 V ต่อ กระแส 1 A

5.2.5 วงจรกำลัง



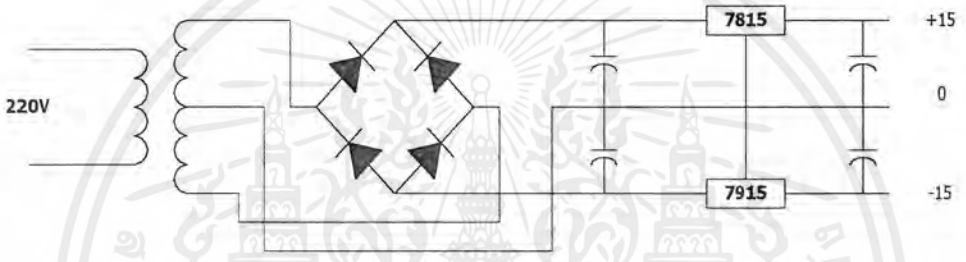
รูปที่ 5.11 แสดงวงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ได้จากวงจรขับเกท จะนำมาป้อนเข้าวงจรกำลังที่ขาเกทของอุปกรณ์สวิตซ์ เพื่อเปิด ปิดการทำงาน ให้จ่ายกระแสตามวงจรควบคุม

5.2.6 วงจรไฟเลี้ยง

วงจรไฟเลี้ยง ใช้สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งใช้ไฟ ±15 V ดังรูปที่ 4.8 โดยออกแบบให้มี 10 เอาท์พุท ไฟ +15 V 5 เอาท์พุท และ –15 V 5 เอาท์พุท



รูปที่ 5.12 แสดงวงจรไฟเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

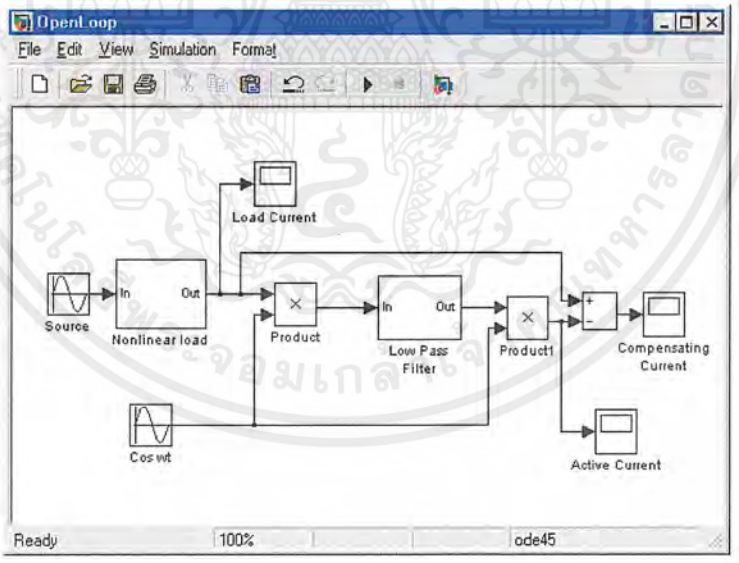
การทดลองในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. การจำลองการทำงานโดย Simulink
2. การทดลองในวงจรต้นแบบ

6.1 การจำลองวงจรชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์

เพื่อแสดงผลของทฤษฎีการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ที่กล่าวมา โดยการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการการทดลอง จะทดลองการทำงานแบบลูปเปิดเพื่อศึกษาการทำงาน และใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป

ศึกษาผลของรูปสัญญาณต่างๆของไดอะแกรมแบบลูปเปิด

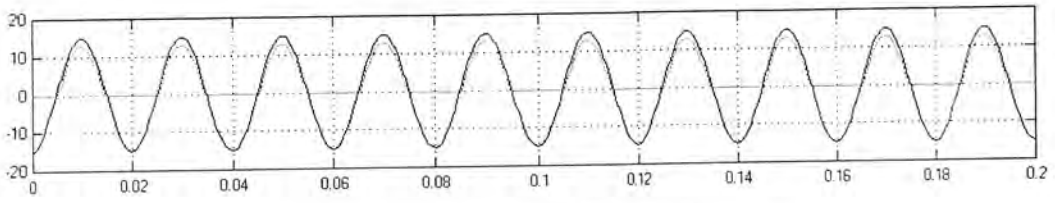


รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่วิเคราะห์แบบลูปเปิด

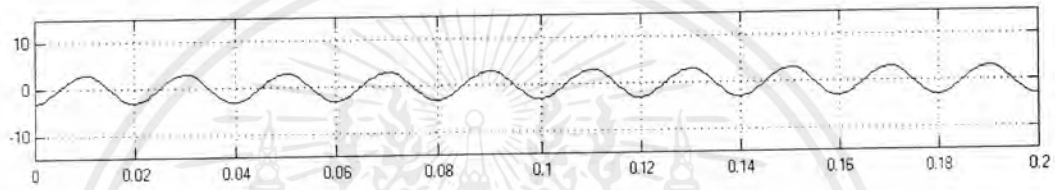
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาจะจำลองกระแสโหลดไม่เชิงเส้น 2 ลักษณะคือ

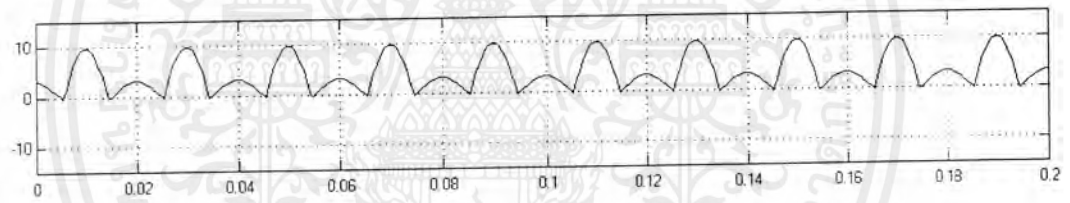
1. โหลดเป็นไดโอด



รูปที่ 6.2 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$ กับ $v_s(t)$

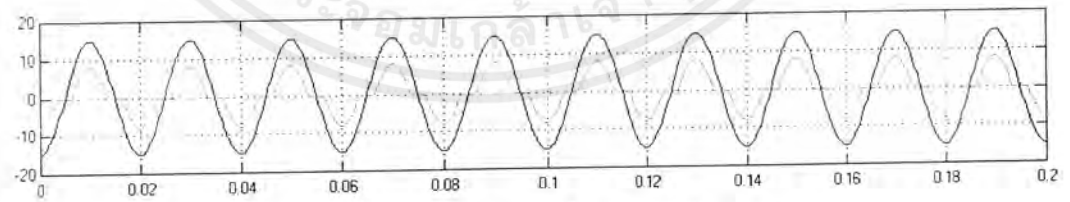


รูปที่ 6.3 แสดงกระแสแอคทีฟ $i_p(t)$

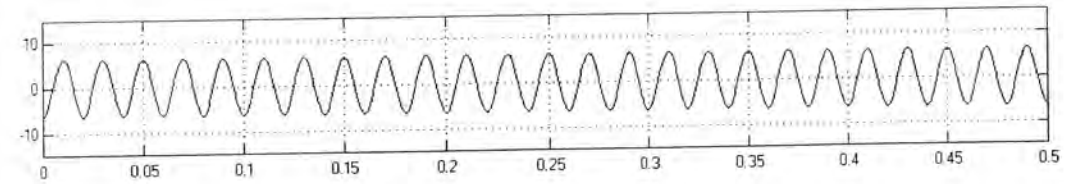


รูปที่ 6.4 แสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ $i_f(t)$

2. โหลดเป็นบริดจ์เร็กติไฟร์

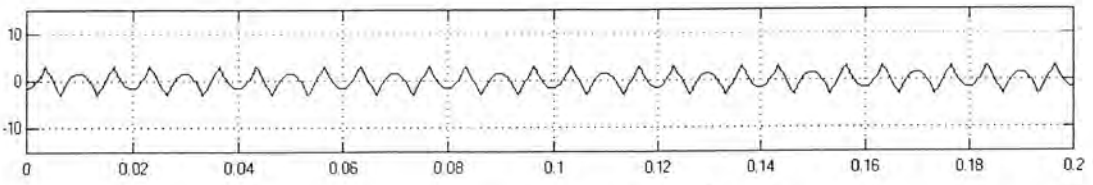


รูปที่ 6.5 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$ กับ $v_s(t)$



รูปที่ 6.6 แสดงกระแสแอคทีฟ $i_p(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

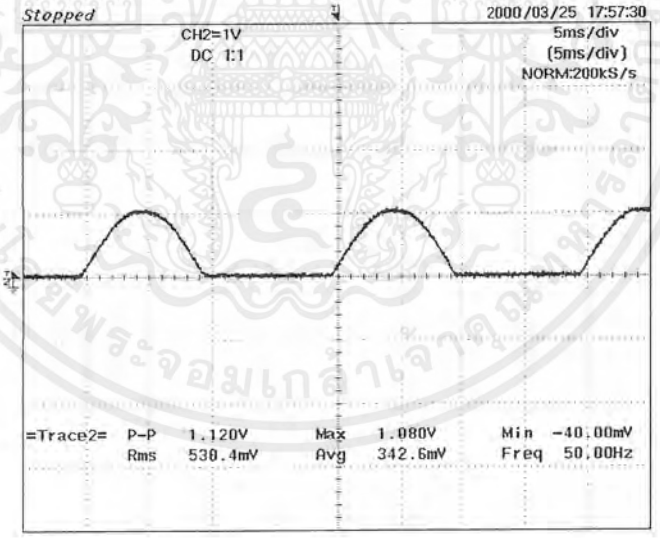


รูปที่ 6.7 แสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ $i_f(t)$

ผลจากการทดลองการจำลองโดยโปรแกรม ปรากฏว่าวงจรชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์สามารถทำให้สัญญาณกระแสโหลด มีรูปคลื่นที่ดีขึ้น แต่เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้ขนาดของกระแสแอกทีฟเปลี่ยนแปลง ซึ่งการประมาณค่า $i_p(t)$ มีความแม่นยำน้อยลง จะส่งผลต่อการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์

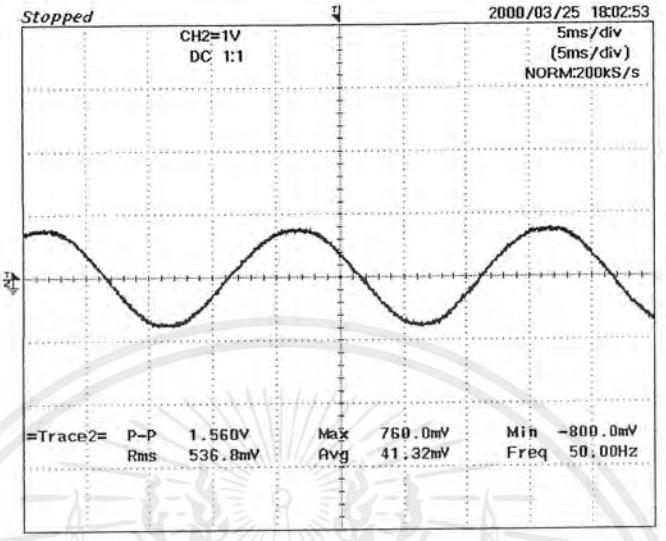
6.2 การชดเชยในวงจรต้นแบบ

1. เมื่อโหลดเป็นไดโอด

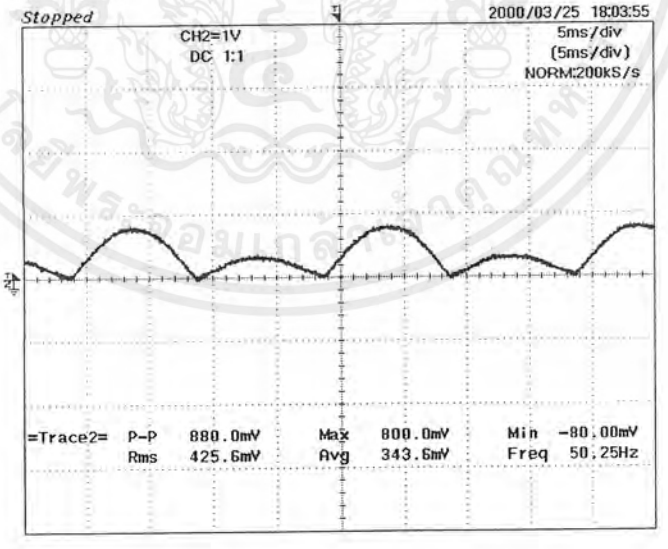


รูปที่ 6.8 แสดงกระแสโหลด $i_l(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



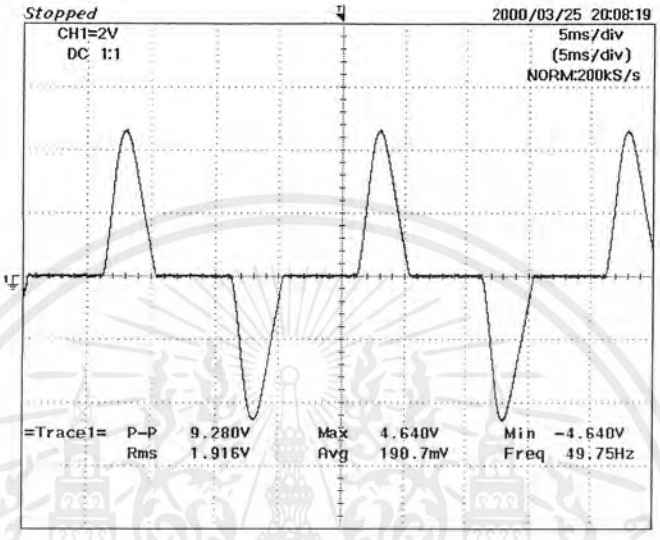
รูปที่ 6.9 สัญญาณ Ip คูณกับ cos (ωt)



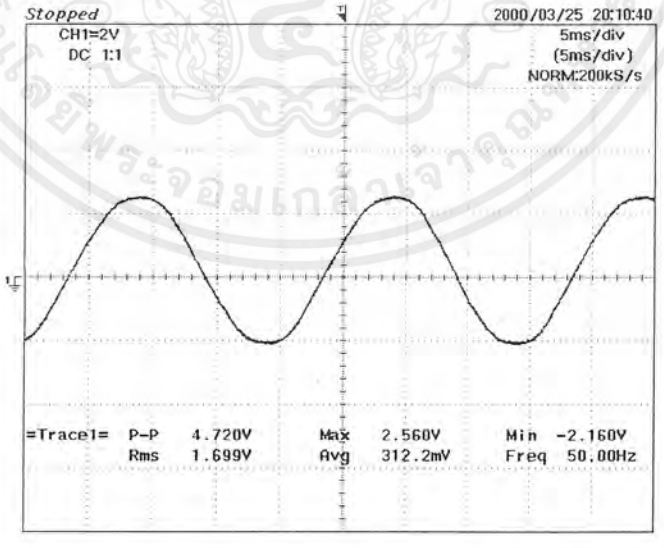
รูปที่ 6.10 กระแสชดเชยโหลดโคโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อเป็นโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์

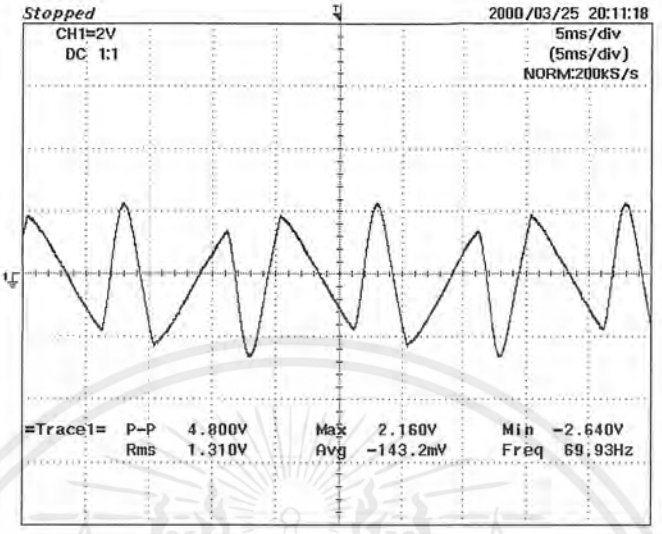


รูป 6.11 แสดงกระแสของโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์



รูปที่ 6.12 สัญญาณ $I_p\cos(\omega t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณกระแสชดเชยสำหรับโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์

6.3 การทดลองในวงจรต้นแบบ

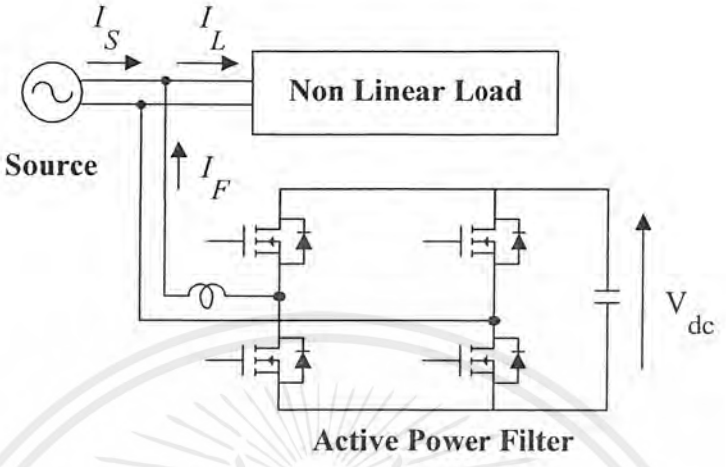
การทดลองในส่วนนี้ เป็นการแก้กระแสฮาร์โมนิกส์ ที่เกิดจากโหลด 2 ประเภท คือ โหลดไดโอดเร็กติไฟร์ และไดโอดบริดจ์เร็กติไฟร์

การวิเคราะห์ %THD จะคิดที่ ความถี่มูลฐาน ถึงฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 50

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ไดโอด
- บริดเร็กติไฟร์ 4 A. 600 V.
- หลอดไฟ 100 วัตต์ 6 หลอด
- บัลลาสต์ PHILIPS 40 W $\cos\varphi$ 0.5
- ตัวเก็บประจุ 1 ไมโครฟารัด 400 V
- oscilloscope YOKOGAWA DL1520
- probe YOKOGAWA 700998
- variac 15 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

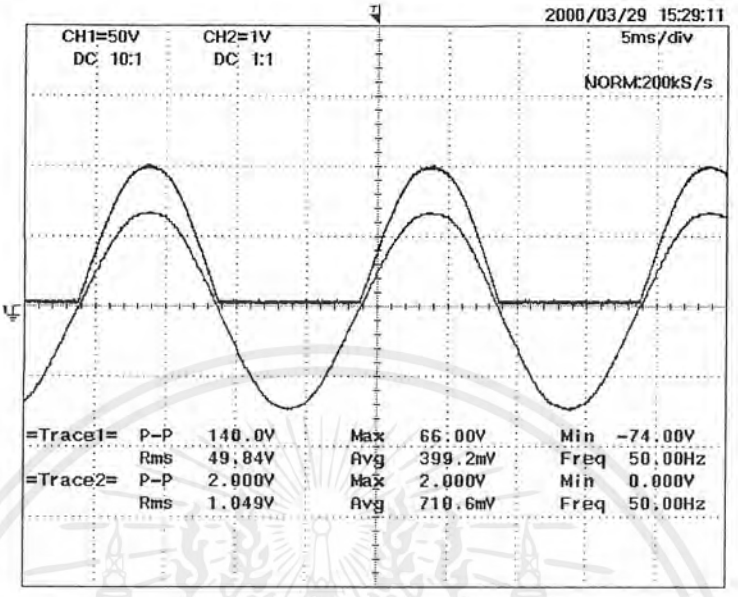


รูปที่ 6.14 แสดงวงจรที่ทำการทดลอง

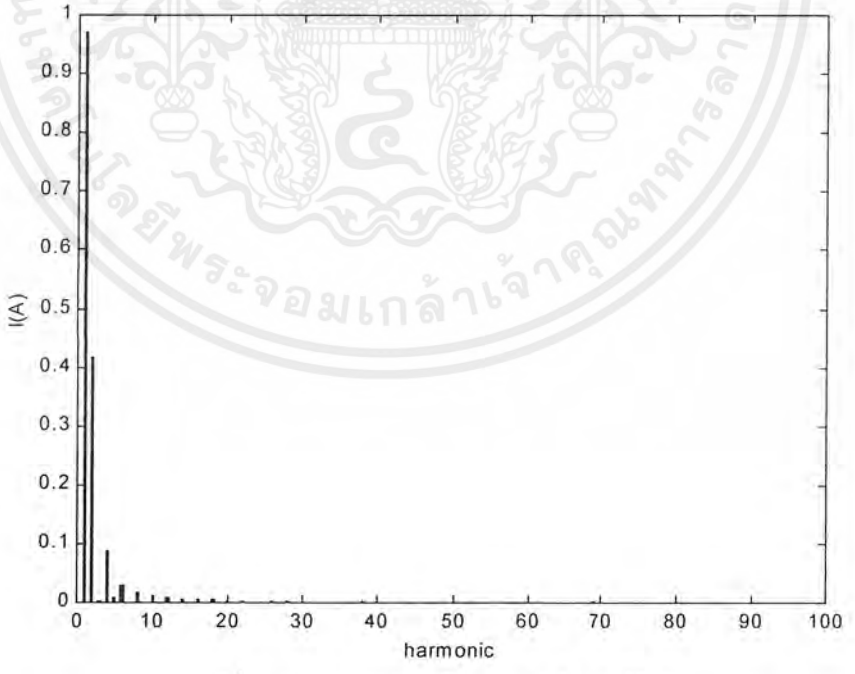
6.3.1 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R

รูปที่ 6.14 แสดงโหลดไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

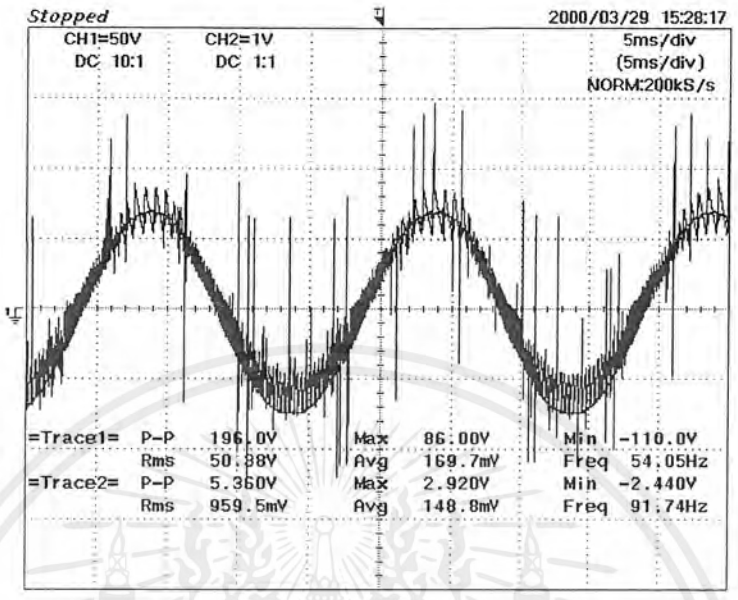


รูปที่ 6.15 แสดง กระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.16 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดง กระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

รูปที่ 6.18 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด

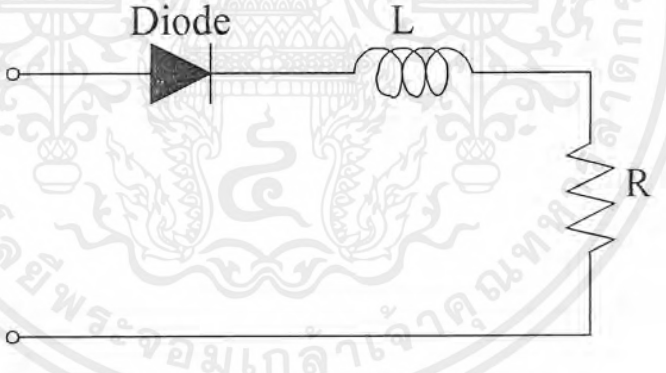
ก่อนปรับปรุง

$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	43.91	0.6786	0.9999	0.6786	1.049	0.6863

หลังแก้ไข

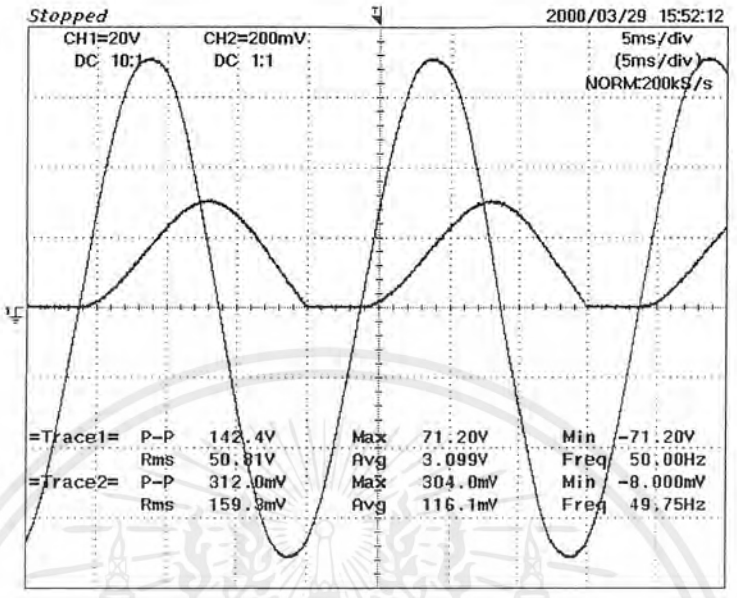
$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	13.06	0.9346	0.9999	0.9346	0.959	0.9142

6.3.2 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R, L

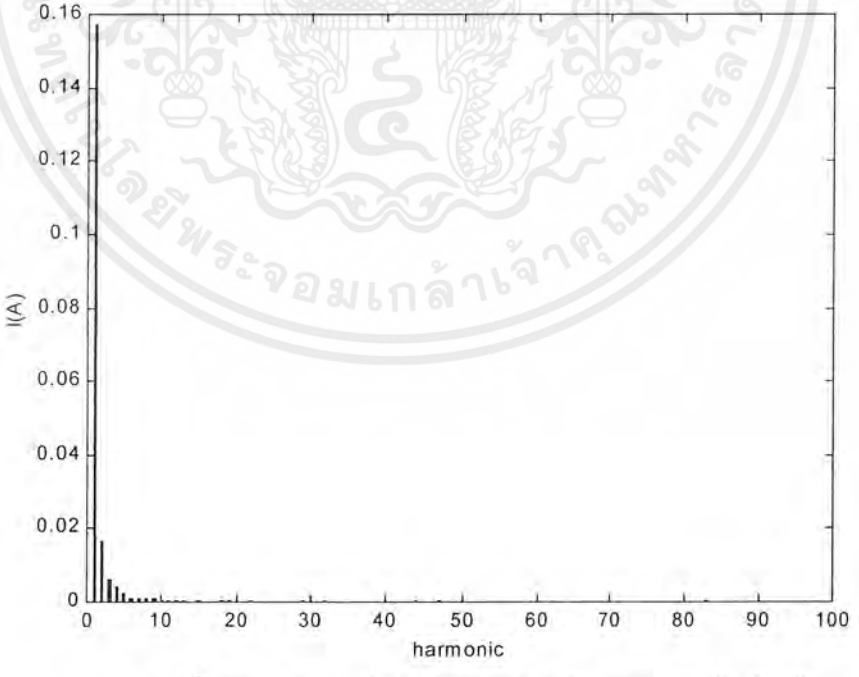


รูปที่ 6.19 แสดงโหลดไดโอด R, L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

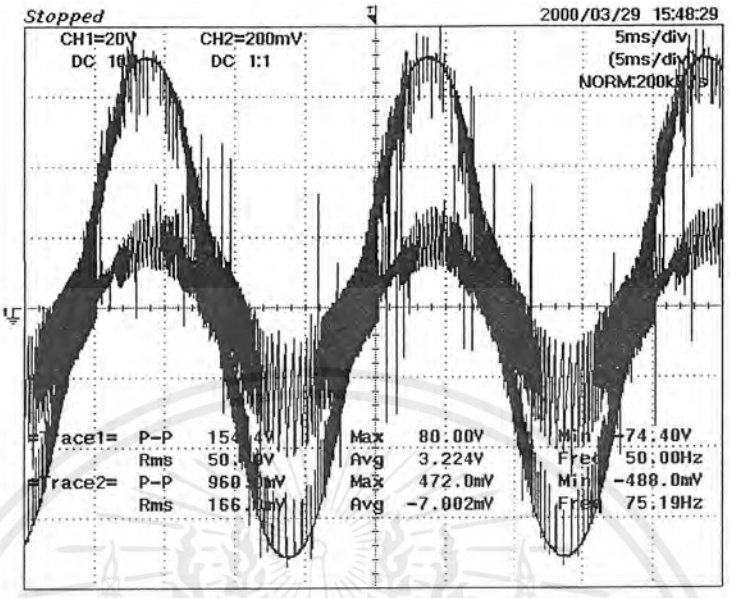


รูปที่ 6.20 แสดง กระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

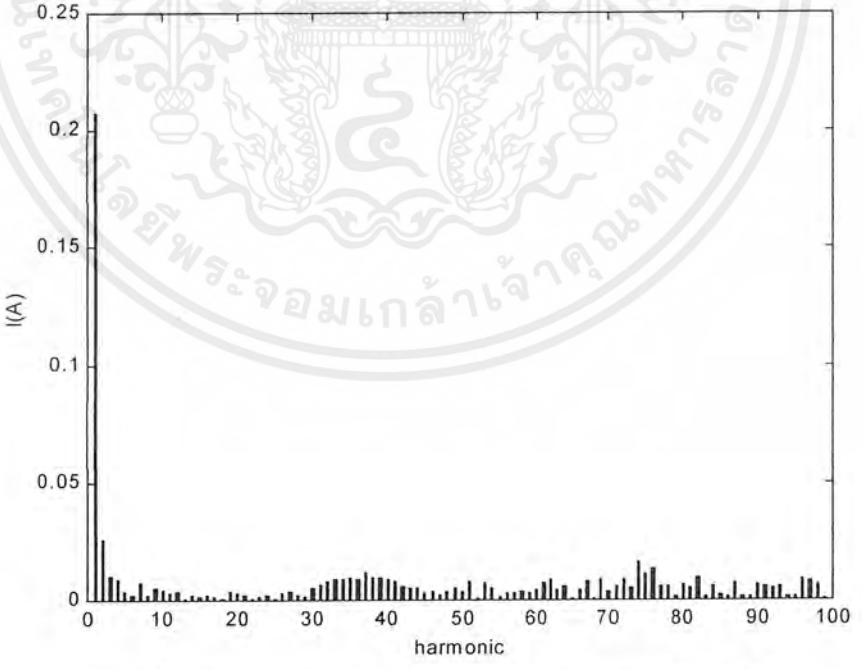


รูปที่ 6.21 แสดงสเปกตัมของ I_s ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.22 แสดง กระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.23 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด R , L

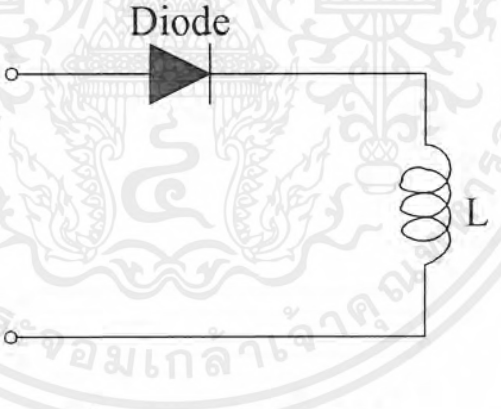
ก่อนปรับปรุง

$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	11.67	0.6373	0.3075	0.1939	0.159	0.1112

หลังแก้ไข

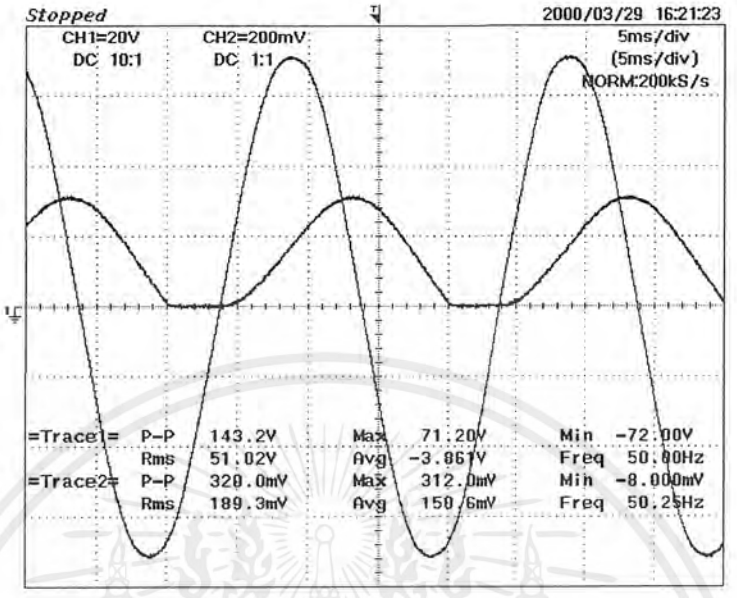
$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	22.43	0.8432	0.9928	0.8371	0.166	0.1467

6.3.3 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด L

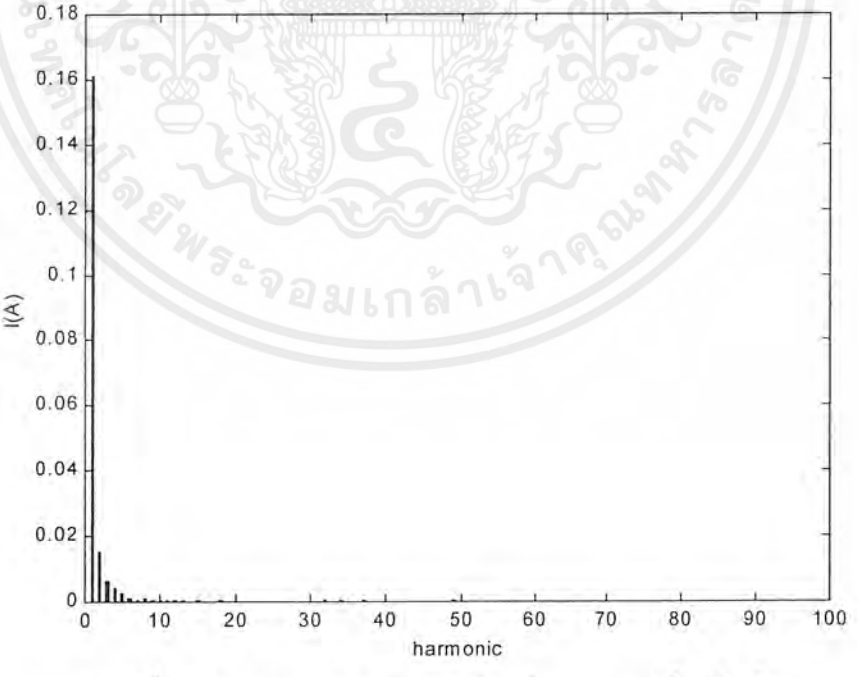


รูปที่ 6.24 แสดงโหลดไดโอด L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

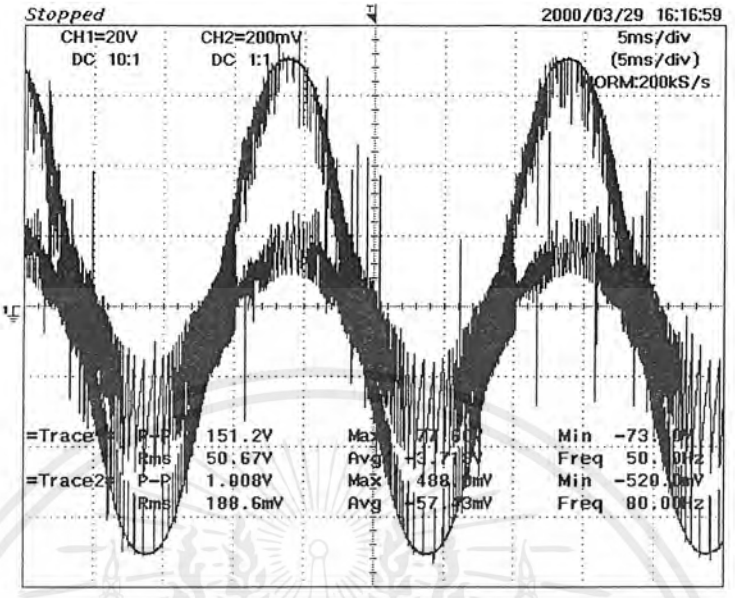


รูปที่ 6.25 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

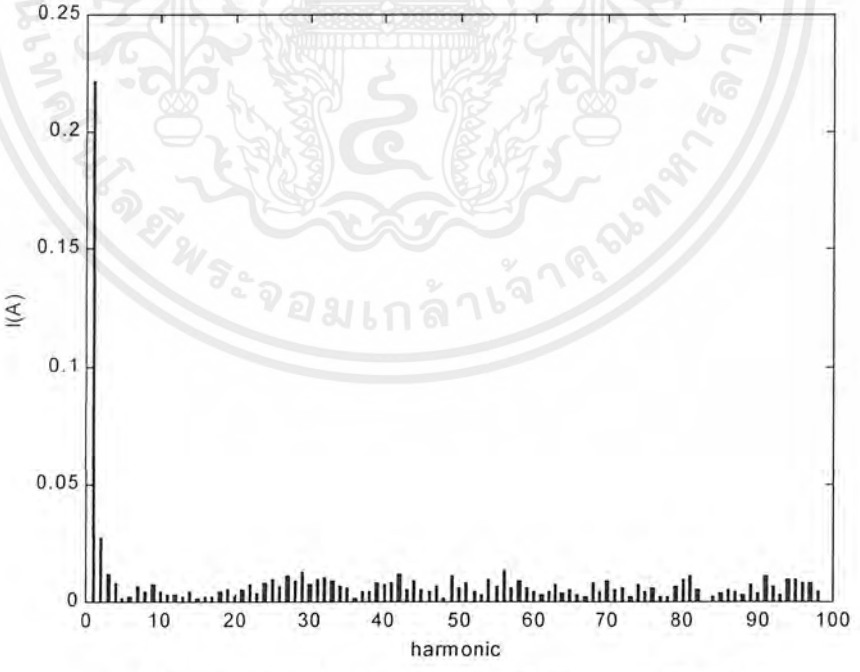


รูปที่ 6.26 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 แสดงกระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.28 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด L

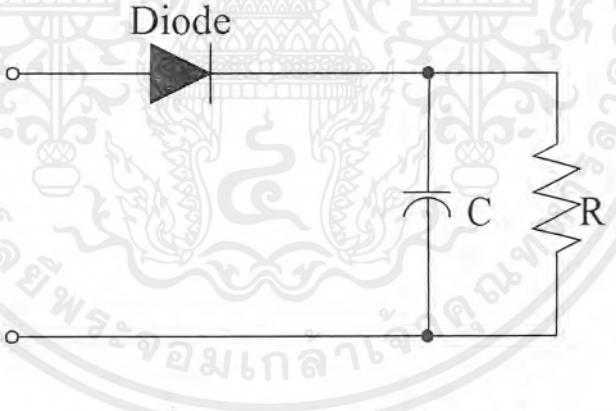
ก่อนปรับปรุง

$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	10.90	0.6371	0.2804	0.1786	0.189	0.1140

หลังแก้ไข

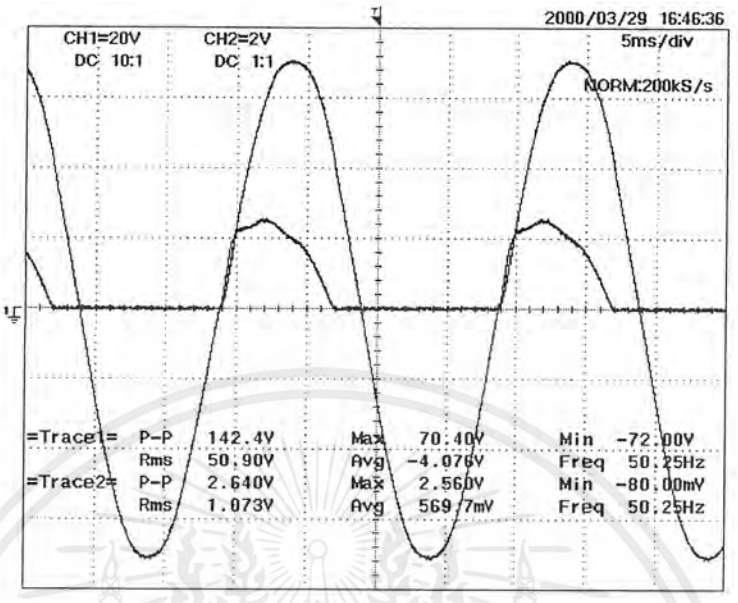
$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	24.35	0.8304	0.9966	0.8275	0.188	0.1565

6.3.4 เมื่อโหลดเป็นไดโอดเร็กติไฟร์ ต่อกับโหลด R, C

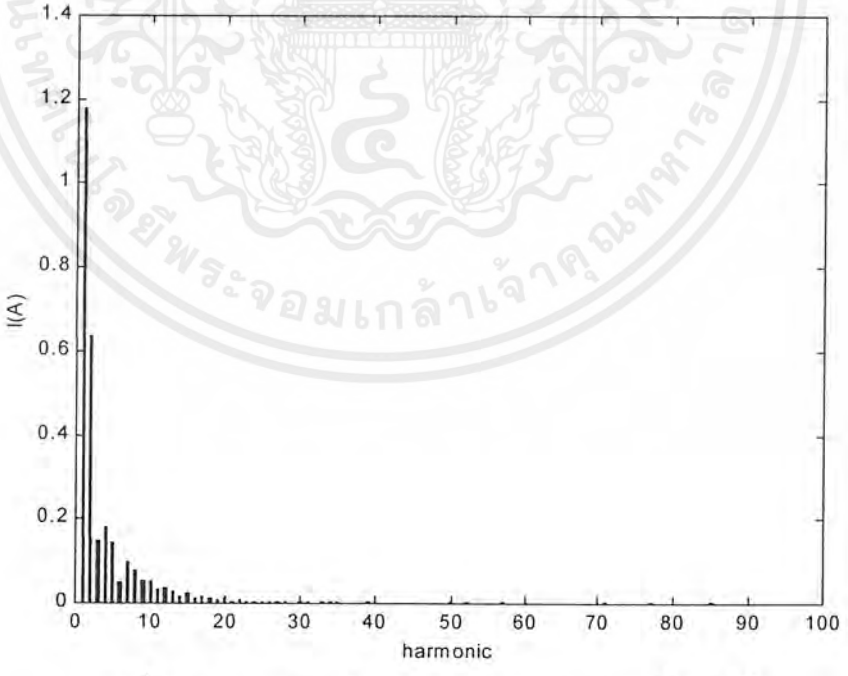


รูปที่ 6.29 แสดงโหลดไดโอด R, C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

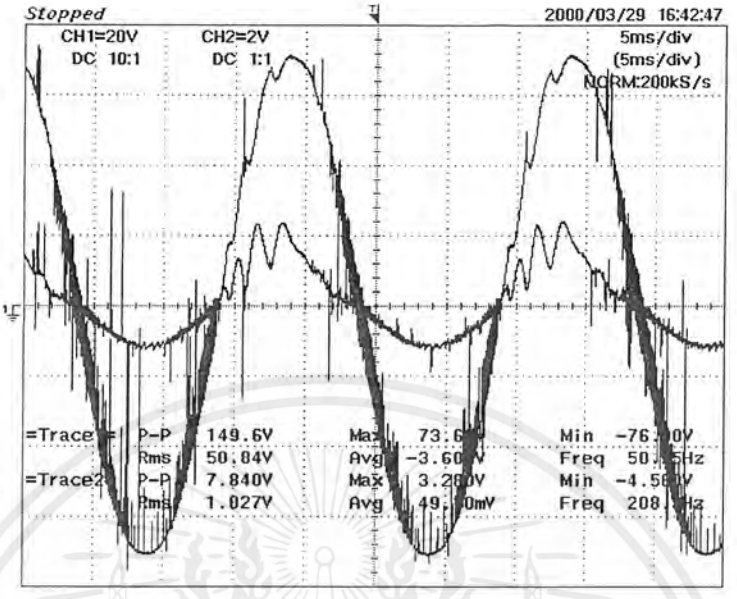


รูปที่ 6.30 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

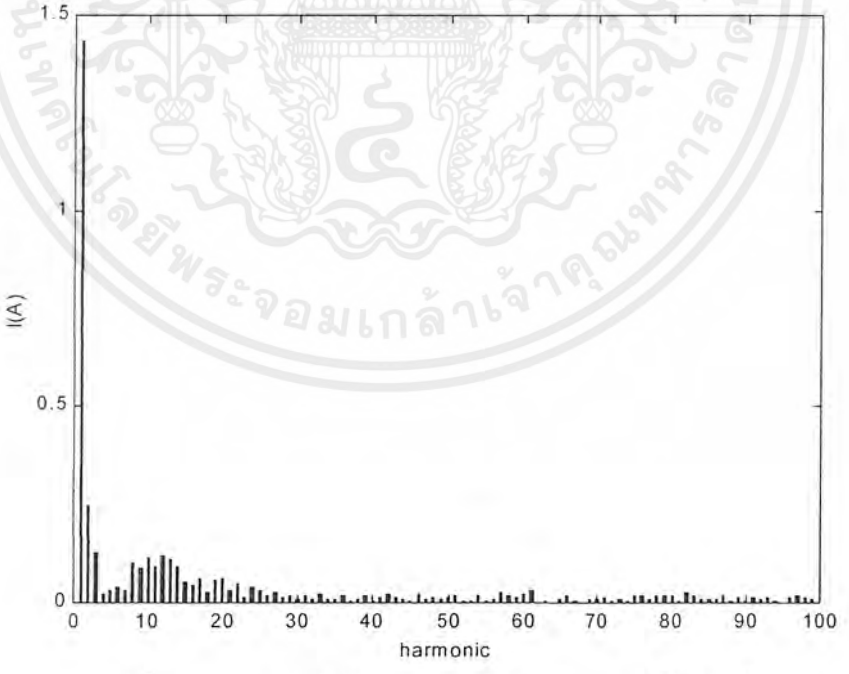


รูปที่ 6.31 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 แสดงกระแส Is และ V หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.33 แสดงสเปกตัมของ I_S หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดไดโอด R, C

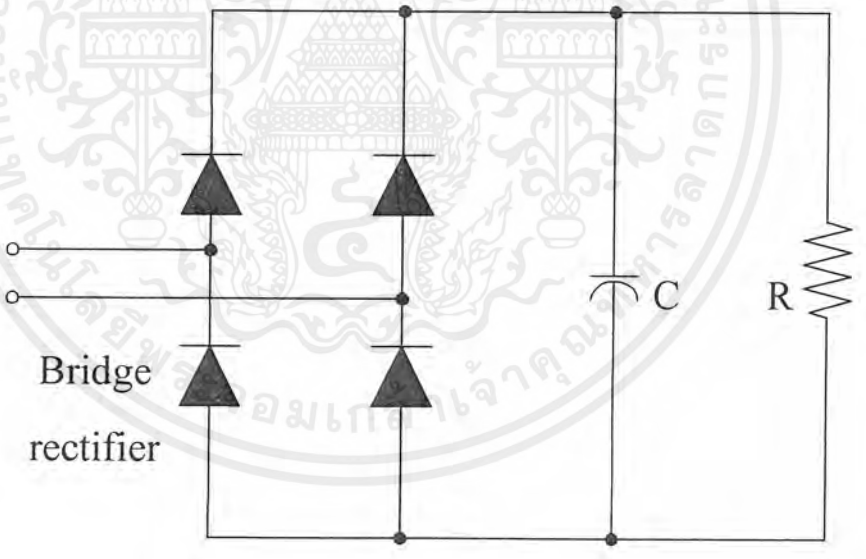
ก่อนปรับปรุง

$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	60.73	0.6918	0.9034	0.6249	1.2032	0.8323

หลังแก้ไข

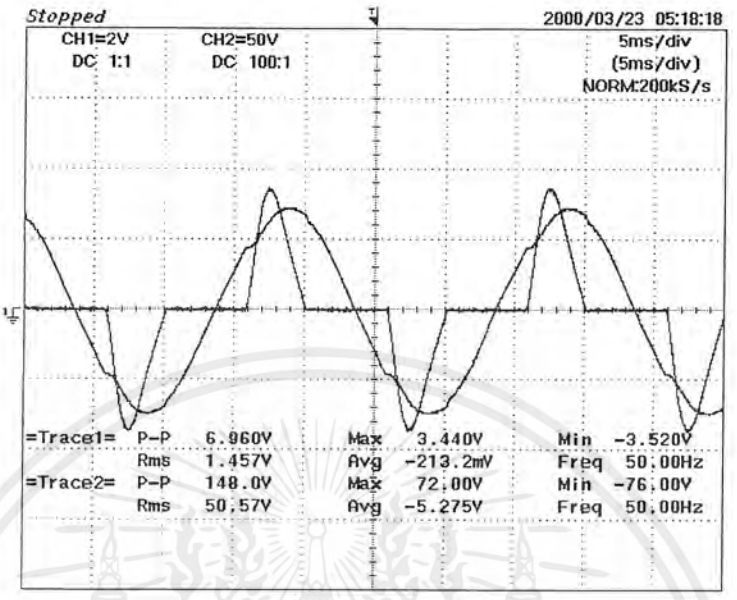
$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	29.91	0.8801	0.9925	0.8734	1.1538	1.0154

6.3.5เมื่อโหลดเป็นบริดจ์เร็กติไฟร์

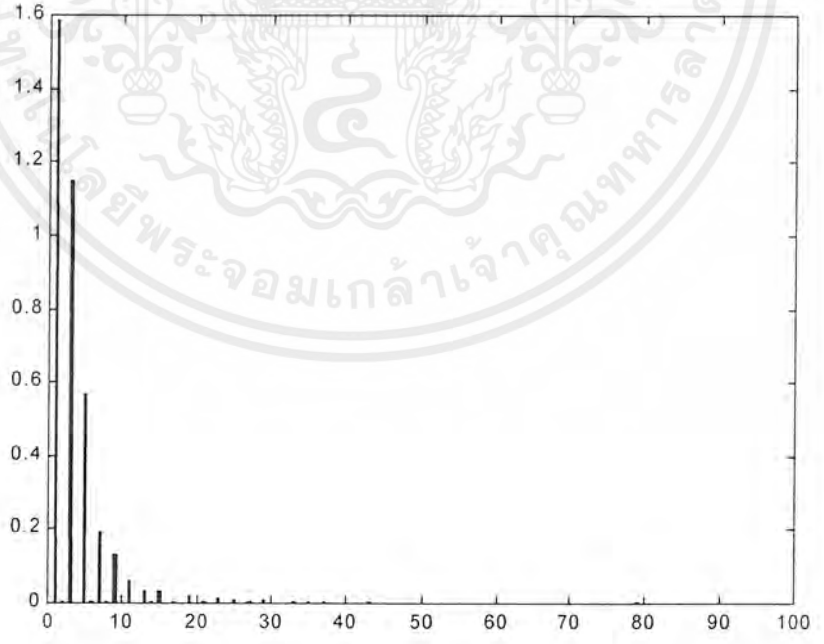


รูปที่ 6.34สดงโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

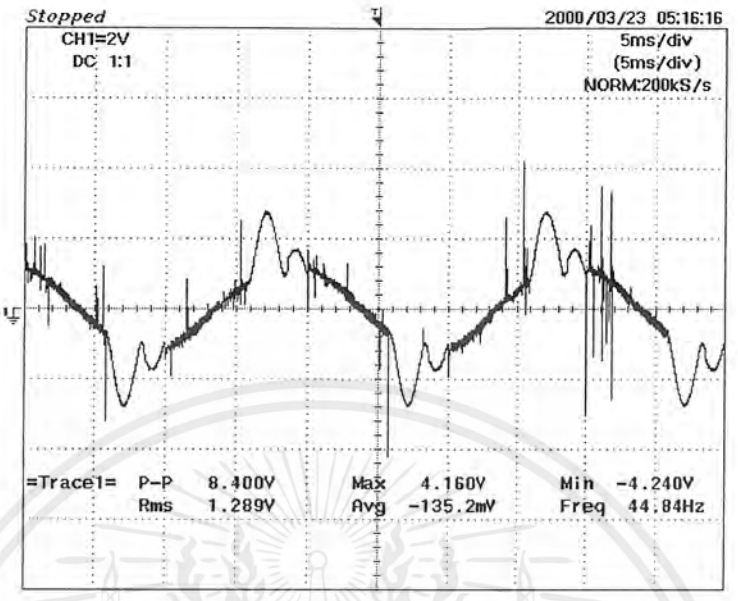


รูปที่ 6.35 แสดงกระแส Is และ V ก่อนการฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

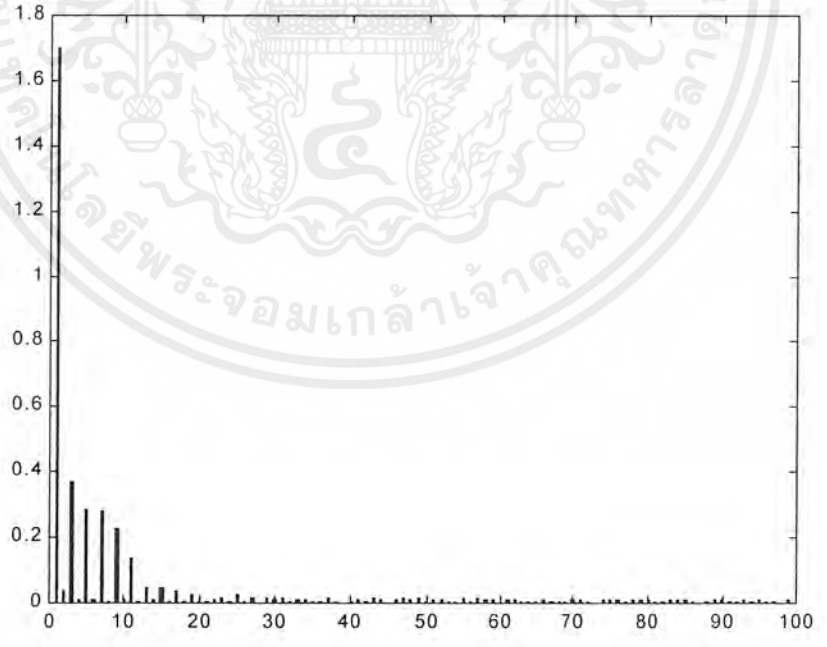


รูปที่ 6.36 แสดงสเปกตัมของ I_S ก่อนฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 แสดงกระแส Is หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 6.38 แสดงสเปกตัมของ I_s หลังฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดงค่า THD และเพาเวอร์แฟคเตอร์ เปรียบเทียบก่อนแก้ไข และหลังแก้ไขเมื่อเป็นโหลดบริดจ์เร็กติไฟร์

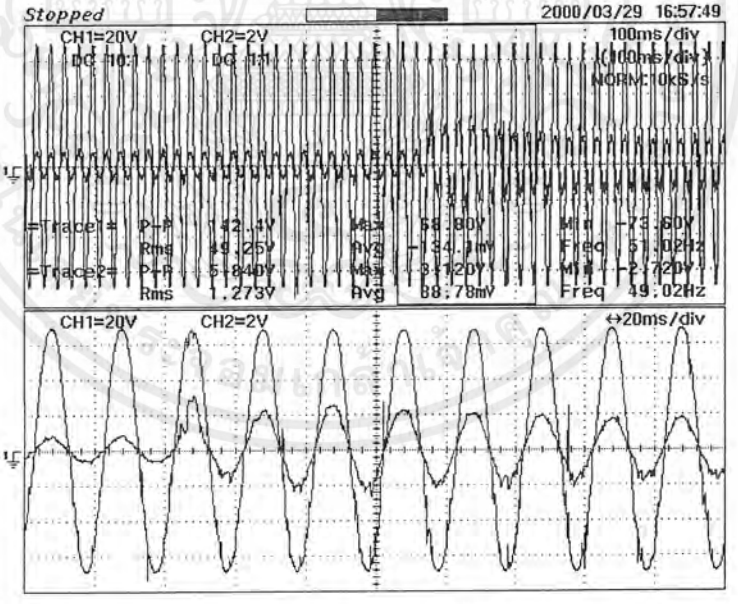
ก่อนปรับปรุง

$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	82.46	0.7712	0.9562	0.7374	1.457	1.120

หลังแก้ไข

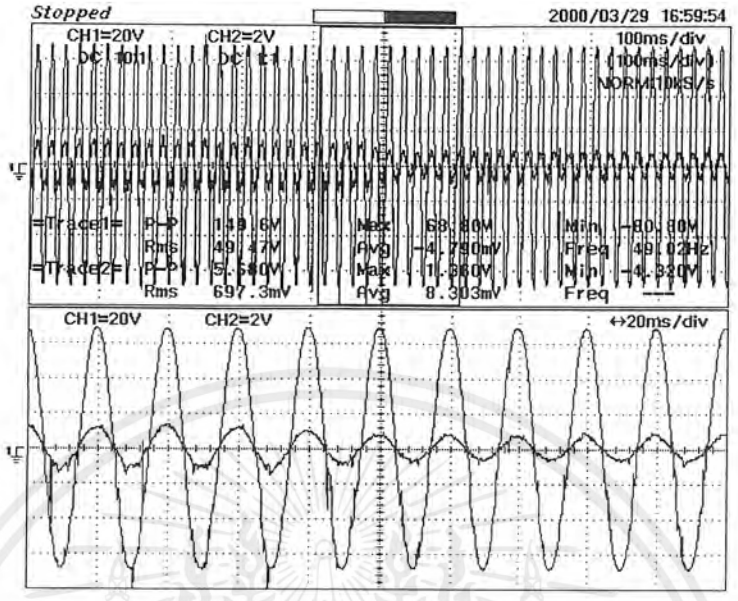
$V_{I/P}$ (v)	%THD	FF	DPF	PF	I_S (A)	I_{S1} (A)
50	36.20	0.9259	0.9876	0.9144	1.289	1.200

6.4 การทดสอบการตอบสนองเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.39 แสดงการตอบสนองเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น จาก 300 วัตต์ เป็น 600 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.40 แสดงการตอบสนองเมื่อโหลดลดลงจาก 600 วัตต์ เป็น 300 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปผลการทดลอง

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสร้างวงจรต้นแบบ เพื่อศึกษาการทำงาน พบว่าสามารถชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ ซึ่งสามารถแก้ไขกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำได้ดี แต่ควรมีวงจร passive filter แก้ไขกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับสูง ประกอบด้วย จะทำให้ passive filter มีขนาดเล็กลง เนื่องจากความถี่สูงขึ้น และวงจรมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็วภายใน 2 – 3 ไซเคิล การชดเชยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ การชดเชยรีแอคทีฟเพาเวอร์ และการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์

7.1.1 การศึกษาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรคำนวณกระแสชดเชย สามารถนำมาเปรียบเทียบกับวงจรต้นแบบได้ เพื่อนำกระแสชดเชยที่ได้นำไปแก้ไขกระแสฮาร์โมนิกส์ และปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้นได้

7.1.2 การชดเชยรีแอคทีฟเพาเวอร์ หรือการแก้ไขเพาเวอร์แฟคเตอร์

จากการทดลองพบว่าวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ ต้นแบบสามารถทำการชดเชยรีแอคทีฟฟิลเตอร์ได้โดยการชดเชยที่เกิดขึ้น สามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. การชดเชยในส่วน DPF

   ในส่วนนี้ วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ คือ สามารถให้ค่า DPF ที่เกิดขึ้นใกล้เคียง 1 โดยไม่ขึ้นกับประเภทของโหลดไม่เชิงเส้นที่ใช้งาน ซึ่งเป็นผลจากวงจรที่คำนวณกระแสอ้างอิง สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง

2. การชดเชยในส่วน FF

   วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ สามารถแก้ไข FF ได้ดีขึ้น ซึ่งค่า FF ที่เกิดขึ้นหลักการชดเชย สามารถชดเชยได้โดยไม่ขึ้นกับโหลดไม่เชิงเส้นที่ใช้งาน แต่ขึ้นกับค่าความกว้างแบนของวงจรฮีสเตอร์รีซีส ที่เลือกใช้งาน ซึ่งค่าความกว้างของแบนที่ลดลง ทำให้ FF มีค่าดีขึ้น

7.1.3 การชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์

การชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์นั้น วงจรต้นแบบสามารถทำการแก้ไขได้โดย กระแสฮาร์โมนิกส์ที่โหลดไม่เชิงเส้น สร้างขึ้นมา ซึ่งการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์ในโหลดทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้ค่า THD ดีขึ้น โดยค่า THD ของโหลดไดโอด สามารถชดเชยได้ดีว่า โหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ อันเนื่องมาจาก โหลดบริดจ์เร็กติไฟร์ มีความเป็น แหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ ทำให้กระแสที่เกิดขึ้น มีความผิดเพี้ยนไปตามรูปแรงดัน

7.1.4 การควบคุมกระแส

การชดเชยกระแสฮาร์โมนิกส์นั้น จะพบปัญหาการที่ไม่สามารถควบคุมลักษณะตรงส่วนยอดของรูปคลื่นได้อย่างเต็มที่ เพราะเนื่องมาจากแรงดันคร่อมตัวอินดักเตอร์ ไม่พอเพียงให้อัตราการเพิ่มขึ้น และลดลงของกระแส ให้ถึงค่าขอบเขต ความกว้างของฮีสเตอร์รีซีส ผลคือทำให้ช่วงยอด ลูกคลื่นไม่สามารถควบคุมได้

การควบคุมกระแสมีลักษณะการควมคุมได้ดังต่อไปนี้

1. ความชันของกระแสสามารถควบคุมได้โดย การเปลี่ยนค่า L ซึ่งค่า L ที่สูงจะทำให้ความชันของกระแสมีค่าต่ำ ในทำนองเดียวกัน ถ้า L มีค่าต่ำจะทำให้กระแสมีค่าความชันสูง
2. การเปลี่ยนค่าความกว้างฮีสเตอร์รีซีส จะทำให้ลักษณะรูปคลื่นของกระแสมีลักษณะเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเพิ่มความกว้างฮีสเตอร์รีซีส โดยการเปลี่ยนค่า R ที่วงจรแบง แบงจะทำให้ลักษณะรูปคลื่นมีความกว้างของแบนลดลง ความใกล้เคียงกับรูปคลื่น Sinusoidal จะมีมากขึ้น
3. ค่าความถี่การสวิตซ์สามารถเปลี่ยนได้โดยขึ้นกับค่าความกว้างของขอบเขตฮีสเตอร์รีซีส และค่าของ L ที่ใช้ในวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

7.2 ปัญหา และอุปสรรค

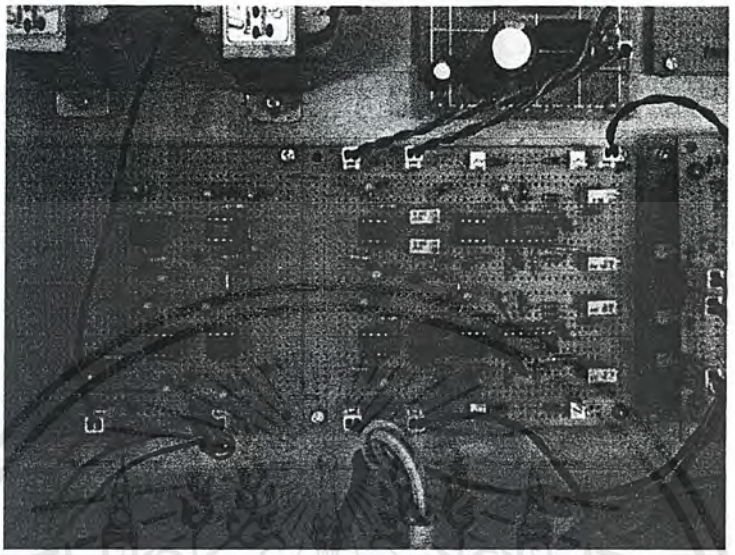
1. ปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนในวงจร ทำให้เกิดความยุ่งยากในการทำงาน อย่างถูกต้อง

2. เนื่องจากการทดลองนี้ มีความถี่การสวิตชิ่งที่ไม่คงที่ ทำให้การเลือกค่าความไวของออปแอมป์ ให้ได้ค่าที่เหมาะสมได้ยาก

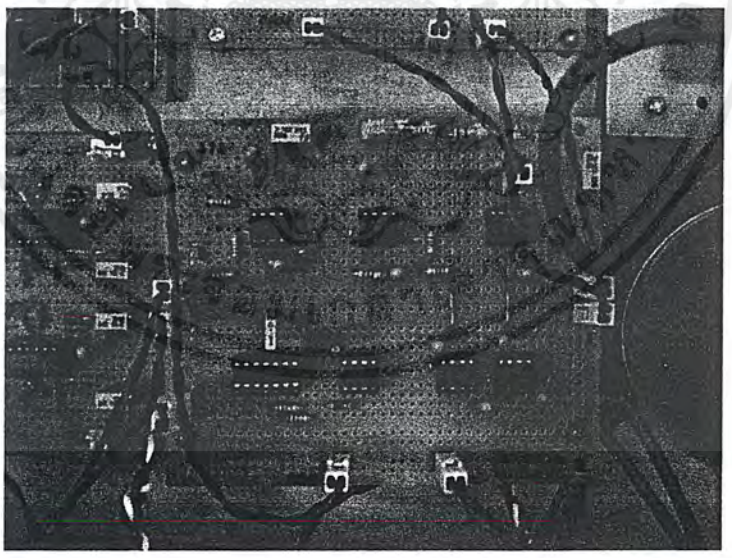
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

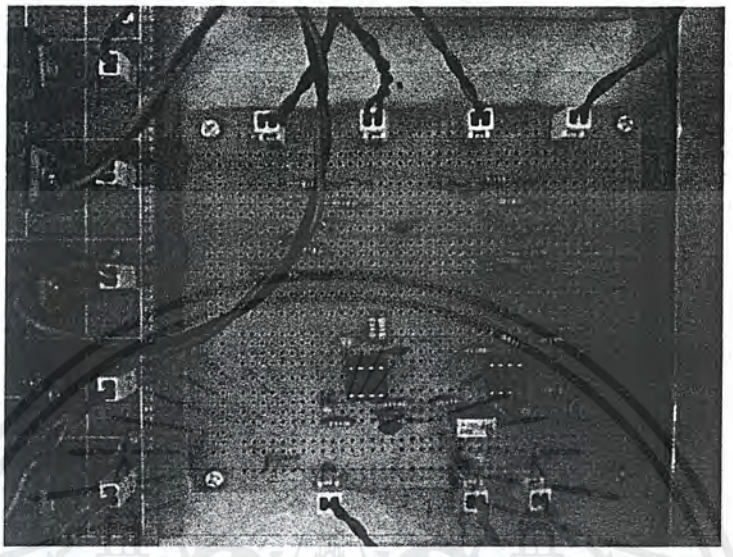


ส่วนสร้างสัญญาณกระแสชดเชย

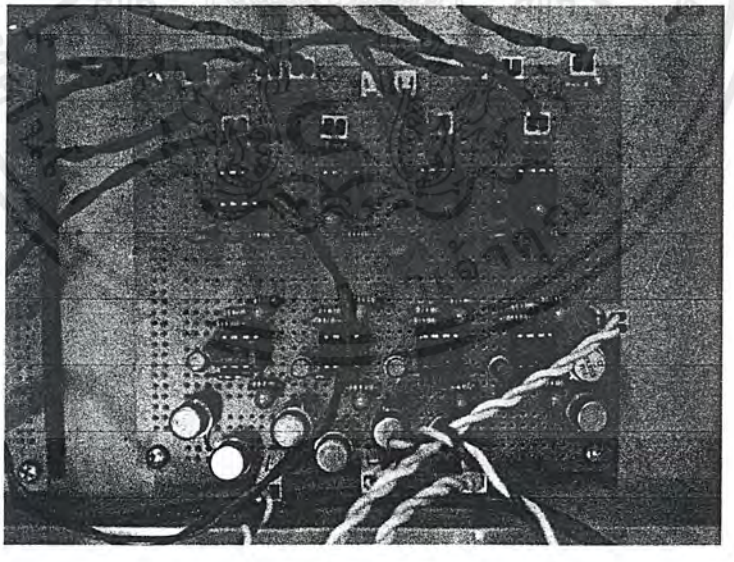


ส่วนควบคุมกระแสแบง แบง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

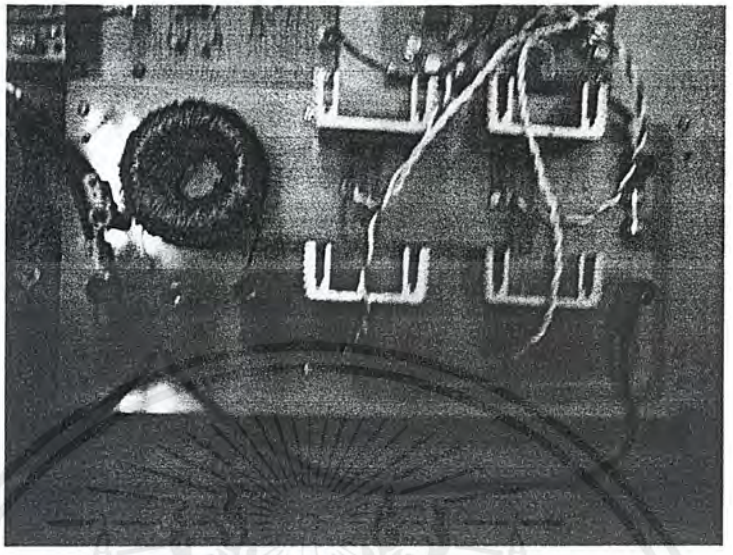


วงจรเดดไทม์

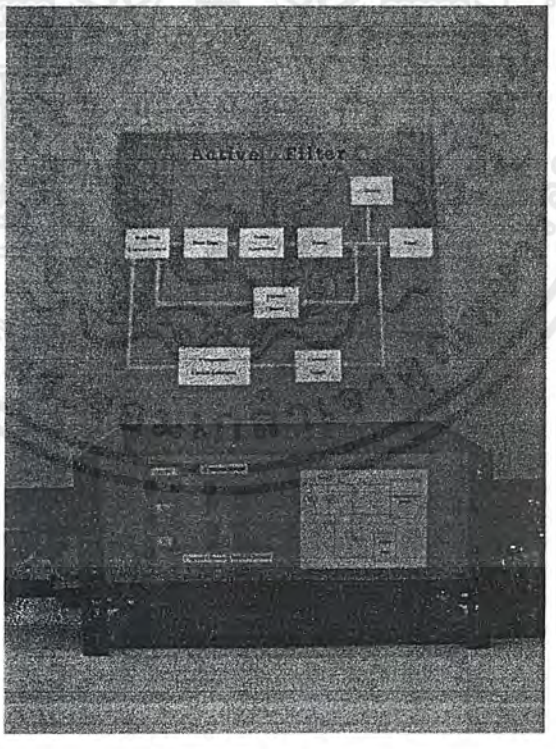


วงจรขับเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรกำลัง



วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Order this document by MC1495/D

MOTOROLA

MC1495

Wideband Linear Four-Quadrant Multiplier

The MC1495 is designed for use where the output is a linear product of two input voltages. Maximum versatility is assured by allowing the user to select the level shift method. Typical applications include: multiply, divide*, square root*, mean square*, phase detector, frequency doubler, balanced modulator/demodulator, and electronic gain control.

- Wide Bandwidth
- Excellent Linearity:
  2% max Error on X Input, 4% max Error on Y Input Over Temperature
  1% max Error on X Input, 2% max Error on Y Input at + 25°C
- Adjustable Scale Factor, K
- Excellent Temperature Stability
- Wide Input Voltage Range: ± 10 V
- ±15 V Operation

*When used with an operational amplifier.

LINEAR FOUR-QUADRANT MULTIPLIER

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751A
(SO-14)

P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646

MAXIMUM RATINGS (T_A = + 25°C, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Applied Voltage (V_2–V_1, V_{14}–V_1, V_1–V_9, V_1–V_{12}, V_1–V_4, V_1–V_8, V_{12}–V_7, V_9–V_7, V_8–V_7, V_4–V_7)	ΔV	30	Vdc
Differential Input Signal	V_{12}–V_9 V_4–V_8	± (6+I_{13} R_X) ± (6+I_3 R_Y)	Vdc
Maximum Bias Current	I_3 I_{13}	10 10	mA
Operating Temperature Range MC1495 MC1495B	T_A	 0 to +70 – 40 to +125	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	– 65 to +150	°C

ORDERING INFORMATION

Device	Tested Operating Temperature Range	Package
MC1495D	T_A = 0° to + 70°C	SO–14
MC1495P		Plastic DIP
MC1495BP	T_A = – 40° to +125°C	Plastic DIP

© Motorola, Inc. 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (+V = + 32 V , –V = –15 V, T_A = + 25°C, $I_3 = I_{13}$ = 1.0 mA, $R_X = R_Y$ = 15 kΩ, R_L = 11 kΩ, unless otherwise noted.)

Characteristics	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Linearity (Output Error in percent of full scale)	5					%
T_A = + 25°C						
–10 < V_X < +10 (V_Y = ±10 V)		E_{RX}	–	±1.0	±1.0	
–10 < V_Y < +10 (V_X = ±10 V)		E_{RY}	–	± 2.0	± 2.0	
$T_A = T_{Low}$ to T_{High}						
–10 < V_X < +10 (V_Y = ±10 V)		E_{RX}	–	±1.5	± 2.0	
–10 < V_Y < +10 (V_X = ±10 V)		E_{RY}	–	± 3.0	± 4.0	
Square Mode Error (Accuracy in percent of full scale after Offset and Scale Factor adjustment)	5	E_{SQ}				%
T_A = + 25°C			–	± 0.75	–	
$T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	±1.0	–	
Scale Factor (Adjustable) $\left(K = \frac{2R_L}{I_3 R_X R_Y}\right)$	–	K	–	0.1	–	
Input Resistance (f = 20 Hz)	7	R_{inX}	–	30	–	MΩ
		R_{inY}	–	20	–	
Differential Output Resistance (f = 20 Hz)	8	R_O	–	300	–	kΩ
Input Bias Current	6					µA
$I_{bx} = \frac{(I_9 + I_{12})}{2}$, $I_{by} = \frac{(I_4 + I_8)}{2}$ T_A = + 25°C		I_{bx}, I_{by}	–	2.0	8.0	
$T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	2.0	12	
Input Offset Current	6					µA
$\lvert I_9 - I_{12}\rvert$ T_A = + 25°C		$\lvert I_{iox}\rvert$, $\lvert I_{ioy}\rvert$	–	0.4	1.0	
$\lvert I_4 - I_8\rvert$ $T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	0.4	2.0	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current	6	$\lvert TC_{Iio}\rvert$				nA/°C
$T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	2.5	–	
Output Offset Current T_A = + 25°C	6	$\lvert I_{OO}\rvert$		10	50	µA
$\lvert I_{14} - I_2\rvert$ $T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	20	100	
Average Temperature Coefficient of Output Offset Current	6	$\lvert TC_{IOO}\rvert$				nA/°C
$T_A = T_{Low}$ to T_{High}			–	20	–	
Frequency Response	9,10					
3.0 dB Bandwidth, R_L = 11 kΩ		$BW_{(3dB)}$	–	3.0	–	MHz
3.0 dB Bandwidth, R_L = 50 Ω (Transconductance Bandwidth)		$T_{BW(3dB)}$	–	80	–	MHz
3° Relative Phase Shift Between V_X and V_Y		f_ϕ	–	750	–	kHz
1% Absolute Error Due to Input-Output Phase Shift		f_θ	–	30	–	kHz
Common Mode Input Swing	11	CMV				Vdc
(Either Input)			±10.5	±12	–	
Common Mode Gain T_A = + 25°C	11	A_{CM}	– 50	– 60	–	dB
(Either Input) $T_A = T_{Low}$ to T_{High}			– 40	– 50	–	
Common Mode Quiescent	12	V_{O1}	–	21	–	Vdc
Output Voltage		V_{O2}	–	21	–	
Differential Output Voltage Swing Capability	9	V_O	–	±14	–	V_{pk}
Power Supply Sensitivity	12	S^+	–	5.0	–	mV/V
		S^-	–	10	–	
Power Supply Current	12	I_7	–	6.0	7.0	mA
DC Power Dissipation	12	P_D	–	135	170	mW

NOTES: 1. T_{High} = +70°C for MC1495 = +125°C for MC1495B T_{Low} = 0°C for MC1495 = – 40°C for MC1495B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 1. Multiplier Transfer Characteristic

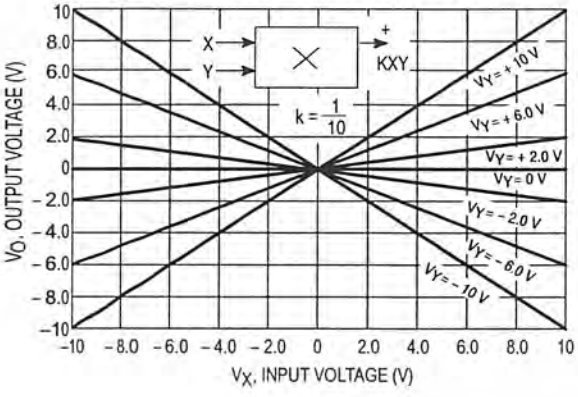


Figure 2. Transconductance Bandwidth

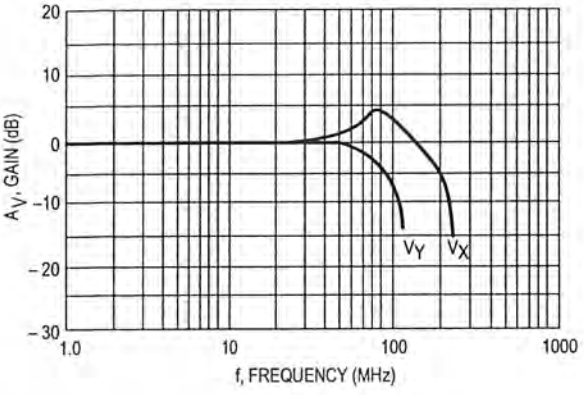
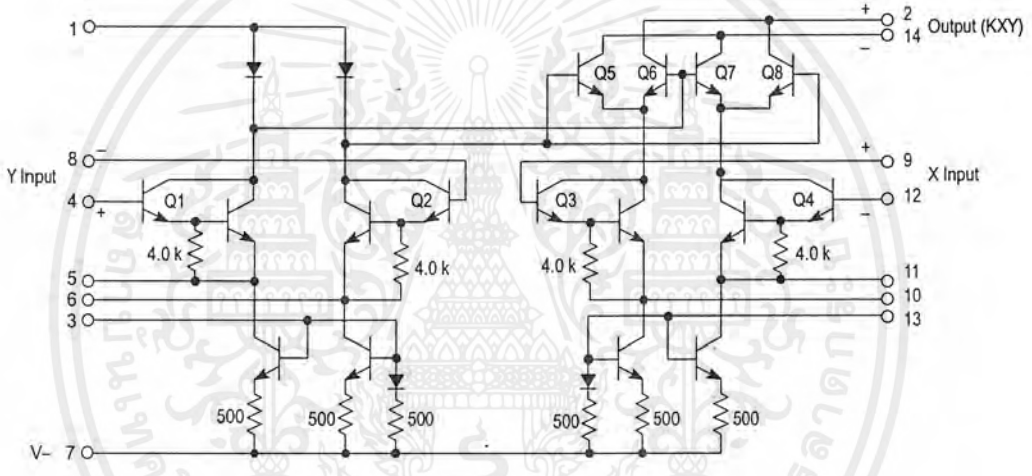
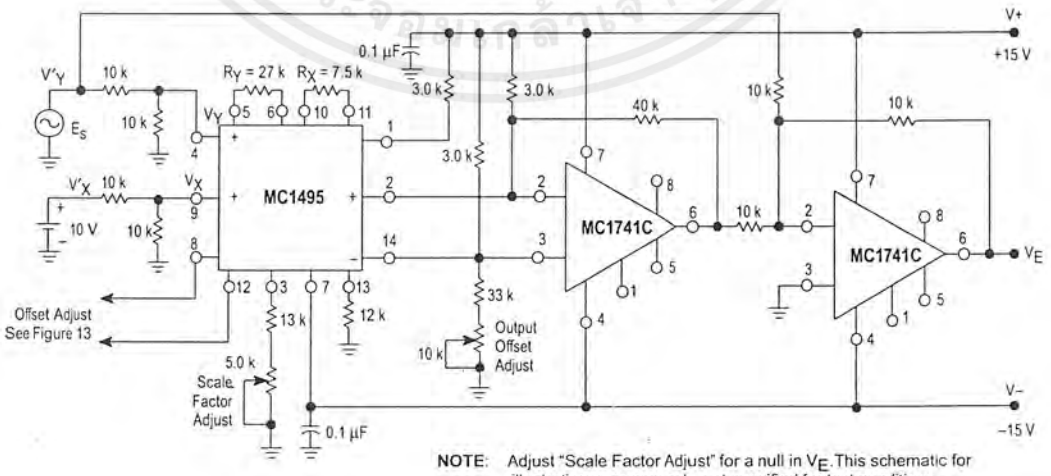


Figure 3. Circuit Schematic



This device contains 16 active transistors.

Figure 4. Linearity (Using Null Technique)



NOTE: Adjust "Scale Factor Adjust" for a null in V_E. This schematic for illustrative purposes only, not specified for test conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 5. Linearity (Using X-Y Plotter Technique)

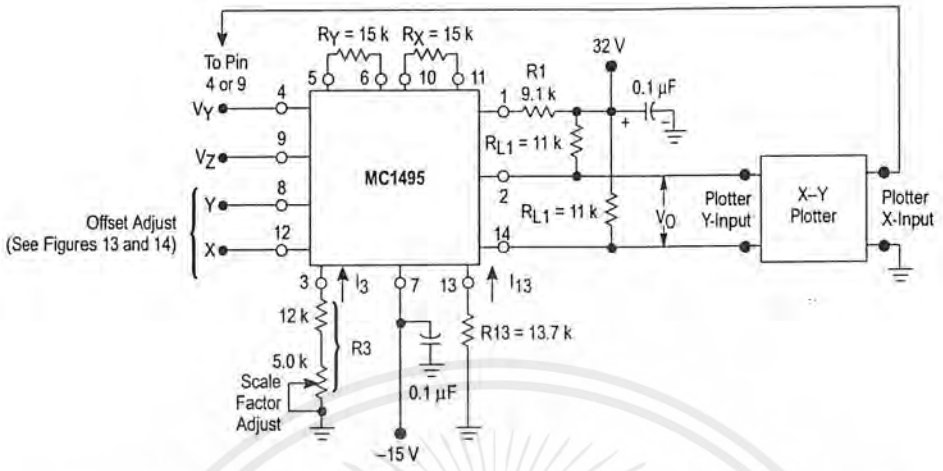


Figure 6. Input and Output Current

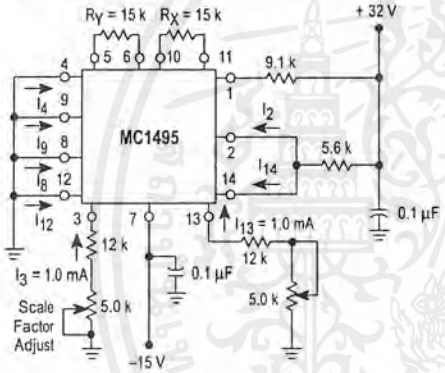


Figure 7. Input Resistance

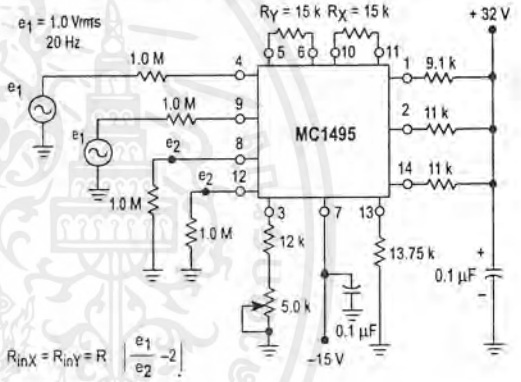


Figure 8. Output Resistance

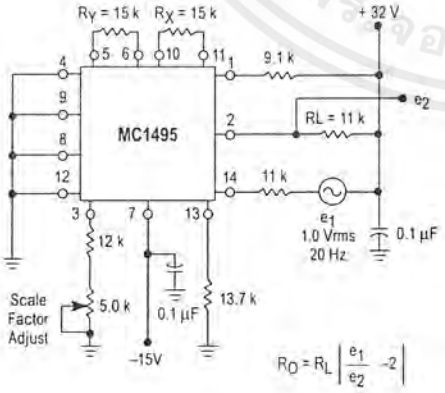
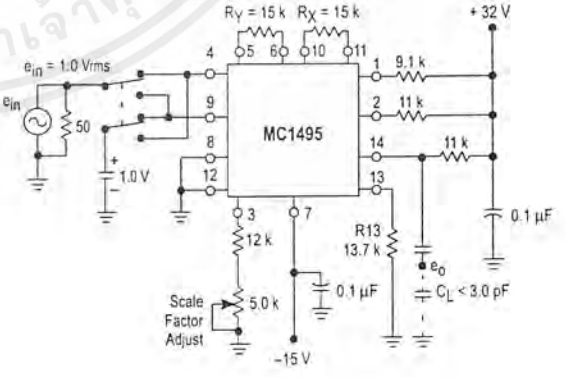


Figure 9. Bandwidth (R_L = 11 kΩ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 10. Bandwidth (R_L = 50 Ω)

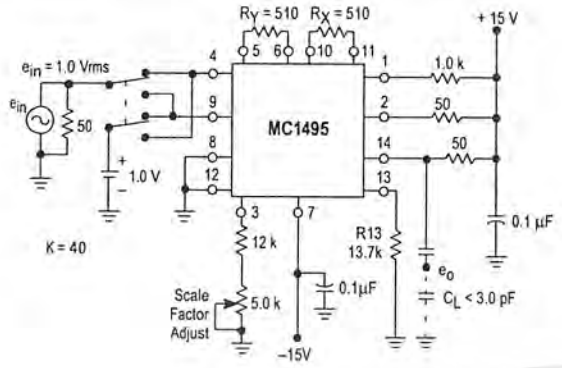


Figure 11. Common Mode Gain and Common Mode Input Swing

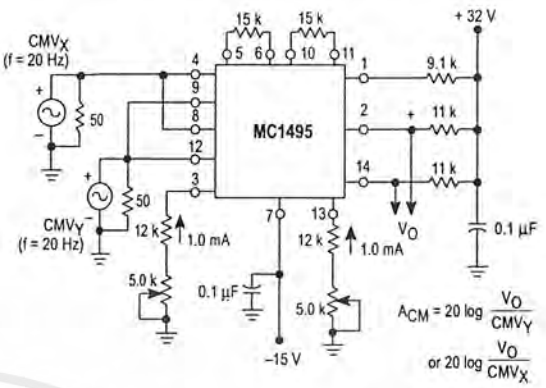


Figure 12. Power Supply Sensitivity

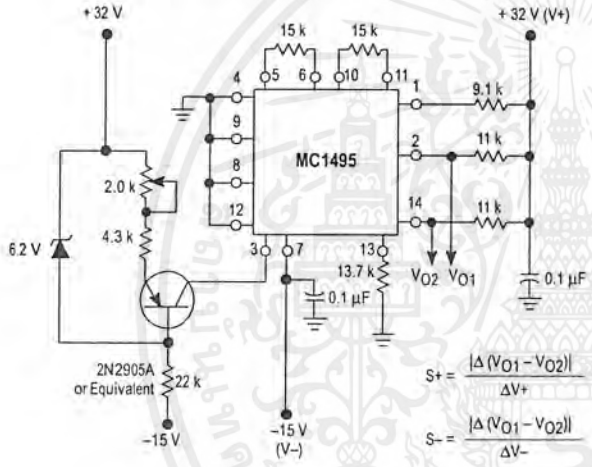
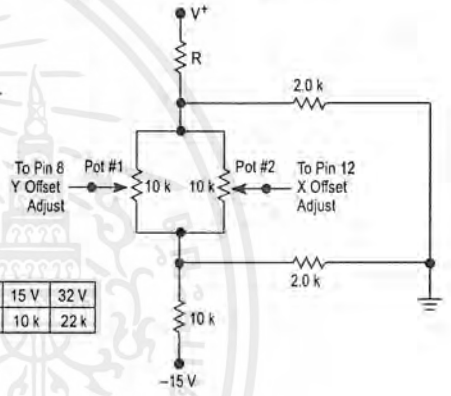
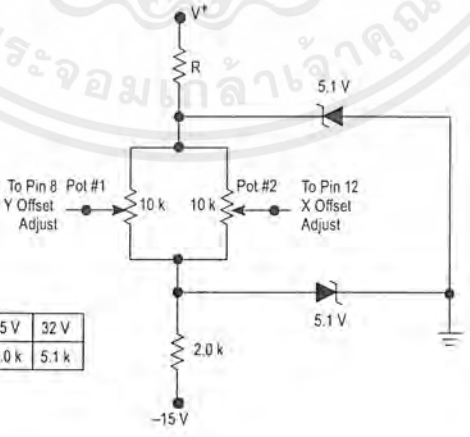


Figure 13. Offset Adjust Circuit



V+	15 V	32 V
R	10 k	22 k

Figure 14. Offset Adjust Circuit (Alternate)



V+	15 V	32 V
R	2.0 k	5.1 k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 15. Linearity versus Temperature

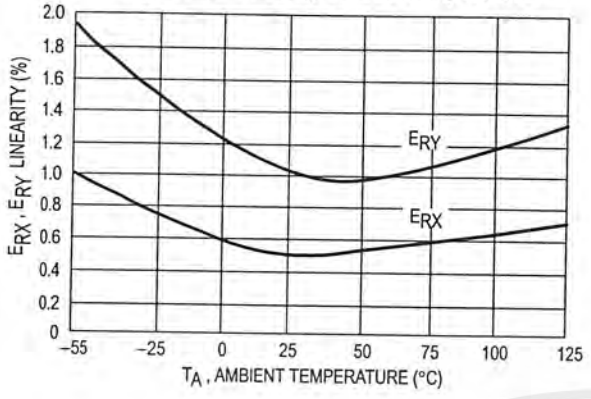


Figure 16. Scale Factor versus Temperature

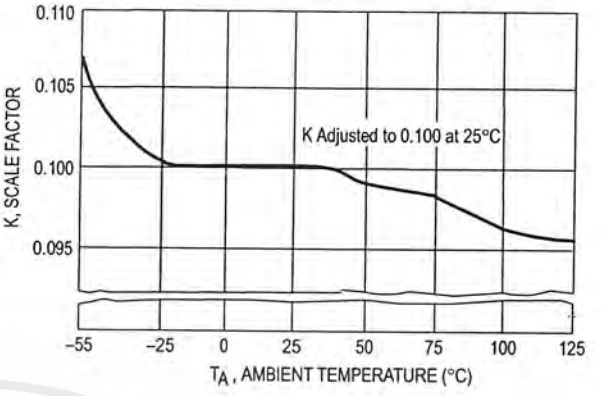


Figure 17. Error Contributed by Input Differential Amplifier

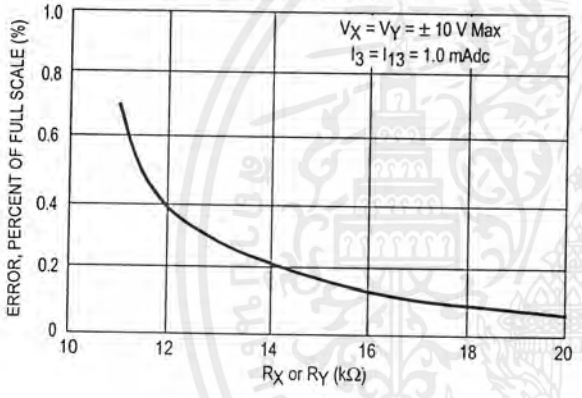


Figure 18. Error Contributed by Input Differential Amplifier

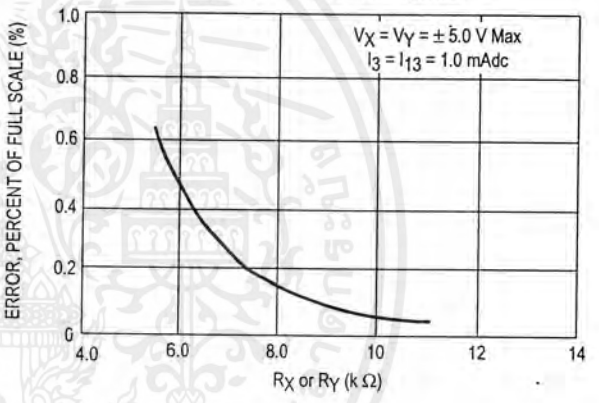
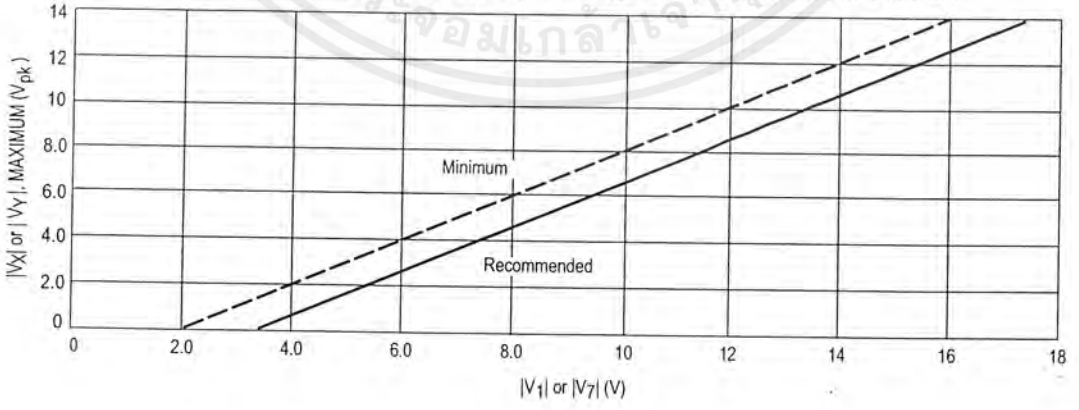


Figure 19. Maximum Allowable Input Voltage versus Voltage at Pin 1 or Pin 7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPERATION AND APPLICATIONS INFORMATION

Theory of Operation

The MC1495 is a monolithic, four-quadrant multiplier which operates on the principle of variable transconductance. A detailed theory of operation is covered in Application Note AN489, *Analysis and Basic Operation of the MC1595*. The result of this analysis is that the differential output current of the multiplier is given by:

$$I_A - I_B = \Delta I = \frac{2V_X V_Y}{R_X R_Y I_3}$$

where, I_A and I_B are the currents into Pins 14 and 2, respectively, and V_X and V_Y are the X and Y input voltages at the multiplier input terminals.

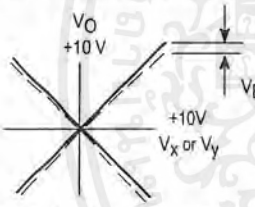
DESIGN CONSIDERATIONS

General

The MC1495 permits the designer to tailor the multiplier to a specific application by proper selection of external components. External components may be selected to optimize a given parameter (e.g. bandwidth) which may in turn restrict another parameter (e.g. maximum output voltage swing). Each important parameter is discussed in detail in the following paragraphs.

Linearity, Output Error, E_{RX} or E_{RY}

Linearity error is defined as the maximum deviation of output voltage from a straight line transfer function. It is expressed as error in percent of full scale (see figure below).



For example, if the maximum deviation, $V_{E(max)}$, is ±100 mV and the full scale output is 10 V, then the percentage error is:

$$E_R = \frac{V_{E(max)}}{V_{O(max)}} \times 100 = \frac{100 \times 10^{-3}}{10} \times 100 = \pm 1.0\%.$$

Linearity error may be measured by either of the following methods:

1. Using an X-Y plotter with the circuit shown in Figure 5, obtain plots for X and Y similar to the one shown above.
2. Use the circuit of Figure 4. This method nulls the level shifted output of the multiplier with the original input. The peak output of the null operational amplifier will be equal to the error voltage, $V_{E\ (max)}$.

One source of linearity error can arise from large signal nonlinearity in the X and Y input differential amplifiers. To avoid introducing error from this source, the emitter degeneration resistors R_X and R_Y must be chosen large enough so that nonlinear base-emitter voltage variation can be ignored. Figures 17 and 18 show the error expected from this source as a function of the values of R_X and R_Y with an operating current of 1.0 mA in each side of the differential amplifiers (i.e., $I_3 = I_{13} = 1.0$ mA).

3 dB Bandwidth and Phase Shift

Bandwidth is primarily determined by the load resistors and the stray multiplier output capacitance and/or the operational amplifier used to level shift the output. If wideband operation is desired, low value load resistors and/or a wideband operational amplifier should be used. Stray output capacitance will depend to a large extent on circuit layout.

Phase shift in the multiplier circuit results from two sources: phase shift common to both X and Y channels (due to the load resistor-output capacitance pole mentioned above) and relative phase shift between X and Y channels (due to differences in transadmittance in the X and Y channels). If the input to output phase shift is only 0.6°, the output product of two sine waves will exhibit a vector error of 1%. A 3° relative phase shift between V_X and V_Y results in a vector error of 5%.

Maximum Input Voltage

$V_{X(max)}$, $V_{Y(max)}$ input voltages must be such that:

$$V_{X(max)} < I_{13} R_Y$$
$$V_{Y(max)} < I_3 R_Y$$

Exceeding this value will drive one side of the input amplifier to "cutoff" and cause nonlinear operation.

Current I_3 and I_{13} are chosen at a convenient value (observing power dissipation limitation) between 0.5 mA and 2.0 mA, approximately 1.0 mA. Then R_X and R_Y can be determined by considering the input signal handling requirements.

For $V_{X(max)} = V_{Y(max)} = 10$ V;

$$R_X = R_Y > \frac{10\ V}{1.0\ mA} = 10\ k\Omega.$$

The equation $I_A - I_B = \dfrac{2V_X V_Y}{R_X R_Y I_3}$

is derived from $I_A - I_B = \dfrac{2V_X V_Y}{(R_X + \frac{2kT}{qI_{13}})(R_Y + \frac{2kT}{qI_3}) I_3}$.

with the assumption $R_X >> \dfrac{2kT}{qI_{13}}$ and $R_Y >> \dfrac{2kT}{qI_3}$.

At $T_A = +25°C$ and $I_{13} = I_3 = 1.0$ mA,

$$\frac{2kT}{qI_{13}} = \frac{2kT}{qI_3} = 52\ \Omega.$$

Therefore, with $R_X = R_Y = 10$ kΩ the above assumption is valid. Reference to Figure 19 will indicate limitations of $V_{X(max)}$ or $V_{Y(max)}$ due to V_1 and V_7. Exceeding these limits will cause saturation or "cutoff" of the input transistors. See Step 4 of General Design Procedure for further details.

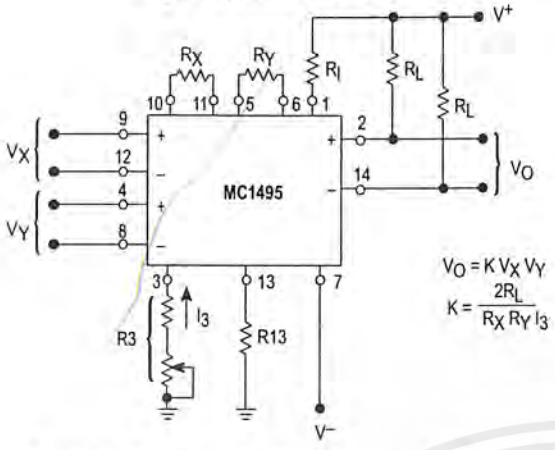
Maximum Output Voltage Swing

The maximum output voltage swing is dependent upon the factors mentioned below and upon the particular circuit being considered.

For Figure 20 the maximum output swing is dependent upon V^+ for positive swing and upon the voltage at Pin 1 for negative swing. The potential at Pin 1 determines the quiescent level for transistors Q_5, Q_6, Q_7 and Q_8. This potential should be related so that negative swing at Pins 2 or 14 does not saturate those transistors. See General Design Procedure for further information regarding selection of these potentials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 20. Basic Multiplier



If an operational amplifier is used for level shift, as shown in Figure 21, the output swing (of the multiplier) is greatly reduced. See Section 3 for further details.

GENERAL DESIGN PROCEDURE

Selection of component values is best demonstrated by the following example. Assume resistive dividers are used at the X and Y-inputs to limit the maximum multiplier input to ± 5.0 V [$V_X = V_{Y(max)}$] for a ± 10 V input [$V_{X'} = V_{Y'(max)}$] (see Figure 21). If an overall scale factor of 1/10 is desired,

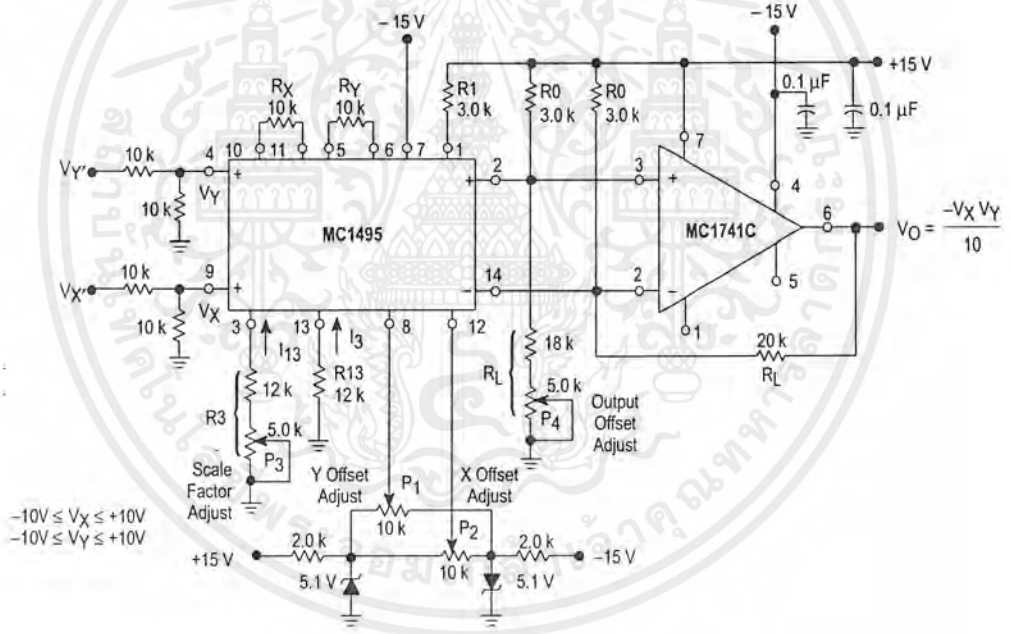
$$\text{then, } V_O = \frac{V_{X'}\,V_{Y'}}{10} = \frac{(2V_X)\,(2V_Y)}{10} = 4/10\ V_X\,V_Y$$

Therefore, K = 4/10 for the multiplier (excluding the divider network).

Step 1. The fist step is to select current I_3 and current I_{13}. There are no restrictions on the selection of either of these currents except the power dissipation of the device. I_3 and I_{13} will normally be 1.0 mA or 2.0 mA. Further, I_3 does not have to be equal to I_{13}, and there is normally no need to make them different. For this example, let

$$I_3 = I_{13} = 1.0\ \text{mA}.$$

Figure 21. Multiplier with Operational Amplifier Level Shift



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Referring to Figure 21, the level shift components will be determined. When $V_X = V_Y = 0$, the currents I_2 and I_{14} will be equal to I_{13}. In Step 3, R_L was found to be 20 kΩ and in Step 4, V_2 and V_{14} were found to be approximately 11 V. From this information R_O can be found easily from the following equation (neglecting the operational amplifiers bias current):

$$\frac{V2}{R_L} + I_{13} = \frac{V^+ - V_2}{R_O}$$

And for this example, $\frac{11\ V}{20\ k\Omega} + 1.0\ mA = \frac{15\ V - 11\ V}{R_O}$

Solving for R_O: $R_O = 2.6\ k\Omega$, thus, select $R_O = 3.0\ k\Omega$

For $R_O = 3.0\ k\Omega$, the voltage at Pins 2 and 14 is calculated to be:

$$V_2 = V_{14} = 10.4\ V.$$

The linearity of this circuit (Figure 21) is likely to be as good or better than the circuit of Figure 5. Further improvements are possible as shown in Figure 23 where R_Y has been increased substantially to improve the Y linearity, and R_X decreased somewhat so as not to materially affect the X linearity. This avoids increasing R_L significantly in order to maintain a K of 0.1.

The versatility of the MC1495 allows the user to to optimize its performance for various input and output signal levels.

OFFSET AND SCALE FACTOR ADJUSTMENT

Offset Voltages

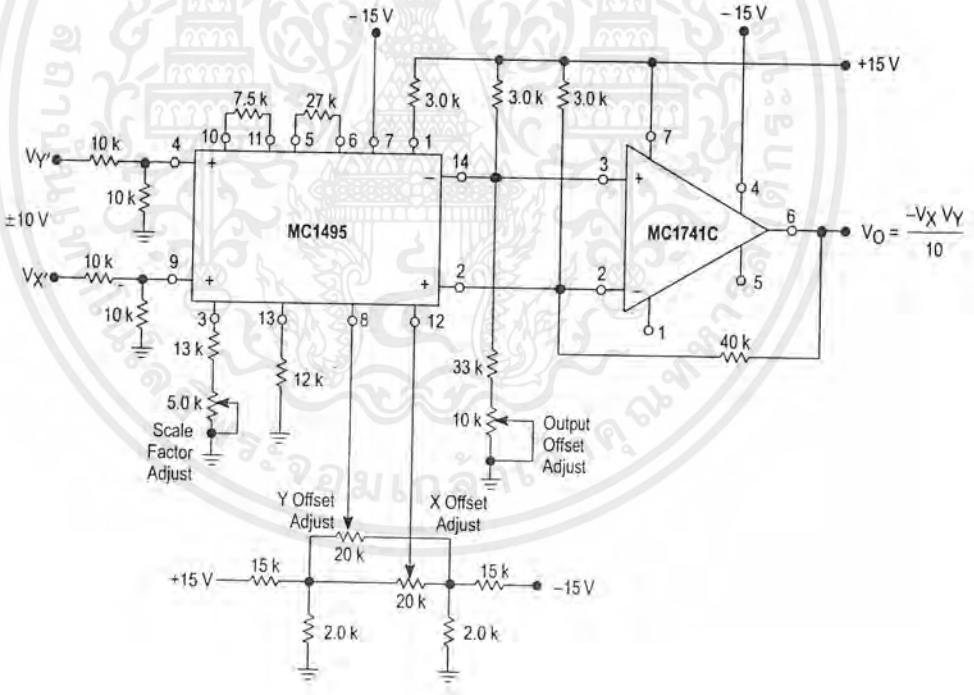
Within the monolithic multiplier (Figure 3) transistor base-emitter junctions are typically matched within 1.0 mV and resistors are typically matched within 2%. Even with this careful matching, an output error can occur. This output error is comprised of X-input offset voltage, Y-input offset voltage, and output offset voltage. These errors can be adjusted to zero with the techniques shown in Figure 21. Offset terms can be shown analytically by the transfer function:

$$V_O = K[V_X \pm V_{iox} \pm V_{x(off)}]\,[V_y \pm V_{ioy} \pm V_{y(off)}] \pm V_{OO} \quad (1)$$

Where:

- K = scale factor
- V_x = "x" input voltage
- V_y = "y" input voltage
- V_{iox} = "x" input offset voltage
- V_{ioy} = "y" input offset voltage
- $V_{x(off)}$ = "x" input offset adjust voltage
- $V_{y(off)}$ = "y" input offset adjust voltage
- V_{OO} = output offset voltage.

Figure 23. Multiplier with Improved Linearity



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current Transducer LA 25-NP

I_{PN} = 5-6-8-12-25 A

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current		25		At
I_P	Primary current, measuring range		0 .. ± 36		At
R_M	Measuring resistance		$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	
	with ± 15 V	@ ± 25 At_{max}	100	320	Ω
		@ ± 36 At_{max}	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current		25		mA
K_N	Conversion ratio		1-2-3-4-5 : 1000		
V_C	Supply voltage (± 5 %)		± 15		V
I_C	Current consumption		10 + I_S		mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn		2.5		kV
V_b	R.m.s. rated voltage [1], safe separation		600		V
	basic isolation		1700		V

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN}, T_A = 25°C		± 0.5		%
ε_L	Linearity		< 0.2		%
			Typ	Max	
I_O	Offset current [2] @ I_P = 0, T_A = 25°C		± 0.05	± 0.15	mA
I_{OM}	Residual current [3] @ I_P = 0, after an overload of 3 x I_{PN}		± 0.05	± 0.15	mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	0°C .. + 25°C	± 0.06	± 0.25	mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10	± 0.35	mA
t_r	Response time [4] @ 90 % of $I_{P\,max}$		< 1		µs
di/dt	di/dt accurately followed		> 50		A/µs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 150		kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_P	Primary resistance per turn @ T_A = 25°C	< 1.25	mΩ
R_S	Secondary coil resistance @ T_A = 70°C	110	Ω
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 V, T_A = 25°C	> 1500	MΩ
m	Mass	22	g
	Standards [5]	EN 50178	

Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

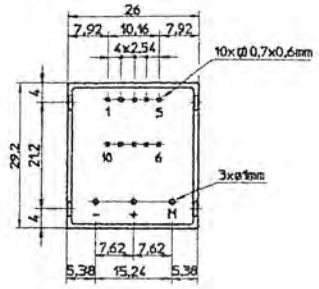
Notes : [1] Pollution class 2
[2] Measurement carried out after 15 mn functionning
[3] The result of the coercive field of the magnetic circuit
[4] With a di/dt of 100 A/µs
[5] A list of corresponding tests is available

980909/8

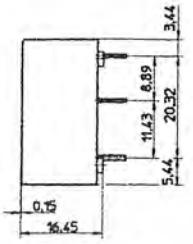
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dimensions LA 25-NP (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)

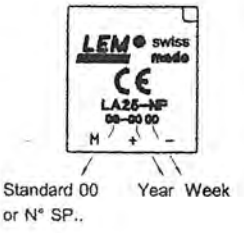
Bottom view

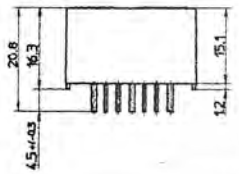


Right view



Top view

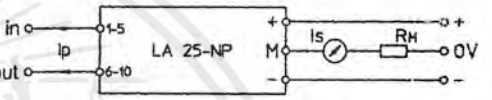




Secondary terminals

Terminal + : supply voltage + 15 V
Terminal M: measure
Terminal - : supply voltage - 15 V

Connection



Number of primary turns	Primary current nominal I_{PN} [A]	Primary current maximum I_P [A]	Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_P [mΩ]	Primary insertion inductance L_P [µH]	Recommended connections
1	25	36	25	1/1000	0.3	0.023	IN 5 4 3 2 1 / OUT 6 7 8 9 10
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	IN 5 4 3 2 1 / OUT 6 7 8 9 10
3	8	12	24	3/1000	2.5	0.21	IN 5 4 3 2 1 / OUT 6 7 8 9 10
4	6	9	24	4/1000	4.4	0.37	IN 5 4 3 2 1 / OUT 6 7 8 9 10
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	IN 5 4 3 2 1 / OUT 6 7 8 9 10

Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 10 pins 0.7 x 0.6 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins ∅ 1 mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

Remarks

- I_S is positive when I_P flows from terminals 1, 2, 3, 4, 5 to terminals 10, 9, 8, 7, 6
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี โดยการให้คำแนะนำ คำปรึกษาความอนุเคราะห์ทางด้านวิชาการ อุปกรณ์เครื่องมือ และเทคนิคต่างๆโดย ดร.วิจิตร กิณเรศ และอาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณ พี่ๆนักศึกษปริญญาโท ที่ให้คำปรึกษาทางทฤษฎี และวงจรเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงาน ตลอดจนบุคคลอื่นๆ จนทำให้โครงงาน และปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี คณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Fang Zheng Peng, "Application Issues of Active Power Filters", 7th Int'l Conference on Harmonics and Quality of Power, and IEEE Industry Applications Magazine, September/October 1998.

[2] IEEE, Transactions on Industrial Electronics Vol.43 No.6 Dec.1995, "A Simple Frequency – Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load",pp894-899,1999.

[3] IEEE, "New Trends in Active Filters for Improving Power Quality",pp417-425,1999

[4] IEEE ,Jianping Ying, "An Improved Control Method for Three- Phase Active Power Filter". International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, pp905-909,July1999, Hong Kong

[5] Ned Mohan, "Power Electronics: converters, applications and design", Second edition, John Wiley & Sons, Inc.

[6] John G. Kasakian, Martin F.Schlect, George C. Verghese, "Principles of Power Electronics", Addison – Wesley Publishing Company.

[7] Andrzej M. Trzynadlowski, "Introduction to Modern Power Electronics", John Wiley & Sons, inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้