



รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมรรถนะวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง
สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

**(The Performance Improvement of Instantaneous Power Theory
for Active Power Filter)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมรรถนะวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง
สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

**(The Performance Improvement of Instantaneous Power Theory
for Active Power Filter)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2557

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยวิธีที่ปรับปรุงขึ้น เรียกว่า วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง ประกอบกับวิธีฟูริเยร์ การทดสอบสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของวิธีที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่อาศัยวิธีการที่พัฒนาขึ้น เมื่อใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งแบบดั้งเดิม อีกทั้งผลการกำจัดฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 นอกจากนี้ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเป็น 1 ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ในงานวิจัยมีการนำเสนอการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย เพื่อควบคุมการบิดกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยโครงสร้างของระบบการควบคุมจะอยู่บนแกนดีคิว และในส่วนของ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ในงานวิจัยได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยจากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งระบบ พบว่า การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และใช้ตัวควบคุมต่าง ๆ ตามแนวทางที่เสนอในงานวิจัยนี้ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดี โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE std. 519-1992

Abstract

This research presents the performance improvement of instantaneous power theory for active power filter. The instantaneous power theory with Fourier called PQF is the harmonic identification method proposed in this research. This method is modified from the conventional instantaneous power theory. In this research, the MATLAB programming is used to simulate the harmonic identification of the system. The performance comparison between the conventional instantaneous power theory and the instantaneous power theory with Fourier is also proposed in this research. From the simulation results, the instantaneous power theory with Fourier method can provide the better performance compared with the conventional method. Moreover, the harmonic elimination results are followed the IEEE Std.519-1992. In addition, the power factor after compensation is a unity. In this research, the predictive controller on dq-frame is applied to control the compensating currents injection of active power filter. In addition, the PI controller is selected to regulate the DC bus voltage of active power filter. From the overall simulation results, the harmonic elimination using the harmonic identification and the controllers proposed in this research can provide the good results. The %THD of source currents after compensation is decrease and it is also followed the IEEE Std. 519-1992.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การปรับปรุงสมรรถนะวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งสำหรับวงจรรอกกำลัง แอक्तिพ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนายสุขสันต์ ดิยรัชกุล และนายพลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกตามวิธีการในงานวิจัย ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง



กองพล อารีรักษ์

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัย	4
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรองกำลังแอกทีฟ	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ...	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรองกำลังแอกทีฟ	10
2.6 สรุป	11
3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์	13
3.1 บทนำ.....	13

สารบัญ (ต่อ)

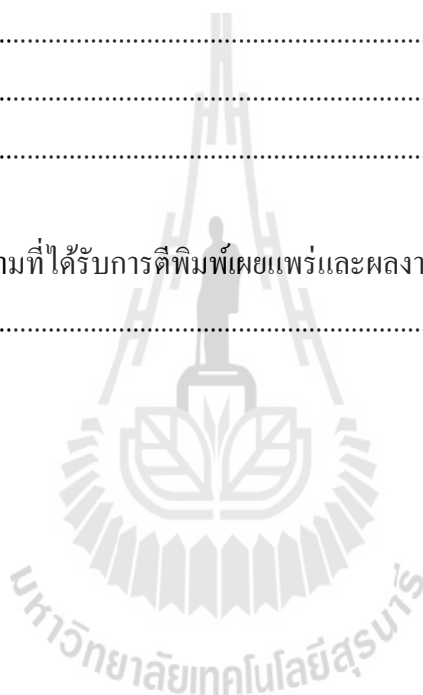
หน้า

3.2	นิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ในวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง.....	13
3.3	การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง	18
3.4	การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ ..	20
3.5	สรุป	25
4	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	27
4.1	บทนำ.....	27
4.2	ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีกระแสไหลคแบบอุดมคติ	27
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีไหลคเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	45
4.4	สรุป	59
5	การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายสำหรับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	60
5.1	บทนำ.....	60
5.2	โครงสร้างระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจร กรองกำลังแอกทีฟ.....	60
5.3	การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	62
5.4	หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย	64
5.5	ขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย บนแกนดีคิว.....	67
5.6	การออกแบบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนาย บนแกนดีคิว.....	69
5.7	ผลการจำลองสถานการณ์ และการอภิปรายผล.....	72
5.8	สรุป	76
6	การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	78
6.1	บทนำ.....	78
6.2	การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการเชื่อมโยงกับ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูรีเยร์	78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	80
6.4	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	82
6.5	ผลการจำลองสถานการณ์ และการอภิปรายผล.....	85
6.6	สรุป	99
7	สรุป	100
	รายการอ้างอิง	104
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดลิขสิทธิ์.....	108
	ประวัติผู้วิจัย	110



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน..... 5
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ 7
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการบิดกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ..... 9
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ 10
3.1	ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ใช้คำนวณกระแสอ้างอิงในแต่ละกรณี ... 19
4.1	เปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF..... 32
4.2	เปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF เมื่อ โหลดเป็นวงจรเรียงกระแส..... 46
5.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์สำหรับสมการของลากรานจ์อันดับต่าง ๆ 66
5.2	เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ จากการใช้สมการของลากรานจ์แต่ละอันดับ..... 70
5.3	เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ จากการสุ่มค่าคงที่การปรับลด 71
5.4	เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย จากการสุ่มค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ สามเหลี่ยม..... 72
5.5	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ 73
6.1	ผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2
2.1	ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 12
3.1	แผนภาพการแปลงแกน และอินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์ก 15
3.2	ความหมายทางฟิสิกส์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ขณะหนึ่ง 16
3.3	แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ 20
3.4	แผนภาพการคำนวณค่า A_{op} และ A_{oq} 23
3.5	แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF 24
3.6	แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF 25
4.1	ระบบที่มีกระแสไหลคแบบอุดมคติและวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแส แบบอุดมคติ 28
4.2	สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ 28
4.3	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ 30
4.4	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์ 30
4.5	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 280 เฮิร์ตซ์ 31
4.6	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้วิธี SWFA 31
4.7	รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 1 33
4.8	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อน การชดเชย 34
4.9	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย 34
4.10	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชย ด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 35
4.11	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 35
4.12	รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 2 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2.....	38
4.14 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2.....	38
4.15 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 1.....	39
4.16 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1	40
4.17 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1.....	40
4.18 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a	41
4.19 สเปกตรัมกระแสชดเชยเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1	41
4.20 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 2.....	43
4.21 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2	44
4.22 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2.....	44
4.23 สเปกตรัมกระแสชดเชยเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2	45
4.24 ระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและวงจรรอกกำลังแยกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ.....	46
4.25 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	47
4.26 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย กรณี โหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	48
4.27 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย กรณี โหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	48
4.28 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	49
4.29 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์สามเฟสของวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	50
4.31 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	51
4.32 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	51
4.33 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	53
4.34 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	54
4.35 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	54
4.36 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	55
4.37 สเปกตรัมกระแสชดเชยในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	55
4.38 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	56
4.39 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	57
4.40 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	57
4.41 สเปกตรัมกระแสชดเชยในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	58
5.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ ...	61
5.2 สเปกตรัมของกระแสโหลดเฟส a	63
5.3 โครงสร้างการวิเคราะห์ระบบ	65
5.4 หลักการของการควบคุมกระแสแบบทำนาย	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5	แผนภาพการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนคิวิร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม 68
5.6	รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟส..... 73
5.7	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a 75
5.8	รูปสัญญาณระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยในเฟส a แกนคิ และแกนคว 76
6.1	ระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 79
6.2	แผนภาพการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง..... 80
6.3	ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ตัวเก็บประจุ..... 82
6.4	บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ..... 83
6.5	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีการประมาณค่าราคาที่สองของ V_{dc}^2 84
6.6	รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟส..... 86
6.7	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a 87
6.8	รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง 89
6.9	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง..... 89
6.10	รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 90
6.11	รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรง 90
6.12	รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน 92
6.13	รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน 92
6.14	รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน..... 93
6.15	รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน 93
6.16	รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงในช่วงคายพลังงาน 94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทิฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วง คายพลังงาน.....	94
6.18 รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วง คายพลังงาน.....	95
6.19 รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงในช่วงคายพลังงาน.....	95
6.20 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	96
6.21 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	97
6.22 รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	98



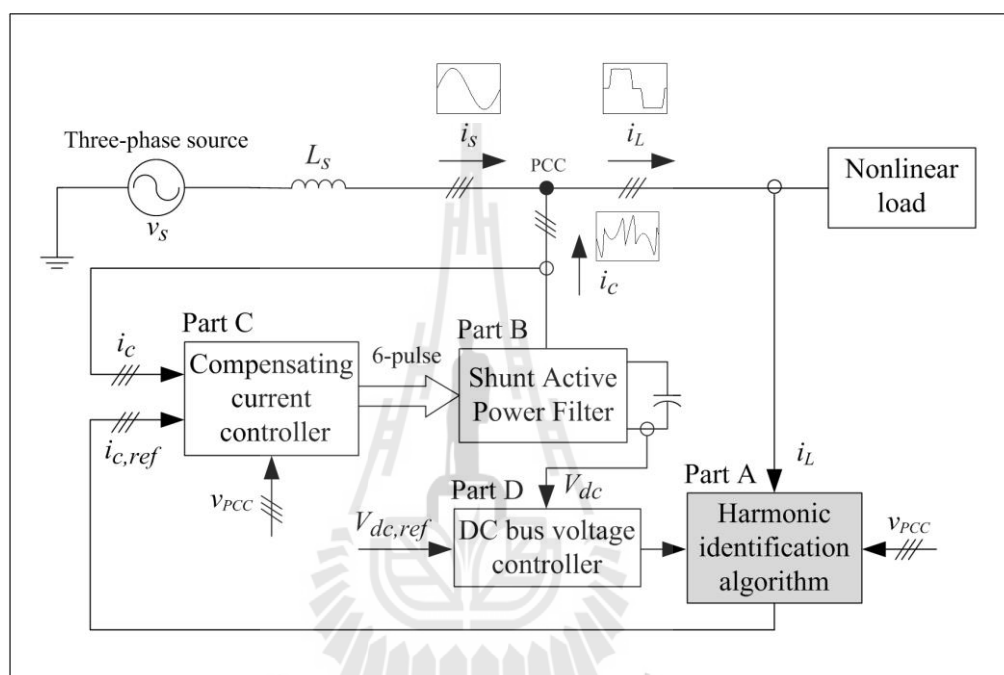
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ วงจรคอนเวอร์เตอร์ เครื่องคอมพิวเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อหลายประการ ได้แก่ ทำให้มีเตอร์วัดค่าไฟวัดค่าผิดพลาด (Indrajit, and Paul, 1989) (Elham, Clarence, and Adly, 1992) อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด (Ho, and Liu, 2001) เกิดกำลังงานสูญเสีย (Rice, 1986) และความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน (Wagner, 1993) เป็นต้น จากเหตุผลข้างต้น การกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง จึงเป็นประเด็นสำคัญสำหรับงานวิจัยนี้ วิธีสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Liang, and Ilochonwu, 2011) การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Benchaita, Saadate, and nia, 1999) และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Lin, Yang, and Tsai, 2002) จากงานวิจัยในอดีตวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการสวิตชิง ฉีดกระแสเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกในระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง มีความสามารถในการปรับรูปร่างค่าตัวประกอบกำลังและมีความอ่อนตัวในการปรับแต่งเพื่อให้เหมาะกับระบบใด ๆ ได้ง่าย เมื่อเทียบกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนาน อีกทั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานมักประสบปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเป็นสำคัญ และจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสมรรถนะการทำงานที่ดีสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนดังรูปที่ 1.1 ได้แก่ ส่วน A กระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ส่วน B โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ส่วน C กระบวนการควบคุมกระแสชดเชย และส่วน D กระบวนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาส่วน A โดยส่วน A กระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทำหน้าที่สร้างกระแสอ้างอิงที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกในระบบ และจากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก พบว่าแบ่งได้เป็นสองกลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจเฉพาะการกำจัด ฮาร์มอนิก โดยไม่ปรับรูปร่างค่าตัวประกอบกำลัง และกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมทั้งปรับรูปร่างค่าตัวประกอบกำลัง งานวิจัย

นี่จึงมุ่งเน้นพัฒนาวิธีการใหม่ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้นซึ่งวิธีการดังกล่าวอยู่ในกลุ่มที่สอง การพัฒนาองค์ความรู้ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะ โดยค่า %THD ดังกล่าวต้องอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 การจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยใช้ชุดบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 1.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้และพัฒนาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้และดำเนินการออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวสำหรับควบคุมการฉีดกระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2.4 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล
- 1.3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
- 1.3.3 การจำลองสถานการณ์ฟังก์ชันโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems
- 1.3.4 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน
- 1.3.5 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและระบบที่มีกระแสโหลดแบบอูมคคติ
- 1.3.6 การวิเคราะห์ และแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกมุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว
- 1.3.7 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ใช้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย โดยค่า %THD ดังกล่าวภายหลังการชดเชยต้องอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลเท่านั้น
- 1.4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ต้องอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
- 1.5.2 ได้องค์ความรู้ใหม่ด้านการพัฒนาอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น
- 1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว
- 1.5.4 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
- 1.5.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 3 อธิบายนิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งและขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ อีกทั้งยังนำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธีการใหม่ที่เรียกว่า วิธี PQF ซึ่งอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการและขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธีนี้อย่างละเอียด

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกโดยระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มี 2 ระบบ คือ ระบบแรกเป็นระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ และระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

บทที่ 5 นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ อีกทั้งอธิบายหลักการพื้นฐานและการออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวสำหรับการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอธิบายรายละเอียดขั้นตอน และการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมดังกล่าวอย่างละเอียด

บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการเชื่อมโยงกับวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบด้วยวิธีฟูรีเยร์

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน พบว่า มีการวิจัยและพัฒนาจากอดีตจนถึงปัจจุบันอย่างต่อเนื่อง การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญเพื่อเป็นรากฐานการวิจัย การสำรวจงานวิจัยในอดีตดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งจะนำมาเป็นเหตุผลประกอบสำหรับการศึกษาวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง การสำรวจในข้างต้นผู้วิจัยได้นำเสนอ ปีที่ตีพิมพ์งานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัย รวมถึงอธิบายสาระสำคัญที่ได้ในแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1988	Hayashi, Y., Sato, N., and Takahashi, K.	นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส
1995	Xu, J. H., Lott, C., Saadate, S., and Davat, B.	นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Benchaita, L., Saadate, S., and Nia, A. S.	นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ปรากฏว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่า
2006	Zouidi, A., Fnaiech, F., and Al-Haddad, K.	นำเสนอโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งกรณีเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและแหล่งจ่ายแรงดัน สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามสายและสามเฟสสี่สาย และได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบโดยมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ความไวต่อการตอบสนอง ความซับซ้อนต่อการควบคุม ความอ่อนตัวของวงจร กำลังงานสูญเสีย และราคา ปรากฏว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีสมรรถนะที่ดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสทุกคุณสมบัติที่กล่าวมา
2007	Routimo, M., Salo, M., and Tuusa, H.	นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยทดสอบกับโหลด 2 กรณี คือ กรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและกรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ผลปรากฏว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสมีข้อดี คือ ง่ายต่อการควบคุม กระแสแบบวงรอบเปิด มีข้อเสีย คือ เกิดการสูญเสีย ของวงจรเชื่อมโยงทางคิซีสูง เกิดข้อจำกัดเมื่อแรงดันเกินในส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีข้อดี คือ มีสมรรถนะที่ดี ณ จุดการทำงานที่กำหนด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน ผลการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ
วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1984	Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A.	นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกบนระบบสามเฟสสมดุลด้วยวิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory) ซึ่งเรียกว่าวิธี PQ สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงเพื่อชดเชยฮาร์มอนิก และกำลังรีแอกทีฟให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
2001	EI-Habrouk M., and Darwish, M. K.	นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis) ซึ่งเรียกว่าวิธี SWFA วิธีนี้เป็นวิธีที่ปรับการคำนวณให้เร็วกว่าวิธี FFT ปกติ โดยทำการคำนวณเพียงองค์ประกอบมูลฐานของกระแส จากนั้นนำไปห้กลับกับค่ากระแสโหนดทั้งหมด เพื่อให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับชดเชยฮาร์มอนิก
2004	Chen, D., and Xie, S.	นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ กับวิธี SRF (Synchronous Reference Frame) โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 4 ประเด็น ประเด็นที่ 1 คือ ผลของความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย ประเด็นที่ 2 คือ ผลจากกรณีทดสอบกับโหลดไม่สมดุล ประเด็นที่ 3 คือ ความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณ และประเด็นที่ 4 คือ ผลการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ปรากฏว่า วิธี SRF ดีกว่าในประเด็นที่ 1 และ 2 วิธี PQ ดีกว่าในประเด็นที่ 4 ส่วนประเด็นที่ 3 มีความใกล้เคียงกันทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ
วงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Sujitjorn, S., Areerak, K-L., and Kulworawanichpong, T.	นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคว (DQ axis with Fourier) ซึ่งเรียกว่าวิธี DQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สายแบบไม่สมดุล มีการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกกับอีก 2 วิธี คือ วิธี SRF และ วิธี SWFA ปรากฏว่า วิธี DQF มีสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกดีกว่าอีกสองวิธี และสามารถรักษาสภาพสมดุลภายหลังการชดเชยได้อย่างสมบูรณ์
2009	Abdelkhalek, O., and Benachaiba, C.	นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SD (Synchronous Detection) โดยทำการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์ ปรากฏว่า กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ ทั้งสองวิธีให้ผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ดีทั้งคู่ แต่กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์ วิธี PQ ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี SD

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

วิธีการควบคุมกระแส จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธี การศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมในส่วนนี้ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการฉีดกระแสขดลวดสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1993	Kazmierkowski, M. P., and Dzieniakowski, M. A.	นำเสนอผลการสำรวจวิธีการควบคุมกระแส ทั้งหมด 7 วิธี ได้แก่ วิธีพีดับเบิลยูเอ็ม วิธีพีไอ วิธีทำนาย (predictive) วิธีเดลตา วิธีฮีสเตอร์ซิส วิธีเครือข่ายประสาทเทียม (neural network) และวิธีฟัซซีลอจิก (fuzzy logic)
1998	Kazmierkowski, M. P., and Malesani, L.	นำเสนอผลการสำรวจวิธีการควบคุมกระแส โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มการควบคุมกระแสแบบเชิงเส้น ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> - วิธี stationary frame controller - วิธี synchronous frame controller - วิธี predictive deadbeat controller กลุ่มการควบคุมกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> - วิธี hysteresis controller - วิธี delta modulation - วิธี online – optimized controller พบว่า การควบคุมกระแสแบบเชิงเส้นมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้สำหรับการควบคุมแบบดิจิทัล
2002	Mendalek, N., Al-Haddad, K., Fnaiech, F., and Dessaint, L. A.	นำเสนอวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกบนระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีระบบที่มีโหลดสมดุล และกรณีระบบที่มีโหลดแบบไม่สมดุล ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ปรากฏว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้ง 2 กรณี
2007	Rodriguez, J., Pontt, J., Silva, C., Cortes, P., Amman, U., and Rees, S.	นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมกระแสระหว่างวิธีทำนาย วิธีพีดับเบิลยูเอ็ม และวิธีฮีสเตอร์ซิส โดยการทดสอบควบคุมกระแสรูปไซน์ ปรากฏว่า วิธีทำนายมีประสิทธิภาพดีกว่าอีกสองวิธี เมื่อพิจารณาที่บริเวณเชื่อมต่อของรูปสัญญาณไซน์ในแต่ละคาบ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Odavic, M., Biagini, V., Zanchetta, P., Sumner, M., and Degano, M.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟบนระบบสามเฟส โดยเปรียบเทียบการควบคุมกระแส 2 วิธี คือ การควบคุมกระแสแบบทำนายและการควบคุมกระแสแบบเดทบีท (deadbeat) ผลการทดลองปรากฏว่า การควบคุมกระแสแบบทำนายให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่าและนำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงในอนาคตด้วยสมการของลากรานจ์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ
วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

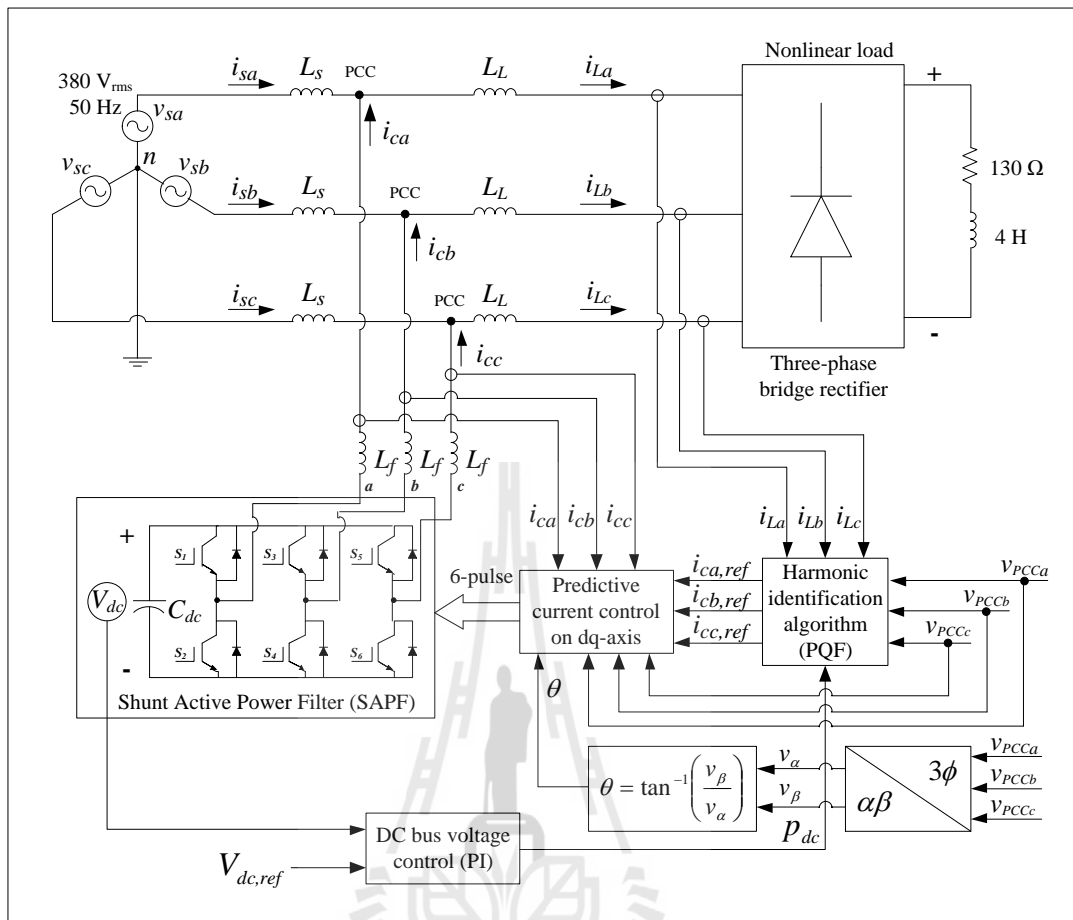
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	Bruyant, N., Machmoum, M., and Chevrel, P.	นำเสนอแนวทางการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง 2 วิธี ได้แก่ การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ RST
2000	Mendalek, N., and Al-Haddad, K.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการใช้งานเชื่อมโยงกับระบบควบคุมกระแสบนแกน d-q
2001	Cho, J-H., and Song, E-H.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และการนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ออกแบบแล้ว เชื่อมต่อการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ
วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	ทศพร ฌรงค์ฤทธิ์	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และการนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ออกแบบแล้ว เชื่อมต่อการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ โดยจำลองสถานการณ์ทั้งระบบที่มีและไม่มี การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

2.6 สรุป

จากข้อมูลปริทัศน์วรรณกรรมสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 1-4 ทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน เนื่องจากวงจรชนิดดังกล่าวมีสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี มีความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการทำงาน และมีกำลังงานสูญเสียต่ำ วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ใช้วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (instantaneous power theory with Fourier) ซึ่งจะเรียกว่าวิธี PQF เป็นวิธีการใหม่ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการของวิธี SWFA ผนวกกับวิธี PQ เดิม โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีความแม่นยำในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ และยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้เช่นกัน โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอคทีฟในงานวิจัยมีลักษณะเป็นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่มีการควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และมีการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากโครงสร้างการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ให้ผลการควบคุมที่ดี กระบวนการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นภาพรวมโดยสรุปของงานวิจัย โดยยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB มีดัชนีชี้วัด คือ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่าย ต้องอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992



รูปที่ 2.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูรีเยร์

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power filter : SAPF) ที่มีการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ (PQF) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น วิธี PQF เป็นการผสมผสานระหว่างวิธี PQ (Akagi, Kanazawa, and Nabae, 1984) ร่วมกับการใช้วิธี SWFA (EI-Habrouk, and Darwish, 2001) โดยวิธี PQF ได้รวมเอาข้อดีของวิธี PQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน ทำให้วิธี PQF มีความแม่นยำในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ รวมถึงมีการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอนิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธี PQ อีกทั้งขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ PQF อย่างละเอียด รวมถึงชี้ให้เห็นจุดเด่นของวิธี PQ และวิธี SWFA ที่ผู้วิจัยนำมาใช้ร่วมกันในวิธี PQF

3.2 นิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ในวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ มีนิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจ ประกอบด้วย การแปลงแกน และอินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์ค (Clarke's Transformation) การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (p) และการคำนวณค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

การแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยใช้การแปลงแกนของคาร์ค แสดงดังสมการที่ (3-1) การแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยใช้อินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์ค แสดงดังสมการที่ (3-2) โดยทั้งสองสมการดังกล่าวข้างต้นมีการปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ $\sqrt{\frac{2}{3}}$ เพื่อให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ ($p_{\alpha\beta 0}, q_{\alpha\beta 0}$) เท่ากับการคำนวณกำลังไฟฟ้าสามเฟส (p_{abc}, q_{abc})

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\mathbf{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

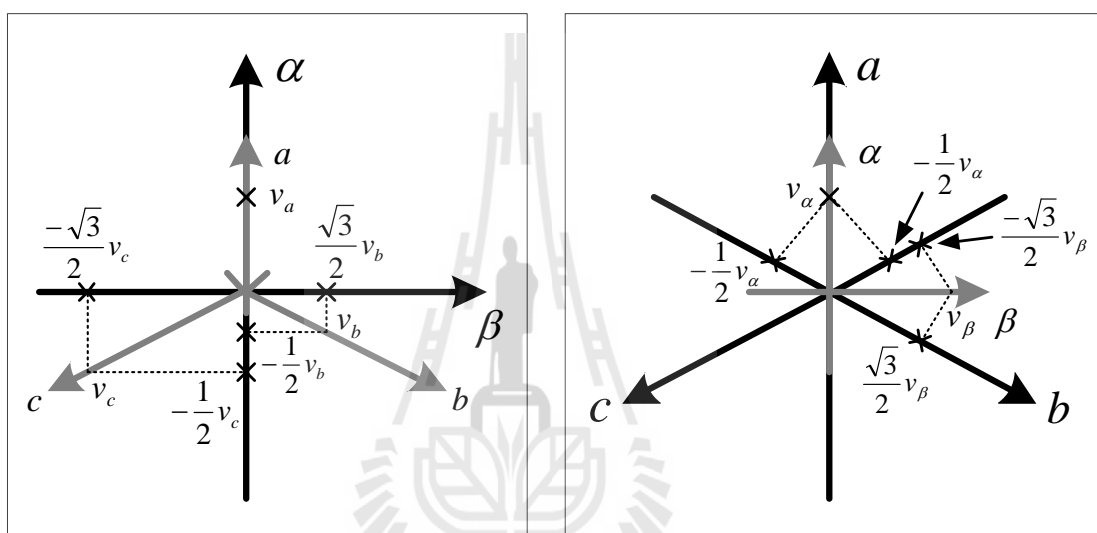
ในทำนองเดียวกัน การแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยใช้การแปลงแกนของคาร์กแสดงดังสมการที่ (3-3) การแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส โดยใช้อินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์กแสดงดังสมการที่ (3-4)

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$\mathbf{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลจะไม่พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ จึงไม่ปรากฏค่าแรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์ (v_0) และค่ากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ (i_0) ดังนั้นแผนภาพการแปลงแกน และอินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์กสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.1 จากรูป

ดังกล่าว ในงานวิจัยนี้พิจารณาปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_a, v_b, v_c) ที่มีส่วนประกอบลำดับบวก (positive sequence) ทำมุมห่างกันเท่ากับ $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน สำหรับแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำมุมตั้งฉาก โดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส a การแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ด้วยการแปลงแกนของคาร์กแสดงดังสมการที่ (3-5) การแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสด้วยอินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์กแสดงดังสมการที่ (3-6)



(ก) การแปลงแกน abc เป็นแกน $\alpha\beta$

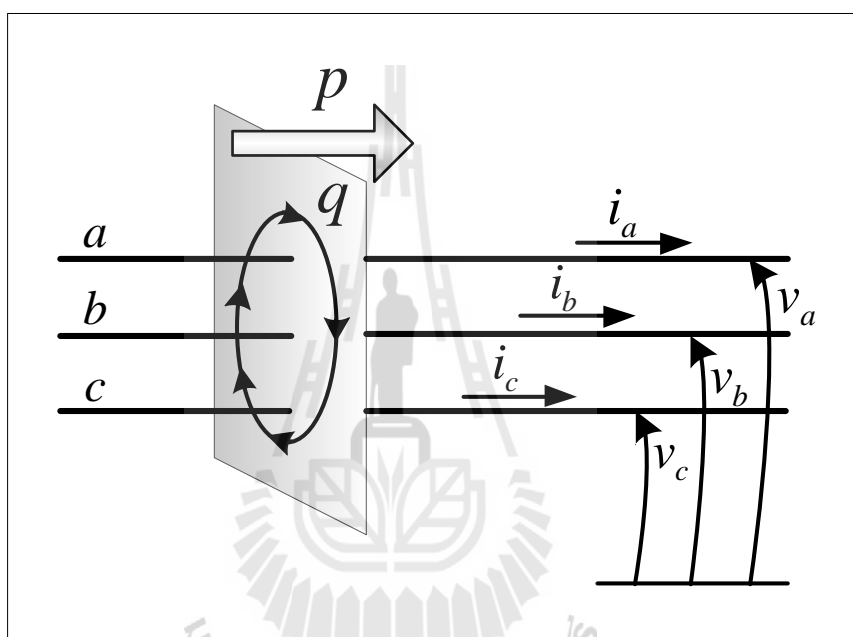
(ข) การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน abc

รูปที่ 3.1 แผนภาพการแปลงแกน และอินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์ก

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$\mathbf{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ความหมายทางฟิสิกส์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง หมายถึง การไหลของพลังงานรวมขณะหนึ่งต่อหน่วยเวลาที่ถูกถ่ายโอนไปยังโหลดแสดงดังรูปที่ 3.2 และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟขณะหนึ่ง หมายถึง การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างเฟสต่าง ๆ โดยไม่มีการถ่ายโอนพลังงานไปยังโหลด แสดงดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ จึงเป็นส่วนที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเป็นส่วนที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์เปรียบเสมือนกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในระบบ



รูปที่ 3.2 ความหมายทางฟิสิกส์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟขณะหนึ่ง

นิยามของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง พิจารณาได้ดังสมการที่ (3-7) จากสมการดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งสามเฟส (p_{abc}) แสดงดังสมการที่ (3-8) และการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ($p_{\alpha\beta 0}$) แสดงดังสมการที่ (3-9) จากสมการดังกล่าว เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลจะไม่พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ จึงไม่ปรากฏค่าแรงดันไฟฟ้ลำดับศูนย์ และค่ากระแสไฟฟ้ลำดับศูนย์ ทำให้สามารถพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ได้ดังสมการที่ (3-10)

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \quad (3-7)$$

$$P_{abc} = \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3-8)$$

$$P_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (3-9)$$

$$P = P_{\alpha\beta 0} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (3-10)$$

นิยามของเวกเตอร์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (\mathbf{q}) สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (3-11) จากสมการดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาการคำนวณเวกเตอร์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ($\mathbf{q}_{\alpha\beta 0}$) แสดงได้ดังสมการที่ (3-12) จากสมการดังกล่าว เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลจะไม่พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ ทำให้สามารถพิจารณาเวกเตอร์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ได้ดังสมการที่ (3-13) จากสมการดังกล่าว เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของเวกเตอร์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ จะได้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ($q_{\alpha\beta 0}$) ดังสมการที่ (3-14)

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (3-11)$$

$$\mathbf{q}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\beta i_0 - v_0 i_\beta \\ v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\mathbf{q}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$q = q_{\alpha\beta 0} = \|\mathbf{q}_{\alpha\beta 0}\| = \sqrt{q_\alpha^2 + q_\beta^2 + q_0^2} = q_0 = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (3-14)$$

3.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ใช้อินพุตในการคำนวณ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ($v_{PCCa}, v_{PCCb}, v_{PCCc}$) และกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) โดยที่เอาต์พุตของการคำนวณ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิง ($i_{ca,ref}, i_{cb,ref}, i_{cc,ref}$) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งการคำนวณแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่โหลด จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้การแปลงแกนของคาร์กคังสมการที่ (3-15) และ (3-16) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{PCC\alpha} \\ v_{PCC\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PCCa} \\ v_{PCCb} \\ v_{PCCc} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (p_L) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q_L) ทางด้านโหลด โดยอาศัยค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ดังสมการที่ (3-17) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{PCC\alpha} & v_{PCC\beta} \\ -v_{PCC\beta} & v_{PCC\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

ขั้นที่ 3 เป็นขั้นตอนการแยกกำลังไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นปริมาณฮาร์มอนิก จากความสัมพันธ์ $p_L = \bar{p}_L + \tilde{p}_L$ โดยที่ \bar{p}_L คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงที่มีปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐาน \tilde{p}_L คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับที่มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิก และจากความสัมพันธ์ $q_L = \bar{q}_L + \tilde{q}_L$ โดยที่ \bar{q}_L คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟกระแสตรงที่มีปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐาน \tilde{q}_L คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟกระแสสลับที่มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งการแยกปริมาณกระแสสลับดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter : HPF) โดยค่า p_L^* และ q_L^* ที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังตารางที่ 3.1 กรณี 1

จะกำจัดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิก และกรณี 2 กำจัดฮาร์มอนิกและชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

ตารางที่ 3.1 ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้คำนวณกระแสอ้างอิงในแต่ละกรณี

กรณี	p_L^*	q_L^*
1	\tilde{p}_L	\tilde{q}_L
2	\tilde{p}_L	q_L

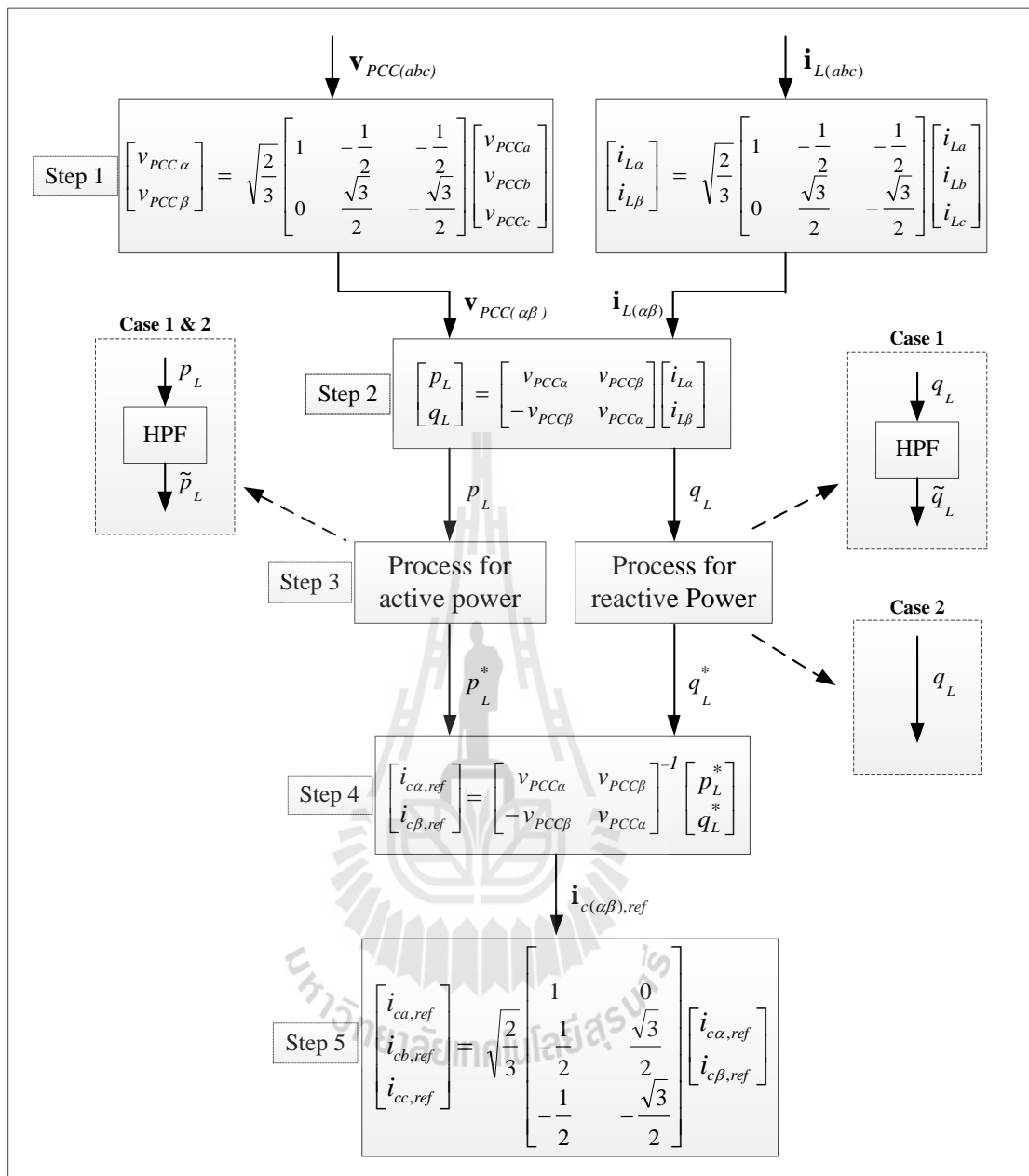
ขั้นที่ 4 ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ได้จากขั้นที่ 3 ตามตารางที่ 3.1 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{ca,ref}$, $i_{cb,ref}$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3-18) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_{ca,ref} \\ i_{cb,ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{PCC\alpha} & v_{PCC\beta} \\ -v_{PCC\beta} & v_{PCC\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_L^* \\ q_L^* \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

ขั้นที่ 5 แปลงค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ เป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส ($i_{ca,ref}$, $i_{cb,ref}$, $i_{cc,ref}$) โดยใช้อินเวอร์สการแปลงแกนของคาร์คดังสมการที่ (3-19)

$$\begin{bmatrix} i_{ca,ref} \\ i_{cb,ref} \\ i_{cc,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca,ref} \\ i_{cb,ref} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ตามที่ได้นำเสนอ มีขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอนสามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ

3.4 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์
 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลใช้ขั้นตอนในการคำนวณ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และ กระแสไฟฟ้าที่โหลดเช่นเดียวกับวิธี PQ โดยที่เอาต์พุตของการคำนวณ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิง ให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งการคำนวณแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน โดยจะมีขั้นตอน

ที่เหมือนกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในขั้นตอนที่ 1, 2, 4 และ 5 ส่วนขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนการแยกกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นปริมาณฮาร์มอนิกจะแตกต่างกัน คือ การแยกปริมาณฮาร์มอนิกดังกล่าวในวิธี PQ จะใช้วงจรกรองผ่านสูง ซึ่งแตกต่างกับวิธี PQF ที่ใช้หลักการของวิธี SWFA ซึ่งการแยกปริมาณฮาร์มอนิกโดยใช้หลักการของ SWFA จะมีความถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง อีกทั้งประสิทธิภาพของวิธี PQ ยังขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรกรองผ่านสูงให้เหมาะสมกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธี PQF ใช้หลักการของวิธี SWFA จึงไม่มีข้อจำกัดในส่วนนี้ โดยเริ่มแรกจะนำสมการอนุกรมฟูรีเยร์ในวิธี SWFA มาใช้วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟดังสมการที่ (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวสังเกตได้ว่าสมการ

$$p_L(kT_s) = \frac{A_{op}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_{hp} \cos(h\omega kT_s) + B_{hp} \sin(h\omega kT_s)] \quad (3-20)$$

$$q_L(kT_s) = \frac{A_{oq}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_{hq} \cos(h\omega kT_s) + B_{hq} \sin(h\omega kT_s)] \quad (3-21)$$

อนุกรมฟูรีเยร์มีอยู่ด้วยกัน 2 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงและองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่มีปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงคำนวณได้ดังสมการที่ (3-22) และ (3-23)

$$\bar{p}_L(kT_s) = \frac{A_{op}}{2} \quad (3-22)$$

$$\bar{q}_L(kT_s) = \frac{A_{oq}}{2} \quad (3-23)$$

ตามลำดับ ดังนั้นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF จึงคำนวณเฉพาะสัมประสิทธิ์ A_{op} และ A_{oq} เท่านั้น ซึ่งคำนวณได้จากการแทนค่า $h = 0$ ในสมการที่ (3-24) และ (3-25) จะได้ดังสมการที่ (3-26) และ (3-27) ตามลำดับ การคำนวณเริ่มแรกจะรับข้อมูลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ

$$A_{hp} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \cos(nh\omega T_s) \quad (3-24)$$

$$A_{hq} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} q_L(nT_s) \cos(nh\omega T_s) \quad (3-25)$$

$$A_{op} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \quad (3-26)$$

$$A_{oq} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} q_L(nT_s) \quad (3-27)$$

มาหนึ่งคาบ ซึ่งมีจำนวน N ข้อมูล มาคำนวณค่า A_{op} และ A_{oq} ตามสมการที่ (3-26) และ (3-27) หลังจากนั้นในรอบการทำงานถัดไปสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.4 โดยจะเพิ่มข้อมูลใหม่คือ $p_L(N_0 + N)$ และ $q_L(N_0 + N)$ และลบข้อมูลเก่าคือ $p_L(N_0 - 1)$ และ $q_L(N_0 - 1)$ ออกจากค่า $A_{op}^{(old)}$ และ $A_{oq}^{(old)}$ เพื่อคำนวณค่า $A_{op}^{(new)}$ และ $A_{oq}^{(new)}$ ดังสมการที่ (3-28) โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T_s (sampling time) วินาที ซึ่งจะทำให้ได้ค่า \bar{p}_L และ \bar{q}_L ตามสมการที่ (3-22) และ (3-23) ตามลำดับ ในทุกรอบของการคำนวณ หลังจากนั้นนำค่า \bar{p}_L และ \bar{q}_L ลบออกจากค่า p_L และ q_L จะได้ค่า \tilde{p}_L และ \tilde{q}_L ดังสมการที่ (3-29) และ (3-30) ตามลำดับ ซึ่งเป็น

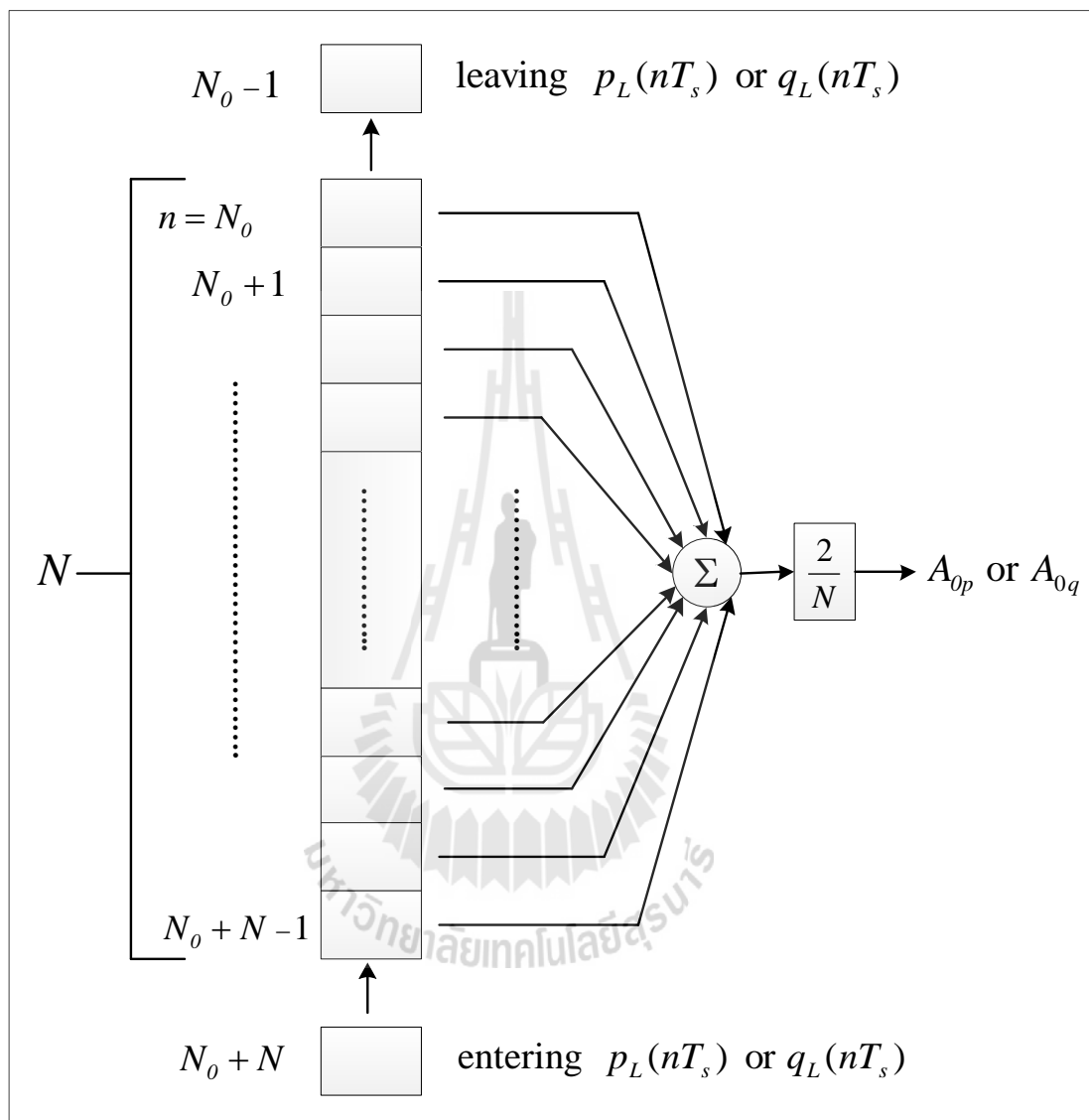
$$\begin{bmatrix} A_{op}^{(new)} \\ A_{oq}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{op}^{(old)} \\ A_{oq}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} p_L[(N_0 - 1)T_s] \\ q_L[(N_0 - 1)T_s] \end{bmatrix} + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} p_L[(N_0 + N)T_s] \\ q_L[(N_0 + N)T_s] \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$\tilde{p}_L = p_L - \bar{p}_L \quad (3-29)$$

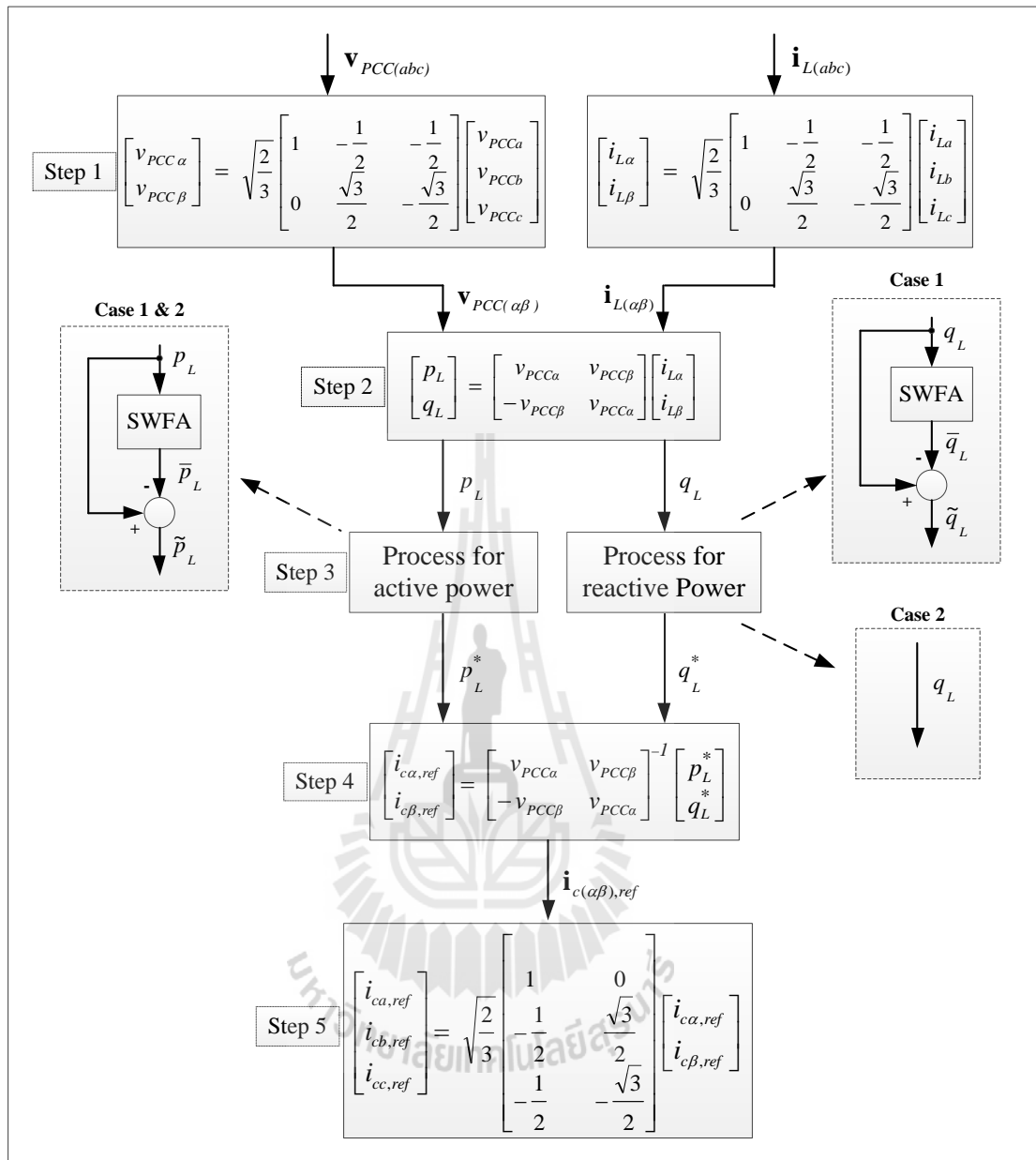
$$\tilde{q}_L = q_L - \bar{q}_L \quad (3-30)$$

กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟในส่วนที่มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิก โดยค่า p_L^* และ q_L^* ที่ใช้คำนวณกระแสอ้างอิงจะแบ่งเป็น 2 กรณี ดังตารางที่ 3.1 กรณี 1 จะกำจัดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิกและกรณี 2 กำจัดฮาร์มอนิกและชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ตามที่ได้นำเสนอสามารถพิจารณาเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.5 และจากข้อแตกต่างในขั้นตอนการคำนวณ

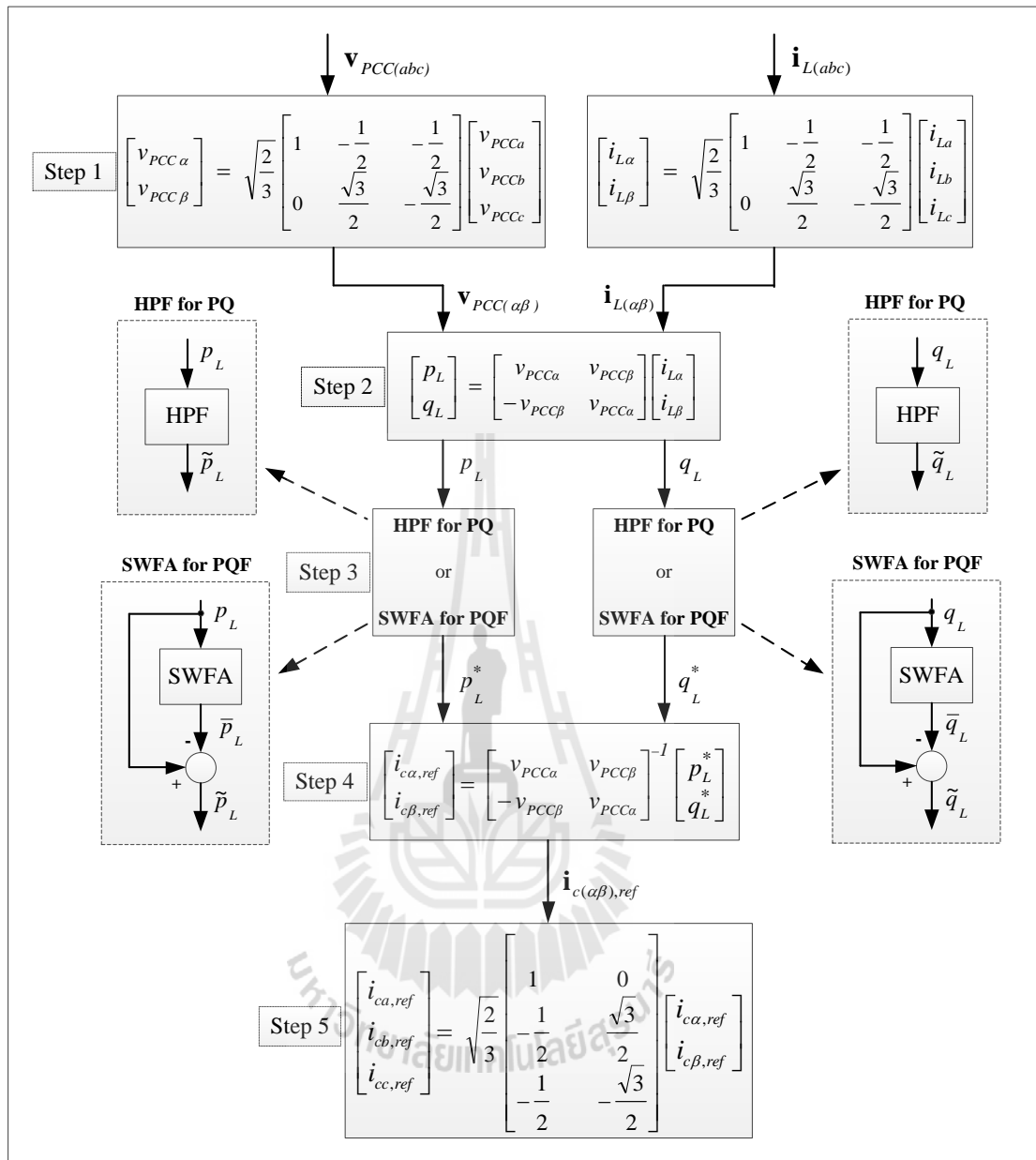
กระแสอ้างอิงระหว่างการระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 แผนภาพการคำนวณค่า A_{op} และ A_{oq}



รูปที่ 3.5 แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF



รูปที่ 3.6 แผนภาพการคำนวณกระแสอ้างอิงจากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก
ด้วยวิธี PQ และวิธี PQF

3.5 สรุป

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ตามที่ได้นำเสนอในบทนี้ เป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น จากการผสมผสานข้อดีของวิธี PQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน โดยจุดเด่นของวิธี PQ คือ มีการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุง

ค่าตัวประกอบกำลัง ช่วยลดการสูญเสียพลังงานในระบบ และทำให้การใช้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าลดลง ส่วนจุดเด่นของวิธี SWFA ที่นำมาใช้กับวิธี PQF คือ การคำนวณเพื่อแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากสัญญาณกระแสสลับให้ความถูกต้องสูง และมีความอ่อนตัว สามารถปรับใช้กับระบบใด ๆ ได้ง่ายกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง นอกจากนี้การคำนวณด้วยวิธี SWFA ใช้เวลาการคำนวณสั้น ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในเวลาจริง นอกจากนี้แล้ววิธี PQF ยังสามารถแก้จุดด้อยของวิธี PQ และวิธี SWFA ได้อีกด้วย โดยจุดด้อยของวิธี PQ คือ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูงมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธี PQF ส่วนจุดด้อยของวิธี SWFA คือ ไม่มีการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเปรียบเทียบระหว่างการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF จะนำเสนอในบทที่ 4



บทที่ 4

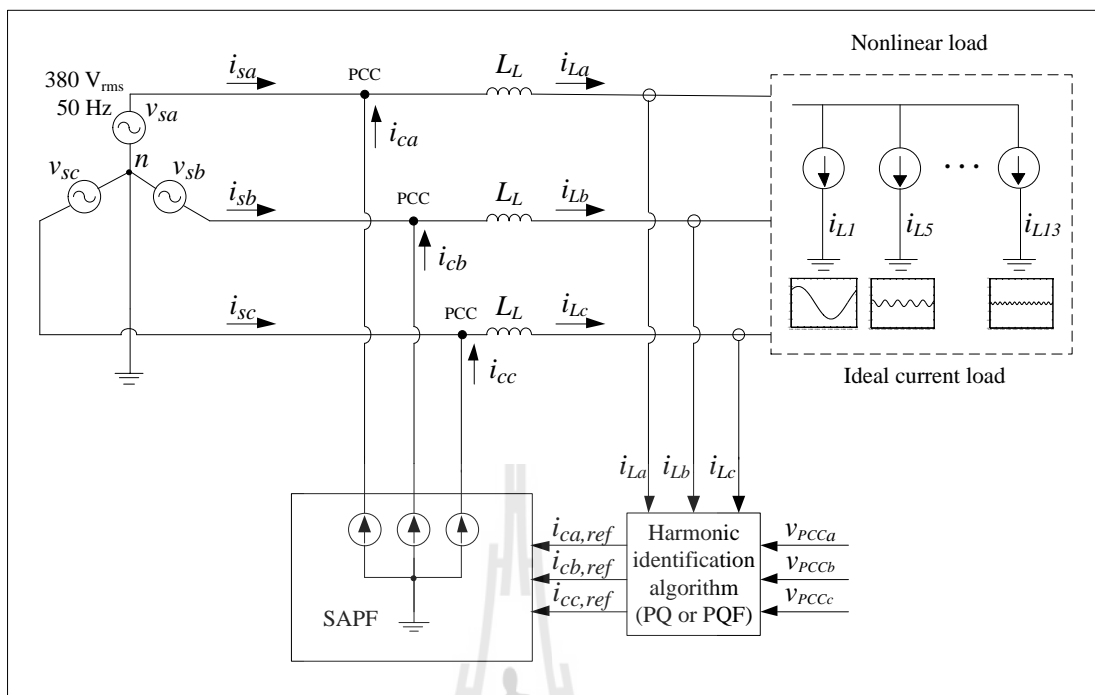
ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

4.1 บทนำ

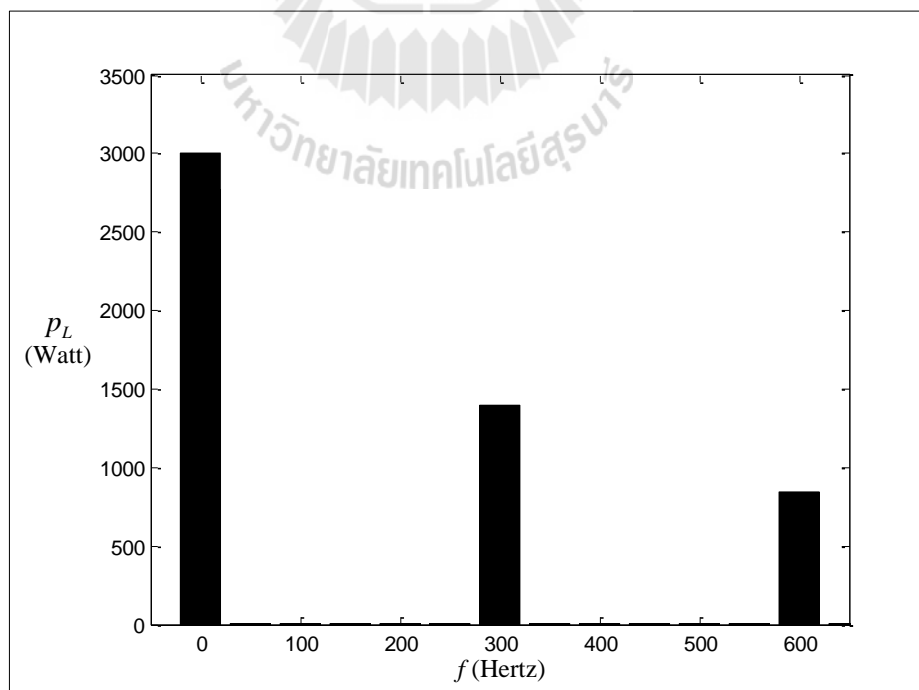
การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF จะจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติเพื่อลดผลกระทบจากตัวควบคุมกระแสชดเชยและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในกรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ โดยระบบในการจำลองสถานการณ์แบ่งเป็น 2 ระบบ ซึ่งมีโหลดแตกต่างกัน คือ ระบบแรกเป็นระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ ซึ่งสามารถกำหนดรูปแบบกระแสโหลดได้ตามต้องการ ทำให้ง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำและมีปริมาณฮาร์มอนิกสูง เพื่อทดสอบสมรรถนะในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ระบบที่สองเป็นระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ก่อให้เกิดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบ และเป็นโหลดที่มีการใช้งานใกล้เคียงกับทางปฏิบัติจริง

4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ

การจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปดังกล่าว กระแสโหลดแบบอุดมคติประกอบด้วยกระแสองค์ประกอบมูลฐาน และกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11, 13 ($i_{L1} = 10 \text{ A}$, $i_{L5} = 2 \text{ A}$, $i_{L7} = 1 \text{ A}$, $i_{L11} = 1 \text{ A}$, $i_{L13} = 0.8 \text{ A}$, $\phi_{L1,L5,L7,L11,L13} = 50^\circ$) ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านโหลด (L_L) เท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี การเลือกใช้ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านสูงในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ จะพิจารณาจากค่าความถี่ต่ำสุดที่เริ่มมีปริมาณฮาร์มอนิก โดยการอธิบายจะพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p_L) แสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับจะมีปริมาณฮาร์มอนิกเริ่มต้นที่ความถี่ 300 เฮิรตซ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านสูงในช่วงระหว่าง 0 ถึง 300 เฮิรตซ์ การทดสอบค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ 1 ซึ่งกำจัดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิกโดยแบ่งค่าความถี่ตัดที่ใช้ทดสอบเป็น 2 ค่า ได้แก่ ความถี่ตัดเท่ากับ 100 เฮิรตซ์ และ 280 เฮิรตซ์

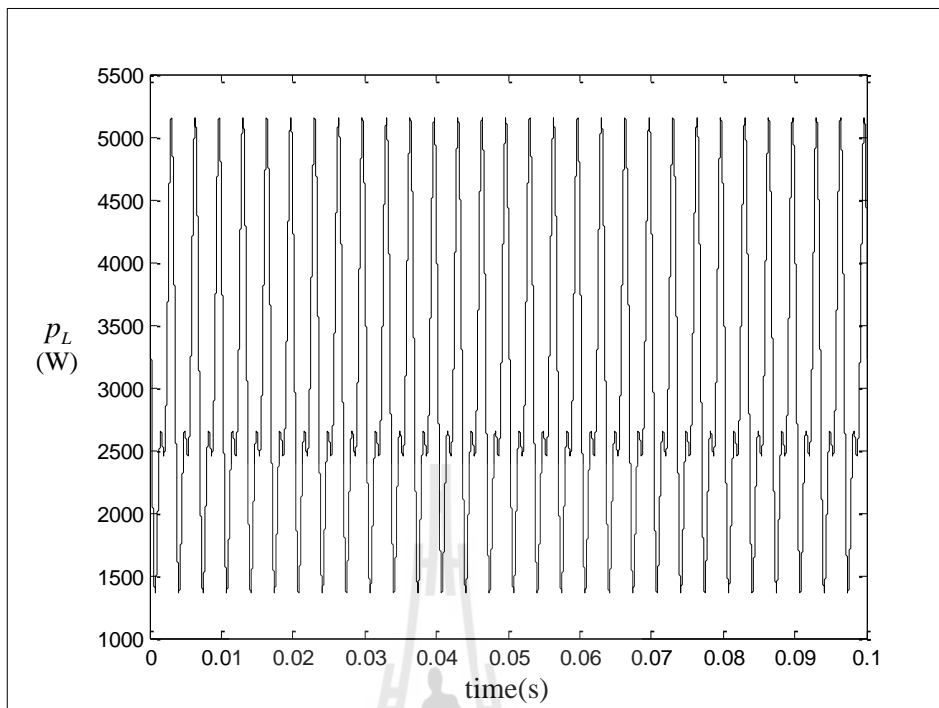


รูปที่ 4.1 ระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติและวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ

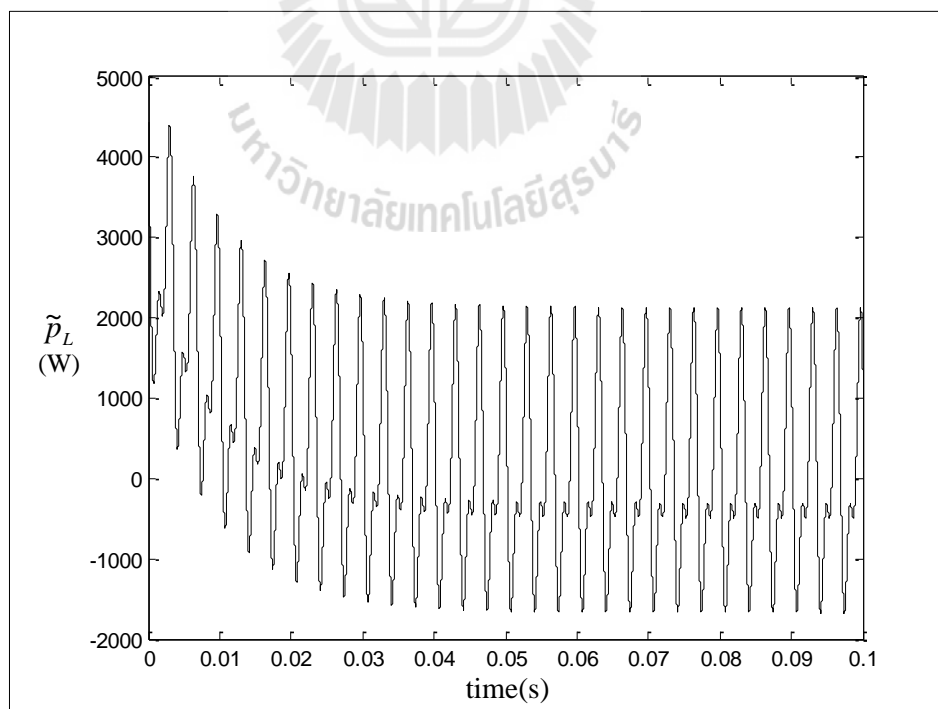


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

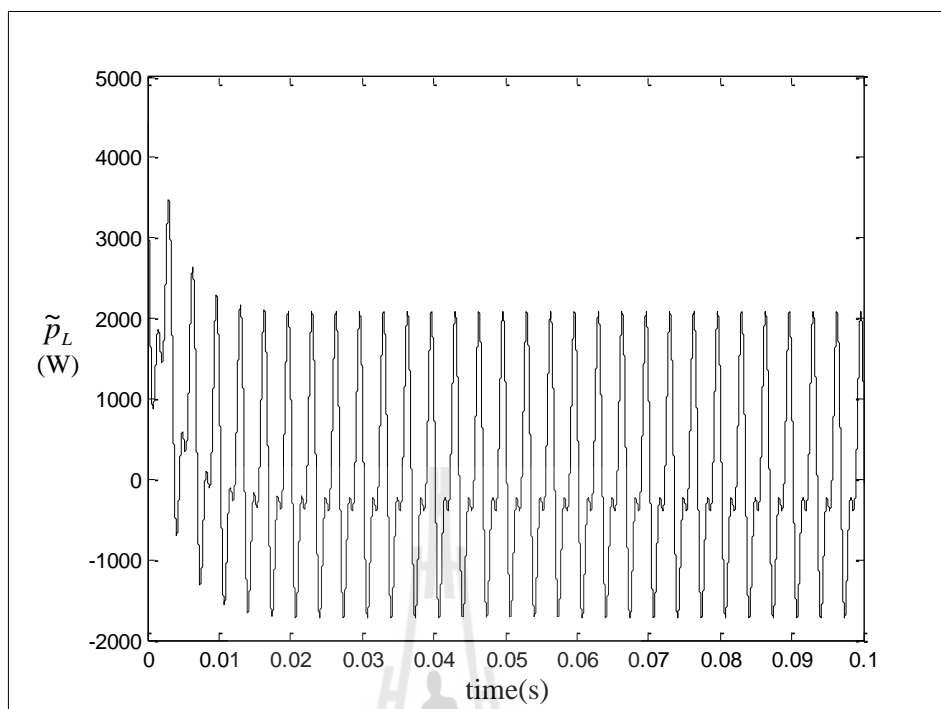
รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟก่อนเข้าสู่วงจรกรองผ่านสูงแสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าว กำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะมีทั้งองค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ ซึ่งหลังเข้าสู่วงจรกรองผ่านสูงจะเหลือเพียงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับ โดยกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 เฮิรตซ์ ให้ผลค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 1.23% และรูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับแสดงดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าว กำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับจะเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลา 0.04 วินาที เนื่องจากเวลาการประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 280 เฮิรตซ์ ให้ผลค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 3.42% และรูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับแสดงดังรูปที่ 4.5 จากรูปดังกล่าว กำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับจะเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลา 0.02 วินาที ซึ่งกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 เฮิรตซ์ จะมีเวลาการประวิงของวงจรกรองผ่านสูงที่นานกว่าทำให้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวของรูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับเป็นไปได้ช้า โดยใช้เวลานานเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 280 เฮิรตซ์ จากการทดสอบค่าความถี่ตัดที่มีค่าต่างกัน พบว่าหากกำหนดค่าความถี่ตัดให้มีค่าน้อยลงจะส่งผลให้การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับ ซึ่งเป็นปริมาณฮาร์มอนิกมีความแม่นยำมากขึ้น แต่จะทำให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง และหากกำหนดค่าความถี่ตัดให้มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้การแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีความแม่นยำน้อยลง แต่จะให้ความเร็วในการตอบสนองที่เร็วขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งที่มีค่าความถี่ตัดเท่ากับ 280 เฮิรตซ์ เนื่องจากคำนึงถึงผลการตอบสนองของสัญญาณที่รวดเร็ว และในกรณีใช้เทคนิค SWFA ในการแยกองค์ประกอบดังกล่าวรูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับจากการใช้วิธี SWFA แสดงดังรูปที่ 4.6 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการใช้วิธี SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกสำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF แทนการใช้วงจรกรองผ่านสูง จะให้ผลการตอบสนองของสัญญาณที่รวดเร็วมก โดยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับจะเข้าสู่สถานะคงตัวทันทีหลังจากผ่านการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณด้วยวิธี SWFA ในคาบแรก ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่าในตารางที่ 4.1 ประกอบด้วย ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเฉลี่ย ($\%THD_{i,av}$) ซึ่งค่าดังกล่าวคำนวณได้จากข้อมูลค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมต่อเฟส ($\%THD_{i,k}$) ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor : pf) ค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (displacement power factor : pf_{disp}) และค่าตัวประกอบกำลังความเพี้ยน (distortion power factor : pf_{dist}) ซึ่งค่าดังกล่าว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-1) ถึง (4-5) ตามลำดับ โดยกรณี 1 กำจัดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิกโดยไม่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งการกำจัดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิกจะช่วยลดการกระจัดกระแสชดเชยในส่วนที่เป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณี 1 รูปสัญญาณจากการ



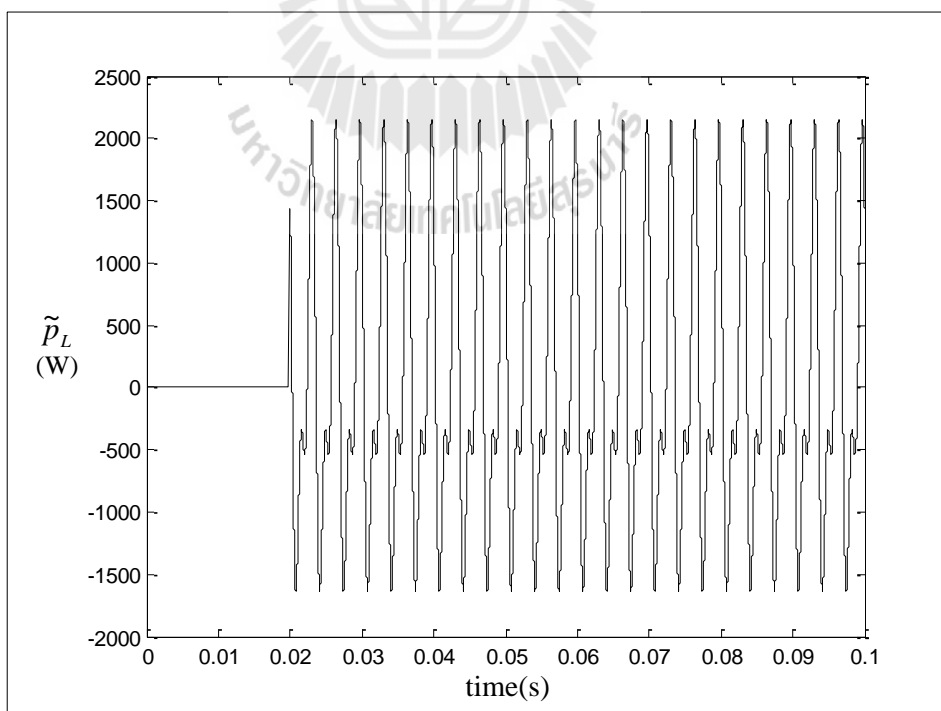
รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าเอกทีฟ



รูปที่ 4.4 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าเอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 100 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 280 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.6 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับในกรณีใช้วิธี SWFA

$$\%THD_{i,av} = \sqrt{\frac{\sum_{k=a,b,c} \%THD_{i,k}^2}{3}} \quad (4-1)$$

$$\%THD_{i,k} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,k}^2}}{I_{1,k}} \times 100\% \quad (4-2)$$

$$pf = \frac{P}{S} = pf_{disp} \times pf_{dist} \quad (4-3)$$

$$pf_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (4-4)$$

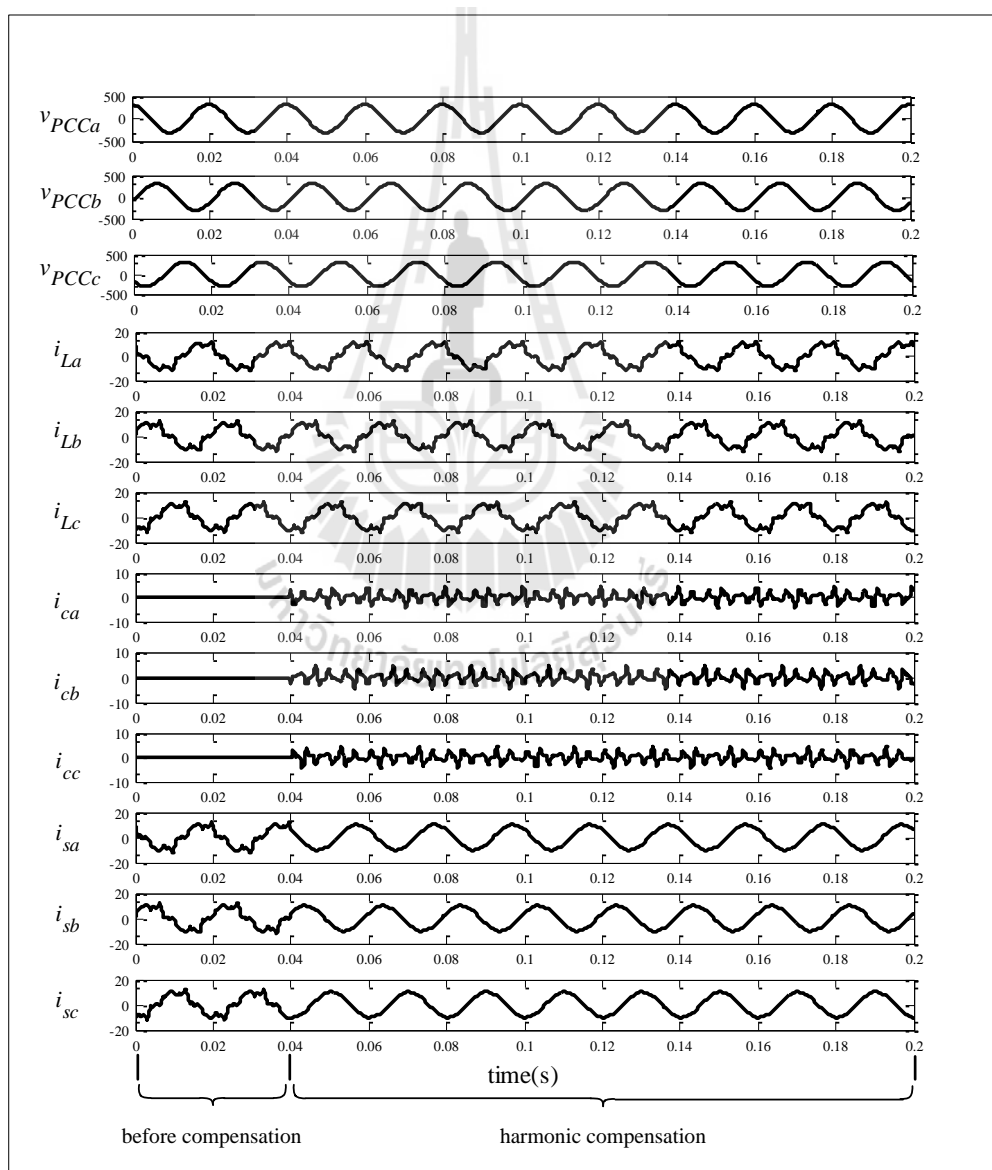
$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2} \times \sqrt{1+THD_i^2}} \quad (4-5)$$

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF

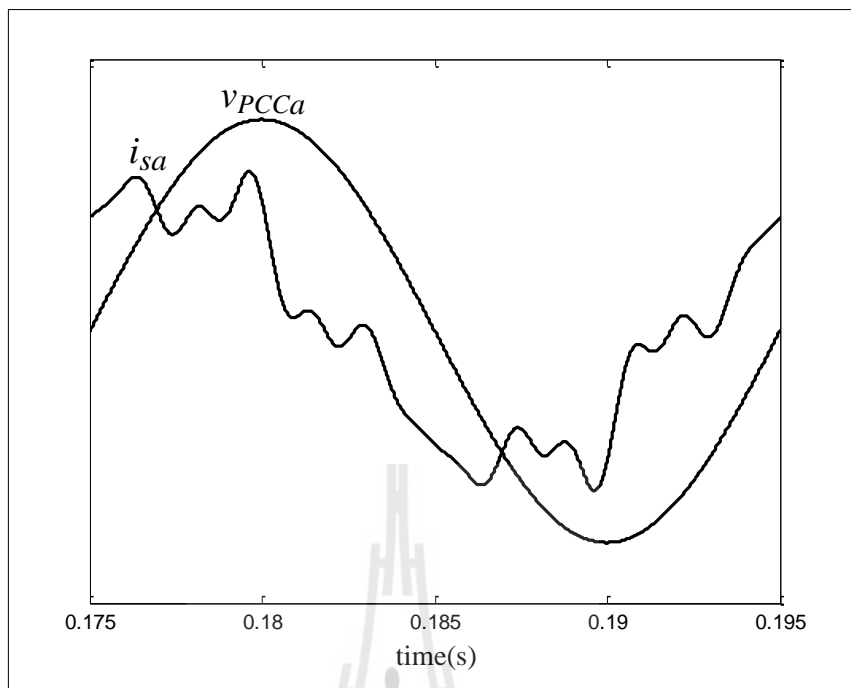
วิธีระบุ เอกลักษณ์ ฮาร์มอนิก	กรณี	ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
		$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf	$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf
PQ	1	25.76	0.64	0.97	0.62	3.42	0.64	1	0.64
	2					5.06	1	1	1
PQF	1					0	0.64	1	0.64
	2					0	1	1	1

จำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีผลการกำจัดฮาร์มอนิกรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ก่อนการชดเชย จึงมีลักษณะเหมือนกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) และหลังจากเวลา 0.04 วินาที

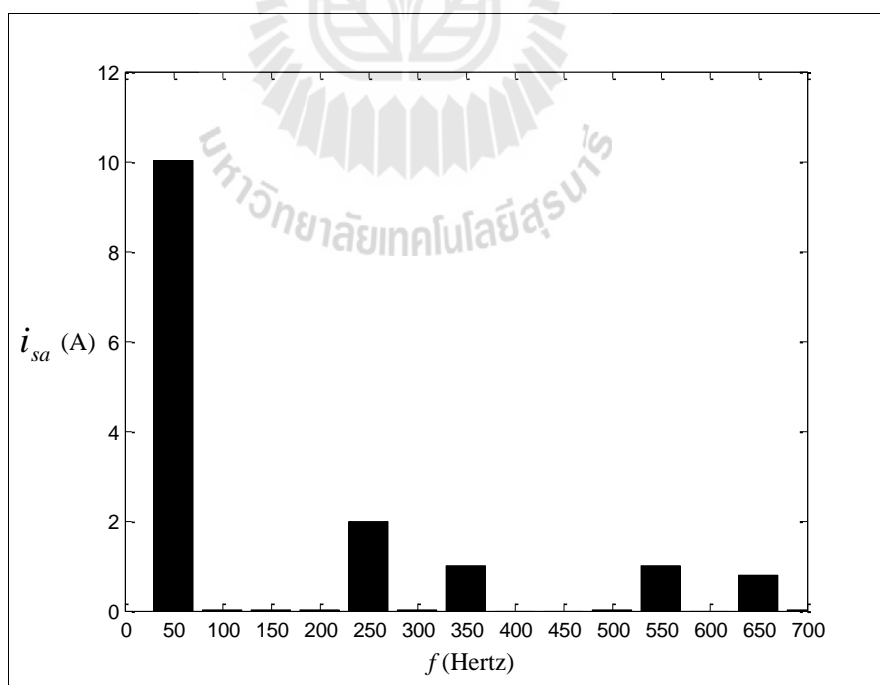
เป็นต้น ไปมีการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.8 จากรูปดังกล่าว ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งไม่มีการกำจัดฮาร์โมนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5, 7,



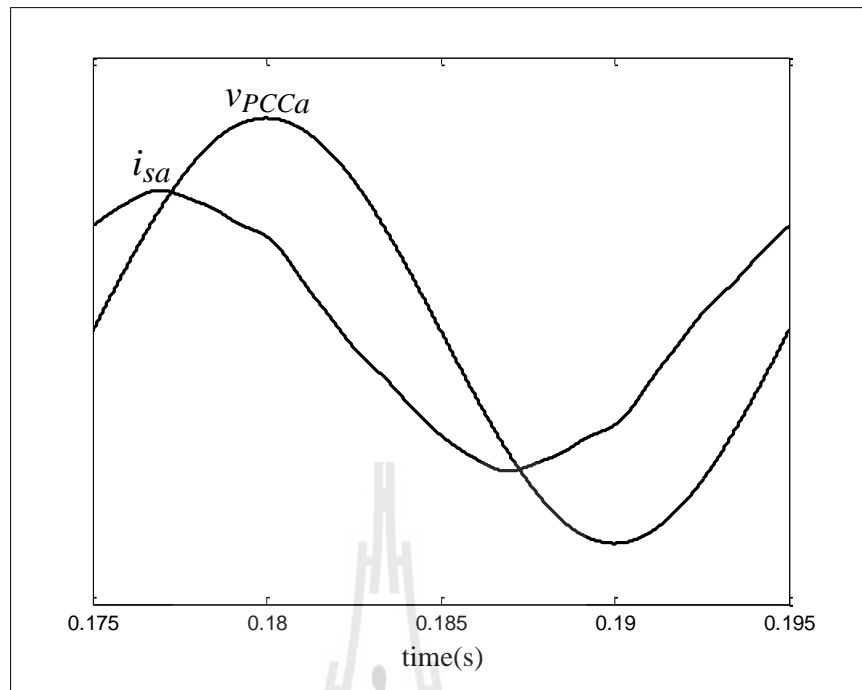
รูปที่ 4.7 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 1



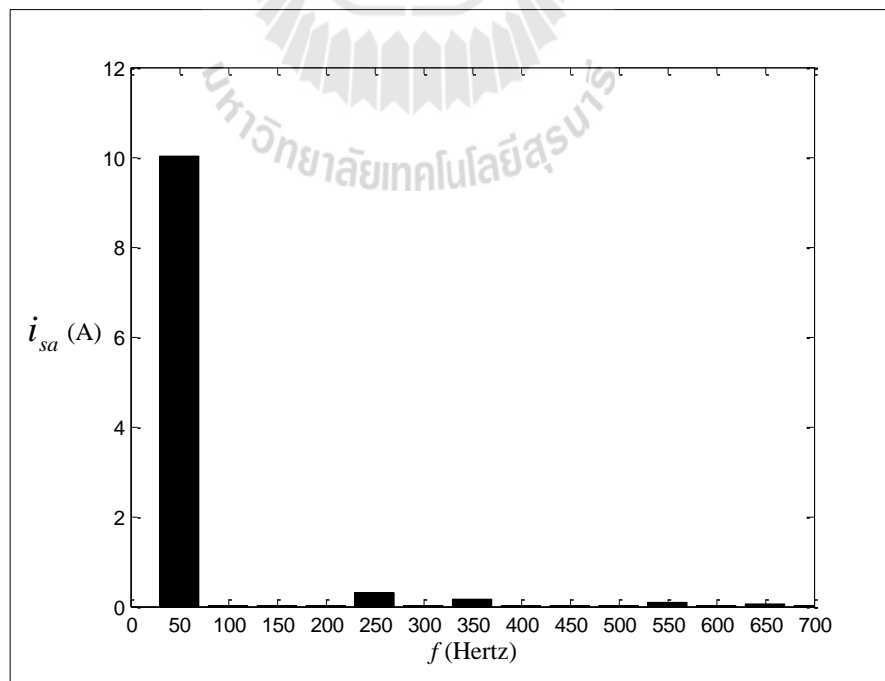
รูปที่ 4.8 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย



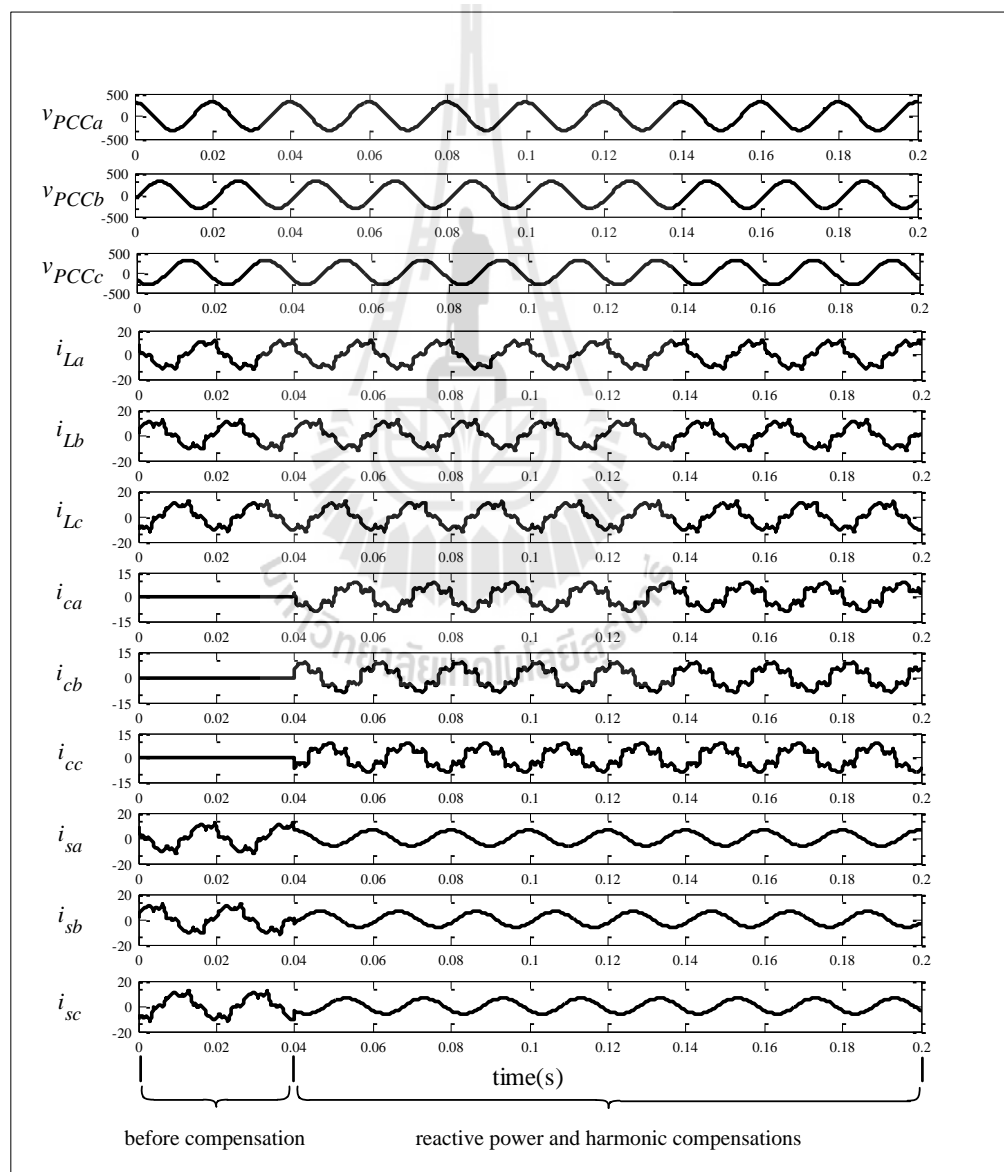
รูปที่ 4.10 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1



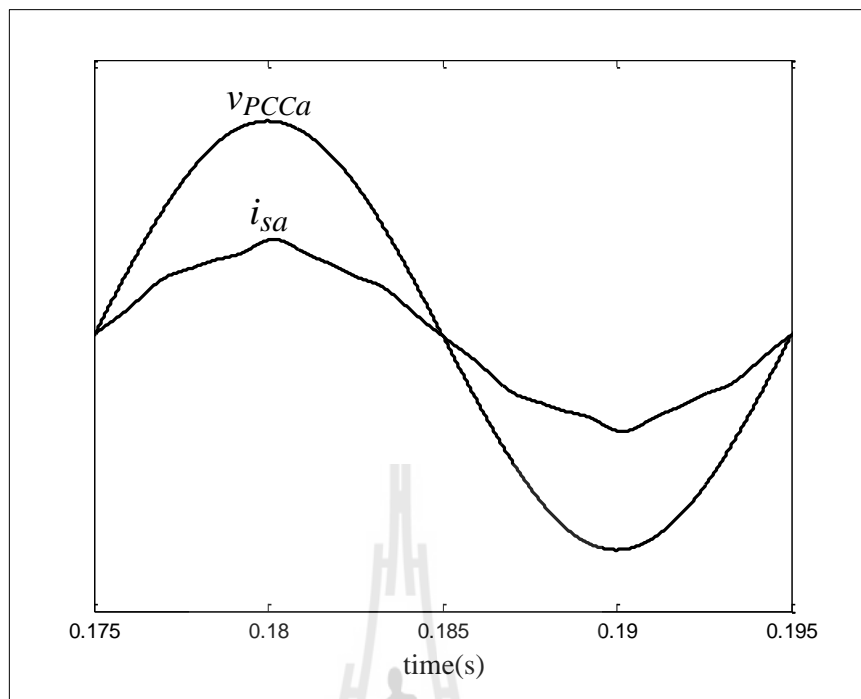
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1

11 และ 13 แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.9 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 25.76% และค่าตัวประกอบกำลังความเพี้ยน (pf_{dist}) เท่ากับ 0.97 อีกทั้งกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ยังคงเกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (pf_{disp}) เท่ากับ 0.64 ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลัง (pf) เท่ากับ 0.62 การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิกทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนเล็กน้อย ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7 และ 11 แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.11 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 3.42% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 อีกทั้งยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.64 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.64 และเมื่อพิจารณาในกรณี 2 ที่มีการกำจัดฮาร์มอนิก และมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณี 2 แสดงดังรูปที่ 4.12 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQ ในกรณี 1 และหลังจากเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิกจึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะคล้ายวิธี PQ ในกรณี 1 แต่จะมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มเติม การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.13 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยน ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.14 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 5.06% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1 ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณีที่ 2 มีค่า $\%THD_{i,av}$ ที่มากกว่าในกรณีที่ 1 เนื่องจากในกรณีที่ 2 มีการฉีดกระแสชดเชยที่มีความถี่มูลฐานเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในปริมาณมาก ทำให้กระแสที่แหล่งจ่ายที่มีความถี่มูลฐานมีค่าแอมพลิจูดลดลง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-2) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าแอมพลิจูดดังกล่าวมีค่าลดลงจะส่งผลให้ $\%THD_{i,k}$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ $\%THD_{i,av}$ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันดังความสัมพันธ์ในสมการที่

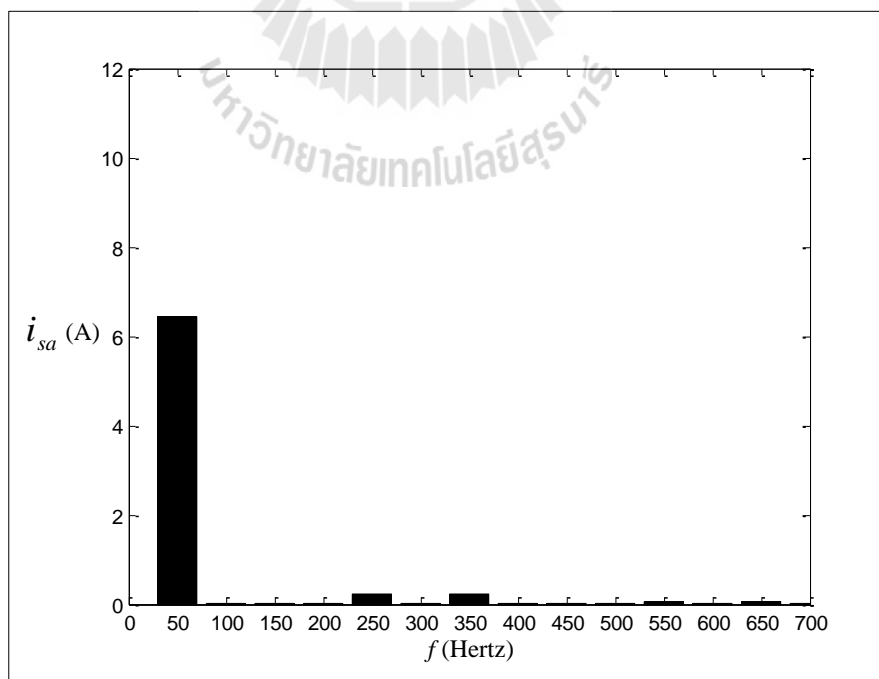
(4-1) เมื่อพิจารณาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ในกรณี 1 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 4.15 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQ ในกรณี 1 คือ ไม่มีการชดเชยกระแสชดเชยในช่วงนี้และช่วงเวลา 0.04 ถึง 0.06 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่เริ่มต้นในการเก็บข้อมูล (initialization) เพื่อนำไปคำนวณด้วยวิธี SWFA ซึ่งจะคำนวณเสร็จสิ้นเมื่อเริ่มคาบถัดไป ทำให้หลังจากเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปจึงเริ่มมีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย การเปรียบเทียบ



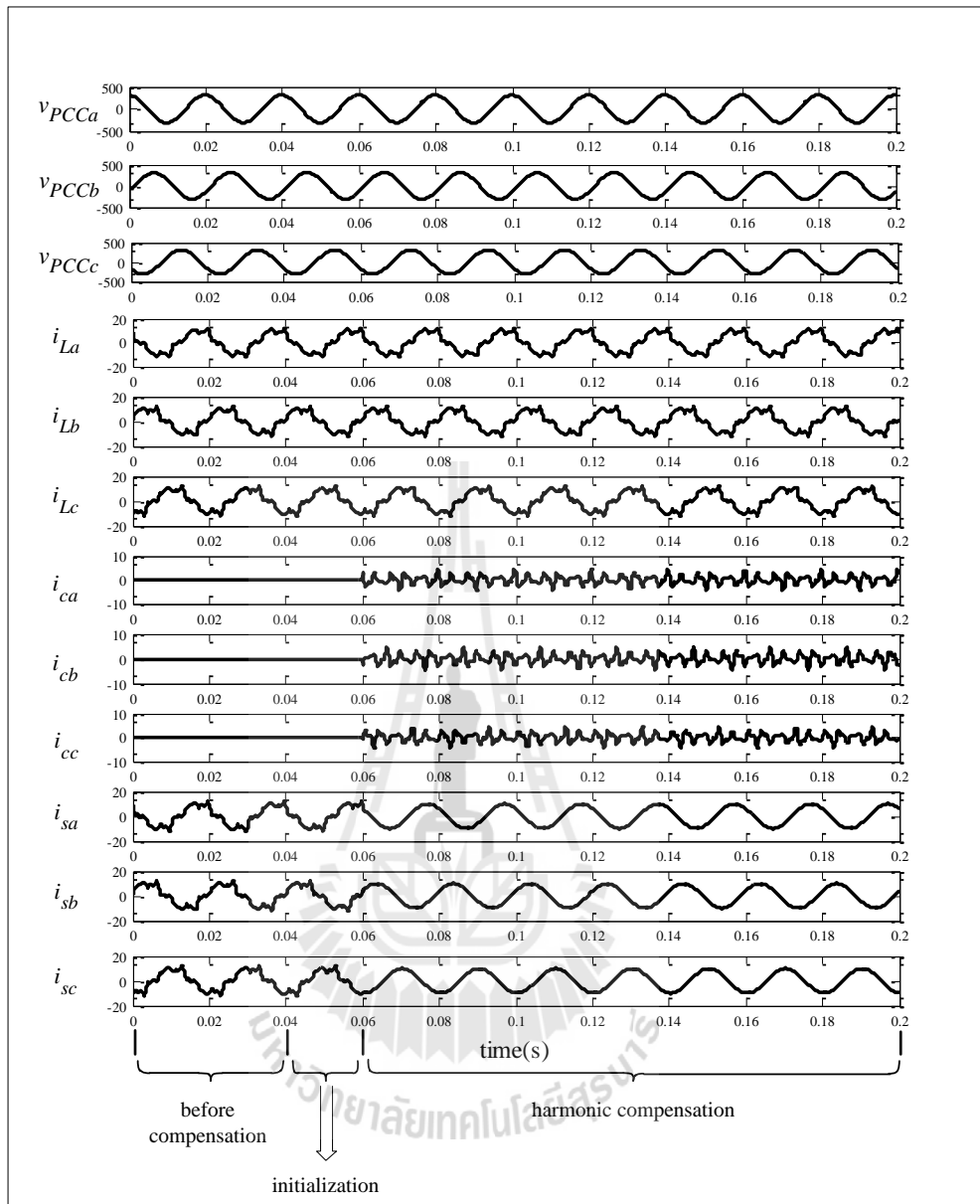
รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 2



รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2

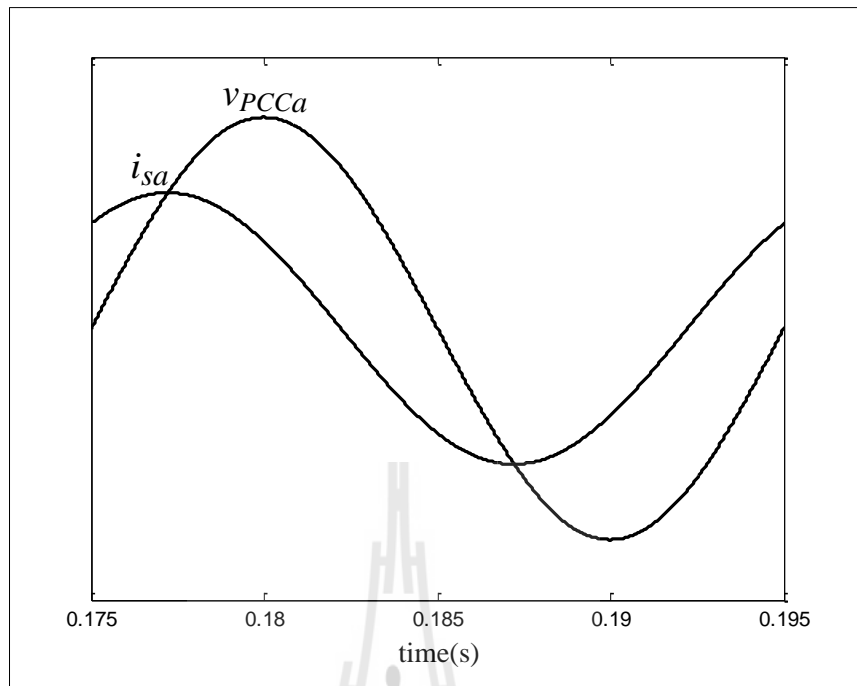


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2

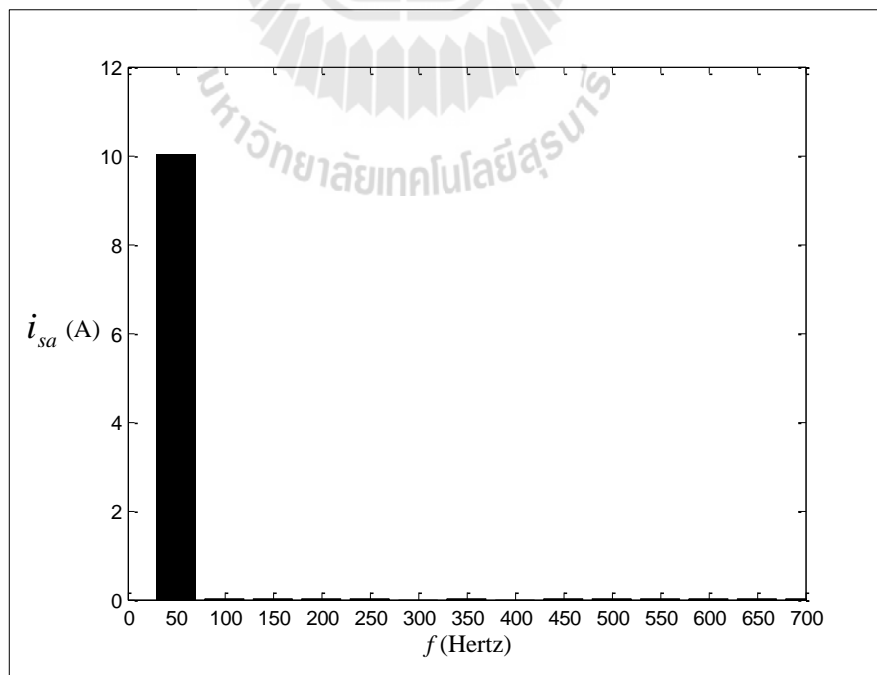


รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 1

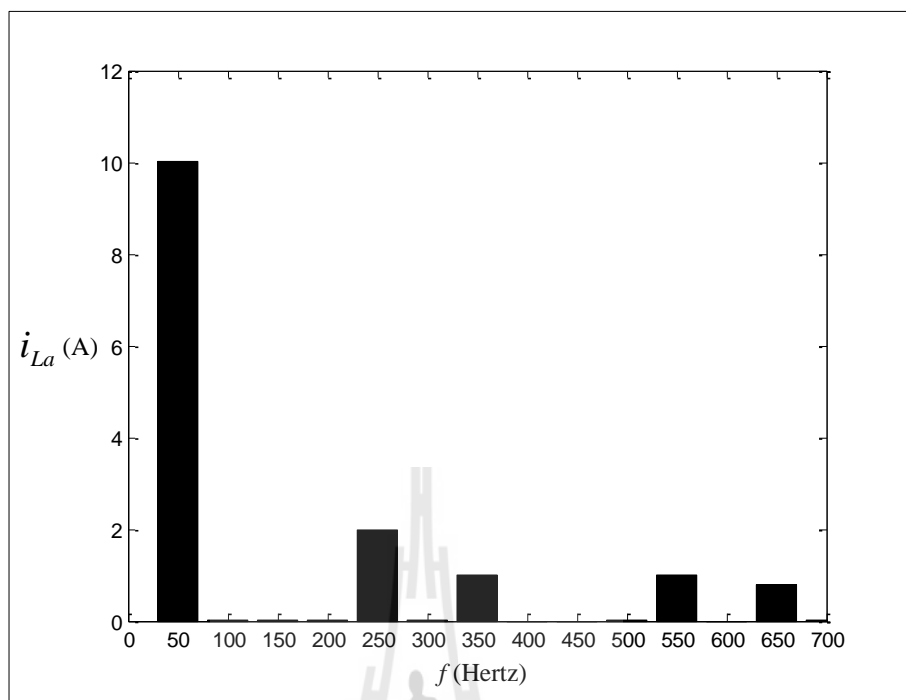
ระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.16 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ไม่เกิดความผิดเพี้ยน จึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์โดยสมบูรณ์ ซึ่งกระแสดังกล่าวมีเฉพาะปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานโดยไม่ปรากฏปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.17 โดยมีค่า $\%THD_{i_{av}}$ เท่ากับ 0% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 อีกทั้งยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่าง



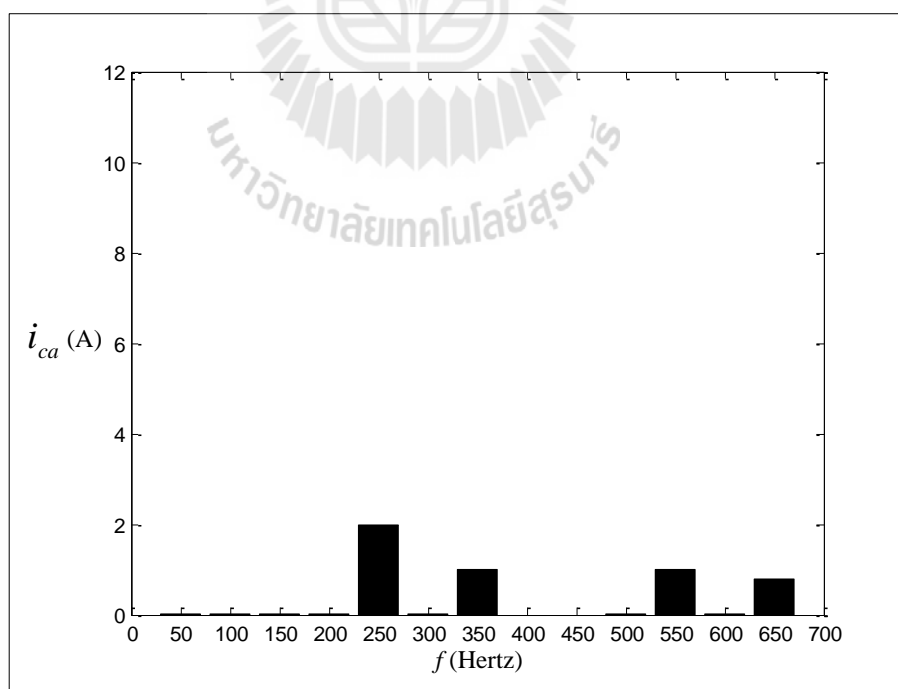
รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเฟส a



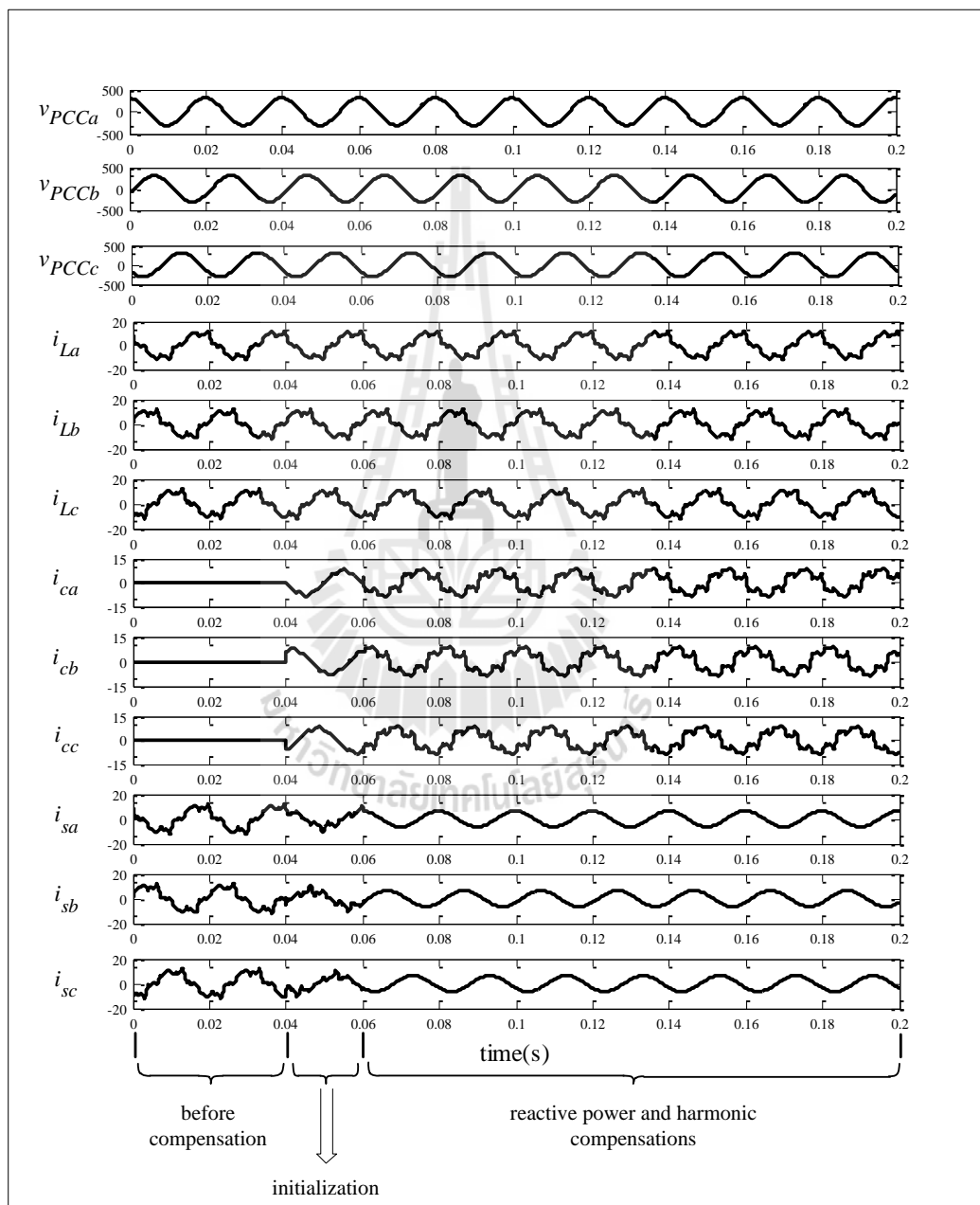
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมกระแสชดเชยเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.64 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.64 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.18 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 สเปกตรัมของกระแสชดเชยในเฟส a (i_{ca}) แสดงดังรูปที่ 4.19 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสชดเชยในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 สำหรับการกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-6) การกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ

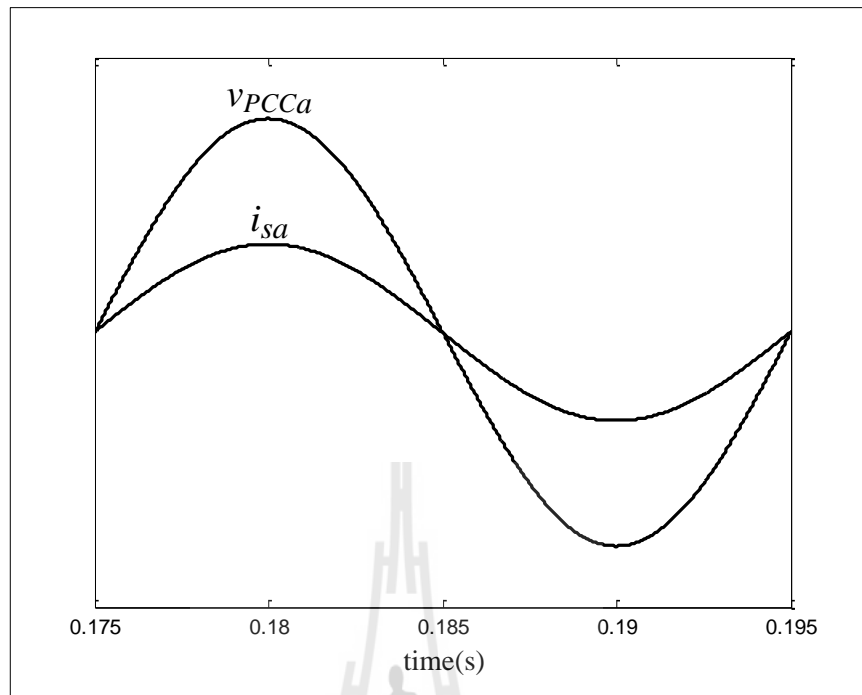
$$i_{sa} = i_{La} - i_{ca} \quad (4-6)$$

ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a เหลือเพียงปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานเท่านั้น ซึ่งแสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้การระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกวิธี PQF ในกรณี 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQF กรณี 1 และหลังจากเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิกจึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะคล้ายวิธี PQF ในกรณี 1 แต่จะมีการปรับค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มเติม การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.21 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ไม่เกิดความผิดเพี้ยน จึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์โดยสมบูรณ์ ซึ่งกระแสดังกล่าวมีเฉพาะปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานโดยไม่ปรากฏปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.22 โดยมีค่า $\%THD_{i_{av}}$ เท่ากับ 0% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.18 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 สเปกตรัมของกระแสชดเชยในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.23 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสชดเชยในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟเพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลัง และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 สำหรับการกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-6) การกำจัดปริมาณ

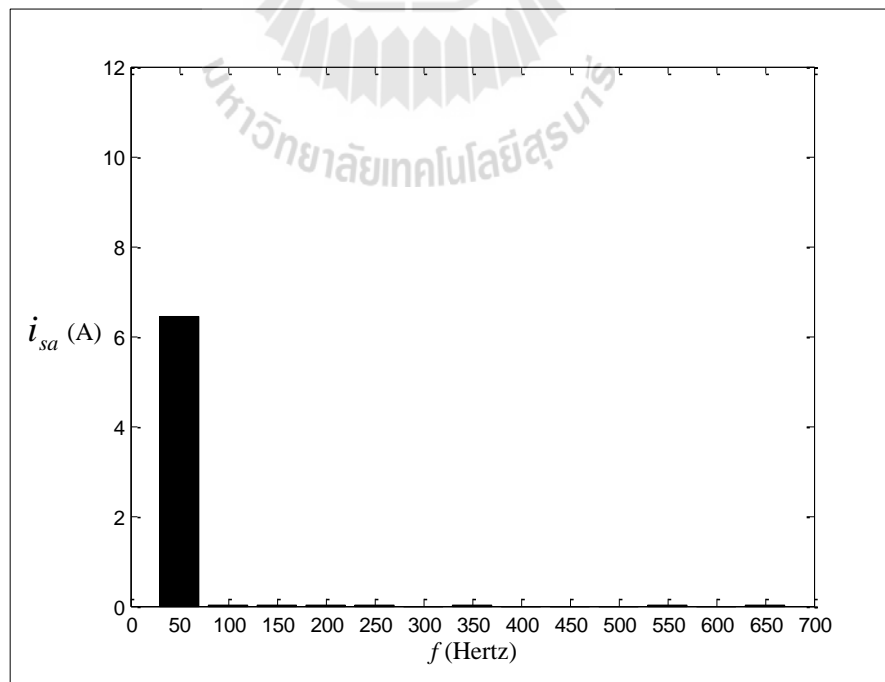
กระแสฮาร์โมนิกทั้งหมดในระบบทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเหลือเพียงปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานเท่านั้น และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายที่มีความถี่มูลฐานมีค่าแอมพลิจูดลดลงเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่โหลดที่มีความถี่มูลฐานแสดงในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 4.22



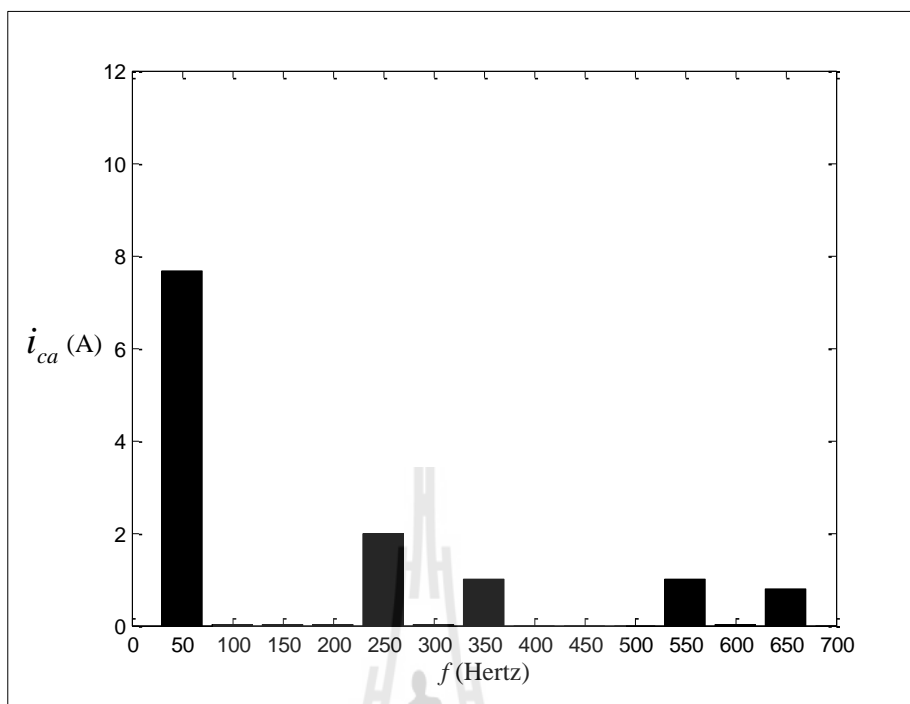
รูปที่ 4.20 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 2



รูปที่ 4.21 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2



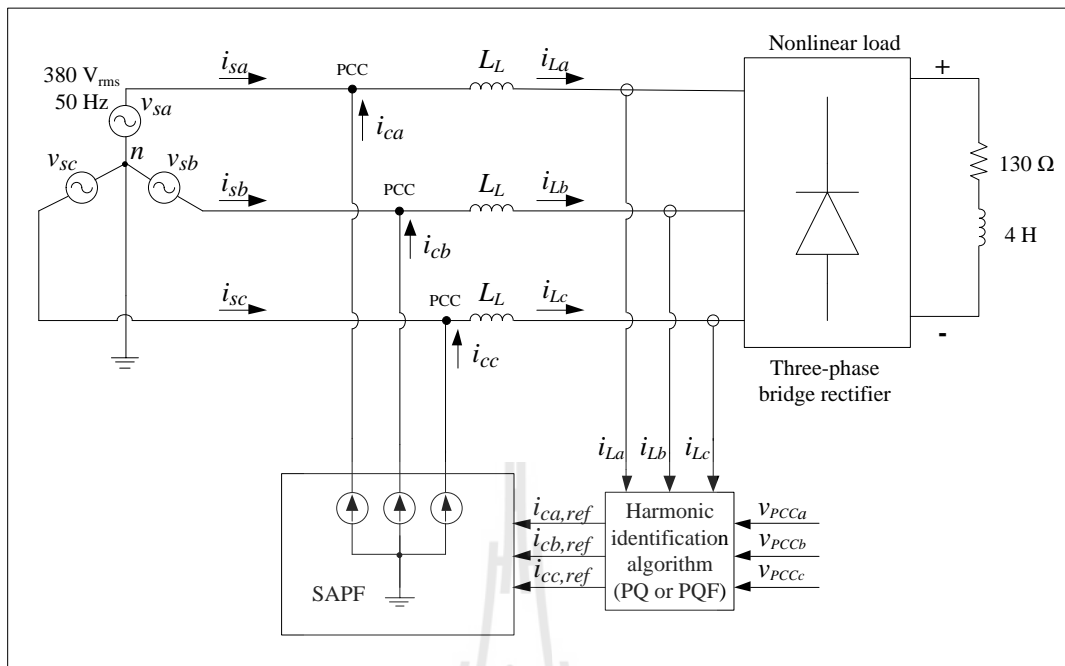
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมกระแสชดเชยเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส ต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

การจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.24 จากรูปดังกล่าว ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านโหลดเท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ใช้วงจรรอกผ่านสูงอันดับหนึ่งที่มีความถี่ตัด 280 เฮิร์ตซ์ ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 4.2 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณี 1 แสดงดังรูปที่ 4.25 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีกรอกำลังฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชย จึงมีลักษณะเหมือนกระแสไฟฟ้าที่โหลด และหลังจากเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปมีการกรอกำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.26 จากรูปดังกล่าว ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟซึ่งไม่มีกรอกำลังฮาร์มอนิก และ



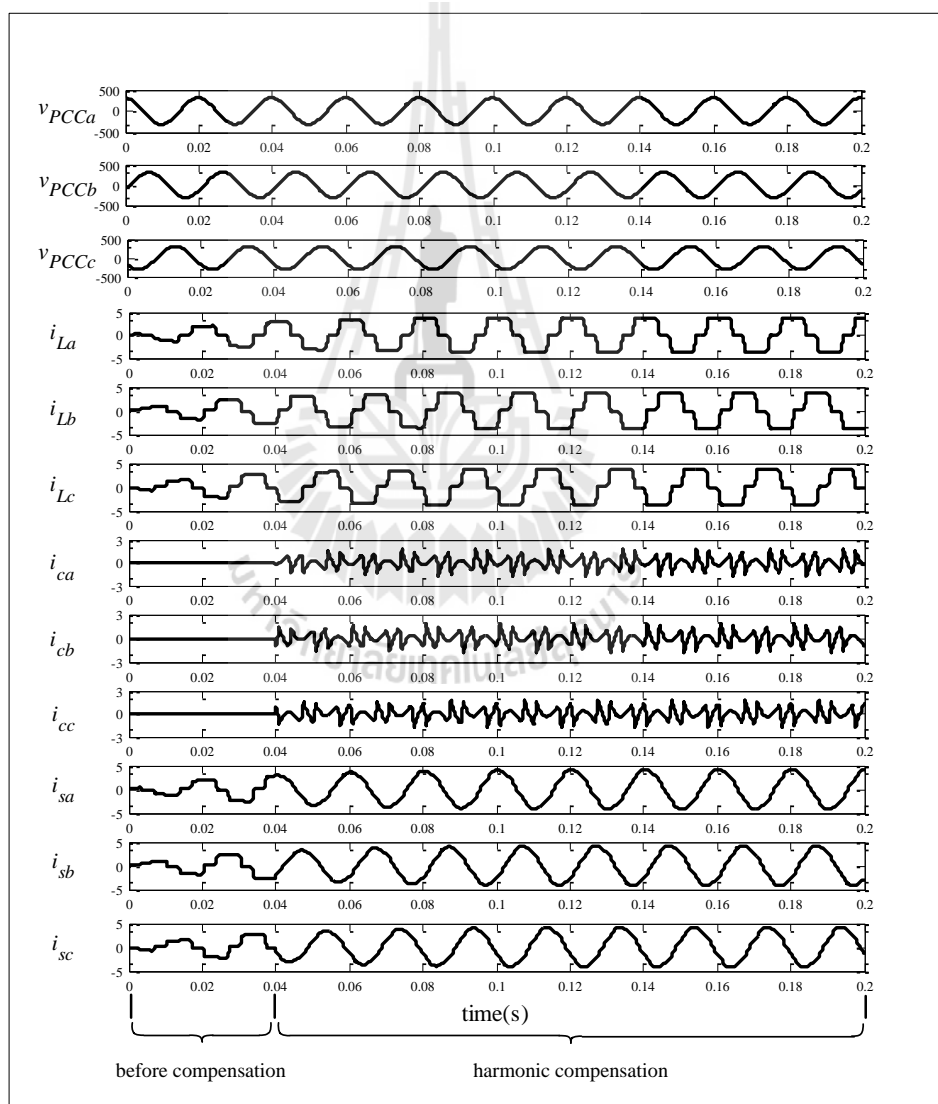
รูปที่ 4.24 ระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และวงจรรอกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

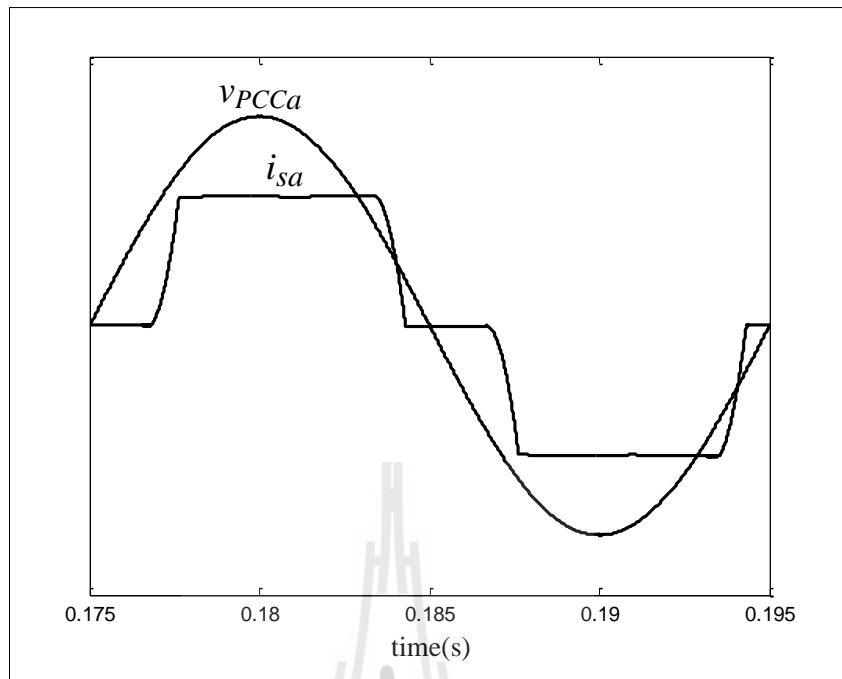
วิธีระบุ เอกลักษณ์ ฮาร์มอนิก	กรณี	ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
		$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf	$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf
PQ	1	24.48	0.98	0.97	0.95	3.40	0.98	1	0.98
	2					0.95	1	1	1
PQF	1					0.04	0.98	1	0.98
	2					0.04	1	1	1

ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.27 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$

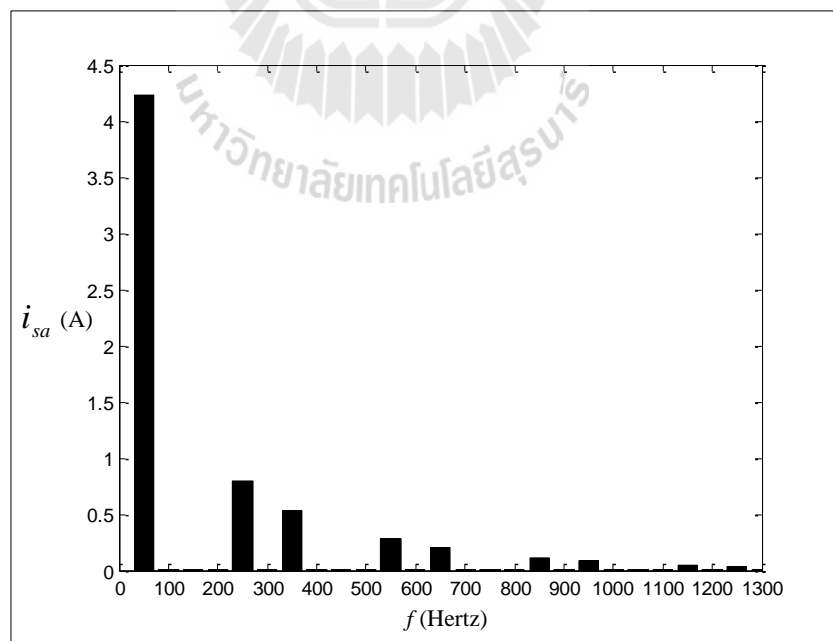
เท่ากับ 24.48% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 0.97 อีกทั้งกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.98 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.95 การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.28 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยน ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน



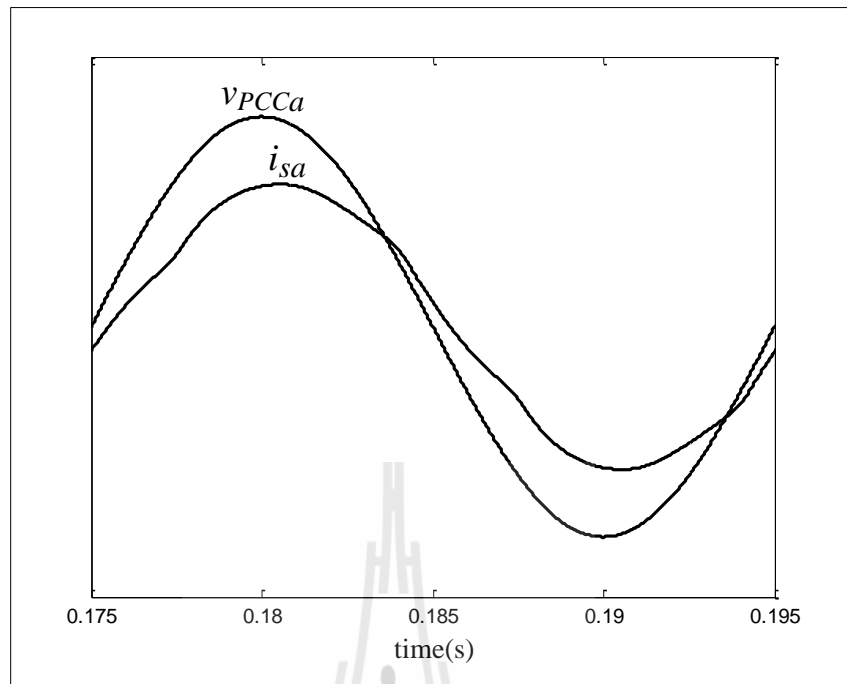
รูปที่ 4.25 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



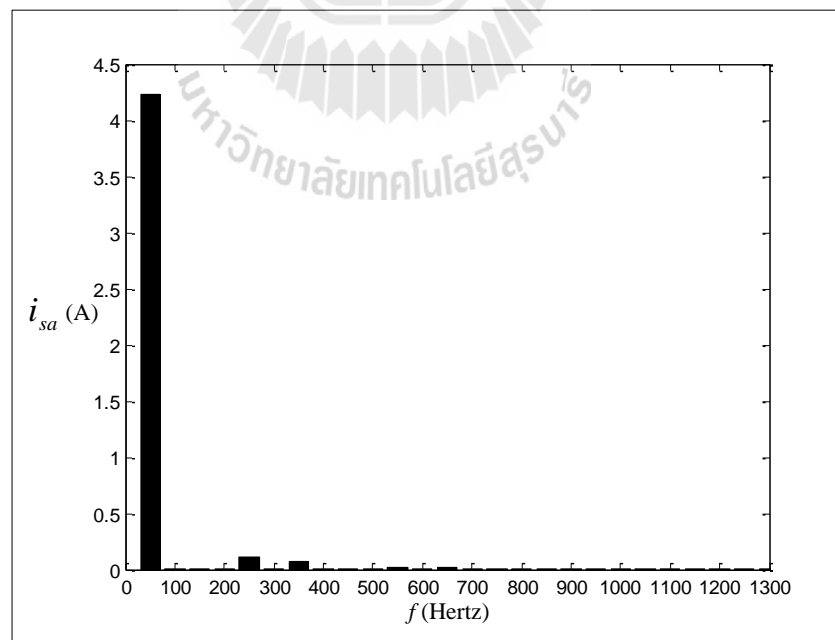
รูปที่ 4.26 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย กรณี โหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชย กรณี โหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

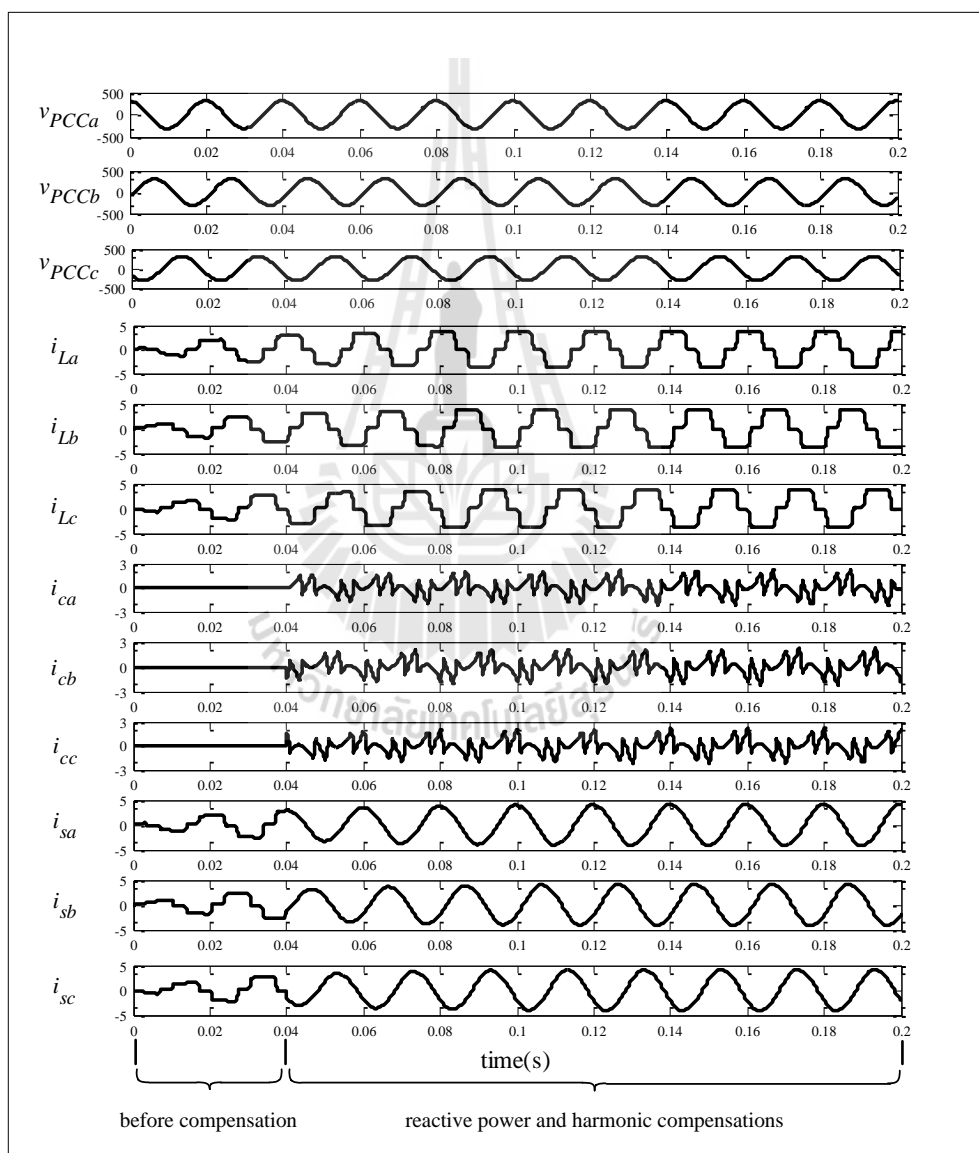


รูปที่ 4.28 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

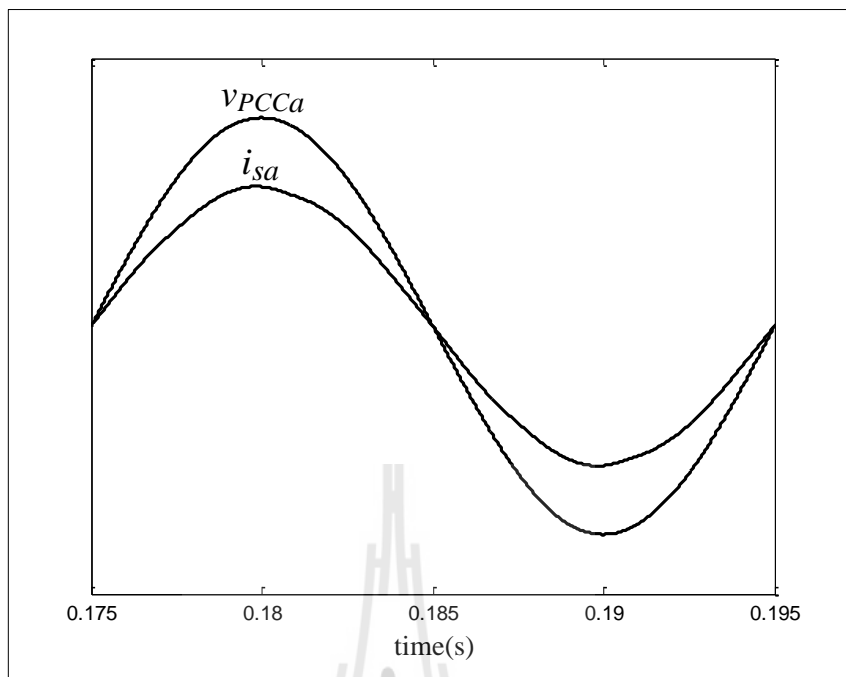


รูปที่ 4.29 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

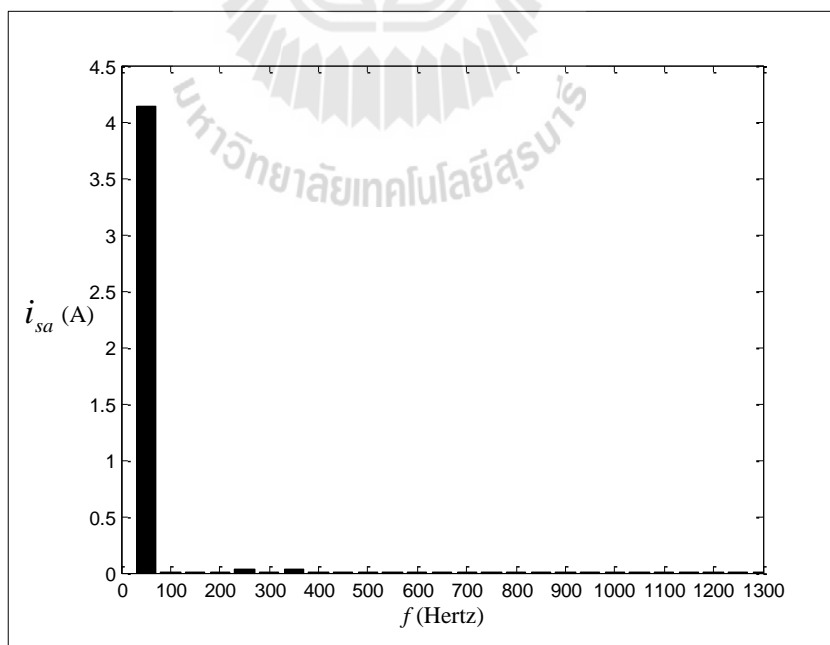
และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.29 โดยมีค่า $\%THD_{i_{av}}$ เท่ากับ 3.40% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 อีกทั้งยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.98 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.98 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณี 2 แสดงดังรูปที่ 4.30 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQ ในกรณี 1 และหลังจากเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิกจึงทำให้รูปสัญญาณ



รูปที่ 4.30 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์สามเฟสของวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



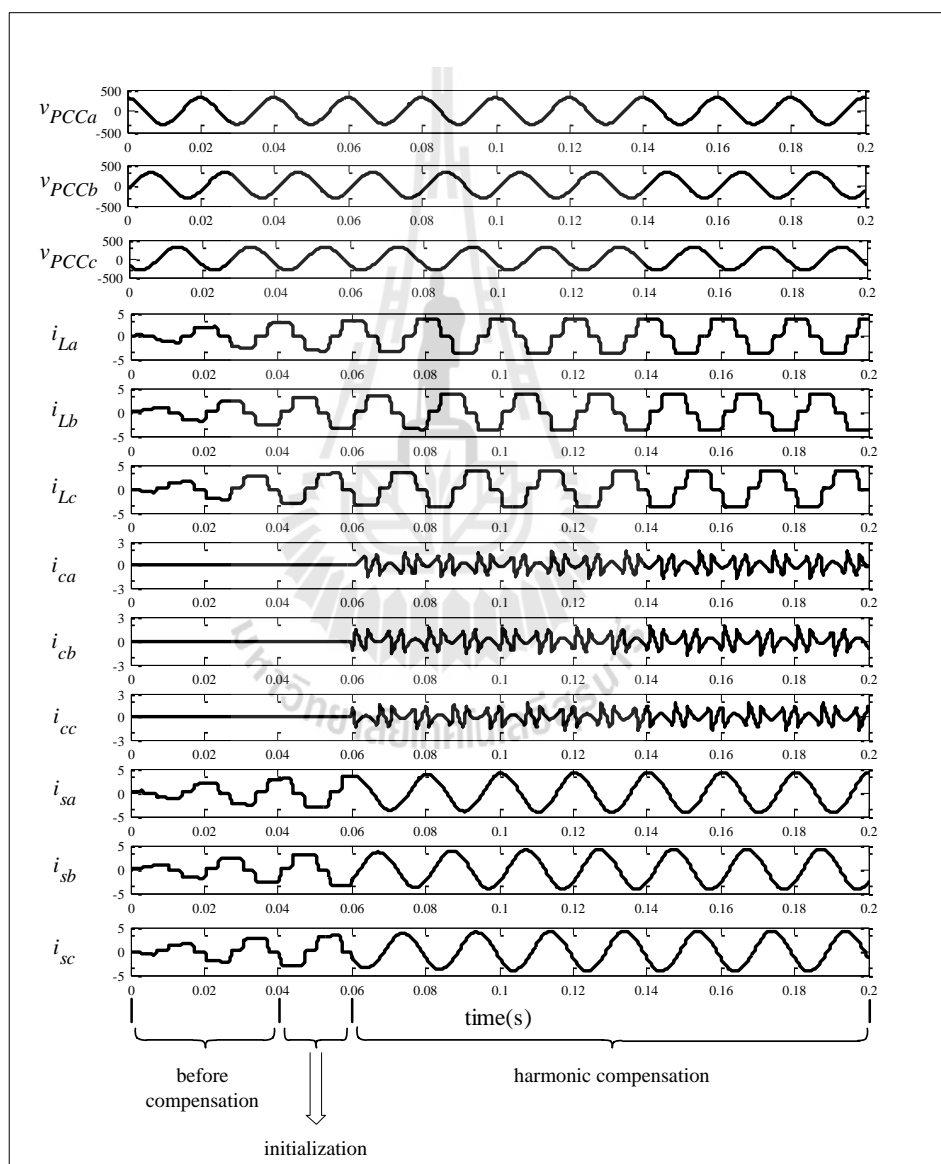
รูปที่ 4.31 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



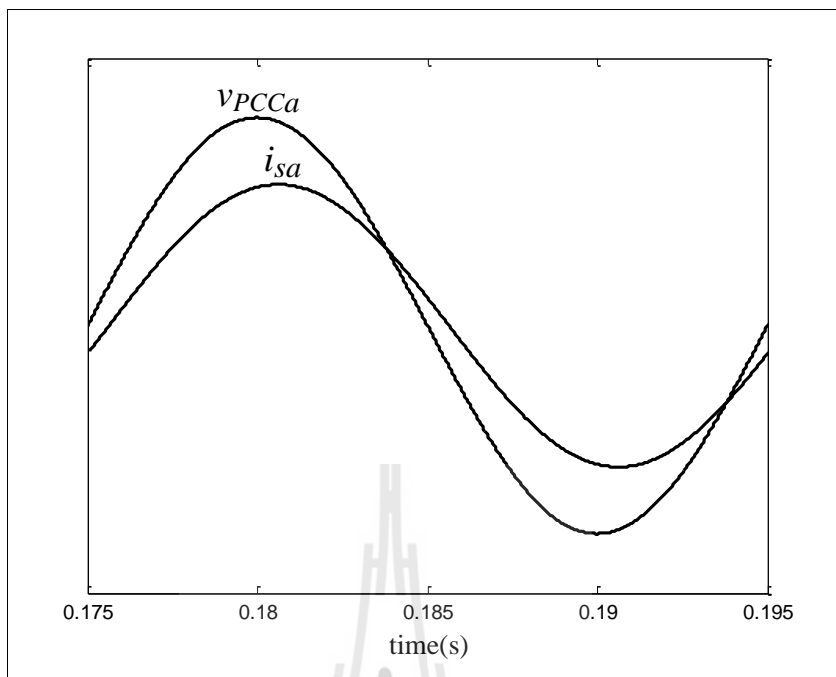
รูปที่ 4.32 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQ ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

มีลักษณะคล้ายวิธี PQ ในกรณี 1 แต่จะมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มเติม การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.31 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนเล็กน้อย ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.32 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 0.95% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1 ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ ในกรณีที่ 1 มีค่า $\%THD_{i,av}$ ที่มากกว่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากในกรณีที่ 1 มีการใช้ทั้งกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟเข้าสู่วงจรกรองผ่านสูง ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ส่วนในกรณีที่ 2 ใช้เพียงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้าสู่วงจรกรองผ่านสูงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า โดยในกรณีที่ 2 อิทธิพลจากค่าแอมพลิจูดของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ความถี่มูลฐานที่มีค่าลดลงมีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีการฉีดกระแสชดเชยที่ความถี่มูลฐานเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในปริมาณไม่มากนัก เมื่อพิจารณาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ในกรณี 1 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 4.33 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQ ในกรณี 1 คือ ไม่มีการฉีดกระแสชดเชยในช่วงนี้ และช่วงเวลา 0.04 ถึง 0.06 วินาทีเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นในการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณด้วยวิธี SWFA ซึ่งจะคำนวณเสร็จสิ้นเมื่อเริ่มคาบถัดไป ทำให้หลังจากเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปจึงเริ่มมีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชยการเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.34 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ไม่เกิดความผิดเพี้ยน จึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์โดยสมบูรณ์ ซึ่งกระแสดังกล่าวมีเฉพาะปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานโดยไม่ปรากฏปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.35 โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 0.04% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 อีกทั้งยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.98 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.98 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.36 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่า

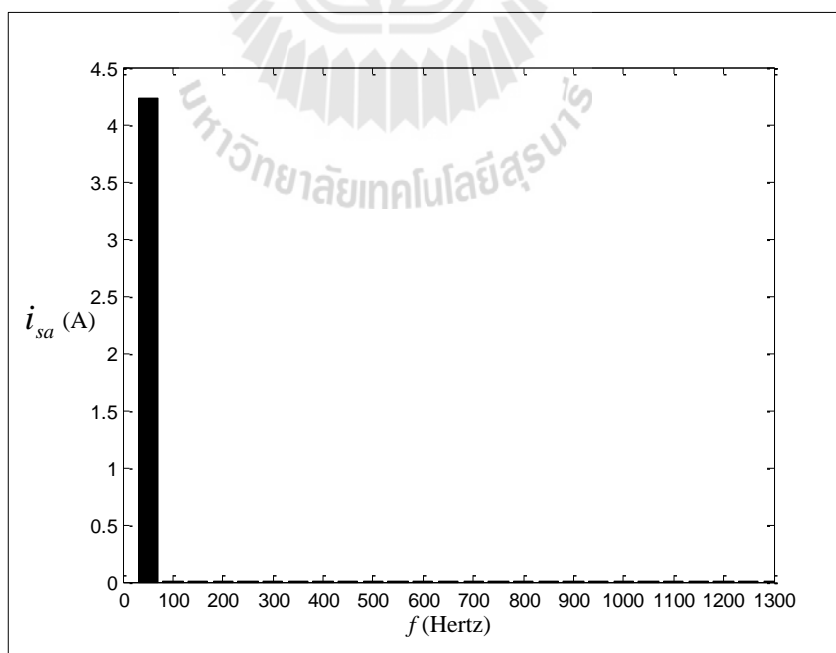
กระแสไฟฟ้าที่ไหลคืนในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ สเปกตรัมของกระแสชดเชยในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.37 จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่ากระแสชดเชยในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ สำหรับการกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-6) การกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a เหลือเพียงปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานเท่านั้นแสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.35 นอกจากนี้ผล



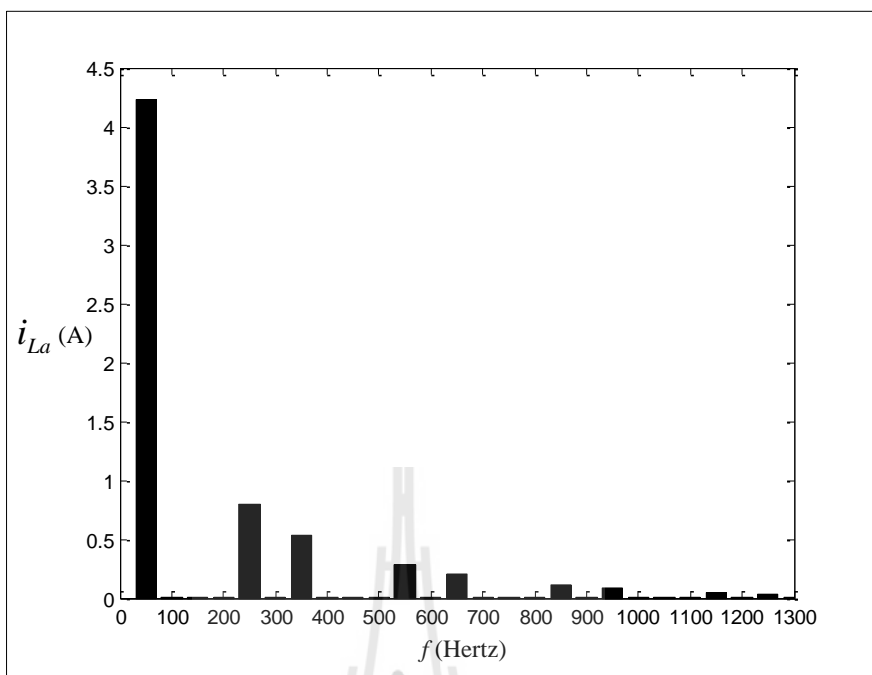
รูปที่ 4.33 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



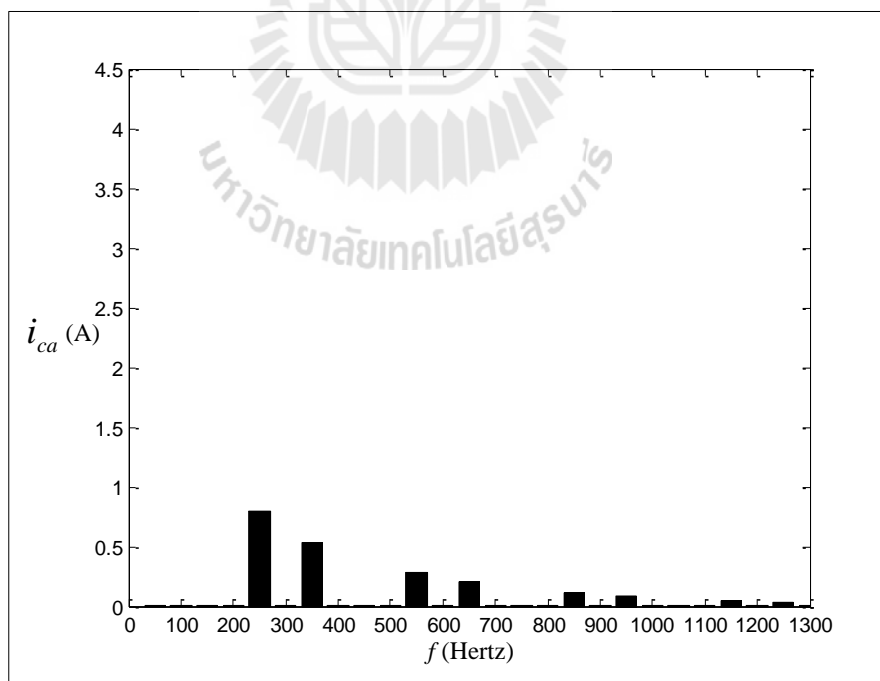
รูปที่ 4.34 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

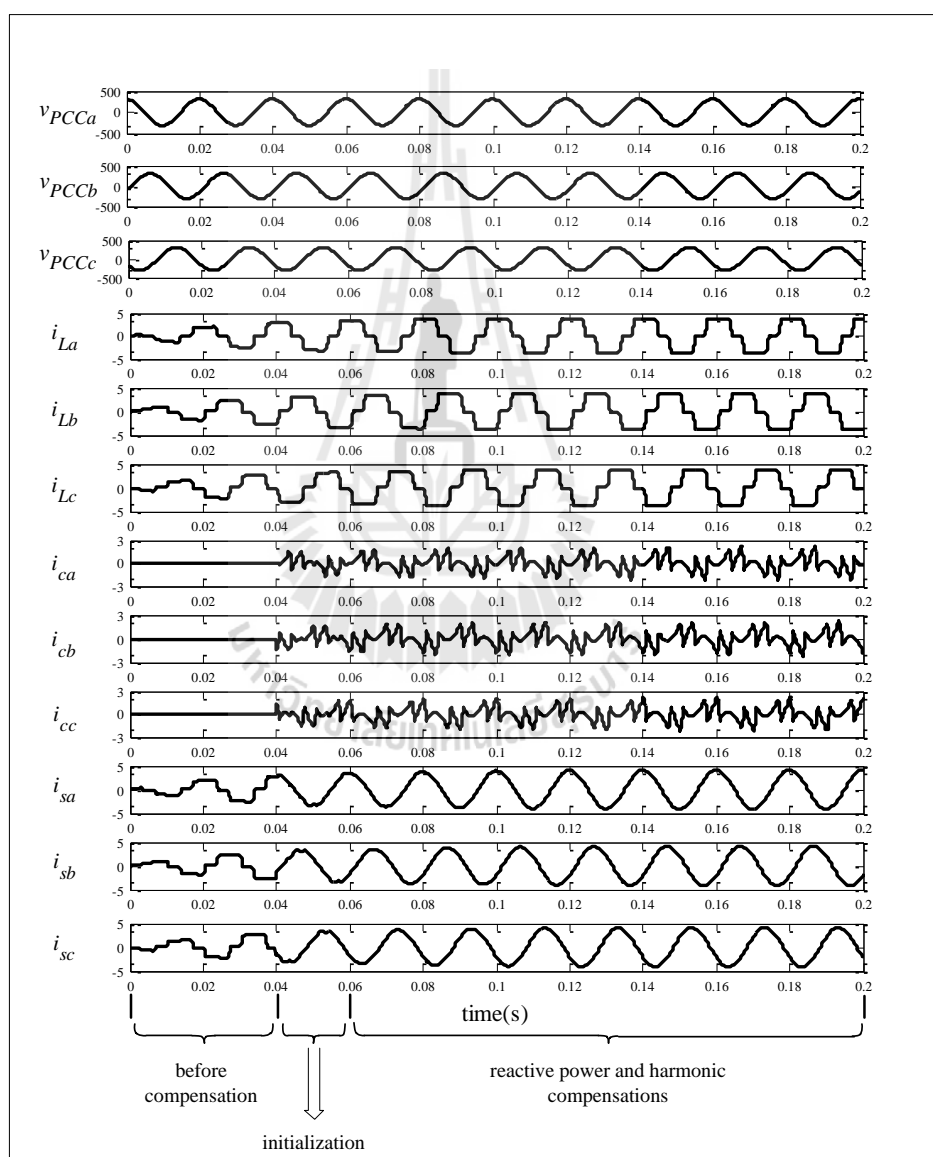


รูปที่ 4.36 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

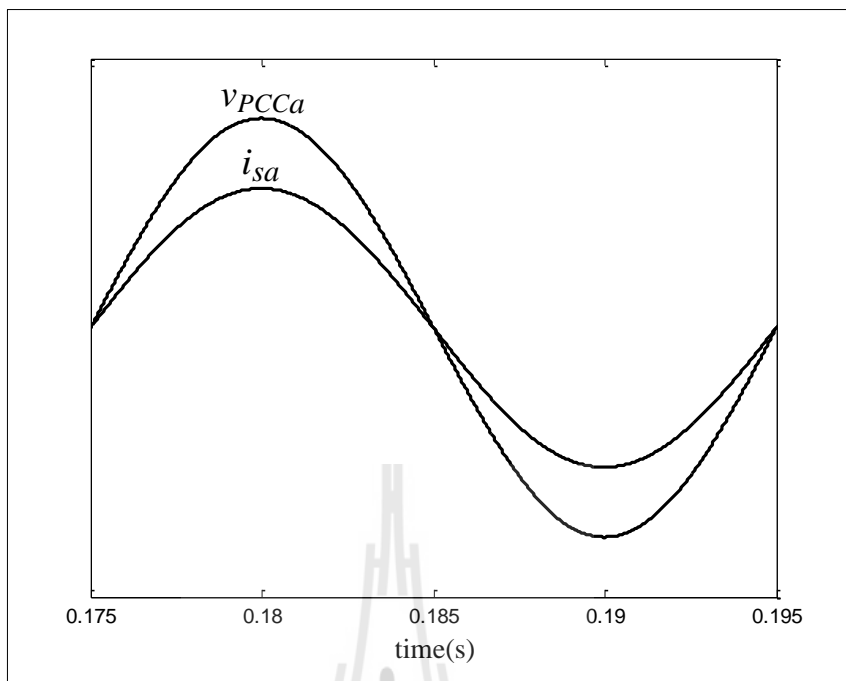


รูปที่ 4.37 สเปกตรัมกระแสชดเชยในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 1
เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

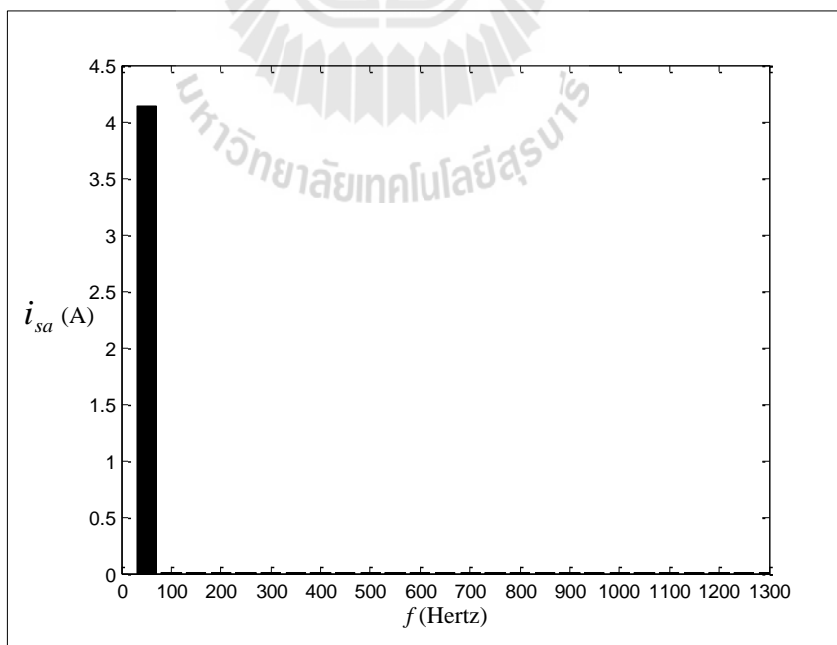
การจำลองสถานการณ์ที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ในกรณี 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.38 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีรูปสัญญาณมีลักษณะเหมือนวิธี PQF กรณี 1 และหลังจากเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิกจึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะคล้ายวิธี PQF ในกรณี 1 แต่จะมีการปรับปรุค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มเติม การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.39 จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการ



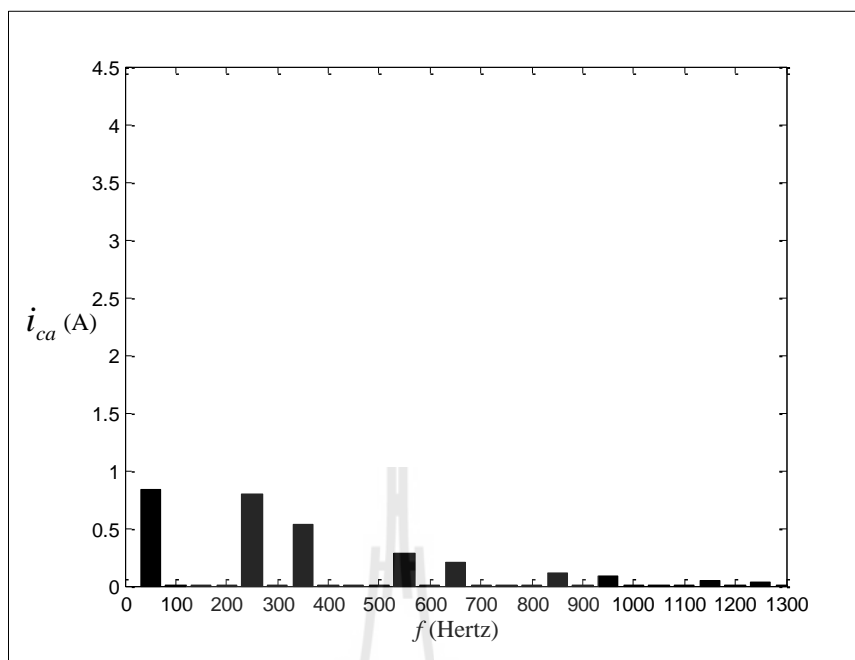
รูปที่ 4.38 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ของวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.39 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมกระแสชดเชยในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวิธี PQF ในกรณี 2 เมื่อโหลดเป็น วงจรเรียงกระแส

กําจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ไม่เกิดความผิดเพี้ยน จึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์โดยสมบูรณ์ ซึ่งกระแสดังกล่าวมีเฉพาะปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐาน โดยไม่ปรากฏปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ แสดงในรูปของสเปกตรัมดังรูปที่ 4.40 โดยมีค่า $\%THD_{i_{av}}$ เท่ากับ 0.04% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.36 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่ความถี่ มูลฐาน และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ สเปกตรัมของกระแสชดเชยในเฟส a แสดงดังรูปที่ 4.41 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากระแสชดเชยในเฟส a ประกอบด้วยปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ สำหรับการกําจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-6) การกําจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเหลือเพียงปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายที่ความถี่มูลฐานมีค่า

แอมพลิจูดลดลงเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่โหลดที่ความถี่มูลฐานแสดงในรูปของสเปกตรัม
 ดังรูปที่ 4.40

4.4 สรุป

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบด้วยวิธีฟูรีเยร์ (PQF) ซึ่งพัฒนามาจากวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (PQ) ร่วมกับการใช้วิธีวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA) โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQ มีข้อจำกัดในการเลือกค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านสูงให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งปัญหาการเลือกใช้ค่าความถี่ตัดดังกล่าวจะถูกแก้ไขด้วยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ที่มีการใช้วิธี SWFA แทนการใช้วงจรกรองผ่านสูง ซึ่งวิธี SWFA มีความแม่นยำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก และมีความเร็วในการตอบสนองที่ดี โดยมีข้อจำกัดเพียงการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณในคาบแรกเท่านั้น จากการทดสอบทั้ง 2 ระบบ ซึ่งมีโหลดแตกต่างกัน คือ ระบบแรกเป็นระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ ซึ่งสามารถกำหนดรูปแบบกระแสได้ตามต้องการ ทำให้ง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลังและมีปริมาณฮาร์มอนิกสูง เพื่อทดสอบสมรรถนะในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ระบบที่สองเป็นระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ก่อให้เกิดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบ และเป็นโหลดที่มีการใช้งานใกล้เคียงในทางปฏิบัติจริง ทั้งสองระบบดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณี 1 กำหนดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิก และกรณี 2 กำหนดฮาร์มอนิกและชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง พบว่าทั้ง 2 กรณี การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีสมรรถนะในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี PQ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยของวิธี PQF มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากกว่าในวิธี PQ และค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยที่มีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีค่าต่ำกว่าวิธี PQ โดยค่า $\%THD_{i,av}$ ดังกล่าวอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงในกรณี 2 สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเป็น 1 ในบทถัดไปหลังจากนี้จะใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ในการจำลองสถานการณ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และยังช่วยปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยเช่นกัน

บทที่ 5

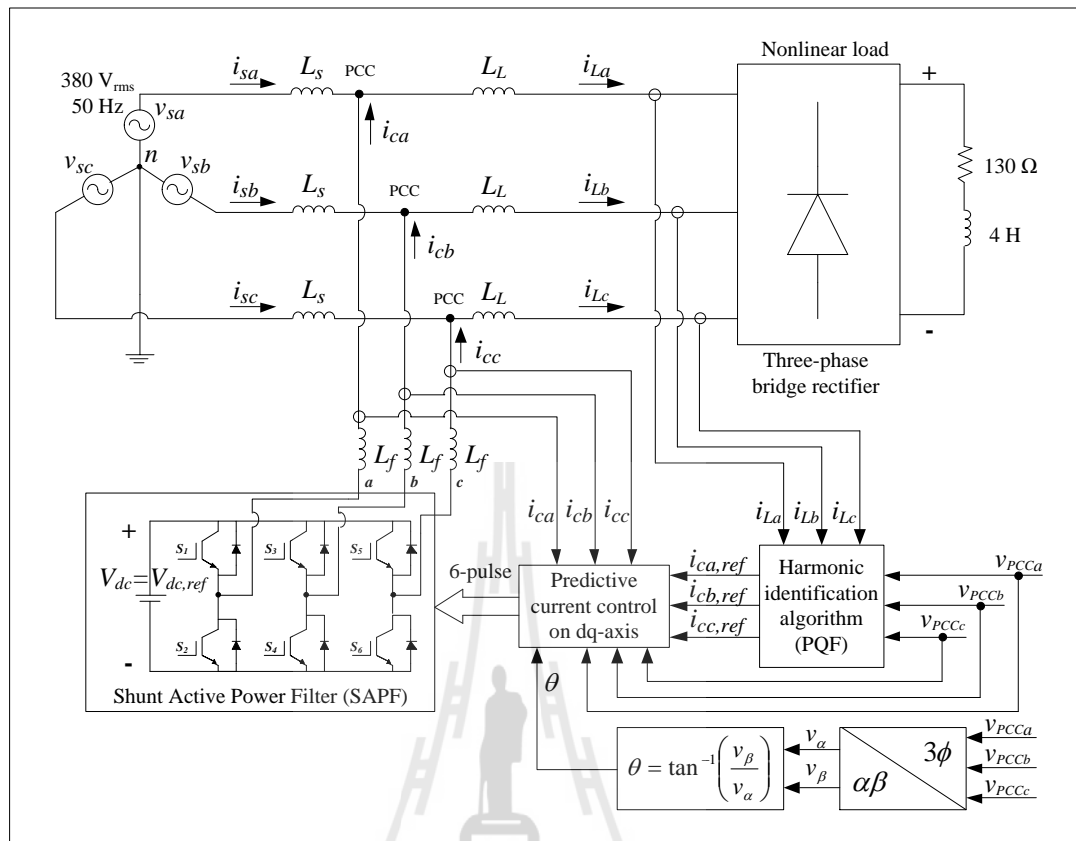
การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย สำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ

5.1 บทนำ

การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว (Mendalek, Farhat, Al-Haddad, and Dessaint, 2002) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยตัวควบคุมดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมให้การฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีลักษณะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งตัวควบคุมกระแสแบบทำนายมีข้อดีคือ ลดผลกระทบจากการประวิงเวลาของการควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการประวิงเวลาดังกล่าวจะทำให้กระแสชดเชยมีความคลาดเคลื่อนไปจากกระแสอ้างอิงมากยิ่งขึ้น ส่วนการพิจารณาตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวเป็นการต่อยอดจากการพิจารณาบนแกน 3 เฟส ซึ่งจะทำได้สามารถลดสมการในการคำนวณสำหรับการควบคุมจาก 3 แกนให้เหลือเพียง 2 แกน ในบทนี้จึงได้นำเสนอโครงสร้างระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย ขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และการออกแบบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์ และการอภิปรายผล

5.2 โครงสร้างระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ

โครงสร้างระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูปดังกล่าว การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นตามที่ได้



รูปที่ 5.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 พิจารณาได้ดังบล็อก Harmonic identification algorithm (PQF) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก และมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดยทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิงซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิก และปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว พิจารณาได้ดังบล็อก Predictive current control on dq-axis ซึ่งใช้งานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-Width Modulation : PWM) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อควบคุมการทำงานของไอจีบีทีให้การฉีดกระแสชดเชยมีลักษณะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์การสวิตช์ไอจีบีทีจำนวน 6 ตัว พิจารณาได้ดังบล็อก Shunt Active Power Filter (SAPF) ซึ่งทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน พบว่าไอจีบีทีแต่ละ

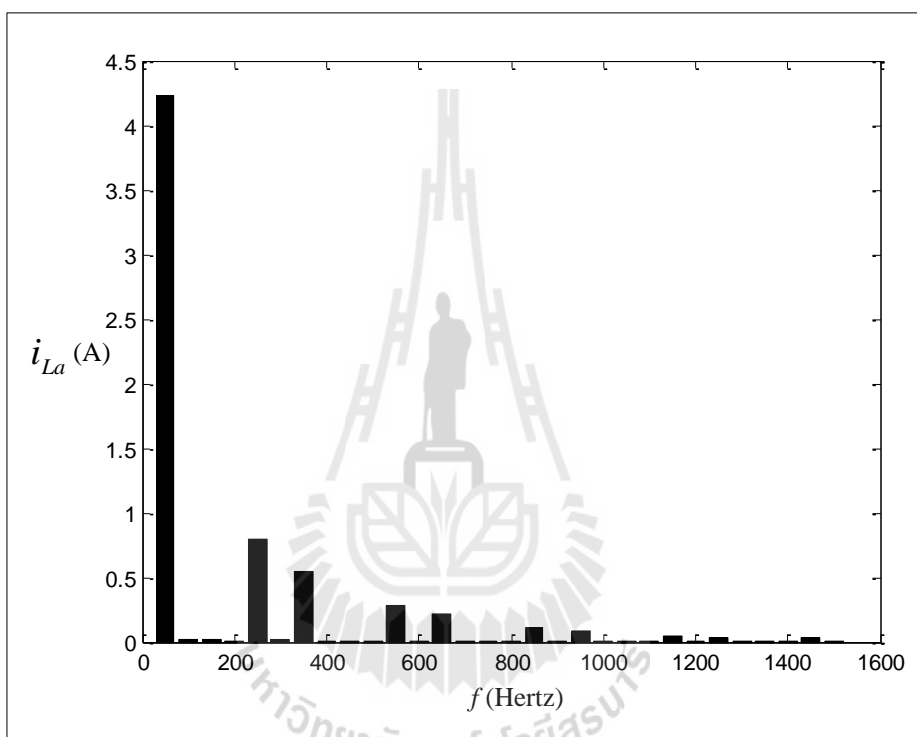
ตัวจะมีลักษณะการทำงานเป็นกึ่ง โดยแต่ละกึ่งทำงานเป็นอิสระต่อกัน ถ้าไอจีบีที่ตัวบนนำกระแส ไอจีบีที่ตัวล่างจะหยุดนำกระแส ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากไอจีบีที่ตัวบนหยุดนำกระแส ไอจีบีที่ตัวล่างจะนำกระแส ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง ดังนั้นการทำงานของไอจีบีที่ควรจะสัมพันธ์กับกระแสอ้างอิงเพื่อให้การฉีดกระแสชดเชยมีลักษณะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง โดยพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ได้แก่ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ($V_{dc.ref}$) และค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_f) ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3

5.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ได้แก่ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบ 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีของ Ingram และ Round กับวิธีของ Benchaita, Saadate และ Nia ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา การออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงด้วยวิธีการของ Benchaita, Saadate และ Nia ได้นำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1999 (Benchaita, Saadate, and Nia, 1999) ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบค่าดังกล่าวควรออกแบบให้มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_m) หรือมากกว่า 467 โวลต์ โดยค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 311 โวลต์ การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองจะดำเนินการตามวิธีการของ Ingram และ Round ที่ได้นำเสนอในปี ค.ศ. 1997 (Ingram, and Round, 1997) ซึ่งการออกแบบค่าดังกล่าวควรออกแบบให้มีค่าไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(max)}$) ซึ่งค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-1) จากสมการดังกล่าวจะปรากฏค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(\frac{di_{c.ref}}{dt})$) ซึ่งค่าดังกล่าวคำนวณได้ดังสมการที่ (5-2) จากสมการดังกล่าว จะปรากฏค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่มีขนาดกระแสสูงสุด (A) และค่าความถี่ของอันดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด (f) โดยค่าดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมของกระแสโพลดิเฟส a แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งบ่งบอกถึงค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ความถี่มูลฐานและที่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ จากรูปดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่มีขนาดกระแสสูงสุด คือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับ 5 ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 250 เฮิรตซ์ และค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 0.8 แอมป์ ทำให้สามารถออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุดได้ดังสมการที่ (5-3) จากสมการดังกล่าวเงื่อนไขค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุดเท่ากับ 0.349 เฮนรี

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{dc,ref} - V_m}{\max\left(\frac{di_{c,ref}}{dt}\right)} \quad (5-1)$$

$$\max\left(\frac{di_{c,ref}}{dt}\right) = A(2\pi)f \quad (5-2)$$



รูปที่ 5.2 สเปกตรัมของกระแสไหลคเฟส a

$$L_{f,\max} = \frac{V_{dc,ref} - V_m}{A(2\pi)f} = \frac{750 - (\sqrt{2} \times 220)}{0.8 \times 2\pi \times 250} = 0.349 \text{ H} \quad (5-3)$$

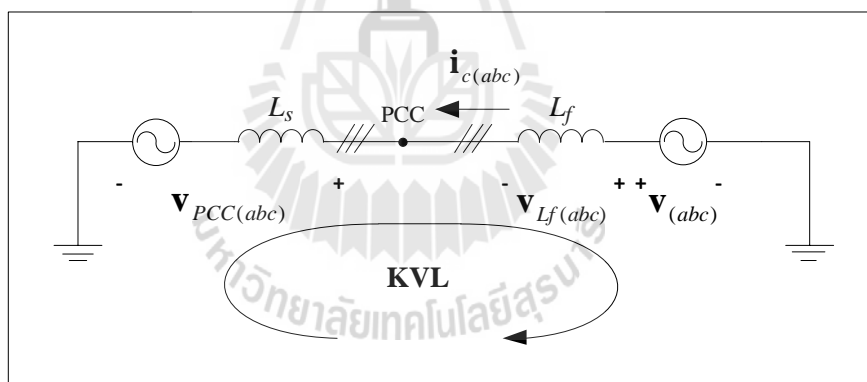
จากการนำเสนอข้างต้นค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือมากกว่า 467 โวลต์ และค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองต้องมีค่าไม่เกิน 0.349 เฮนรี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงอ้างถึงงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในอดีตของ ทศพร ฌรงศ์ฤทธิ ที่ได้นำเสนอไว้ในปี พ.ศ. 2552 (ทศพร ฌรงศ์ฤทธิ, 2552) ที่ออกแบบค่าดังกล่าว

ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ซึ่งเป็นระบบการกำจัดฮาร์มอนิกที่มี องค์ประกอบใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ โดยมีข้อแตกต่างกัน คือ ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกของงานวิจัย ในอดีตดังกล่าวใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และการควบคุมการฉีดกระแสชดเชย ด้วยวิธีฮีสเทอรีซิส ส่วนระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วย วิธี PQF และการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมจะส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิก และ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟตามงานวิจัยในอดีตดังกล่าว คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง อ้างอิงเท่ากับ 750 โวลต์ และค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ 0.039 เฮนรี

5.4 หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย

การควบคุมกระแสแบบทำนายเป็นเทคนิคการควบคุมที่สามารถลดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการประวิงเวลาของการควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งการควบคุมดังกล่าวจะส่งผลให้กระแส ชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการ ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF หลักการของการควบคุมกระแสแบบทำนายเริ่มแรกจะ พิจารณาโครงสร้างการวิเคราะห์ระบบดังรูปที่ 5.3 เพื่อหาสมการที่ใช้ในการควบคุมกระแสชดเชย สามเฟส จากรูปที่ 5.3 สังเกตได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด แหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าแรงดันตกคร่อม คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ($\mathbf{v}_{(abc)}$) ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเชื่อมต่อผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองที่มีค่าแรงดันตกคร่อม $\mathbf{v}_{Lf(abc)}$ ไปยังแหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ($\mathbf{v}_{PCC(abc)}$) เมื่อวิเคราะห์โดยใช้กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์จะได้รับความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (5-4) ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปแบบความสัมพันธ์ของกระแสชดเชยจะได้ดังสมการที่ (5-5) จากสมการดังกล่าว สังเกตได้ว่าปรากฏเทอมอนุพันธ์อันดับหนึ่งของกระแสชดเชย การประมาณค่า เทอมอนุพันธ์ในสมการดังกล่าวจะใช้การประมาณค่าอนุพันธ์แบบไปข้างหน้า (forward difference approximation) พิจารณาได้ดังสมการที่ (5-6) จากสมการดังกล่าว เนื่องจากต้องการคำนวณค่า แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้กระแสชดเชยที่เวลา $t(k+1)$ ($\mathbf{i}_{c(abc)}(k+1)$) มีค่าเป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่เวลา $t(k+1)$ ($\mathbf{i}_{c(abc),ref}(k+1)$) ดังนั้นจึงแทนค่า $\mathbf{i}_{c(abc)}(k+1)$ ด้วยค่า $\mathbf{i}_{c(abc),ref}(k+1)$ แต่เนื่องจากค่า $\mathbf{i}_{c(abc),ref}(k+1)$ เป็นค่าในอนาคต และยังไม่ทราบค่า ด้วยเหตุนี้จึงมีการประมาณค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าวโดยกระแสอ้างอิงที่จะประมาณนี้ คือ ค่า $\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1)$ แสดงดังสมการที่ (5-7) โดยการประมาณค่า $\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1)$ จะใช้สมการของ

ลากรานจ์ดั่งสมการที่ (5-8) ซึ่งค่า $\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1)$ ที่ประมาณนี้จะต้องมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ ค่า $\mathbf{i}_{c(abc),ref}(k+1)$ ดังรูปที่ 5.4 จากสมการที่ (5-8) จะคิดตัวแปรค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ (a_0, a_1, \dots, a_n) ซึ่งสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์จะมีค่าแตกต่างกันตามสมการของลากรานจ์แต่ละอันดับ สามารถคำนวณได้ดั่งสมการที่ (5-9) (Odavic, Biagini, Zanchetta, Sumner, and Degano, 2011) โดยที่ n คือ อันดับสมการของลากรานจ์ ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ในสมการที่ (5-9) แสดงดังตารางที่ 5.1 จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5-7) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรถออินเวอร์เตอร์ส่งผลโดยตรงต่อการนิโคกระแสชดเชยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้การนิโคกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ มีลักษณะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการควบคุมกระแสแบบทำนายดังรูปที่ 5.4 เมื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรถออินเวอร์เตอร์ในสมการที่ (5-7) แล้ว ค่าดังกล่าวจะนำไปเข้าสู่กระบวนการพีดีบีลยูเอ็มเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในการสั่งการไอจีบีทีของวงจรถออินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ



รูปที่ 5.3 โครงสร้างการวิเคราะห์ระบบ

$$\mathbf{v}_{(abc)} = \mathbf{v}_{L_f(abc)} + \mathbf{v}_{PCC(abc)} \quad (5-4)$$

$$\mathbf{v}_{(abc)} = L_f \left(\frac{d\mathbf{i}_{c(abc)}}{dt} \right) + \mathbf{v}_{PCC(abc)} \quad (5-5)$$

$$\mathbf{v}_{(abc)}(k) = \frac{L_f}{T_s} [\mathbf{i}_{c(abc)}(k+1) - \mathbf{i}_{c(abc)}(k)] + \mathbf{v}_{PCC(abc)}(k) \quad (5-6)$$

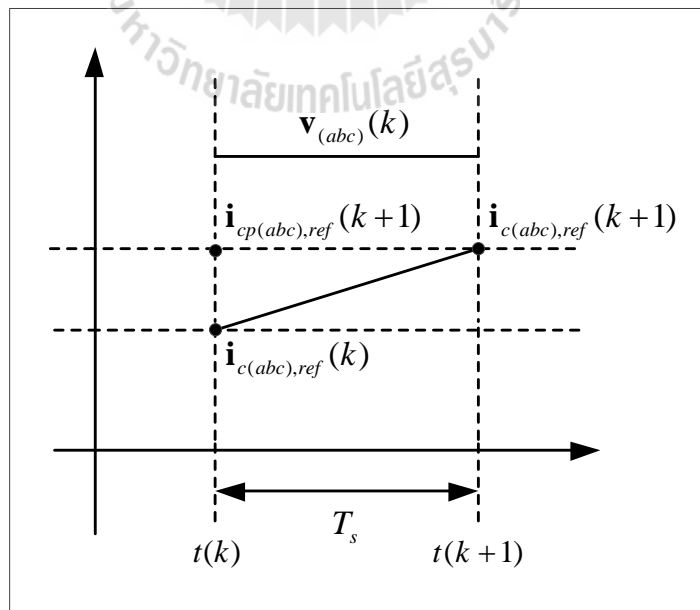
$$\mathbf{v}_{(abc)}(k) = \frac{L_f}{T_s} [\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1) - \mathbf{i}_{c(abc)}(k)] + \mathbf{v}_{PCC(abc)}(k) \quad (5-7)$$

$$\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1) = a_0 \mathbf{i}_{c(abc),ref}(k) + a_1 \mathbf{i}_{c(abc),ref}(k-1) + \dots + a_n \mathbf{i}_{c(abc),ref}(k-n) \quad (5-8)$$

$$\mathbf{i}_{cp(abc),ref}(k+1) = \sum_{l=0}^n (-1)^{n-l} \frac{(n+1)!}{l!(n+1-l)!} \cdot \mathbf{i}_{c(abc),ref}(k+l-n) \quad (5-9)$$

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์สำหรับสมการของลากรานจ์อันดับต่าง ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์ อันดับ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$n = 1$	2	-1	0	0	0	0	0
$n = 2$	3	-3	1	0	0	0	0
$n = 3$	4	-6	4	-1	0	0	0
$n = 4$	5	-10	10	-5	1	0	0
$n = 5$	6	-15	20	-15	6	-1	0



รูปที่ 5.4 หลักการของการควบคุมกระแสแบบทำนาย

5.5 ขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว

จากการควบคุมกระแสแบบทำนายสามเฟสในสมการที่ (5-5) เมื่อนำมาพิจารณาบนแกนดีคิวจะปรากฏเทอมผลคูณระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรถองและค่าความถี่เชิงมุมสำหรับแปลงแกนดีคิว ($L_f \omega_{dq}$) เพิ่มขึ้นดังสมการที่ (5-10) สมการดังกล่าวสังเกตได้ว่าปรากฏเทอมอนุพันธ์อันดับหนึ่งของกระแสชดเชย ซึ่งการประมาณค่าเทอมอนุพันธ์นี้จะเป็นดังสมการที่ (5-11) และจากสมการที่ (5-8) เป็นสมการสำหรับประมาณค่ากระแสอ้างอิงในอนาคตสามเฟส เมื่อนำมาพิจารณาบนแกนดีคิว จะได้ดังสมการที่ (5-12) ซึ่งจะติดตัวแปรค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ดังกล่าวจะใช้ค่าเดียวกับกรณีพิจารณาบนระบบสามเฟสซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.1 จากการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวในสมการที่ (5-11) เมื่อแยกพิจารณาแต่ละแกนบนแกนดีจะสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (5-13) และบนแกนคิวจะสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (5-14) จากสมการที่ (5-13) และ (5-14) เป็นสมการที่ใช้ในการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดี และคิว ซึ่งใช้งานร่วมกับสมการของลากรานจ์ที่ใช้คำนวณกระแสอ้างอิงในอนาคตบนแกนดีคิวตามสมการที่ (5-12) ซึ่งการออกแบบเพื่อเลือกอันดับของสมการลากรานจ์ในสมการดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อที่ 5.6 รายละเอียดขั้นตอนการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยวิธีพีดีบีเบิลยูเอ็มให้กับวงจรถอง

$$\mathbf{v}_{(dq)} = L_f \frac{d\mathbf{i}_{c(dq)}}{dt} + L_f \omega_{dq} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i}_{c(dq)} + \mathbf{v}_{PCC(dq)} \quad (5-10)$$

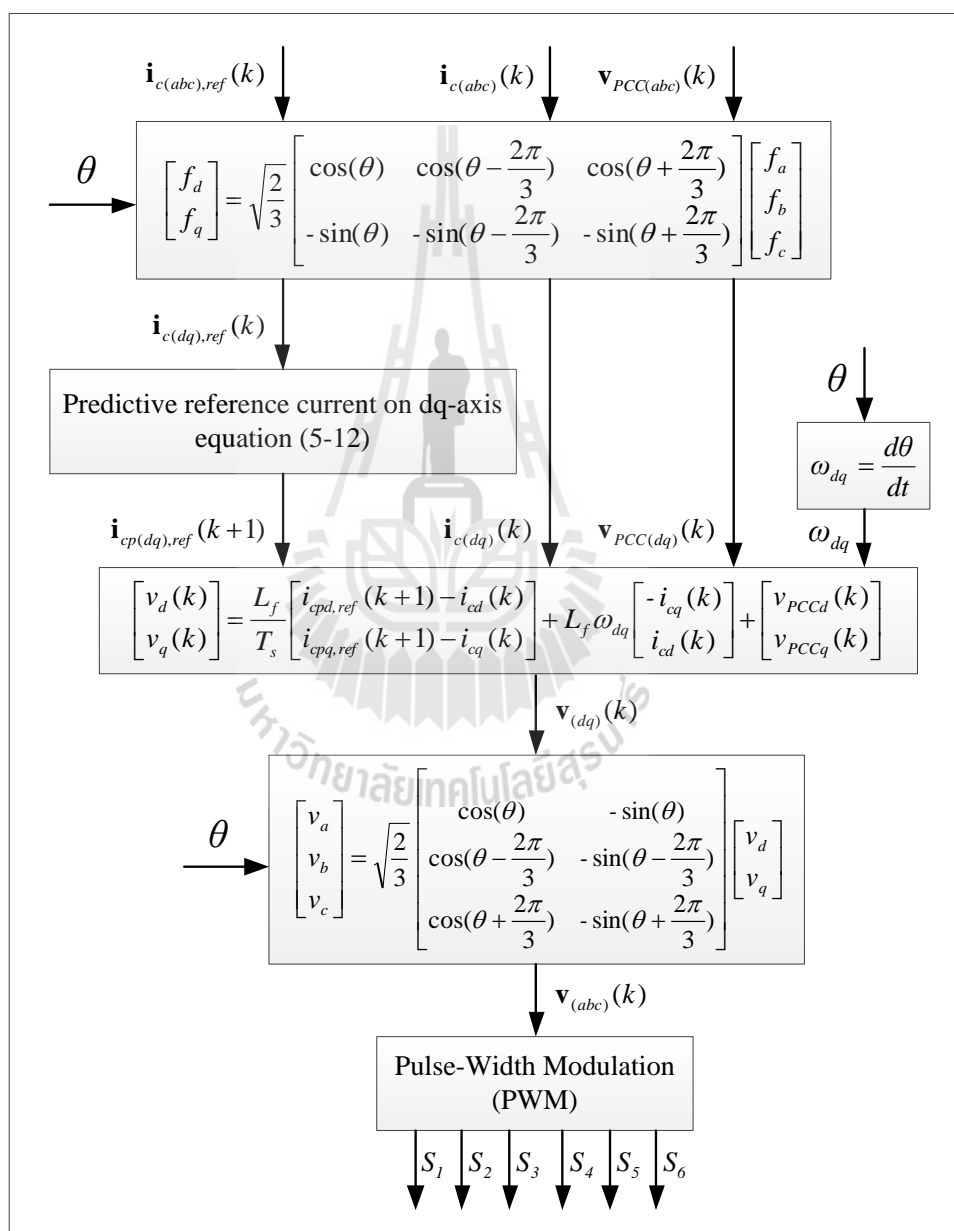
$$\mathbf{v}_{(dq)}(k) = \frac{L_f}{T_s} [\mathbf{i}_{cp(dq),ref}(k+1) - \mathbf{i}_{c(dq)}(k)] + L_f \omega_{dq} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i}_{c(dq)}(k) + \mathbf{v}_{PCC(dq)}(k) \quad (5-11)$$

$$\mathbf{i}_{cp(dq),ref}(k+1) = a_0 \mathbf{i}_{c(dq),ref}(k) + a_1 \mathbf{i}_{c(dq),ref}(k-1) + \dots + a_n \mathbf{i}_{c(dq),ref}(k-n) \quad (5-12)$$

$$v_d(k) = \frac{L_f}{T_s} [i_{cpd,ref}(k+1) - i_{cd}(k)] - L_f \omega_{dq} \cdot i_{cq}(k) + v_{PCCd}(k) \quad (5-13)$$

$$v_q(k) = \frac{L_f}{T_s} [i_{cpq,ref}(k+1) - i_{cq}(k)] + L_f \omega_{dq} \cdot i_{cd}(k) + v_{PCCq}(k) \quad (5-14)$$

กำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.5 การควบคุมกระแสเซชด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดิวตามที่ได้นำเสนอถูกนำมาใช้งานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ไอจีบีที เนื่องจากข้อดีของเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็มที่ให้ความถี่การสวิตช์คงที่เท่ากับค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม เหมาะสำหรับนำมาใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งมีโครงสร้างการควบคุม



รูปที่ 5.5 แผนภาพการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม

ที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลการควบคุมที่ดี (Kazmierkowski, and Malesani, 1998) ลักษณะการทำงานของ การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการ สวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ให้กับไอจีบีที คือ การเปรียบเทียบสัญญาณ ระหว่างแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์กับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม (v_c) ที่มีค่าความถี่ ของสัญญาณสามเหลี่ยม (f_c) และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม (A_c) คงที่ค่าหนึ่งในแต่ละ เฟส เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีทั้ง 6 ตัว ยกตัวอย่างการทำงาน โดยการเปรียบเทียบสัญญาณในเฟส a เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์เฟส a ($v_a(k)$) มากกว่าสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมจะทำให้ไอจีบีทีตัวบนนำกระแส และตัวล่างหยุดนำกระแส ส่งผลให้กระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากผลการเปรียบเทียบสัญญาณ แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์เฟส a น้อยกว่าสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมจะทำให้ไอจีบีที ตัวบนหยุดนำกระแส และตัวล่างนำกระแส ส่งผลให้กระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบมีค่าลดลง การ เปรียบเทียบสัญญาณในลักษณะดังกล่าวตลอดย่านการทำงานจะทำให้กระแสชดเชยเฟส a (i_{ca}) มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณกระแสอ้างอิงเฟส a ($i_{ca,ref}$) โดยพารามิเตอร์ของวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม ประกอบไปด้วย ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้มีความเหมาะสม จะส่งผลต่อประสิทธิภาพผลการกำจัด ฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และจะนำเสนอรายละเอียดการออกแบบในหัวข้อที่ 5.6

5.6 การออกแบบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนาย

บนแกนดีคิว

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว ได้แก่ การเลือกอันดับของสมการลากรานจ์ ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และค่าแอมพลิจูด ของสัญญาณสามเหลี่ยมในกระบวนการพีดับเบิลยูเอ็ม เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความ เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมกระแสชดเชย และสมรรถนะการ หนีกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การใช้สมการของลากรานจ์ควรเลือกอันดับของ สมการให้มีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยการทดสอบสมการของลากรานจ์อันดับต่าง ๆ จะแสดงค่าความคลาดเคลื่อน (*Error*) ระหว่างกระแสอ้างอิงที่ได้จากการประมาณด้วยสมการของ ลากรานจ์กับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ทั้งบนแกนดี และ แกนควค่านวนได้ดังสมการที่ (5-15) โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลในหนึ่งคาบ และใช้ตัวชี้วัดการ ทดสอบเป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเฉลี่ย ($\%THD_{i,av}$) หลังการชดเชยดังตารางที่ 5.2 จากตารางดังกล่าว การใช้สมการของลากรานจ์อันดับที่ 1 ทำให้ค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยมีค่า

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ จากการใช้สมการของลากรานจ์แต่ละอันดับ

อันดับสมการของ ลากรานจ์ (n)	$\%THD_{i,av}$		<i>Error</i>	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	d-axis	q-axis
1	24.91	1.40	1.6×10^{-3}	5.9×10^{-3}
2		1.45	3.2×10^{-3}	15.2×10^{-3}
3		1.97	7.9×10^{-3}	55.7×10^{-3}
4		1.49	13.2×10^{-3}	57.7×10^{-3}
5		3.23	30.0×10^{-3}	98.9×10^{-3}

$$Error = \left\{ \sum_{k=1}^N |i_{cp,ref}(k) - i_{c,ref}(k)| \right\} / N \quad (5-15)$$

ค่าที่ต่ำที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า *Error* ทั้งบนแกนดี และ แกนควมีค่าต่ำที่สุดเช่นกันซึ่งบ่งบอกถึงผลการประมาณกระแสอ้างอิงด้วยสมการของลากรานจ์ อันดับที่ 1 ทั้งบนแกนดี และแกนควมีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการของลากรานจ์อันดับที่ 1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ คือ a_0 เท่ากับ 2 และ a_1 เท่ากับ -1 พิจารณาได้ดังสมการที่ (5-16)

$$\mathbf{i}_{cp(dq),ref}(k+1) = 2\mathbf{i}_{c(dq),ref}(k) - \mathbf{i}_{c(dq),ref}(k-1) \quad (5-16)$$

การออกแบบค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมในกระบวนการพีดับเบิลยูเอ็มด้วยวิธีการของ Thomas ได้นำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1998 (Thomas, 1998) ซึ่งพิจารณาจากอันดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด โดยค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมต้องมีค่ามากกว่าค่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงสุด ($f_{h,max}$) ที่พิจารณาเป็นสองเท่า ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาอันดับฮาร์มอนิกที่มีนัยสำคัญ 50 อันดับ หรือที่ค่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงสุดเท่ากับ 2500 เฮิร์ตซ์ การคำนวณพิจารณาได้ดังสมการที่ (5-17) จากสมการดังกล่าว จึงเลือกใช้ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 5000 เฮิร์ตซ์ กระบวนการพีดับเบิลยูเอ็มในขั้นตอนการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์กับสัญญาณพารูปสามเหลี่ยมหากเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์

$$f_c = 2 \times f_{h,max} = 2 \times 2500 = 5000 \text{ Hz} \quad (5-17)$$

มีค่าสูงเกินไปอาจไม่สามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ได้แก่ การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออปแอมป์ (Operation Amplifier : Op-Amp) ในการสร้างวงจรเปรียบเทียบแรงดัน สำหรับเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์กับสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าเป็นวงจรที่ง่ายในการสร้างจริงในทางปฏิบัติ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก แต่มีข้อจำกัดในด้านการทนต่อแรงดัน ดังนั้นก่อนเข้ากระบวนการพีดับเบิลยูเอ็มจึงทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนค่าแอมพลิจูดแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าลดลง โดยการหารด้วยค่าคงที่การปรับลด (K) หากค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้ค่าแอมพลิจูดแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงจนไม่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริงได้ ในทางตรงกันข้ามหากค่าดังกล่าวมีค่ามากเกินไปอาจทำให้ค่าแอมพลิจูดแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำจนไม่มีนัยสำคัญ ส่งผลให้ตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยได้ การทดสอบค่าคงที่การปรับลดให้มีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยใช้วิธีการสุ่มค่าคงที่การปรับลดเพื่อทดสอบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาจากค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยแสดงดังตารางที่ 5.3 จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าคงที่การปรับลดเท่ากับ 1000 ส่งผลทำให้ค่า

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ จากการสุ่มค่าคงที่การปรับลด

K	$\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย	K	$\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย
1000	1.40	6000	3.35
2000	1.62	7000	3.60
3000	2.33	8000	3.92
4000	2.94	9000	4.46
5000	3.07	10000	4.69

$\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าคงที่การปรับลดเท่ากับ 1000 การออกแบบค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมให้มีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยใช้วิธีการสุ่มค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อทดสอบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาจากค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย แสดงดังตารางที่ 5.4 จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.3 โวลต์ ส่งผลทำให้ค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.3 โวลต์

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย จากการสุ่มค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม

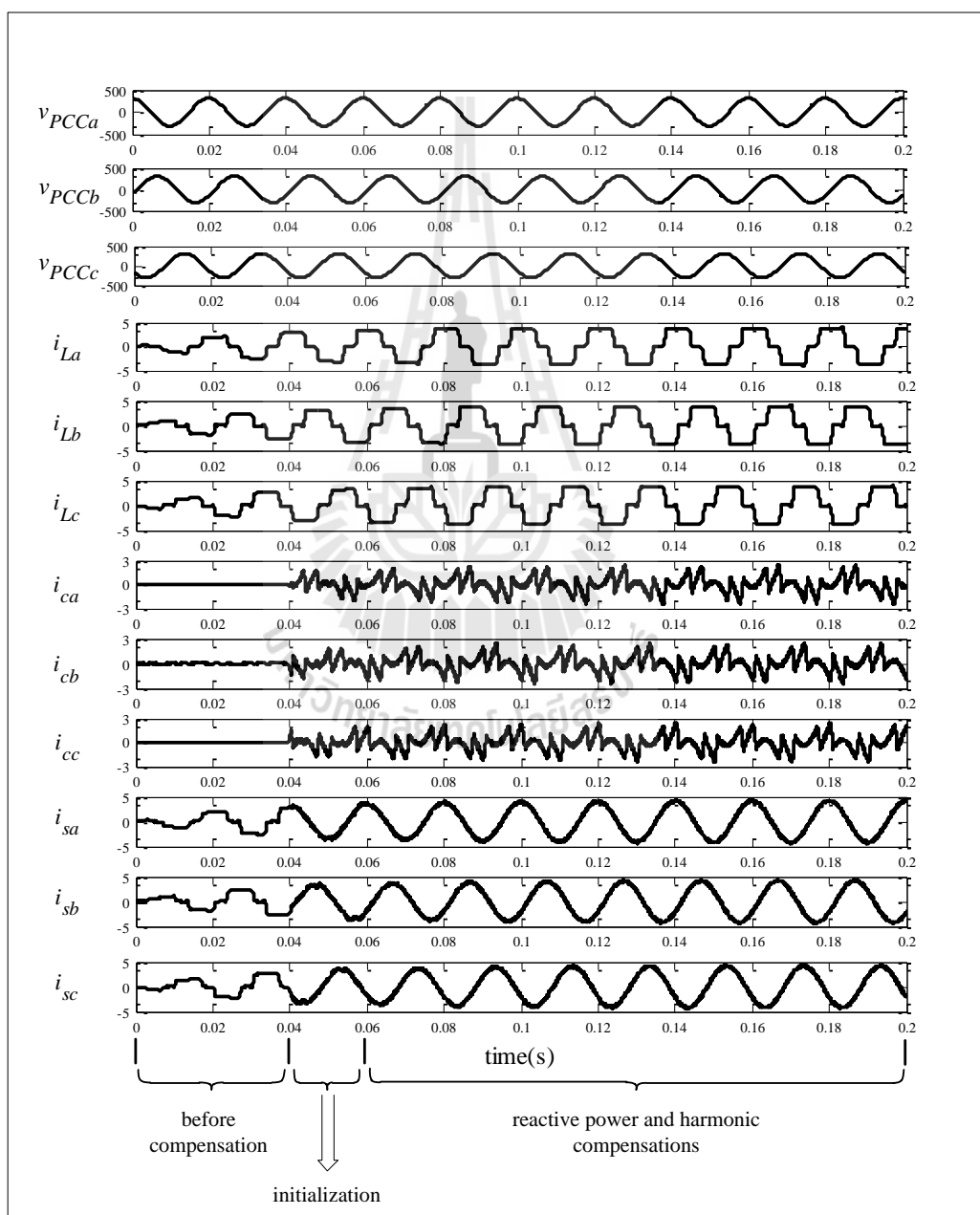
A_c (V)	$\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย	A_c (V)	$\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชย
0.1	1.46	0.45	1.56
0.15	1.50	0.5	1.55
0.2	1.51	0.55	1.59
0.25	1.45	0.6	1.62
0.3	1.40	0.65	1.71
0.35	1.46	0.7	1.92
0.4	1.49	0.75	2.09

5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูปดังกล่าว ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านแหล่งจ่าย (L_s) เท่ากับ 10 ไมโครเฮนรี ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านโหลด (L_L) เท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่ ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกเท่ากับ 39 มิลลิเฮนรี เพื่อลดผลกระทบจากการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ดังนั้นการจำลองสถานการณ์ในบทนี้จึงยังไม่มีตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง จึงใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแทนการใช้ตัวเก็บประจุทำให้แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) มีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ซึ่งตามที่ได้ออกแบบไว้เท่ากับ 750 โวลต์ ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.3 โวลต์ ผลการจำลองสถานการณ์ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกเฉลี่ย และค่าตัวประกอบกำลังก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 5.5 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.6 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีกราดำจัดฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ก่อนการชดเชย จึงมีลักษณะเหมือนกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) และช่วงเวลา 0.04 ถึง 0.06 วินาทีเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นในการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณด้วยวิธี SWFA ซึ่งจะคำนวณเสร็จสิ้นเมื่อเริ่มคาบถัดไป ทำให้หลังจากเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง จึงส่งผลให้รูป

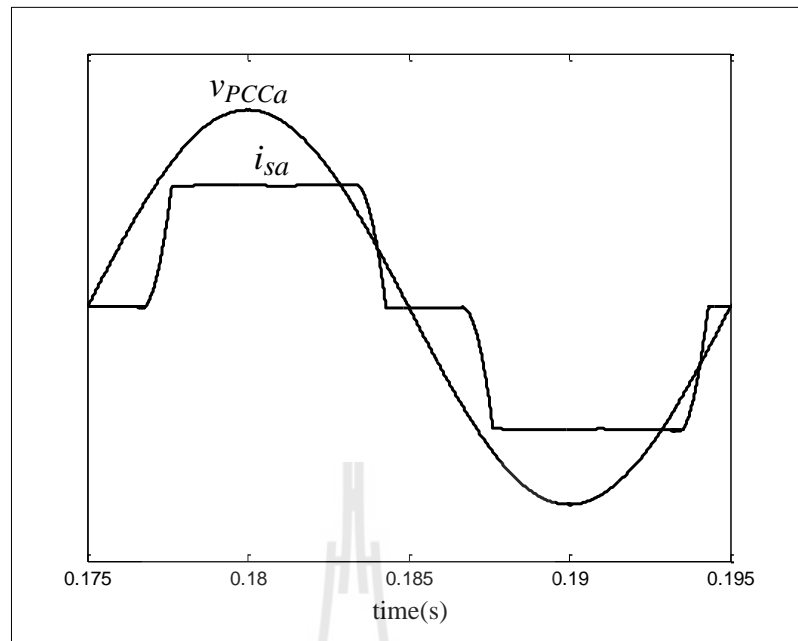
ตารางที่ 5.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf	$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf
24.91	0.98	0.97	0.95	1.40	1	1	1

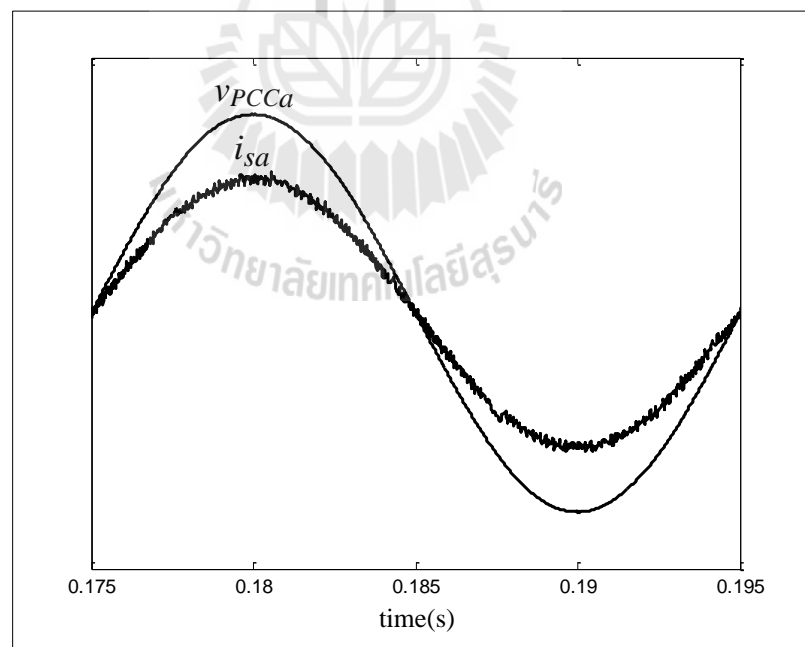


รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟส

สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.7 (ก) จากรูปดังกล่าว ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟซึ่งไม่มีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 24.91% และค่าตัวประกอบกำลังความถี่ (pf_{dist}) เท่ากับ 0.97 อีกทั้งยังเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a โดยมีค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (pf_{disp}) เท่ากับ 0.98 ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลัง (pf) เท่ากับ 0.95 การเปรียบเทียบระหว่างรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.7 (ข) จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนเล็กน้อย โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 1.40% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1 รูปสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบในเฟส a แกนดี และแกนควแสดงดังรูปที่ 5.8 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตเห็นได้ว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟที่มีการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว ทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบมีลักษณะเป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ทั้งเฟส a แกนดี และแกนคว ซึ่งบ่งบอกถึงสมรรถนะที่ดีของการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว

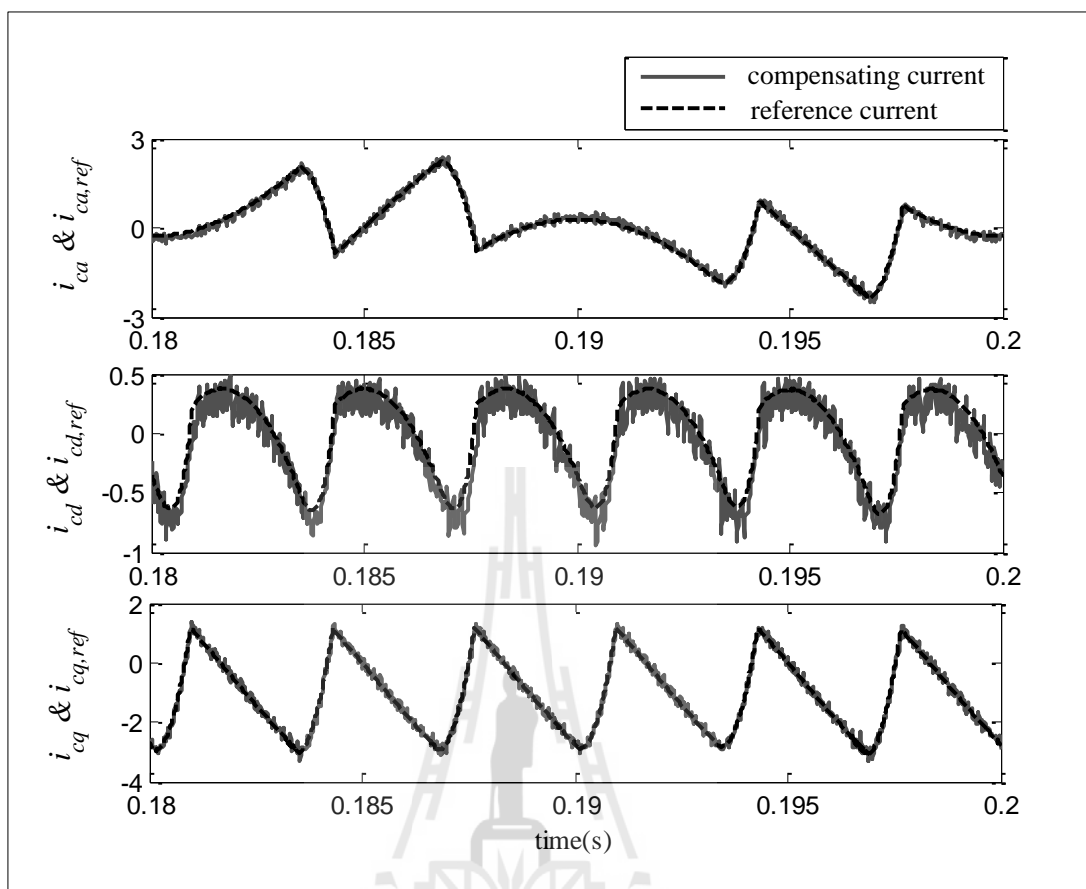


(ก) ก่อนการชดเชย



(ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a



รูปที่ 5.8 รูปสัญญาณระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสชดเชยในเฟส a แกนดี และแกนคิว

5.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีการควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF โดยเนื้อหาในหัวข้อที่ 5.3 ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งให้ผลการออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงเท่ากับ 750 โวลต์ และค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ 39 มิลลิเฮนรี เนื้อหาในหัวข้อที่ 5.4 ได้นำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมกระแสแบบทำนายซึ่งมีจุดเด่นในการลดความคลาดเคลื่อนจากการประวิงเวลาของการควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งส่งผลให้กระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เนื้อหาในหัวข้อที่ 5.5 ได้นำเสนอขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวร่วมกับเทคนิคการสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม และเนื้อหาในหัวข้อที่ 5.6 ได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์

ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว ซึ่งจากการออกแบบได้เลือกใช้สมการของลากรานจ์อันดับหนึ่ง ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.3 โวลต์ ซึ่งภายหลังการฉีดกระแสชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง พบว่าฮาร์มอนิกมีค่าลดลงอย่างมาก โดยค่า $\%THD_{i,av}$ ลดลงจาก 24.91% เหลือเพียง 1.40% และอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีค่าเป็น 1 ด้วยเช่นกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบการกำจัดฮาร์มอนิกและการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวทำให้วงจรรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี ในบทความต่อไปจะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบไว้ในบทนี้ไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ในระบบการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



บทที่ 6

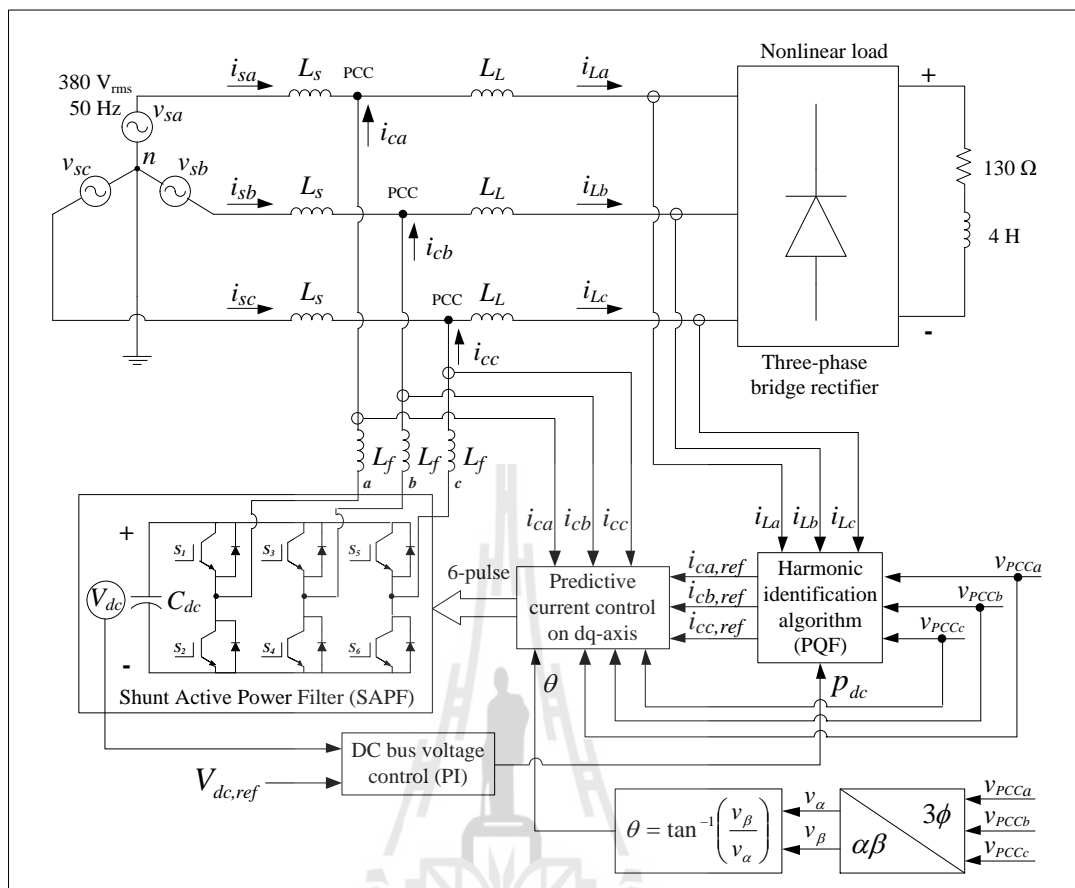
การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ

6.1 บทนำ

การกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องมีการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_{dc}) เพื่อให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าเป็นไปตามค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ($V_{dc,ref}$) ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 6.4 หากไม่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง จะทำให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีค่าไม่ตรงตามค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยตรง ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ

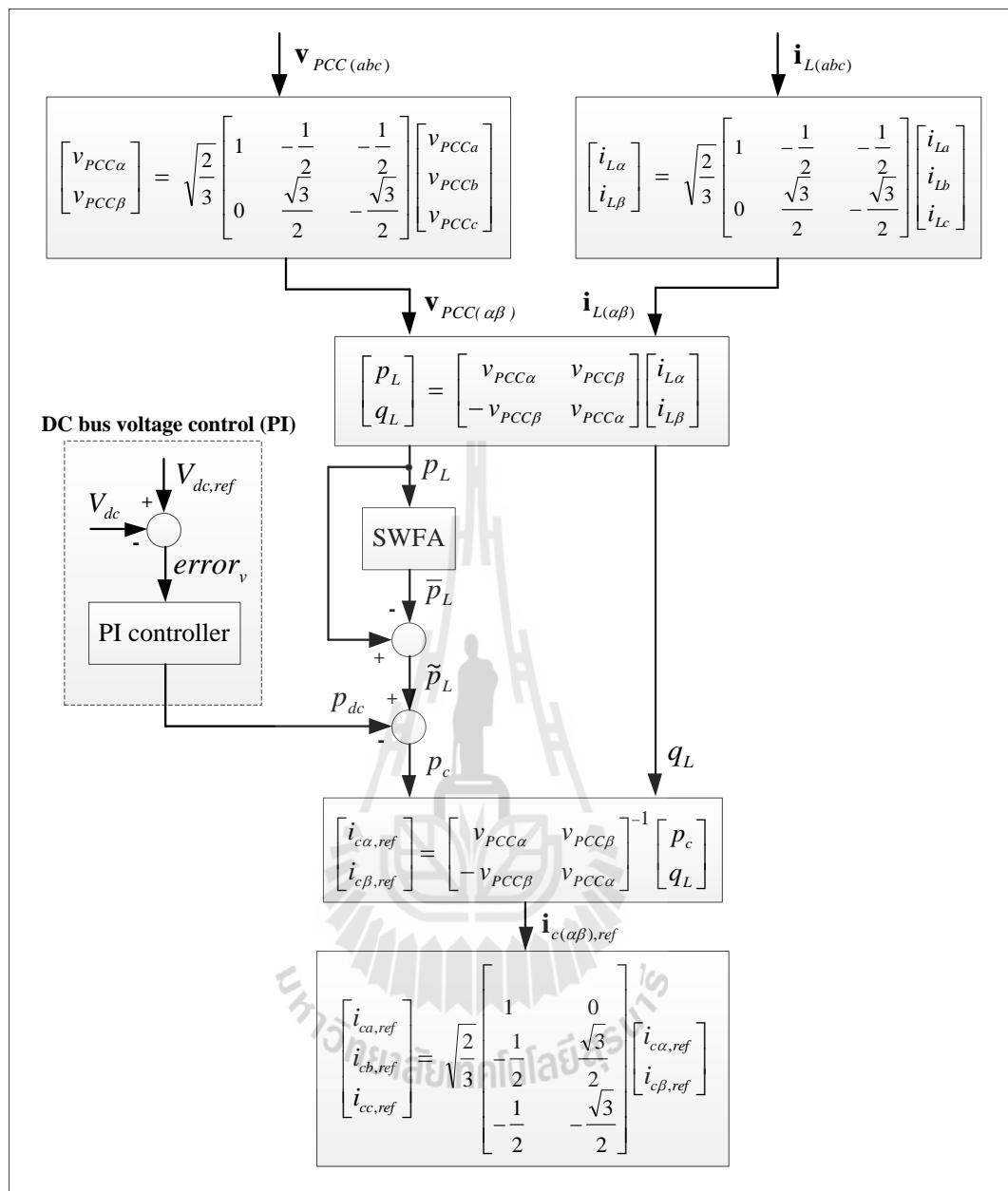
6.2 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการเชื่อมโยงกับวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบด้วยวิธีฟูริเยร์

โครงสร้างระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าว ประกอบไปด้วยบล็อกต่าง ๆ ซึ่งมีหน้าที่การทำงานตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.2 โดยเพิ่มการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีโอพิจารณาได้ดังบล็อก DC bus voltage control (PI) ซึ่งมีการทำงานเชื่อมโยงกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ในบล็อก Harmonic identification algorithm (PQF) และทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองให้มีค่าเป็นไปตามค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีจุดการทำงานที่เหมาะสม เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยทางด้านดีซี มีการต่อตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ซึ่งจะทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานเพื่อใช้สำหรับการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบทางด้านเอซี



รูปที่ 6.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการเชื่อมโยงกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF โดยมีการนำเอาต์พุตของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเข้าไปแทรกในขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงของวิธี PQF แสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปดังกล่าว บล็อก DC bus voltage control (PI) มีอินพุต 2 ค่า ได้แก่ V_{dc} คือ แรงดันบัสไฟตรง และ $V_{dc,ref}$ คือ แรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง และเอาต์พุต คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (p_{dc}) เมื่อพิจารณาภายในบล็อก DC bus voltage control (PI) การนำค่า V_{dc} หักลบออกจากค่า $V_{dc,ref}$ จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ($error_v$) เมื่อใช้ค่า $error_v$ เป็นอินพุตของบล็อก PI controller ที่เป็นตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้เอาต์พุต คือ ค่า p_{dc} เมื่อพิจารณาการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเชื่อมโยงกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF จะนำค่า p_{dc} ไปหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสสลับ (\tilde{p}_L) ซึ่งให้ผลต่าง คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง (p_c) สำหรับการชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก และควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 6.2 แผนภาพการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

6.3 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

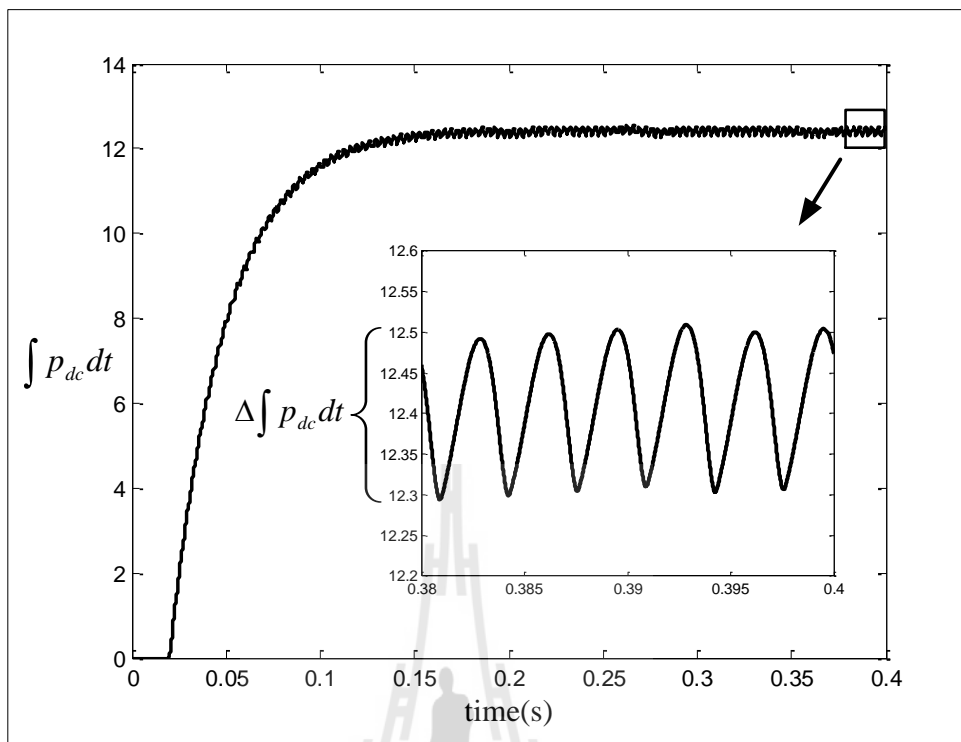
การออกแบบค่าตัวเก็บประจุสำหรับเป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันบัสไฟตรงให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะพิจารณาออกแบบโดยคำนึงถึง 2 ประเด็นสำคัญ คือ ประเด็นแรกการออกแบบค่า C_{dc} โดยคำนึงถึงค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งจะต้องมีพลังงานเพียงพอสำหรับการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัว

ประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และประเด็นที่สองการออกแบบค่า C_{dc} โดยคำนึงถึงค่าแรงดันกระเพื่อม (ΔV_{dc}) ซึ่งจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันบัสไฟตรง การออกแบบโดยคำนึงถึงค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุ โดยใช้วิธีการของพลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ได้นำเสนอขึ้นในปี พ.ศ. 2554 (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2554) เริ่มแรกจะพิจารณาค่ากำลังงาน $p_{dc}(t)$ ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ตัวเก็บประจุเทียบกับเวลา ($\frac{dE_{dc}}{dt}$) ดังสมการที่ (6-1) จากสมการดังกล่าว เมื่อทำการอินทิเกรต $p_{dc}(t)$ เพื่อพิจารณาให้อยู่ในรูปแบบของพลังงานที่ตัวเก็บประจุ (E_{dc}) จะได้ดังสมการที่ (6-2) ทำการจัดรูปแบบสมการจะได้ขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุ ($C_{dc,min}$) ดังสมการที่ (6-3) โดยที่ ค่า $\int p_{dc} dt$ คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ตัวเก็บประจุในสถานะคงตัวแสดงดังรูปที่ 6.3 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่าที่สถานะคงตัว $\int p_{dc} dt$ มีค่าเท่ากับ 12.4 วัตต์ และใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงเท่ากับ 750 โวลต์ ซึ่งให้ผลลัพธ์การออกแบบโดยมีขอบเขตค่า $C_{dc,min}$ เท่ากับ 44.09 ไมโครฟารัด การออกแบบโดยคำนึงถึงค่าแรงดันกระเพื่อม โดยใช้วิธีการของ Thierry Thomas ได้นำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1998 (Thomas, 1998) ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบคือ ค่า $C_{dc,min}$ คำนวณได้ดังสมการที่ (6-4) จากสมการดังกล่าว ค่าแรงดันกระเพื่อมจะกำหนดให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้ ΔV_{dc} มีค่าไม่เกิน 3 V หรือไม่เกิน 0.4 เปอร์เซ็นต์ และค่าผลต่างของพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ($\Delta \int p_{dc} dt$) พิจารณาได้ดังรูปที่ 6.3 จากรูปดังกล่าว $\Delta \int p_{dc} dt$ มีค่าเท่ากับ 0.2 วัตต์ จึงให้ผลลัพธ์การออกแบบขอบเขตค่า $C_{dc,min}$ เท่ากับ 88.89 ไมโครฟารัด จากการออกแบบทั้ง 2 วิธีพบว่าค่า C_{dc} ควรมีค่ามากกว่า 88.89 ไมโครฟารัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุของวงจรกรองให้มีค่าเท่ากับ 250 ไมโครฟารัด เนื่องจากเป็นไปตามขอบเขตของการออกแบบด้านพลังงาน และแรงดันกระเพื่อม อีกทั้งยังคำนึงถึงระยะเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวของค่า V_{dc} ที่รวดเร็ว และแรงดันกระเพื่อมที่ต่ำ

$$p_{dc} = V_{dc} i_{dc} = \frac{dE_{dc}}{dt} \quad (6-1)$$

$$E_{dc} = \int p_{dc} dt = \int (V_{dc} \cdot C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt}) dt = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \quad (6-2)$$

$$C_{dc,min} = \frac{2 \cdot \int p_{dc} dt}{V_{dc}^2} = \frac{2(12.4)}{750^2} = 44.09 \mu F \quad (6-3)$$



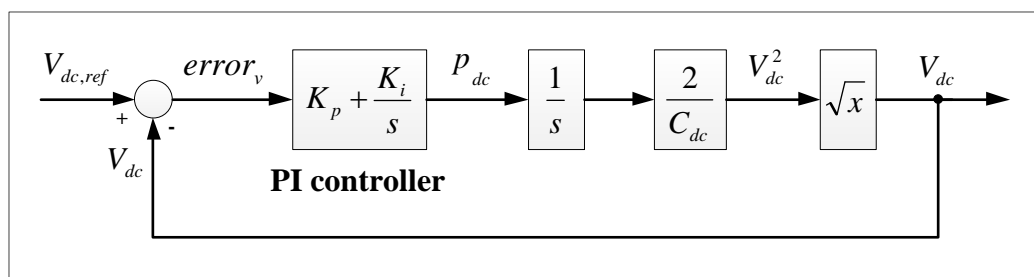
รูปที่ 6.3 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ตัวเก็บประจุ

$$C_{dc,min} = \frac{\Delta \int p_{dc} dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc,ref}} = \frac{0.2}{3 \times 750} = 88.89 \mu F \quad (6-4)$$

6.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (ทศพร ฅรงศ์ฤทธิ, 2552)

วงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสร้างขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีที 6 ตัว โดยมีตัวเก็บประจุของวงจรกรองเป็นตัวสะสมพลังงาน ซึ่งค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6-2) และเมื่อทำการจัดรูปสมการสำหรับการคำนวณค่าแรงดันบัสไฟตรงจะได้ดังสมการที่ (6-5) จากสมการดังกล่าว นำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งสังเกตได้ว่าภายในบล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงมีส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ บล็อกการหาค่ารากที่สองของค่า x ใด ๆ ดังนั้นในการแปลงสมการไม่เชิงเส้นที่ใช้อธิบายระบบให้เป็นสมการเชิงเส้น เพื่อนำไปสู่การหาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function : $T(s)$) ได้อย่างเหมาะสม จึงใช้เทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ด้วยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} \int p_{dc} dt} \quad (6-5)$$



รูปที่ 6.4 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

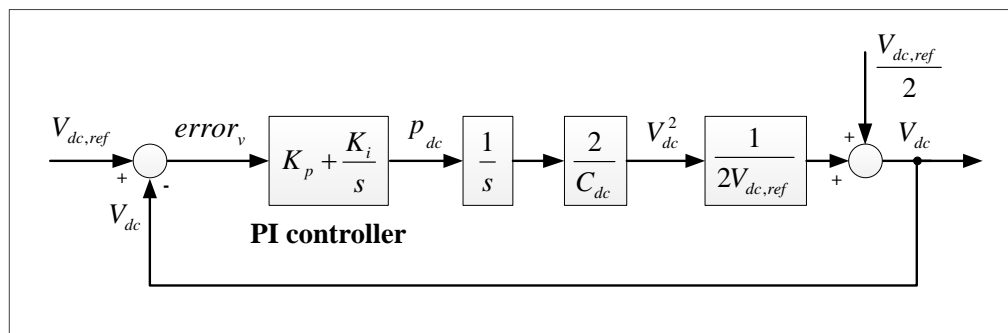
(Taylor series) เข้าไปแทนฟังก์ชัน ไม่เชิงเส้นที่พบในสมการดั้งเดิม ซึ่งการกระจายจะพิจารณารอบจุดปฏิบัติการของระบบ (x_0) พิจารณาได้ดังสมการที่ (6-6) จากสมการดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลในเทอมอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (6-7) ทำการจัดรูปสมการจะได้ดังสมการที่ (6-8) เมื่อแทนค่า $x = V_{dc}^2$ และค่า $\sqrt{x_0} = V_{dc,ref}$ ลงในสมการที่ (6-8) ทำให้สามารถหาค่ารากที่สองของ V_{dc}^2 ได้ดังสมการที่ (6-9) จากการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการ (6-9) ทำให้สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟใหม่ได้ดังรูปที่ 6.5 จากบล็อกไดอะแกรมในรูปดังกล่าวสามารถพิจารณาหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแสดงดังสมการที่

$$\sqrt{x} \approx \sqrt{x_0} + \left. \frac{d\sqrt{x}}{dx} \right|_{x=x_0} \cdot (x - x_0) \quad (6-6)$$

$$\sqrt{x} \approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} (x - x_0) \quad (6-7)$$

$$\sqrt{x} \approx \frac{\sqrt{x_0}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} x \quad (6-8)$$

$$\sqrt{V_{dc}^2} \approx \frac{V_{dc,ref}}{2} + \frac{1}{2V_{dc,ref}} V_{dc}^2 \quad (6-9)$$



รูปที่ 6.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่มีการประมาณค่ารากที่สองของ V_{dc}^2

(6-10) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมแบบพีไอ จะใช้วิธีการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะ (characteristic polynomial) ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในสมการที่ (6-10) และพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานในสมการที่ (6-11) โดยการเปรียบเทียบพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองแสดงได้ดังสมการที่ (6-12) เมื่อทำการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ในสมการดังกล่าว พร้อมทั้ง

$$T(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc,ref}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{s^2 + 2AK_p s + 2AK_i}{s^2 + AK_p s + AK_i} \quad (6-10)$$

โดยที่ $A = \frac{1}{C_{dc} V_{dc,ref}}$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6-11)$$

$$s^2 + AK_p s + AK_i = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (6-12)$$

ทำการจัดรูปสมการจะได้สมการสำหรับคำนวณค่า K_p ดังสมการที่ (6-13) และสมการสำหรับคำนวณค่า K_i ดังสมการที่ (6-14) ซึ่ง T_{set} คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 วินาที เนื่องจากหากกำหนดให้ช่วงเวลาเข้าที่มีค่าน้อยลงจะส่งผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นด้วย และ ζ คือ ค่าอัตราส่วนการเข้าสู่สถานะคงตัว (damping ratio) โดยกำหนดให้มีค่า

เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เพื่อให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (underdamped response) การออกแบบค่า K_p และ K_i จะใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงเท่ากับ 896.4 โวลต์ และค่าตัวเก็บประจุของวงจรรองเท่ากับ 250 ไมโครฟารัด ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.3 เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณค่า K_p และ K_i ในสมการที่ (6-13) และสมการที่ (6-14) ทำให้ได้ผลการออกแบบค่า K_p เท่ากับ 3 และค่า K_i เท่ากับ 24

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n}{A} \quad (6-13)$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2}{A} \quad (6-14)$$

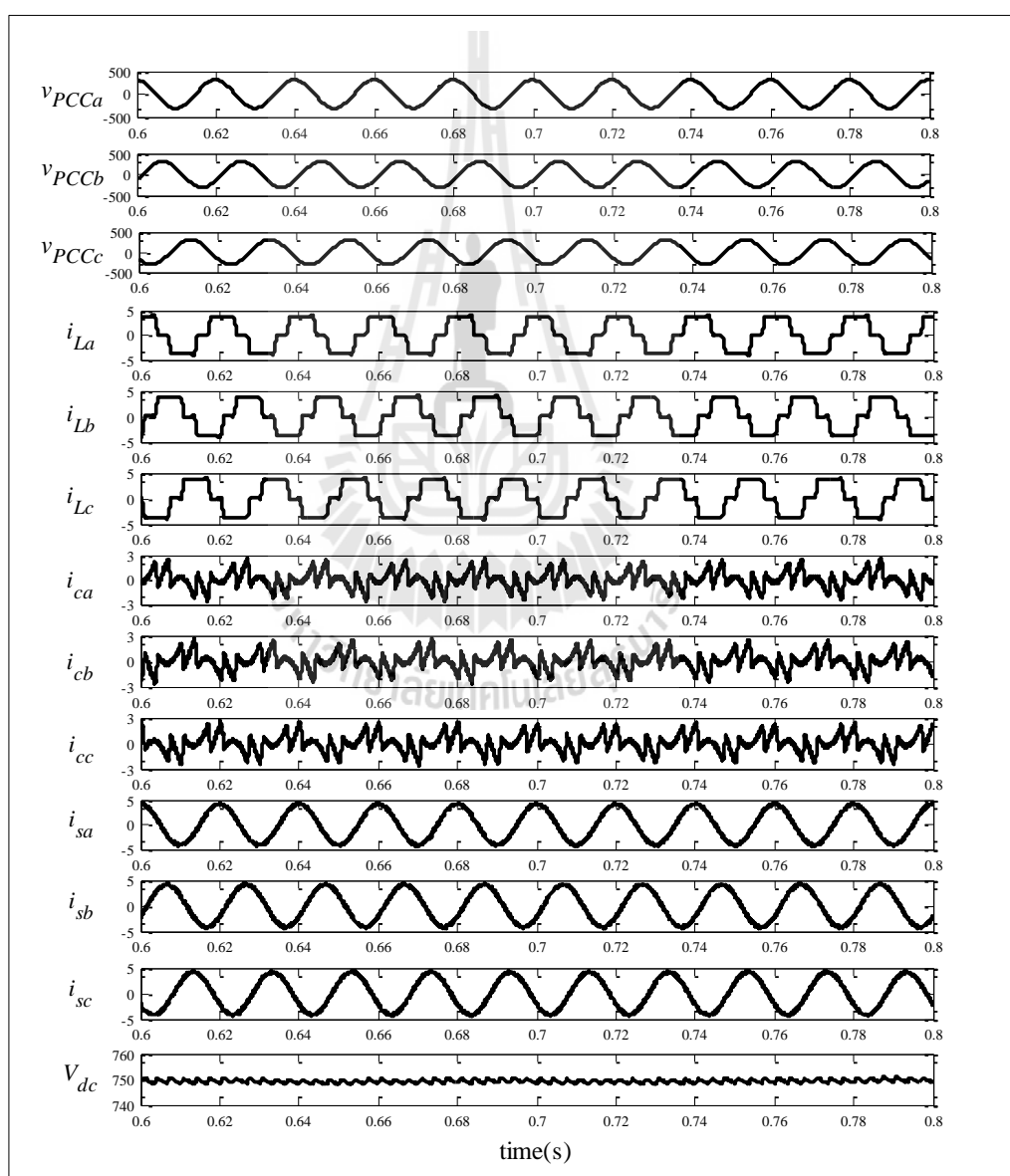
โดยที่ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) มีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_{set}\zeta}$ เมื่อพิจารณาให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าเท่ากับ $\pm 2\%$

6.5 ผลการจำลองสถานการณ์ และการอภิปรายผล

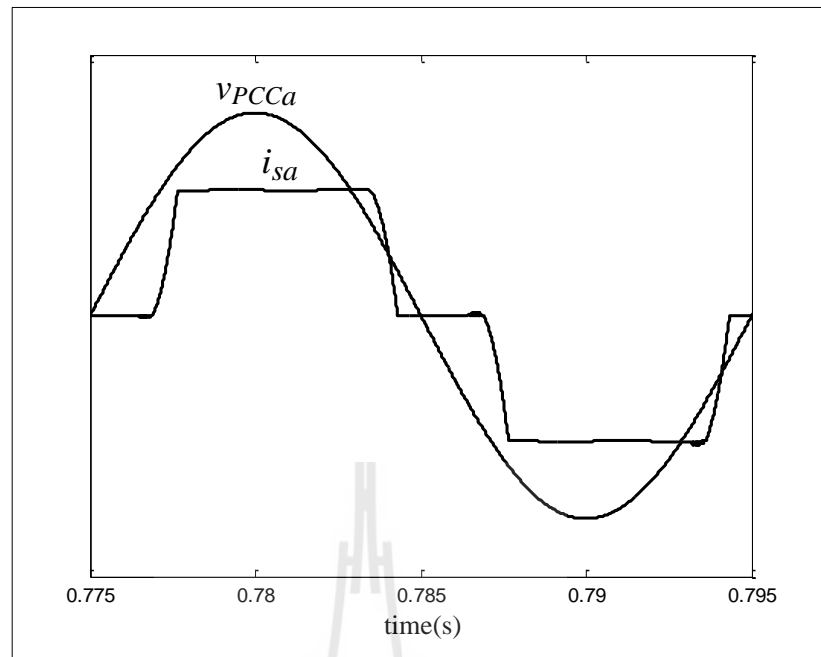
การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดยใช้ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 6.1 โดยระบบดังกล่าวมีองค์ประกอบ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบเช่นเดียวกับระบบการกำจัดฮาร์มอนิกที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.7 แต่จะใช้ตัวเก็บประจุที่มีการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงแทนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการจ่ายแรงดันบัสไฟตรงให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยตัวเก็บประจุของวงจรรองตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.3 มีค่าเท่ากับ 250 ไมโครฟารัด และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.4 คือ ค่า K_p เท่ากับ 3 ค่า K_i เท่ากับ 24 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกเฉลี่ย และค่าตัวประกอบกำลังก่อนการชดเชย และหลังการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 6.1 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดังรูปที่ 6.6 จากรูปดังกล่าว หลังจากเวลา 0.6 วินาทีเป็นต้นไปมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ จึงส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชย โดยการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะการทำงานที่ดีส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าเป็นไปตามแรงดันบัส

ตารางที่ 6.1 ผลการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

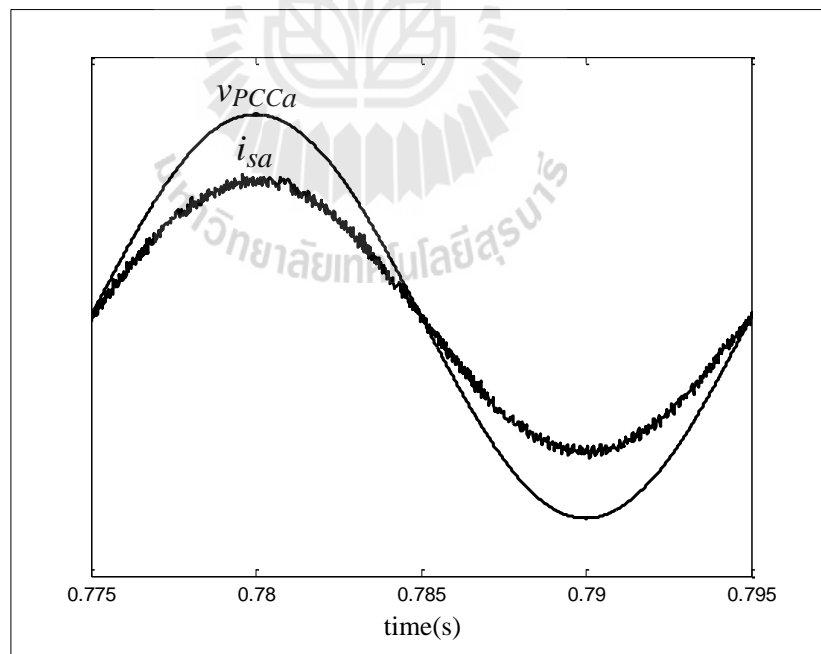
ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf	$\%THD_{i,av}$	pf_{disp}	pf_{dist}	pf
24.91	0.98	0.97	0.95	1.32	1	1	1



รูปที่ 6.6 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟส



(ก) ก่อนการชดเชย

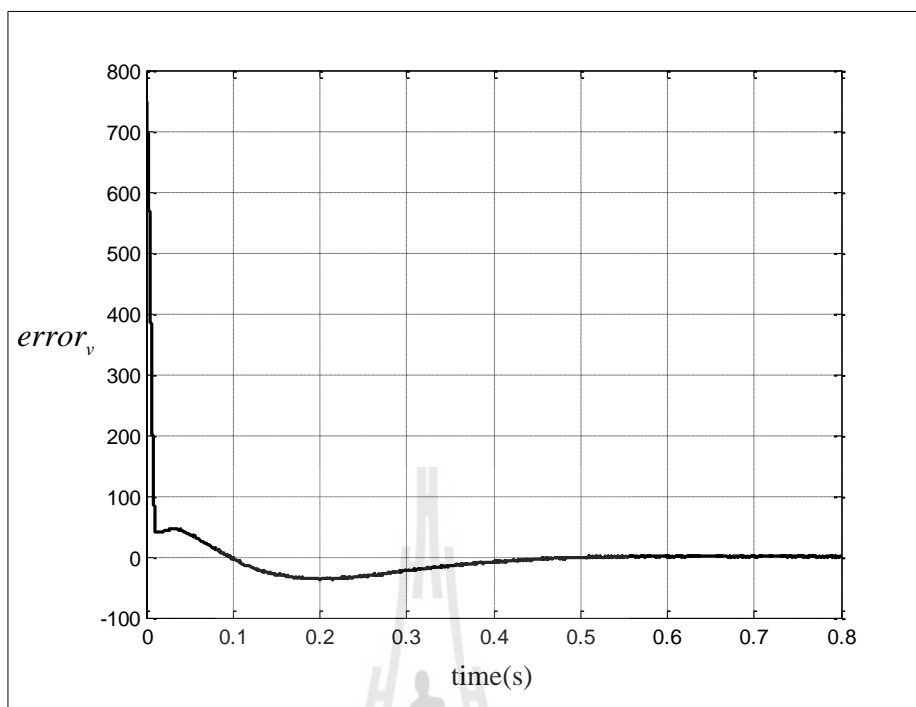


(ข) หลังการชดเชย

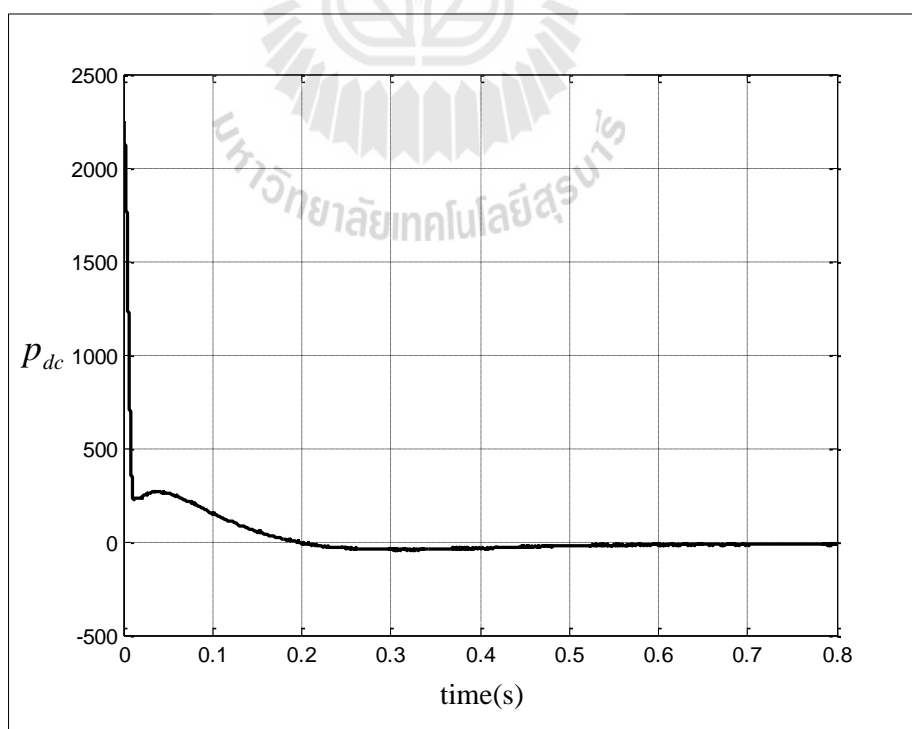
รูปที่ 6.7 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a

ไฟตรงอ้างอิงที่ค่า 750 โวลต์ โดยเกิดแรงดันกระเพื่อมประมาณ 0.6 โวลต์ การเปรียบเทียบรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 6.7 (ก) จากรูปดังกล่าว ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งไม่มีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุ้ค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 24.91% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 0.97 อีกทั้งยังคงเกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 0.98 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 0.95 การเปรียบเทียบรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 6.7 (ข) จากรูปดังกล่าว หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุ้ค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยแต่ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนเล็กน้อย โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 1.32% และค่า pf_{dist} เท่ากับ 1 และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเฟส a ดังนั้นสัญญาณทั้งสองจึงมีเฟสตรงกัน โดยมีค่า pf_{disp} เท่ากับ 1 ส่งผลให้ค่า pf เท่ากับ 1

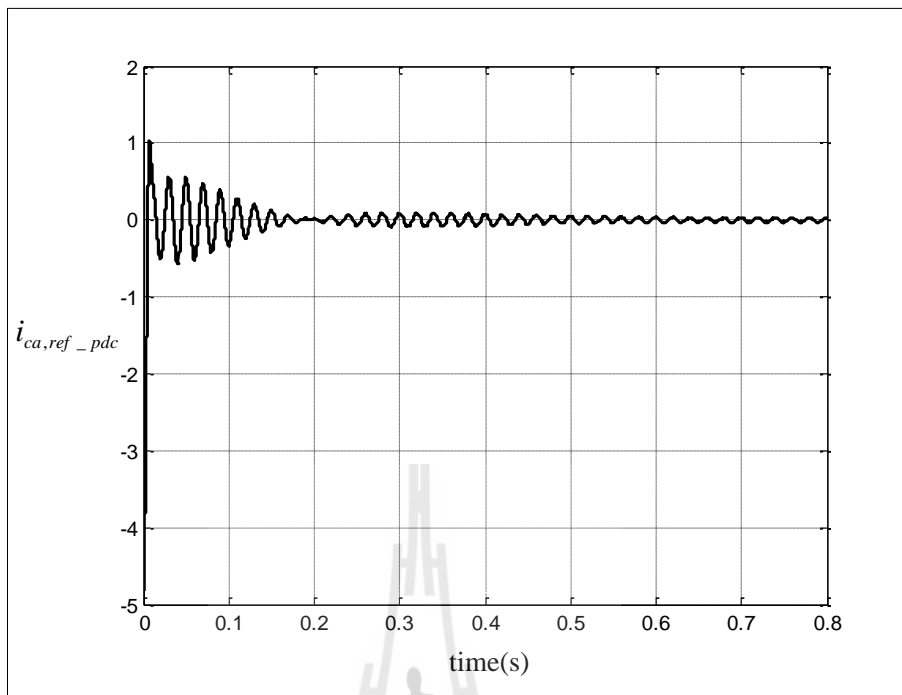
เมื่อพิจารณาการทำงานของ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 6.8 จากรูปดังกล่าว เนื่องจาก $error_v$ เป็นค่าผลต่างที่ได้จากการนำค่า V_{dc} หักลบออกจากค่า $V_{dc,ref}$ ดังนั้น $error_v$ จะมีค่าเป็นบวกเมื่อ V_{dc} มีค่าน้อยกว่า $V_{dc,ref}$ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที และ $error_v$ มีค่าเป็นลบเมื่อ V_{dc} มีค่ามากกว่า $V_{dc,ref}$ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที โดยที่เวลา 0.2 วินาทีเป็นจุดที่มีค่า $error_v$ ต่ำที่สุดเนื่องจากมีค่าแรงดันบัสไฟตรงสูงที่สุดและแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงมีค่าคงที่ โดยที่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไปค่า $error_v$ จะมีค่าประมาณศูนย์ เมื่อใช้ค่า $error_v$ เป็นอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอจะได้เอาต์พุต คือ ค่า p_{dc} รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแสดงดังรูปที่ 6.9 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาที p_{dc} มีค่าเป็นบวกซึ่งเป็นช่วงแรกเริ่มเก็บสะสมพลังงานที่ตัวเก็บประจุ และที่เวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป p_{dc} มีค่าเป็นลบซึ่งเป็นช่วงคายพลังงานที่ตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณาการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเชื่อมโยงกับการระบุนอกลักษณะฮาร์มอนิกวิธี PQF ในรูปที่ 6.2 จะนำค่า p_{dc} ไปหักลบกับ \tilde{p}_L ซึ่งเป็นปริมาณฮาร์มอนิกซึ่งให้ผลต่าง คือ ค่า p_c เมื่อกำหนดค่า \tilde{p}_L และค่า q_L เท่ากับศูนย์ เพื่อพิจารณาเฉพาะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (i_{ca,ref_pdc}) โดยไม่พิจารณาการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุ้ค่าตัวประกอบกำลัง รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง



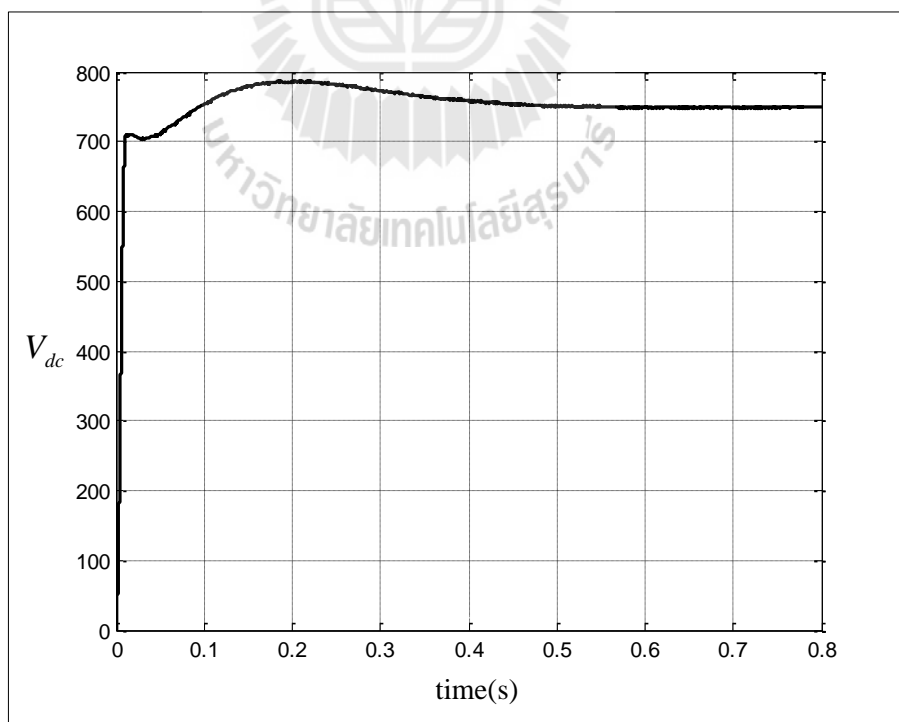
รูปที่ 6.8 รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง



รูปที่ 6.9 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

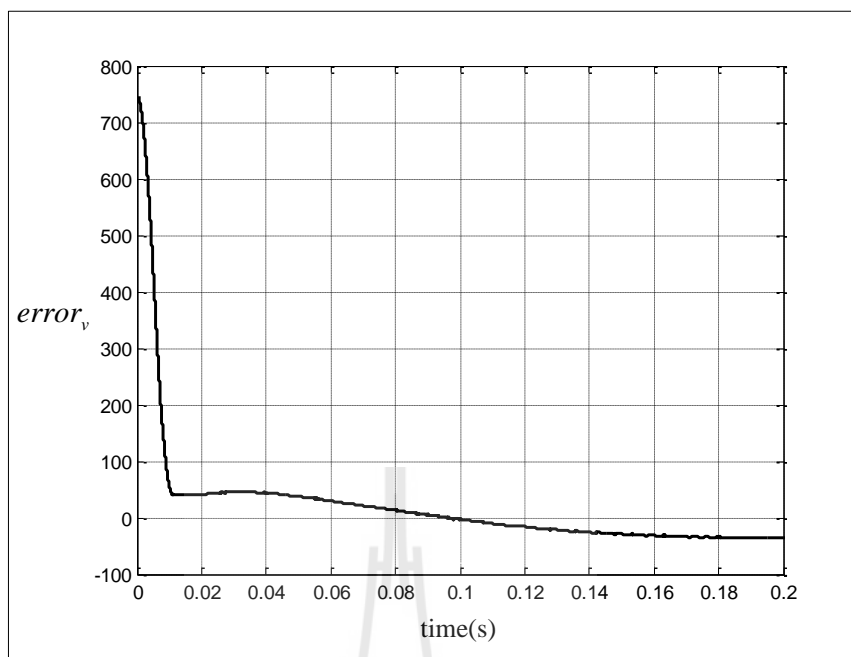


รูปที่ 6.10 รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

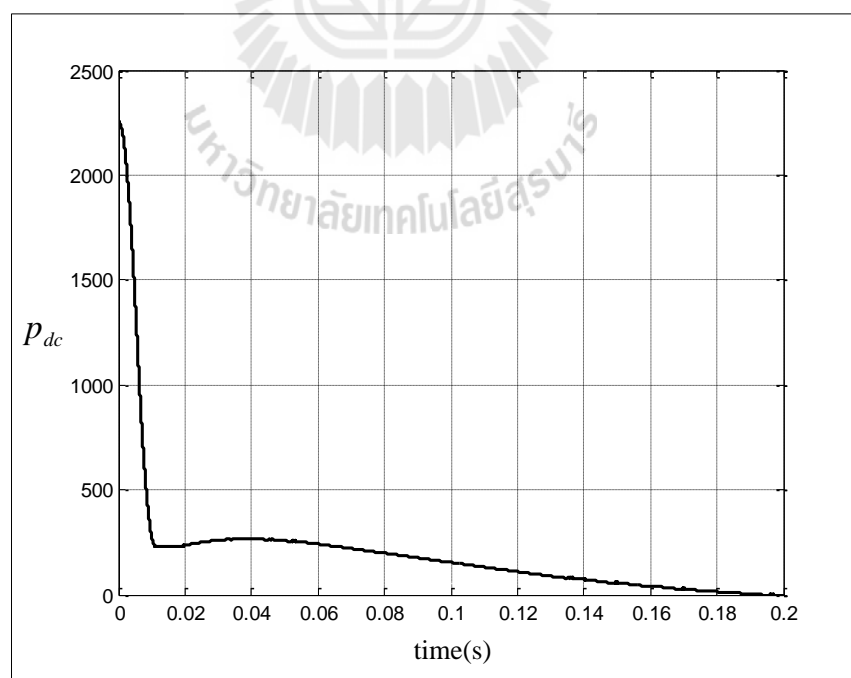


รูปที่ 6.11 รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรง

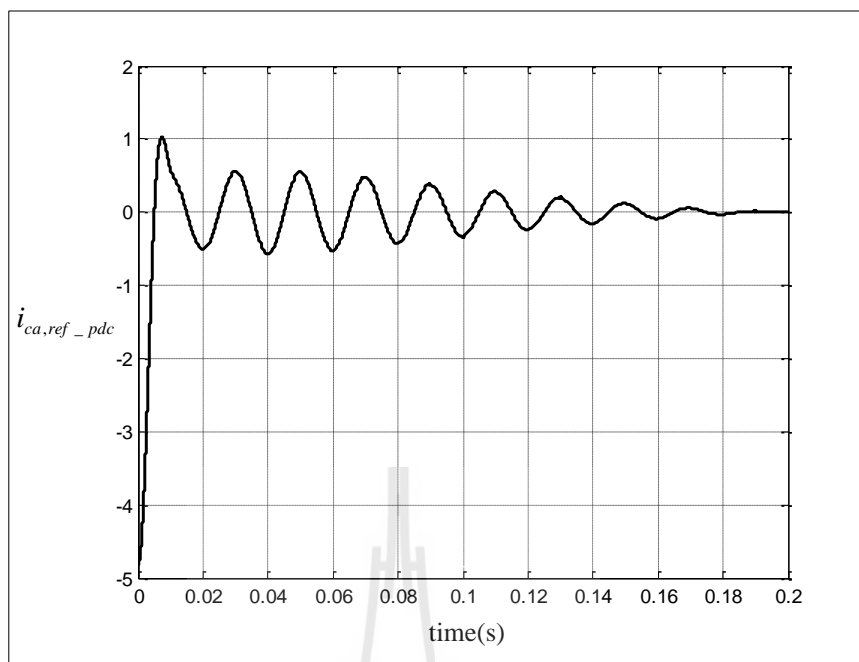
แสดงดังรูปที่ 6.10 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาที รูปสัญญาณ i_{ca,ref_pdc} เป็นกระแสที่ความถี่มูลฐานและมีลักษณะกลับเฟสเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชย และที่เวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป รูปสัญญาณ i_{ca,ref_pdc} เป็นกระแสที่ความถี่มูลฐานและมีเฟสตรงกับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชย รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงแสดงดังรูปที่ 6.11 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาที V_{dc} มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยเกิดการพุ่งเกิน และมีค่า V_{dc} สูงสุดเท่ากับ 787 โวลต์ที่เวลา 0.2 วินาที ช่วงเวลา 0.2 ถึง 0.5 วินาที V_{dc} มีค่าลดลงเรื่อย ๆ และที่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป V_{dc} มีค่าเท่ากับ 750 โวลต์ ซึ่งมีค่าเป็นไปตามค่า $V_{dc,ref}$ และเข้าสู่สภาวะคงตัวตามการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอที่กำหนดเวลาการเข้าที่เท่ากับ 0.5 วินาที โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $error_v$, p_{dc} , i_{ca,ref_pdc} และ V_{dc} จะแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาทีซึ่งเป็นช่วงแรกเริ่มเก็บสะสมพลังงานที่ตัวเก็บประจุ เพื่อเพิ่มค่า V_{dc} และช่วงเวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไปเป็นช่วงคายพลังงานที่ตัวเก็บประจุ เพื่อลด V_{dc} ให้มีค่าเป็นไปตาม $V_{dc,ref}$ รูปสัญญาณ $error_v$, p_{dc} , i_{ca,ref_pdc} และ V_{dc} ในช่วงแรกเริ่มเก็บสะสมพลังงานแสดงดังรูปที่ 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที $error_v$ มีค่าเป็นบวกเนื่องจาก V_{dc} มีค่าน้อยกว่า $V_{dc,ref}$ ดังนั้นจึงมีความต้องการเก็บสะสมพลังงานเพื่อเพิ่มค่า V_{dc} ให้มีค่าเป็นไปตาม $V_{dc,ref}$ โดยการเก็บสะสมพลังงานดังกล่าวตัวควบคุมแบบพีไอจะให้เอาต์พุตคือ p_{dc} ที่มีค่าเป็นบวกทำให้ i_{ca,ref_pdc} ซึ่งเป็นกระแสที่ความถี่มูลฐานจะมีลักษณะกลับเฟสเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชย โดย i_{ca,ref_pdc} ดังกล่าวจะใช้สำหรับดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักส่งผลให้ V_{dc} มีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าที่เวลา 0.1 วินาที $error_v$ จะ มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจาก V_{dc} มีค่าเป็นไปตามค่า $V_{dc,ref}$ แล้วก็ตาม แต่ช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.2 วินาที p_{dc} ยังคงมีค่าเป็นบวกทำให้ i_{ca,ref_pdc} มีลักษณะเช่นเดียวกับช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที และมีการสะสมพลังงานเพื่อเพิ่มค่า V_{dc} ต่อไปเนื่องจากลักษณะของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ออกแบบโดยกำหนดให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตทำให้เกิดการพุ่งเกินของแรงดันบัสไฟตรง จากค่า V_{dc} ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า V_{dc} มีค่ามากกว่า $V_{dc,ref}$ และส่งผลให้ค่า $error_v$ มีค่าติดลบ รูปสัญญาณ $error_v$, p_{dc} , i_{ca,ref_pdc} และ V_{dc} ในช่วงคายพลังงานแสดงดังรูปที่ 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ที่เวลา 0.2 วินาที $error_v$ มีค่าเป็นลบเนื่องจาก V_{dc} มีค่ามากกว่า $V_{dc,ref}$ ดังนั้นจึงมีความต้องการคายพลังงานเพื่อลดค่า V_{dc} ให้มีค่าเป็นไปตาม $V_{dc,ref}$ โดยการคายพลังงานดังกล่าวเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป ตัวควบคุมแบบพีไอจะให้เอาต์พุตคือ p_{dc} ที่มีค่าเป็นลบทำให้ i_{ca,ref_pdc} ซึ่งเป็นกระแสที่ความถี่มูลฐานจะมีเฟสตรงกับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในเฟส a หลังการชดเชย โดย i_{ca,ref_pdc} ดังกล่าวจะใช้สำหรับคายพลังงานที่ตัวเก็บประจุส่งผลให้ V_{dc} มีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $V_{dc,ref}$ และส่งผลให้ค่า $error_v$ มีค่าเป็นศูนย์



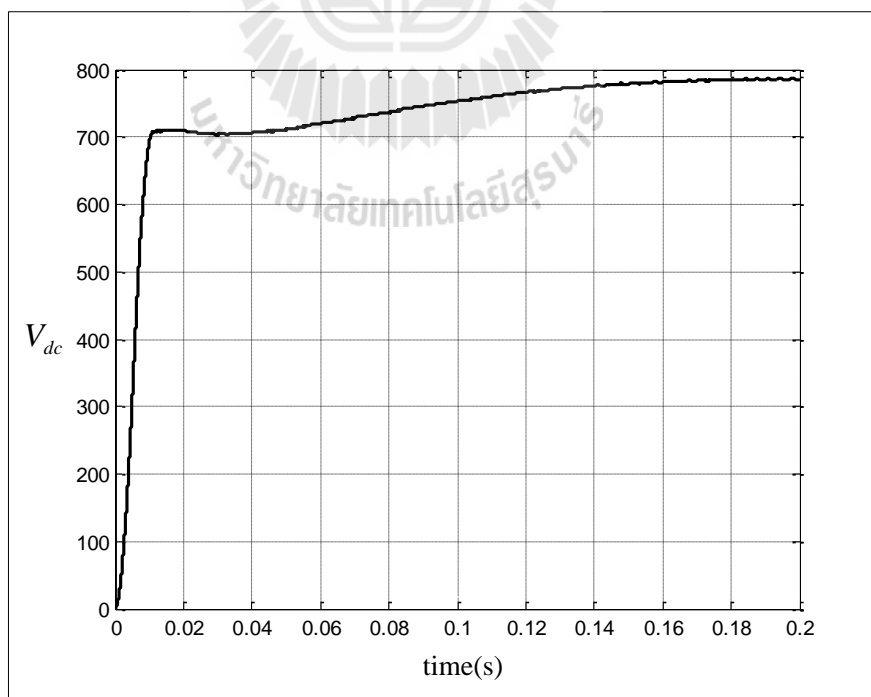
รูปที่ 6.12 รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน



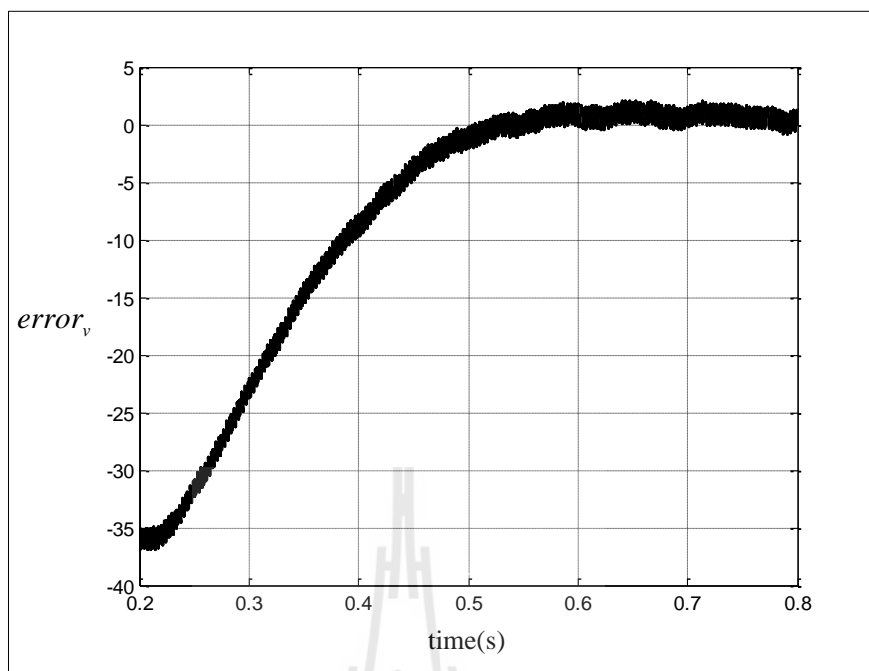
รูปที่ 6.13 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน



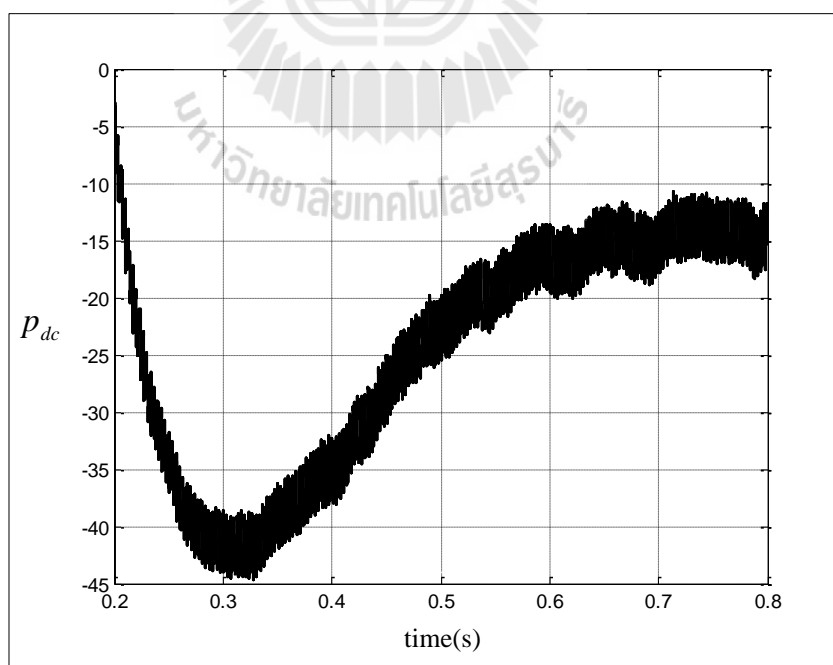
รูปที่ 6.14 รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่ม
สะสมพลังงาน



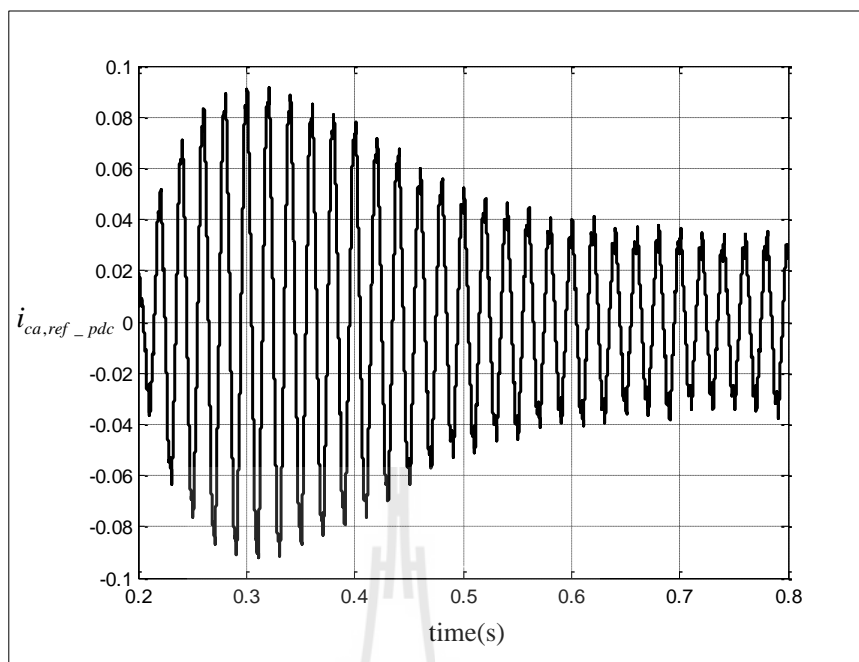
รูปที่ 6.15 รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงในช่วงแรกเริ่มสะสมพลังงาน



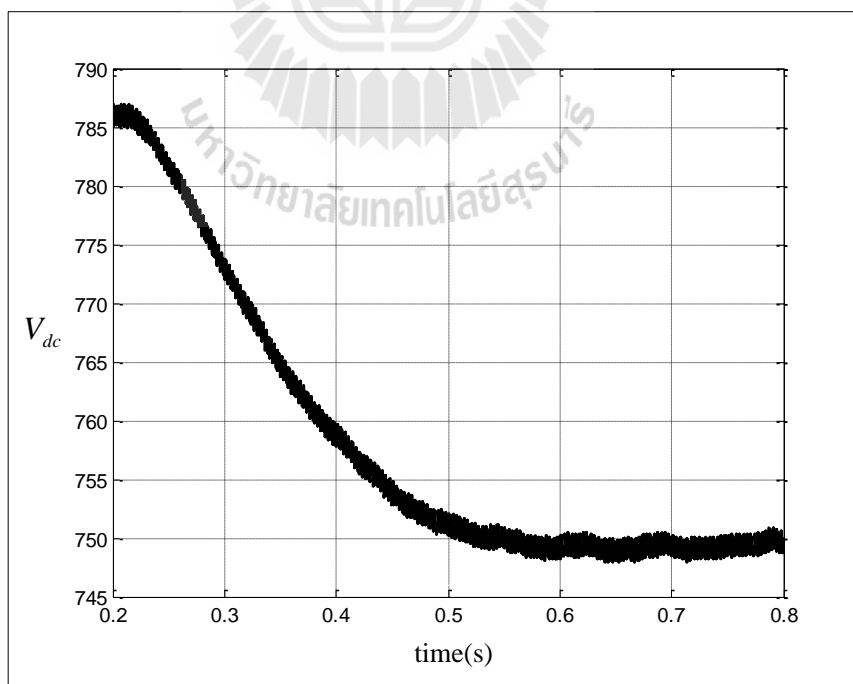
รูปที่ 6.16 รูปสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันบัลไฟตรงกับแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ในช่วงกายพลังงาน



รูปที่ 6.17 รูปสัญญาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกระแสตรงสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงในช่วงกายพลังงาน

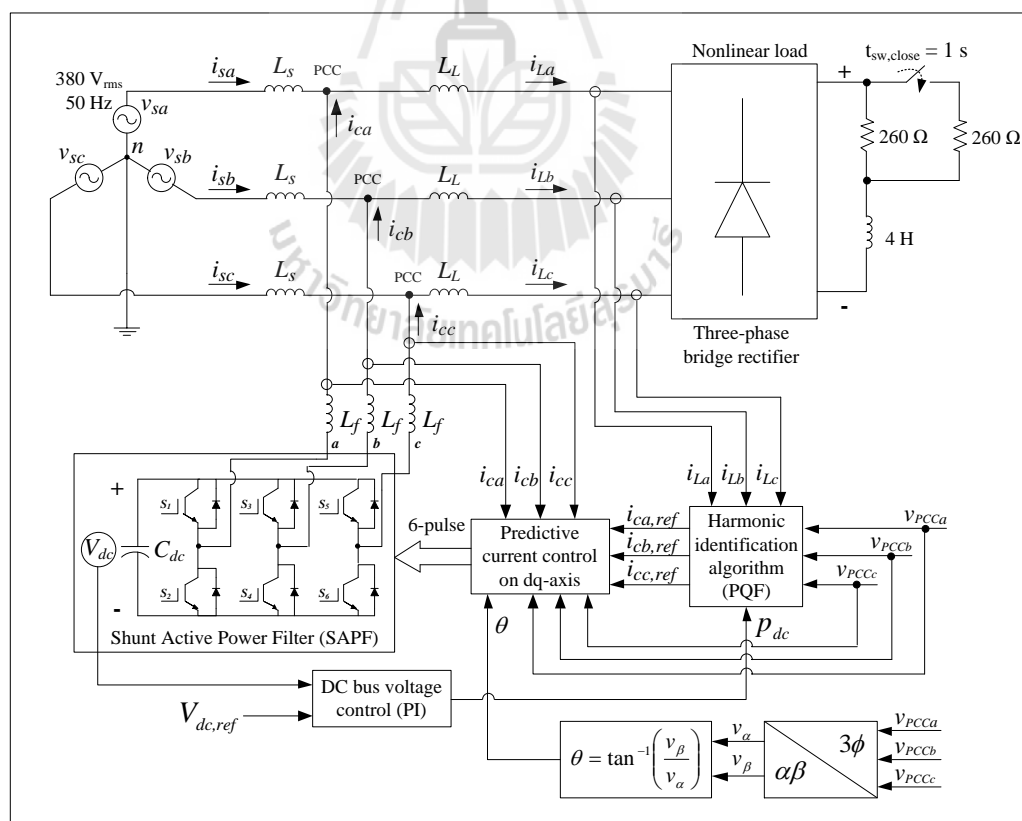


รูปที่ 6.18 รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงในเฟส a สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วง
คายพลังงาน

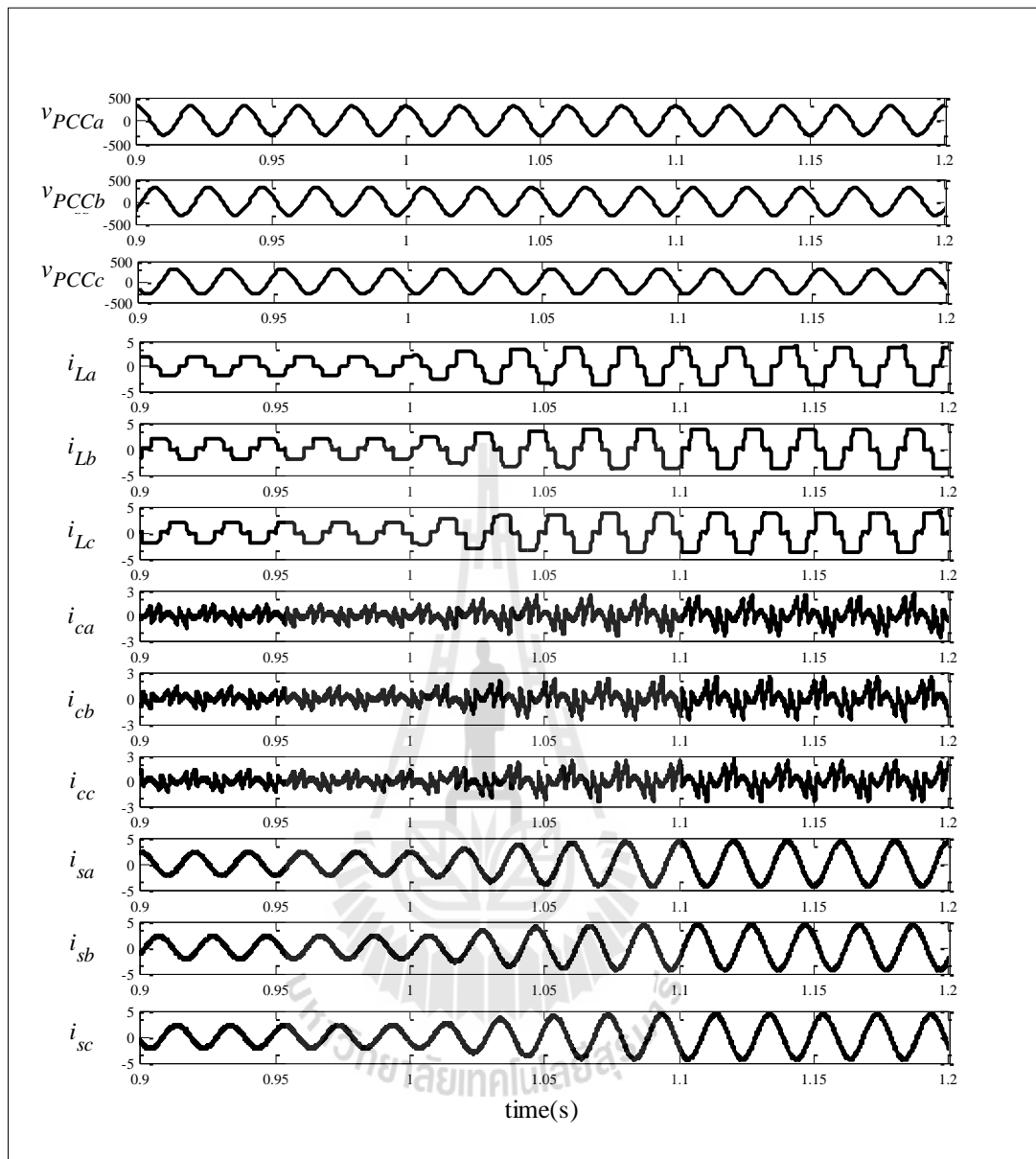


รูปที่ 6.19 รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงในช่วงคายพลังงาน

การทดสอบระบบการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยทำการเปลี่ยนแปลง โหลดที่เวลา 1 วินาที จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทาน 260 โอห์ม อนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ 4 เฮนรี เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทาน 130 โอห์ม อนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ 4 เฮนรี แสดงดังรูปที่ 6.20 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสแสดงดัง รูปที่ 6.21 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0.9 ถึง 1 วินาที เป็นช่วงเวลาที่ยัง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด โดยระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทาน 260 โอห์ม อนุกรมกับตัว เหนี่ยวนำ 4 เฮนรี จะสังเกตได้ว่าเนื่องจากการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรอง กำลังแอกทีฟทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับ สภาวะก่อนการชดเชย และที่เวลา 1 วินาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ทำให้ช่วงเวลา 1 วินาทีเป็น ต้นไป ระบบมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทาน 130 โอห์ม อนุกรมกับตัว เหนี่ยวนำ 4 เฮนรี ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่โหลด ซึ่งประกอบด้วยกระแสที่ความถี่มูลฐาน และ กระแสฮาร์มอนิกมีค่าแอมพลิจูดสูงขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และกระแส ชดเชยจึงมีแอมพลิจูดสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยกระแสทั้งหมดดังกล่าวเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา



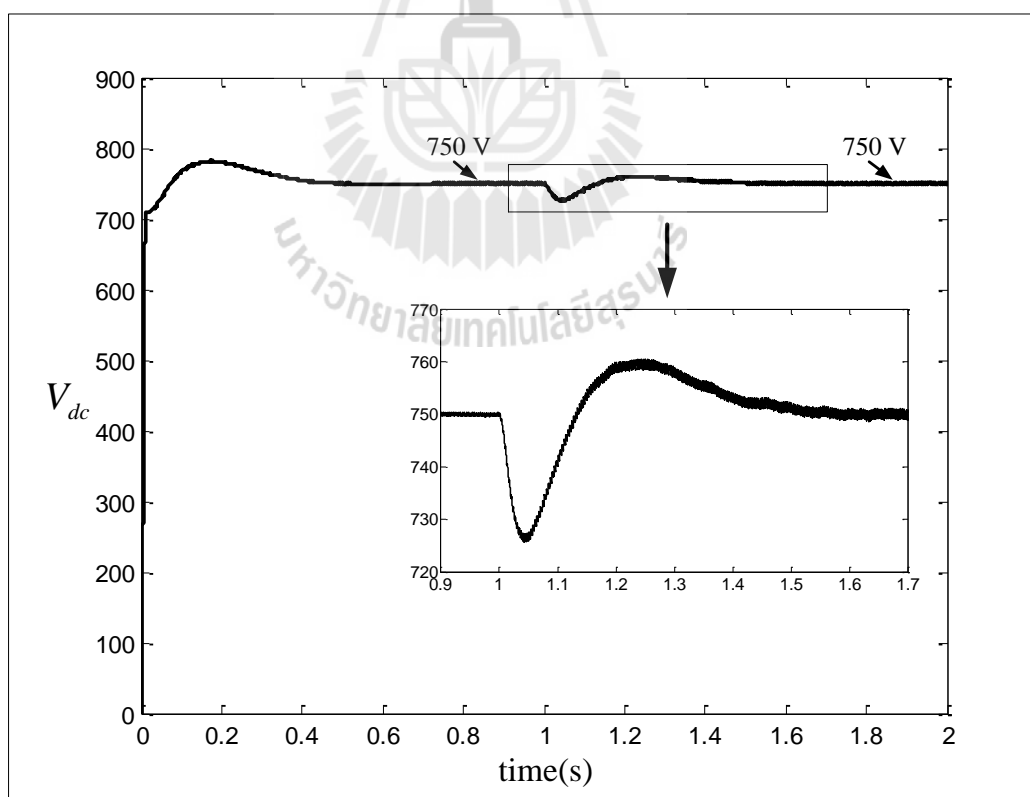
รูปที่ 6.20 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.21 รูปสัญญาณจากการจำลองสถานการณ์ทั้งสามเฟสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ประมาณ 1.05 วินาที จะสังเกตได้ว่าหลังจากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงวงจรรองกำลังแอกทีฟยังมีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี ส่งผลให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงแสดงดังรูปที่ 6.22 จากรูปดังกล่าว ช่วงเวลา 0 ถึง 0.2 วินาที เป็นช่วงเวลาเริ่มต้นเก็บสะสมพลังงานที่ตัวเก็บประจุทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีค่าแรงดันบัสไฟตรงสูงสุดเท่ากับ 781.5 โวลต์ และช่วงเวลา 0.2 ถึง 0.5 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่แรงดันบัสไฟตรงเริ่มมีการปรับค่า

ลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 750 โวลต์ โดยที่เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป แรงดันบัลไฟตรงจะเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเกิดแรงดันกระเพื่อมประมาณ 0.6 โวลต์ และมีค่าเป็นไปตามแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 750 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามการออกแบบตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กที่กำหนดเวลาการเข้าที่เท่ากับ 0.5 วินาที จนมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่เวลา 1 วินาที ซึ่งส่งผลให้ช่วงเวลา 1 ถึง 1.05 วินาทีวงจรรอกำลังแอกทีฟต้องฉีดกระแสชดเชยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ทำให้พลังงานที่ตัวเก็บประจุมีไม่เพียงพอ แรงดันบัลไฟตรงจึงมีค่าลดลง โดยมีค่าแรงดันบัลไฟตรงต่ำที่สุดเท่ากับ 726 โวลต์ และช่วงเวลา 1.05 ถึง 1.25 วินาทีกระแสชดเชยเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำให้มีการเก็บสะสมพลังงานที่ตัวเก็บประจุ และแรงดันบัลไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีค่าแรงดันบัลไฟตรงสูงสุดเท่ากับ 760.5 โวลต์ และช่วงเวลา 1.25 ถึง 1.5 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่แรงดันบัลไฟตรงเริ่มมีการปรับค่าลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 750 โวลต์ ที่เวลา 1.5 วินาที เป็นต้นไป ซึ่งเวลาดังกล่าวนับเป็น 0.5 วินาทีภายหลังมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดสังเกตได้ว่าแรงดันบัลไฟตรงเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยเกิดแรงดันกระเพื่อมประมาณ 1.8 โวลต์ และมีค่าเป็นไปตามแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 750 โวลต์ โดย



รูปที่ 6.22 รูปสัญญาณแรงดันบัลไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

เป็นไปตามการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอที่กำหนดเวลาการเข้าที่เท่ากับ 0.5 วินาที เมื่อพิจารณา ค่าแรงดันกระแสเฟืองของแรงดันบัสไฟตรงก่อนการเปลี่ยนแปลงโหลดมีค่าประมาณเท่ากับ 0.6 โวลต์ และหลังการเปลี่ยนแปลงโหลดมีค่าประมาณเท่ากับ 1.8 โวลต์ เนื่องจากภาระการฉีดกระแส แสชชของวงจรกรองกำลังแอกทิฟที่ต่างกัน โดยก่อนการเปลี่ยนแปลงโหลดมีค่าแอมพลิจูดของ กระแสชชชต่ำกว่า หลังการเปลี่ยนแปลงโหลด ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ตัว เก็บประจุของวงจรกรองน้อยกว่าหลังการเปลี่ยนแปลงโหลด จึงทำให้เกิดการกระแสเฟืองของแรงดัน บัสไฟตรงน้อยกว่า

6.6 สรุป

การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทิฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการ เชื่อมโยงกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF มีการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน และมีสมรรถนะ การทำงานที่ดี เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมดังกล่าวยังคงมีสมรรถนะการทำงานที่ดี และ สามารถทำให้แรงดันบัสไฟตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงกลับมามีค่าเป็นไปตามแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ตามที่ต้องการได้ ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในบทนี้ประกอบด้วย วงจรกรองกำลังแอกทิฟเป็น อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ที่มีการควบคุมการฉีด กระแสชชชด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงใช้ตัว ควบคุมแบบพีไอ จากการจำลองสถานการณ์พบว่าวงจรกรองกำลังแอกทิฟยังคงมีสมรรถนะการฉีด กระแสชชชที่ดีถึงแม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยผลค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยเท่ากับ 1.32% ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมี ค่าเป็น 1 ด้วยเช่นกัน

บทที่ 7

สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล โดยมุ่งเน้นการพัฒนาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยเป็นสำคัญ งานวิจัยเริ่มต้นจากการสืบค้นข้อมูลปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้า พบว่า ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแบ่งองค์ประกอบได้เป็น 4 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมการฉีดกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละองค์ประกอบได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 และจะนำข้อมูลดังกล่าว มาเป็นเหตุผลประกอบการตัดสินใจ เพื่อเลือกรูปแบบที่มีจุดเด่น และมีความเหมาะสมในแต่ละองค์ประกอบ โดยเลือกให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เนื่องจากวงจรชนิดดังกล่าวมีสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี มีความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการทำงาน และมีกำลังงานสูญเสียต่ำ จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจเฉพาะการกำจัดฮาร์มอนิก โดยไม่ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจการกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมทั้งปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ดังนั้นจึงนำเอาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (วิธี PQ) ที่มีจุดเด่นในด้านการคำนวณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมาพัฒนา ซึ่งทำให้ได้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ คือ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (วิธี PQF) โดยอาศัยหลักการของวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) ผสมกับวิธี PQ เดิม ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีความแม่นยำในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ และยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้เช่นกัน โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ทำหน้าที่คำนวณกระแสอ้างอิงซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิก และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟทั้งหมดในระบบให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัด

ฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้อย่างถูกต้อง การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยใช้ตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวทำหน้าที่ควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แอกทีฟให้มีค่าเป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF เนื่องจากข้อดีของตัวควบคุมกระแสแบบทำนายที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนจากผลของการประวิงเวลา ในการควบคุมแบบดิจิทัล ส่วนการพิจารณาตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวเป็นการ ต่อยอดจากการพิจารณาบนแกน 3 เฟส ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดสมการในการคำนวณสำหรับการ ควบคุมจาก 3 แกนให้เหลือเพียง 2 แกน และเลือกใช้การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุม แบบพีโอทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีค่าเป็นไปตามแรงดัน บัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้ออกแบบ เพื่อให้วงจรรองกำลังแอกทีฟมีจุดการทำงานที่ดีตามที่ได้ ออกแบบไว้ เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีโอมีโครงสร้างการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน และให้ผลการ ควบคุมที่ดี โดยยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก Simulink บน โปรแกรม MATLAB มีดัชนีชี้วัด คือ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่ายต้องอยู่ ภายใต้อุปกรณ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

จากการศึกษาค้นคว้า และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในอดีต รวมถึงข้อดี และข้อเสียของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการ วิเคราะห์ และพัฒนาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ พบว่า การระบุเอกลักษณ์ ฮาร์มอนิกวิธี PQ มีส่วนประกอบที่สามารถนำเอาหลักการของวิธี SWFA มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวทางในการพัฒนาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่เรียกว่า วิธี PQF ซึ่งวิธี PQF เป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี PQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน โดยจุดเด่นของวิธี PQ คือ มีการ คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ส่วนจุดเด่นของวิธี SWFA ที่นำมาใช้กับ วิธี PQF คือ การคำนวณเพื่อแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากสัญญาณกระแสสลับที่มีความ ถูกต้องแม่นยำสูง และมีความอ่อนตัว สามารถปรับใช้กับระบบใด ๆ ได้ง่ายกว่าการใช้วงจรรอง ผ่านสูง นอกจากนี้การคำนวณด้วยวิธี SWFA ใช้เวลาการคำนวณสั้น ซึ่งเหมาะกับการใช้งาน ในเวลาจริง อีกทั้งวิธี PQF ยังสามารถแก้จุดด้อยของวิธี PQ และวิธี SWFA ได้อีกด้วย โดยจุดด้อย ของวิธี PQ คือ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงออกจากองค์ประกอบสัญญาณ กระแสสลับ ที่ใช้วงจรรองผ่านสูงมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธี PQF ส่วนจุดด้อยของวิธี SWFA คือ ไม่มีการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดย รายละเอียดนิยามของส่วนประกอบต่าง ๆ ของวิธี PQ อีกทั้งขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ PQF อย่างละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 การจำลองสถานการณ์ เปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF ได้นำเสนอ รายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในบทที่ 4 ซึ่งจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟที่เป็น

แหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติเพื่อลดผลกระทบจากตัวควบคุมกระแสชดเชย และตัวควบคุมแรงดัน บัสไฟตรงในกรณีวงจรรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ โดยการทดสอบแบ่งเป็น 2 ระบบ ซึ่งมี โหลดแตกต่างกัน คือ ระบบแรกเป็นระบบที่มีกระแสโหลดแบบอุดมคติ ซึ่งสามารถกำหนด รูปแบบกระแสได้ตามต้องการ ทำให้ง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะ กำหนดค่าให้มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และมีปริมาณฮาร์มอนิกสูง เพื่อทดสอบสมรรถนะในการระบุน เอกลักษณะฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ระบบที่สองเป็นระบบที่มีโหลดเป็นวงจร เรียงกระแสสามเฟสต่อกับตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ ก่อให้เกิดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบ และเป็นโหลดที่มีการใช้งานใกล้เคียงในทาง ปฏิบัติจริง ทั้งสองระบบดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบการระบุนเอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณี 1 กำหนดเฉพาะปริมาณฮาร์มอนิก และกรณี 2 กำหนดฮาร์มอนิก พร้อมทั้งชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง พบว่าทั้ง 2 กรณี การระบุน เอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีสมรรถนะในการระบุนเอกลักษณะฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี PQ ส่งผลให้ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยของวิธี PQF มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากกว่าใน วิธี PQ และค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยที่มีการระบุนเอกลักษณะฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF มีค่าต่ำกว่า วิธี PQ โดยค่า $\%THD_{i,av}$ ดังกล่าวอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงในกรณี 2 สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเป็น 1

การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวร่วมกับ เทคนิคการสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็มเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบ ขนาน โดยตัวควบคุมดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมให้การฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบของวงจรรอง กำลังแอกทีฟแบบขนานมีลักษณะเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการระบุนเอกลักษณะ ฮาร์มอนิก ซึ่งตัวควบคุมกระแสแบบทำนายมีข้อดี คือ ช่วยลดผลกระทบจากการประวิงเวลาของ การควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการประวิงเวลาดังกล่าวจะทำให้กระแสชดเชยมี ความคลาดเคลื่อนไปจากกระแสอ้างอิงมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการพิจารณาบนแกนดีคิวทำให้สามารถลด สมการในการคำนวณจากการควบคุมบน 3 แกนให้เหลือเพียง 2 แกน ส่วนข้อดีของเทคนิคการ สวิตช์ด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม คือ ให้ความถี่การสวิตช์ที่เท่ากับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม เหมาะสำหรับนำมาใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งมีโครงสร้าง การควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลการควบคุมที่ดี การออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ และการ ออกแบบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว รายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัด ฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิด

แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF และการควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว พบว่าฮาร์มอนิกมีค่าลดลงอย่างมาก โดยค่า $\%THD_{i,av}$ ลดลงจาก 24.91% เหลือเพียง 1.40% และอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีค่าเป็น 1 ด้วยเช่นกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบการกำจัดฮาร์มอนิก และการควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิวทำให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพการจัดฮาร์มอนิกที่ดี โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 5 ไปใช้สำหรับการออกแบบ และจำลองสถานการณ์ในระบบการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอในบทที่ 6

การกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องมีการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรอก (C_{dc}) ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรรอกกำลังแอกทีฟ เพื่อให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเป็นไปตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง หากไม่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง จะทำให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีค่าไม่ตรงตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการบิดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยตรง ดังนั้นในบทที่ 6 จึงได้นำเสนอการออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรรอกโดยคำนึงถึงค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งจะต้องมีพลังงานเพียงพอสำหรับการบิดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ และคำนึงถึงค่าแรงดันกระเพื่อม (ΔV_{dc}) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันบัสไฟตรง การออกแบบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการเชื่อมโยงกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF ซึ่งมีการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน และมีสมรรถนะการทำงานที่ดี รวมถึงวิเคราะห์การทำงานของตัวควบคุมดังกล่าว จากการจำลองสถานการณ์ โดยใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี PQF การควบคุมการบิดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบทำนายบนแกนดีคิว และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ พบว่า เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอยังคงมีสมรรถนะการทำงานที่ดี และสามารถทำให้แรงดันบัสไฟตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงกลับมามีค่าเป็นไปตามแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงตามที่ต้องการได้ ส่วนวงจรรอกกำลังแอกทีฟยังคงมีสมรรถนะการบิดกระแสชดเชยที่ดีถึงแม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยผลค่า $\%THD_{i,av}$ หลังการชดเชยเท่ากับ 0.91% ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีค่าเป็น 1 ด้วยเช่นกัน

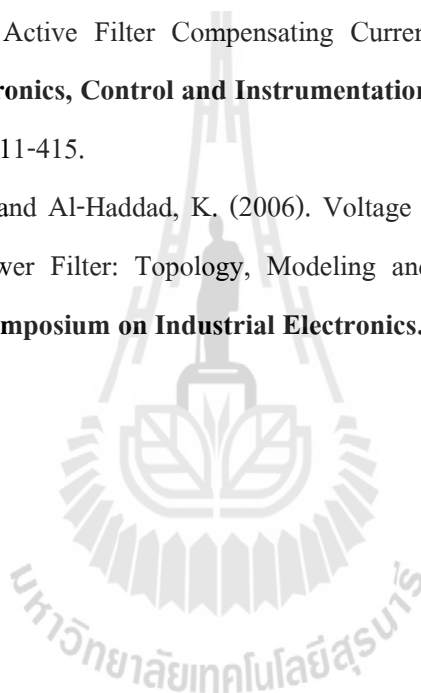
รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุุณบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2552). การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์. (2554). การควบคุมกระแสขดลวดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยเทคนิคพีดีบีเอ็มบนแกนดีคิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Abdelkhalik, O., and Benachaiba, C. (2009). Sensitivity Assessment of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods of Current Harmonics Under Non-Sinusoidal Condition for Shunt Active Power Filter. **Journal of Electrical & Electronics Engineering**. 9(1): 801-807.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A. (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. **Proc. In Int. Power Electronics Conf.** :1375-1386.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A. (1984). Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. **IEEE Trans. Ind. Appl.** 20: 625-630.
- Areerak, K-L., and Areerak, K-N. (2010). The Comparison Study of Harmonic Detection Methods for Shunt Active Power Filters. **The WASET International Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ICEMPE 2010), Paris, France.** : 271-276.
- Benchaita, L., Saadate, S., and Nia, A. S. (1999). A Comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation. **IEEE Transactions on Power Systems**. 14(2): 837-842.

- Bruyant, N., Machmoum, M., and Chevrel, P. (1998). Control of a three-phase active power filter with optimized design of the energy storage capacitor. **IEEE Conference on Power Electronics Specialists 1998. (PESC '98)**. 1: 878-883.
- Buso, S., Malesani, L., and Mattavelli, P. (1998). Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications. *Industrial Electronics*. **IEEE Transactions**. 45: 722–729.
- Chen, D., and Xie, S. (2004). Review of the control strategies applied to active power filters. **IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies (DRPT '04)**. 2: 666-670.
- Cho, J-H., and Song, E-H. (2001). Stationary Frame-Based Simple Active Power Filter with Voltage Regulation. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE '01)**. 3: 2044-2048.
- EI-Habrouk, M., and Darwish, M. K. (2001). Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filter using DSPs. **Electric Power Applications, IEE Proceedings 2001**. 148(1): 21-28.
- Elham B. M., Clarence L. W., and Adly, A. G. (1992). A Harmonic Analysis of the Induction Watthour Meter's Registration Error. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 7(3): 1080-1088.
- Hayashi, Y., Sato, N. and Takahashi, K. (1988). A Novel Control of a Current Source Active Filter for AC Power System Harmonic Compensation. **IEEE Conference on Industry Applications Society Annual**. 1: 837-842.
- Ho, J. M., and Liu, C. C. (2001). The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer. **IEE International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)**. 2(482).
- IEEE Std. 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.
- Indrajit, P., and Paul, J. S. (1989). Effect of Harmonic on Power Measurement. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference**. : 129-132.
- Ingram, D. M. E., and Round, S. D. (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for and Active Power Filter. **IEEE International Conference on Power Electronics and Drive System**. 2: 744-749.

- Kazmierkowski, M. P., and Dzieniakowski, M. A. (1993). Review of current regulation methods for VS-PWM inverters. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics 1993 (ISIE '93)**. : 448-456.
- Kazmierkowski, M. P., and Malesani, L. (1998). Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 45(5): 691-703.
- Liang, X., and Ilochonwu, O. (2011). Passive Harmonic Filter Design Scheme. **IEEE Industry Applications Magazine**. 17(5): 36-44.
- Lin, B. R., Yang, B. R., and Tsai, H. R. (2002). Analysis and Operation of Hybrid Active Filter for Harmonic Elimination. **Electric Power Systems Research**. 62(3): 191-200.
- Mendalek, N., and Al-Haddad, K. (2000). Modeling and Nonlinear Control of Shunt Active Power Filter in the Synchronous Reference Frame. **Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings**. 1: 30-35.
- Mendalek, N., Al-Haddad, K., Fnaiech F., and Dessaint, L. A. (2002). A Non-linear Optimal Predictive Control of a Shunt Active Power Filter. **Industry Applications Conference 2002**. 1: 70-77.
- Odavic, M., Biagini, V., Zanchetta, P., Sumner, M., and Degano, M. (2011). One-sample-period-ahead predictive current control for high-performance active shunt power filters. **IET Power Electronics**. 4(4): 414-423.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujijorn, S., and Totarong, P. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. **In Proceedings IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT02)**. : 915-920.
- Rice, D. E. (1986). Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics – Their Effect on Power Systems Components. **IEEE Transactions on Industrial**. 22(1): 161-177.
- Rodriguez, J., Pontt, J., Silva, C., Cortes, P., Amman, U., and Rees, S. (2004). Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. **IEEE Conference on Power Electronics Specialists 2004 (PESC '04)**. 3: 2192-2196.
- Routimo, M., Salo, M., and Tuusa, H. (2007). Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 22(2): 636-643.

- Sujitjorn, S., Areerak, K-L., and Kulworawanichpong, T. (2007). The DQ Axis With Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 22(1): 737-739.
- Thomas, T., Haddad, K., Joos, G., and Jaafari, A. (1988). Design and Performance of Active Power Filters. **IEEE Industry Applications Magazine**. 4(5): 38-46.
- Wagner, V. E. (1993). Effects of Harmonics on Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(2): 672-680.
- Xu, J. H., Lott, C., Saadate, S., and Davat, B. (1994). Simulation and Experimentation of a Voltage Source Active Filter Compensating Current Harmonics and Power Factor. **Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON '94, 20th International Conference**. 1: 411-415.
- Zouidi, A., Fnaiech, F., and Al-Haddad, K. (2006). Voltage source Inverter Based three-phase shunt active Power Filter: Topology, Modeling and Control Strategies. **IEEE-ISIE International Symposium on Industrial Electronics**. : 785-790.





ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดลิขสิทธิ์

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

สุขสันต์ ดิยารัชกุล, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์ (2555). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและการควบคุมกระแสแบบทำนายสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35). นครนายก, 12-14 ธันวาคม, หน้า 497-500

Tiyarachakun, S., Areerak, K-L., Areerak, K-N. (2012). **Harmonic Current Elimination and Power Factor Improvement for Distorted Voltage System.** European Journal of Scientific Research, Vol. 91, No. 3, November, pp. 404-415.

กองพล อารีรักษ์ และสุขสันต์ ดิยารัชกุล (2554). บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีพีคิวเอฟสำหรับโปรแกรม SIMULINK. 2 พฤศจิกายน, เลขที่คำขอ 266184 (จดลิขสิทธิ์)



ประวัติผู้วิจัย

ดร.กองพล อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี โท และเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2543 2546 และ 2550 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรรอกกำลังแยกทีฟ การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

