

วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน

นายกิติพงษ์ สิทธิเลิศพิศาล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-108-1

ลิขสิทธิ์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16998686

**A SERIES ACTIVE POWER FILTER AS A HARMONIC SUPPRESSOR
AND VOLTAGE STABILIZER**

MR.KITIPHOT SITILERTPISAN

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-634-108-1

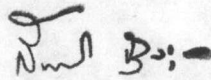
หัวข้อวิทยานิพนธ์ : วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิก
และรักษาระดับแรงดัน

โดย : นายกิติพงษ์ สิทธิเลิศพิศาล

ภาควิชา : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

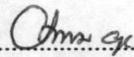
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

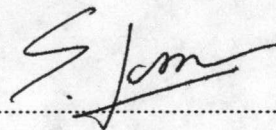


..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุทสุวรรณ)

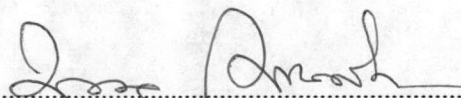
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



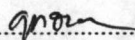
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)



..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

กิตติพงษ์ สิริเลิศพิศาล : วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน
(A SERIES ACTIVE POWER FILTER AS A HARMONIC SUPPRESSOR AND VOLTAGE
STABILIZER) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 154 หน้า. ISBN 974-634-108-1

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรกรองแบบต่าง ๆ ในการลดกระแสฮาร์มอนิก และได้นำเสนอวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมาใช้ในการระงับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด โดยอาศัยหลักการควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม กระทำต่อความถี่ฮาร์มอนิกเสมือนกับตัวความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด นอกจากนี้วงจรกรองกำลังที่นำเสนอนี้ยังสามารถควบคุมรักษาระดับแรงดันที่ตกคร่อมโหลดให้มีค่าคงที่ได้ โดยจะกระทำต่อความถี่หลักมูลเสมือนเป็นตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างแรงดันขึ้นมาชดเชยค่าแรงดันหลักมูลที่ขาดหายไป และ ยังช่วยทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบที่มองจากด้านแหล่งจ่ายมีค่าสูงขึ้นด้วยการคำนวณค่าแรงดันสำหรับกระงับกระแสฮาร์มอนิกจะอาศัยหลักการของสเปซเวกเตอร์ (Space Vector) ซึ่งจะพิจารณาเทียบกับแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่เท่ากับความถี่หลักมูล (50Hz) พร้อมกันนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยยังได้ วิเคราะห์หาเสถียรภาพของการควบคุมในส่วนของการสร้างแรงดันระงับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยแผนภูมิในควิสต์ ผลของการทดสอบที่ได้แสดงถึงสมรรถนะของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา.....2538.....

ลายมือชื่อนิติ.....*Adwong S. S. S. S.*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*S. S. S.*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

C515527 : MAJOR POWER ELECTRONICS
KEY WORD: SERIES ACTIVE POWER FILTER / HARMONIC SUPPRESSOR / VOLTAGE STABILIZER
KITIPHOT SITILERTPISAN : A SERIES ACTIVE POWER FILTER AS A HARMONIC
SUPPRESSOR AND VOLTAGE STABILIZER. THESIS ADVISOR : DR. SOMBOON
SANGWONGWANICH 154 pp. ISBN 974-634-108-1

In this thesis, we study the benefits and disadvantages of several kinds of harmonic filters, and propose a novel series active power filter (SAPF) for suppressing the harmonic currents flowing between the power source and loads. At harmonic frequencies, the SAPF will behave like a series resistor inserted between the source and loads. In addition, at the fundamental frequency, the SAPF will then behave like a series capacitor or inductor inserted between the source and loads for compensation of the voltage drop and improving the power factor of the system. Calculation of harmonic suppression voltage is carried out through space vector representation which uses the synchronously rotating frame of the fundamental frequency (50 Hz) as a reference frame. Stability analysis of the harmonic suppression system is also discussed using the Nyquist Plot. Experimental results verify the feasibility of the proposed series active power filter.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา.....2538

ลายมือชื่อนิติ.....*Kitiphot Sitilertpisan*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*S. Pong*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำตลอดจน ความช่วยเหลือด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ตลอดจนทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในการ จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา



สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญเรื่อง	ช
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 ทฤษฎีการลดฮาร์มอนิก	6
3 ทฤษฎีการรักษาระดับแรงดันตกคร่อมโหลด	16
4 อินเวอร์เตอร์แบบไร้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรง	27
5 โครงสร้างฮาร์ดแวร์	34
6 ผลการทดสอบระบบ	43
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	105
รายการอ้างอิง	108
ภาคผนวก ก	110
ภาคผนวก ข.....	114
ภาคผนวก ค.....	118
ภาคผนวก ง.....	123
ภาคผนวก จ.....	126
ประวัติผู้เขียน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เสถียรภาพในการควบคุมของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A และ B ที่ค่าอัตราขยาย K ต่างๆ.....	14
3.1 การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมในช่วงต่างๆ.....	23
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	43
6.2 ค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกและ THD ของกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟลดกระแสฮาร์โมนิก (switching frequency 6 kHz).....	62
6.3 ความสัมพันธ์ของค่ามอดูเลตระหว่างกระแสและแรงดันกับค่าที่สัญญาณลำดับต่างๆ	62
6.4 ค่าองค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิกและค่าองค์ประกอบความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมที่ค่าอัตราขยาย K ค่าต่างๆ (switching frequency 10 kHz).....	81
6.5 ผลการทดสอบระบบรักษาแรงดันเมื่อโหลดมีลักษณะเป็นแบบตัวเก็บประจุ.....	84
6.6 ผลการทดสอบระบบรักษาแรงดันเมื่อโหลดมีลักษณะเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	84
6.7 ผลการทดสอบระบบรักษาแรงดันเมื่อโหลดมีลักษณะเป็นแบบที่มีฮาร์โมนิกปนอยู่.....	87
6.8 ค่าองค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิก ค่าองค์ประกอบความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม และค่าแรงดันตกคร่อมโหลด เมื่อใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟลดกระแสฮาร์โมนิกและรักษาระดับแรงดัน.....	88
7.1 ปริมาณกระแสโหลดและค่ากระแสจากแหล่งจ่ายที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ.....	106
ค.1 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ.....	122

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบและการใช้วงจรกรองแบบต่างๆ.....	2
1.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบต่างๆ.....	3
2.1 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	6
2.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม.....	6
2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับความถี่ฮาร์มอนิก.....	7
2.4 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณค่าแรงดันสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก.....	8
2.5 เวกเตอร์กระแส และ แกนอ้างอิง d-q ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz.....	8
2.6 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณค่าแรงดันชดเชยสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก.....	9
2.7 บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองผ่านความถี่สูงแบบ A และ B.....	9
2.8 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A.....	11
2.9 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B.....	11
2.10 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส และ บล็อกไดอะแกรมของการลดกระแสฮาร์มอนิก.....	12
2.11 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A (K=100).....	12
2.12 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B (K=100).....	13
2.13 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A (K=310).....	13
2.14 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B (K=310).....	13
2.15 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A (K=400).....	14
2.16 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B (K=400).....	14
3.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับความถี่หลักมูล.....	16
3.2 ลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันในรูปแบบของสเปซเวกเตอร์.....	16
3.3 ทิศทางของเวกเตอร์กระแส,แรงดัน และ ผลคูณเชิงเวกเตอร์.....	18
3.4 แรงดันของแหล่งจ่าย และ แรงดันตกคร่อมโหลดในรูปแบบของเวกเตอร์.....	19
3.5 การชดเชยค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลดในกรณีค่ามุมระหว่าง v_i และ i_i ค่าต่างๆ.....	20
3.6 เวกเตอร์แรงดันและกระแสขณะแรงดันชดเชยมีค่า 20% ของแรงดันพิกัดของระบบ...	21
3.7 เวกเตอร์ขณะชดเชย VAR และแรงดันชดเชยมีค่า 20% ของแรงดันพิกัดของระบบ....	23
3.8 ขอบเขตการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	23
3.9 เวกเตอร์กระแสและแรงดันต่างๆ ขณะทำงานในพื้นที่ 1.....	25
3.10 เวกเตอร์กระแสและแรงดันต่างๆ ขณะทำงานในพื้นที่ 2,3.....	25
3.11 เวกเตอร์กระแสและแรงดันต่างๆ ขณะทำงานในพื้นที่ 4.....	26
3.12 แผนภาพวิธีการหาพื้นที่การทำงาน.....	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัลไฟตรง.....	28
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแรงดันบัลไฟตรง.....	28
4.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันบัลไฟตรง.....	29
4.4 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมระดับแรงดันไฟตรงหลังจากทำการประมาณเป็นระบบเชิงเส้น	30
4.5 แผนภูมิโบบ์ของระบบเมื่อยังไม่รวมส่วนควบคุม PI.....	30
4.6 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบ.....	31
4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมค่าระดับแรงดันบัลไฟตรง.....	32
4.7 ผลการทดลองการทำงานของระบบรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรง.....	33
5.1 โครงสร้างของวงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรม.....	34
5.2 รูปแบบการจับวางอุปกรณ์สวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์.....	35
5.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแสเพื่อป้องกันกระแสเกิน.....	36
5.4 ภาคตรวจจับแรงดันเพื่อป้องกันแรงดันเกิน.....	36
5.5 ส่วนควบคุมสัญญาณขั้วนำเกิด.....	37
5.6 ส่วนตรวจจับแรงดันจากแหล่งจ่ายและแรงดันบัลไฟตรง.....	37
5.7 ส่วนควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์แบบบอร์ดเดียว.....	38
5.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบวงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรม.....	39
5.9 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล Harmonic.....	41
5.10 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล Voltage.....	42
6.1 ระบบวงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
6.2 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่มีเพียงวงจรรอกำลึงพาสซีฟแบบขนาน.....	45
6.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ใช้วงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรมเฉพาะลดกระแสฮาร์มอนิกอย่างเดียว.....	45
6.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ใช้วงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรมเฉพาะการรักษาระดับแรงดันคร่อมโหลด.....	46
6.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ใช้วงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบอนุกรมลดกระแสฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดันคร่อมโหลด.....	46
6.6 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสโหลด.....	49
6.7 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (K=0).....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองแบบพาสซีฟ ($K=0$).....	51
6.9 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 30$, switching frequency 6 kHz.....	52
6.10 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 30$, switching frequency 6 kHz.....	53
6.11 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 50$, switching frequency 6 kHz.....	54
6.12 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 50$, switching frequency 6 kHz.....	55
6.13 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 60$, switching frequency 6 kHz.....	56
6.14 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 60$, switching frequency 6 kHz.....	57
6.15 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 65$, switching frequency 6 kHz.....	58
6.16 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 65$, switching frequency 6 kHz.....	59
6.17 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 70$, switching frequency 6 kHz.....	60
6.18 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 70$, switching frequency 6 kHz.....	61
6.19 มุมเฟสต่างของกระแสจากแหล่งจ่ายและแรงดันที่สร้างขึ้น ณ ค่าที่ฮาร์มอนิกอันดับ ต่างๆ.....	63
6.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้จำลองผลการประวิงเวลา.....	63
6.21 ผลจำลองการทำงานเมื่อรวมผลของการประวิงเวลาเข้าไปในระบบ.....	64
6.22 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 30$, switching frequency 10 kHz.....	65
6.23 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 30$, switching frequency 10 kHz.....	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.24 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 50$, switching frequency 10 kHz.....	67
6.25 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 50$, switching frequency 10 kHz.....	68
6.26 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 60$, switching frequency 10 kHz.....	69
6.27 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 60$, switching frequency 10 kHz.....	70
6.28 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 65$, switching frequency 10 kHz.....	71
6.29 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 65$, switching frequency 10 kHz.....	72
6.30 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 75$, switching frequency 10 kHz.....	73
6.31 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 75$, switching frequency 10 kHz.....	74
6.32 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 80$, switching frequency 10 kHz.....	75
6.33 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 80$, switching frequency 10 kHz.....	76
6.34 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 85$, switching frequency 10 kHz.....	77
6.35 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 85$, switching frequency 10 kHz.....	78
6.36 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ $K = 90$, switching frequency 10 kHz.....	79
6.37 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรกรองพาสซีฟที่ $K = 90$, switching frequency 10 kHz.....	80
6.38 สัญญาณกระแสจากแหล่งจ่าย (i_s) และแรงดันขดเคชของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (v_c) ในกรณีโหลดเป็นแบบตัวเก็บประจุ (กระแสมีรูปคลื่นเป็นไซน์).....	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.39 สัญญาณแรงดันระหว่างสายจากแหล่งจ่าย (v_s) และแรงดันระหว่างสายตกคร่อมโหลด (v_L) ในกรณีโหลดเป็นแบบตัวเก็บประจุ (กระแสมีรูปคลื่นเป็นไซน์).....	82
6.40 สัญญาณกระแสจากแหล่งจ่าย (i_s) และแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (v_c) ในกรณีโหลดเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำ (กระแสมีรูปคลื่นเป็นไซน์).....	83
6.41 สัญญาณแรงดันระหว่างสายจากแหล่งจ่าย (v_s) และแรงดันระหว่างสายตกคร่อมโหลด (v_L) ในกรณีโหลดเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำ (กระแสมีรูปคลื่นเป็นไซน์).....	83
6.42 การเปรียบเทียบระหว่างช่วงที่ไม่มีกระแสแรงดันและในช่วงที่มีการชดเชยแรงดัน	85
6.43 สัญญาณกระแสจากแหล่งจ่าย (i_s) และแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (v_c) ในกรณีที่โหลดมีลักษณะเป็นแบบที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่.....	86
6.44 สัญญาณแรงดันระหว่างสายจากแหล่งจ่าย (v_s) และแรงดันระหว่างสายตกคร่อมโหลด (v_L) ในกรณีที่โหลดมีลักษณะเป็นแบบที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่.....	86
6.45 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=30$	89
6.46 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=30$	90
6.47 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=50$	91
6.48 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=50$	92
6.49 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=60$	93
6.50 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=60$	94
6.51 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=65$	95
6.52 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=65$	96
6.53 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=75$	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.54 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟ ทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=75$	98
6.55 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=80$	99
6.56 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟ ทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=80$	100
6.57 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=85$	101
6.58 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟ ทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=85$	102
6.59 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำหน้าที่ ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=90$	103
6.60 สัญญาณและสเปกตรัมของกระแสผ่านวงจรรองพาสซีฟขณะที่วงจรรองแอกทีฟ ทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยแรงดัน, $K=90$	104
ข.1 (ก) แบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์ (ข) เวกเตอร์แรงดันของชุดอินเวอร์เตอร์.....	115
ข.2 ส่วนประกอบของเวกเตอร์แรงดัน.....	116
ข.3 แผนผังเวลารูปแบบการสวิตช์.....	116
ค.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรรองกำลังแบบพาสซีฟ.....	119
ง.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อรวมผลของการประวิงเวลา.....	124
ง.2 แผนภูมิในควิสต์ของระบบที่มีการประวิงเวลา $166.66 \mu s$, $K=55$	124
ง.3 แผนภูมิในควิสต์ของระบบที่มีการประวิงเวลา $100 \mu s$, $K=90$	125