การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยวิธีฮีสเตอรีซีส

นายเอนก ง้อตระกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

THE CONTROL OF COMPENSATING VOLTAGE INJECTION OF SERIES ACTIVE POWER FILTER USING HYSTERESIS METHOD

Anek Ngotakun

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
แบบอนุกรมด้วยวิธีฮีสเตอรีซีส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(ผศ. ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอนก ง้อตระกูล : การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยวิธีฮีสเตอรีซีส (THE CONTROL OF COMPENSATING VOLTAGE OF SERIES ACTIVE POWER FILTER USING HYHTERESIS METHOD)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 230 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยวิธีฮีสเตอรีซีสสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกันทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF)วิธีดีคิวเอฟ (DQF) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (PQ) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (PQF) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (SD) และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (SDF) จากการจำลองสถานการณ์ พบว่า วิธีดีคิวเอฟมีสมรรถนะดีที่สุดในด้านการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกนอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมทั้งบนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว รวมไปถึงการนำตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสมาใช้กับการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชย สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) มาช่วยในการออกแบบ ทั้งนี้เพื่อให้สมรรถนะในการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกของระบบดียิ่งขึ้น โดยเน้นที่ค่า $\%THD_v$ ภายหลังการชดเชยที่จุด PCC ต้องมีค่าน้อยที่สุด อีกทั้งต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในงานวิทยานิพนธ์ได้มีการทดสอบความคงทนของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในกรณีที่โหลดแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ใช้งานร่วมกับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟเพื่อคงค่าแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวให้ได้ตามที่ต้องการ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ANEK NGOTAKUN : THE CONTROL OF COMPENSATING VOLTAGE INJECTION OF SERIES ACTIVE POWER FILTER USING HYSTERESIS METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 230 PP.

HARMONIC DETECTION/ SERIES ACTIVE POWER FILTETR/
MATHEMATICAL MODEL/HYSTERESIS METHOD/
ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD

The thesis presents the compensating voltage control for series active power filter using the hysteresis method in balancd three-phase system. There are six harmonic detection methods for performance comparison such as synchronous reference frame method (SRF), DQF method, instantaneous power theory method (PQ), instantaneous power theory with Fourier method (PQF), synchronous detection method (SD) and synchronous detection with Fourier method (SRF). The simulation results show that the DQF method provides the best performance to detect the harmonic voltages in the system. Moreover, the mathematical models of series active power filter on three-phase and dq axes are purposed. The hysteresis voltage control is applied to control the compensating voltages in the thesis. The designs of series active power filter and hysteresis controller use the artificial intelligence technique called the adaptive tabu search method (ATS). The performance improvement in term of the minimum $\%THD_v$ of the voltages at PCC point after compensation is the main objective in the thesis. In addition, this $\%THD_v$ after compensation also follows the IEEE Std.519-1992. The robust control testing for the hysteresis control with variable harmonic voltage characteristics is presented. Finally, the PI controller is used with the DQF harmonic

detection method to regulate the DC bus voltage of series active power filter to desire value.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2012 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เอนก ง้อตระกูล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฎ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 บทนำ 7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 16
2.6 สรุป 17
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก 18
3.1 บทนำ 18
3.2 ความหมายของฮาร์มอนิก 18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ 19
3.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (voltage distortion factor) 20
3.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก 20
3.6 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก 21
3.7 การกำจัดฮาร์มอนิก 22
3.8 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก 24
3.9 สรุป 27

4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 28
4.1 บทนำ 28
4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว 28
4.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก 29
4.4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส 31
4.5 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ 35
4.6 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง 37
4.7 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ 41
4.8 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส 44
4.9 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ 46
4.10 ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก 48
4.11 สรุป 60

5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 62
5.1 บทนำ 62
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนสามเฟส 62
5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว 66
5.4 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง 74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 สรุป 90
6 การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 91
6.1 บทนำ 91
6.2 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 91
6.3 หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 93
6.4 การฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 94
6.5 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล 112
6.6 สรุป 115
7 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 116
7.1 บทนำ 116
7.2 ทบทวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 116
7.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 119
7.4 การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 120
7.5 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 121
7.6 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้น 130
7.7 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล 135
7.8 สรุป 140
8 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุม 141
8.1 บทนำ 141
8.2 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์และโหลดแบบต่าง ๆ 141
8.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส .. 143

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม พร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 144
8.3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม พร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 153
8.4 การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันแต่อิมพลิจูดต่างกัน 157
8.5 การจำลองสถานการณ์กรณีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่ากันแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม 166
8.6 สรุป 177
9 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 178
9.1 บทนำ 178
9.2 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 178
9.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 182
9.4 การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล 185
9.5 สรุป 189
10 สรุปและข้อเสนอแนะ 190
10.1 สรุป 190
10.2 ข้อเสนอแนะ 193
รายการอ้างอิง 194
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่า v_d และ v_q 199
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) 206
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 215
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และจดลิขสิทธิ์ 228
ประวัติผู้เขียน 230

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 7
2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 10
2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 16
3.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก 25
3.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV) 26
3.3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 69,001 V ถึง 161 kV) 26
3.4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน >161 kV) 26
4.1 ผลการจำลองสถานการณ์ 59
5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 1) 79
5.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 2) 83
5.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 3) 86
6.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง 95
6.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง 99
6.3 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง 104
6.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส 108
7.1 ค่าขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 121
7.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

7.3 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 124
7.4 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น 126
7.5 ผลการทดสอบตัวปรับลดรัศมี 127
7.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 130
7.7 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น 134
7.8 ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกของวิธีการออกแบบตามแนวทางต่าง ๆ 136
8.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง 144
8.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง 147
8.3 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง 149
8.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส 151
8.5 ค่าขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 153
8.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น 156
8.7 ผลการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมตามแนวทางต่าง ๆ 157
9.1 ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยเมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 189
ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ 200
ก.2 ปริมาณแรงดันฮารืมอนิกที่ปรากฏบนแกนดีคิว 205
ข.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ 209

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 องค์ประกอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 3
3.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ 23
3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 23
3.3 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1 24
3.4 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 2 24
3.5 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE Std 519-1992 25
4.1 แผนภาพการแปลงของปาร์ค 29
4.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 30
4.3 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF 32
4.4 สเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง 33
4.5 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF 35
4.6 แผนภาพคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณแรงดันที่ความถี่มูลฐานบนแกนดี 37
4.7 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ 38
4.8 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง 40
4.9 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF 42
4.10 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และคำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน 43
4.11 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD 44
4.12 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF 46
4.13 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณกำลังแอกทีฟรวมที่ความถี่มูลฐาน. 47
4.14 แรงดันสามเฟสก่อนการชดเชย 48
4.15 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SRF 49
4.16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี DQF 50
4.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ 52
4.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQF 53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.19 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD 55
4.20 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.02$ sec) 56
4.21 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.04$ sec) 57
5.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน .. 62
5.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของระบบที่พิจารณา 69
5.3 ระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems 77
5.4 แบบจำลองของวงจรอินเวอร์เตอร์อุดมติสำหรับการจำลองสถานการณ์ 78
5.5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd} 79
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq} 80
5.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd} 80
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq} 81
5.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc} 81
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd} 83
5.11 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq} 84
5.12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd} 84
5.13 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq} 85
5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc} 85
5.15 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd} 87
5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq} 87
5.17 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd} 88
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq} 88
5.19 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc} 89
6.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 92
6.2 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 93
6.3 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส 94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.4 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก 97
6.5 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก 98
6.6 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม 98
6.7 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 99
6.8 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก 102
6.9 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก 102
6.10 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม 103
6.11 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 103
6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย 105
6.13 ผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ค่าน้อย 107
6.14 ผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ค่ามาก 107
6.15 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 108
6.16 ผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่ามาก 110
6.17 ผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่าน้อย 111
6.18 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเอตรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 111
6.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส u 112
6.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส v 113
6.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส w 113
6.22 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย 114
7.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา 117
7.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0 117
7.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่ 118
7.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่ 118
7.5 กลไกการเดินย้อนรอย 118
7.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อม
ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS 120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

7.7 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS 129
7.8 การกำหนดคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่ารัศมีเริ่มต้น 131
7.9 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 132
7.10 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น 133
7.11 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย 137
7.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย 137
7.13 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส u 138
7.14 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส v 138
7.15 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส w 139
8.1 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์กรณีที่โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 142
8.2 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์กรณีที่เป็นโหลดแรงดันฮาร์มอนิก 142
8.3 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 146
8.4 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 148
8.5 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 150
8.6 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ 152
8.7 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป 154
8.8 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น 155
8.9 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 183 โวลต์ 159
8.10 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 220 โวลต์ 159
8.11 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 146 โวลต์ 160
8.12 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์ 162
8.13 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 220 โวลต์ 163
8.14 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 146 โวลต์ 164
8.15 สเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1 165
8.16 สเปกตรัมในรูปของอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1 165
8.17 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 1 167

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

8.18 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 2 168
8.19 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 3 169
8.20 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 4 170
8.21 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 1 172
8.22 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 2 173
8.23 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 3 174
8.24 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 4 175
8.25 สเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิแบบที่ 2 176
8.26 สเปกตรัมในรูปของอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 2 176
9.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 179
9.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ 180
9.3 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 181
9.4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ 184
9.5 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง 186
9.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส *u* 187
9.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส *v* 187
9.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส *w* 188

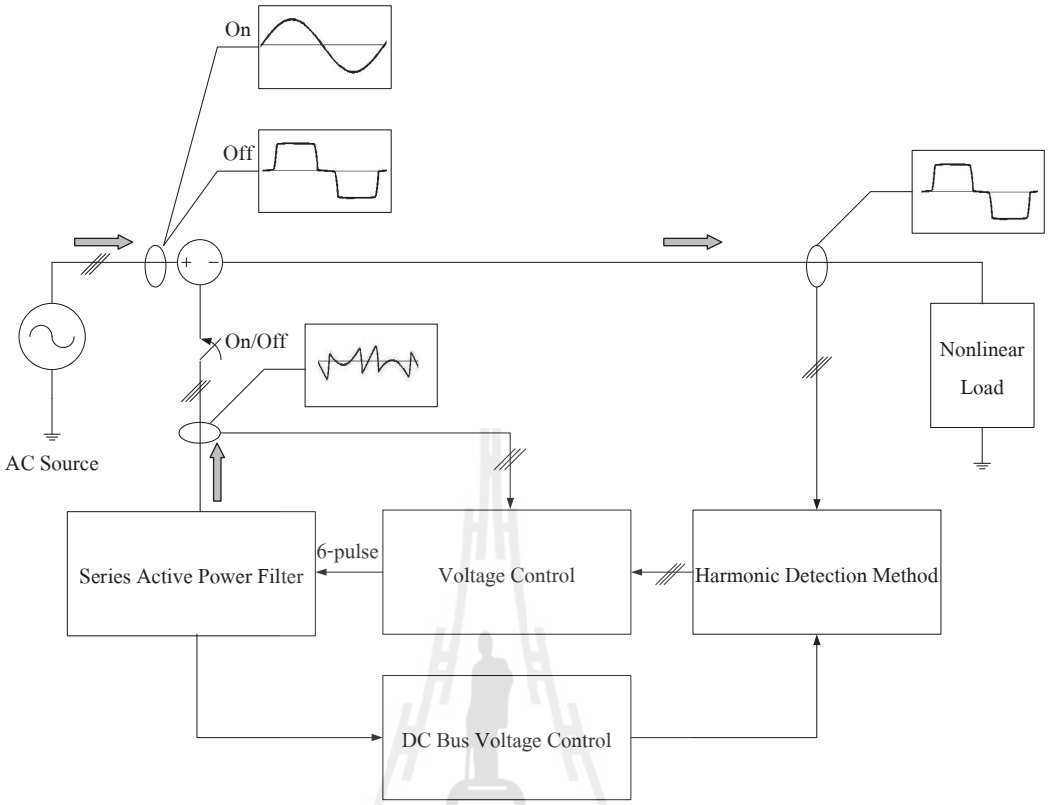
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการใช้งานอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นกันอย่างกว้างขวาง อาทิ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หม้อแปลงไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์ดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เหล่านี้ก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ ดังเช่น ทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้าวัดค่าผิดพลาด (Fuchs, 1987)(Elham and Makrm, 1992) เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด (Ho and Liu, 2001) เกิดกำลังงานสูญเสีย (Rice, 1986) และความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน (Wagner, 1993) เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นเพื่อทำให้ปัญหาทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกลดน้อยลง ซึ่งในอดีตได้มีการแก้ไขปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกด้วยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Peng, Akagi, and Nabae, 1988) แต่เนื่องจากวงจรดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบและยังมีน้ำหนักมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Singh, Al-Haddad and Chandra, 1999) ขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วงกรองกำลังแอกทีฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง ซึ่งการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่อาศัยอุปกรณ์สวิตชิง ในการฉีดแรงดันชดเชยเพื่อหักล้างกับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกัน โดยในส่วนที่ 1 จะเป็นส่วนของการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ในกระบวนการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงมีหลายวิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Liccardo, Marino, Schiano and Visciano, 2003) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (Young-Seok, Jin-Sun and Soo-Hyun, 2003) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Chang and chen, 2006) ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนของการควบคุมแรงดันชดเชย ซึ่งปัจจุบันการควบคุมดังกล่าวมีหลากหลายวิธี เช่น ตัวควบคุมพีไอ (Kanan, and Al-Haddad, 2004) ตัวควบคุมพีไอดี (Khoor, Machmoum, and Doeuff, 2004) ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส (Mekri, Machmoun, Ait-Ahmed, and Mazari, 2010) ฟัซซีลอจิก (Lai, Liang, and Wu, 2007) โครงข่ายประสาทเทียม (Libano, Braga, Willman, and Muller, 2002) การควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Antchev, Petkova, and Gurgulicov,

2007) ตัวควบคุม RST (Mekri, Machmoum, Mazari, and Ait Ahamed, 2007) เป็นต้น และในส่วนที่ 3 เป็นการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงซึ่งการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวนิยมใช้ตัวควบคุมพีไอ (Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech, 2002)

จากรูปที่ 1.1 เป็นรูปองค์ประกอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยในรูปดังกล่าวจะประกอบไปด้วยโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) ที่ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ ส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic Detection Method) จะมีหน้าที่ตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและสร้างสัญญาณแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชย ในขณะที่การควบคุมแรงดันชดเชย (Voltage Control) จะทำหน้าที่ควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง ส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (Series Active Power Filter) จะทำหน้าที่ชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้าหลัก และสุดท้ายเป็นการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (DC Bus Voltage Control) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีการนำเสนอการเปรียบเทียบการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส วิธีดีคิวแอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การออกแบบพารามิเตอร์โดยการสังเกตพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมาใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมถึงออกแบบตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสเพื่อให้สมรรถนะในการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกดีกว่าเดิม สำหรับผลจากการออกแบบได้มีการทดสอบความคงทนของตัวควบคุม โดยที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใช้เท่าเดิม แต่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าหลักที่โหลดแรงดันฮาร์มอนิก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน และแบบที่ 2 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่าเดิมแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมโดยสรุปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2.2 เพื่อนำเทคนิคการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม บนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว

1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้และดำเนินการออกแบบทางด้านการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

1.2.5 เพื่อประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

1.2.6 เพื่อศึกษาองค์ความรู้ทางด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

1.3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อก SimPowerSystems ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.5 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสำหรับการจำลองสถานการณ์ ใช้แหล่งจ่ายกระแส ทั้งนี้เนื่องจากพิจารณาเฉพาะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกเท่านั้น

1.3.6 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวเก็บประจุขนานกับตัวต้านทาน

1.3.7 การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกมุ่งเน้นที่การปรับแก้แรงดันฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว

1.3.8 ดัชนีชี้วัดประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิก ใช้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 เป็นเกณฑ์กำหนด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุลเท่านั้น

1.4.2 การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจะใช้โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติที่กำจัดแรงดันฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์

1.4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ต้องอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 ได้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่มีสมรรถนะดีกว่าเดิม

1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว

1.5.4 ได้องค์ความรู้ใหม่ ในการนำเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟและออกแบบตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

1.5.5 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.5.6 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือ นานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 10 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

บทที่ 3 กล่าวถึงความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดแรงดันฮาร์มอนิก การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกรวมถึงข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

บทที่ 4 นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ใช้วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส วิธีดีคิวแอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์

บทที่ 5 นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟสและใช้หลักการแปลงของปาร์คสำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว โดยมีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ซึ่งรายละเอียดในบทนี้จะนำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส การฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส และการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยมีการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการควบคุม

บทที่ 7 นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งในบทนี้มีการอธิบายกระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหา การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวแบบกำหนดค่าเริ่มต้น

บทที่ 8 นำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุม ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอโครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกและลักษณะของโหลดแรงดันฮาร์มอนิกรูปแบบต่าง ๆ การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส การจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกกรณีที่โหลดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันแต่แอมพลิจูดต่างกัน และการจำลองสถานการณ์ที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเท่าเดิมแต่รูปร่างแรงดันฮาร์มอนิกที่แตกต่างไปจากเดิม

บทที่ 9 นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสที่ใช้การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการจำลองสถานการณ์ในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

บทที่ 10 เป็นบทสรุปภาพรวมของงานวิจัยวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยดังกล่าวได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Grady, Samotyj, and Noyola	นำเสนอการใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะใช้ความถี่ในการสวิตช์น้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Singh, Al-Haddad, and Chandra	นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและแหล่งจ่ายแรงดันกับการใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2000	El-Habrouk, Darwish, and Mehta	เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งในบทความระบุว่า ความซับซ้อนในการควบคุมของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีความง่ายกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส การตอบสนองของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส กำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าน้อยกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส
2001	Tey, and So	นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2006	Akagi	นำเสนอโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่มีวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน รวมไปถึงการนำเสนอความเหมาะสมของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิดกับการนำไปใช้งาน

จากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในตารางที่ 2.1 สามารถสรุปเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งในตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด ด้วยเหตุนี้จึงเลือกวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมาใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

คุณสมบัติ	ชนิดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	
	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส
ระบบไฟฟ้ากำลัง	สามเฟส	สามเฟส
แหล่งสะสมพลังงาน	ตัวเก็บประจุ	ตัวเหนี่ยวนำ
ความซับซ้อนในการควบคุม	ง่าย	ยาก
ความไวในการตอบสองต่อการทำงาน	เร็ว	ปานกลาง
ความอ่อนตัวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า	ดี	ไม่ดี
กำลังงานสูญเสียต่าง ๆ	ปานกลาง	มาก
ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิก	ดี	ดี
ราคา	ถูก	แพง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชย ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกอยู่หลายวิธี และในแต่ละวิธีมีรูปแบบการคำนวณที่แตกต่างกันในการนำเสนอนี้จึงนำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยเช่นกันเพื่อเป็นแนวทางนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก และหัวข้อนี้จึงนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Furuhashi, Okuma, and Uchikawa	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ในการตรวจจับฮาร์มอนิก งานวิจัยนี้ได้กำหนดความหมายของกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งไว้ด้วย
1998	Qun, Weizheng, Jinjun, and Zhaoan	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งหรือวิธี PQ ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้วงรอบการล็อกเฟส (Phase Lock Loop) มาใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิก
2002	Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนดีคิวหรือวิธี SRF โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้วงรอบการล็อกเฟสร่วมกับอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน
2004	Kim, Kim, and Ko	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง และได้นำเสนอการชดเชยแรงดันอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
2005	Asiminoaei, Blaabjerg, and Hansen	นำเสนอวิธีการตรวจแรงดันและกระแสจับฮาร์มอนิก ซึ่งในบทความดังกล่าวได้แบ่งวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกจะเป็นการตรวจจับฮาร์มอนิกในรูปแบบของโดเมนความถี่ ซึ่งในรูปของโดเมนความถี่จะประกอบไปด้วย วิธี Discrete Fourier Transform (วิธี DFT) วิธี Fast Fourier Transform (วิธี FFT) วิธี Recursive Discrete Fourier Transform (วิธี RDFT) และกลุ่มที่สองเป็นการตรวจจับฮาร์มอนิกในรูปของโดเมนเวลา ในส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกในโดเมน

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		เวลาจะประกอบด้วย วิธี Synchronous Fundamental วิธี Synchronous Individual Harmonic วิธี Instantaneous Power วิธี Generalized Integrators โดยในบทความนี้ได้สรุปความเหมาะสมของแต่ละวิธีในการนำไปใช้ตรวจจับฮาร์มอนิก
2006	Chang, and Chen	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส หรือวิธี SD ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและได้ทำการจำลองสถานการณ์ในการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก
2006	Chang, K. Chen, Chin, and C. Chen	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี a-b-c Reference Frame ซึ่งในบทความดังกล่าวนำเสนออัลกอริทึมเกี่ยวกับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและทำการจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก
2007	Sujitjorn, K-L Areerak, and Kulworawanichpong	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคิว (DQ axis with Fourier) หรือวิธี DQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สายแบบไม่สมดุล โดยผลการจำลองสถานการณ์มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกกับอีก 2 วิธี คือ วิธี SRF และวิธี Sliding Window Fourier Analysis (SWFA) ซึ่งวิธี DQF ให้ผลการตรวจจับที่ดีกว่าอีกสองวิธี และสามารถปรับให้ระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลก่อนการชดเชย กลับสู่สภาวะสมดุลภายหลังการชดเชยได้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Abdelkhalek, and Benachaiba	นำเสนอเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SD โดยทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่อเข้ากับโหลดสมดุล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ทั้งสองวิธีให้ผลการตรวจจับดีทั้งคู่แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์วิธี PQ ให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี SD

จากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในตารางที่ 2.3 สามารถทราบถึงข้อดีและข้อเสียของการตรวจจับฮาร์มอนิกแต่ละวิธี และสรุปข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก

สภาวะโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง	วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก					
	วิธี PQ	วิธี SRF	วิธี SD	วิธี a-b-c ref. frame	วิธี SWFA	วิธี DQF
สมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิก						
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ต่อกับโหลดสมดุล	ดี	ดี	ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ต่อกับโหลดไม่สมดุล	ดี	ดี	ไม่ดี	ดี	ดี	ดี
การชดเชยกำลังรีแอกทีฟหรือปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง						
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ต่อกับโหลดสมดุล	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก (ต่อ)

สภาวะโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง	วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก					
	วิธี PQ	วิธี SRF	วิธี SD	วิธี a-b-c ref. frame	วิธี SWFA	วิธี DQF
การชดเชยกำลังรีแอกทีฟหรือปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง						
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ต่อกับโหลดไม่สมดุล	ดีมาก	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี
คุณสมบัติด้านการคำนวณ						
ความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน	ซับซ้อน
ความเร็วในการคำนวณ	เร็ว	เร็ว	เร็ว	เร็ว	เร็วมาก	เร็ว

การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกดังตารางที่ 2.4 เป็นการประเมินจากความเข้าใจด้านโครงสร้างของการคำนวณเท่านั้น แต่การเปรียบเทียบนี้จะขึ้นอยู่กับระบบที่ทำการทดสอบ รวมถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ของระบบ ดังนั้นเมื่อทดสอบกับระบบใด ๆ การเปรียบเทียบอาจให้ผลที่ต่างกัน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถชดเชยแรงดันได้ตามลักษณะรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ถือเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันโดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การควบคุมแรงดันแบบเชิงเส้น (linear control) และการควบคุมแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear control) ซึ่งงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Bose	นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันโดยการใช้ตัวควบคุมแบบฮีสเตอรีซีส

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	Libano, Braga, Willmann, and Muller	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่อาศัยหลักการทำงานเป็นแบบการเรียนรู้ด้วยตัวเองแล้วนำกลับมาควบคุม ซึ่งวิธีนี้จะค่อนข้างซับซ้อนมาก
2004	Kanaan, and Al-Haddad	นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันชดเชยฮาร์มอนิก รวมไปถึงการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในขณะที่ทำการควบคุมการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก
2004	Khoor, Machmoum, and Doeuff	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี รวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ
2007	Antchev, Petkova, and Gurgulicov	นำเสนอการควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Sliding mode control) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม วิธีนี้อาศัยการเทียบเวลาในแต่ละจุดเพื่อทำการเลื่อนจุดข้อมูลในการควบคุม
2007	Lan, Liang, and Wu	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้วิธีฟัซซี-พีไอดีในการควบคุมการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
2007	Mekri, Machmoum, Mazari, and Ait Ahmed	บทความนี้นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยในสามรูปแบบ ได้แก่ การควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ การควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบ RST และการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งในบทความได้มุ่งเน้นให้เห็น

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ถึงองค์ประกอบของการนำวงรอบการล็อกเฟสมาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบต่าง ๆ
2009	Yusof, and Rahim	นำเสนอการควบคุมด้วยวิธี Space Vector Pulse Width modulation หรือวิธี SVPWM ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการควบคุมการชดเชยแรงดันสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
2010	Mekri, Machmoun, Ait Ahmed, and Mazari	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มการควบคุมแรงดันชดเชยแบบเชิงเส้นประกอบด้วย วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) วิธีการควบคุมแบบ RST กลุ่มการควบคุมแรงดันชดเชยแบบไม่เป็นเชิงเส้นประกอบด้วย วิธีฮีสเตอรีซีสแบบคงค่าแถบ วิธีฮีสเตอรีซีสแบบปรับค่าแถบ วิธีฮีสเตอรีซีสร่วมกับฟัซซีลอจิก ซึ่งผลการควบคุมในกลุ่มของไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเป็นเชิงเส้น

จากตารางที่ 2.5 สามารถเรียนรู้วิธีการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการควบคุมแรงดันชดเชย รวมไปถึงความยากง่ายและความซับซ้อนของวิธีการควบคุมแต่ละวิธี เพื่อนำไปประยุกต์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์และนำไปพัฒนาอีกต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิธีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฮีสเตอรีซีส ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Soares, Verdelho, and Marques	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยทำการควบคุมค่าผลต่างระหว่างค่าแรงดันสูงสุดกับค่าแรงดันต่ำสุด ($\Delta V_{dc} = V_{dc,\max} - V_{dc,\min}$) แทนการควบคุม V_{dc} โดยตรง
1998	Bruyant, Machmoum, And Chevrel	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุม 2 ชนิด คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ และแบบ RST การออกแบบตัวควบคุมทั้งสองชนิดดังกล่าว อาศัยสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุสำหรับการออกแบบตัวควบคุม
2001	Z. Wang, Q. Wang, Yao, and Liu	นำเสนอการออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรงและค่าตัวเก็บประจุสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอการสุ่มค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกรองความถี่สวิตช์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และการนำตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเข้าไปเชื่อมต่อภายในอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ
2002	Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และนำเสนอการนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้เข้าไปเชื่อมต่อภายในอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	Kanan, Assi, Sleiman, Aoun, Asmar, and Al-Haddad	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม รวมทั้งยังนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยเช่นกัน
2007	Zawawi, Youssef, and Sebakhy	นำเสนอการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยควบคุมค่า ΔV_{dc} แทนการควบคุม V_{dc} โดยตรง

จากตารางที่ 2.6 นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามวัตถุประสงค์ อีกทั้งความซับซ้อนในการออกแบบไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ และการพัฒนาประสิทธิภาพของการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมให้เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

3.1 บทนำ

ปัจจุบันปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ลดน้อยลงหรือหมดไป ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิกจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก รายละเอียดในบทนี้จึงนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิกซึ่งประกอบด้วย ความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก และข้อกำหนดมาตรฐานของฮาร์มอนิก เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานในการศึกษาค้นคว้า และนำไปสู่การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกต่อไป

3.2 ความหมายของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก คือ องค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยมีความถี่มูลฐาน คือ 50 Hz ดังนั้นความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิก หรือกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย คือ 100 Hz 150 Hz 200 Hz หรือ 250 Hz เป็นต้น

สำหรับการอธิบายรูปสัญญาณใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบนิยมใช้อนุกรมฟูริเยร์ที่อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติดังอธิบายไว้ในสมการที่ (3-1) เมื่อ $f(t)$ คือ สัญญาณรายคาบใด ๆ ที่ขึ้นอยู่กับเวลา t

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \tag{3-1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 a_n และ b_n ของอนุกรมฟูริเยร์อธิบายได้ดังสมการที่ (3-2) ถึงสมการที่ (3-4) ตามลำดับ

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \tag{3-2}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(n\omega_0 t)dt \tag{3-3}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(n\omega_0 t)dt \tag{3-4}$$

จากสมการข้างต้น T คือ คาบของสัญญาณ (วินาที)

n คือ อันดับของฮาร์มอนิก

ω_0 คือ ความถี่มูลฐานเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

3.3 นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ

แรงดันฮาร์มอนิกหรือกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ (IEEE std. 519-1992, 1993) ได้ดังต่อไปนี้

อินเตอร์ฮาร์มอนิก (*interharmonic*) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

คาแรคเตอริสติคฮาร์มอนิก (*characteristic harmonic*) คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งมีอันดับฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (3-5)

$$n = kp \pm 1 \tag{3-5}$$

จากสมการข้างต้น n คือ อันดับของฮาร์มอนิก

k คือ จำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,…

p คือ จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

นันคาแรคเตอริสติคฮาร์มอนิก (*non-characteristic harmonic*) คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า เช่นเดียวกับกรณีคาแรคเตอริสติคฮาร์มอนิกแต่มีอันดับฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (3.5)

ทริเพลอร์ฮาร์มอนิก (triple harmonic) คือ ฮาร์มอนิกที่มีอันดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 6 และ 9 เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอันดับศูนย์ (zero sequence) ในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวทรอล (George, 2001)

3.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (voltage distortion factor)

มาตรฐานสากล IEEE ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: %THD) เป็นการบ่งบอกปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาจบ่งบอกเป็นเปอร์เซนต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion: $\%THD_V$) ดังสมการที่ (3-6) ดังนี้

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \qquad (3\text{-}6)$$

จากสมการข้างต้น V_n คือ ค่า RMS ของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

V_1 คือ ค่า RMS ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

3.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกเกิดจากระบบไฟฟ้ากำลังต่อเข้ากับโหลดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) ซึ่งโหลดดังกล่าวสามารถแบ่งแยกเป็นประเภทต่าง ๆ (IEEE std. 519-1992, 1993) ได้ดังนี้

-อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น

-อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ก เช่น เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก หรือหลอดปล่อยประจุในก๊าซชนิดต่าง ๆ

-อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการปรับความเร็ว (adjustable-speed drive) (George, 2001)

-อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตามบ้านพัก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส เช่น คอมพิวเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น (Srianthumrong, 2003)

3.6 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก

การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.5 จะส่งผลให้มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็น “มลพิษ” ประเภทหนึ่งทางไฟฟ้า และก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ (IEEE std. 519-1992, 1993) ดังต่อไปนี้

-ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์

-ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากมีค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิก

-ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียกระแสไหลวน (eddy current loss) และกำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีส (hysteresis loss) เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงลดลง

-ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ และผลจากสภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวเก็บประจุทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกให้มีปริมาณสูงขึ้น (George, 2001) ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของตัวเก็บประจุให้ทนต่อค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก ตัวเก็บประจุที่ออกแบบจากผู้ผลิตควรอยู่ในกรอบตามมาตรฐานของ IEEE std. 18-1992

-ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ชนิดต่าง ๆ ผิดพลาดไปจากเดิม เช่น รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าการเริ่มตอบสนอง (pickup values) ที่สูง ซึ่งโดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มตอบสนองที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์เหล่านี้พิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานเท่านั้น (Ho and Liu, 2001)

-ผลของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่ากำลังงานไฟฟ้า (watt-hour meter) ทำงานผิดพลาดได้ (Elham, Clarence, and Adly, 1992) ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งไว้ที่ความถี่มูลฐาน

-ผลของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าร้อนกว่าปกติ และอาจส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์คอกกิง (cogging) คือ ไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่า

ความเร็วซิงโครนัสได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิด (Arrillaga and Watson, 2003)

-ผลของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) ในระบบสื่อสารซึ่งอาจส่งผลให้ข้อมูลในการสื่อสารมีความคลาดเคลื่อนได้

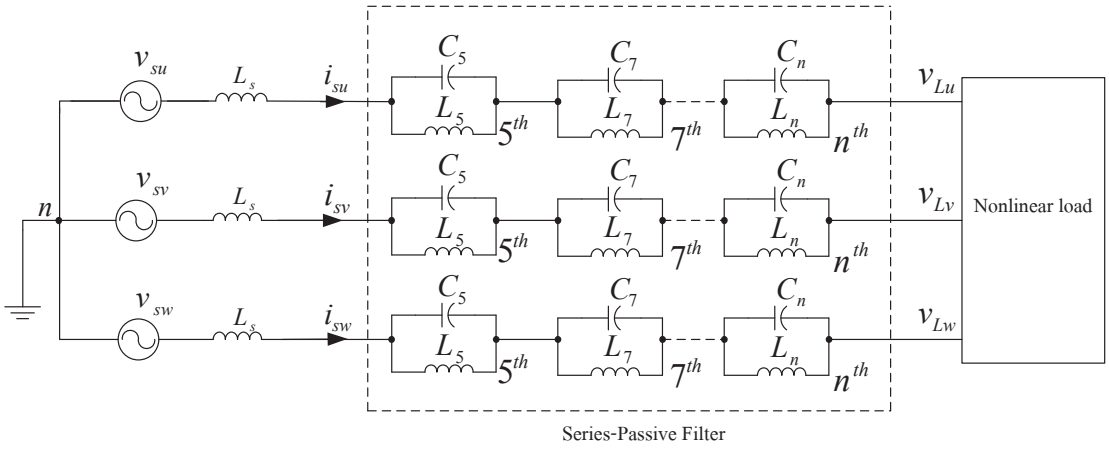
3.7 การกำจัดฮาร์มอนิก

การกำจัดฮาร์มอนิกมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก รวมถึงต้องมีความเข้าใจระบบไฟฟ้ากำลังที่มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากความเข้าใจฮาร์มอนิกดังกล่าวจะส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิผล และจากการศึกษาค้นคว้า พบว่า วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิกมีด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

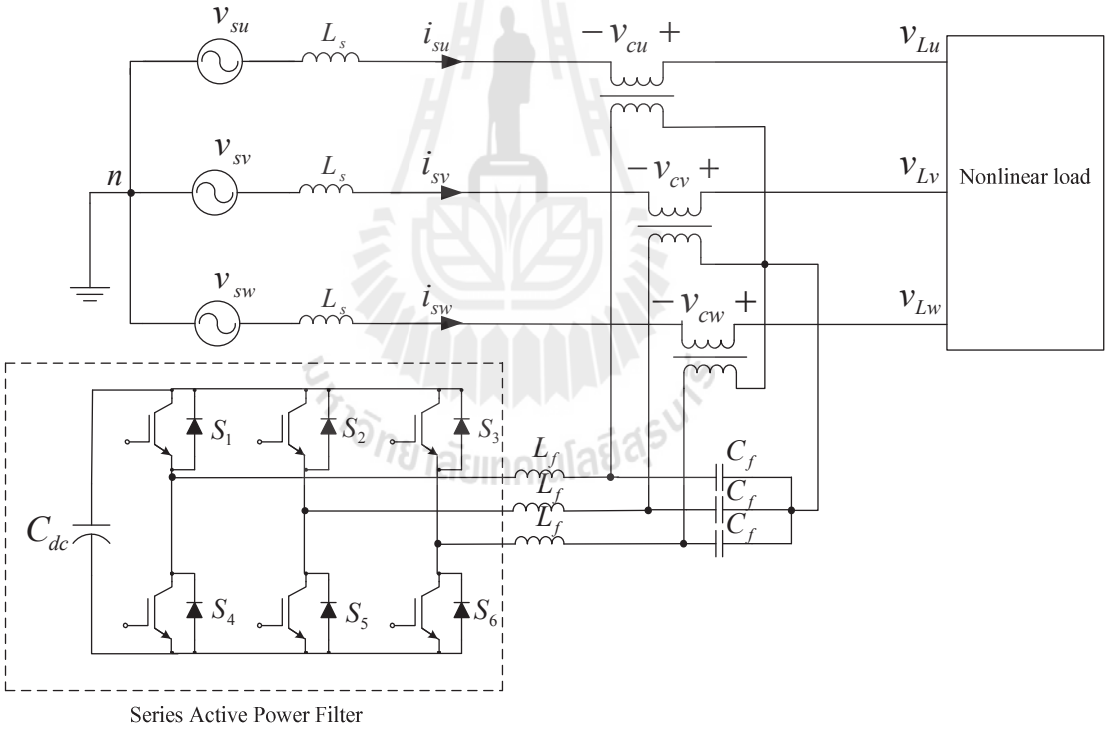
-การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (passive power filter) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งวงจรดังกล่าวทำหน้าที่ดูดซับฮาร์มอนิก ซึ่งปกติจะเป็นฮาร์มอนิกบางอันดับเท่านั้น ชนิดของวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป คือ วงจรกรองแบบดีจูน วงจรกรองแบบจูน และวงจรกรองผ่านสูง (Jou, Wu J-C., and Wu K-D., 2001)

-การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (active power filter) ทำหน้าที่ฉีดแรงดันชดเชยออกมาหักล้างกับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น (Singh, Al-Haddad, and Chandra, 1999) โดยในรูปที่ 3.2 จะเป็นตัวอย่างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมซึ่งทำหน้าที่ชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก

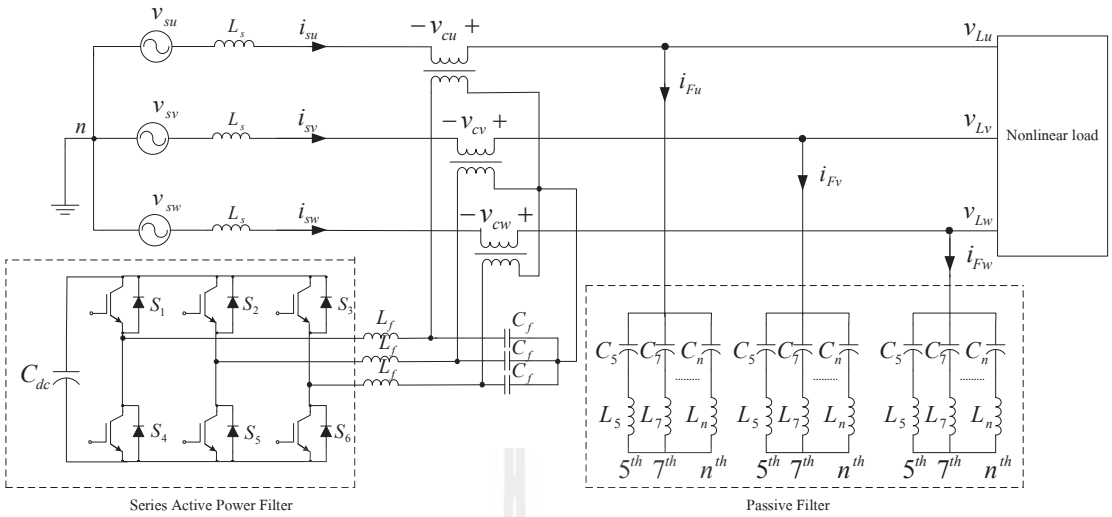
-การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (hybrid power filter) คือ การผสมผสานนำข้อดีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังพาสซีฟมาใช้ร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1 คือ การผสมผสานกันระหว่างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนาน (Na, Jian, and Dianguo, 2006) และในรูปที่ 3.4 เป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 2 คือ การผสมผสานกันระหว่างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบอนุกรม (Peng, and Adams, 1999)



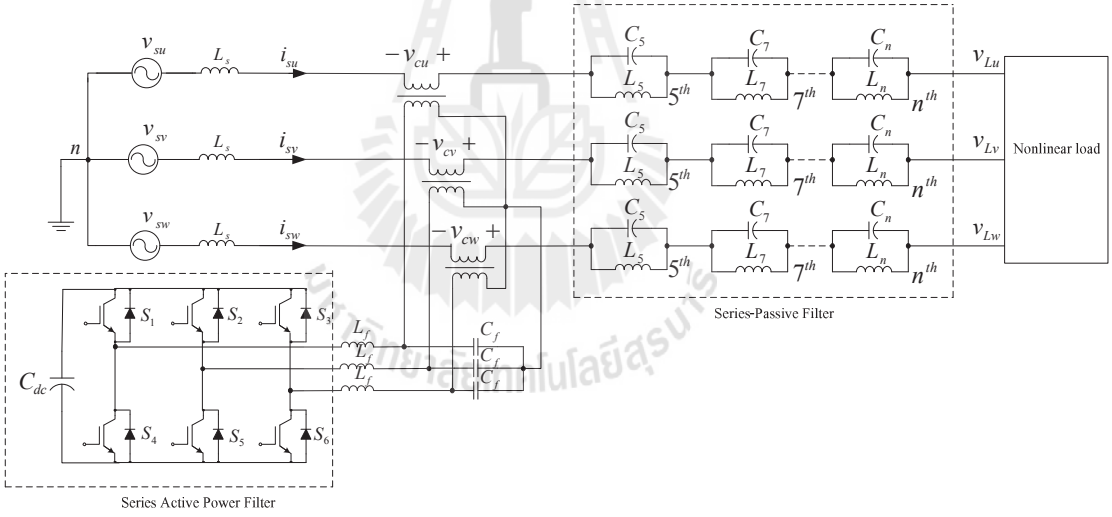
รูปที่ 3.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ



รูปที่ 3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 3.3 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1

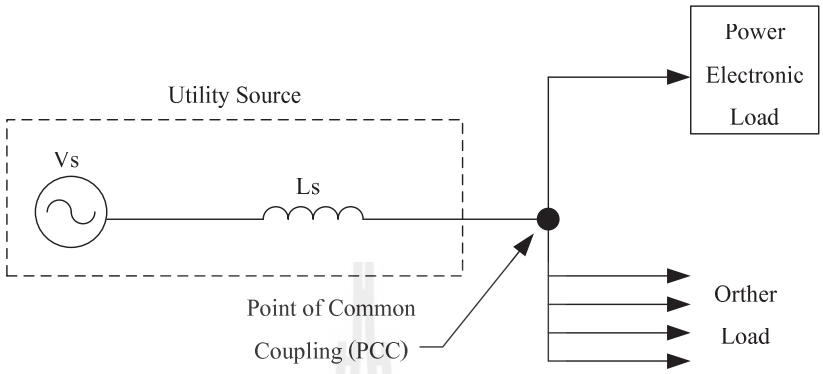


รูปที่ 3.4 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 2

3.8 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่บ่งบอกถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสำหรับอ้างอิงในระดับสากลจะใช้การพิจาณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่

กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในรูปของเปอร์เซนต์ ทั้งขีดจำกัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก และขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE Std 519-1992

มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ได้กำหนดค่าความเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ดังตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Voltage Distortion (THD_V) (%)
≤ 69kV	3.0	5.0
69,001 V-161kV	1.5	2.5
> 161kV	1.0	1.5

จากตารางที่ 3.1 เป็นขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ยอมรับได้ที่จุด PCC และสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจะแบ่งตามระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน ณ จุด PCC ในย่านไม่เกิน 69 kV ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละอันดับจะต้องไม่เกิน 3 % และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THD_V) ของทุกอันดับจะต้องไม่เกิน 5 %

ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					TDD_I (%)
	$n<11$	$11<n<17$	$17<n<23$	$23<n<35$	$35\leq n$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 69,001 V ถึง 161 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					TDD_I (%)
	$n<11$	$11<n<17$	$17<n<23$	$23<n<35$	$35\leq n$	
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

ตารางที่ 3.4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน >161 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					TDD_I (%)
	$n<11$	$11<n<17$	$17<n<23$	$23<n<35$	$35\leq n$	
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

จากตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 I_{SC} คือ ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุด PCC I_L คือ ค่าความต้องการกระแสสูงสุด (ที่ความถี่มูลฐาน) และ *n* คือ อันดับฮาร์มอนิก นอกจากนี้การพิจารณาขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่ (even harmonic limit) ของตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 จะมีค่าเท่ากับ 25% ของขีดจำกัดความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่ (odd harmonic limit) ของแต่ละตาราง และเมื่อพิจารณามาตรฐานจากตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 สังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC จะมีค่าสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ I_{SC}/I_L มีค่าเท่าใด ตัวอย่างเช่น ถ้าระบบจำหน่ายอยู่ในช่วง 120 V ถึง 69 kV มีค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC เท่ากับ 3000 A และมีความต้องการสูงสุด 100 A ดังนั้น ค่าอัตราส่วนของ I_{SC}/I_L คือ 30 ซึ่งจากตารางที่ 3.2 กรอบมาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับ 3 5 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7% ในขณะที่อันดับ 11 13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5% และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมแบบ $\%TDD_I$ (total demand distortion) ต้องไม่เกิน 8% โดยที่ค่า $\%TDD_I$ ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (3-7) ดังนี้

$$\%TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \times 100\% \qquad (3\text{-}7)$$

3.9 สรุป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิกถือเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก การกำจัดฮาร์มอนิก และข้อกำหนดมาตรฐานของฮาร์มอนิกที่ได้นำเสนอในบทนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในบทต่อ ๆ ไป

บทที่ 4
การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

4.1 บทนำ

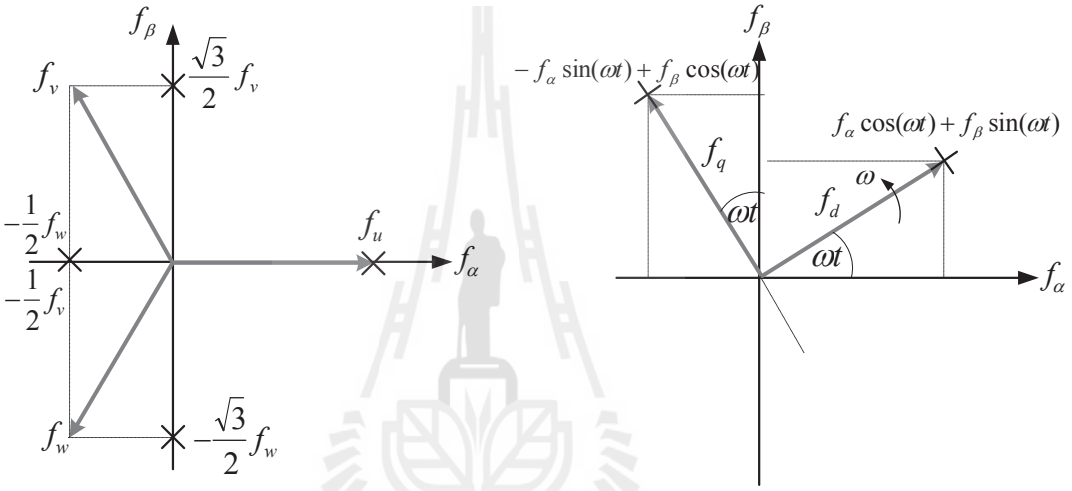
การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และจากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกันทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส วิธีดีคิวเอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ อีกทั้งยังนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว นอกจากนี้ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและมีการทดสอบสมรรถนะการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกทั้ง 6 วิธี

4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว

การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิวใช้หลักการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟส คือ f_u, f_v และ f_w เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน α และ β คือ f_α และ f_β โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-1) ซึ่งสมการดังกล่าวได้ถูกปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ $\sqrt{\frac{2}{3}}$ เนื่องจากการแปลงปริมาณบนแกนสามเฟสไปอยู่บนแกน α และ β ได้คำนึงถึงกฎการอนุรักษ์กำลังงาน (power conserving convention) หลังจากนั้นจึงแปลงปริมาณบนแกน α และ β เป็นปริมาณบนแกนดีคิว คือ f_d และ f_q ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-2) จากสมการดังกล่าวค่า ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที) ที่หมุนด้วยความเร็วตามการกำหนดของผู้วิจัย เพื่อให้สามารถระบุปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ใด ๆ ได้ตามการออกแบบ โดยมีแผนภาพแสดงการแปลงปริมาณต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.1

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} \tag{4-1}$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \tag{4-2}$$



(ก) การแปลงแกนสามเฟสเป็นแกน α และ β (ข) การแปลงแกน α และ β เป็นแกนดีคิว

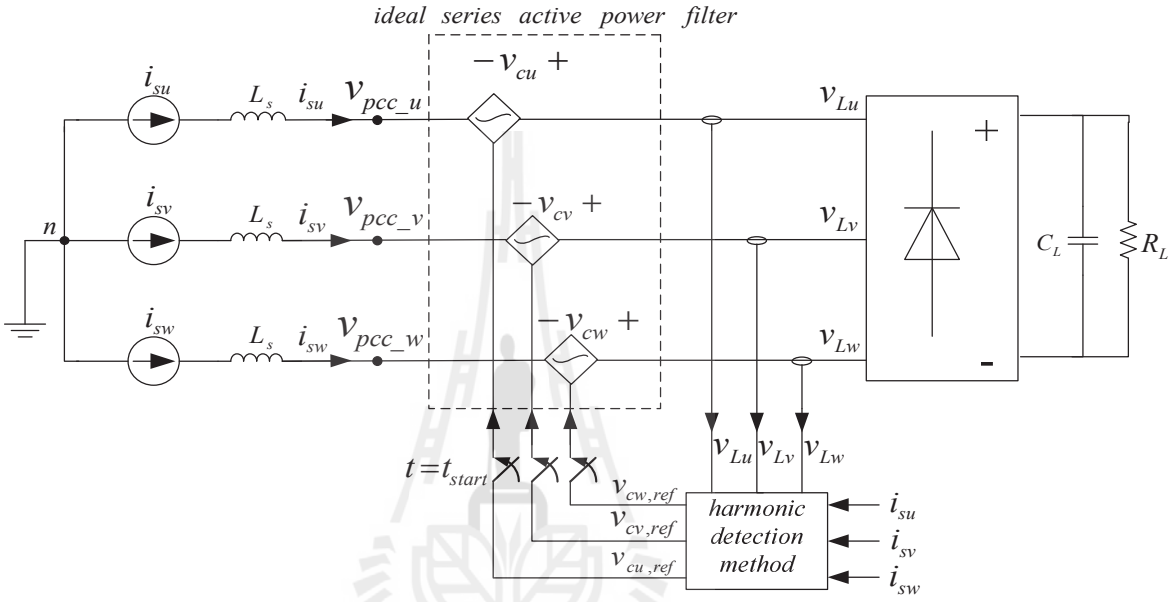
รูปที่ 4.1 แผนภาพการแปลงของปาร์ค

จากรูปที่ 4.1 (ก) งานวิจัยได้พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟสสมดุลดังมุมเฟสของ f_u f_v และ f_w จะทำมุมห่างกัน เท่ากับ $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน จึงไม่พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence) สำหรับแกน α และ β จะต้องทำมุมตั้งฉากโดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส u ในขณะที่แกนดีคิวทำมุมตั้งฉากกันหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω ดังรูปที่ 4.1 (ข)

4.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

การจำลองสถานการณ์ในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก จึงไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวควบคุมการฉีดแรงดันชดเชย การ

ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ดังนั้นจึงเลือกใช้การจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอุดมคติ ซึ่งทำหน้าที่ฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ คือ ค่าแรงดันชดเชยจะมีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ

การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากรูปดังกล่าวใช้แหล่งจ่ายกระแสขนาด 17 แอมแปร์ต่อเฟส ตัวเหนี่ยวนำทางด้านแหล่งจ่าย (L_s) เท่ากับ 0.1 mH ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 0.1 MΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ 1 μF โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (Kim, Kim, and Ko, 2004) บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกจึงเข้ามามีบทบาทเพื่อตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงบนแกนสามเฟส ($v_{cu,ref}$, $v_{cv,ref}$, $v_{cw,ref}$) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอุดมคติ ค่าแรงดันชดเชย (v_{cu}, v_{cv}, v_{cw}) จะมีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับ และเมื่อพิจารณาการฉีดแรงดันชดเชยของเฟส u จะมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (4-3)

$$v_{pcc_u} = v_{Lu} - v_{cu} \tag{4-3}$$

จากสมการที่ (4-3) เมื่อพิจารณาการทำงานในเฟส u ที่ไม่มีการฉีดแรงดันชดเชย (v_{cu}) ค่าแรงดันที่จุด PCC (v_{pcc_u}) จะเท่ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลด (v_{Lu}) ซึ่งจะมีการผิดเพี้ยนของรูปร่างสัญญาณ จึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ แต่ถ้าทำการฉีดแรงดันชดเชยดังสมการที่ (4-3) ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดหักลบค่าแรงดันชดเชยจึงทำให้ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นส่งผลให้รูปสัญญาณมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลดน้อยลง ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานจะยังคงเท่าเดิม สำหรับผลการทดสอบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในแต่ละเฟส (Total Harmonic Voltage Distortion: $\%THD_{v,k}$) ดังสมการที่ (4-4) โดยการเฉลี่ยเป็น $\%THD_{v,av}$ ตามสมการที่ (4-5) เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

$$\%THD_{v,k} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} v_n^2}{v_1}} \times 100\% \tag{4-4}$$

$$\%THD_{v,av} = \frac{\sum_{k=u,v,w} \%THD_{v,k}}{3} \tag{4-5}$$

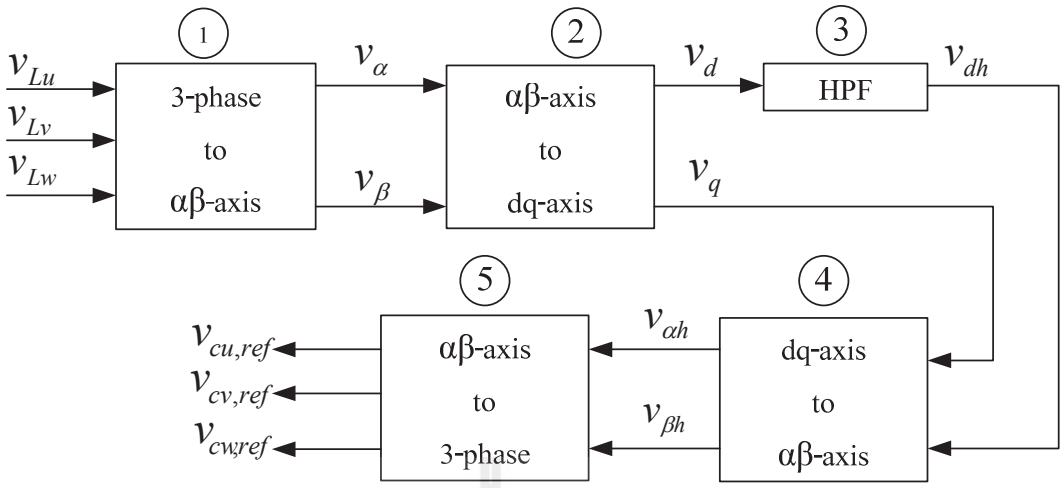
จากสมการข้างต้น v_n คือ ค่าของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

v_1 คือ ค่าของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

k คือ เฟสของแรงดัน

4.4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส หรือวิธี SRF (Liccardo, Marino, Schiano and Visciano, 2003) มีแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.3 โดยรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

ขั้นตอนที่ 1 แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่โหลด คือ v_{Lu} , v_{Lv} และ v_{Lw} เป็นแรงดันไฟฟ้า บนแกน α และ β (v_α , v_β) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-6)

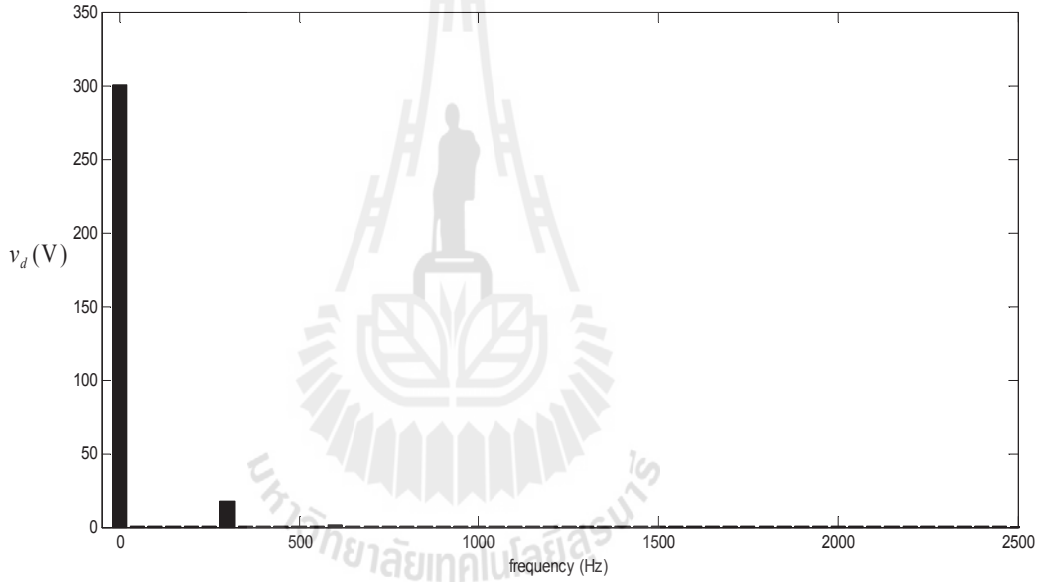
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Lu} \\ v_{Lv} \\ v_{Lw} \end{bmatrix} \tag{4-6}$$

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้แรงดันไฟฟ้าบนแกน α และ β จะดำเนินการแปลงค่าไปอยู่บนแกนหมุนดีคิว (v_d , v_q) ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-7) โดยค่า ω ที่ปรากฏในสมการมีค่าเท่ากับความถี่มูลฐานของระบบ ซึ่ง v_d และ v_q จะหมุนด้วยอัตราเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน ในประเทศไทยมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ หรือ 314.16 เรเดียนต่อวินาที

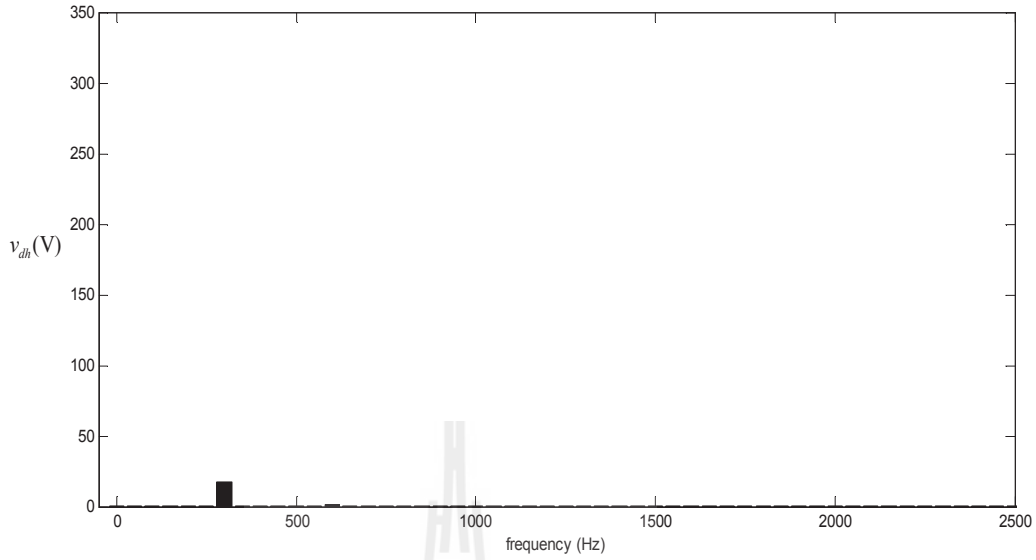
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \tag{4-7}$$

ขั้นตอนที่ 3 คือ การแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐาน เมื่อพิจารณาบนแกนหมุนดีแรงดันที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่แรงดันฮาร์มอนิก

เปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ ด้วยเหตุนี้การแยกปริมาณฮาร์มอนิก (v_{dh}) ออกจากแรงดันรวมบนแกนดีสามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีดังรูปที่ 4.4 (ก) จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานจะปรากฏที่ 0 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นสัญญาณกระแสตรงในขณะที่ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกจะปรากฏที่ความถี่อื่น ๆ ที่มากกว่า 0 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นสัญญาณกระแสสลับ การแยกปริมาณทั้งสองออกจากกันจะใช้วงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกความถี่ตัดของ HPF ที่ 5 เฮิรตซ์ และภายหลังผ่าน HPF สเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีจะเป็นดังรูปที่ 4.4 (ข) (รายละเอียดที่มาของปริมาณฮาร์มอนิกบนแกนดีคิวแสดงไว้ในภาคผนวก ก.)



(ก) ก่อนผ่าน HPF



(ข) หลังผ่าน HPF

รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการแปลงปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดีคิวไปบนแกน α และ β ($v_{\alpha h}$, $v_{\beta h}$) โดยอาศัยเมตริกซ์การแปลงดังสมการที่ (4-8)

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha h} \\ v_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dh} \\ v_{q} \end{bmatrix} \tag{4-8}$$

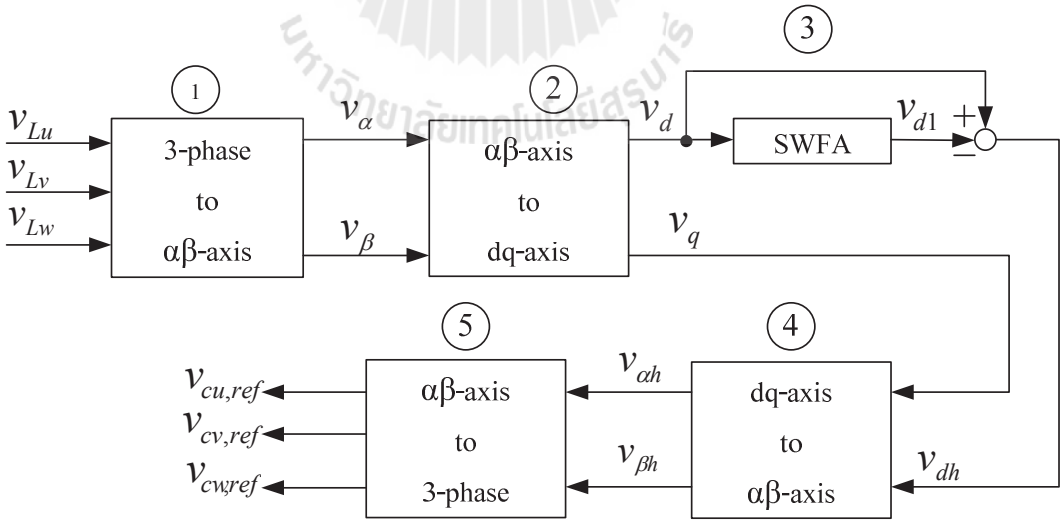
ขั้นตอนที่ 5 คือ การคำนวณแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($v_{cu,ref}$, $v_{cv,ref}$, $v_{cw,ref}$) ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยใช้เมตริกซ์การแปลงดังสมการที่ (4-9)

$$\begin{bmatrix} v_{cu,ref} \\ v_{cv,ref} \\ v_{cw,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha h} \\ v_{\beta h} \end{bmatrix} \tag{4-9}$$

4.5 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ หรือวิธี DQF ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาจะมีการใช้วิธี DQF ในการหาค่ากระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Sujitjorn, Areerak, and Kulworawanichpong, 2007)(กองพล, 2549) และเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี SRF ซึ่งแผนภาพการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จะแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยสังเกตได้ว่าวิธี DQF จะแตกต่างจากวิธี SRF ในส่วนของการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดี ออกจากปริมาณที่ความถี่มูลฐานโดยวิธี DQF จะใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis: SWFA) ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรกรองผ่านสูง

การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดี จะเริ่มพิจารณาจากสมการที่ (4-10) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูริเยร์ ซึ่งในสมการที่ (4-10) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันกระแสตรง และองค์ประกอบของแรงดันกระแสสลับ ในการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกออกจากปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน (v_{d1}) ซึ่งปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานพิจารณาได้จากสมการที่ (4-11) โดยจะคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรงเท่านั้น ซึ่งการคำนวณหาค่า A_{0d} คำนวณได้จากการแทนค่า $h=0$ ในสมการที่ (4.12) เมื่อพิจารณาที่ความถี่มูลฐานในสมการที่ (4-12) จะได้ดังสมการที่ (4-13) ซึ่งการคำนวณ



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

เริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของ A_{0d} โดยการรับข้อมูลแรงดัน v_d มาหนึ่งคาบ ซึ่งในหนึ่งคาบจะมีทั้งหมด N ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (4-13) หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแถวลำดับ ส่วนในรอบการทำงานถัดไปเริ่มต้นจากการรับข้อมูลแรงดัน v_d ค่าใหม่ ($v_d(N_0+N)$) และลบข้อมูลแรงดัน v_d ค่าเก่า ($v_d(N_0-1)$) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ค่าใหม่ ($A_{0d}{}^{(new)}$) ดังสมการที่ (4-14) โดยที่ $A_{0d}{}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}{}^{(new)}$ ในทุกรอบของการรับข้อมูลค่าแรงดัน v_d ค่าใหม่ทำให้ได้ค่าแรงดัน v_{d1} ในทุกรอบการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที หลังจากที่คำนวณค่าแรงดัน v_{d1} นำค่าแรงดันดังกล่าวไปหักลบออกจากค่าแรงดัน v_d จะได้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนดี (v_{dh}) หลังจากนั้นดำเนินการคำนวณแรงดันอ้างอิงตามขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 ในวิธีการของ SRF สำหรับรายละเอียดการคำนวณด้วยวิธี SWFA นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.6

$$v_d(kT) = \frac{A_{0d}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty}[A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{4-10}$$

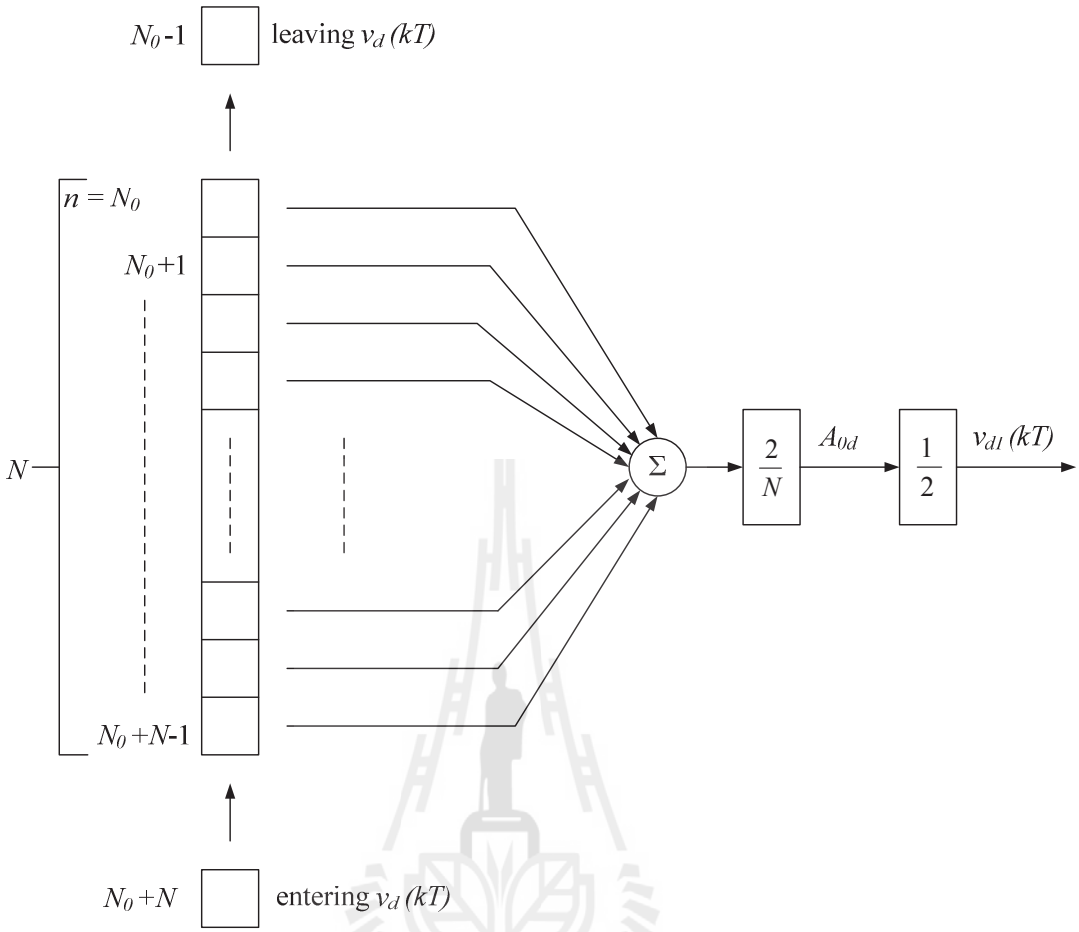
$$v_{d1}(kT) = \frac{A_{0d}}{2} \tag{4-11}$$

$$A_h = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} v_d(nT)\cos(n\omega kT) \tag{4-12}$$

$$A_{0d} = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} v_d(nT) \tag{4-13}$$

$$\left[A_{0d}{}^{(new)}\right] = \left[A_{0d}{}^{(old)}\right] - \frac{2}{N}\left[v_d[N_0-1]T\right] + \frac{2}{N}\left[v_d[N_0+N]T\right] \tag{4-14}$$

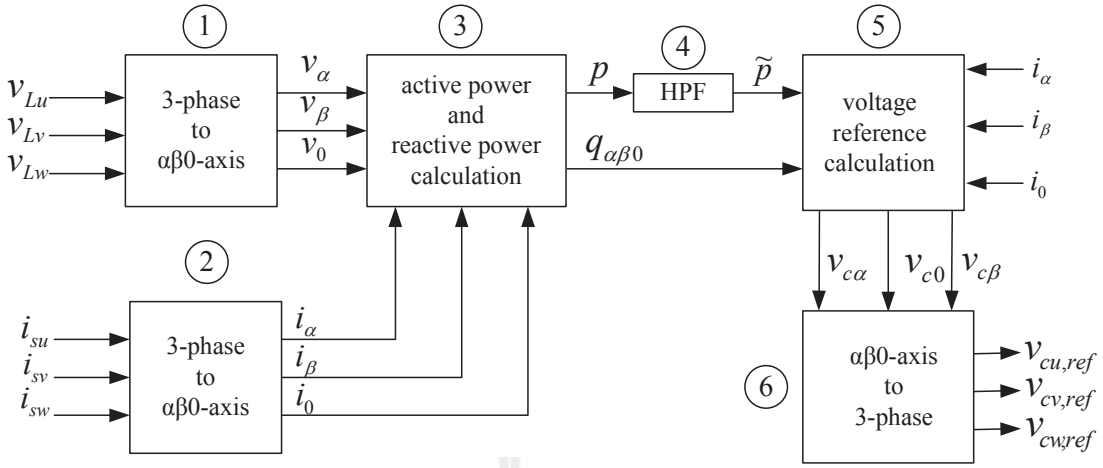
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.6 แผนภาพคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณแรงดันที่ความถี่มูลฐานบนแกนดี

4.6 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ (Young-Seok, Jin-Sun and Soo-Hyun, 2003) มีแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) เป็นแรงดันไฟฟ้าบนแกน α, β และ 0 (v_α, v_β, v_0) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-15)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Lu} \\ v_{Lv} \\ v_{Lw} \end{bmatrix} \tag{4-15}$$

ขั้นตอนที่ 2 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส (i_{su}, i_{sv}, i_{sw}) เป็นกระแสไฟฟ้าบนแกน α, β และ 0 (i_α, i_β, i_0) โดยใช้เมตริกซ์การแปลงแกนดังสมการที่ (4-16)

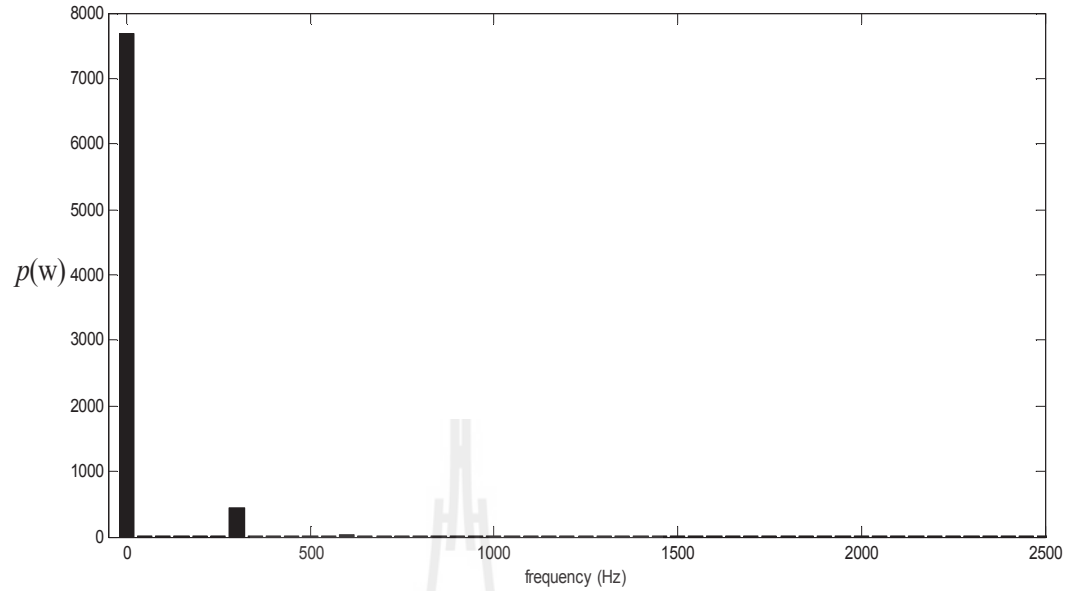
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix} \tag{4-16}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบนแกน α , β และ 0 (q_α, q_β, q_0) ดังสมการที่ (4-17) และ (4-18) ตามลำดับ

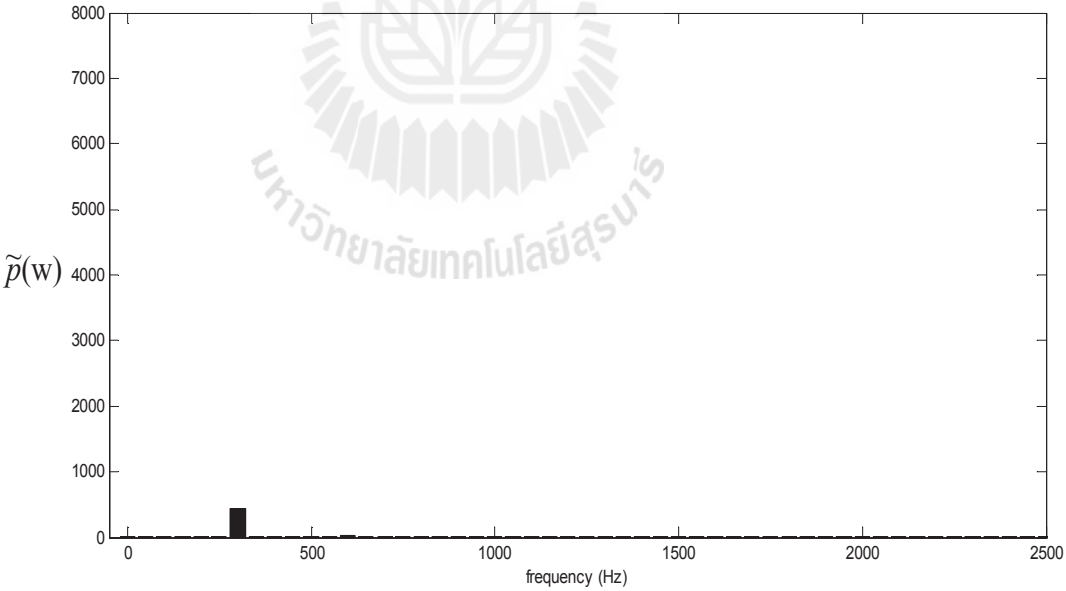
$$p = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \tag{4-17}$$

$$\begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\beta i_0 - v_0 i_\beta \\ v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \tag{4-18}$$

ขั้นตอนที่ 4 ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง ($\bar{p}$) ซึ่งเป็นปริมาณมูลฐาน และองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ ($\tilde{p}$) ซึ่งเป็นปริมาณฮาร์มอนิก การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานพิจารณาได้จากสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้ดังรูปที่ 4.8 (ก) โดยในรูปดังกล่าวปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานจะปรากฏที่ความถี่ 0 เฮิรตซ์ และปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกที่ความถี่อื่น ๆ จะปรากฏที่มากกว่า 0 เฮิรตซ์ โดยการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ HPF ในการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกและผู้วิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ความถี่ตัดที่ 5 เฮิรตซ์ (รายละเอียดของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟแสดงไว้ในภาคผนวก ข.) หลังจากผ่าน HPF จะได้ปริมาณฮาร์มอนิกซึ่งพิจารณาได้จากสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟดังรูปที่ 4.8 (ข)



(ก) ก่อนผ่าน HPF



(ข) หลังผ่าน HPF

รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าแรงดันแอกทีฟ ($\mathbf{v}_{ph(\alpha\beta0)}$) และค่าแรงดันรีแอกทีฟ ($\mathbf{v}_{q(\alpha\beta0)}$) ดังสมการที่ (4-19) และสมการที่ (4-20) ตามลำดับ หลังจากนั้นคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงบนแกน α, β และ 0 ($v_{c\alpha}, v_{c\beta}, v_{c0}$) ดังสมการที่ (4-21)

$$\mathbf{v}_{ph(\alpha\beta0)} = \frac{\tilde{p}}{\mathbf{i}_{\alpha\beta0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta0}} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta0} \tag{4-19}$$

$$\mathbf{v}_{q(\alpha\beta0)} = \frac{q_{\alpha\beta0} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta0}}{\mathbf{i}_{\alpha\beta0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta0}} \tag{4-20}$$

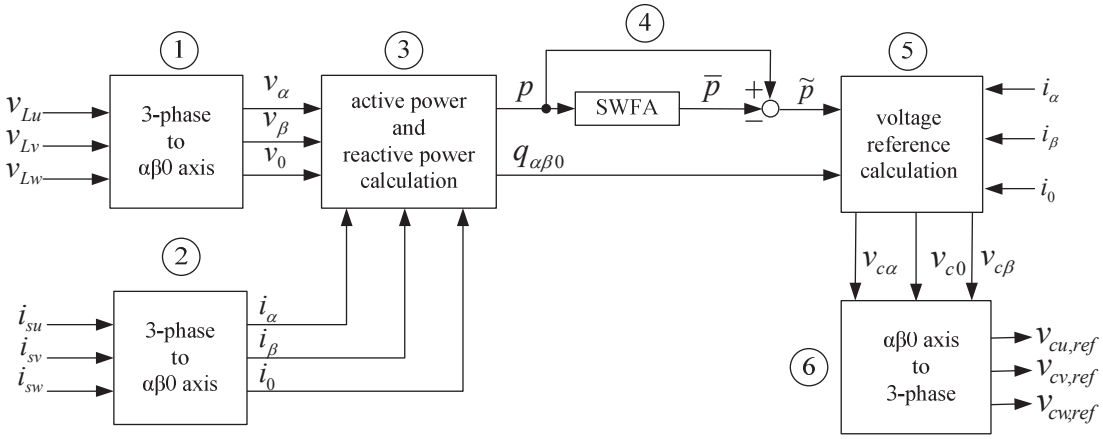
$$\mathbf{v}_{c(\alpha\beta0)} = \mathbf{v}_{ph(\alpha\beta0)} + \mathbf{v}_{q(\alpha\beta0)} \tag{4-21}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสามเฟสโดยดำเนินการแปลงปริมาณแรงดันอ้างอิงบนแกน α, β และ 0 ให้ไปอยู่บนแกนสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ดังสมการที่ (4-22)

$$\begin{bmatrix} v_{cu,ref} \\ v_{cv,ref} \\ v_{cw,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \tag{4-22}$$

4.7 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF เป็นการพัฒนาต่อยอดจากวิธี PQ ซึ่งแผนภาพการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF จะแสดงดังรูปที่ 4.9 ในการคำนวณหาค่าแรงดันด้วยวิธี PQF จะแตกต่างจากวิธี PQ ในส่วนของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังแอกทีฟ ออกจากปริมาณที่ความถี่มูลฐาน โดยวิธี PQF จะใช้ SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรกรองผ่านสูง



รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF

การแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟด้วย SWFA นี้ได้แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.10 โดยวิธีการของ SWFA จะคล้ายคลึงกับการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดีด้วยวิธีดีคิวเอฟในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งกระบวนการ SWFA เริ่มต้นจากการพิจารณาสมการที่ (4-23) ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เป็นปริมาณกระแสตรงและกระแสสลับ ในการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF จะคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ A_0 เท่านั้น ซึ่งการคำนวณหาค่า A_0 คำนวณได้จากการแทนค่า $h=0$ ในสมการที่ (4-24) ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน ($\bar{p}$) คำนวณได้ดังสมการที่ (4-25) ค่า A_{0p} คำนวณได้จากสมการที่ (4-26) ซึ่งการคำนวณเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของ A_{0p} โดยการรับข้อมูลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ p มาหนึ่งคาบ ซึ่งในหนึ่งคาบจะมีทั้งหมด N ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (4-26) หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแถวลำดับส่วนในรอบการทำงานถัดไปเริ่มต้นจากการรับข้อมูลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ p ค่าใหม่ ($p(N_0+N)$) และลบข้อมูลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ p ค่าเก่า ($p(N_0-1)$) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0p} ค่าใหม่ ($A_{0p}{}^{(new)}$) ดังสมการที่ (4-27) โดยที่ $A_{0p}{}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_{0p} ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0p}{}^{(new)}$ ในทุกรอบของการรับข้อมูลกำลังไฟฟ้าแอกทีฟค่าใหม่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน $\bar{p}$ ในทุกรอบการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที หลังจากที่คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน $\bar{p}$ จะนำค่ากำลังดังกล่าวไปหักลบออกจากค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ p จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก $\tilde{p}$ เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกจะดำเนินการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงตามขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6 ในวิธีการของ PQ

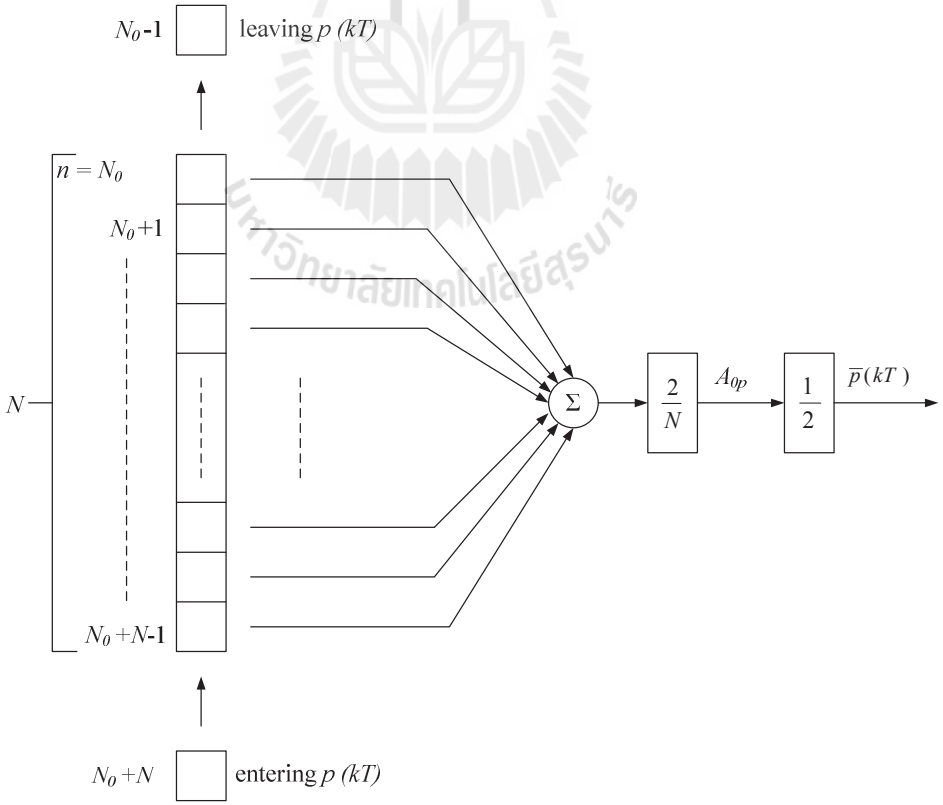
$$p(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty}\left[A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)\right] \tag{4-23}$$

$$A_h = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p(nT)\cos(n\omega kT) \tag{4-24}$$

$$\overline{p}(kT) = \frac{A_{0p}}{2} \tag{4-25}$$

$$A_{0p} = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p(nT) \tag{4-26}$$

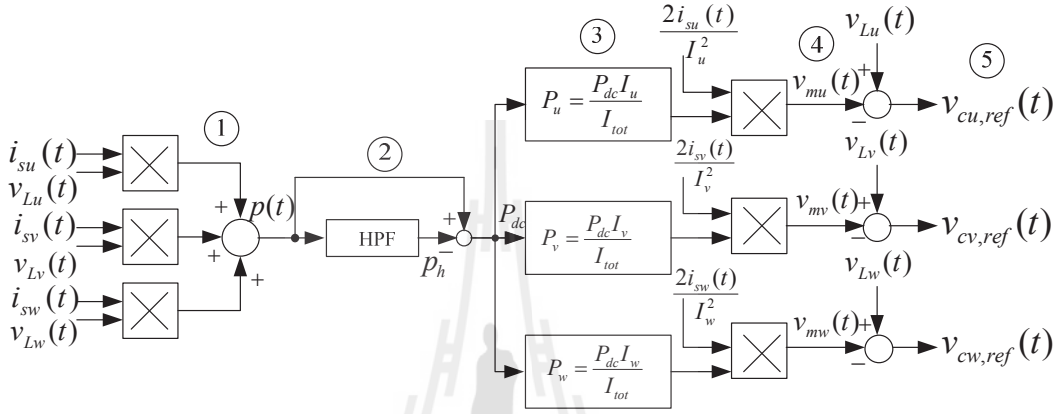
$$\left[A_{0p}{}^{(new)}\right] = \left[A_{0p}{}^{(old)}\right] - \frac{2}{N}\left[p\left[N_0 - 1\right]T\right] + \frac{2}{N}\left[p\left[N_0 + N\right]T\right] \tag{4-27}$$



รูปที่ 4.10 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และคำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน

4.8 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส หรือวิธี SD (Chang and chen, 2006) มีแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 โดยรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.11 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟในแต่ละเฟส และนำค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟในแต่ละเฟสมารวมกันจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม $p(t)$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-28)

$$p(t) = v_{Lu}(t)i_{su}(t) + v_{Lv}(t)i_{sv}(t) + v_{Lw}(t)i_{sw}(t) \tag{4-28}$$

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการแยกปริมาณมูลฐาน (องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง: P_{dc}) ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมออกจากปริมาณฮาร์มอนิก (องค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ: p_h) โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (HPF) เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกนสามเฟสกับค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกน α, β และ 0 พบว่าจะมีปริมาณแอมพลิจูดและความถี่ของอันดับฮาร์มอนิกแต่ละอันดับมีค่าเท่ากัน ในการเลือกความถี่ตัดผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกที่ความถี่ 5 เฮิรตซ์ (รายละเอียดของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟแสดงไว้ในภาคผนวก ข.) และสามารถพิจารณาสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูงได้จากรูปที่ 4.8 ในหัวข้อที่ 4.6

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟแต่ละเฟส (P_u, P_v, P_w) จากสมการที่ (4-29) ถึงสมการที่ (4-31) โดยค่า I_u, I_v และ I_w คือ ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส ในขณะที่ I_{tot} คือ ผลรวมของ I_u, I_v, I_w ($I_{tot} = I_u + I_v + I_w$)

$$P_u = \frac{P_{dc} I_u}{I_{tot}} \tag{4-29}$$

$$P_v = \frac{P_{dc} I_v}{I_{tot}} \tag{4-30}$$

$$P_w = \frac{P_{dc} I_w}{I_{tot}} \tag{4-31}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส ($v_{mu}(t), v_{mv}(t)$, $v_{mw}(t)$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-32) ถึงสมการที่ (4-34)

$$v_{mu}(t) = \frac{2 i_{su}(t) P_u}{I_u^2} \tag{4-32}$$

$$v_{mv}(t) = \frac{2 i_{sv}(t) P_v}{I_v^2} \tag{4-33}$$

$$v_{mw}(t) = \frac{2 i_{sw}(t) P_w}{I_w^2} \tag{4-34}$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($v_{cu,ref}(t), v_{cv,ref}(t), v_{cw,ref}(t)$) จากสมการที่ (4-35) ถึงสมการที่ (4-37)

$$v_{cu,ref}(t) = v_{Lu}(t) - v_{mu}(t) \tag{4-35}$$

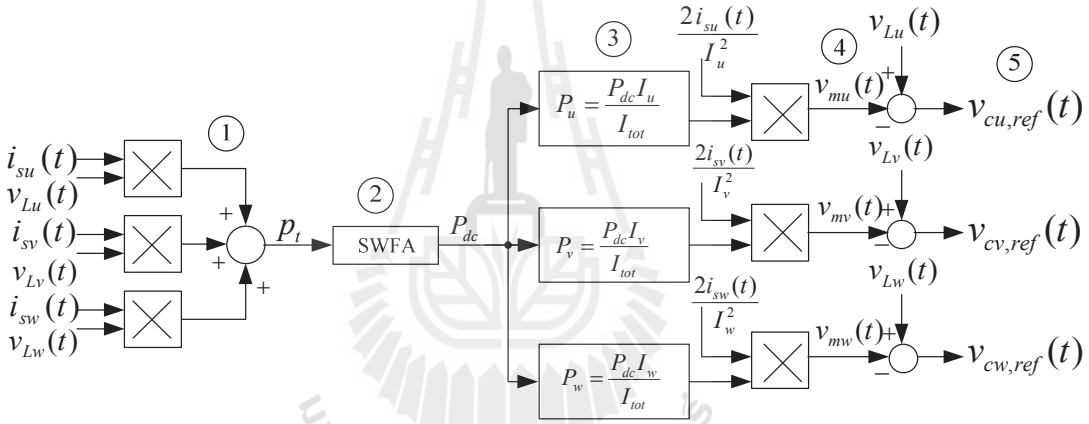
$$v_{cv,ref}(t) = v_{Lv}(t) - v_{mv}(t) \tag{4-36}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$v_{cw,ref}(t) = v_{Lw}(t) - v_{mw}(t) \tag{4-37}$$

4.9 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี SDF เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี SD ในหัวข้อที่ 4.8 โดยมีแผนภาพการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.12 ในการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี SDF จะแตกต่างจากวิธี SD ในส่วนของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมออกจากปริมาณที่ความถี่มูลฐาน โดยใช้ SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรกรองผ่านสูง



รูปที่ 4.12 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF

การแยกปริมาณมูลฐานของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม (p_t) ด้วยวิธี SWFA นี้ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.13 โดยวิธีการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมจะคล้ายคลึงกับการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในหัวข้อที่ 4.7 และในสมการที่ (4-38) ถึงสมการที่ (4-42) จึงดำเนินการเช่นเดียวกับการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในหัวข้อที่ 4.7 เมื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม P_{dc} ที่ได้จากวิธีการ SWFA จึงดำเนินการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงตามขั้นตอนที่ 3-5 ในวิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธี SD ต่อไป

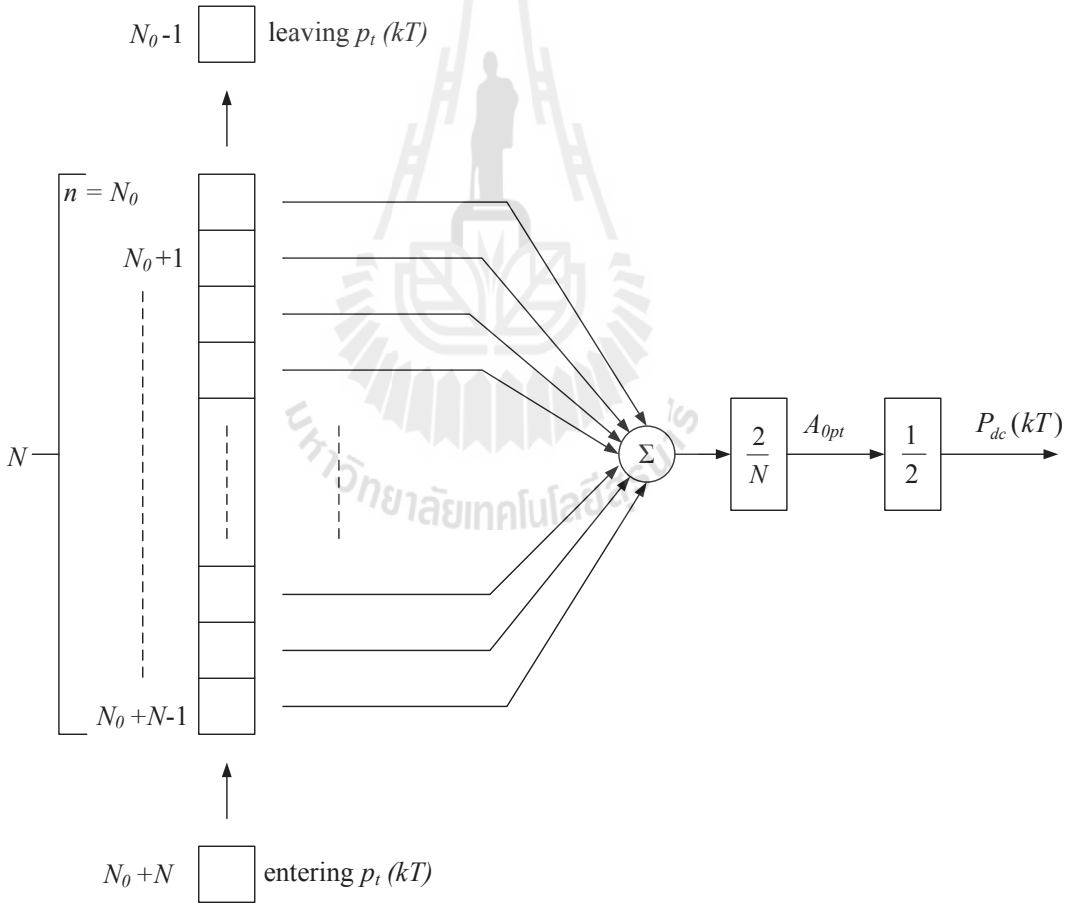
$$p_t(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \left[A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT) \right] \tag{4-38}$$

$$A_h = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_t(nT)\cos(n\omega kT) \tag{4-39}$$

$$P_{dc}(kT) = \frac{A_{0p}}{2} \tag{4-40}$$

$$A_{0p_t} = \frac{2}{N}\sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_t(nT) \tag{4-41}$$

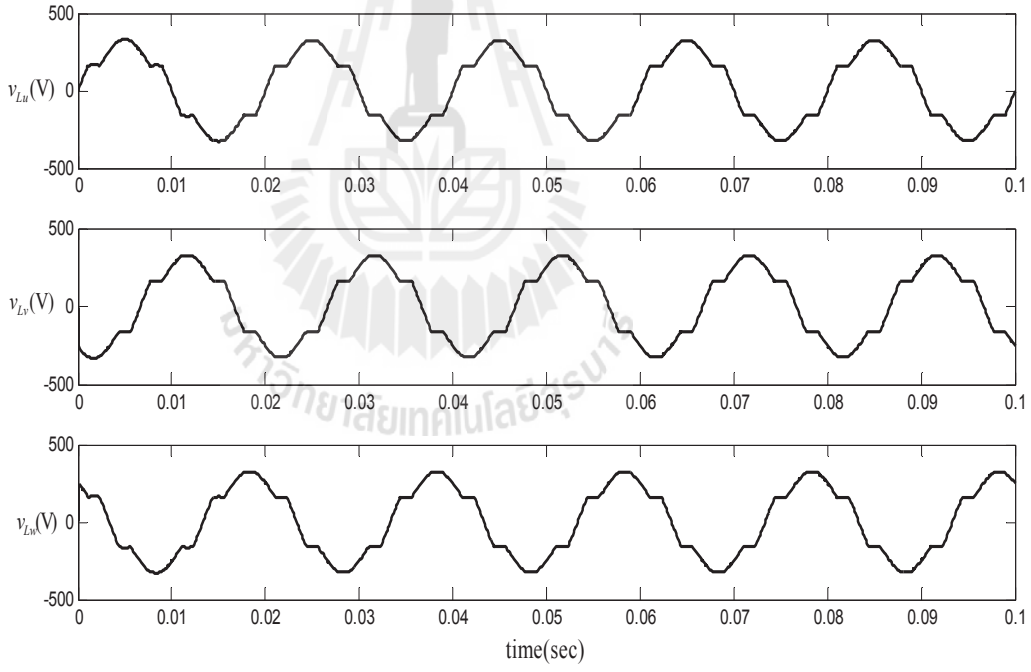
$$\left[A_{0p_t}{}^{(new)}\right] = \left[A_{0p_t}{}^{(old)}\right] - \frac{2}{N}\left[p_t[N_0-1]T\right] + \frac{2}{N}\left[p_t[N_0+N]T\right] \tag{4-42}$$



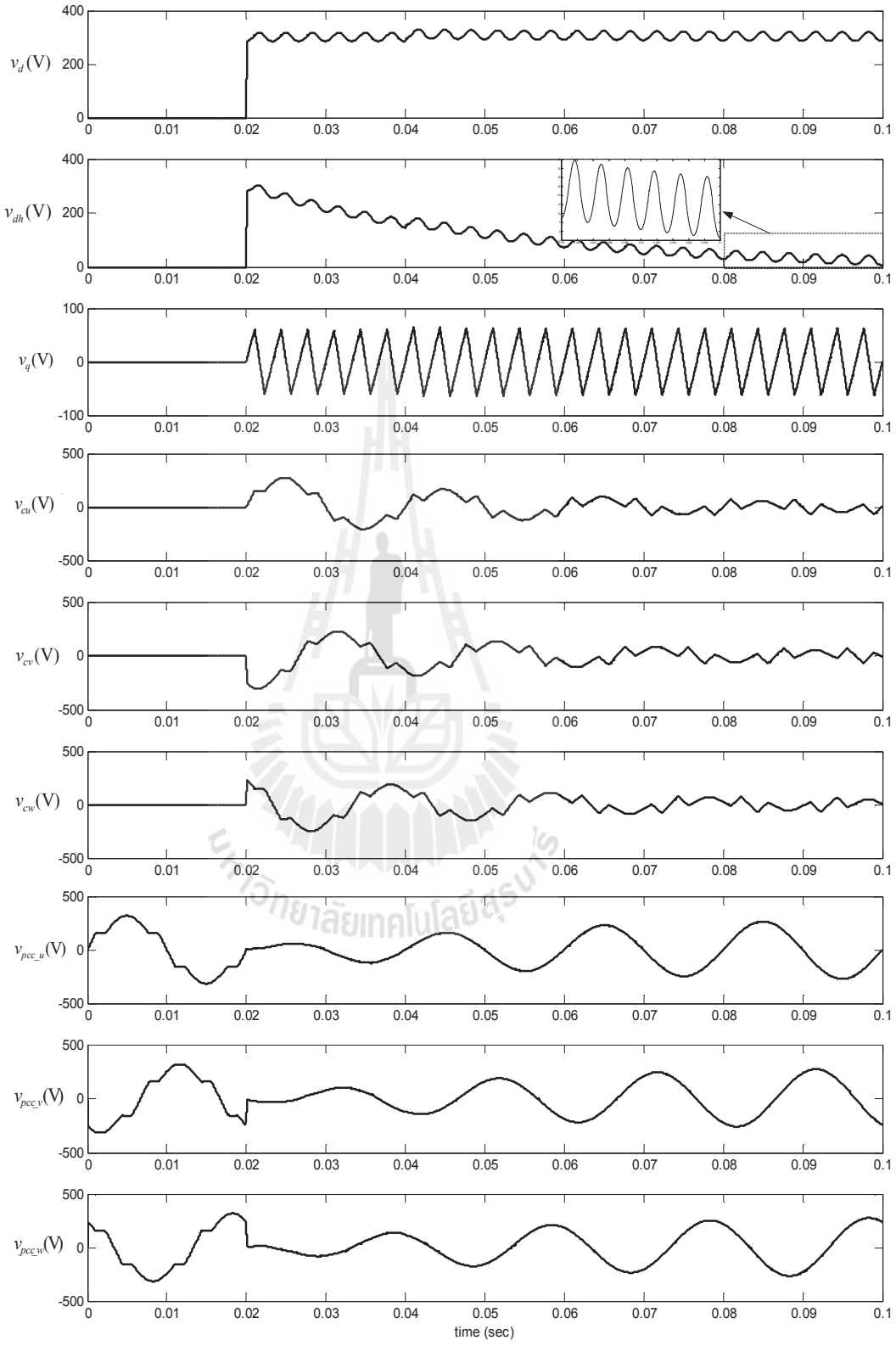
รูปที่ 4.13 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณกำลังแอกทีฟรวมที่ความถี่มูลฐาน

4.10 ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

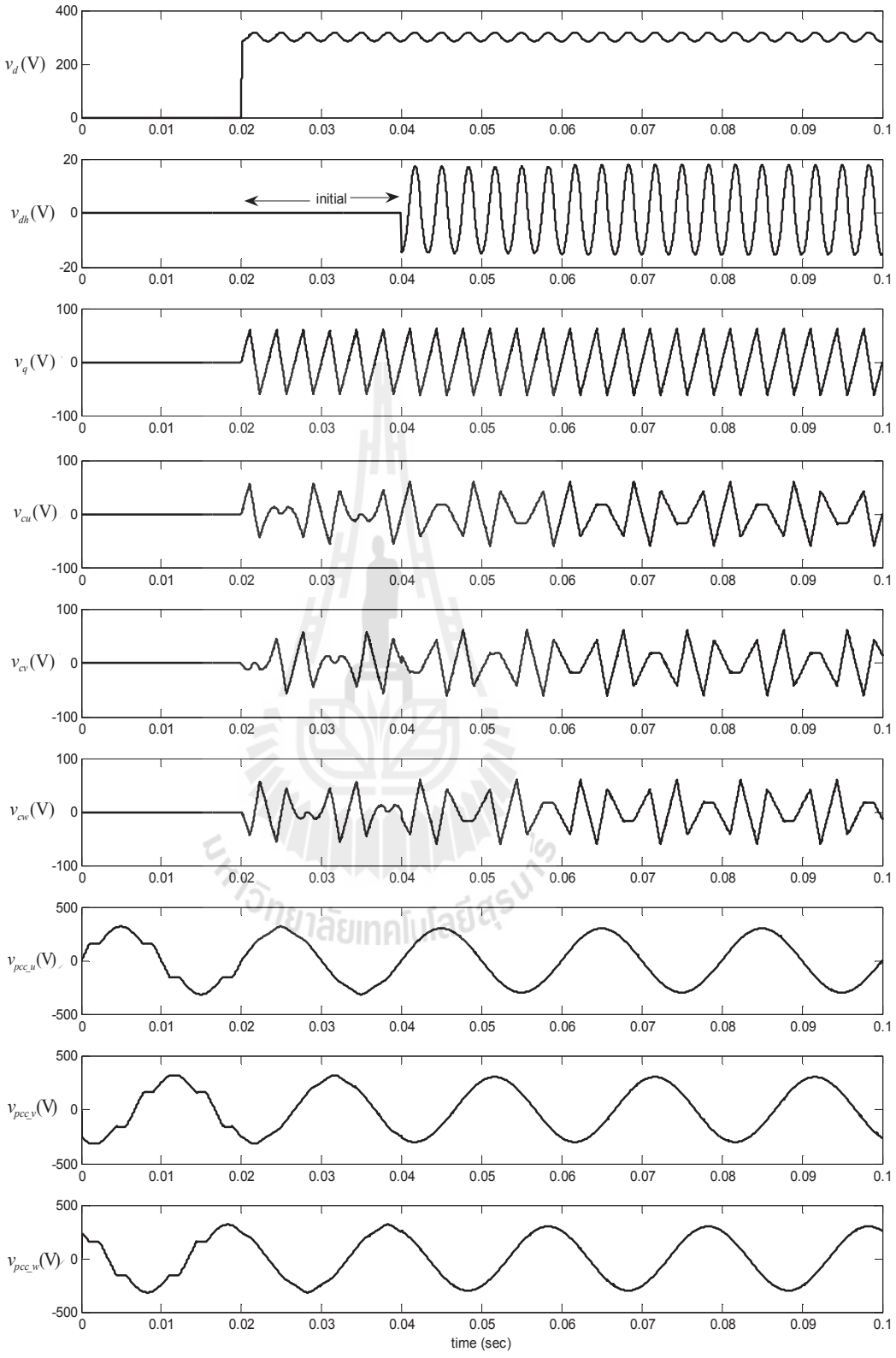
การจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โครงสร้างการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.2 โดยดัชนีชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกใช้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในแต่ละเฟสภายหลังการชดเชย ($\%THD_{v,av}$) ตามสมการที่ (4.5) เป็นสำคัญ เมื่อพิจารณาแรงดันที่จุด PCC ก่อนการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก แรงดันดังกล่าวจะเหมือนกับแรงดันสามเฟสที่โหลด (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14 โดยโหลดดังกล่าวเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ต่อกับตัวเก็บประจุขนานกับตัวต้านทาน ซึ่งโหลดประเภทนี้จะทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.14 แรงดันสามเฟสก่อนการชดเชย



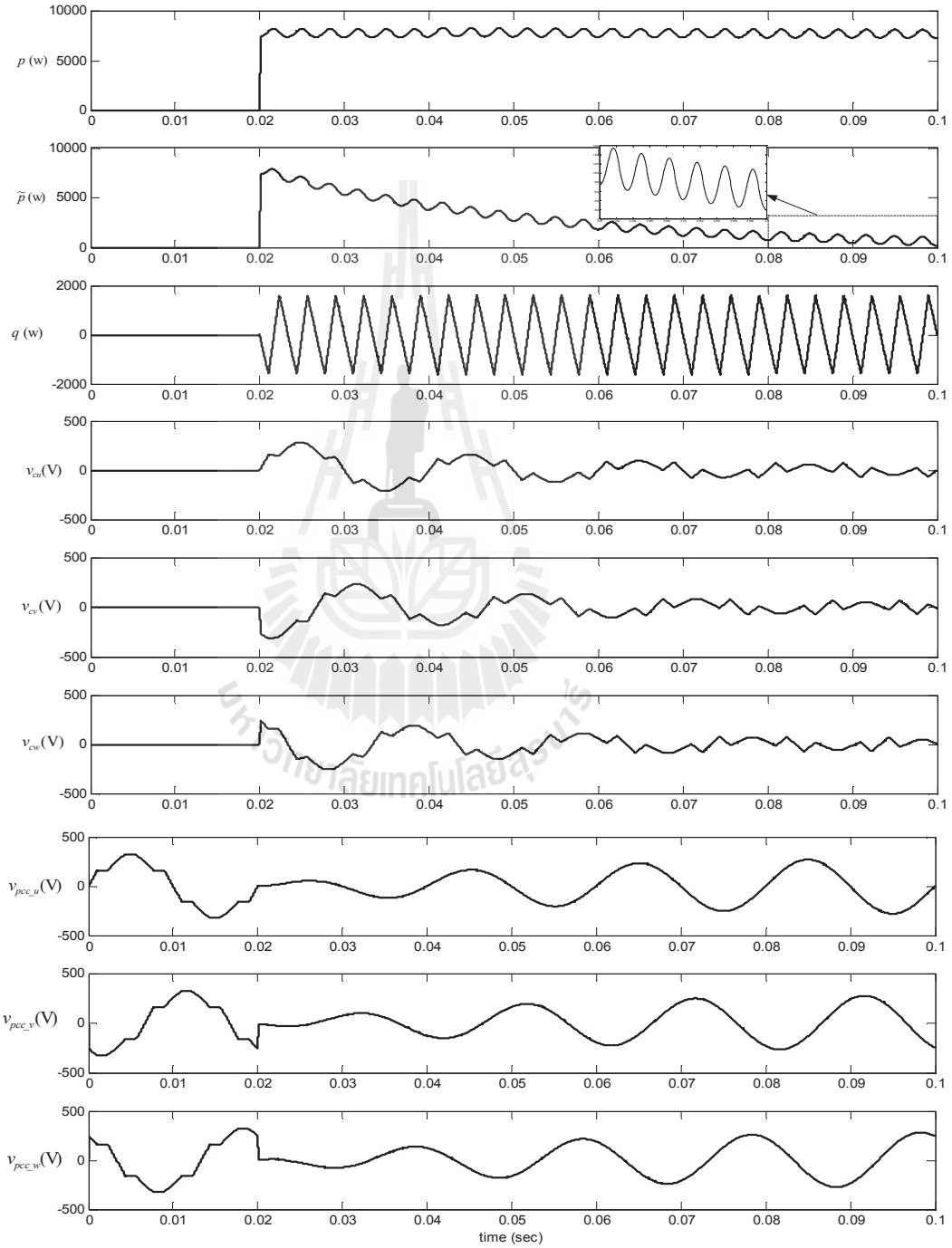
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SRF



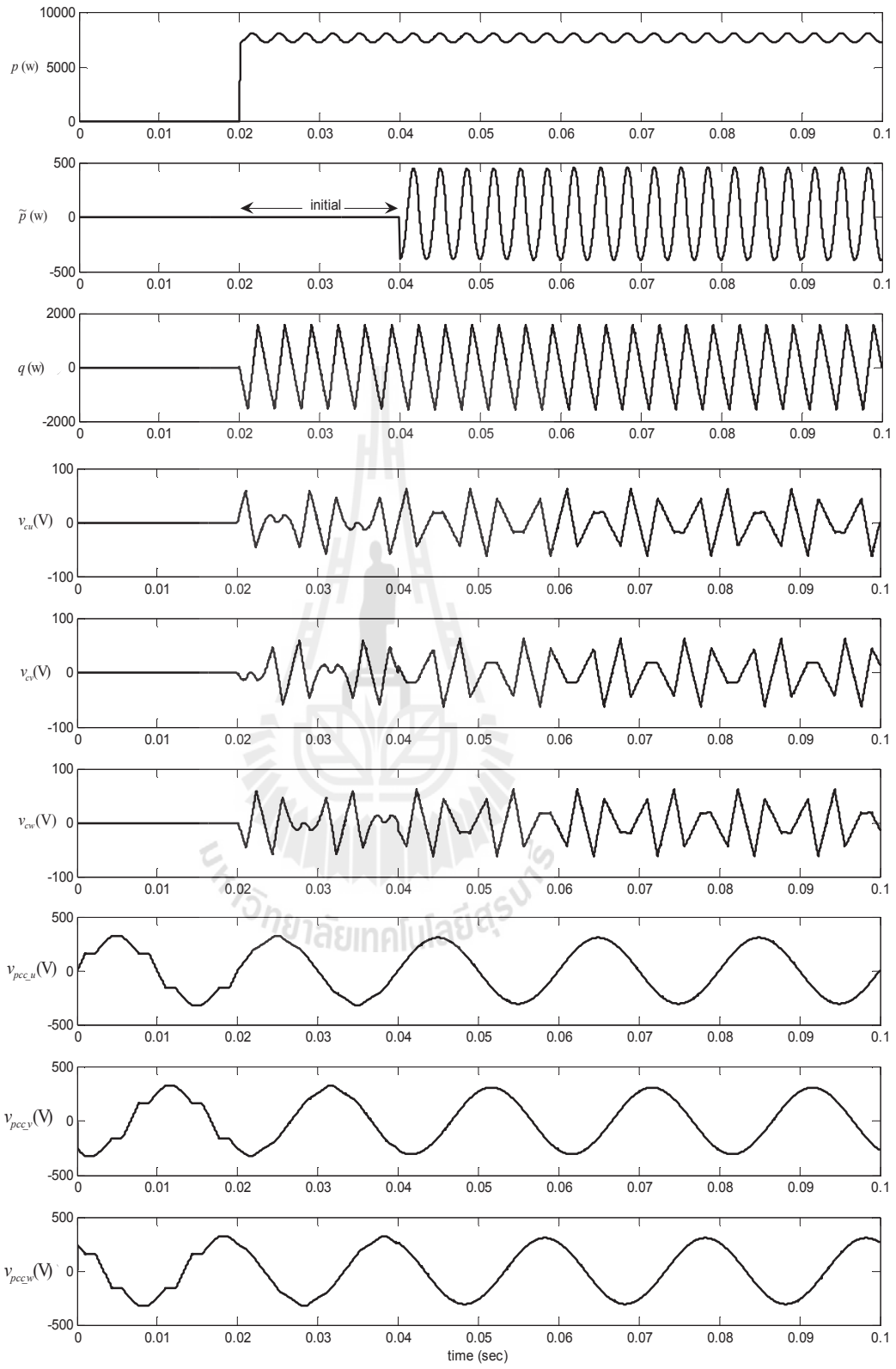
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี DQF

จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SRF และวิธี DQF ตามลำดับ โดยการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 วิธี จะเหมือนกันทุกประการแต่จะแตกต่างกันเพียงการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกออกจากปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ในส่วนของวิธี SRF จะใช้การแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ตัด 5 เฮิรตซ์ และวิธี DQF จะใช้ SWFA เข้ามาแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิก โดยในการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 วิธี จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา (t_{start}) 0.02 วินาที ซึ่งในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 จะประกอบไปด้วยแรงดันบนแกนดี (v_d) เมื่อพิจารณาแรงดันบนแกนดีจะประกอบไปด้วยปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกและปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ส่วนในรูปที่ 4.15 เมื่อปริมาณแรงดันแกนดีผ่านวงจรกรองผ่านสูงจะเหลือเฉพาะปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี (v_{dh}) ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดีปรากฏว่าจะมีเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูงทำให้การแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณแรงดันแกนดีผ่าน SWFA ก็จะได้ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี โดยจากรูปดังกล่าวพบว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที จะเป็นช่วงของการเก็บข้อมูลในช่วงเริ่มต้น (initial) เพื่อทำการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกในคาบถัดไป ในวิธี SWFA นี้จะพบว่าแรงดันฮาร์มอนิกมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วกว่าการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง สำหรับปริมาณแรงดันบนแกนคิว (v_q) ในวิธีการคำนวณหาแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี SRF และวิธี DQF สังเกตได้จากสมการในภาคผนวก ก. ซึ่งในแรงดันบนแกนดีจะมีแรงดันฮาร์มอนิกปะปนอยู่กับแรงดันที่ความถี่มูลฐานส่วนแรงดันบนแกนคิวในทางทฤษฎีไม่ปรากฏแรงดันที่ความถี่มูลฐานจะปรากฏเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนคิว ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีความจำเป็นต้องแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกออกจากปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน นอกจากนี้กำลังรีแอกทีฟ ปรากฏบนแกนคิวจึงส่งผลต่อการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง ดังนั้นค่าแรงดันบนแกนคิวทั้งหมดจะถูกใช้ในการคำนวณแรงดันชดเชยต่อไป ในรูปที่ 4.15 แถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{cu}, v_{cv}, v_{cw}) เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป แรงดันชดเชยจะมีแอมพลิจูดที่สูงแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที เนื่องจากการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.16 แถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟสเช่นกัน จะสังเกตได้ว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที เป็นผลของแรงดันบนแกนคิวที่ชดเชยเข้าสู่ระบบเท่านั้น และเมื่อเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปจึงชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกทั้งบนแกนดีและแกนคิว รวมถึงชดเชยกำลังรีแอกทีฟด้วยเช่นกัน ในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แถวที่ 7 ถึงแถวที่ 9 เป็นแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาที แรงดันที่จุด PCC มีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด และเมื่อเวลา 0.02

วินาที เป็นต้นไปแรงดันที่จุด PCC จึงมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในการจำลองสถานการณ์มีการเริ่มชดเชยแรงดันที่เวลา 0.02 วินาที สามารถดู $\%THD_v$ หลังการชดเชยได้ในตารางที่ 4.1



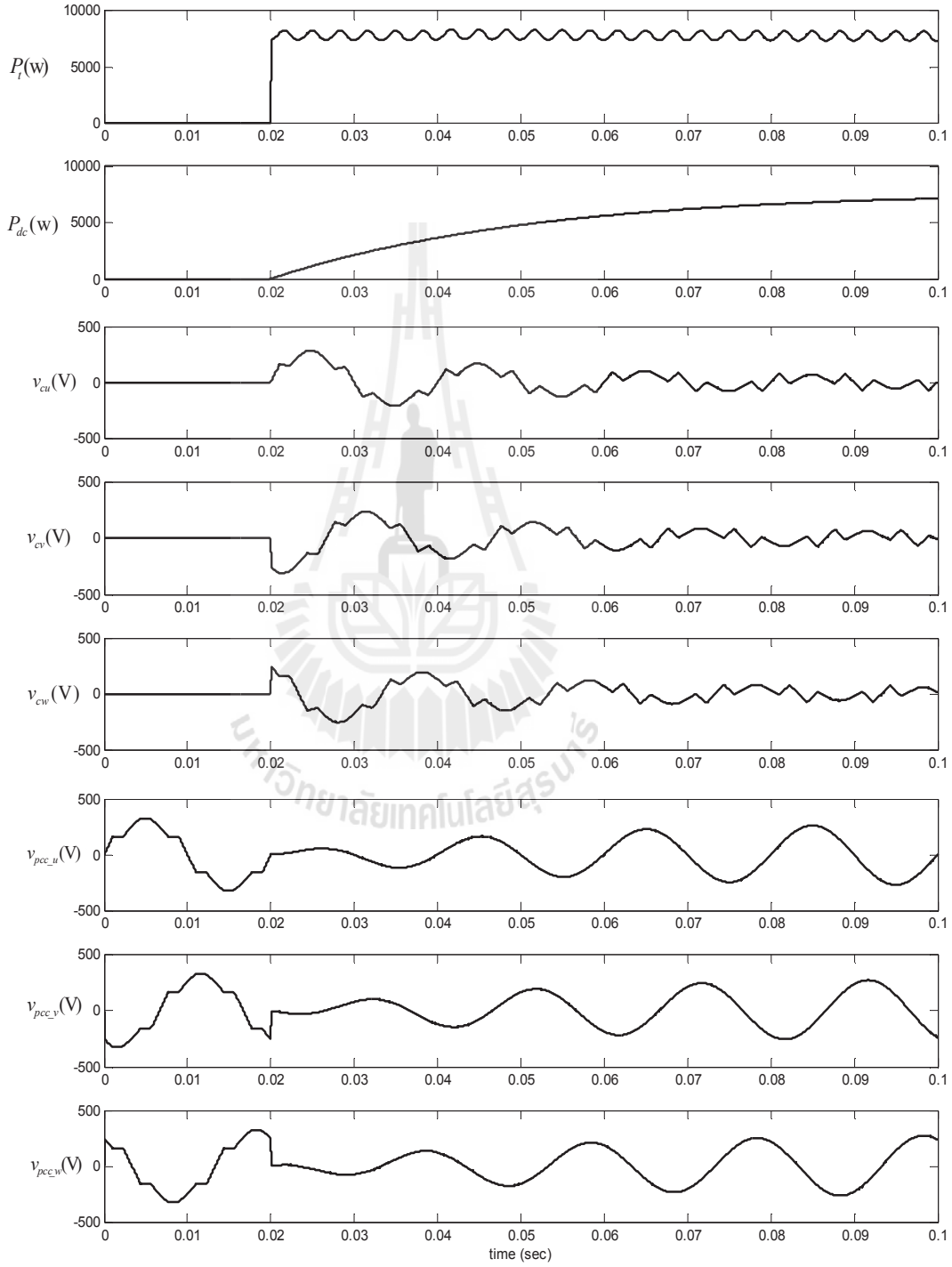
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ



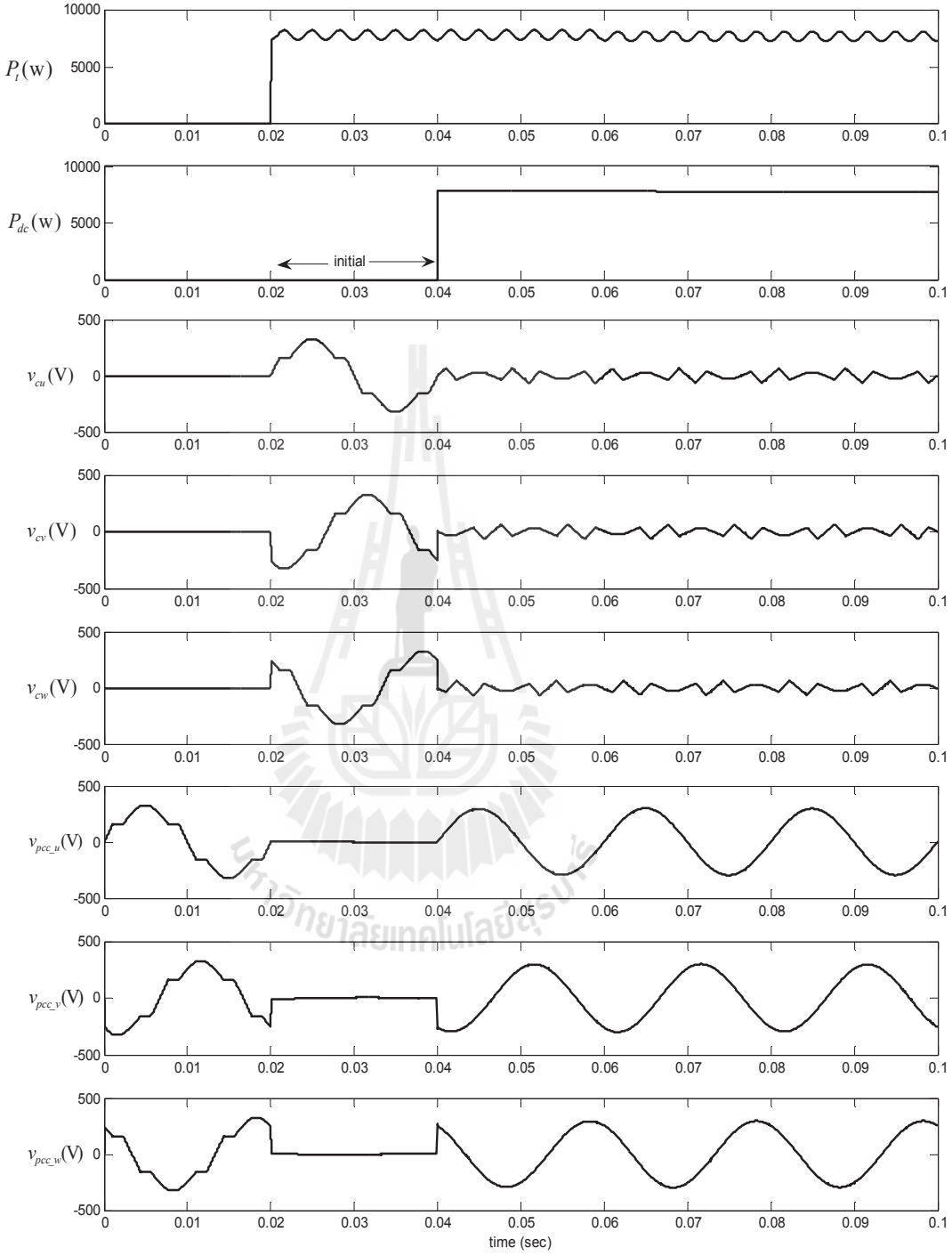
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQF

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ และวิธี PQF ตามลำดับ โดยในการจำลองสถานการณ์จะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ แต่จะแตกต่างกันเพียงวิธีการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน ซึ่งวิธี PQ จะใช้วงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ตัด 5 เฮิรตซ์ ในการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก และวิธี PQF จะใช้ SWFA ในการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน โดยการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 วิธี จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.02 วินาที ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แถวที่ 1 เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) เมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานรวมกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก ส่วนในรูปที่ 4.17 เมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟผ่านวงจรกรองผ่านสูงจึงได้เป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก ($\tilde{p}$) จะปรากฏอยู่ในแถวที่ 2 ของรูปดังกล่าว ซึ่งเมื่อพิจารณารูปดังกล่าวปรากฏว่าจะมีเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูงทำให้การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที และในรูปที่ 4.18 เมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟผ่าน SWFA ก็จะได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวพบว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที จะเป็นช่วงของการเก็บข้อมูลในช่วงแรกเพื่อทำการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกในคาบถัดไป จากภาคผนวก ข. ค่าปริมาณกำลังไฟฟ้ามูลฐานจะปรากฏที่ความถี่ 0 เฮิรตซ์ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 จะปรากฏที่ความถี่ 300 เฮิรตซ์ ในส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 จะปรากฏที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์ โดยเมื่อเทียบจากความถี่มูลฐานของกระแสและแรงดันเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ สำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (q) จะไม่ทำการแยกปริมาณฮาร์มอนิก เนื่องจากการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี PQ และวิธี PQF จะมีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไปพร้อมกัน ในรูปที่ 4.17 แถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป แรงดันชดเชยจะมีแอมพลิจูดที่สูงแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที เนื่องจากการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.18 แถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟสเช่นกัน จะสังเกตได้ว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที เป็นผลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ชดเชยเข้าสู่ระบบ และเมื่อเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปจึงชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกพร้อม ๆ กับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แถวที่ 7 ถึงแถวที่ 9 เป็นแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาที แรงดันที่จุด PCC มีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด และเมื่อเวลา 0.02 วินาที เป็นต้นไปแรงดันที่จุด PCC ในรูปที่ 4.17 จะเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ตามเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.18

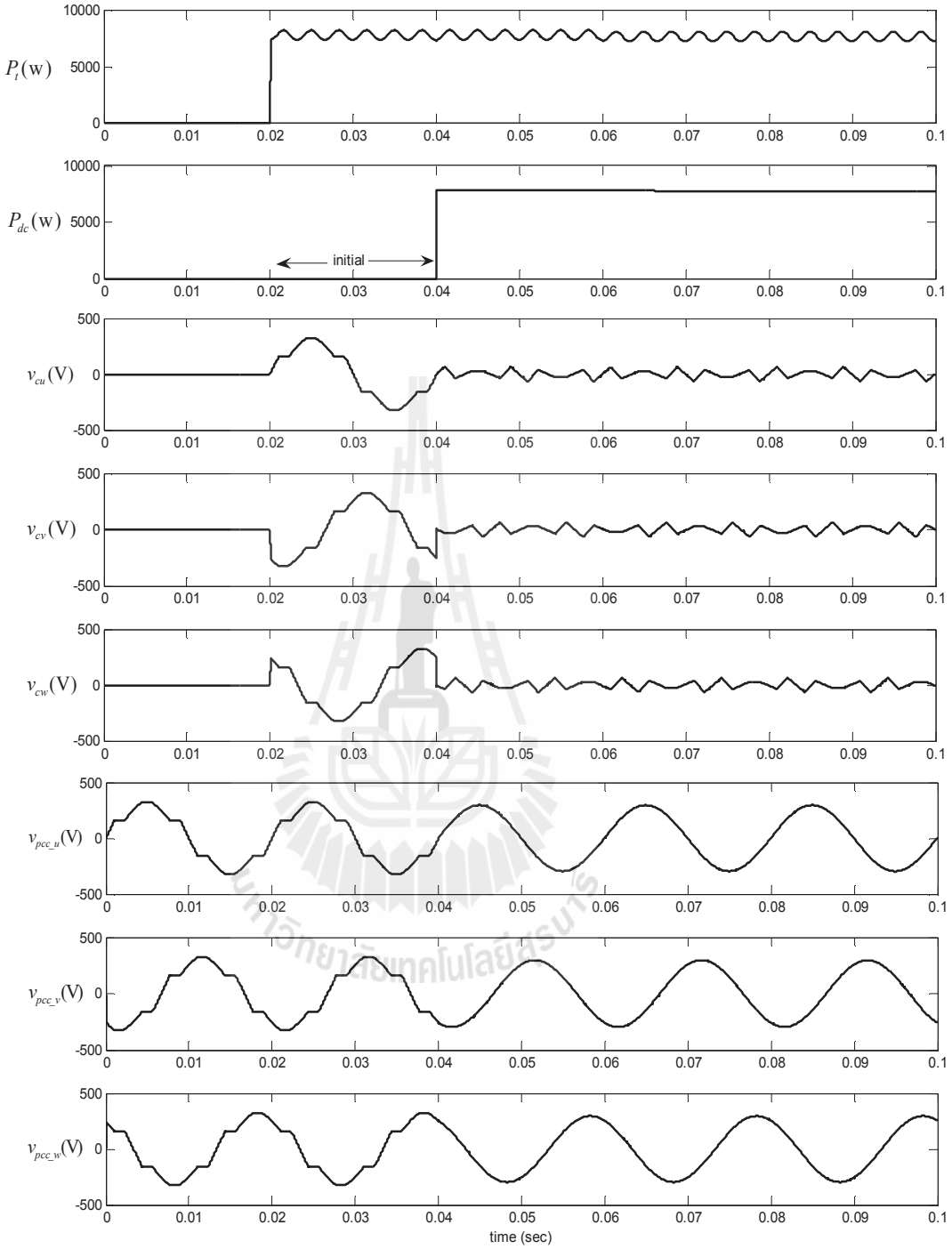
จะเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์เมื่อเริ่มทำการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก สามารถดู $\%THD_v$ หลังการชดเชยได้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.02$ sec)



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.04$ sec)

จากรูปที่ 4.19 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD โดยในการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธี SD จะใช้วงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ตัด 5 เฮิรตซ์ ในการแยกปริมาณ

ฮาร์มอนิก สำหรับการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมของวิธี SD จะเหมือนกับการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของวิธี PQ แต่ในวิธี SD จะใช้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐาน (P_{dc}) มาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง โดยในการจำลองสถานการณ์จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.02 วินาที ซึ่งในรูปที่ 4.19 จะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม (p_t) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมดังกล่าวประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกรวมกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน ในรูปดังกล่าวเมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมผ่านวงจรกรองผ่านสูงจะได้เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐาน เมื่อพิจารณารูปกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานปรากฏว่าจะมีเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูงทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานลู่เข้าสภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที ในรูปที่ 4.19 แถวที่ 3 ถึงแถวที่ 5 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป แรงดันชดเชยจะมีค่าแอมพลิจูดที่เท่ากับแรงดันที่โหลดแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.08 วินาที เนื่องจากการแยกปริมาณฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง ในรูปดังกล่าวแถวที่ 6 ถึงแถวที่ 8 เป็นแรงดันที่จุด PCC เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาที แรงดันที่จุด PCC จะมีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด และเมื่อเวลา 0.02 วินาที เป็นต้นไปแรงดันที่จุด PCC ในรูปที่ 4.19 จะเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ตามเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง สามารถดู $\%THD_v$ หลังการชดเชยได้ในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ทั้ง 2 รูป โดยในการจำลองสถานการณ์จะเหมือนกับวิธี SD จะต่างกันที่วิธีแยกปริมาณฮาร์มอนิกโดยที่วิธี SDF จะใช้ SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก สำหรับการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมของวิธี SDF จะเหมือนกับการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของวิธี PQF แต่วิธี SDF จะใช้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานมาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง โดยในการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.20 จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.02 วินาที และในรูปที่ 4.21 จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.04 วินาที ซึ่งในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 จะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกรวมกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน เมื่อปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมผ่าน SWFA จะได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน โดยในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ที่เวลา 0.02 วินาที ถึงเวลา 0.04 วินาที เป็นช่วงของการเก็บข้อมูลในช่วงแรกเพื่อทำการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานในคาบถัดไป การใช้วิธี SWFA จะพบว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง ในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟสจะสังเกตได้ว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึงเวลา 0.04 วินาที แรงดันชดเชยจะเหมือนกับแรงดันที่โหลด เมื่อพิจารณาจากขั้นตอนที่ 2 ของการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกของวิธี SDF ในหัวข้อที่ 4.9 จะเป็นการแยกปริมาณฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาของการเก็บข้อมูล

เพราะฉะนั้นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ และพิจารณาขั้นตอนที่ 3 ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟแต่ละเฟสก็จะเท่ากับศูนย์โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4-29) ถึงสมการที่ (4-31) และเมื่อพิจารณาในขั้นตอนที่ 4 โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4-32) ถึงสมการที่ (4-34) จะได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสจะเท่ากับศูนย์ และในขั้นตอนที่ 5 เป็นการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงสามเฟสโดยพิจารณาได้จากสมการที่ (4-35) ถึงสมการที่ (4-37) ได้ว่าแรงดันอ้างอิงจะเท่ากับแรงดันที่โหลด เพราะฉะนั้นที่เวลา 0.04 เป็นต้นไปจึงได้แรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แถวที่ 6 ถึงแถวที่ 8 เป็นแรงดันที่จุด PCC เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาที แรงดันที่จุด PCC จะมีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด ในรูปที่ 4.20 ที่เวลา 0.02 วินาที ถึงเวลา 0.04 วินาที แรงดันที่จุด PCC จะเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากการเก็บข้อมูลของ SWFA ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันอ้างอิงที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ และสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4-3) เมื่อเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปแรงดันที่จุด PCC จึงมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์มากขึ้น ด้วยเหตุที่เวลา 0.02 วินาที ถึงเวลา 0.04 วินาที แรงดันที่จุด PCC เป็นศูนย์จะส่งผลให้ระบบขาดการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่ 0.04 วินาที แทนการฉีดที่ 0.02 วินาที สามารถพิจาณาได้จากรูปที่ 4.21 ในแถวที่ 6 ถึงแถวที่ 8 โดยแรงดันที่จุด PCC จะไม่เป็นศูนย์เหมือนรูปที่ 4.20 และสามารถดู $\%THD_v$ หลังการชดเชยได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองสถานการณ์

วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก	$\%THD_{v,u}$	$\%THD_{v,v}$	$\%THD_{v,w}$	$\%THD_{v,av}$
ก่อนการชดเชยแรงดัน				
	12.83	12.83	12.84	12.83
หลังการชดเชยแรงดัน				
SRF	0.45	1.03	1.01	0.83
DQF	0.05	0.05	0.05	0.05
PQ	0.45	1.04	1.02	0.84
PQF	0.06	0.06	0.06	0.06
SD	0.44	1.01	0.98	0.81
SDF	0.06	0.06	0.06	0.06

จากตารางที่ 4.1 เป็นตารางแสดงผลการจำลองสถานการณ์ การชดเชยแรงดันพบว่า $\%THD_{v,av}$ อยู่ที่ 0.83% ในกรณีที่ใช้วิธี SRF ในส่วนของวิธี DQF จะมี $\%THD_{v,av}$ อยู่ที่ 0.05% ส่วนวิธี PQ มีค่า $\%THD_{v,av}$ อยู่ที่ 0.84% วิธี PQF มีค่า $\%THD_{v,av}$ อยู่ที่ 0.06% วิธี SD มีค่า $\%THD_{v,av}$ อยู่ที่ 0.81% และวิธี SDF อยู่ที่ 0.06% การที่นำ SWFA มาแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีข้อดี คือ ผู้วิจัยไม่ต้องเลือกความถี่ตัดและลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็ว ผลการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ผลลัพธ์ที่ดีและผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดี ข้อด้อย คือ เสียเวลาในการจัดเก็บข้อมูลในคาบแรก ในส่วนของการนำวงจรกรองผ่านสูงมาใช้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการใช้งาน ข้อด้อย คือ ผู้วิจัยต้องเลือกความถี่ตัดให้เหมาะสม มีช่วงเวลาประวิงจึงทำให้ลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวช้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิค SWFA มาใช้ในส่วนของการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้งานในอนาคต และงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในการจำลองสถานการณ์ในบทถัดไป ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัย ซึ่งดูได้จากตารางที่ 4.1

4.11 สรุป

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของการพัฒนาเทคนิควิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เนื่องจากการคำนวณแรงดันอ้างอิง จะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันชดเชย หากการคำนวณแรงดันอ้างอิงที่มีสมรรถนะที่ดีก็จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันที่ดีด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ และได้จำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งผลที่ได้ คือ การนำ SWFA มาเป็นตัวแยกปริมาณฮาร์มอนิกจะส่งผลให้การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก ออกมาอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธี DQF สำหรับคำนวณแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้รับการตีพิมพ์ และยื่นจดลิขสิทธิ์ดังนี้

- กองพล อารีรักษ์ และ เอนก ง้อตระกูล, “บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟสำหรับโปรแกรม SIMULINK”, 2 พฤศจิกายน 2554, เลขที่คำขอ 266183

- เอนก ง้อตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และ กองพัน อารีรักษ์, “การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35*, 14 ธันวาคม 2555, หน้า 489-492.

-เอนก ง้อตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์, “การเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม”, *การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ปีการศึกษา 2554*, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 7 ตุลาคม 2554, หน้า 1221-1232.

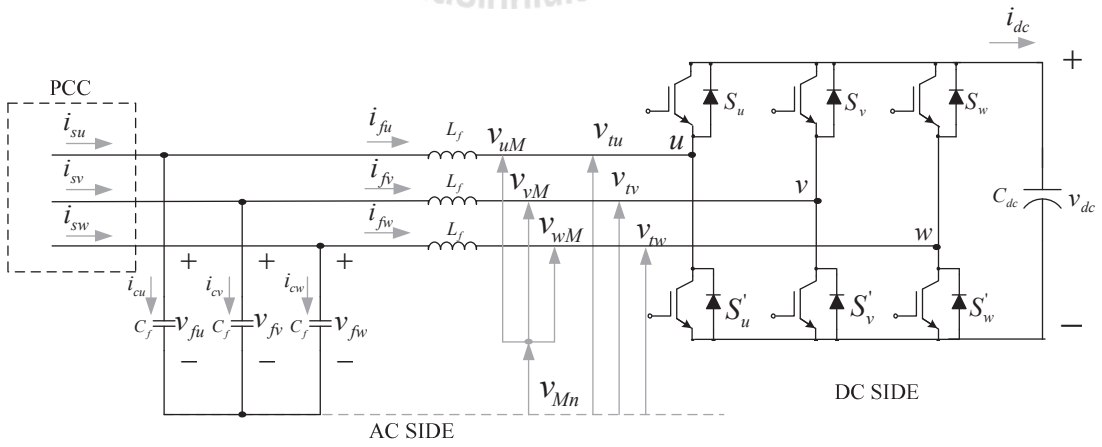
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

5.1 บทนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แบบจำลองที่ได้จะใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมรวมถึงใช้ออกแบบตัวควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟส และดำเนินการแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิว โดยใช้หลักการแปลงของปาร์ค นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลกับการจำลองสถานการณ์ที่พึ่งพาชุดบล็อก SimPowerSystems ในโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะนำไปสู่การใช้งานทางด้านการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกต่อไป

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนสามเฟส



รูปที่ 5.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

จากรูปที่ 5.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ใช้ไอจีบีทีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทางด้านเอซี (AC SIDE) ของวงจรดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสสามเฟสที่จุด PCC (Point of Common Coupling) ผ่านตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ทั้งสามเฟส โดยมีแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{tu}, v_{tv}, v_{tw}) ที่มีผลโดยตรงต่อการฉีดแรงดันชดเชย (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ทั้งนี้เพื่อการควบคุมให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีลักษณะรูปสัญญาณใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิง ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ที่ได้จากการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาทางด้านดีซี (DC SIDE) พบว่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีบทบาทหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน เพื่อใช้สำหรับการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบ รวมถึงแรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) ที่ตกคร่อม C_{dc} จะต้องได้รับการควบคุมเพื่อให้ได้จุดการทำงานที่เหมาะสม

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มต้นจากการพิจารณากฎของแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ทางด้านเอซี เพื่อหาสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง จะได้ดังสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3)

$$v_{fu} = L_f \frac{di_{fu}}{dt} + v_{tu} \tag{5-1}$$

$$v_{fv} = L_f \frac{di_{fv}}{dt} + v_{tv} \tag{5-2}$$

$$v_{fw} = L_f \frac{di_{fw}}{dt} + v_{tw} \tag{5-3}$$

โดยที่ $v_{tu} = v_{uM} + v_{Mn}$, $v_{tv} = v_{vM} + v_{Mn}$ และ $v_{tw} = v_{wM} + v_{Mn}$ ค่าดังกล่าว คือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ของเฟส u, v, w ตามลำดับ

หลังจากได้สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง จึงดำเนินการพิจารณาหาสมการอนุพันธ์ของแรงดันที่ตัวเก็บประจุวงจรกรอง โดยกฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) จะได้ดังสมการที่ (5-4) ถึงสมการที่ (5-6)

$$\frac{dv_{fu}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{su} - \frac{1}{C_f} i_{fu} \tag{5-4}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\frac{dv_{fv}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{sv} - \frac{1}{C_f} i_{fv} \tag{5-5}$$

$$\frac{dv_{fw}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{sw} - \frac{1}{C_f} i_{fw} \tag{5-6}$$

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ตั้งขอบเขต ที่จะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามสายสมดุลเท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์จะไม่กล่าวถึงปริมาณไฟฟ้าลำดับศูนย์ (zero sequence) จึงส่งผลให้ความสัมพันธ์ของแรงดันชดเชยทั้งสามเฟสและกระแสที่จุด PCC เป็นดังสมการที่ (5-7) และสมการที่ (5-8) ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวร่วมกับสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) ในสภาวะคงตัว จะสามารถจัดความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5-9)

$$v_{fu} + v_{fv} + v_{fw} = 0 \tag{5-7}$$

$$i_{su} + i_{sv} + i_{sw} = 0 \tag{5-8}$$

$$v_{Mn} = -\frac{1}{3}(v_{uM} + v_{vM} + v_{wM}) = -\frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} v_{jM} \tag{5-9}$$

แทนความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ (5-9) ลงในสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) จะได้ดังสมการที่ (5-10) ถึงสมการที่ (5-12) ตามลำดับ และเมื่อจัดเทอมของสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ (5-13)

$$\frac{di_{fu}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fu} - \frac{1}{L_f}(v_{uM} - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} v_{jM}) \tag{5-10}$$

$$\frac{di_{fv}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fv} - \frac{1}{L_f}(v_{vM} - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} v_{jM}) \tag{5-11}$$

$$\frac{di_{fw}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fw} - \frac{1}{L_f}(v_{wM} - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} v_{jM}) \tag{5-12}$$

$$\frac{di_{fk}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fk} - \frac{1}{L_f}(v_{kM} - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} v_{jM}) \tag{5-13}$$

โดยที่ k คือ เฟส u, v, w

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะได้ดังสมการที่ (5-14) และสมการที่ (5-15) ตามลำดับ โดยที่ค่า c_k คือ ฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function : c_k) ของไอจีบีที โดยมีลักษณะการทำงานดังสมการที่ (5-16) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5-14) แทนลงในสมการที่ (5-13) จะได้ดังสมการที่ (5-17)

$$v_{kM} = c_k v_{dc} \tag{5-14}$$

$$i_{dc} = \sum_{k=u,v,w} c_k i_{fk} \tag{5-15}$$

$$c_k = \begin{cases} 1, S_k = on, S_k^{'} = off \\ 0, S_k = off, S_k^{'} = on \end{cases} \tag{5-16}$$

$$\frac{di_{fk}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fk} - \frac{1}{L_f}(c_k - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} c_j) v_{dc} \tag{5-17}$$

จากสมการที่ (5-17) สามารถจัดเทอมฟังก์ชันการสวิตช์ เป็นฟังก์ชันสถานะการสวิตช์ (switching state function : d_k) ได้ดังสมการที่ (5-18) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ (5-19) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (5-17) จะได้ดังสมการที่ (5-20)

$$d_k = (c_k - \frac{1}{3}\sum_{j=u,v,w} c_j) \tag{5-18}$$

$$d_k = \begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} c_u \\ c_v \\ c_w \end{bmatrix} \tag{5-19}$$

$$\frac{di_{fk}}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{fk} - \frac{1}{L_f} d_k v_{dc} \tag{5-20}$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง แสดงได้ดังสมการที่ (5-20) ขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการหาสมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันบัสไฟตรง โดยวิเคราะห์จากการพิจารณากฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ทางด้านดีซี อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตของกระแสตามสมการที่ (5-15) จะได้ดังสมการที่ (5-21)

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}}(i_{dc}) = \frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=u,v,w} c_k i_{fk} = \frac{1}{C_{dc}} \sum_{k=u,v,w} d_k i_{fk} \tag{5-21}$$

จากการอธิบายแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนปริมาณไฟฟ้าสามเฟสในข้างต้น สามารถเขียนเป็นแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ ดังสมการที่ (5-22)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fu} \\ i_{fv} \\ i_{fw} \\ v_{fu} \\ v_{fv} \\ v_{fw} \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 & -\frac{d_u}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & -\frac{d_v}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & -\frac{d_w}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d_u}{C_{dc}} & \frac{d_v}{C_{dc}} & \frac{d_w}{C_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fu} \\ i_{fv} \\ i_{fw} \\ v_{fu} \\ v_{fv} \\ v_{fw} \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-22}$$

5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนสามเฟส ผ่านเมตริกซ์การแปลงแกนของปาร์ค ดังสมการที่ (5-23) เพื่อทำให้แบบจำลองอยู่บนแกนดีคิว จากสมการดังกล่าวกำหนดให้ f_u, f_v และ f_w คือ ปริมาณทางไฟฟ้าของเฟส u, v และ w ตามลำดับ ในขณะที่ f_d และ f_q คือ ปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีและแกนคิว ตามลำดับ ทั้งนี้หากต้องการแปลงปริมาณบนแกนดีคิวกลับไปอยู่บนแกนไฟฟ้าสามเฟสทำได้

ดังสมการที่ (5-24) สำหรับเมตริกซ์ K แสดงไว้ในสมการที่ (5-25) โดยมีมุมเฟส $\theta = \omega t$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว เท่ากับ ω rad/s

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = [\mathrm{K}] \cdot \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} \tag{5-23}$$

$$\begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} = [\mathrm{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \tag{5-24}$$

$$[\mathrm{K}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{5-25}$$

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนดีคิว เริ่มต้นจากการพิจารณาฟังก์ชันสถานะการสวิตช์บนแกนไฟฟ้าสามเฟส (d_k) ดังสมการที่ (5-26) จากสมการดังกล่าว ค่า ϕ คือ มุมเฟสเริ่มต้นของฟังก์ชันสถานะการสวิตช์ โดยมีขนาดของฟังก์ชัน d_k อธิบายด้วยค่าดัชนีมอดูเลต (modulation index: M)

$$\begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix} = \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \tag{5-26}$$

จากสมการที่ (5-26) ทำการแปลงฟังก์ชัน d_k ให้อยู่บนแกนดีคิว ด้วยการแทนลงในสมการที่ (5-23) จะได้ดังสมการที่ (5-27) โดยที่ ค่า ϕ_1 คือ มุมเฟสเริ่มต้นของแกนหมุนดีคิว จากสมการดังกล่าวเมื่อใช้คุณสมบัติทางตรีโกณมิติ จะได้ดังสมการที่ (5-28)

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_1) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ -\sin(\omega t + \phi_1) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{bmatrix} \cdot \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (5\text{-}27)$$

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ -\sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (5\text{-}28)$$

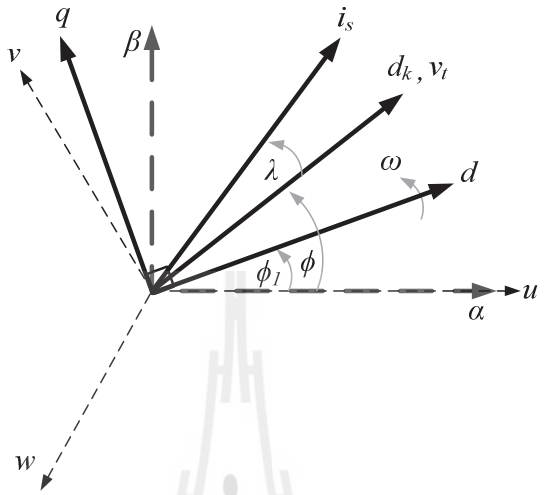
การวิเคราะห์ในส่วนถัดมา คือ การหากระแสที่จุด PCC ที่พิจารณาอยู่บนแกนดีคิว ด้วยการแทนค่ากระแสดังกล่าวลงในสมการที่ (5-23) จะได้ดังสมการที่ (5-29) โดยใช้คุณสมบัติทางตรีโกณมิติ จะได้ดังสมการที่ (5-30) จากสมการดังกล่าว ค่า λ คือ ค่ามุมเหลื่อมระหว่างเวกเตอร์ของแรงดันเอาต์พุตกับเวกเตอร์กระแสที่จุด PCC

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{s,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_1) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ -\sin(\omega t + \phi_1) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \cos(\omega t + \phi) \\ i_s \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ i_s \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (5\text{-}29)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_s \cos(\phi - \phi_1 + \lambda) \\ i_s \sin(\phi - \phi_1 + \lambda) \end{bmatrix} \quad (5\text{-}30)$$

จากการอธิบายข้างต้นเกี่ยวกับเวกเตอร์ของแบบจำลองในระบบ พบว่า เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตมีมุมเฟสเริ่มต้นเดียวกันกับเวกเตอร์ฟังก์ชันสถานะสวิตช์ เท่ากับ ϕ ซึ่งทำมุมต่างเฟสกับมุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์กระแสที่จุด PCC (i_s) เท่ากับ λ และแกนดีคิวหมุนด้วยความเร็ว เท่ากับ

ω rad/s ที่มุมเฟสเริ่มต้น เท่ากับ ϕ_1 ดังนั้น เวกเตอร์ของแบบจำลองบนแกนดีคิวในระบบที่พิจารณา สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเฟสเซอร์ไดอะแกรม ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของระบบที่พิจารณา

จากรูปดังกล่าวผู้วิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้มุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุต (v_t) ทำมุมเดียวกับมุมเฟสเริ่มต้นของแกนหมุนดีคิว ($\phi = \phi_1$) และไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม (λ) ซึ่งเกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ในสายส่ง ผลจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สมการที่ (5-28) และสมการที่ (5-30) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (5-31) และสมการที่ (5-32) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-31}$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} i_s \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-32}$$

ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดังสมการที่ (5-22) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เพื่อแปลงแบบจำลองไปอยู่บนแกนดีคิว คือ ส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง แสดงไว้ในแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 3 ส่วนของแรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรอง แสดงไว้ในแถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 และส่วนของแรงดันบัสไฟตรง แสดงไว้ในแถวที่ 7 โดยจะดำเนินการวิเคราะห์ในแต่ละส่วน ดังนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากสมการที่ (5-22) ในแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 3 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะ จะได้ดังสมการที่ (5-33) จากสมการดังกล่าวอธิบายด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (5-24) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-34)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fu} \\ i_{fv} \\ i_{fw} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix} v_{fu} \\ v_{fv} \\ v_{fw} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix} d_u \\ d_v \\ d_w \end{bmatrix}\cdot v_{dc} \tag{5-33}$$

$$\frac{d}{dt}([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}) = \frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}) - \frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix}\cdot v_{dc}) \tag{5-34}$$

เทอมของ $\frac{d}{dt}([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix})$ ที่ปรากฏในสมการที่ (5-34) จะต้องใช้กฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-35) เพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวลงในสมการที่ (5-34) จะได้ดังสมการที่ (5-36)

$$\frac{d}{dt}([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}) = [\mathrm{K}]^{-1}\cdot(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}) + (\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} \tag{5-35}$$

$$[\mathrm{K}]^{-1}\cdot(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}) + (\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}) - \frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix}\cdot v_{dc} \tag{5-36}$$

ภายหลังจากการแทนค่าด้วยกฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-36) ทำให้สามารถจัดรูปสมการดังกล่าว โดยการคูณด้วยเมตริกซ์ [K] ตลอดสมการ ดังสมการที่ (5-37) จากเมตริกซ์ [K] ในข้างต้น ใช้คุณสมบัติเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) ($[\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1} = \mathrm{I}$) จากคุณสมบัติดังกล่าวถูกแทนลงในสมการที่ (5-37) จะได้ดังสมการที่ (5-38)

$$[\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix})+([\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix}=\frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\ v_{fq}\end{bmatrix})$$
$$-\frac{1}{L_f}\cdot([\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}d_d\\ d_q\end{bmatrix}\cdot v_{dc} \quad (5\text{-}37)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix}=\frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\ v_{fq}\end{bmatrix}-\frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix}d_d\\ d_q\end{bmatrix}\cdot v_{dc}-([\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}38)$$

จากสมการที่ (5-38) แยกพิจารณาเฉพาะเทอม $[\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}$ ซึ่งผลการดำเนินการในส่วนนี้ แสดงดังสมการที่ (5-39) และสมการที่ (5-40) เพื่อแทนกลับลงในสมการที่ (5-38) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-41) สมการดังกล่าว คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองบนแกนดีคิว

$$[\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\omega t) & \cos(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t+\frac{2\pi}{3})\\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}$$
$$\cdot\frac{d}{dt}\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\omega t+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}39)$$

$$[\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}=\frac{2}{3}\cdot\omega\cdot\begin{bmatrix}-\frac{3}{2}\sin(0) & -\frac{3}{2}\cos(0) & 0\\ \frac{3}{2}\cos(0) & \frac{3}{2}\sin(0) & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -\omega & 0\\ \omega & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \quad (5\text{-}40)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}0 & -\omega\\ \omega & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\ i_{fq}\end{bmatrix}+\frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\ v_{fq}\end{bmatrix}-\frac{1}{L_f}\cdot\begin{bmatrix}d_d\\ d_q\end{bmatrix}\cdot v_{dc} \quad (5\text{-}41)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรอง

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากสมการที่ (5-22) ในแถวที่ 4 ถึงแถวที่ 6 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะจะได้ดังสมการที่ (5-42) จากสมการดังกล่าวอธิบายด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (5-24) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-43)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v_{fu} \\ v_{fv} \\ v_{fw} \end{bmatrix} = -\frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix} i_{fu} \\ i_{fv} \\ i_{fw} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix} \tag{5-42}$$

$$\frac{d}{dt}\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}\right) = -\frac{1}{C_f}\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}\right) + \frac{1}{C_f}\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}\right) \tag{5-43}$$

เทอมของ $\frac{d}{dt}\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}\right)$ ที่ปรากฏในสมการที่ (5-43) จะต้องใช้กฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-44) เพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวลงในสมการที่ (5-43) จะได้ดังสมการที่ (5-45)

$$\frac{d}{dt}\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}\right) = [\mathrm{K}]^{-1}\cdot\left(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}\right) + \left(\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}\right)\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix} \tag{5-44}$$

$$[\mathrm{K}]^{-1}\cdot\left(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix}\right) + \left(\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}\right)\cdot\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix} = -\frac{1}{C_f}\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix}\right) + \frac{1}{C_f}\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}\right) \tag{5-45}$$

ภายหลังจากการแทนค่าด้วยกฎอนุพันธ์ของผลคูณเมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-45) ทำให้สามารถจัดรูปสมการดังกล่าว โดยการคูณด้วยเมตริกซ์ $[\mathrm{K}]$ ตลอดสมการ ดังสมการที่ (5-46) จาก $[\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1} = I$ ดำเนินการแทนลงในสมการที่ (5-46) จะได้ดังสมการที่ (5-47)

$$[\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot(\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix})+([\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix}=-\frac{1}{C_f}\cdot([\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\i_{fq}\end{bmatrix})+\frac{1}{C_f}\cdot([\mathrm{K}]\cdot[\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}i_{sd}\\i_{sq}\end{bmatrix}) \quad (5\text{-}46)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix}=-\frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\i_{fq}\end{bmatrix}+\frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix}i_{sd}\\i_{sq}\end{bmatrix}-([\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1})\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}47)$$

เมื่อพิจารณาเทอม $[\mathrm{K}]\cdot\frac{d}{dt}[\mathrm{K}]^{-1}$ ซึ่งจะได้ดังสมการที่กล่าวมาข้างต้น คือ สมการที่ (5-39) และสมการที่ (5-40) ตามลำดับ เมื่อแทนสมการที่ (5-40) ลงในสมการที่ (5-47) จะได้ดังสมการที่ (5-48) สมการดังกล่าว คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนดีคิว

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix}=-\frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\i_{fq}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0&-\omega\\\omega&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}v_{fd}\\v_{fq}\end{bmatrix}+\frac{1}{C_f}\cdot\begin{bmatrix}i_{sd}\\i_{sq}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}48)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแรงดันบัสไฟตรง

การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสมการที่ (5-22) ในแถวที่ 7 โดยเขียนอยู่ในสมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (5-49) หรือจัดเทอมให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-50) จากสมการดังกล่าวเมื่ออธิบายด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (5-24) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-51)

$$\frac{d}{dt}v_{dc}=\frac{1}{C_{dc}}\cdot(d_u i_{fu}+d_v i_{fv}+d_w i_{fw}) \quad (5\text{-}49)$$

$$\frac{d}{dt}v_{dc}=\frac{1}{C_{dc}}\left(\begin{bmatrix}d_u\\d_v\\d_w\end{bmatrix}\right)^T\cdot\begin{bmatrix}i_{fu}\\i_{fv}\\i_{fw}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}50)$$

$$\frac{d}{dt}v_{dc}=\frac{1}{C_{dc}}\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}d_d\\d_q\end{bmatrix}\right)^T\cdot\left([\mathrm{K}]^{-1}\cdot\begin{bmatrix}i_{fd}\\i_{fq}\end{bmatrix}\right) \quad (5\text{-}51)$$

จากสมการที่ (5-51) เมื่อจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่ จะได้ดังสมการที่ (5-52)

$$\frac{d}{dt}v_{dc} = \frac{d_d i_{fd}}{C_{dc}} + \frac{d_q i_{fq}}{C_{dc}} \tag{5-52}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ v_{fd} \\ v_{fq} \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & \frac{1}{L_f} & 0 & -\frac{d_d}{L_f} \\ -\omega & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & -\frac{d_q}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 \\ \frac{d_d}{C_{dc}} & \frac{d_q}{C_{dc}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ v_{fd} \\ v_{fq} \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{sd} \\ i_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-53}$$

จากแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟสแปลงมาอยู่บนแกนดีคิว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะได้ ดังสมการที่ (5-53) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน เพื่อนำมาใช้อธิบายระบบที่พิจารณาอยู่บนแกนดีคิว คือ ส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองบนแกนดี และแกนคิว ในเมตริกซ์แถวที่ 1 และแถวที่ 2 ของสมการดังกล่าว ในส่วนของแรงดันชดเชยตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนดี และแกนคิว ในเมตริกซ์จะอยู่แถวที่ 3 และแถวที่ 4 ของสมการ และส่วนของแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีคิว อยู่ในเมตริกซ์แถวที่ 5 ของสมการ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวจะสามารถนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทถัดไป และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้จำเป็นต้องมีการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้องที่ 5.4

5.4 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดในข้างต้น เมื่อได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง (model validation) จะทำให้แบบจำลองดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นสำหรับการนำไปใช้เพื่อออกแบบระบบควบคุม ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองตามสมการที่ (5-54) บน m-file ในโปรแกรม MATLAB

เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการสร้างระบบที่พิจารณาตามรูปที่ 5.1 บนโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems โดยมีรายละเอียดการจำลองสถานการณ์ของทั้ง 2 ส่วน ดังนี้

การจำลองสถานการณ์ระบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม มีแนวทางการจำลองสถานการณ์ เริ่มต้นจากการนำแบบจำลองในสมการที่ (5-53) จัดให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันสถานะ (state function) ดังสมการที่ (5-54) หลังจากนั้นทำการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equation: ODE) ด้วยการเขียนคำสั่งบน m-file ในโปรแกรม MATLAB

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}} &= \mathrm{A}x + \mathrm{B}u \\ \mathrm{y} &= \mathrm{C}x + \mathrm{D}u \end{aligned} \tag{5-54}$$

โดยที่ $\dot{\mathrm{x}}$ คือ ตัวแปรสถานะเชิงพลวัต ($\dot{\mathrm{x}} = \left[\frac{d}{dt}i_{fd} \quad \frac{d}{dt}i_{fq} \quad \frac{d}{dt}v_{fd} \quad \frac{d}{dt}v_{fq} \quad \frac{d}{dt}v_{dc}\right]^T$)

x คือ ตัวแปรสถานะ ($\mathrm{x} = \left[i_{fd} \quad i_{fq} \quad v_{fd} \quad v_{fq} \quad v_{dc}\right]^T$)

u คือ อินพุตของแบบจำลอง ($u = i_s$)

y คือ เอาต์พุตของแบบจำลอง ($\mathrm{y} = \left[i_{fd} \quad i_{fq} \quad v_{fd} \quad v_{fq} \quad v_{dc}\right]^T$)

$$\mathrm{A} = \left[\mathrm{A}_{11} \quad \mathrm{A}_{12} \quad \mathrm{A}_{13} \quad \mathrm{A}_{14} \quad \mathrm{A}_{15}\right]$$

โดยที่ $\mathrm{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \\ -\frac{1}{C_f} \\ 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_{dc}} \cdot \cos(\phi - \phi_1) \end{bmatrix}$, $\mathrm{A}_{12} = \begin{bmatrix} \omega \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C_f} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_{dc}} \cdot \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix}$

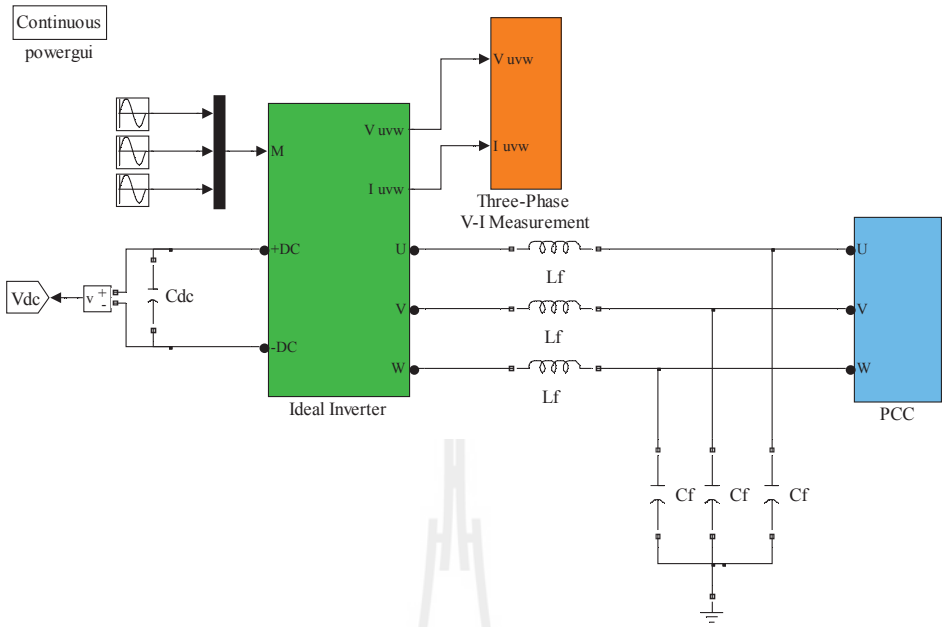
$$\mathrm{A}_{13} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \\ -\omega \\ 0 \end{bmatrix}, \mathrm{A}_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_f} \\ \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathrm{A}_{15} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_f} \cos(\phi - \phi_1) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_f} \sin(\phi - \phi_1) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_f} \cos(\phi - \phi_1 + \lambda) & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{C_f} \sin(\phi - \phi_1 + \lambda) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [0]$$

การจำลองสถานการณ์ระบบโดยอาศัยชุดบล็อก SimPowerSystems ร่วมกับ simulink

การจำลองสถานการณ์ระบบตามการพิจารณาในรูปที่ 5.1 จะใช้โปรแกรม simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างระบบดังรูปที่ 5.3 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วย ชุดบล็อกอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบอุดมติ (Ideal Inverter) ซึ่งสามารถพิจารณาแบบจำลองของวงจรอินเวอร์เตอร์ในบล็อกอินเวอร์เตอร์แบบอุดมคติได้ดังรูปที่ 5.4 และในรูปที่ 5.3 จะมีองค์ประกอบทางด้านดีซีของวงจรดังกล่าวถูกต่อเข้ากับตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ส่วนทางด้านเอซีของวงจรจะต่อเข้ากับตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) และตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) ทั้งสามเฟสถูกต่อร่วมกับจุด PCC ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส และในส่วนของการวัดค่าแรงดันและค่ากระแสจะอยู่ในส่วนของบล็อก Three-Phase V-I Measurement โดยในบล็อกดังกล่าวจะแสดงผลในการจำลองสถานการณ์ทั้งกระแสและแรงดันที่อยู่บนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว



รูปที่ 5.3 ระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

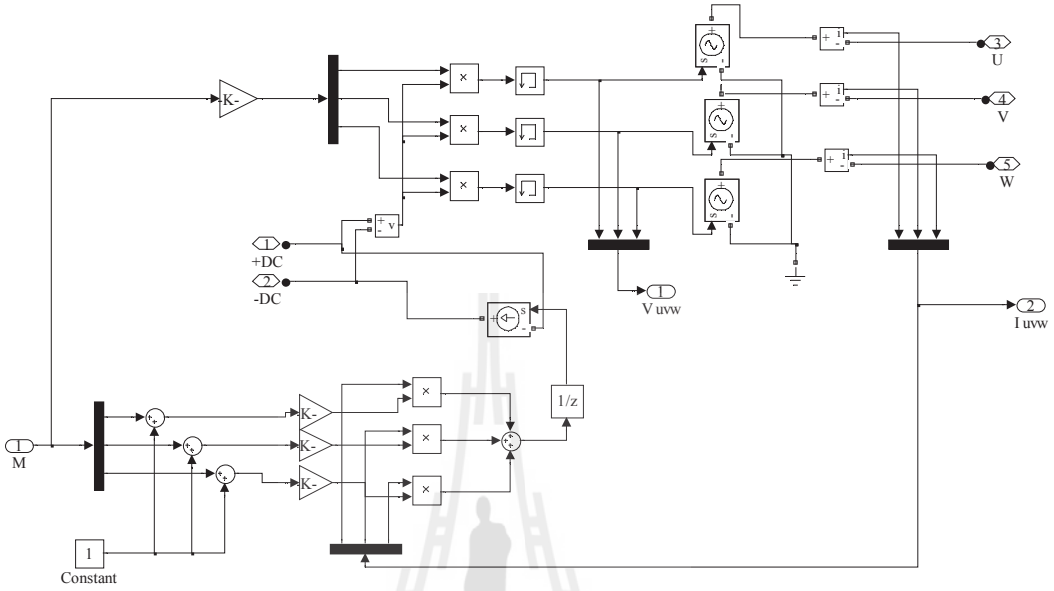
จากรูปที่ 5.4 เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอุดมคติที่สร้างจากสมการทางคณิตศาสตร์สมการที่ (5-55) ถึงสมการที่ (5-58) โดยในส่วนของสมการที่ (5-55) ถึงสมการที่ (5-57) จะเป็นสมการของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ และในสมการที่ (5-58) จะเป็นสมการกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้ค่าดัชนีมอดูเลต (M) จะมีผลต่อแรงดันดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ และสาเหตุที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอุดมติเพื่อที่จะลดผลกระทบของการสวิตช์

$$v_{tu} = \frac{M_u}{2} v_{dc} = \frac{|M_u|}{2} \sin(\omega t) v_{dc} \tag{5-55}$$

$$v_{tv} = \frac{M_v}{2} v_{dc} = \frac{|M_v|}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) v_{dc} \tag{5-56}$$

$$v_{tw} = \frac{M_w}{2} v_{dc} = \frac{|M_w|}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) v_{dc} \tag{5-57}$$

$$i_{dc} = \frac{(M_u + 1)}{2} i_{fu} + \frac{(M_v + 1)}{2} i_{fv} + \frac{(M_w + 1)}{2} i_{fw} \tag{5-58}$$

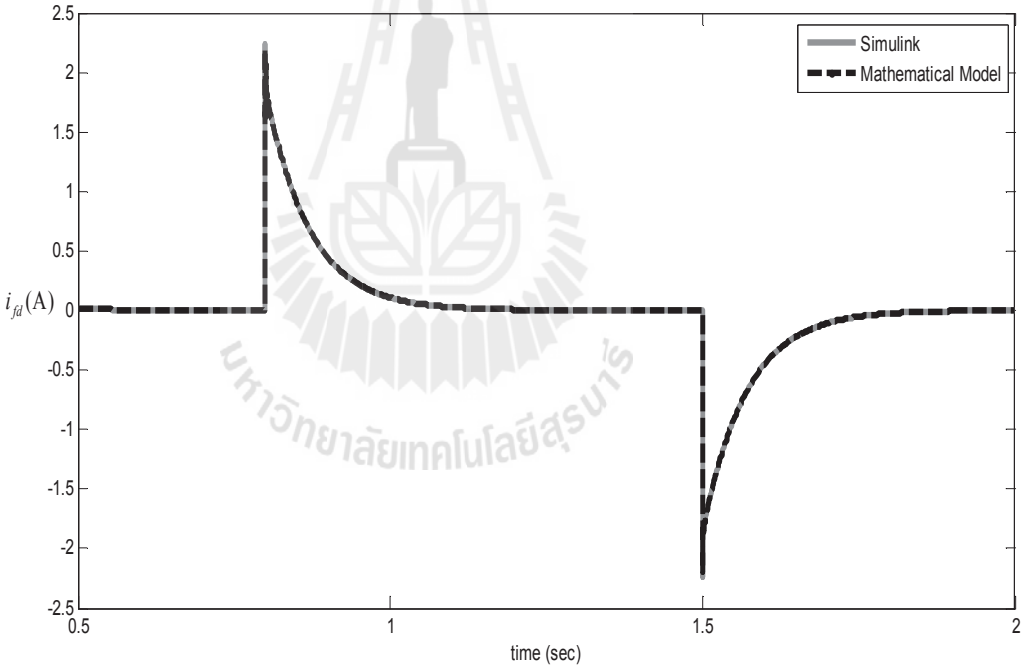


รูปที่ 5.4 แบบจำลองของวงจรอินเวอร์เตอร์อุดมติสำหรับการจำลองสถานการณ์

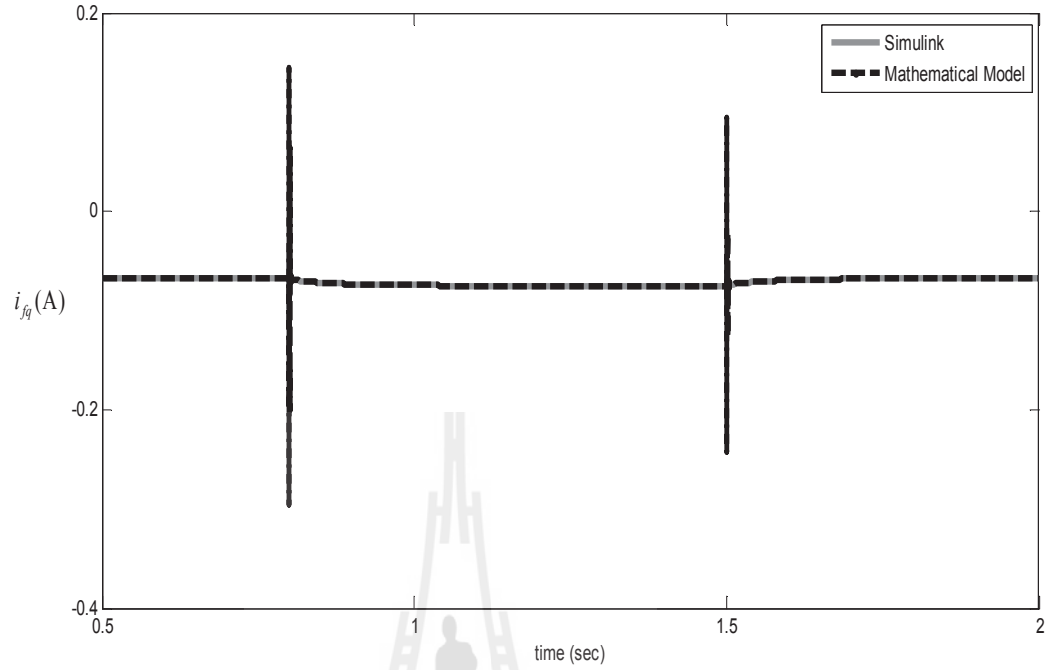
การจำลองสถานการณ์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.1 ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 ชุด ดังตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.3 ตามลำดับ การทดสอบมีวัตถุประสงค์ คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว ด้วยการเปรียบเทียบรูปสัญญาณของ i_{fd} , i_{fq} , v_{fd} , v_{fq} และ v_{dc} กับชุดบล็อกที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 1)

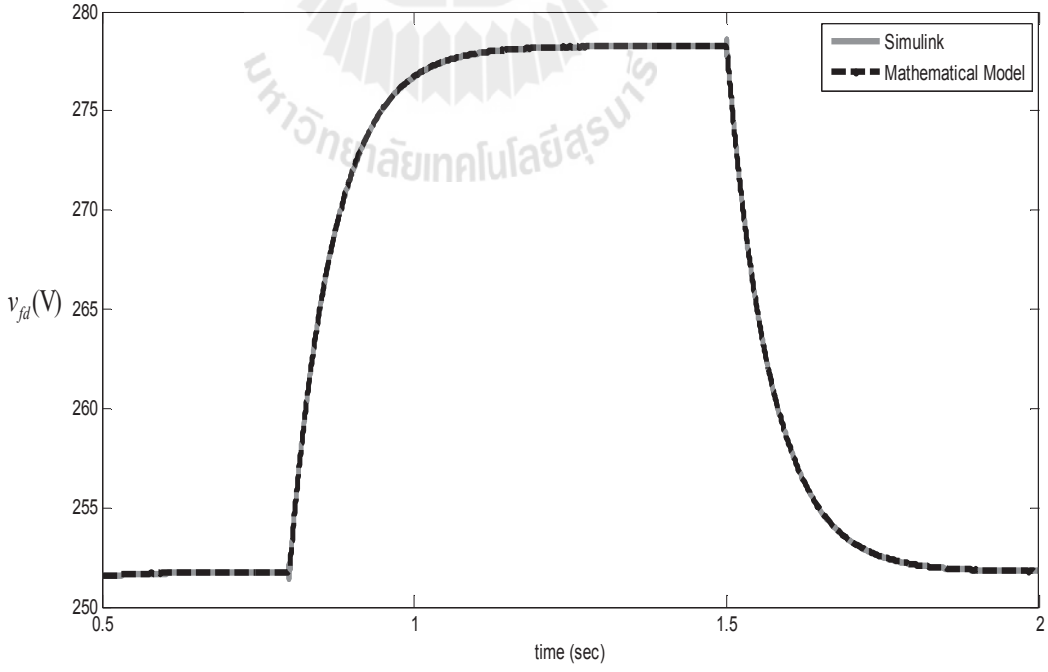
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 19$ A $(t = 0 - 0.8$ sec, $1.5 - 2$ sec$)$, $i_s = 21$ A $(t = 0.8 - 1.5$ sec$)$
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50$ Hz
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 1000$ μF
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 1$ μH
ตัวเก็บประจุวงจรกรอง	$C_f = 1$ μF
ดัชนีการมอดูเลต	$M = 0.9$



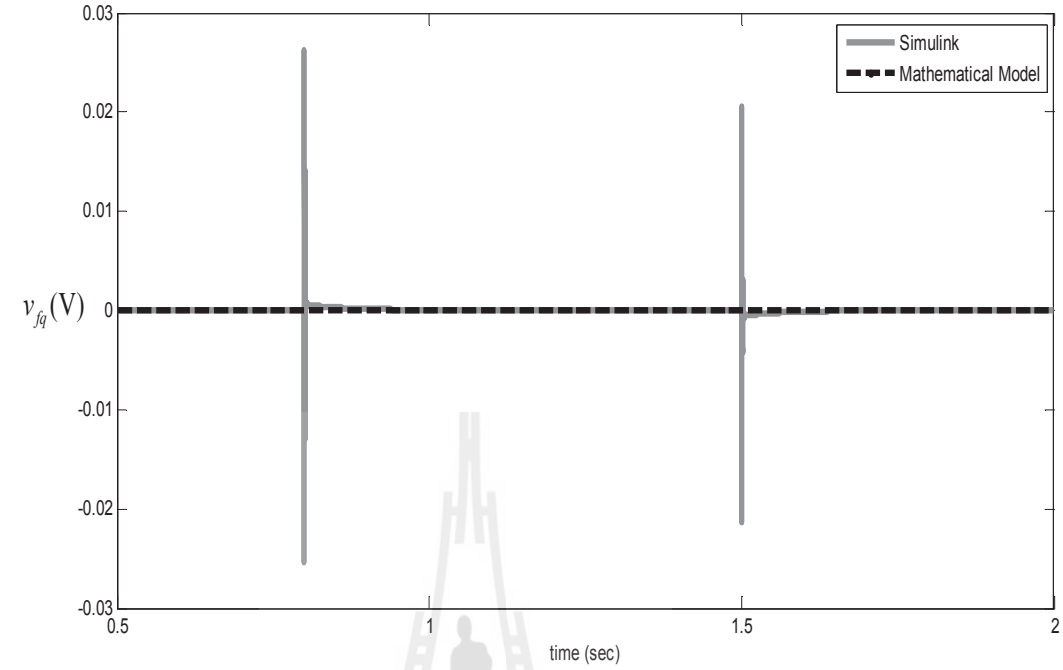
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}



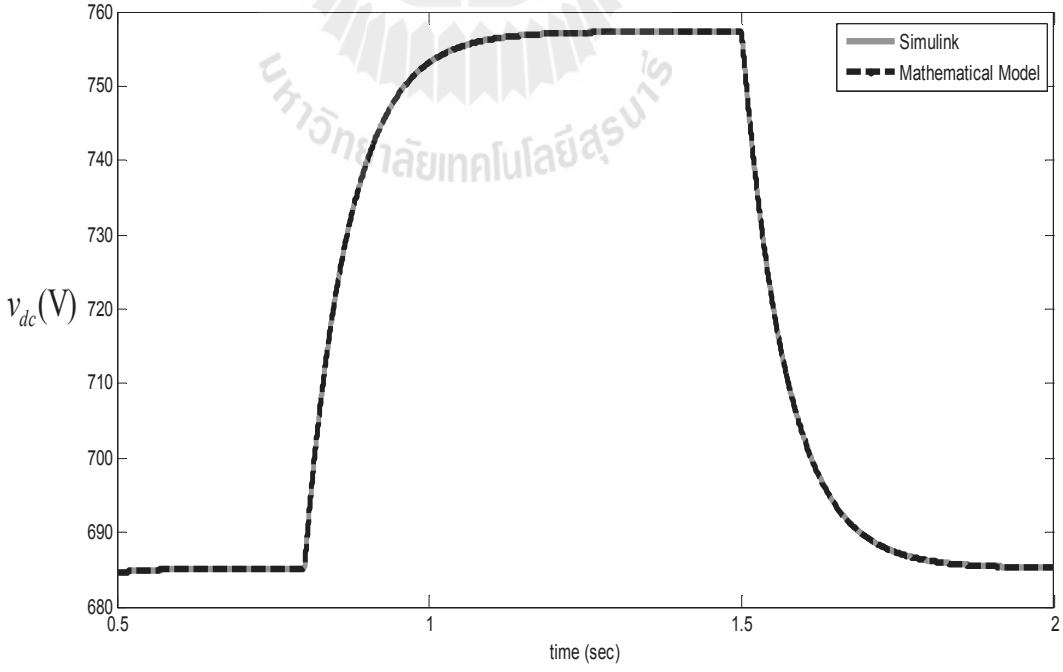
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}

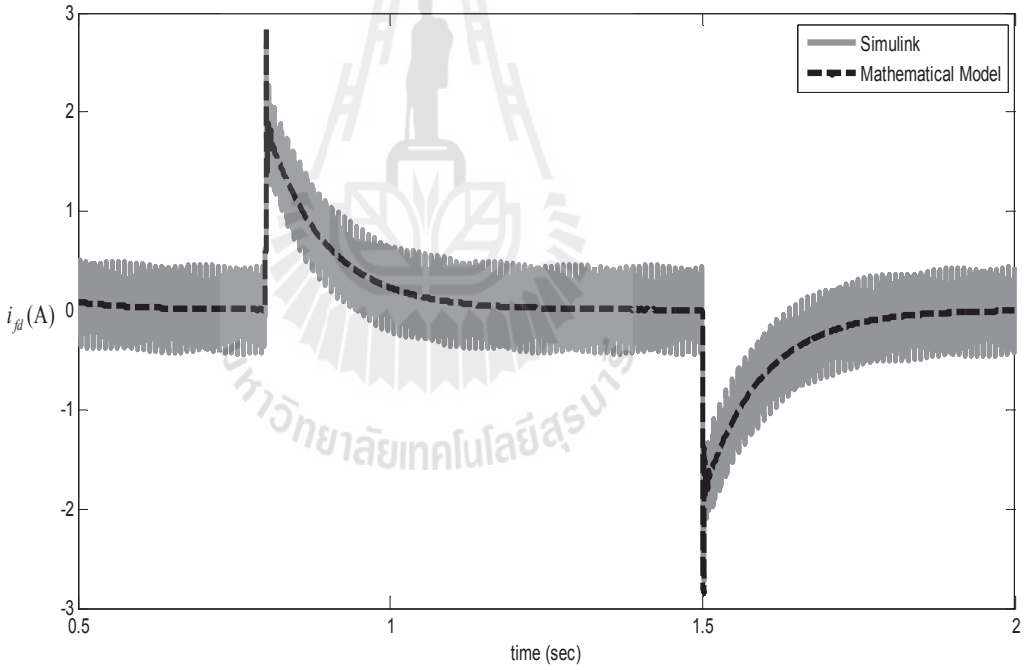


รูปที่ 5.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}

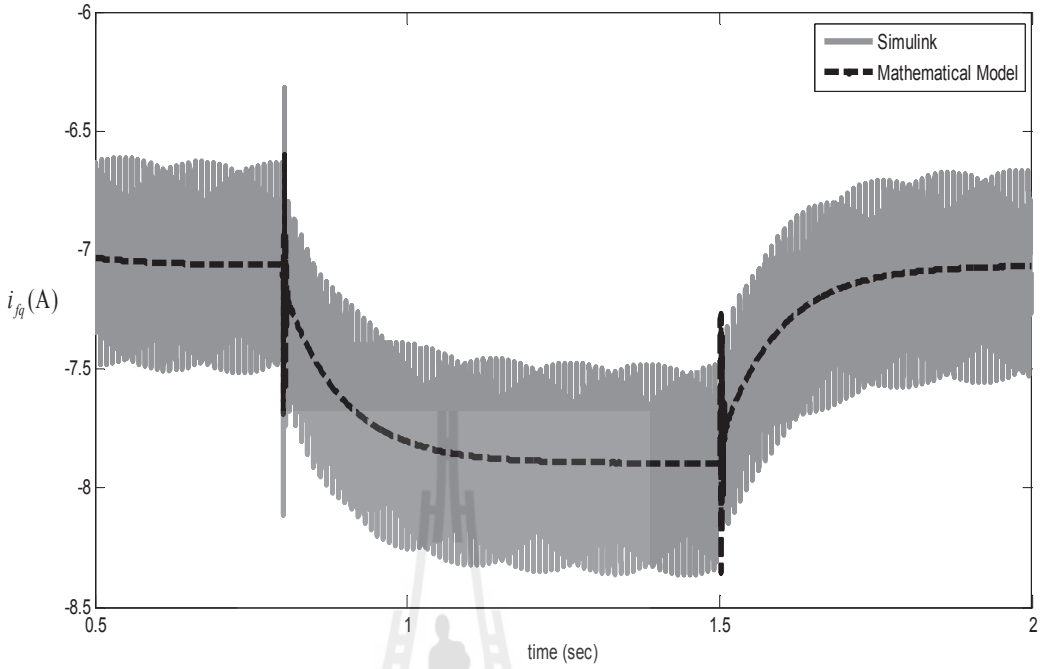
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของค่า $i_{fd}, i_{fq}, v_{fd}, v_{fq}$ และ v_{dc} โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1 (ชุดที่ 1) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว แสดงด้วยเส้นประสีดำ และผลที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSystems ของโปรแกรม simulink แสดงด้วยเส้นสีเทา สังเกตได้ว่า การจำลองสถานการณ์จะพิจารณาในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.5 วินาที ถึง 2 วินาที เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอินพุตของแบบจำลอง คือ ค่า i_s ที่จุด PCC จาก 19 แอมแปร์ เป็น 21 แอมแปร์ ตั้งแต่เวลา 0.8 วินาที ถึง 1.5 วินาที และปรับค่า i_s ที่จุด PCC จาก 21 แอมแปร์ เป็น 19 แอมแปร์ ตั้งแต่เวลา 1.5 วินาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในสภาวะคงตัว ควบคู่ไปกับการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ในช่วงก่อนเวลา 0.8 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที และ 1.5 วินาที ส่งผลให้การตอบสนองของค่า i_{fd} และ i_{fq} มีลักษณะสั่นไกวบ้างเล็กน้อย และเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 จะสังเกตได้ว่าในรูปที่ 5.7 คือ แรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนดี (v_{fd}) ที่ก่อนเวลา 0.8 วินาที แรงดันจะคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 252 โวลต์ และในรูปที่ 5.8 คือ แรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนคิว (v_{fq}) แรงดันจะคงที่ที่ประมาณ 0 โวลต์ ซึ่งที่เวลา 0.8 วินาที จะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุด PCC แรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนดีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนไปคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 278 โวลต์ และที่เวลา 1.5 วินาที กระแสที่จุด PCC ได้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 21 แอมแปร์ มาเป็น 19 แอมแปร์ แรงดันชดเชยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองบนแกนดี จะลดลงและมีค่าแรงดันจะคงที่ที่ประมาณ 252 โวลต์ ส่วนในรูปที่ 5.8 ในการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที และ 1.5 วินาที จะมีการลักษณะสั่นไกวบ้างเล็กน้อย แล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัว ในรูปที่ 5.9 สังเกตได้ว่า ค่า v_{dc} จะเริ่มคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 685 โวลต์ เมื่อมีการเพิ่มค่ากระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที ค่า v_{dc} จะเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ค่าแรงดัน 758 โวลต์ ซึ่งหลังจากเวลา 1.5 วินาที กระแสที่จุด PCC มีการเปลี่ยนแปลงลดลงเท่ากับ 19 แอมแปร์ อีกครั้ง ค่า v_{dc} จึงมีการตอบสนองโดยปรับลดลงกลับมาคงที่ เท่ากับ 685 โวลต์ เช่นเดิม จากผลการตอบสนองทั้งหมด พบว่ารูปสัญญาณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว ให้ผลการตอบสนองทั้งสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วครู่ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับรูปสัญญาณที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSystems ผลดังกล่าวในข้างต้นแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 2)

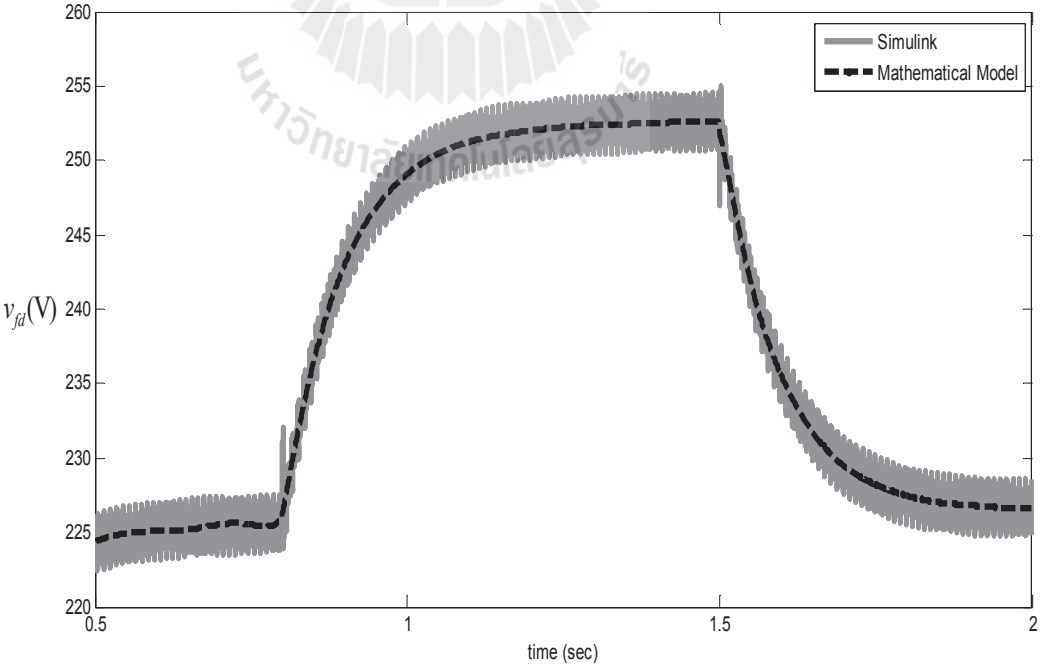
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 17$ A $(t = 0 - 0.8$ sec,$1.5 - 2$ sec$)$, $i_s = 19$ A $(t = 0.8 - 1.5$ sec$)$
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50$ Hz
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 1700$ μF
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 2$ mH
ตัวเก็บประจุวงจรกรอง	$C_f = 100$ μF
ดัชนีการมอดูเลต	$M = 1$



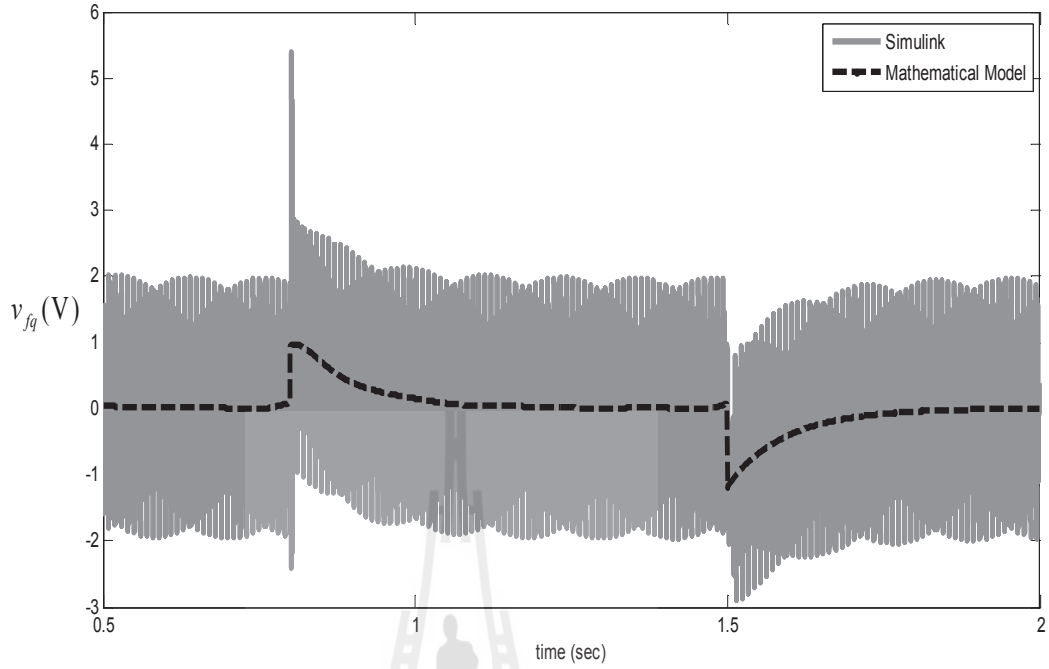
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}



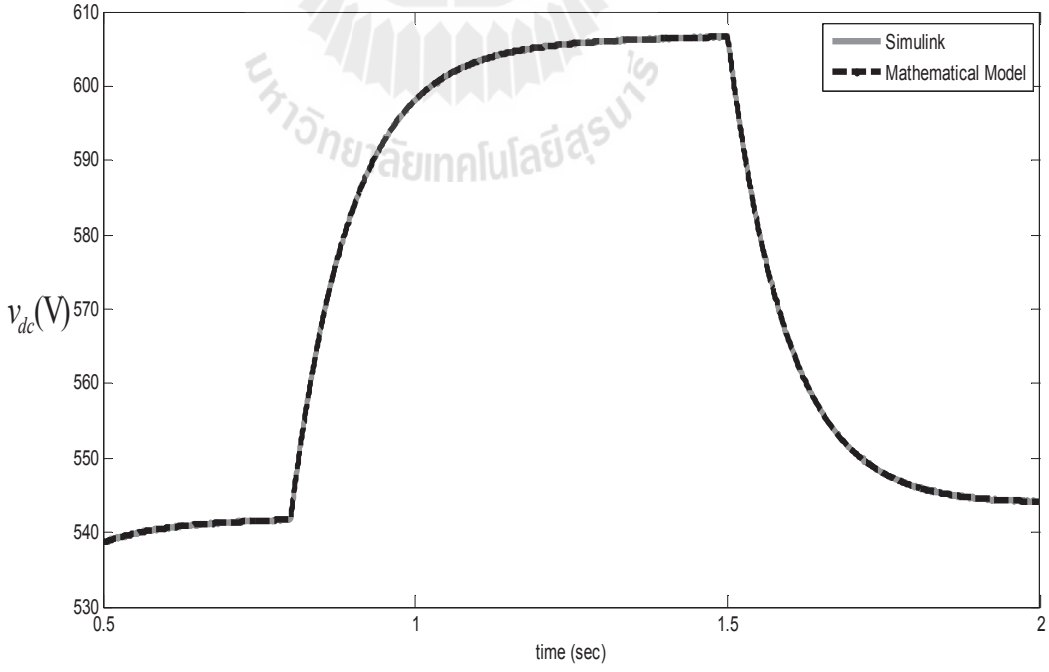
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}

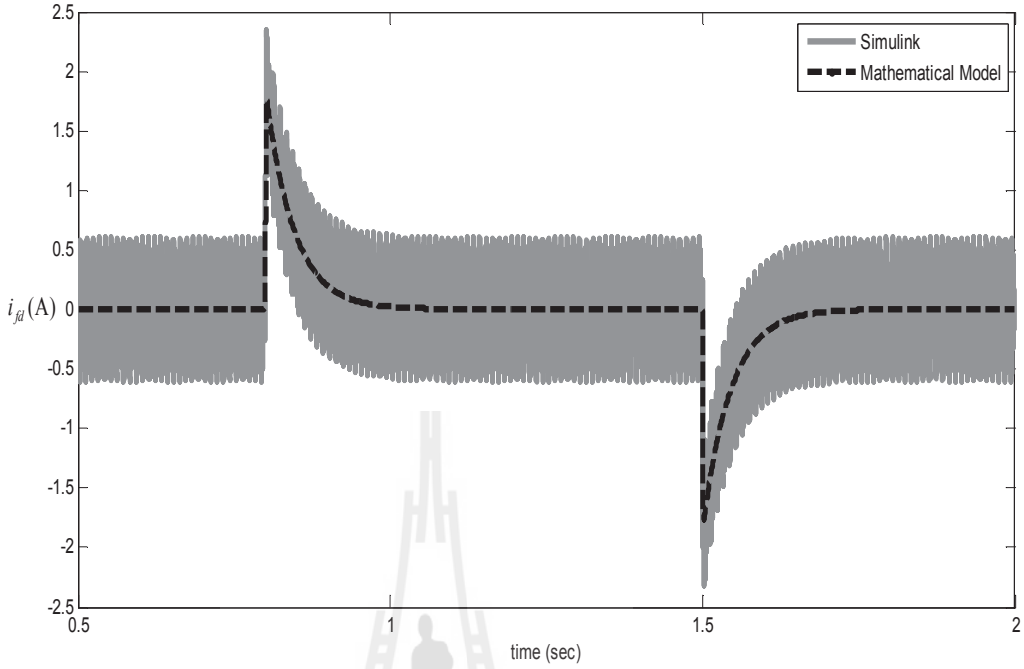


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}

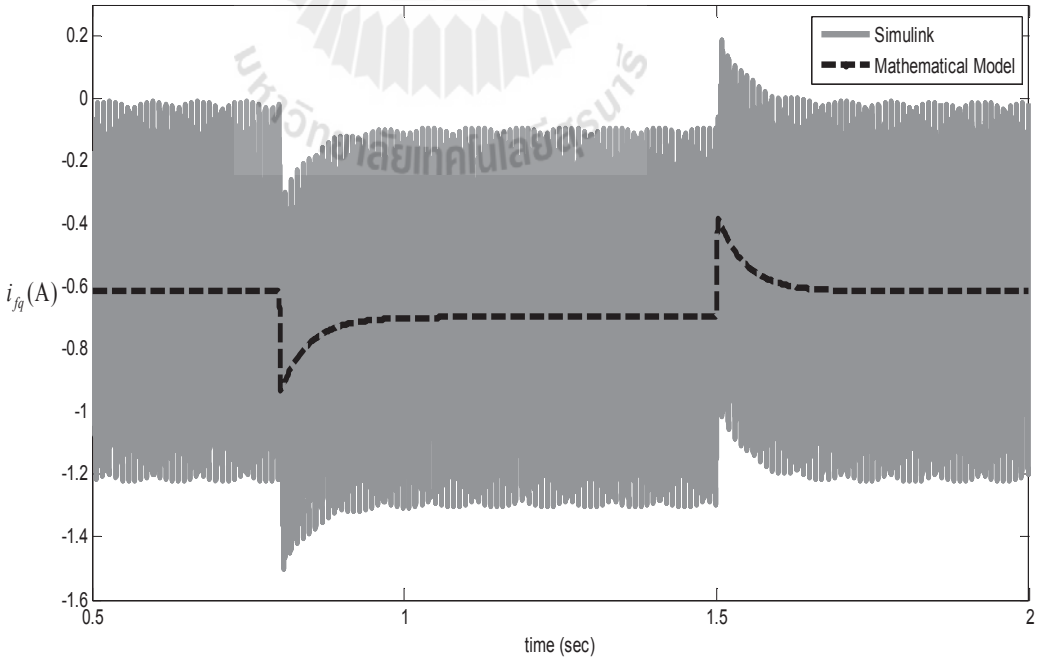
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.14 เป็นผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของค่า $i_{fd}, i_{fq}, v_{fd}, v_{fq}$ และ v_{dc} โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.2 (ชุดที่ 2) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystems การจำลองสถานการณ์จะเหมือนกับการจำลองสถานการณ์ของพารามิเตอร์ชุดที่ 1 โดยมีการปรับเปลี่ยนอินพุตของพารามิเตอร์ชุดที่ 2 คือ กระแสที่จุด PCC จาก 17 แอมแปร์ เป็น 19 แอมแปร์ ตั้งแต่เวลา 0.8 วินาที ถึง 1.5 วินาที และปรับค่ากระแสที่จุด PCC จาก 19 แอมแปร์ เป็น 17 แอมแปร์ตั้งแต่เวลา 1.5 วินาที เป็นต้นไป จากรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 คือ รูปของ i_{fd} และ i_{fq} จะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.12 คือรูปของ v_{fd} ในส่วนนี้จะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 5.7 แต่ที่ก่อนเวลา 0.8 วินาที แรงดันจะคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 225 โวลต์ และเมื่อมีการปรับเปลี่ยนกระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที ถึง 1.5 วินาที แรงดันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนไปคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 253 โวลต์ ในรูปที่ 5.13 คือ รูปของ v_{fq} จะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 5.8 และในรูปที่ 5.14 คือ รูปของ v_{dc} ซึ่งจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.9 แต่ที่ก่อนเวลา 0.8 วินาที แรงดันบัสไฟตรงจะคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 541 โวลต์ และเมื่อมีการปรับเปลี่ยนกระแสที่จุด PCC จาก 17 แอมแปร์ เป็น 19 แอมแปร์ แรงดันบัสไฟตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 605 โวลต์ ในการจำลองสถานการณ์ของพารามิเตอร์ชุดที่ 2 ได้ให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่คล้ายคลึงกับการจำลองสถานการณ์ของพารามิเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งผลที่ได้เป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 3)

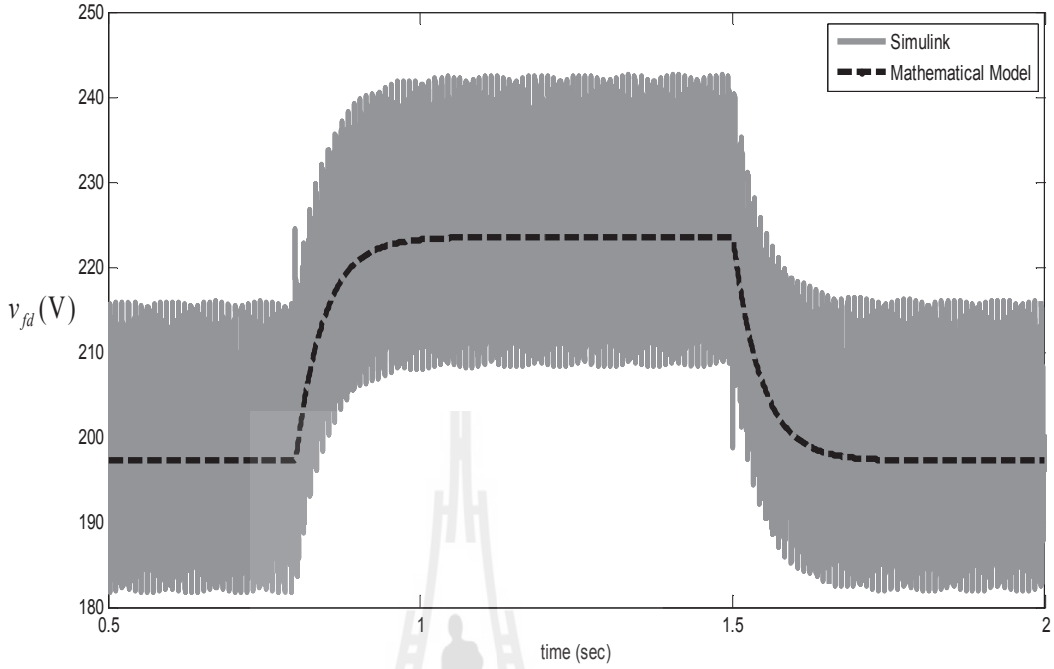
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 15$ A $(t = 0-0.8$ sec,$1.5-2$ sec$)$, $i_s = 17$ A(t = 0.8 - 1.5 sec)
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50$ Hz
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 500$ μF
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 8$ mH
ตัวเก็บประจุวงจรกรอง	$C_f = 10$ μF
ดัชนีการมอดูเลต	$M = 0.8$



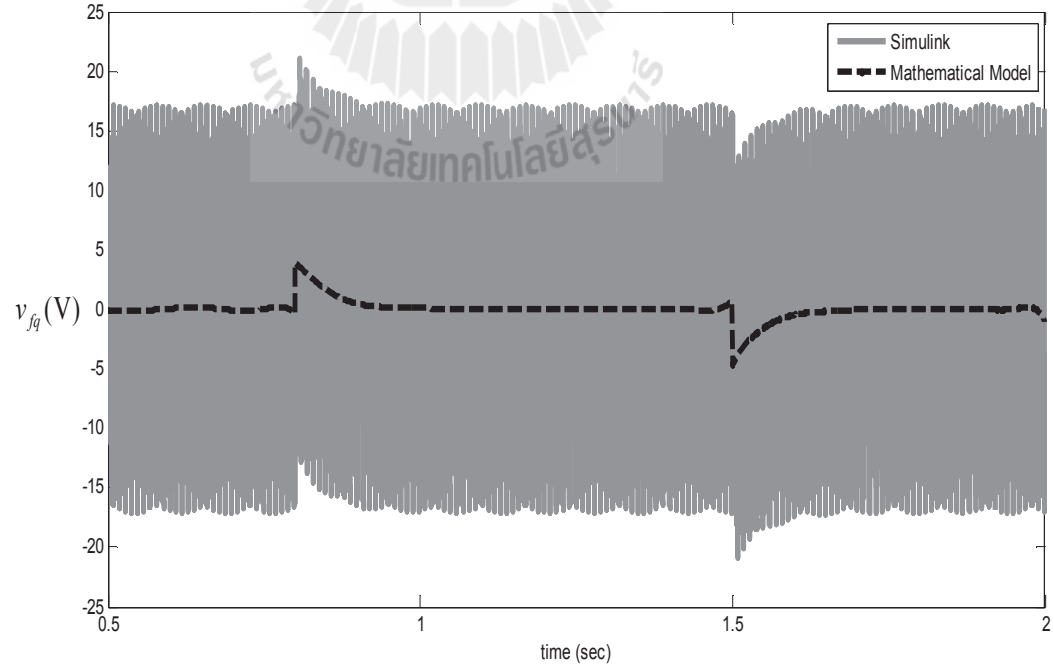
รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}



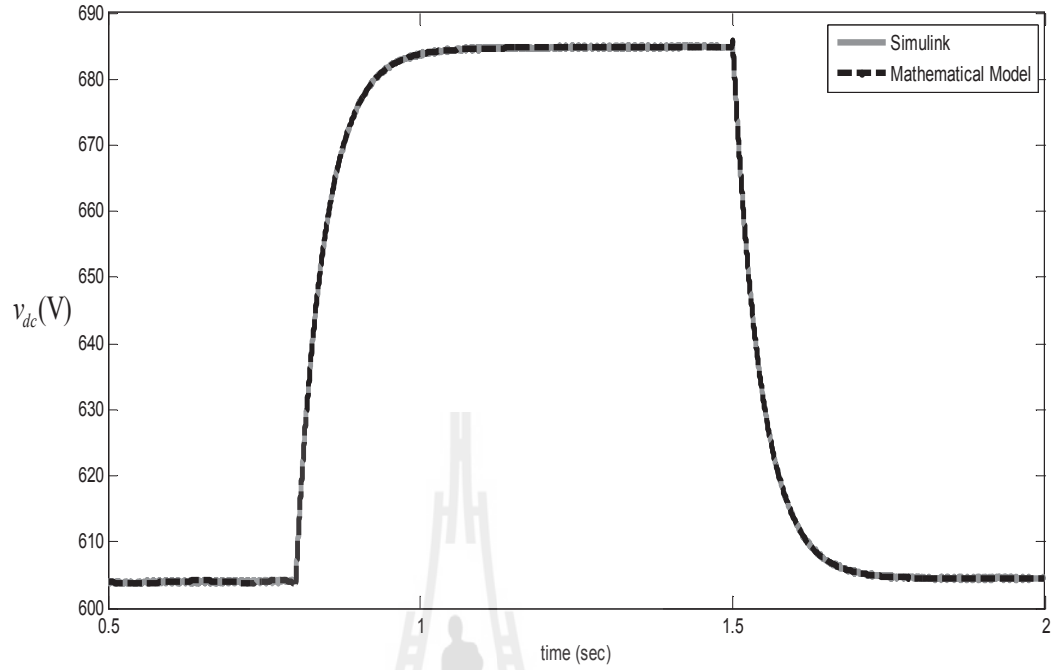
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



รูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}



รูปที่ 5.19 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.19 เป็นผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของค่า $i_{fd}, i_{fq}, v_{fd}, v_{fq}$ และ v_{dc} โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.3 (ชุดที่ 3) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystems ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จะคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าพารามิเตอร์ในชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในการจำลองถานการณ์ได้มีการปรับเปลี่ยนอินพุต คือ กระแสที่จุด PCC จาก 15 แอมแปร์ เป็น 17 แอมแปร์ ที่เวลา 0.8 วินาที ถึง 1.5 วินาที และปรับค่ากระแสที่จุด PCC จาก 17 แอมแปร์ เป็น 15 แอมแปร์ ที่เวลา 1.5 วินาที เป็นต้นไป จากรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.19 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบค่า $i_{fd}, i_{fq}, v_{fd}, v_{fq}$ และ v_{dc} ตามลำดับ ซึ่งจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการจำลองสถานการณ์ของพารามิเตอร์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 แต่จะแตกต่างกันเพียงขนาดของแอมพลิจูด เช่น ในรูปที่ 5.17 คือ รูปของ v_{fd} ที่ก่อนเวลา 0.8 วินาที แรงดันจะคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 197 โวลต์ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสที่จุด PCC จาก 15 แอมแปร์ เป็น 17 แอมแปร์ แรงดันจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 225 โวลต์ และในรูปที่ 5.19 คือ รูปของ v_{dc} ที่ก่อนเวลา 0.8 วินาที ค่าแรงดันบัสไฟตรง จะเริ่มคงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 604 โวลต์ เมื่อมีการเพิ่มค่ากระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที ค่าแรงดันบัสไฟตรงจะเพิ่มขึ้นและจะ

คงที่ที่ค่าแรงดันประมาณ 685 โวลต์ จากผลการจำลองสถานการณ์โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดที่ 3 จะยังคงยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง

จากการจำลองสถานการณ์ของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ชุด เป็นการแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวที่ได้มีความถูกต้อง อีกทั้งเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ เช่น เปลี่ยนค่ากระแสที่จุด PCC ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง ค่าตัวเก็บประจุดีซี และค่าดัชนีการมอดูเลต จะยังให้ผลการลู่เข้าระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับชุดบล็อก SimPowerSystems ที่เหมือนกันอีกด้วย ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ชุดนี้ เป็นเพียงการดูแนวโน้มของการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัว และเพียงพอต่อการยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนดีคิวมีความถูกต้อง

5.5 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่นำเสนอในบทนี้ใช้กฎของแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองบนปริมาณสามเฟส รวมถึงการแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิว ด้วยหลักการแปลงของปาร์ค ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนสามเฟสมีความสำคัญต่อการอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่อยู่บนแกนดีคิวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม อีกทั้งผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง โดยรายละเอียดการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้งานจะนำเสนอไว้ในบทถัดไป

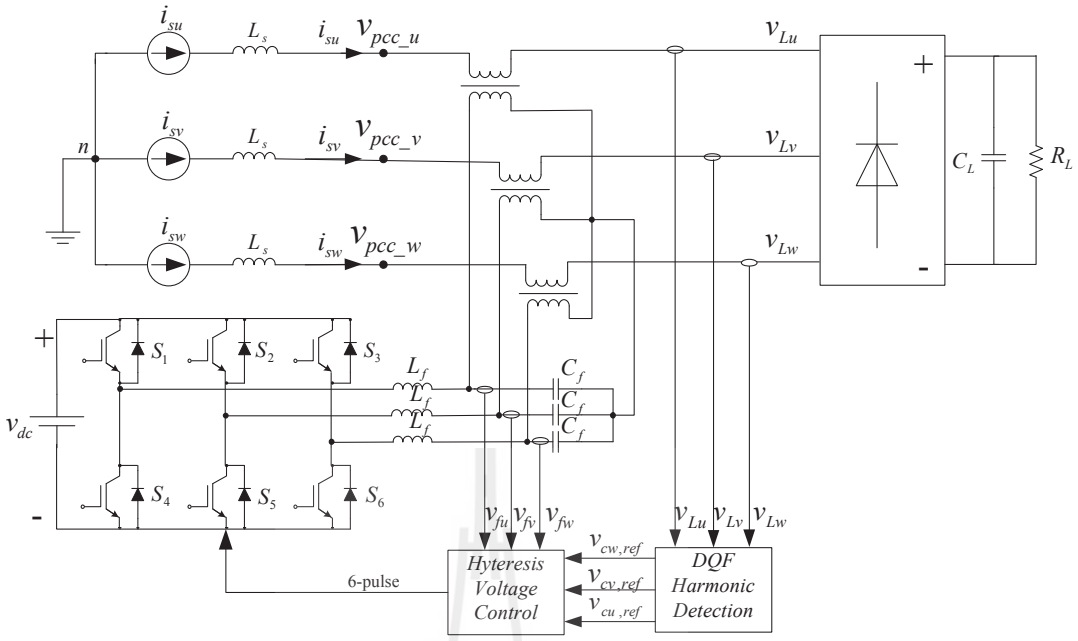
บทที่ 6
การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

6.1 บทนำ

การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยเป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน และการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF รวมไปถึงหลักการของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมรวมไปถึงค่าแถบฮีสเตอรีซีส เนื่องจากในการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมนั้นมีความซับซ้อนและในอดีตไม่ปรากฏการออกแบบดังกล่าวอย่างเป็นขั้นตอน ดังนั้นในบทนี้จะมีการนำเสนอ ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลที่ได้จากการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

6.2 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสจะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 6 ตัว เพื่อทำหน้าที่ฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบ ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

จากรูปที่ 6.1 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจะใช้วิธี DQF ซึ่งเป็นวิธีที่มีสมรรถนะดีที่ได้จากการเปรียบเทียบจากบทที่ 4 ซึ่งพิจารณาได้จากบล็อก DQF Harmonic Detection ส่วนบล็อก Hysteresis Voltage Control เป็นบล็อกสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยได้ตามรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ไอจีบีทีจะทำงานเป็นกิ่งและในแต่ละกิ่งจะทำงานอิสระต่อกันซึ่งพบว่า ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแส จึงส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นตามรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิง ในทำนองเดียวกันเมื่อไอจีบีทีตัวบนหยุดนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะนำกระแสแทน ส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าลดลง ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาการฉีดแรงดันชดเชยจะได้ตามสมการที่ (6-1) ดังนี้

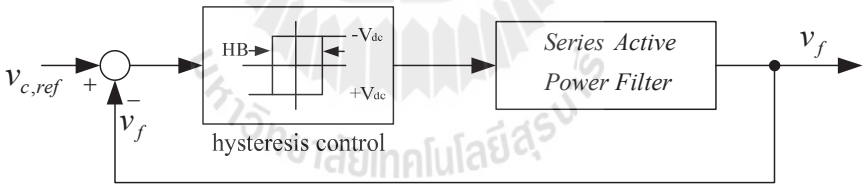
$$v_{pcc_u} = v_{Lu} - v_{fu} \tag{6-1}$$

จากสมการที่ (6-1) พิจารณาการทำงานในกรณีเฟส u เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีการฉีดแรงดันชดเชย (v_{fu}) ค่าแรงดันที่จุด PCC (v_{pcc_u}) จะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลด (v_{Lu}) ซึ่งจะมี

การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ เมื่อทำการฉีดแรงดันชดเชยดังสมการที่ (6-1) ค่าแรงดันที่จุด PCC จะเท่ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดหักลบกับค่าแรงดันชดเชยจึงทำให้ค่าแรงดันที่จุด PCC มีลักษณะรูปสัญญาณเป็นรูปไซน์มากขึ้น

6.3 หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

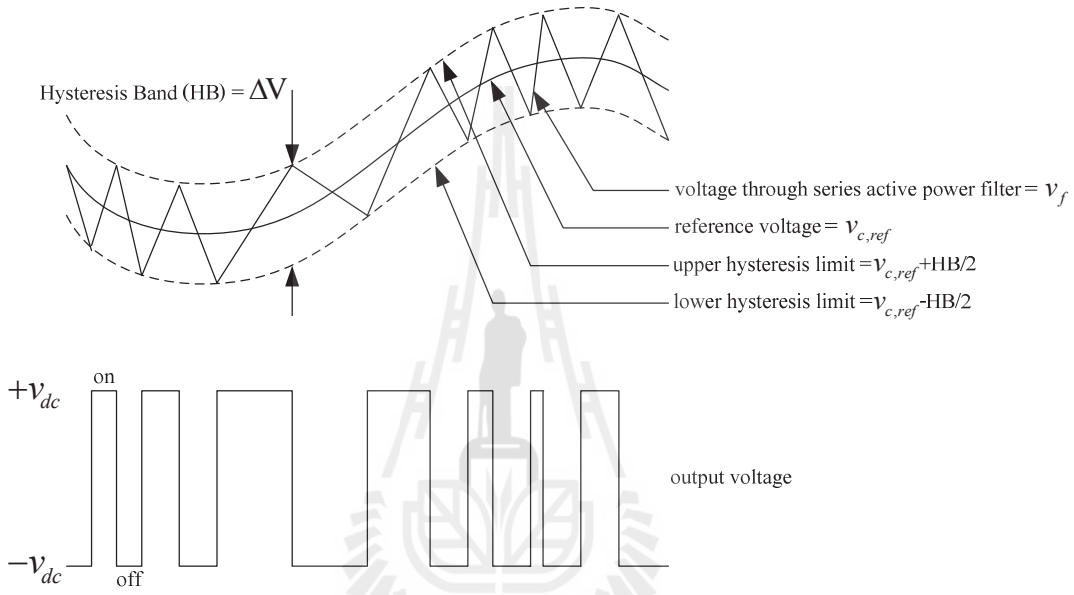
การควบคุมแรงดันชดเชยมีความสำคัญมากสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะกับการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถดูโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสได้ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งรูปดังกล่าวเป็นการควบคุมแบบวงรอบปิดที่มีการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณแรงดันอ้างอิง ($v_{c,ref}$) กับสัญญาณแรงดันชดเชย (v_f) จะได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน (error) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณส่งไปยัง ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส เพื่อที่จะปรับสัญญาณแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง โดยสัญญาณแรงดันชดเชยจะได้จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งรายละเอียดการควบคุมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสจะแสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

จากรูปที่ 6.3 แถบฮีสเตอรีซีส (Hysteresis Band: HB) คือ ขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชย (v_f) ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ซึ่งค่าแรงดันชดเชยดังกล่าวสามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้โดยอาศัยการควบคุมการทำงานของการสวิตช์ไอจีบีทีและเมื่อพิจารณาการทำงานในกรณีหนึ่งเฟส ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างหยุดนำกระแส จะทำให้แรงดันชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบนของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส (upper hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะหยุดนำกระแสในขณะที่ไอจีบีทีตัวล่างนำกระแสแทน ส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าลดลง เมื่อค่าแรงดันลดลงจนถึงค่าขอบเขตล่างของ

ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส (lower hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแสอีกครั้ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงานโดยค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) การอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.3 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

6.4 การฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

การฉีดแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและค่าแถบฮีสเตอรีซีส มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก โดยในการจำลองสถานการณ์จะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าวใช้แหล่งจ่ายกระแส (i_s) ขนาด 17 แอมแปร์ต่อเฟส ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสายส่ง (L_s) เท่ากับ 0.1 mH ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 0.1 MΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ 1 μF โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่จุด PCC ด้วยเหตุนี้บล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเข้ามามีบทบาทเพื่อ

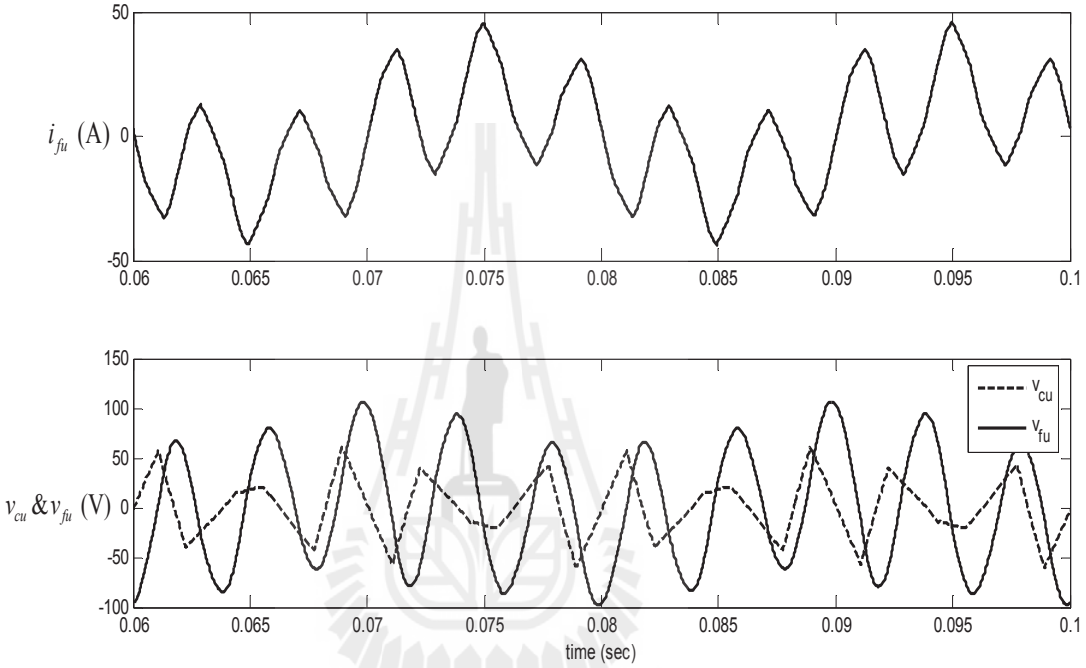
ตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบโดยการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงบนแกนสามเฟส ($v_{cu,ref}$, $v_{cv,ref}$, $v_{cw,ref}$) สำหรับเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสจะใช้การควบคุมแบบวงรอบปิดดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 เพื่อทำการสร้างสัญญาณพัลส์ไปสั่งไอจีบีทีให้ทำงานตามที่ต้องการ การสังเกตพฤติกรรมค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง ค่าแรงดันบัสไฟตรง และค่าแถบฮีสเตอรีซีส ในการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่าความผิดเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) หลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเป็นหลัก

ตารางที่ 6.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

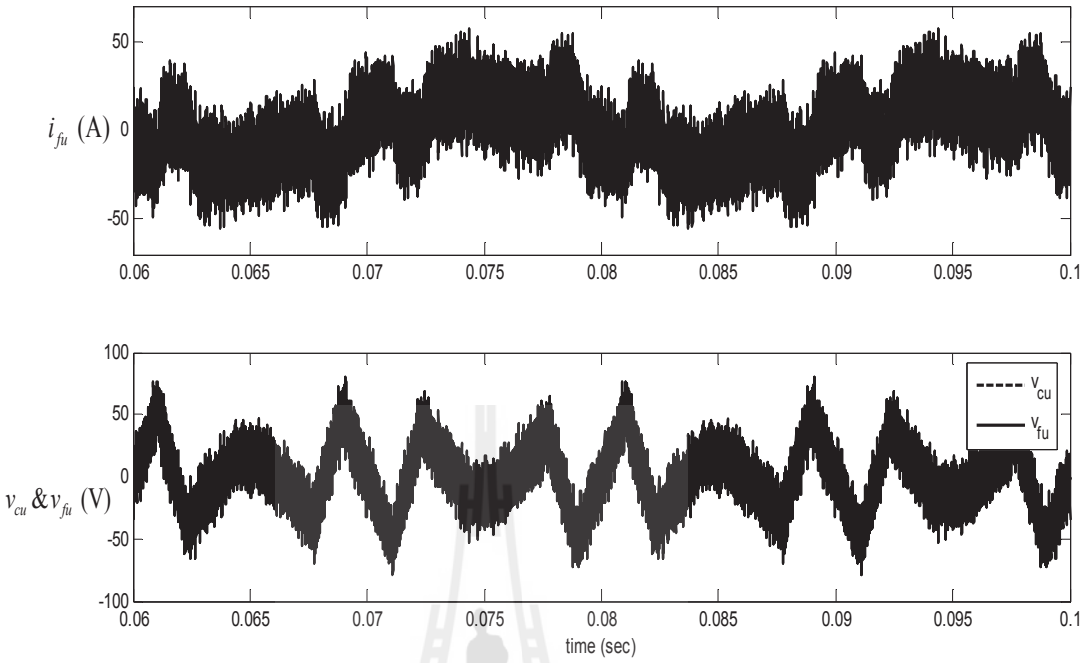
ค่าพารามิเตอร์ L_f(mH)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 200$ V, $C_f = 50$ μF, $HB = 0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 300$ V $C_f = 100$ μF, $HB = 0.1$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 400$ V, $C_f = 80$ μF, $HB = 0.1$ V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 500$ V, $C_f = 200$ μF, $HB = 0.001$ V)
0.1	3.56	4.71	6.36	7.45
0.5	0.83	1.01	1.36	1.56
1	0.47	0.52	0.69	0.79
2	0.33	0.29	0.37	0.41
3	0.49	0.37	0.31	0.35
4	0.84	0.76	0.41	0.56
5	1.29	1.37	0.59	1.08
6	2.57	1.99	0.86	1.94
7	2.24	2.57	1.30	2.89
8	2.14	2.97	1.68	4.15
9	5.28	5.02	2.21	16.72
10	5.31	19.05	2.31	22.03

จากตารางที่ 6.1 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ซึ่งในตารางดังกล่าวจะดำเนินการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด ซึ่งชุดที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) เท่ากับ 50 μF และแถบฮีสเตอรีซีส (HB) เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 400 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 80 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันและพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน แต่ในตารางที่ 6.1 จะมุ่งไปที่ประเด็นของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองโดยการสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะดำเนินการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวกับพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เพื่อยืนยันว่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก เมื่อพิจารณาสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ($L_f \frac{di_f}{dt}$) โดยที่ $\frac{di_f}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเทียบกับเวลา และพิจารณาในรูปของความชันของรูปสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดันชดเชยมีการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ช้าเนื่องมาจากมีความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่น้อย สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.4 โดยในรูปดังกล่าวจะใช้พารามิเตอร์ในชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 10 mH และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้การลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่เร็วมากจนเกิดเป็นสัญญาณกระเพื่อม เนื่องจากมีความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองมีค่ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสจึงเร็วเกินไปสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.5 ซึ่งในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 0.1 mH การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในตารางที่ 6.1 พบว่าพารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 2 mH ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยที่เหมาะสมที่สุดและสามารถดูได้จากรูปที่ 6.6 ซึ่งเป็นรูปผลของการใช้ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่เหมาะสม จะพบว่าแรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง และจากตารางดังกล่าว สามารถนำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งในรูปนี้จะแสดงให้เห็นอยู่ 2 ประเด็น ประเด็นที่ 1 คือ เมื่อเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก โดยสังเกตได้จาก $\%THD_{v,av}$ โดยในช่วงก่อน 0.5 mH จะพบว่ามีค่าที่สูง และในช่วงตั้งแต่ 8 mH ขึ้นไปก็จะมีค่าที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองช่วงที่เหมาะสม คือ 0.5 mH ถึง

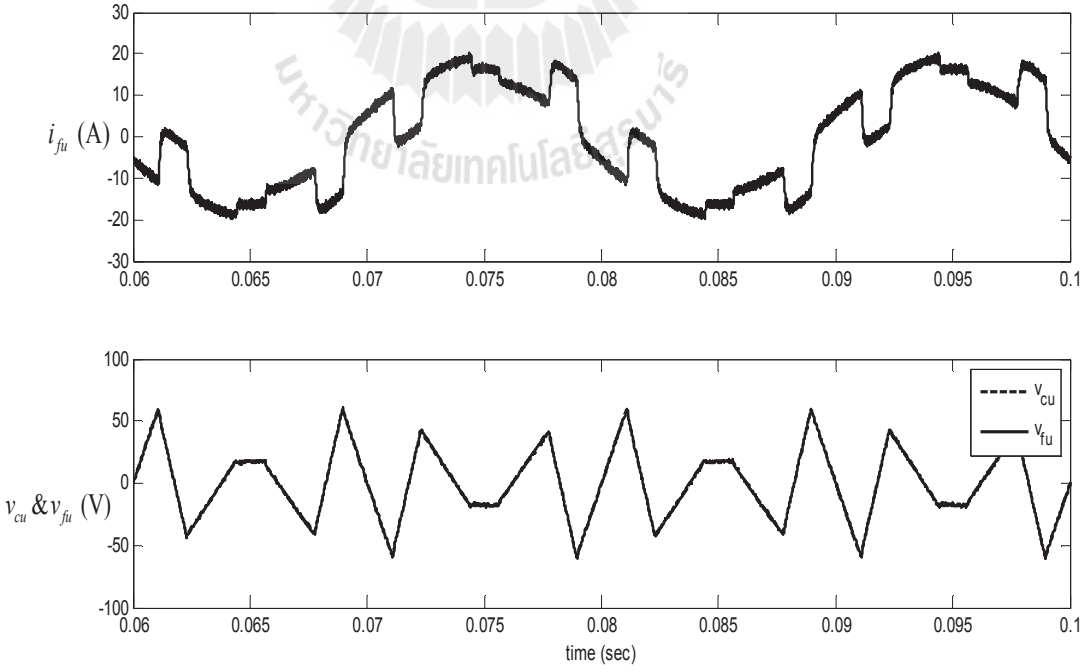
8 mH ประเด็นที่ 2 คือ ถึงแม้ว่าค่าแรงดันบัสไฟตรง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง และแถบฮีสเตอรีซีส ไม่เหมือนกันก็ตาม แต่ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่เหมาะสมก็จะอยู่ในช่วง 0.5 mH ถึง 8 mH สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่มีโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงดังกล่าว



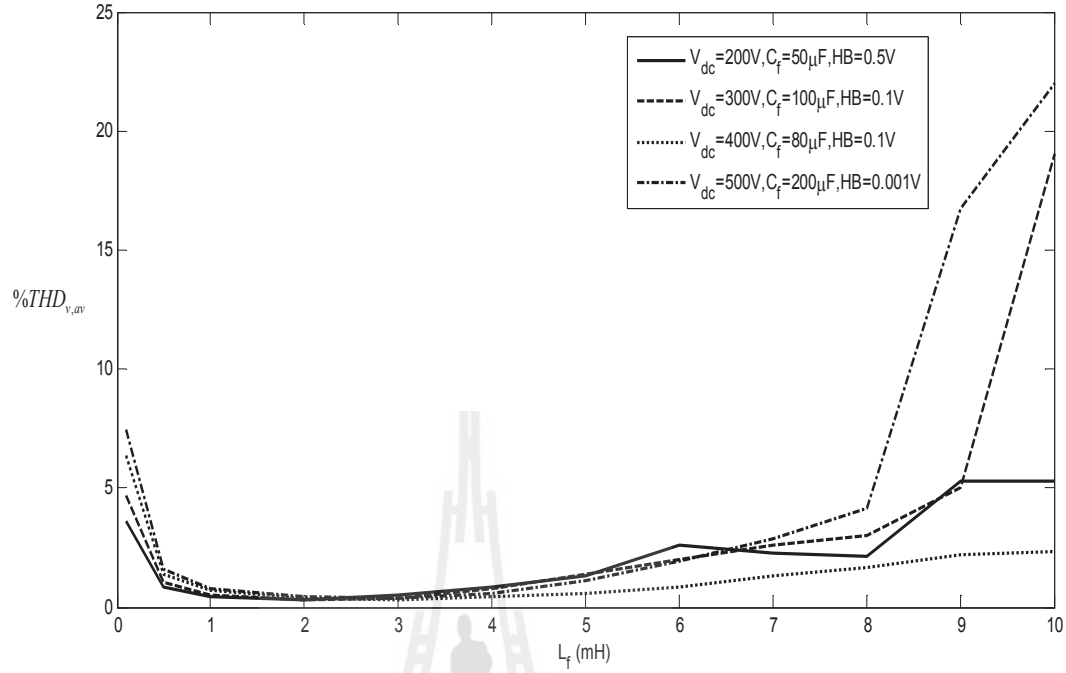
รูปที่ 6.4 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก



รูปที่ 6.5 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 6.6 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม



รูปที่ 6.7 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 6.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง

ค่าพารามิเตอร์ $C_f(\mu\text{F})$	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 60$ V, $L_f = 1$ mH, $HB = 0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 200$ V, $L_f = 3$ mH, $HB = 1$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 500$ V, $L_f = 6$ mH, $HB = 0.001$ V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 550$ V, $L_f = 5$ mH, $HB = 0.05$ V)
1	38.07	54.41	74.20	93.88
5	13.03	26.10	39.98	50.60
10	4.95	9.31	12.67	12.34
30	2.45	0.78	0.35	0.34
50	2.02	0.62	0.41	0.30
80	1.42	0.75	0.59	0.39
100	1.20	0.87	0.78	0.44
200	0.86	2.11	1.94	0.79

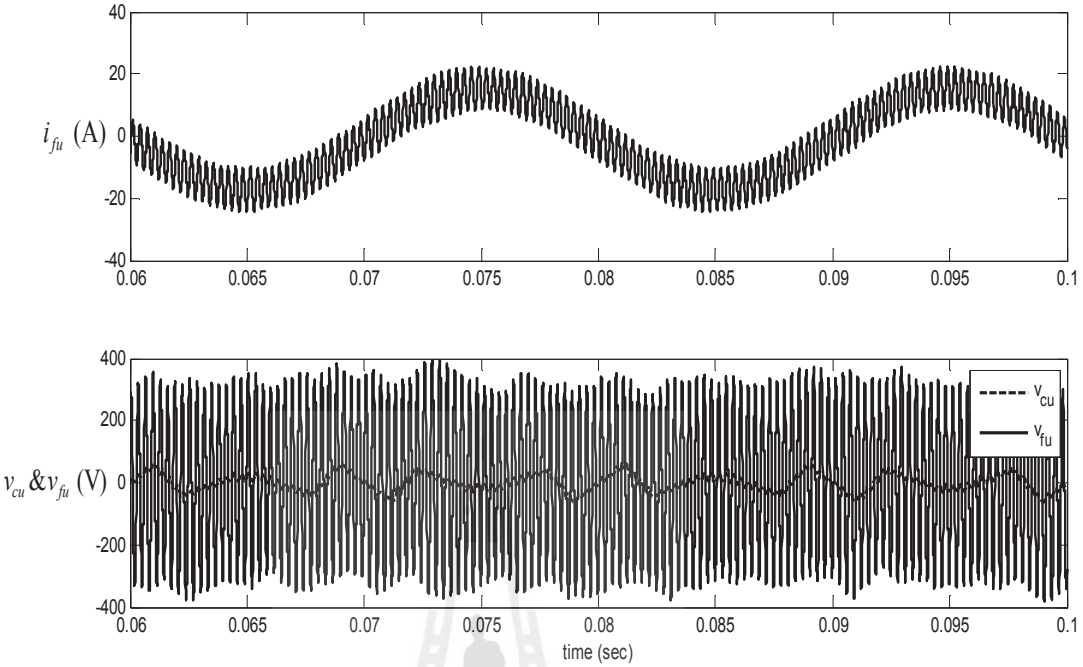
ตารางที่ 6.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง (ต่อ)

ค่าพารามิเตอร์ $C_f(\mu\text{F})$	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 60$ V, $L_f = 1$ mH, $HB = 0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 200$ V, $L_f = 3$ mH, $HB = 1$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 500$ V, $L_f = 6$ mH, $HB = 0.001$ V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 550$ V, $L_f = 5$ mH, $HB = 0.05$ V)
300	0.83	4.42	3.74	1.38
400	1.30	7.22	7.85	2.12
500	2.14	8.14	8.97	2.79

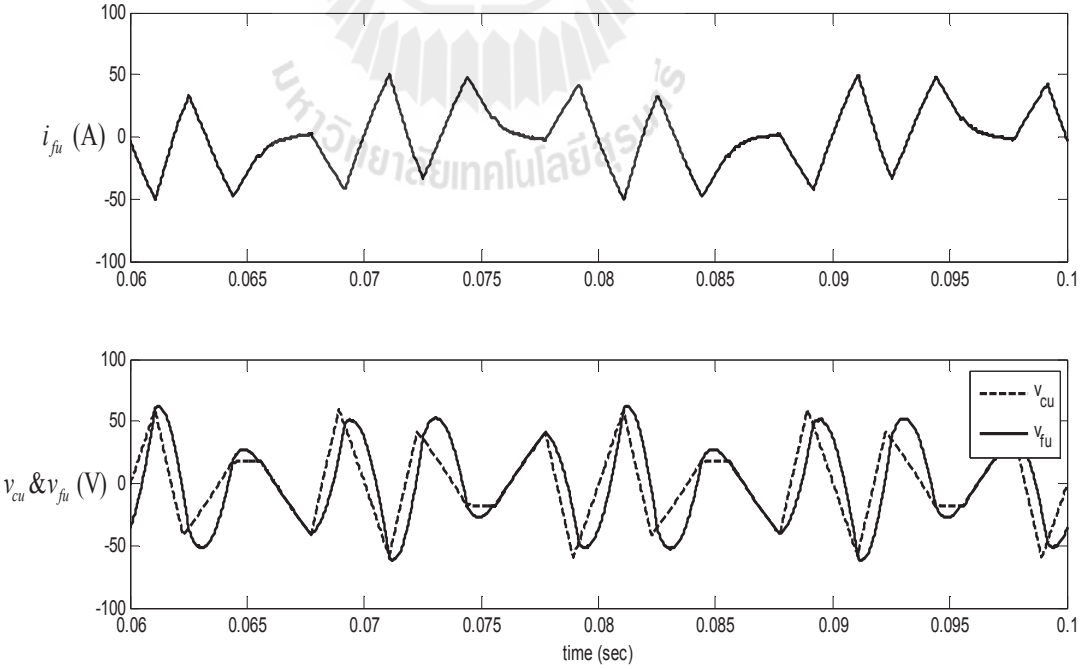
จากตารางที่ 6.2 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุวงจรกรองมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก จึงได้เปรียบเทียบจากพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด โดยชุดที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 60 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเหนี่ยววงจรกรอง เท่ากับ 3 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเหนี่ยววงจรกรอง เท่ากับ 6 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 550 โวลต์ ตัวเหนี่ยววงจรกรอง เท่ากับ 5 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.05 โวลต์ ในการสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว จะมีผลต่อการฉีดแรงดันชดเชย แต่ในตารางที่ 6.2 จะมุ่งประเด็นไปที่การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองโดยจะทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองตั้งแต่ 1 μF ถึง 500 μF และเมื่อพิจารณาสมการที่ (5-4) ถึงสมการที่ (5-6) ในบทที่ 5 จะเป็นสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรกรอง ($C_f \frac{dv_f}{dt}$) โดยที่ $\frac{dv_f}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองเทียบกับเวลา และเมื่อพิจารณาในรูปของความชันของรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรอง โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้การลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่เร็วมากจนทำให้เกิดเป็นสัญญาณกระเพื่อม เนื่องมาจากมีความชันที่มากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองจึงเร็วเกินไป สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.8 โดยในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 1 μF และเมื่อพิจารณาที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้

รูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองมีการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ช้า เนื่องจากมีความชันที่น้อย สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.9 โดยในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 3 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 500 μF จากตารางที่ 6.2 พบว่าพารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF เป็นค่าที่ส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่าที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองตัวอื่น ๆ และสามารถดูได้จากรูปที่ 6.10 จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงมาก และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.11 โดยในรูปดังกล่าวเป็นรูปของค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ซึ่งจะพบว่าที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองมีขนาดเล็ก เช่น 1 μF, 5 μF และ 10 μF จะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่ามาก และที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่ เช่นที่ 400 μF และ 500 μF ก็จะทำให้ $\%THD_{v,av}$ มากด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้และโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 30 μF ถึง 300 μF และในรูปดังกล่าวพบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันบัสไฟตรง ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง และแถบฮีสเตอรีซีส ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง ที่เหมาะสมจะยังคงอยู่ในช่วงดังกล่าว ทั้งนี้ในกรณีที่เปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันบัสไฟตรงเป็นตัวเก็บประจุ การเลือกตัวเก็บประจุวงจรกรองควรมีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินจากขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง (C_{dc}) ทั้งนี้เพื่อให้กระแสไฟฟ้าได้ไหลเข้าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเพื่อเก็บสะสมพลังงานให้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

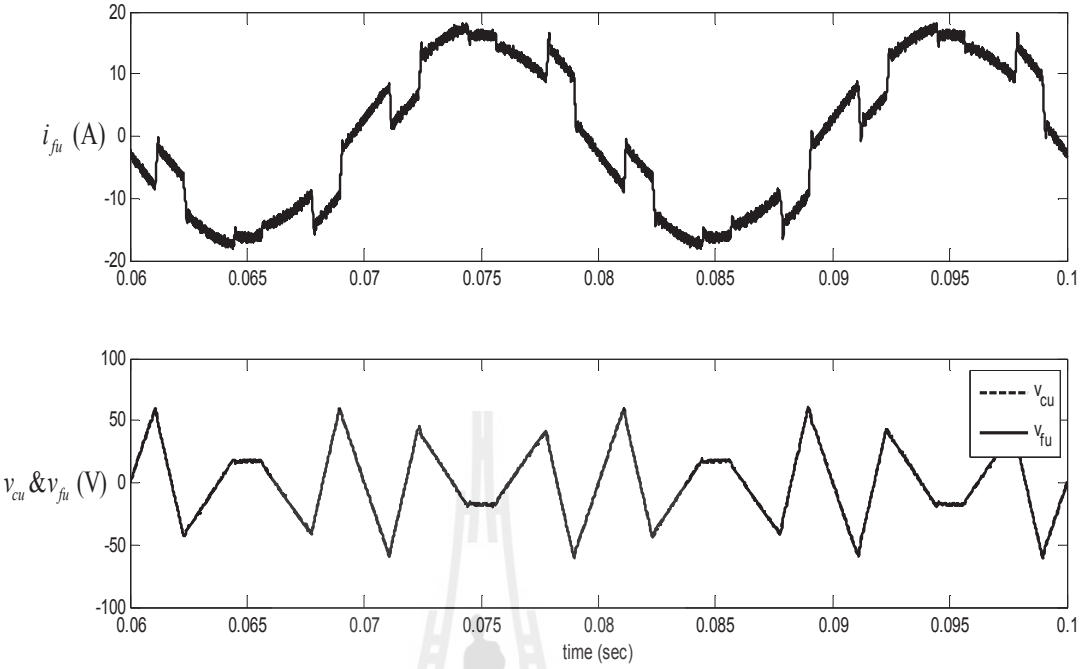
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



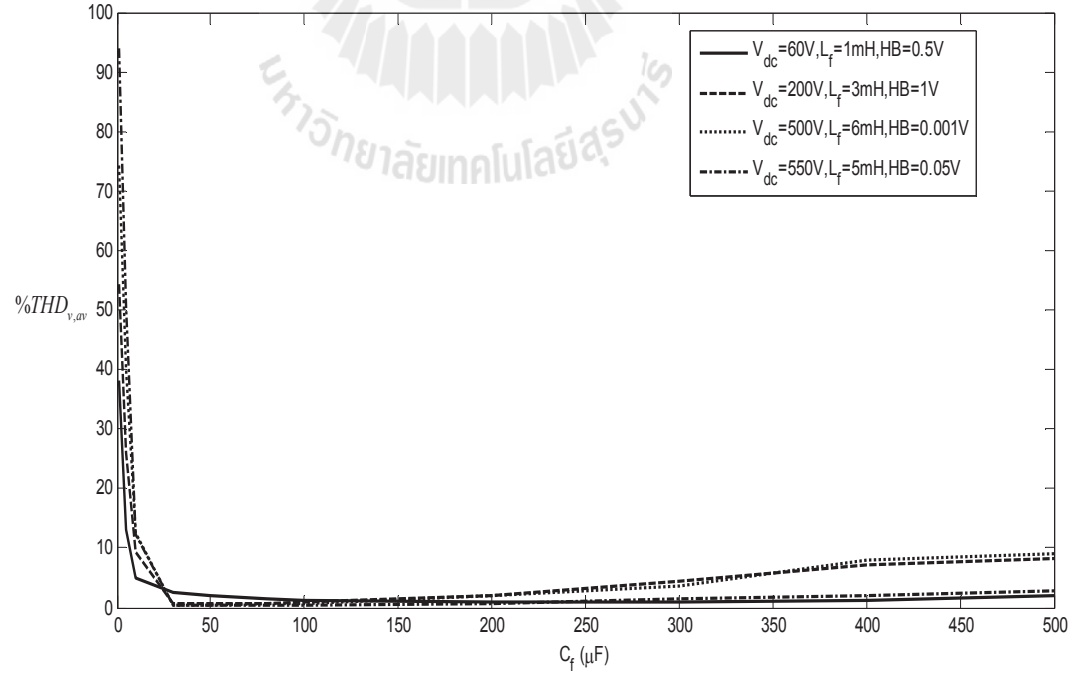
รูปที่ 6.8 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 6.9 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก



รูปที่ 6.10 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม



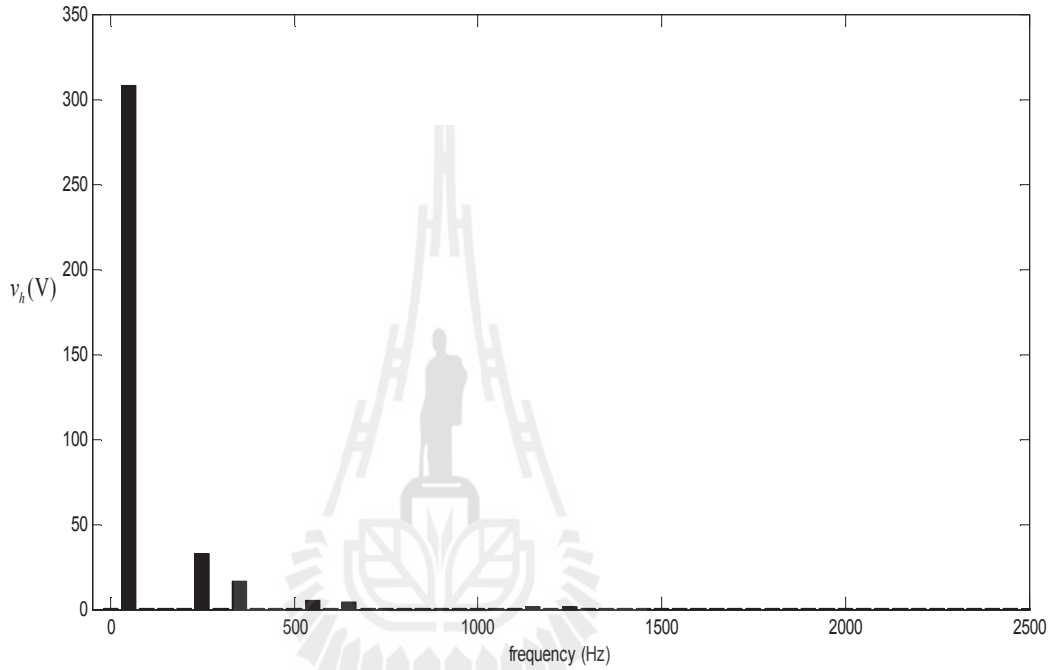
รูปที่ 6.11 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 6.3 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง

ค่าพารามิเตอร์ v_{dc}(V)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($C_f = 80\ \mu$F, $L_f = 4$ mH, $HB = 0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($C_f = 50\ \mu$F, $L_f = 5$ mH, $HB = 0.1$ V)	ชุดที่ 3 ($C_f = 300\ \mu$F, $L_f = 2$ mH, $HB = 0.005$ V)	ชุดที่ 4 ($C_f = 200\ \mu$F, $L_f = 3$ mH, $HB = 0.001$ V)
52.5	4.54	5.45	7.86	10.66
60	4.96	6.03	7.40	10.52
100	1.71	1.66	4.66	7.10
150	2.11	2.40	1.74	3.25
200	1.23	1.27	0.83	1.89
250	0.84	0.84	0.46	1.18
300	0.64	0.55	0.34	0.75
350	0.52	0.51	0.32	0.55
400	0.43	0.40	0.35	0.40
450	0.39	0.35	0.38	0.33
500	0.38	0.35	0.42	0.35
550	0.37	0.33	0.45	0.33
600	0.38	0.30	0.47	0.35
650	0.37	0.30	0.52	0.37
700	0.38	0.32	0.56	0.39
750	0.40	0.33	0.59	0.41

จากตารางที่ 6.3 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งในตารางดังกล่าวจะดำเนินการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด ชุดที่ 1 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 4 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 80 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ

300 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.005 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เป็นพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน แต่จะดำเนินการเปลี่ยนค่าแรงดันบัสไฟตรงที่เท่ากัน เพื่อยืนยันว่าแรงดันบัสไฟตรงมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก

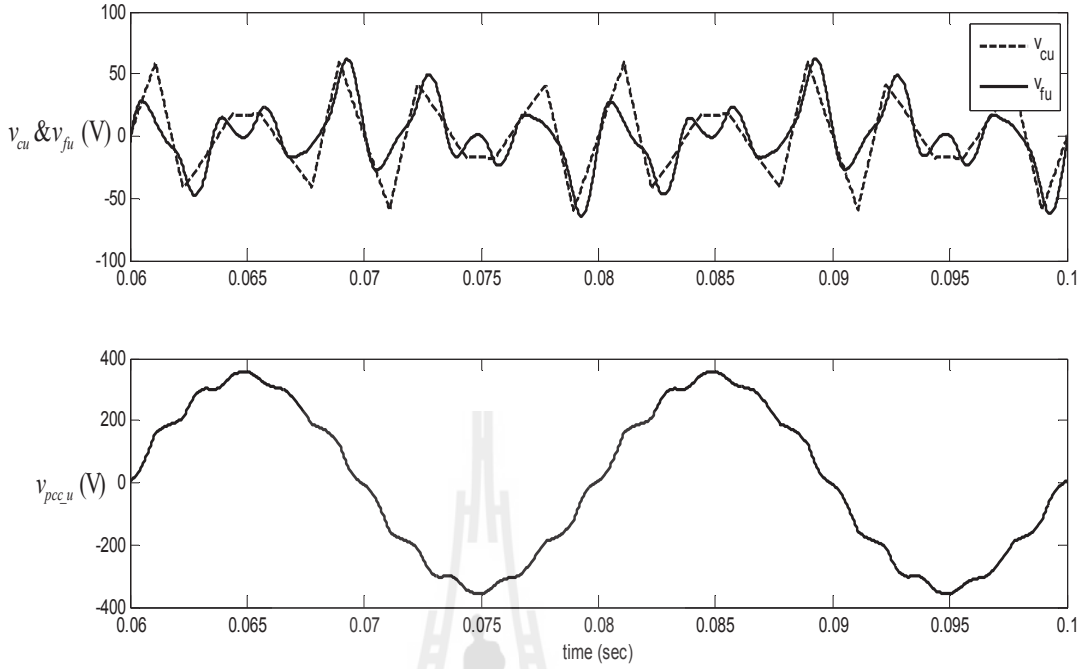


รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย

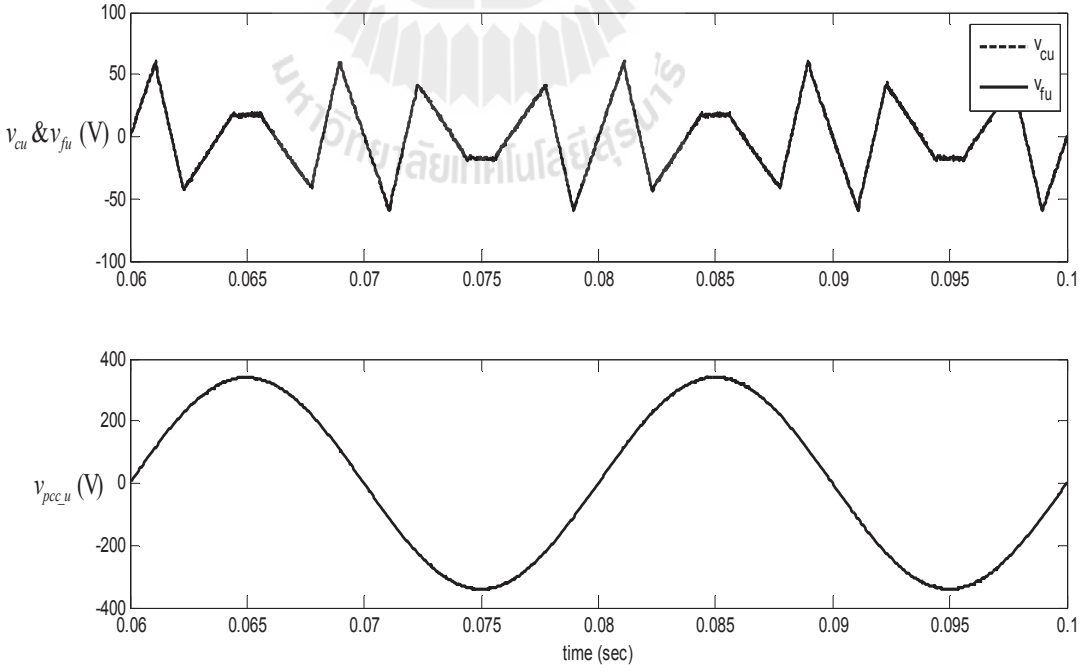
$$v_{dc} \geq \frac{3}{2} v_{h,\max} \tag{6-2}$$

จากรูปที่ 6.12 เป็นรูปสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย จะพบว่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็นแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่มีค่าสูงสุด ($v_{h,\max}$) โดยแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะมีค่าประมาณ 35 โวลต์ ในการคำนวณหาค่าแรงดันบัสไฟตรงจะดำเนินการคำนวณจากสมการที่ (6-2) (Wang, Yao, and Liu, 2001) เมื่อแทนค่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่มีค่าสูงสุดลงในสมการดังกล่าวจะได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงจะต้องมีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 52.5 โวลต์ ในการสังเกตพฤติกรรมของแรงดันบัสไฟตรงจะดำเนินการสังเกตพฤติกรรมของแรงดันบัสไฟตรงตั้งแต่ 52.5 โวลต์ ถึง 750 โวลต์ สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 6.3 เมื่อพิจารณา

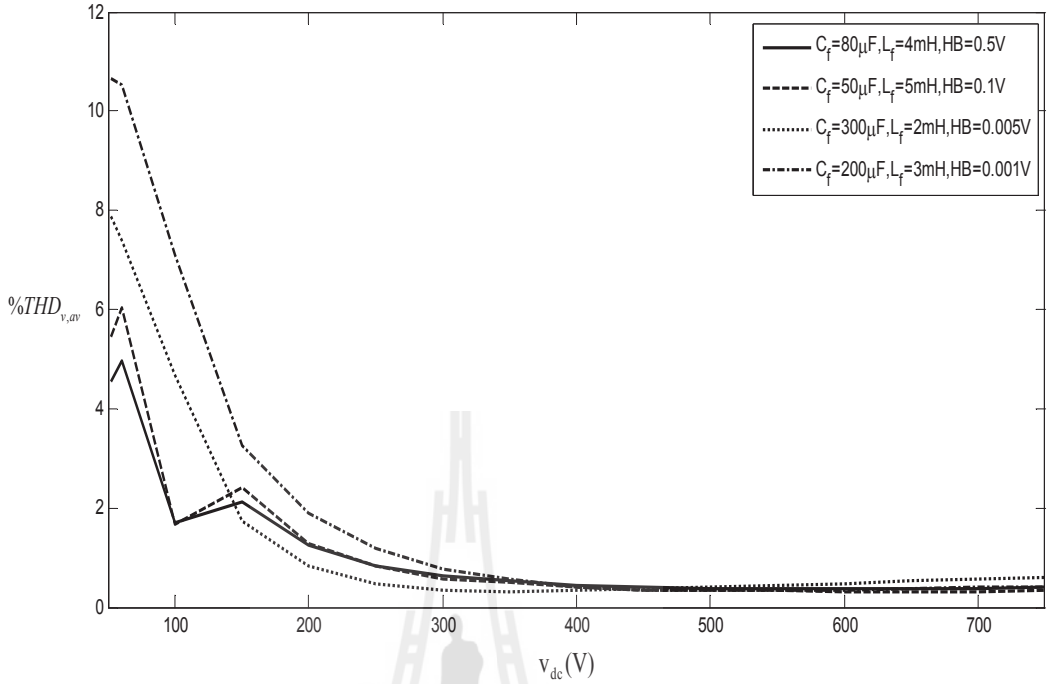
ในสมการที่ (5-21) ในบทที่ 5 จะพบว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงจะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ และพิจารณาสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ยังขึ้นอยู่กับค่าแรงดันบัสไฟตรงอีกด้วย ทั้งนี้ค่าแรงดันบัสไฟตรงจึงมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.3 พบว่าที่แรงดันบัสไฟตรงมีค่าแรงดันที่น้อยจะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยมีค่าที่สูงแต่จะยังสามารถชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกได้ และสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.13 ในรูปดังกล่าวเป็นผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีค่าน้อยโดยจะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 52.5 โวลต์ ซึ่งผลที่ได้ คือ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยลงมาระดับหนึ่งแต่ยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากแรงดันบัสไฟตรงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบ เพราะฉะนั้นแรงดันบัสไฟตรงจึงต้องมีค่าแรงดันที่มากจึงจะสามารถมีสมรรถนะในการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบที่ดี และเมื่อค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่ามากขึ้น สมรรถนะในการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.14 ในรูปนี้เป็นรูปผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีค่ามาก โดยในรูปนี้จะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 750 โวลต์ ผลที่ได้จากรูปนี้ คือ แรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงจึงส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยออกมามีค่าที่ค่อนข้างดี จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาวาดกราฟของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ได้ดังรูปที่ 6.15 จากรูปดังกล่าวพบว่าที่ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าที่มากขึ้น $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และในการเลือกช่วงของค่าแรงดันบัสไฟตรงไม่ควรมีค่าที่สูงเกินไป เมื่อต้องคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต ตัวอย่างเช่น ที่ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่า 600 โวลต์ ถึง 750 โวลต์ จะเห็นได้ว่า $\%THD_{v,av}$ มีการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อย เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกที่ 600 โวลต์ เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้และโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เลือกช่วงของค่าแรงดันบัสไฟตรงตั้งแต่ 52.5 โวลต์ ถึง 600 โวลต์



รูปที่ 6.13 ผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ค่าน้อย



รูปที่ 6.14 ผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ค่ามาก



รูปที่ 6.15 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 6.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส

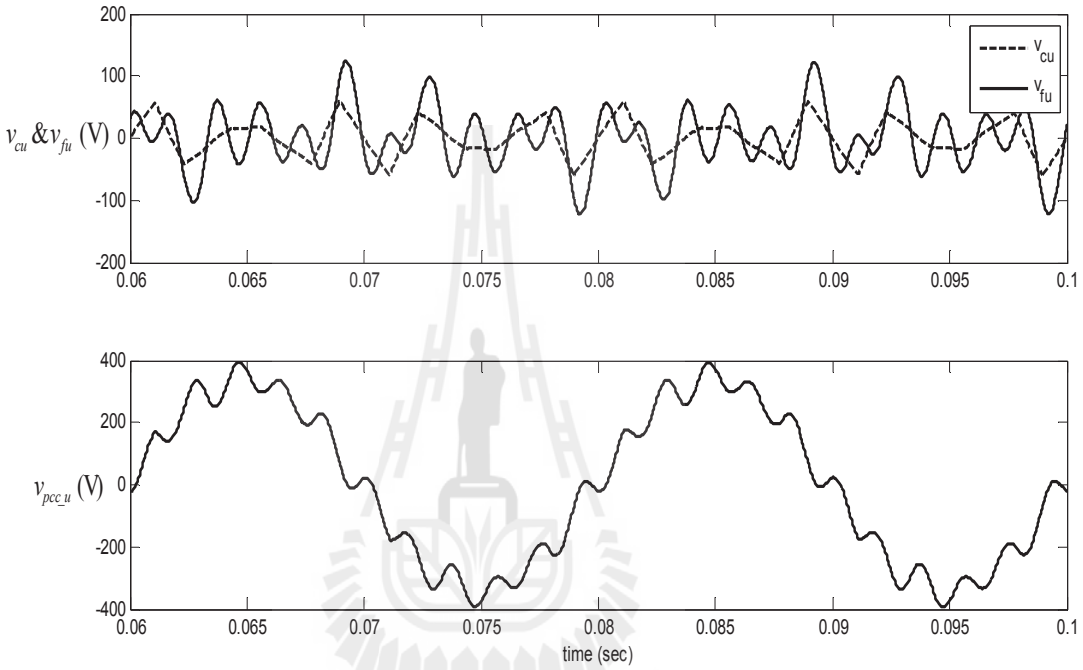
ค่าพารามิเตอร์ HB(V)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=100$ V, $C_f=80$ μF, $L_f=5$ mH)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=500$ V, $C_f=30$ μF, $L_f=6$ mH)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=300$ V, $C_f=50$ μF, $L_f=8$ mH)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=600$ V, $C_f=200$ μF, $L_f=2$ mH)
0.0001	3.28	0.31	1.74	0.48
0.0005	3.31	0.34	1.49	0.48
0.001	3.30	0.35	1.68	0.48
0.005	3.31	0.34	1.55	0.48
0.01	3.29	0.33	1.75	0.49
0.05	3.34	0.35	1.90	0.49
0.1	3.37	0.33	1.54	0.49
0.5	3.61	0.50	2.66	0.54

ตารางที่ 6.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส (ต่อ)

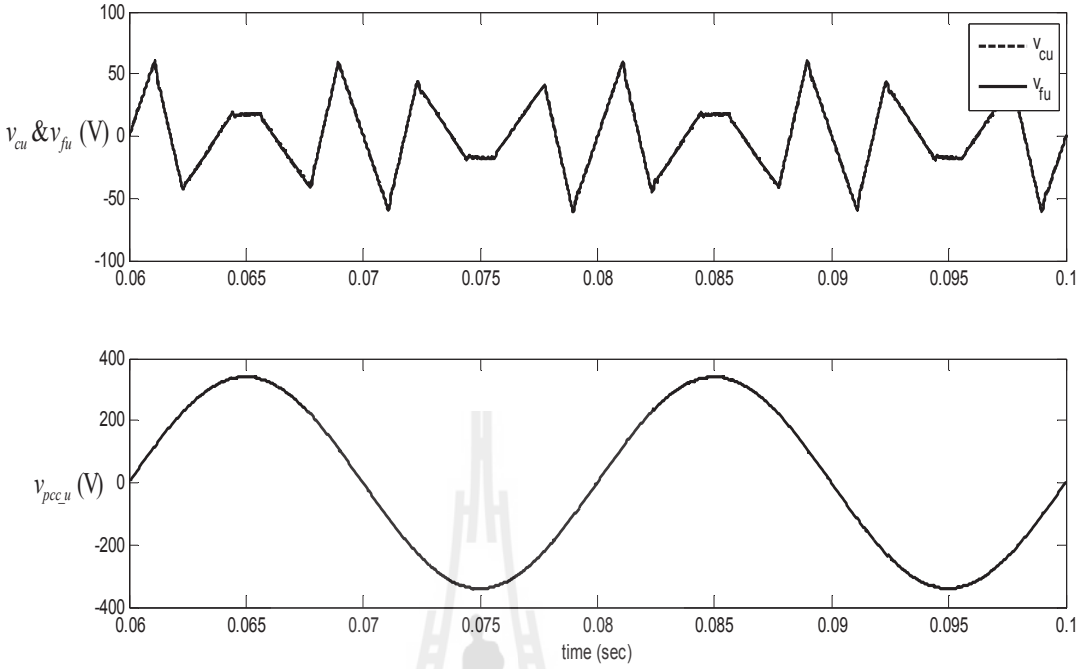
ค่าพารามิเตอร์ HB(V)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=100$ V, $C_f=80$ μF, $L_f=5$ mH)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=500$ V, $C_f=30$ μF, $L_f=6$ mH)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=300$ V, $C_f=50$ μF, $L_f=8$ mH)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=600$ V, $C_f=200$ μF, $L_f=2$ mH)
1	3.69	0.72	2.89	0.58
5	6.40\	3.55	4.84	1.06
10	7.98	9.43	11.13	1.77

จากตารางที่ 6.4 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส เพื่อเป็นการยืนยันว่าพารามิเตอร์ของแถบฮีสเตอรีซีสมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก จึงได้เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด ชุดที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 100 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 80 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 30 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6 mH ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 8 mH และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 600 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH โดยในการสังเกตพฤติกรรมของแถบฮีสเตอรีซีส สามารถพิจารณาได้จากขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชยในรูปที่ 6.3 และเมื่อพิจารณาที่แถบฮีสเตอรีซีสมีค่ามากจะทำให้ขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชยมีขอบเขตที่กว้างจึงทำให้สัญญาณแรงดันชดเชยมีสมรรถนะในการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงไม่ดี สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.16 โดยในรูปดังกล่าว คือ รูปผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่ามาก โดยในรูปนี้จะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 3 ที่ค่าแถบฮีสเตอรีซีสเท่ากับ 10 โวลต์ ซึ่งผลที่ได้จะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่ามาก และเมื่อพิจารณาที่แถบฮีสเตอรีซีสมีค่าน้อย จะทำให้ขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชยมีค่าที่น้อยตามด้วยเช่นกัน จึงทำให้การลู่ของสัญญาณแรงดันชดเชยมีสมรรถนะที่ดี สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.17 โดยในรูปนี้ คือ รูปผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีค่าน้อย โดยจะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ค่าแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.0001 โวลต์ จะพบว่าที่ค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่าน้อย แรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง จากตารางที่ 6.4 สามารถนำมาวาดกราฟผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ดังรูปที่ 6.18 โดยในรูปดังกล่าวจะพบว่าที่ค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่ายิ่งน้อยลงจะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยมีค่าลดน้อยลงตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัย

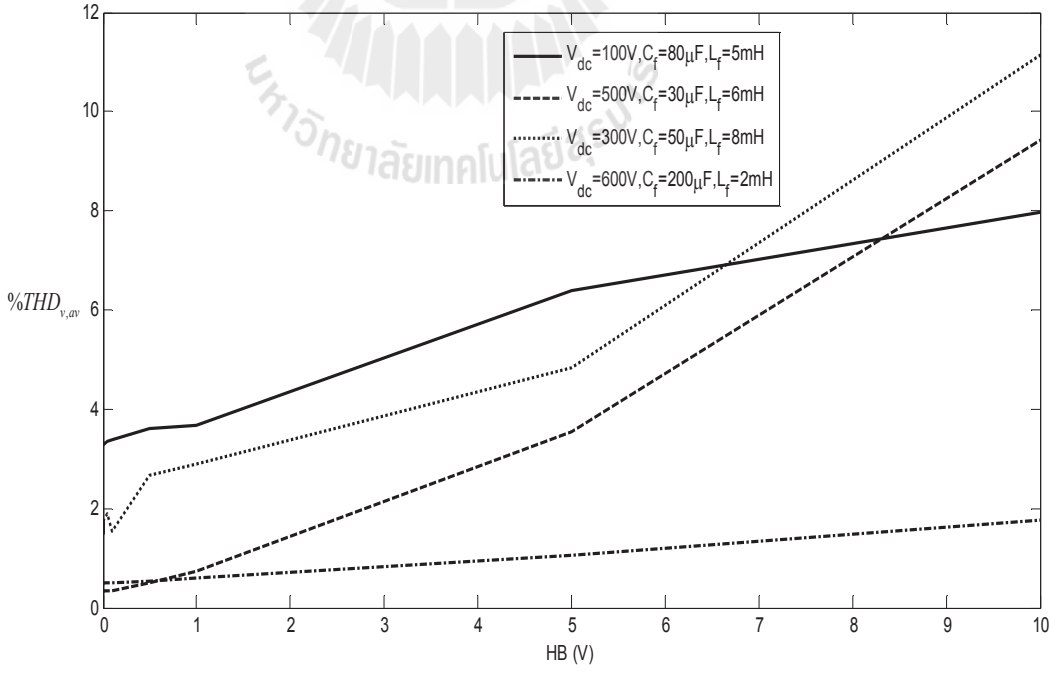
วิทยานิพนธ์นี้และโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้จึงเลือกค่าแถบฮีสเตอรีซีสระหว่าง 0 โวลต์ ถึง 1 โวลต์ ทั้งนี้การเลือกค่าแถบฮีสเตอรีซีสจะมีข้อจำกัดของเวลาชักตัวอย่างในการจำลองสถานการณ์เมื่อแถบฮีสเตอรีซีสมีค่าน้อยมาก ๆ และการเลือกใช้ค่าแถบฮีสเตอรีซีสขึ้นอยู่กับการใช้งานและชนิดของโหลด



รูปที่ 6.16 ผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่ามาก



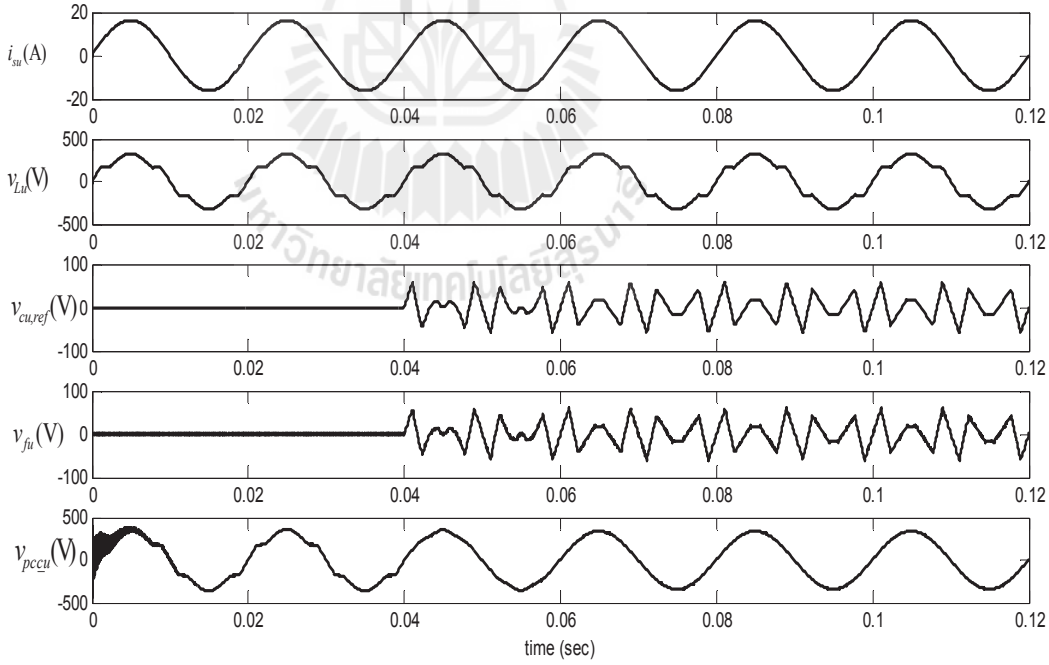
รูปที่ 6.17 ผลของค่าแถบฮีสเตอรีซีสมีค่าน้อย



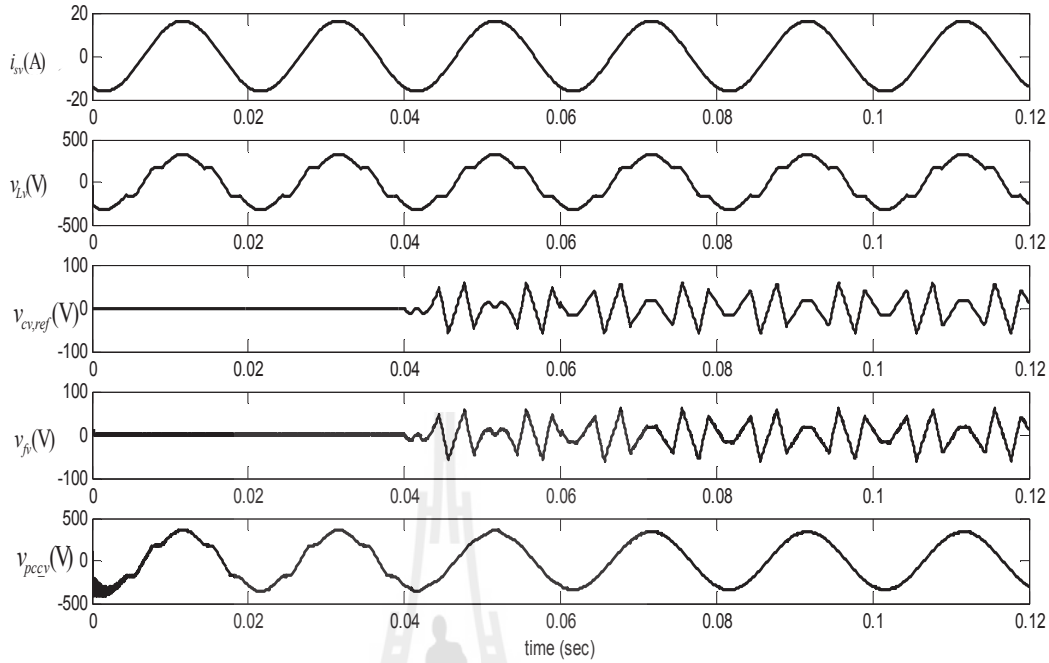
รูปที่ 6.18 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเอตรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

6.5 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

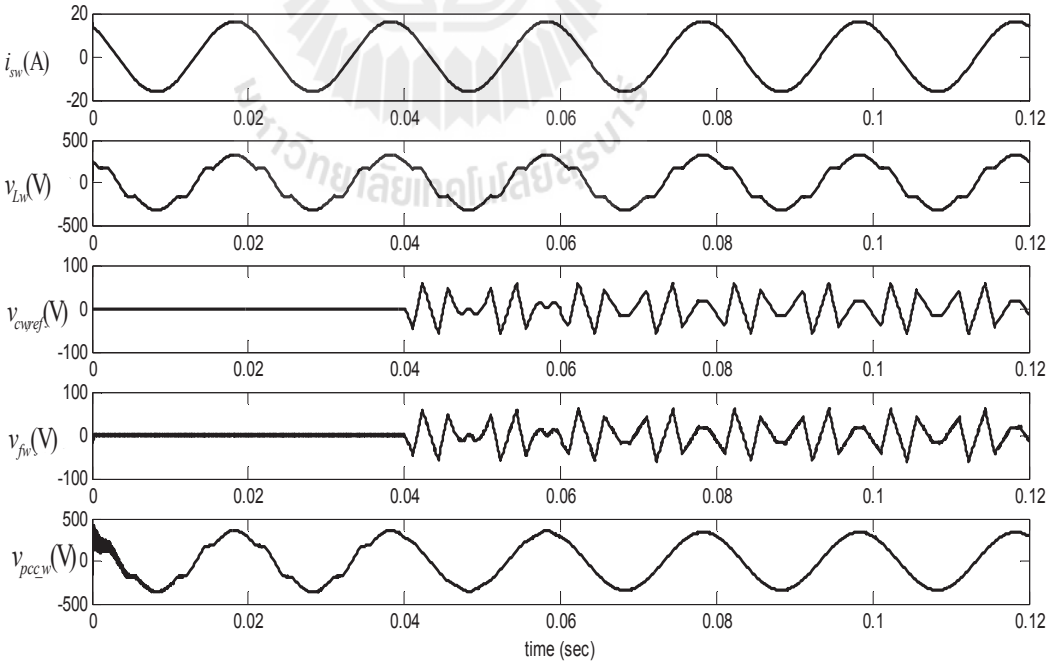
การจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมของระบบดังรูปที่ 6.1 จะใช้การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งการจำลองสถานการณ์ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์จากการสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง แรงดันบัสไฟตรง และแถบฮีสเตอรีซีส ในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4 ตามลำดับ โดยผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จากตารางทั้ง 4 ตาราง ที่ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุดมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ ซึ่งในตารางที่ 6.1 จะพบว่าที่ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส



รูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส *u*

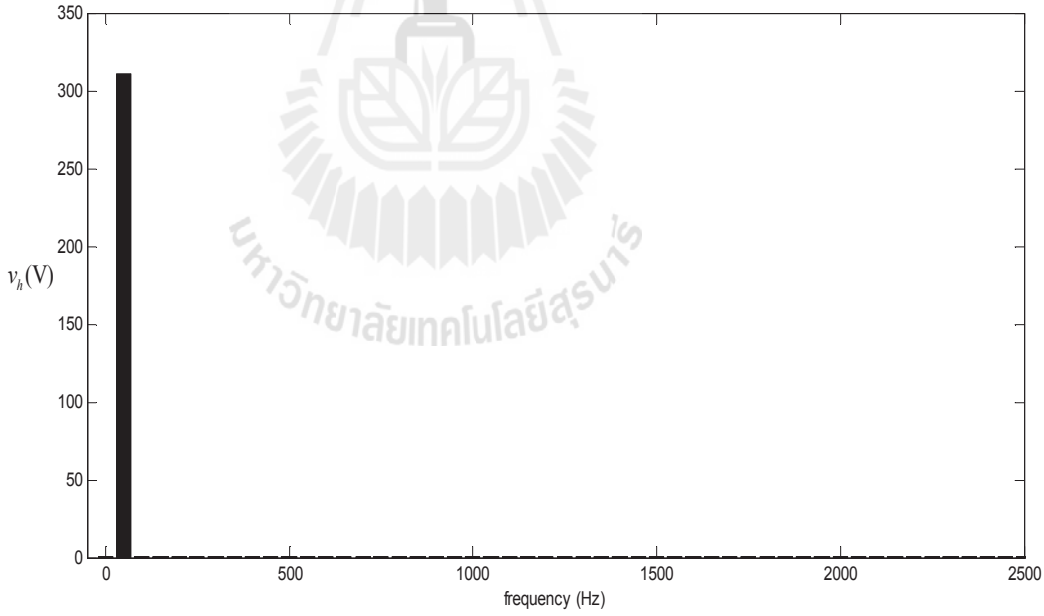


รูปที่ 6.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส *v*



รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส *w*

จากรูปที่ 6.19 ถึงรูปที่ 6.21 ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยให้แก่ระบบ เมื่อพิจารณาแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) จะพบว่ามีลักษณะเหมือนกับแรงดันที่โหลดทั้งสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) ต่อมาที่เวลา 0.04 ถึง 0.12 วินาที จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยทั้งสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ซึ่งจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส มีสมรรถนะที่สามารถควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) เมื่อฉีดแรงดันชดเชยจะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น เมื่อเทียบกับรูปสัญญาณแรงดันที่จุด PCC ก่อนการชดเชย โดยที่ค่า $\%THD_v$ หลังการชดเชยกรณีเฟส u มีค่าเท่ากับ 0.30% กรณีเฟส v มีค่าเท่ากับ 0.29% กรณีเฟส w มีค่าเท่ากับ 0.29% และค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.29% ซึ่งค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสให้ผลการจำลองสถานการณ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการฉีดแรงดันชดเชยให้มีสมรรถนะที่ดีและอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992



รูปที่ 6.22 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย

นอกจากนี้ในรูปที่ 6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชยจะสังเกตได้ว่าขณะที่ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบจะพบว่าปริมาณแรงดัน

ฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ อาทิ เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 โดยปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการฉีดแรงดันชดเชยโดยมีตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสควบคุมการฉีดแรงดันชดเชย จะสังเกตได้ว่าลักษณะสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกดังรูปที่ 6.22 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกทุกอันดับจะมีปริมาณลดน้อยลงมาก และคงเหลือเฉพาะปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้น การจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมของพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ให้ผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง และให้ผลการเลือกช่วงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม

6.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมีความซับซ้อนและยังไม่ปรากฏการออกแบบมาในอดีต ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการพึ่งพาการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลจากการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง สำหรับผลการจำลองสถานการณ์จากการออกแบบโดยการดูพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะให้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกออกมาที่ดีและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 7
การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

7.1 บทนำ

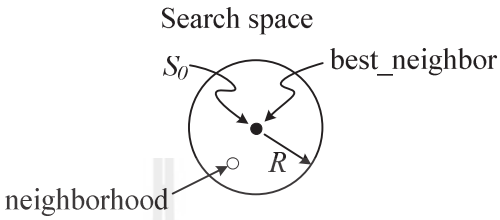
การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิผลมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก ในบทนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยนำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยมีวัตถุประสงค์ในการค้นหา คือ ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด โดยในบทนี้มีการอธิบายกระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหาและการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว อีกทั้งยังนำเสนอการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวแบบกำหนดค่าเริ่มต้น รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

7.2 ทบทวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เป็นเทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง อัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) ที่ได้รับการพัฒนาโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวุฒิ สุจิตจร (2545) ซึ่งการพัฒนามีการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาให้ดียิ่งขึ้น โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม คือ การเดินย้อนรอย (back - tracking) และการปรับค่ารัศมีการค้นหา (adaptive search radius) กลไกการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุด กลไกนี้จะเลือกคำตอบรายการตาบู (Tabu list) เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สำหรับกลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

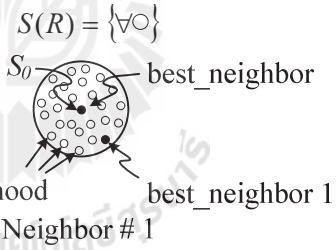
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา (Search space) รัศมีการค้นหา (R) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($count_{max}$)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

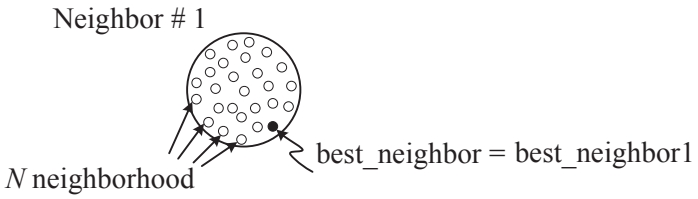
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 7.2



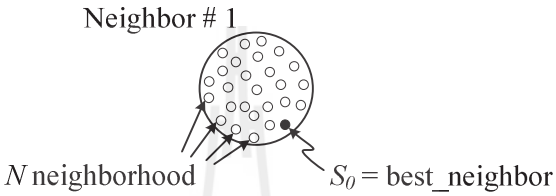
รูปที่ 7.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบูดังรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4

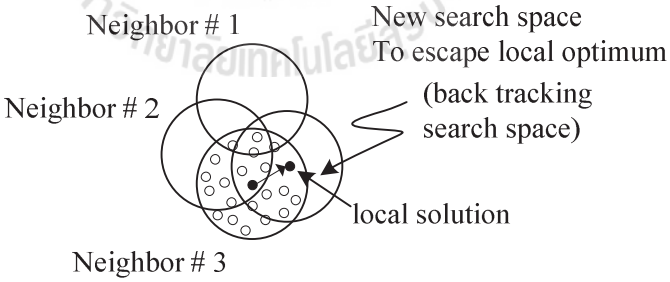


รูปที่ 7.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 7.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{max}$ จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ



รูปที่ 7.5 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบูเพื่อนำมากำหนด

เป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 7.5

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7-1)

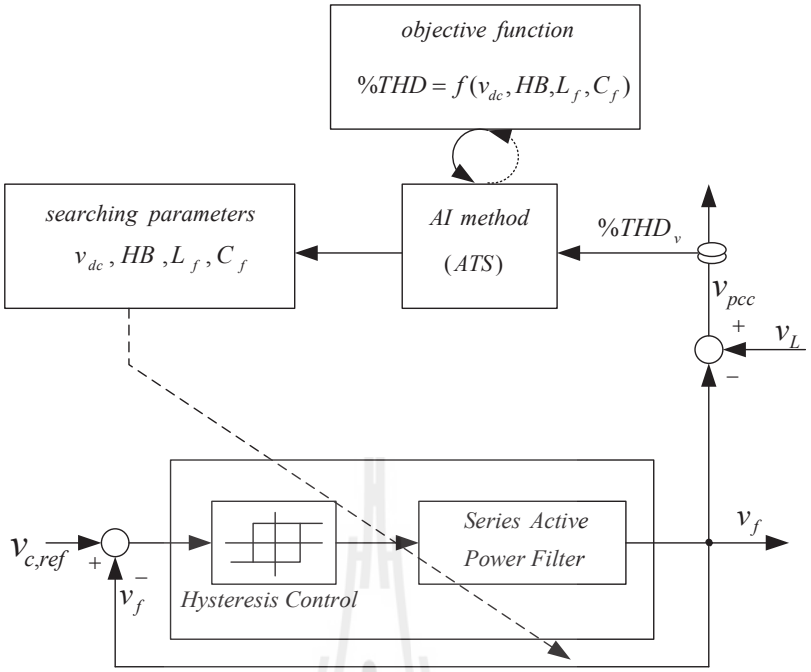
$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{7-1}$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor)

7.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะดำเนินการโดยค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสรวมทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว หรือ วิธี ATS ตามที่อธิบายในรายละเอียดตามหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 7.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 7.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
พร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 7.6 แสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการนำวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ (AI method) ด้วยวิธี ATS เข้ามาช่วยในการค้นหาพารามิเตอร์ v_{dc} , HB , L_f และ C_f ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยวัตถุประสงค์ของการค้นหา คือ ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุดของแรงดันที่จุด PCC (v_{pcc}) หลังการชดเชย ซึ่งค่า $\%THD_{v,av}$ ดังกล่าวต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 512-1992 ด้วยเช่นกัน โดยรายละเอียดโปรแกรมการค้นหาด้วยวิธี ATS ดูได้จากภาคผนวก ค.

7.4 การกำหนดขอบเขตการค้นหาของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การกำหนดขอบเขตการค้นหาด้วยวิธี ATS เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหา ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดการปรับขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวจากบทที่ 6 เกี่ยวกับการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.4 ในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4 ซึ่งในตารางที่ 6.1 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองซึ่งจะพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0.5 mH ถึง 8 mH ใน

ตารางที่ 6.2 เป็นตารางสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง จากตารางดังกล่าวพบว่าค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 30 μF ถึง 300 μF ตารางที่ 6.3 เป็นตารางสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงจะพบว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 52.5 โวลต์ ถึง 600 โวลต์ และในตารางที่ 6.4 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส จากในตารางดังกล่าวพบว่าค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0 โวลต์ ถึง 1 โวลต์ และในบทที่ 6 ได้มีการอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสไว้แล้ว ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการได้กำหนดขอบเขตจากการสังเกตพฤติกรรของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว ได้ตามตารางที่ 7.1 ซึ่งเป็นตารางสรุปค่าขอบเขตการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

ตารางที่ 7.1 ค่าขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

พารามิเตอร์	v_{dc} (V)	HB (V)	L_f (mH)	C_f (μF)
ขอบเขตล่าง	52.5	0	0.5	30
ขอบเขตบน	600	1	8	300

7.5 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาด้วยวิธี ATS ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่สำคัญด้วยกัน 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น (S_N) จำนวนคำตอบรอบข้าง ($S_{neighbor}$) รัศมีเริ่มต้น (R) และตัวปรับลดรัศมี (DF) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธี ATS มีสมรรถนะดียิ่งขึ้น โดยสามารถพิจารณาผลการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ ได้ตามตารางที่ 7.2 ถึงตารางที่ 7.5 โดยที่การชี้วัดสมรรถนะการค้นหาจะให้ความสำคัญที่ $\%THD_{v,av}$ เฉลี่ย มากที่สุดในขณะที่ จำนวนรอบการค้นหาเฉลี่ย (N) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) จะให้ความสำคัญรองลงมาตามลำดับ

การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาด้วยวิธี ATS สำหรับใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ได้ทำการทดสอบที่ค่า 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.2 ในตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า กรณีที่ใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 และที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25 ให้ผลค่าเฉลี่ย $\%THD_{v,av}$ ที่ใกล้เคียงกัน

คือ 0.37244% และ 0.379932% และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรอบการค้นหาที่พบคำตอบของทั้งสองกรณี พบว่า มีค่า 33 รอบ และ 39 รอบ ตามลำดับ เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาที่ $\%THD_{v,av}$ เป็นหลัก จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ โดยในการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นนี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5							
จำนวนรอบ	38	272	135	529	13	198	189.11954
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39618	0.39900	0.39254	0.39935	0.39004	0.395422	0.00376
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10							
จำนวนรอบ	44	8	7	8	192	52	71.49965
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39851	0.37875	0.36113	0.39680	0.39175	0.385388	0.01397
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15							
จำนวนรอบ	316	28	14	10	218	118	126.32023
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39579	0.38388	0.39497	0.38474	0.39682	0.39124	0.00569
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20							
จำนวนรอบ	8	7	3	9	138	33	52.53951
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37319	0.36089	0.39327	0.38266	0.35219	0.37244	0.01471

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 25							
จำนวนรอบ	4	164	6	7	11	39	62.84425
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37949	0.37562	0.37734	0.39694	0.37027	0.379932	0.00903
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30							
จำนวนรอบ	129	15	248	11	4	82	95.26699
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38574	0.39778	0.38495	0.38313	0.39755	0.38983	0.00645

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของการค้นหาด้วยวิธี ATS สำหรับใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ได้ทำการทดสอบที่ค่า 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.3 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่าการใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ และจำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ ให้ผลค่าเฉลี่ย $\%THD_{v,av}$ ที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.37244% และ 0.375186% และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรอบการค้นหาที่พบคำตอบของทั้งสองกรณี พบว่า มีค่า 33 รอบ และ 32 รอบ ตามลำดับ เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาที่ $\%THD_{v,av}$ เป็นหลัก จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ โดยในการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างนี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 1 คำตอบ							
จำนวนรอบ	14	7	975	419	590	401	366.20377
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38692	0.38299	0.38710	0.39823	0.39978	0.391004	0.00671
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 2 คำตอบ							
จำนวนรอบ	151	8	187	17	6	74	78.64731
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38941	0.37932	0.39584	0.38407	0.39543	0.38814	0.00646
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 3 คำตอบ							
จำนวนรอบ	40	423	12	13	153	129	156.25492
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39499	0.39901	0.39554	0.38454	0.39745	0.394306	0.00509
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 4 คำตอบ							
จำนวนรอบ	8	12	480	15	17	107	186.82889
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39035	0.39272	0.39145	0.39873	0.37734	0.390118	0.00701
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ							
จำนวนรอบ	8	7	3	9	138	33	52.53951
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37319	0.36089	0.39327	0.38266	0.35219	0.37244	0.01471
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ							
จำนวนรอบ	2	10	11	4	3	6	3.74166
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.36975	0.38261	0.38238	0.37284	0.39230	0.379976	0.00800

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ							
จำนวนรอบ	4	12	5	17	4	9	5.27257
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37754	0.39281	0.38131	0.39752	0.39518	0.388872	0.00795
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ							
จำนวนรอบ	5	4	4	138	5	32	53.40786
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37134	0.37176	0.36627	0.37507	0.39149	0.375186	0.00862
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 25 คำตอบ							
จำนวนรอบ	2	3	5	4	1	3	1.41421
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38065	0.38589	0.39702	0.39142	0.37765	0.386526	0.00704
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ							
จำนวนรอบ	3	4	2	3	10	5	2.93258
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37578	0.37484	0.39107	0.37291	0.39328	0.381576	0.00873

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5,
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นของการค้นหาด้วยวิธี ATS สำหรับใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ได้ทำการทดสอบที่ค่า 0.4, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.4 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่าการใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2 ให้ผลค่าเฉลี่ย $\%THD_{v,av}$ ที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.37244% และ 0.376426% และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรอบการค้นหาที่พบคำตอบของทั้งสองกรณี พบว่า มีค่า 33 รอบ และ 13 รอบ ตามลำดับ เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาที่ $\%THD_{v,av}$ เป็นหลัก จึง

เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 โดยในการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นนี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ และตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.4							
จำนวนรอบ	326	7	43	416	124	184	160.49798
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39311	0.37890	0.38708	0.38869	0.39347	0.38825	0.00529
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5							
จำนวนรอบ	8	7	3	9	138	33	52.53951
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37319	0.36089	0.39327	0.38266	0.35219	0.37244	0.01471
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1							
จำนวนรอบ	9	86	283	206	145	146	94.59281
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39147	0.39934	0.37505	0.39383	0.39798	0.391534	0.00871
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2							
จำนวนรอบ	13	24	5	11	11	13	6.21289
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37683	0.36565	0.37174	0.38341	0.38450	0.376426	0.00710
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3							
จำนวนรอบ	24	29	15	28	148	49	49.84576
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39636	0.37345	0.38327	0.39262	0.39713	0.388566	0.00902
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4							
จำนวนรอบ	5	17	17	39	13	19	11.31371
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38955	0.39877	0.38628	0.39785	0.39819	0.394128	0.00519

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5							
จำนวนรอบ	21	29	328	13	16	82	123.42042
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39003	0.36479	0.39166	0.36828	0.39532	0.382016	0.01280
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6							
จำนวนรอบ	27	24	19	14	135	44	45.81484
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39950	0.39261	0.38151	0.38645	0.39191	0.390396	0.00608

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ, ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

การทดสอบตัวปรับลดรัศมี

การทดสอบตัวปรับลดรัศมีของการค้นหาด้วยวิธี ATS สำหรับใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ได้ทำการทดสอบที่ค่า 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 และ 1.6 ซึ่งผลการทดสอบใช้ตัวปรับลดรัศมีแสดงไว้ดังตารางที่ 7.5 จากตารางดังกล่าวสังเกตได้ว่า การที่ใช้ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 ให้ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย $\%THD_{v,av}$ ดีที่สุด คือ 0.37244% ที่ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบที่พบคำตอบเท่ากับ 33 รอบ ดังนั้นผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 โดยในการทดสอบตัวปรับลดรัศมีนี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ และค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5

ตารางที่ 7.5 ผลการทดสอบตัวปรับลดรัศมี

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1							
จำนวนรอบ	16	11	138	10	1	36	51.63332
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.38467	0.36959	0.39608	0.39519	0.39997	0.3891	0.01099

ตารางที่ 7.5 ผลการทดสอบตัวปรับลดรัศมี (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2							
จำนวนรอบ	5	44	15	10	523	120	202.25479
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.36819	0.39721	0.39119	0.36698	0.38108	0.38093	0.01206
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3							
จำนวนรอบ	8	7	3	9	138	33	52.53951
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.37319	0.36089	0.39327	0.38266	0.35219	0.37244	0.01471
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4							
จำนวนรอบ	11	8	232	546	7	161	211.13550
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39763	0.39877	0.39873	0.38294	0.39318	0.39425	0.00602
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5							
จำนวนรอบ	123	231	123	131	10	124	69.99429
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39873	0.39984	0.39722	0.38621	0.39941	0.396282	0.00511
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.6							
จำนวนรอบ	19	88	224	7	371	142	138.15571
ค่า $\%THD_{v,av}$	0.39947	0.39995	0.39422	0.38400	0.39977	0.395482	0.00613

หมายเหตุ: จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ, ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5

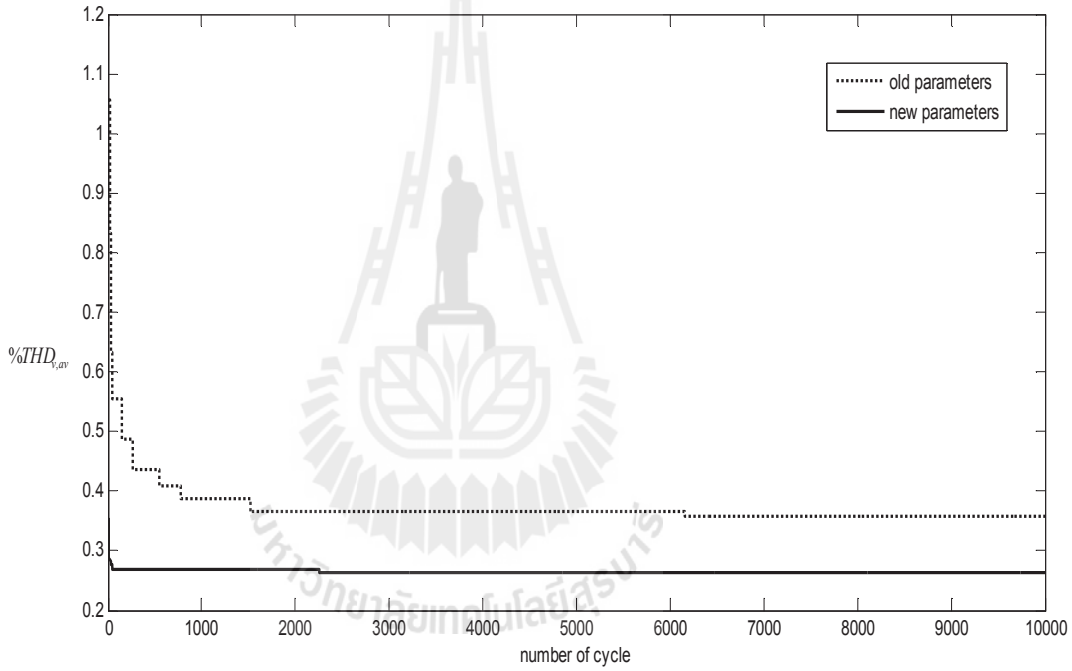
จากการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธี ATS ทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของ ATS สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ซึ่งสรุปได้ดังนี้

-เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ

-เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ

-เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5

-เลือกใช้ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3



รูปที่ 7.7 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 7.7 เป็นกราฟแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS โดยในกราฟดังกล่าวจะประกอบไปด้วยผลการเปรียบเทียบการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของพารามิเตอร์ก่อนทำการทดสอบพารามิเตอร์ (old parameters) ของการค้นหาด้วยวิธี ATS เทียบกับผลการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของพารามิเตอร์วิธี ATS ที่ทำการทดสอบแล้ว (new parameters) ผลที่ได้ คือ พารามิเตอร์ชุดใหม่จะมีการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ที่เร็วกว่าและทำให้ได้ $\%THD_{v,av}$ มีค่าลดลงน้อยกว่าที่ใช้พารามิเตอร์ชุดเก่าด้วยเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้จากพารามิเตอร์ชุดเก่าจะได้ค่า $\%THD_{v,av}$

เท่ากับ 0.35774% และจากพารามิเตอร์ชุดใหม่จะได้ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.26332% ในการทดสอบพารามิเตอร์นี้จะดำเนินการทดสอบทั้งหมดที่ 10,000 รอบ และผลการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 6 เป็นการออกแบบโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสซึ่งผลการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์จะส่งผลให้ได้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.29443% สามารถพิจารณาได้ในตารางที่ 7.6 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จากตารางดังกล่าวพบว่าเมื่อมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ ATS จะให้ผลค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 7.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

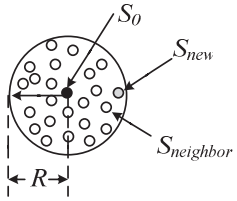
	ทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์	ก่อนการทดสอบพารามิเตอร์ ATS	หลังการทดสอบพารามิเตอร์ ATS
v_{dc} (V)	300	111.83	278.32
HB (V)	0.1	0.00704	0.10953
L_f (mH)	2	0.89	2.13
C_f (μF)	100	66.26	104.48
$\%THD_{v,av}$	0.29443	0.35774	0.26332

7.6 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้น

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่มีการกำหนค่าเริ่มต้น เป็นวิธีการค้นหาที่เหมือนกันกับการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 7.2 แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้นในการค้นหา โดยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้น สามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา ($count_{\max}$) กำหนดขนาดพื้นที่คำตอบ (S) และทำการกำหนดคำตอบเริ่มต้น (S_0)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มเลือกจำนวนคำตอบรอบข้าง ($S_{neighbor}$) และกำหนดรัศมีเริ่มต้น (R) เพื่อประเมินคำตอบที่ดีที่สุดภายในรัศมีดังกล่าว จนได้คำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบใหม่ (S_{new}) สำหรับรอบการค้นหาปัจจุบัน ($count_n$) แสดงดังรูปที่ 7.8

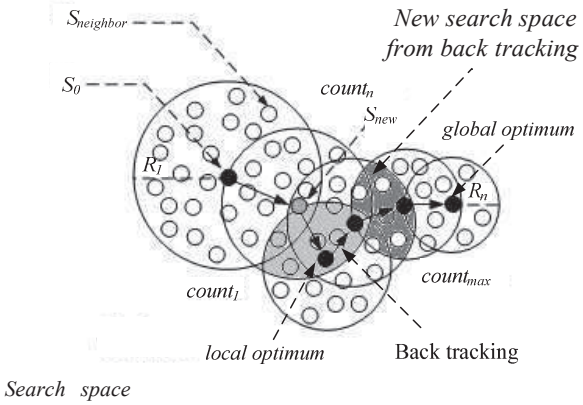


รูปที่ 7.8 การกำหนดคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่ารัศมีเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำตอบใหม่ (S_{new}) ในรอบปัจจุบันจะเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) สำหรับรอบการค้นหาถัดไป โดยเมื่อ $count_n < count_{\max}$ อัลกอริทึมจะดำเนินการค้นหาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนด หรือ $count_n > count_{\max}$ จึงยุติการค้นหา

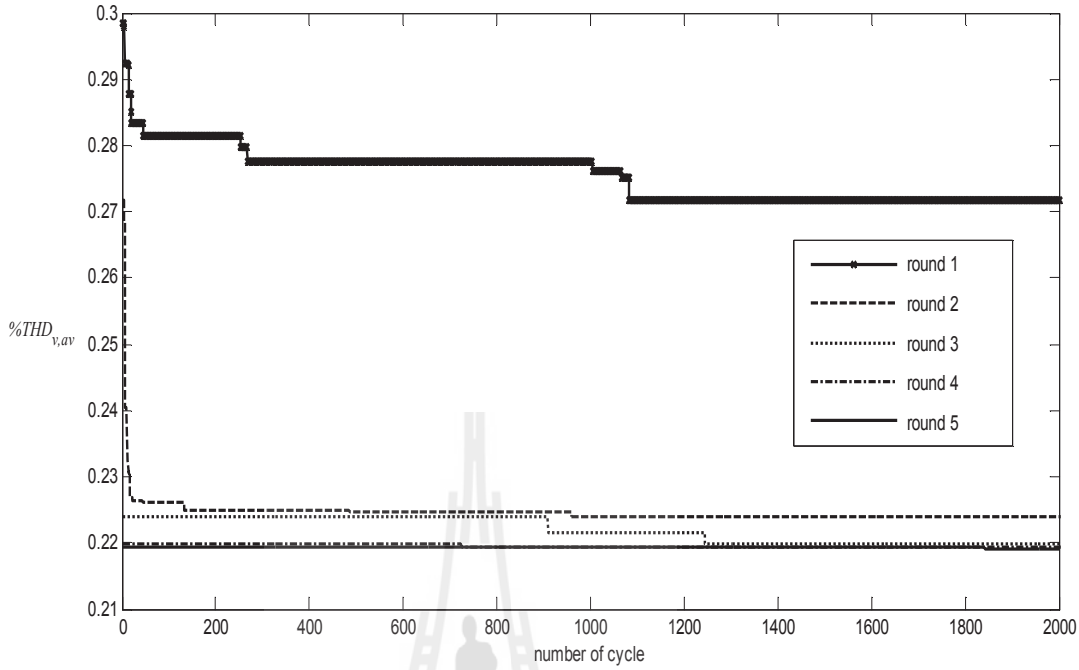
ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าจนกระทั่งอัลกอริทึมแบบตาบูเชิงปรับตัวไม่สามารถหาคำตอบใหม่ (S_{new}) ที่ดีกว่าคำตอบเริ่มต้น (S_0) ในรอบการค้นหาปัจจุบัน นั่นคือ คำตอบดังกล่าวอาจจะไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้น จึงเข้าสู่ขั้นตอนการเดินย้อนรอย ที่มีเงื่อนไขการอนุญาติให้กลับไปค้นหาในพื้นที่คำตอบเก่า ซึ่งผลจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดพื้นที่การค้นหาใหม่ ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

ขั้นตอนที่ 5 การปรับรัศมีการค้นหา ดังสมการที่ (7-1) จะทำการลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้คำตอบจากการค้นหามีความละเอียดมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม หากการปรับลดรัศมีการค้นหามีขนาดเล็กเกินไป การค้นหาอาจไม่ครอบคลุมคำตอบที่ต้องการ ดังนั้น การปรับรัศมีให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาจึงมีความสำคัญ กระบวนทั้งหมดสำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยวิธี ATS ได้อธิบายเป็นแผนภาพไว้ดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส โดยการใช้การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นจะยังคงใช้พารามิเตอร์ของวิธี ATS ที่ทำการทดสอบแล้วดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 7.5 คือ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 5 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และตัวปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.3 ทั้งนี้เนื่องจากในการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นจะใช้ค่าขอบเขตเดิมตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 7.4 แต่สำหรับค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นจะไม่ใช้เหมือนเดิมเพราะผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดค่าเริ่มต้นจากค่าที่ใช้การจำลองสถานการณ์ในบทที่ 6 หรือสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 7.6 เมื่อพิจารณาจะสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นได้ดังนี้ ค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 300 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีสเท่ากับ 0.1 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 2 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรองเท่ากับ 100 μF ค่าพารามิเตอร์ชุดนี้สามารถพิจารณากำหนดเป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น

จากรูปที่ 7.10 เป็นกราฟแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหา ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ทั้งหมด 5 ครั้งการค้นหา โดยในแต่ละครั้งการค้นหาจะดำเนินการครั้งละ 2,000 รอบ และสามารถพิจารณาได้ดังนี้ ในรอบที่ 1 เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF ซึ่งผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในรอบที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 266.97 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.23401 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 2.27 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 57.96 μF ในการค้นหาในรอบที่ 1 ผลที่ได้ คือ $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.27179% เมื่อทำการค้นหาในรอบที่ 2 จึงได้นำผลการทดสอบในรอบที่ 1 มาเป็นค่าเริ่มต้นโดยผลการทดสอบที่ได้ในรอบที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 108.46 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.03997 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.06 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 131.58 μF และผลการทดสอบในรอบที่ 2 ที่ได้ คือ ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.22389% สำหรับการทดสอบในรอบที่ 3 ก็จะนำผลการทดสอบในรอบที่ 2 มาเป็นค่าเริ่มต้นเช่นเดียวกัน ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในรอบที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง

เท่ากับ 105.78 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.03677 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.04 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 130.94 μF และผลการทดสอบในรอบดังกล่าว คือ $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.21973% การทดสอบในรอบที่ 4 จะทำคล้ายคลึงกันกับการทดสอบในรอบก่อนหน้านี้ คือ จะใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบในรอบที่ 3 มาเป็นค่าเริ่มต้นในการทดสอบในรอบที่ 4 ผลการทดสอบที่ได้ในรอบนี้ คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 104.48 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.03550 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.04 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 131.12 μF และผลการทดสอบในรอบดังกล่าวจะได้ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.21935% และในการทดสอบในรอบที่ 5 นี้จะใช้ผลการทดสอบในรอบที่ 4 มาเป็นค่าเริ่มต้นเช่นเดียวกันกับการทดสอบในรอบที่ผ่านมา ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้ คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 103.36 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.03492 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.05 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 131.58 μF และผลการทดสอบในรอบสุดท้ายนี้จะได้ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.21917% สามารถพิจารณาผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นได้ดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น

	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
v_{dc} (V)	(300) 266.97	(266.97) 108.46	(108.46) 105.78	(105.78) 104.48	(104.48) 103.36
HB (V)	(0.1) 0.23401	(0.23401) 0.03997	(0.03997) 0.03677	(0.03677) 0.03550	(0.03550) 0.03492
L_f (mH)	(2) 2.27	(2.27) 1.06	(1.06) 1.04	(1.04) 1.04	(1.04) 1.05
C_f (μF)	(100) 57.96	(57.96) 131.58	(131.58) 130.94	(130.94) 131.12	(131.12) 131.58
$\%THD_{v,av}$	(0.29443) 0.27179	(0.27179) 0.22389	(0.22389) 0.21973	(0.21973) 0.21935	(0.21935) 0.21917

หมายเหตุ: (ค่าเริ่มต้น)

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถเริ่มต้นการค้าหาจากการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมกับตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสเพื่อกำหนดขอบเขตการค้นหา เมื่อได้ขอบเขตการค้นหาจึงทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาวิธี ATS โดยพารามิเตอร์ของ ATS ประกอบไปด้วย จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมีเริ่มต้น และค่าปรับลดรัศมี เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของ ATS เป็นที่เรียบร้อยจะดำเนินการในขั้นตอนของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไปซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 7.2 และการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นซึ่งได้กล่าวในรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 7.6 และเมื่อเสร็จกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จะนำผลที่ได้จากการค้นหาทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดสำหรับนำไปใช้งานจริง

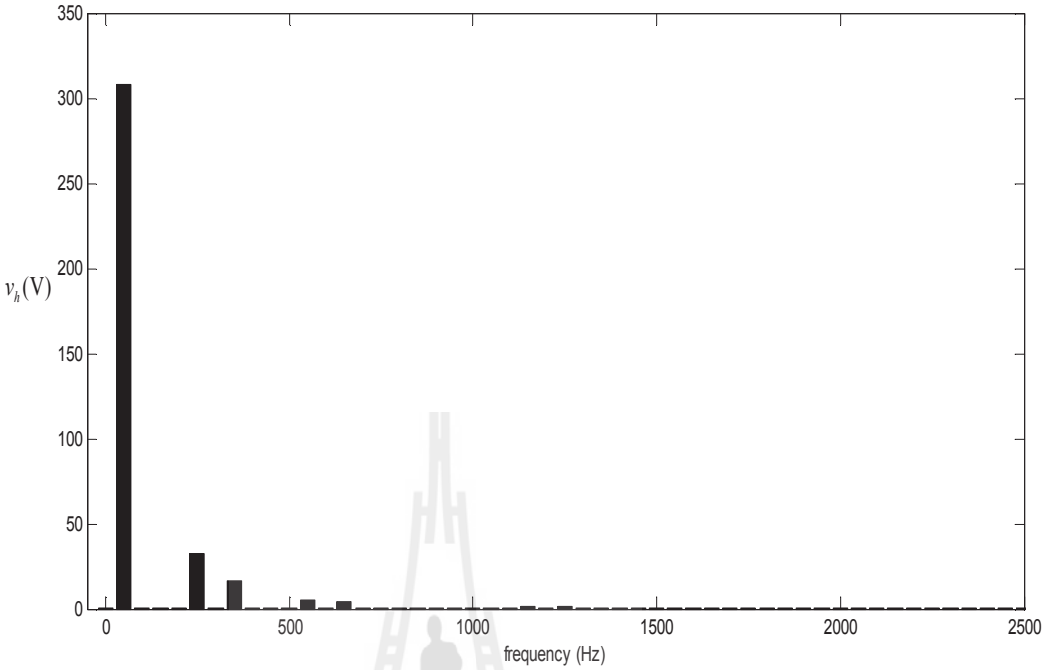
7.7 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบทั้งหมด 3 วิธี คือ วิธีการสังเกตพฤติกรรมของพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ด้วยการค้นหาวิธี ATS และการออกแบบการค้นหาวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น โดยการออกแบบทั้งสามวิธีนี้ได้นำมาเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด สามารถพิจารณาได้ในตารางที่ 7.8 ในตารางดังกล่าวเป็นตารางเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

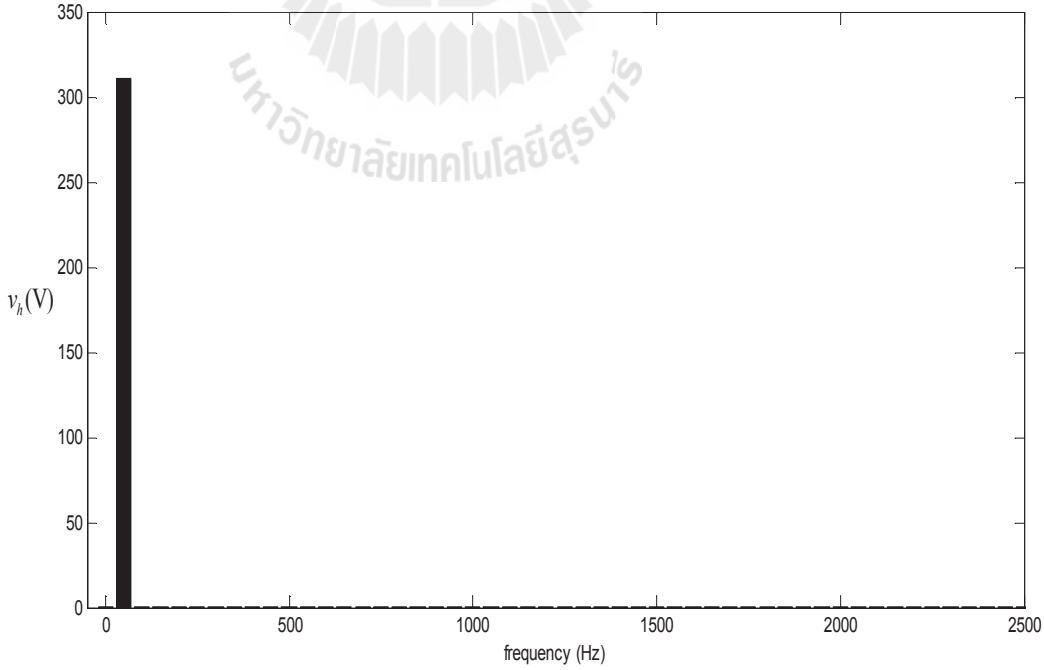
ตารางที่ 7.8 ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกของวิธีการออกแบบตามแนวทางต่าง ๆ

	วิธีการออกแบบพารามิเตอร์		
	การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์	การค้นหาด้วยวิธี ATS	การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น
v_{dc} (V)	300	278.32	103.36
HB (V)	0.1	0.10953	0.03492
L_f (mH)	2	2.13	1.05
C_f (μF)	100	104.46	131.58
$\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชย	0.29443	0.26332	0.21917
$\%THD_{v,av}$ ก่อนการชดเชย	12.83%		

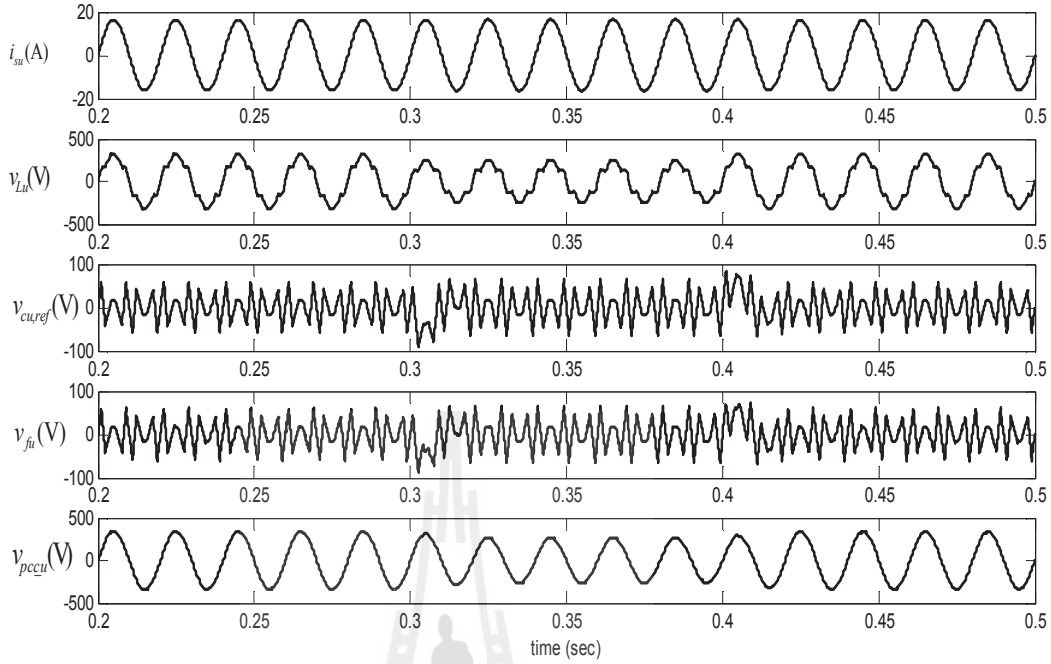
จากตารางที่ 7.8 ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกโดยวิธีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ การค้นหาด้วยวิธี ATS และการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น เมื่อพิจารณาจะสังเกตได้ว่ากรณีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ค่า $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยมีค่า เท่ากับ 0.29443% สำหรับกรณีการค้นหาด้วยวิธี ATS ค่า $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.26332% และในกรณีการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.21917% จะสังเกตได้ว่าค่า $\%THD_{v,av}$ กรณีการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นมีค่าน้อยที่สุดและค่า $\%THD_{v,av}$ มีค่าลดน้อยลงจากก่อนที่มีการชดเชย และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 โดยถ้าพิจารณาสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนและหลังการฉีดแรงดันชดเชยจะได้ดังรูปที่ 7.11 และรูปที่ 7.12 ตามลำดับ ซึ่งในรูป 7.11 เมื่อพิจารณาจะสังเกตได้ว่าขณะที่ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบจะพบว่าจะปรากฏปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ อาทิ เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 โดยปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด และในรูปที่ 7.12 เป็นรูปสเปกตรัมภายหลังการฉีดแรงดันชดเชย จะสังเกตได้ว่า ปริมาณฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ จะถูกกำจัดออกไปโดยปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกทุกอันดับจะมีปริมาณลดน้อยลง และเหลือไว้เฉพาะปริมาณที่ความถี่มูลฐาน อีกทั้งยังสามารถพิจารณารูปสัญญาณก่อนการฉีดแรงดันชดเชยและหลังการฉีดแรงดันชดเชยกรณีเพส u เฟส v และเฟส w ได้ดังรูปที่ 7.13 ถึง รูปที่ 7.15 ตามลำดับ



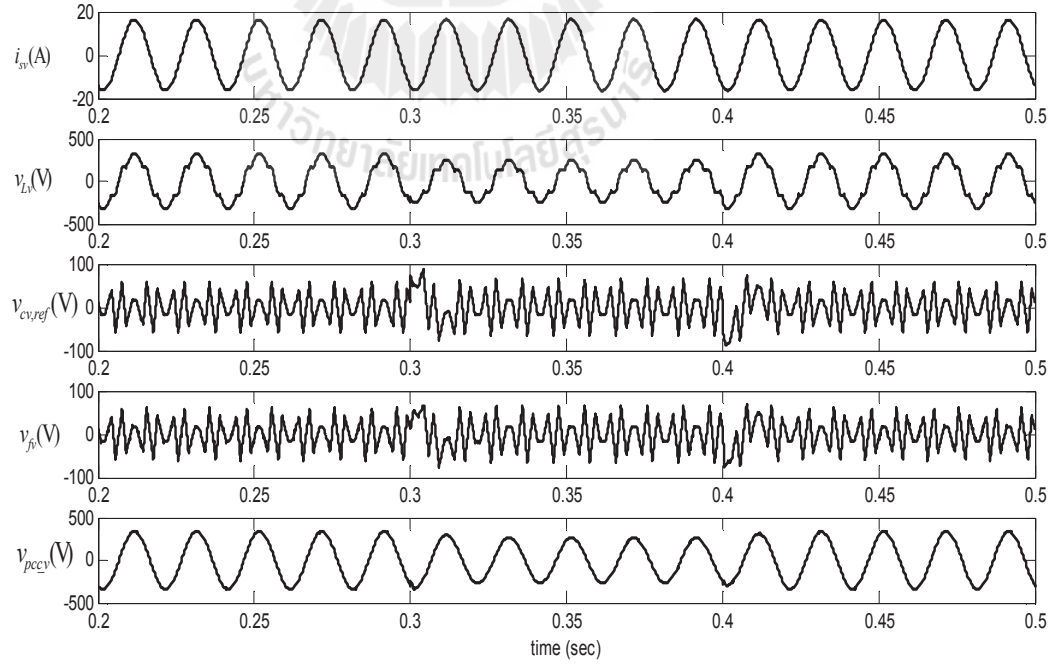
รูปที่ 7.11 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย



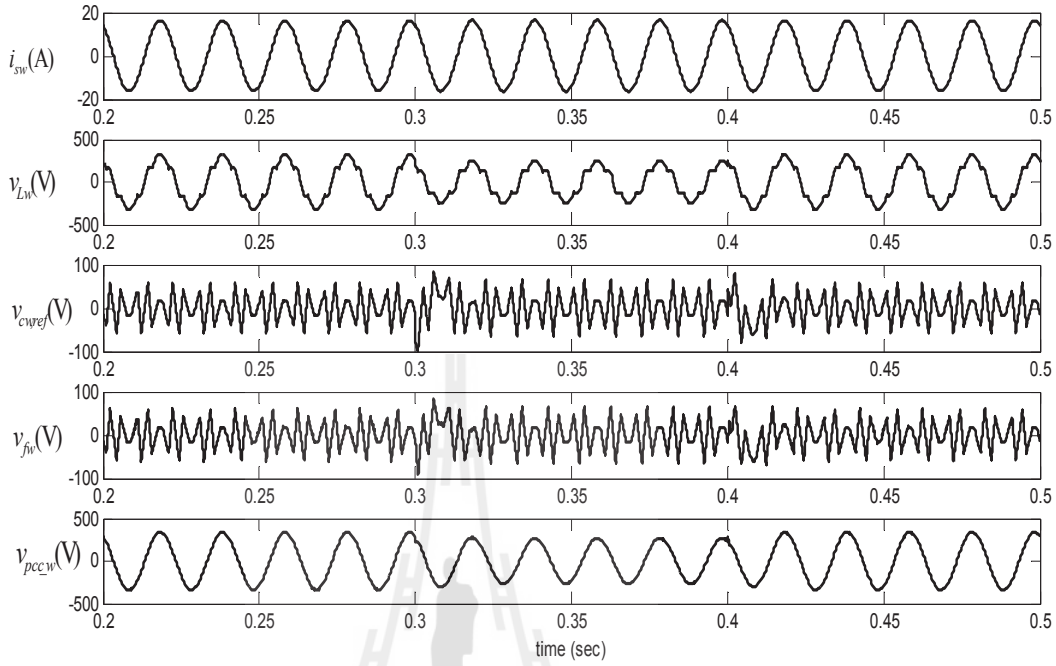
รูปที่ 7.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย



รูปที่ 7.13 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส *u*



รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส *v*



รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันกรณีเฟส w

จากรูปที่ 7.13 ถึงรูปที่ 7.15 เป็นผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกกรณีเฟส u, v และ w ตามลำดับ ในการจำลองสถานการณ์ที่ช่วงเวลา 0.3 วินาที ถึง 0.4 วินาที จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส โดยในขณะที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (i_{su}, i_{sv}, i_{sw}) ยังคงมีค่าคงที่ตลอดการจำลองสถานการณ์ เมื่อพิจารณาแรงดันที่โหลดทั้งสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) มีค่ายอดแรงดันในแต่ละเฟสประมาณ 311 โวลต์ แต่ที่เวลา 0.3 วินาที ถึง 0.4 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะพบว่าแรงดันที่โหลดในแต่ละเฟสมีค่ายอดแรงดันประมาณ 250 โวลต์ และที่เวลา 0.4 วินาที เป็นต้นไปค่ายอดแรงดันในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่าเดิมที่ 311 โวลต์ และในการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันที่โหลดมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 12.83% ในสภาวะก่อนชดเชย โดยภายหลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่มีการคำนวณแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ด้วยวิธี DQF ตามที่แสดงไว้ในบทที่ 4 และการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยและสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลที่ได้ คือ แรงดันหลังการชดเชยทั้งสามเฟสที่จุด PCC ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) มี

ลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น อีกทั้ง $\%THD_v$ หลังการชดเชย กรณีเฟส u มีค่าเท่ากับ 0.21917% กรณีเฟส v มีค่าเท่ากับ 0.21917% และกรณีเฟส w มีค่าเท่ากับ 0.21917% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 และในการออกแบบที่ใช้การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นส่งผลให้การออกแบบได้คำตอบที่ดีที่สุดโดย $\%THD_{v,av}$ มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง

7.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิผลวิธีหนึ่ง โดยจะพบว่าการกำหนดขอบเขตการค้นหาและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในการค้นหาด้วยวิธี ATS จะส่งผลให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ลดลงตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 เท่ากับ 0.26332% สำหรับการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น เมื่อพิจารณาในเรื่องการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยจะสังเกตได้ว่าการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นจะมีการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ที่ค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติ อีกทั้งยังให้ผลลัพธ์ที่ดีอีกด้วย และจากการเปรียบเทียบสมรรถนะการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส พบว่าการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น จะให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.21917% และเมื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยก็สามารถควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงอีกด้วย ในบทต่อไปผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น การนำค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสไปใช้งานร่วมกับโหลดแรงดันฮาร์มอนิกที่มีขนาดเปลี่ยนไปหรือมีค่า $\%THD_v$ ที่เปลี่ยนไปจากการออกแบบ เป็นต้น

บทที่ 8
การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุม

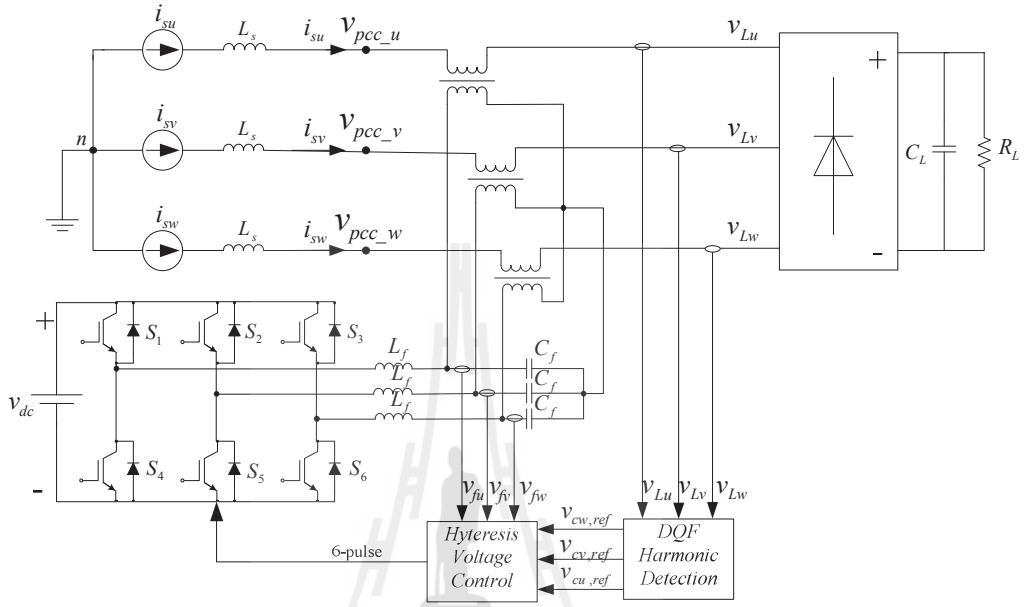
8.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุม โดยที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใช้เท่าเดิม แต่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าหลักที่โหลดแรงดันฮาร์มอนิก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน และแบบที่ 2 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่าเดิมแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม ทั้งนี้เพื่อทดสอบความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาตาบูเชิงปรับตัวและการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาตาบูเชิงปรับตัวแบบกำหนดค่าเริ่มต้น ในการเปรียบเทียบประสิทธิผลจะใช้ค่า $\%THD_{v,av}$ เป็นดัชนีชี้วัด นอกจากนี้ในบทนี้จะนำเสนอโครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกและลักษณะของโหลดแรงดันฮาร์มอนิกรูปแบบต่าง ๆ การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส การจำลองสถานการณ์กรณีที่โหลดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันแต่แอมพลิจูดต่างกัน และการจำลองสถานการณ์ที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเท่าเดิมแต่รูปร่างแรงดันฮาร์มอนิกที่แตกต่างไปจากเดิม รวมไปถึงมีการอภิปรายผลการจำลองสถานการณ์ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

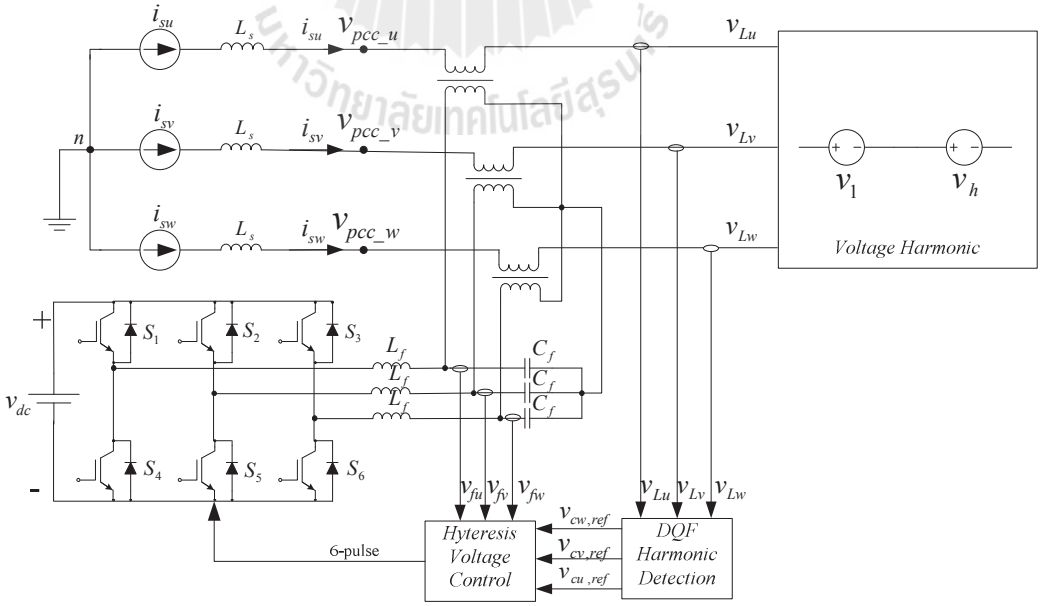
8.2 โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์และโหลดแบบต่าง ๆ

โครงสร้างของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์และโหลดแบบต่าง ๆ ในบทนี้จะนำเสนอลักษณะโหลดที่ก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการต่อตัวเก็บประจุ (C_L) ขนานกับตัวต้านทาน (R_L) ซึ่งสามารถพิจารณาโครงสร้างการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกและลักษณะโหลดได้ดังรูปที่ 8.1 และแบบที่

2 เป็นการอนุกรมแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้าหลักที่จุด PCC ซึ่งสามารถพิจารณาโครงสร้างการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกและการต่อโหลดแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.1 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์กรณีที่โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์



รูปที่ 8.2 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์กรณีที่เป็นโหลดแรงดันฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 8.1 เป็นโครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งในรูปดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่มีแหล่งจ่ายกระแส (i_s) ขนาด 17 แอมแปร์ต่อเฟส ค่าความเหนี่ยวนำ (L_s) เท่ากับ 0.1 mH ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 1 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ 1 μF โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่จุด PCC ขนาดของแรงดันจะเท่ากับ 183 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) เท่ากับ 12.72% การจำลองสถานการณ์ในบทนี้ใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสรายละเอียดการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 และในรูปที่ 8.2 เป็นโครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีโหลดเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งในรูปดังกล่าวจะมีโครงสร้างที่เหมือนกับรูปที่ 8.1 แต่จะแตกต่างกันตรงที่เป็นการอนุกรมแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้าที่จุด PCC ซึ่งการอนุกรมแรงดันฮาร์มอนิก สามารถพิจารณาสมการของแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังสมการที่ (8-1) ในการสร้างโหลดแรงดันฮาร์มอนิกสามารถปรับตั้งค่าการเกิดฮาร์มอนิกแต่ละอันดับได้และยังสามารถกำหนด $\%THD_v$ ได้อีกด้วย โหลดแรงดันฮาร์มอนิกจะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อนำไปทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบของโหลดแรงดันฮาร์มอนิกรูปแบบต่าง ๆ

$$v_{Lk} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \tag{8-1}$$

โดยที่ k คือ เฟส u, v, w

n คือ อันดับของฮาร์มอนิก

ω_0 คือ ความถี่มูลฐานเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

V_{mn} คือ ขนาดแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกอันดับที่ n

ϕ_n คือ เฟสของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

8.3 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ระบบที่พิจารณาการออกแบบดังรูปที่ 8.1 ซึ่งเป็นระบบที่มีโครงสร้างเป็นโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทาน เพราะฉะนั้นจึงดำเนินการเช่นเดียวกันกับการ

ออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่สามารถพิจารณาได้จากบทที่ 7 โดยเริ่มจากการลองปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสเพื่อทำการกำหนดขอบเขต เมื่อได้ค่าขอบเขตมาแล้วจึงดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS แบบไม่มีการกำหนดค่าเริ่มต้นและแบบที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้น โดยการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสามารถเริ่มพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 8.3.1 ซึ่งหัวข้อดังกล่าวเป็นหัวข้อเกี่ยวกับการลองปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

8.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสามารถพิจารณาได้จากการสังเกตพฤติกรรมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและค่าแถบฮีสเตอรีซีส มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ในการสังเกตพฤติกรรมค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง ค่าแรงดันบัสไฟตรง และค่าแถบฮีสเตอรีซีส ที่สำคัญในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาที่ค่า $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเป็นหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาผลการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมได้ดังตารางที่ 8.1 ถึงตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

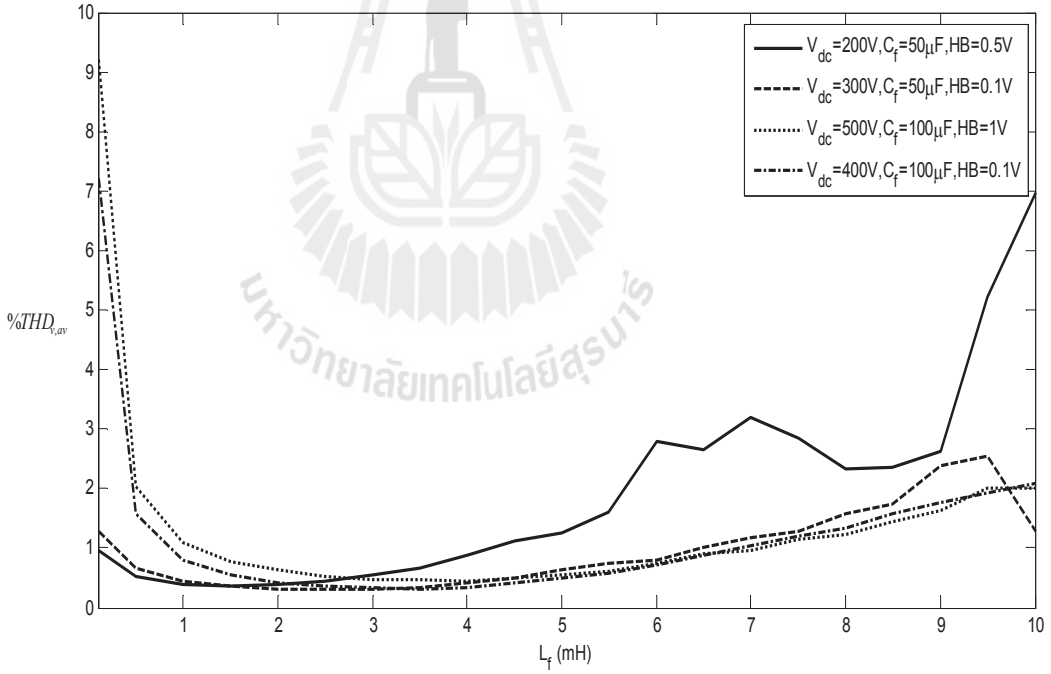
ค่าพารามิเตอร์ $L_f(\text{mH})$	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=200$ V, $C_f=50$ μF, $HB=0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=300$ V, $C_f=50$ μF, $HB=0.1$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=500$ V, $C_f=100$ μF, $HB=1$ V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=400$ V, $C_f=100$ μF, $HB=0.1$ V)
0.1	0.96783	1.28808	9.20456	7.20121
0.5	0.53694	0.66387	2.02698	1.58231
1	0.40077	0.45747	1.08523	0.79956
1.5	0.35852	0.35762	0.77639	0.54818

ตารางที่ 8.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (ต่อ)

ค่าพารามิเตอร์ $L_f(\text{mH})$	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=200$ V, $C_f=50$ μF, $HB=0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=300$ V, $C_f=50$ μF, $HB=0.1$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=500$ V, $C_f=100$ μF, $HB=1$ V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=400$ V, $C_f=100$ μF, $HB=0.1$ V)
2	0.39600	0.31081	0.62068	0.42125
2.5	0.44136	0.31941	0.53764	0.35831
3	0.55995	0.31529	0.48168	0.32558
3.5	0.65782	0.32611	0.47485	0.31067
4	0.87235	0.40484	0.45376	0.32624
4.5	1.10778	0.48842	0.50356	0.42257
5	1.25353	0.63487	0.54949	0.49470
5.5	1.61166	0.73226	0.61778	0.58902
6	2.80083	0.80137	0.74222	0.70218
6.5	2.66267	1.02207	0.89612	0.86798
7	3.18579	1.17785	0.95019	1.03758
7.5	2.84039	1.29245	1.14898	1.19595
8	2.32068	1.56975	1.22814	1.32295
8.5	2.35177	1.73363	1.45322	1.57240
9	2.62118	2.37315	1.62066	1.75667
9.5	5.21094	2.55006	1.99676	1.91402
10	6.96783	1.28808	1.99909	2.10119

จากตารางที่ 8.1 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง โดยในการสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะสังเกตจากการจำลองสถานการณ์พารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด โดยชุดที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) เท่ากับ 50 μF และแถบฮีสเตอรีซีส (HB) เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดัน

บัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 1 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 400 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสี่ชุด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันและพารามิเตอร์ทั้งสามตัวนี้ จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน แต่ในตารางที่ 8.1 จะมุ่งไปที่ประเด็นของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองโดยการสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะดำเนินการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวกับพารามิเตอร์ทั้งสี่ชุด เพื่อยืนยันว่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งรายละเอียดพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 6.4 ในบทที่ 6 เมื่อนำผลการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในตารางที่ 8.1 มาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 8.3 และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะพบว่าในช่วง 0.5 mH ถึง 8 mH จะเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์และสามารถกำหนดขอบเขตการค้นหาด้วยวิธี ATS ของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองได้อีกเช่นกัน



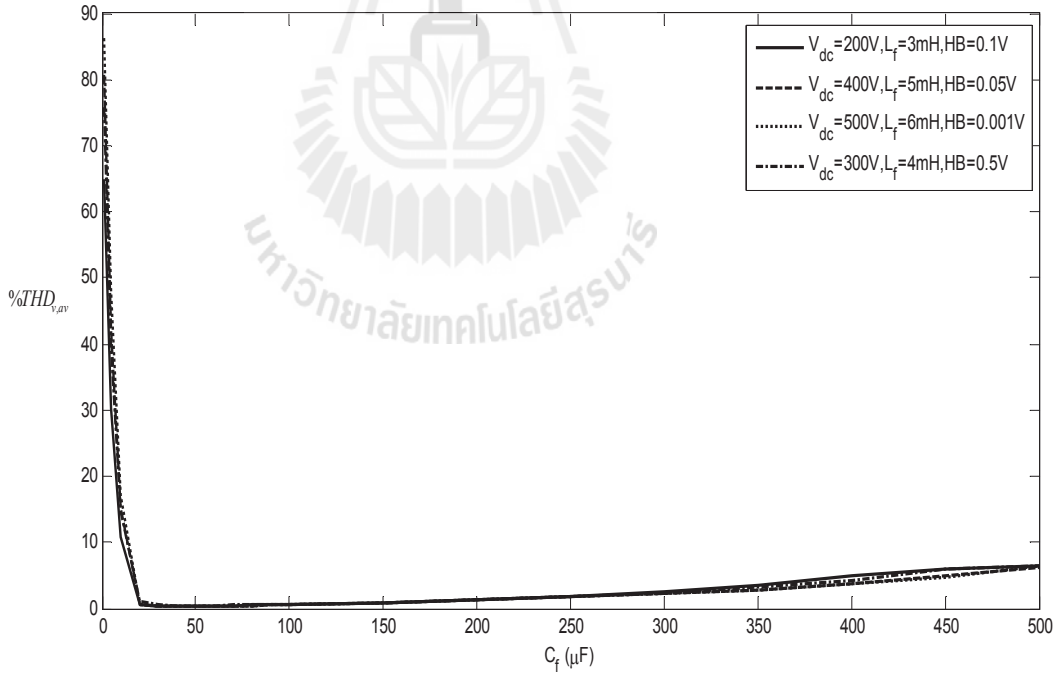
รูปที่ 8.3 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ %$THD_{v,av}$

ตารางที่ 8.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง

ค่าพารามิเตอร์ $C_f(\mu\text{F})$	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=200$ V, $L_f=3$ mH, $HB=0.1$ V)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=400$ V, $L_f=5$ mH, $HB=0.05$ V)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=500$ V, $L_f=6$ mH, $HB=0.001$V)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=300$ V, $L_f=4$ mH, $HB=0.5$ V)
1	64.79329	80.73285	86.25613	75.69647
5	30.17887	42.18191	47.88130	39.28072
10	10.80960	15.0604	17.11839	14.61431
20	0.56453	0.52702	0.52070	0.98932
30	0.37294	0.33455	0.32047	0.49026
40	0.33504	0.32318	0.29234	0.45153
50	0.36241	0.34129	0.34315	0.46525
60	0.39514	0.36953	0.42861	0.45848
70	0.41125	0.44435	0.40820	0.52024
80	0.49155	0.46436	0.46941	0.54887
90	0.53958	0.54294	0.50919	0.52899
100	0.58357	0.54086	0.58968	0.71614
150	0.95076	0.95489	0.96298	0.89853
200	1.41586	1.29689	1.23135	1.42175
250	1.86720	1.81514	1.72344	1.91532
300	2.61099	2.41409	2.20856	2.41614
350	3.42493	2.87702	2.83152	3.16828
400	4.86328	3.86391	3.67789	4.16236
450	6.00047	5.03221	4.69661	5.97205
500	6.47831	6.24959	6.35613	6.39227

จากตารางที่ 8.2 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง โดยการสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองกับ

ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุดด้วยกัน โดยชุดที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 400 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.05 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 4 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ในตารางดังกล่าวจะมุ่งไปที่ประเด็นของตัวเก็บประจุวงจรกรองซึ่งจะมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก และสามารถพิจารณารายละเอียดของพฤติกรรมตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อการฉีดแรงดันชดเชยได้จากหัวข้อที่ 6.4 ในบทที่ 6 และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 8.4 และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะพบว่าในช่วง 20 μF ถึง 300 μF เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาเป็นขอบเขตการค้นหาด้วยวิธี ATS เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่ค่อนข้างน้อย



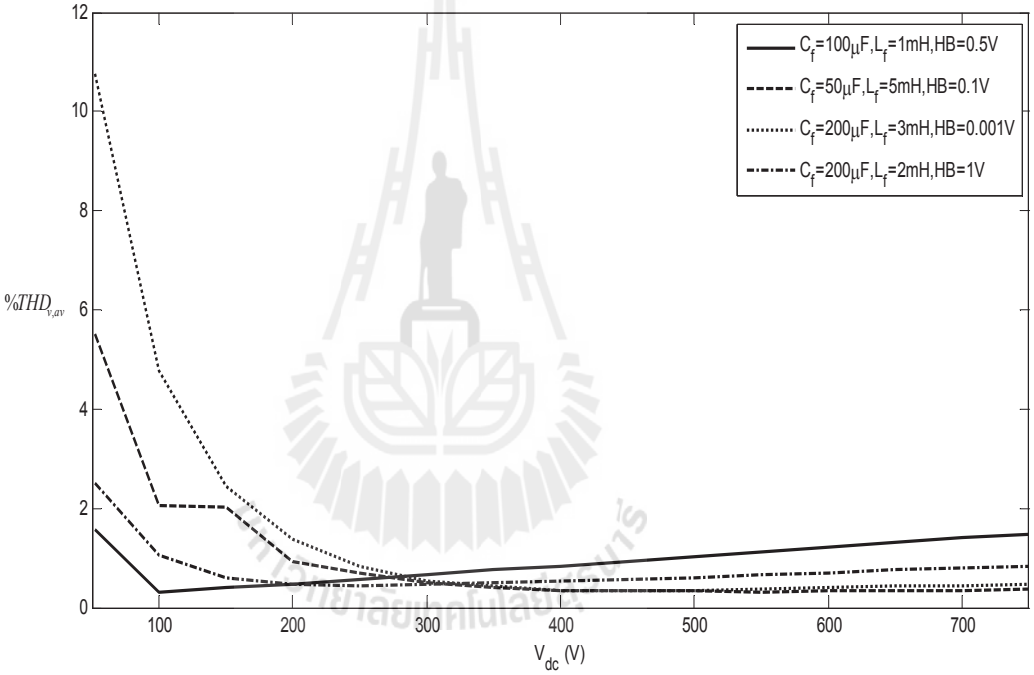
รูปที่ 8.4 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 8.3 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง

ค่าพารามิเตอร์ v_{dc}(V)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($C_f = 100\ \mu$F, $L_f = 1$ mH, $HB = 0.5$ V)	ชุดที่ 2 ($C_f = 50\ \mu$F, $L_f = 5$ mH, $HB = 0.1$ V)	ชุดที่ 3 ($C_f = 200\ \mu$F, $L_f = 3$ mH, $HB = 0.001$V)	ชุดที่ 4 ($C_f = 200\ \mu$F, $L_f = 2$ mH, $HB = 1$ V)
52.5	1.57459	5.50845	10.75109	2.49898
100	0.31222	2.06485	4.76675	1.05282
150	0.39059	2.01912	2.44589	0.61282
200	0.47649	0.92812	1.37209	0.45781
250	0.56411	0.68321	0.80937	0.43679
300	0.65761	0.48842	0.54503	0.46413
350	0.74693	0.40591	0.42779	0.48538
400	0.83789	0.34906	0.34098	0.52386
450	0.92656	0.33167	0.34723	0.55798
500	1.02594	0.32964	0.34673	0.60364
550	1.12327	0.32219	0.37526	0.64981
600	1.21051	0.32394	0.40242	0.69601
650	1.31018	0.33576	0.42787	0.74617
700	1.40232	0.35146	0.44731	0.78710
750	1.48605	0.36614	0.47689	0.83439

จากตารางที่ 8.3 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งในตารางดังกล่าวจะดำเนินการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด โดยชุดที่ 1 คือ ตัวเก็บประจุวงจรกรองเท่ากับ 100 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH และแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 1 โวลต์

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสี่ชุด เป็นพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน แต่จะดำเนินการเปลี่ยนค่าแรงดันบัสไฟตรง เพื่อยืนยันว่าแรงดันบัสไฟตรงมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งรายละเอียดพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 6.4 ในบทที่ 6 และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาวาดกราฟพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ได้ดังรูปที่ 8.5 และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวสามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาด้วยวิธี ATS ได้ คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงจะอยู่ในช่วง 52.5 โวลต์ ถึง 600 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมและอีกทั้งยังส่งผลให้ค่า $\%THD_{v,av}$ มีค่าลดน้อยลงด้วยเช่นกัน



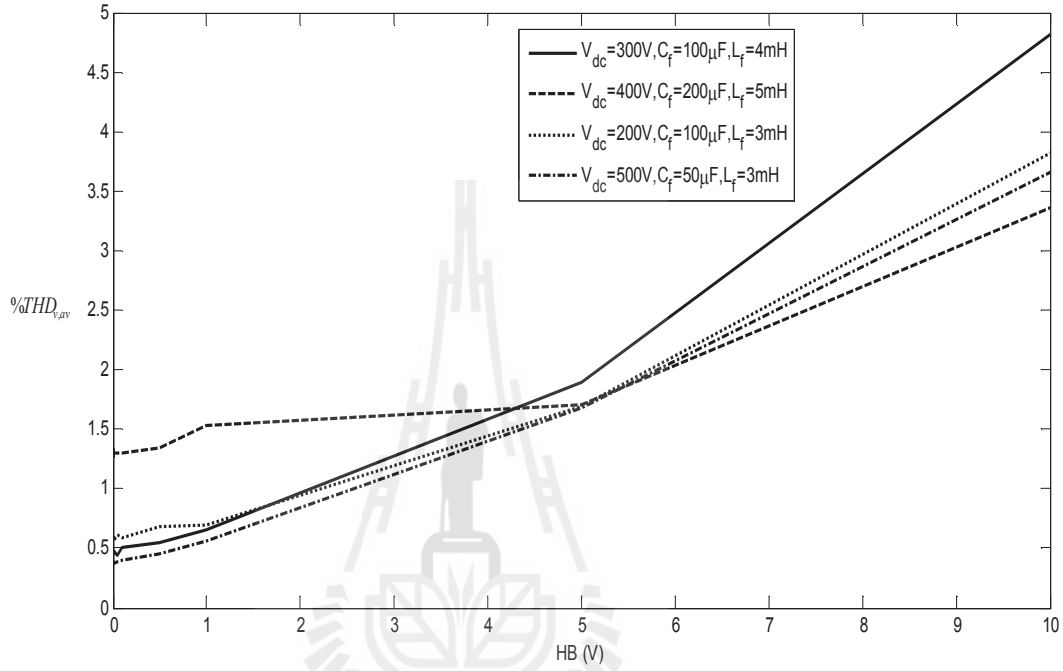
รูปที่ 8.5 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 8.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส

ค่าพารามิเตอร์ HB(V)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc}=300$ V, $C_f=100$ μF, $L_f=4$ mH)	ชุดที่ 2 ($v_{dc}=400$ V, $C_f=200$ μF, $L_f=5$ mH)	ชุดที่ 3 ($v_{dc}=200$ V, $C_f=100$ μF, $L_f=3$ mH)	ชุดที่ 4 ($v_{dc}=500$ V, $C_f=50$ μF, $L_f=3$ mH)
0.0001	0.46845	1.28752	0.60597	0.37230
0.0005	0.48216	1.27016	0.60587	0.37409
0.001	0.48216	1.33471	0.58554	0.37133
0.005	0.45666	1.29773	0.59169	0.37797
0.01	0.47968	1.30073	0.55429	0.37273
0.05	0.43997	1.29689	0.60893	0.38804
0.1	0.50568	1.30029	0.58357	0.39318
0.5	0.54887	1.33474	0.68219	0.45556
1	0.65441	1.52553	0.69667	0.55809
5	1.88985	1.69989	1.69307	1.68308
10	4.81652	3.35965	3.82539	3.65703

จากตารางที่ 8.4 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส โดยการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีสได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าแถบฮีสเตอรีซีสกับค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุดด้วยกัน โดยชุดที่ 1 คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 4 mH ชุดที่ 2 คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 400 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH ชุดที่ 3 คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH และชุดที่ 4 คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH โดยในตารางดังกล่าวจะมุ่งไปที่ประเด็นของค่าแถบฮีสเตอรีซีสซึ่งจะมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก และสามารถพิจารณารายละเอียดของพฤติกรรมค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีผลต่อการฉีดแรงดันชดเชยได้จากหัวข้อที่ 6.4 ในบทที่ 6 และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาวาดกราฟพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ได้

ดังรูปที่ 8.6 และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะพบว่าในช่วง 0 โวลต์ ถึง 1 โวลต์ เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาเป็นขอบเขตการค้นหาด้วยวิธี ATS เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่ค่อนข้างน้อย



รูปที่ 8.6 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดการปรับขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวจากการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 8.1 ถึงตารางที่ 8.4 ซึ่งในตารางที่ 8.1 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองซึ่งจะพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0.5 mH ถึง 8 mH ในตารางที่ 8.2 เป็นตารางสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง จากตารางดังกล่าวพบว่าค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 20 μF ถึง 300 μF ตารางที่ 8.3 เป็นตารางสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงจะพบว่าค่าแรงดันบัสไฟตรงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 52.5 โวลต์ ถึง 600 โวลต์ และในตารางที่ 8.4 เป็นตารางการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอรีซีส จากในตารางดังกล่าวพบว่าค่าแถบฮีสเตอรีซีสที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 0 โวลต์ ถึง 1 โวลต์ และในบทที่ 6 ได้มีการอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสไว้แล้ว

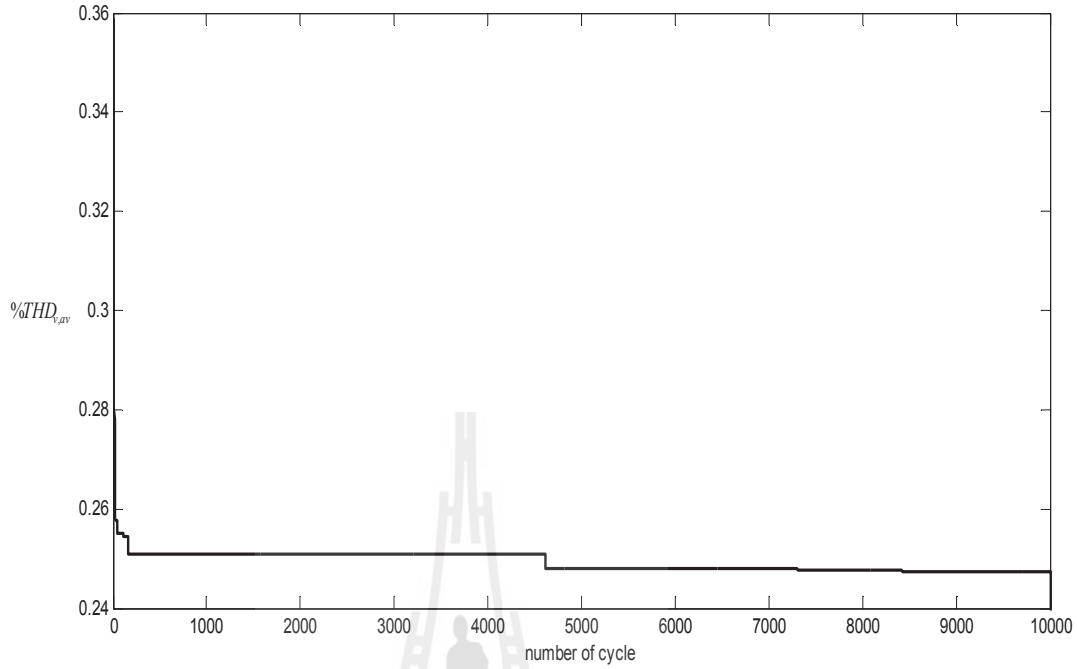
ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการกำหนดขอบเขตจากการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัว ได้ตามตารางที่ 8.5 ซึ่งเป็นตารางสรุปค่าขอบเขตการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัว สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส

ตารางที่ 8.5 ค่าขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

พารามิเตอร์	v_{dc} (V)	HB (V)	L_f (mH)	C_f (μF)
ขอบเขตล่าง	52.5	0	0.5	20
ขอบเขตบน	600	1	8	300

8.3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว หรือการค้นหาด้วยวิธี ATS ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอการค้นหาด้วยวิธี ATS 2 แบบด้วยกัน โดยแบบที่ 1 คือ การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป แบบที่ 2 คือ การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ซึ่งการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไปสามารถพิจารณาอัลกอริทึมได้จากหัวข้อที่ 7.2 ในบทที่ 7 และการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นสามารถพิจารณาอัลกอริทึมได้จากหัวข้อที่ 7.6 ในบทที่ 7 เช่นเดียวกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์ของ ATS ในบทนี้จะไม่มีการทดสอบเพราะว่าผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้ขอบเขตการค้นหาเช่นเดียวกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมในบทที่ 7 เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำมาใช้ คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 5 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 0.5 และตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 ในการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบทั่วไปจะดำเนินการค้นหาเป็นจำนวน 10,000 รอบ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 8.7 และการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นจะดำเนินการค้นหาทั้งหมด 5 ครั้งการค้นหา โดยในแต่ละครั้งการค้นหาจะดำเนินการครั้งละ 2,000 รอบ อีกทั้งยังสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 8.8

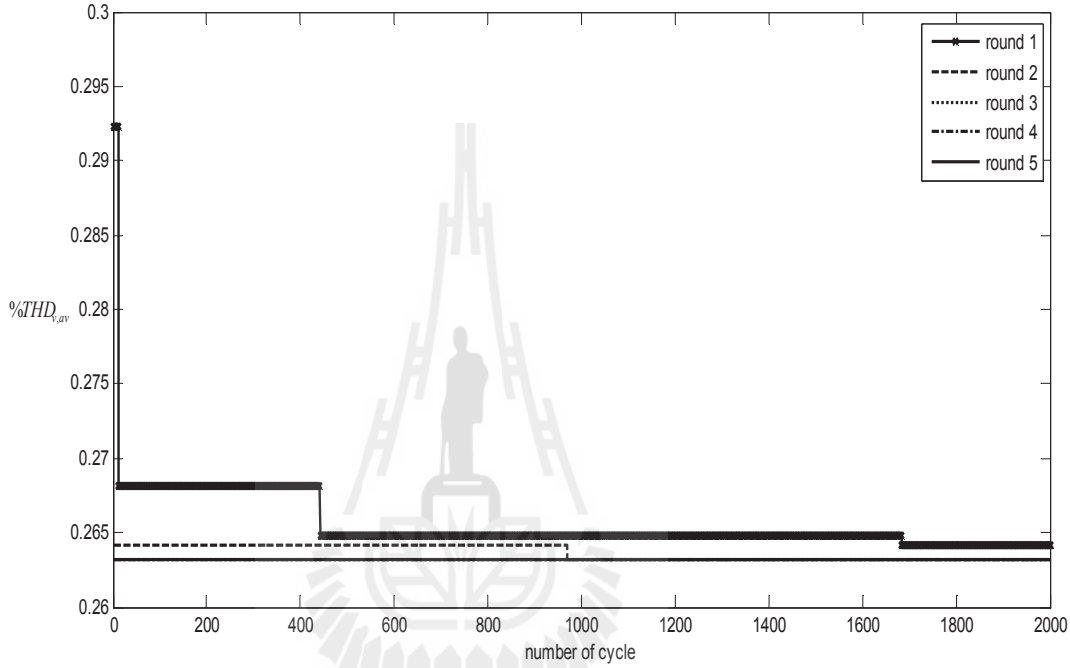


รูปที่ 8.7 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป

จากรูปที่ 8.7 เป็นกราฟแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป โดยในกราฟดังกล่าวเป็นการแสดงผลการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมตั้งแต่ 0 รอบ ถึง 10,000 รอบ เมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะพบการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ในช่วงตั้งแต่ 0 รอบ ถึงประมาณ 300 รอบ ค่า $\%THD_{v,av}$ มีการลู่เข้าที่ค่อยข้างเร็วและพิจารณาต่อไปถึงประมาณ 4,500 รอบ ค่า $\%THD_{v,av}$ จะมีการลู่เข้าที่ค่อนข้างช้า จนกระทั่งถึง 10,000 รอบ ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.24741% และผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป ผลที่ได้ คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 127.99 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.06074 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.19 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 193.92 μF ซึ่งผลที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS เป็นผลการค้นหาที่ดีและอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std 519-1992.

สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส โดยการใช้การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดค่าเริ่มต้นจากค่าที่ใช้การสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจากตารางที่ 8.1 ถึงตารางที่ 8.4 โดยเมื่อพิจารณานำค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่าน้อยที่สุดนำมากำหนด

เป็นค่าเริ่มต้น เมื่อพิจารณาจะสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นได้ดังนี้ ค่าแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีสเท่ากับ 0.001 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 6 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรองเท่ากับ 40 μF ค่าพารามิเตอร์ชุดนี้สามารถพิจารณากำหนดเป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 8.8



รูปที่ 8.8 การลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น

จากรูปที่ 8.8 เป็นกราฟแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ของการค้นหา ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ ทั้งหมด 5 ครั้งการค้นหา โดยในแต่ละครั้งการค้นหาจะดำเนินการครั้งละ 2,000 รอบ และสามารถพิจารณาได้ดังนี้ ในรอบที่ 1 เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.001 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 40 μF ซึ่งผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในรอบที่ 1 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 495.26 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.01404 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 6.11 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 37.60 μF ในการค้นหาในรอบที่ 1 ผลที่ได้ คือ $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.26411% เมื่อทำการค้นหาในรอบที่ 2 จึงได้นำผลการทดสอบในรอบที่ 1 มาเป็นค่าเริ่มต้น โดยผลการทดสอบที่ได้ในรอบที่ 2 คือ

แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 495.41 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.01376 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6.11 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 37.43 μF และผลการทดสอบในรอบที่ 2 ที่ได้ คือ ค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.26315% สำหรับการทดสอบในรอบที่ 3 ก็จะนำผลการทดสอบในรอบที่ 2 มาเป็นค่าเริ่มต้นเช่นเดียวกัน ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในรอบที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 495.41 โวลต์ แถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.01376 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6.11 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 37.43 μF และผลการทดสอบในรอบดังกล่าว คือ $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0.26315% การทดสอบในรอบที่ 4 และรอบที่ 5 จะทำคล้ายคลึงกันกับการทดสอบในรอบก่อนหน้านี้ คือ ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าเท่าเดิมเช่นเดียวกันกับรอบที่ 3 สามารถพิจารณาผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นได้ดังตารางที่ 8.6

ตารางที่ 8.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น

	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
v_{dc} (V)	(500) 495.26	(495.26) 495.41	(495.41) 495.41	(495.41) 495.41	(495.41) 495.41
HB (V)	(0.001) 0.01404	(0.01404) 0.01376	(0.01376) 0.01376	(0.01376) 0.01376	(0.01376) 0.01376
L_f (mH)	(6) 6.11	(6.11) 6.11	(6.11) 6.11	(6.11) 6.11	(6.11) 6.11
C_f (μF)	(40) 37.60	(37.60) 37.43	(37.43) 37.43	(37.43) 37.43	(37.43) 37.43
$\%THD_{v,av}$	(0.29234) 0.26411	(0.26411) 0.26315	(0.26315) 0.26315	(0.26315) 0.26315	(0.26315) 0.26315

หมายเหตุ: (ค่าเริ่มต้น)

จากการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบทั้งหมด 3 วิธี คือ วิธีการสังเกตพฤติกรรมของพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 8.3.1 การออกแบบ

ค่าพารามิเตอร์ด้วยการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป และการออกแบบการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น โดยการออกแบบทั้งสามวิธีนี้ได้นำมาเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด สามารถพิจารณาได้ในตารางที่ 8.7 ในตารางดังกล่าวเป็นตารางเปรียบเทียบผลการออกแบบสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมตามแนวทางต่าง ๆ ซึ่งในตารางดังกล่าวจะพบว่าการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด ที่ค่าพารามิเตอร์แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 127.99 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.06074 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.19 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 193.92 μF เพราะฉะนั้นในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในรูปแบบต่าง ๆ จึงนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบด้วยวิธี ATS ในบทที่ 7 จะพบว่าในบทดังกล่าวการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้นให้ผลการออกแบบที่ดีที่สุด และเมื่อทำการเปลี่ยนระบบมาเป็นดังรูปที่ 8.1 พบว่าผลการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไปให้ผลที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ดังนั้นผลการออกแบบด้วยวิธี ATS ที่ดีที่สุดจะขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 8.7 ผลการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมตามแนวทางต่าง ๆ

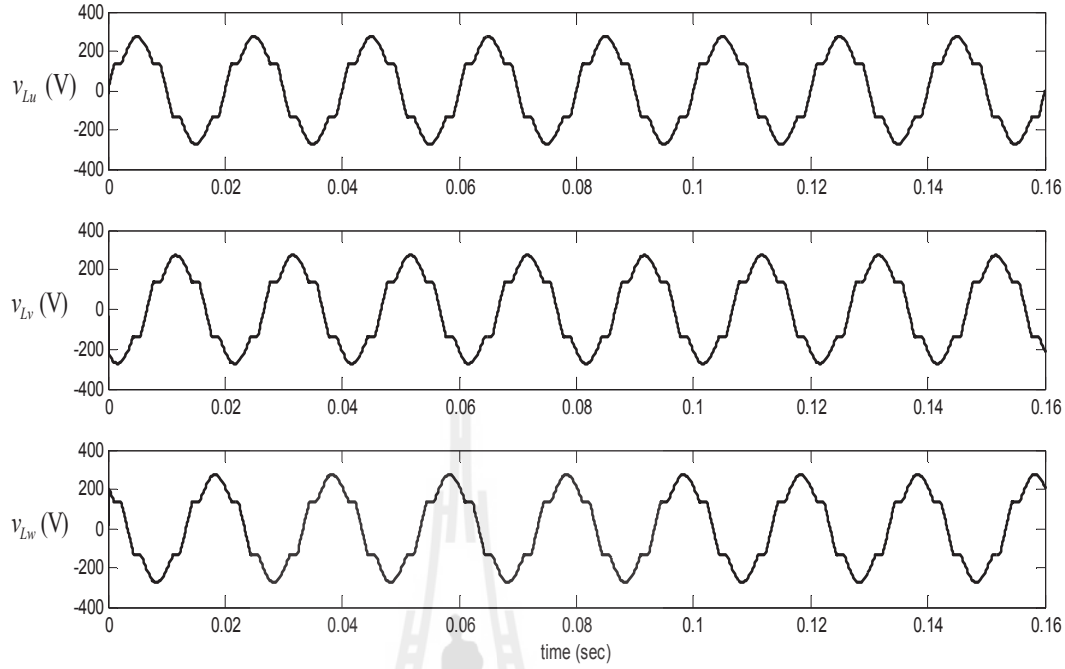
	วิธีการออกแบบพารามิเตอร์		
	การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์	การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป	การค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น
v_{dc} (V)	500	127.99	495.41
HB (V)	0.001	0.06074	0.01376
L_f (mH)	6	1.19	6.11
C_f (μF)	40	193.92	37.43
$\%THD_{v,av}$	0.29234	0.24741	0.26315

8.4 การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันแต่แอมพลิจูดต่างกัน

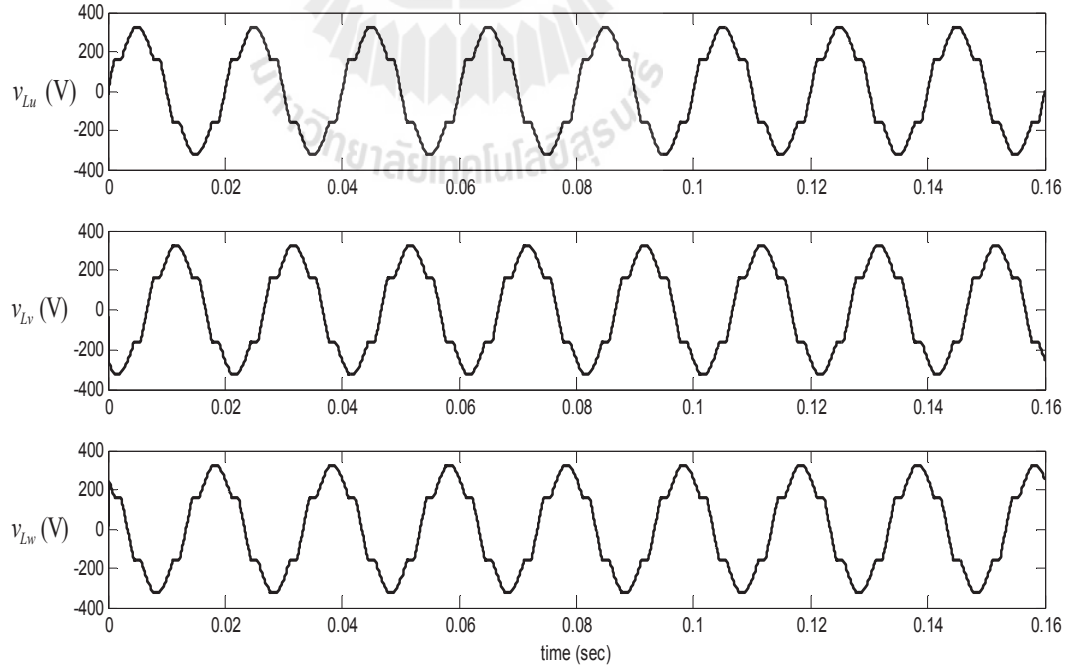
การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่โหลดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันหรือ $\%THD_v$ ที่ใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนแต่ระดับแรงดันฮาร์มอนิกแทน ซึ่งในการ

จำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบความคงทนของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบจากหัวข้อที่ 8.3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 127.99 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.06074 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.19 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 193.92 μF โดยในหัวข้อนี้ได้นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาทดสอบกับโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน เท่ากับ 300 Ω ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1 μF โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่จุด PCC ขนาดของแรงดันจะเท่ากับ 146 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) เท่ากับ 13.64% และโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน เท่ากับ 0.1 MΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1 μF โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่จุด PCC ขนาดของแรงดันจะเท่ากับ 220 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) เท่ากับ 12.83% ในการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้ได้ดำเนินการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมดังรูปที่ 8.1 โดยในรูปดังกล่าวใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF การควบคุมแรงดันชดเชยใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส เมื่อพิจารณาการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่แรงดันโหลดที่ระดับแรงดันต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 8.9 ถึงรูปที่ 8.11 ซึ่งในรูปที่ 8.9 เป็นรูปของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 183 โวลต์ ซึ่งในรูปนี้มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 12.72% รูปที่ 8.10 เป็นรูปของแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับ 220 โวลต์ โดยในรูปดังกล่าวมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 12.83% และในรูปที่ 8.11 เป็นรูปของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 146 โวลต์ ซึ่งในรูปนี้มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 13.64 % เมื่อพิจารณาในรูปที่ 8.9 ถึงรูปที่ 8.11 จะมีลักษณะแรงดันฮาร์มอนิกที่คล้ายคลึงกัน

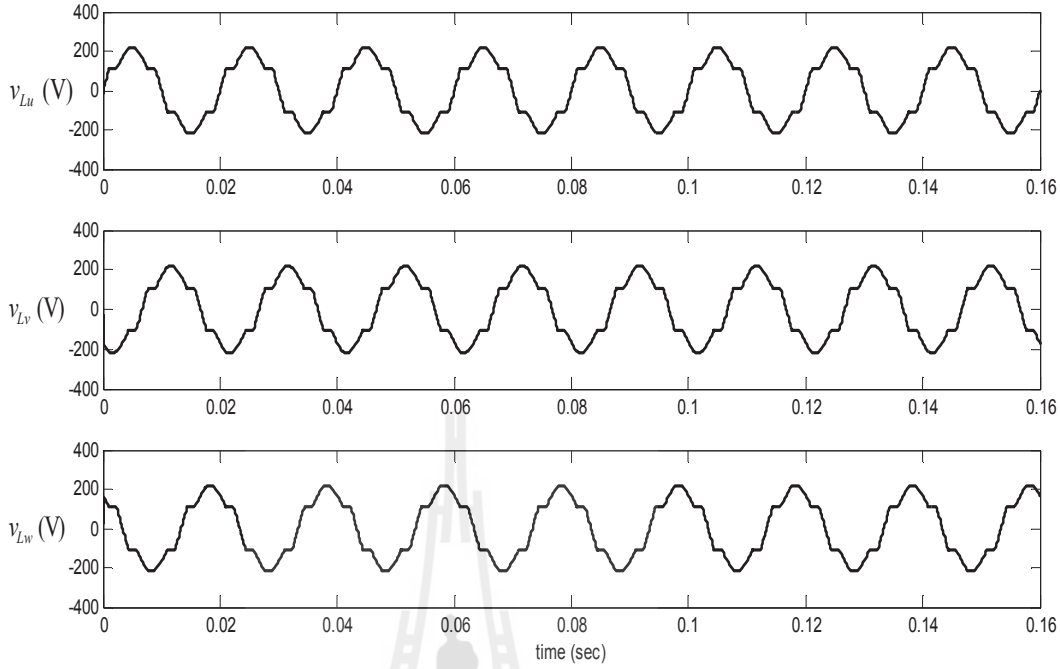
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 8.9 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 183 โวลต์



รูปที่ 8.10 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 220 โวลต์

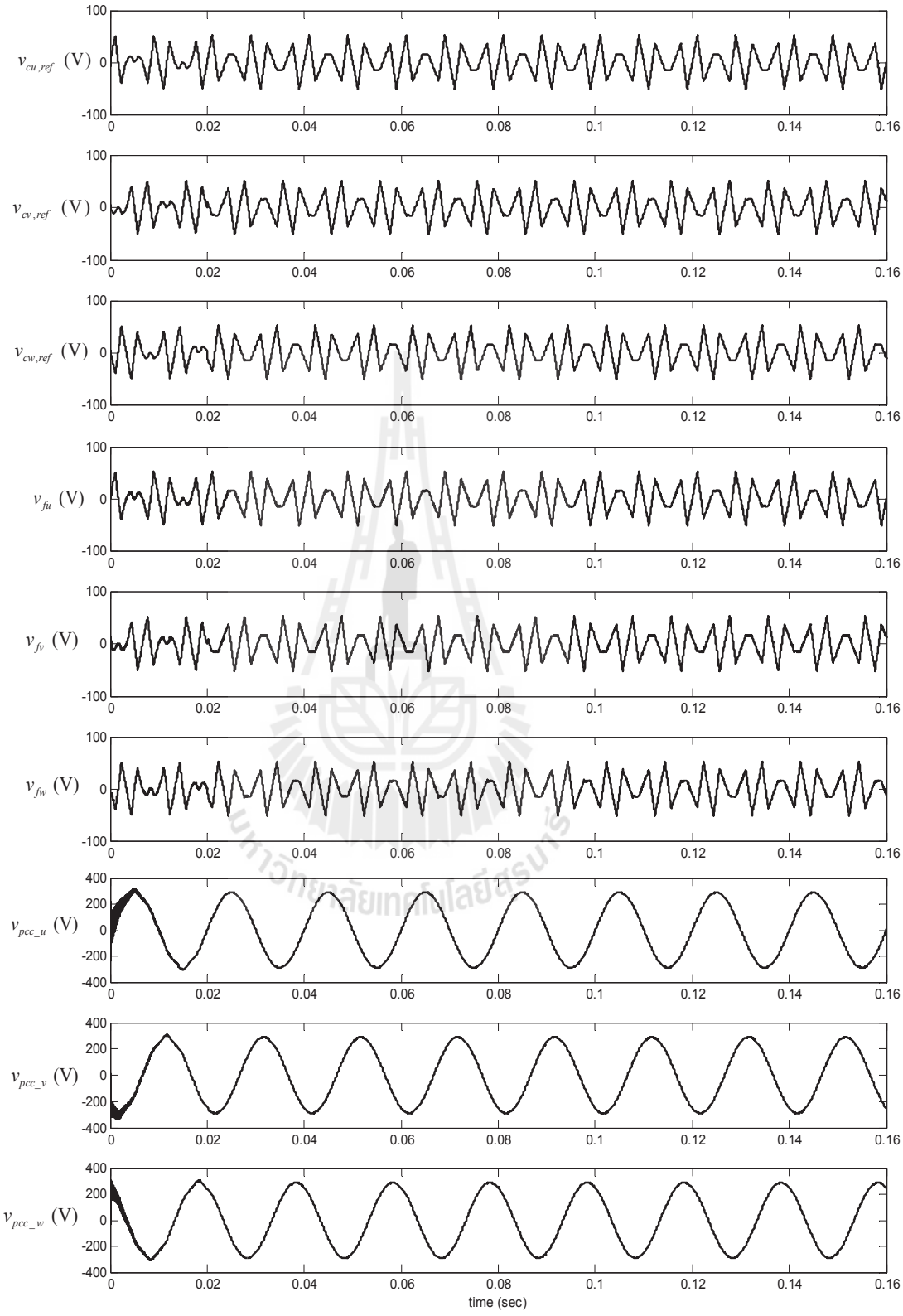


รูปที่ 8.11 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 146 โวลต์

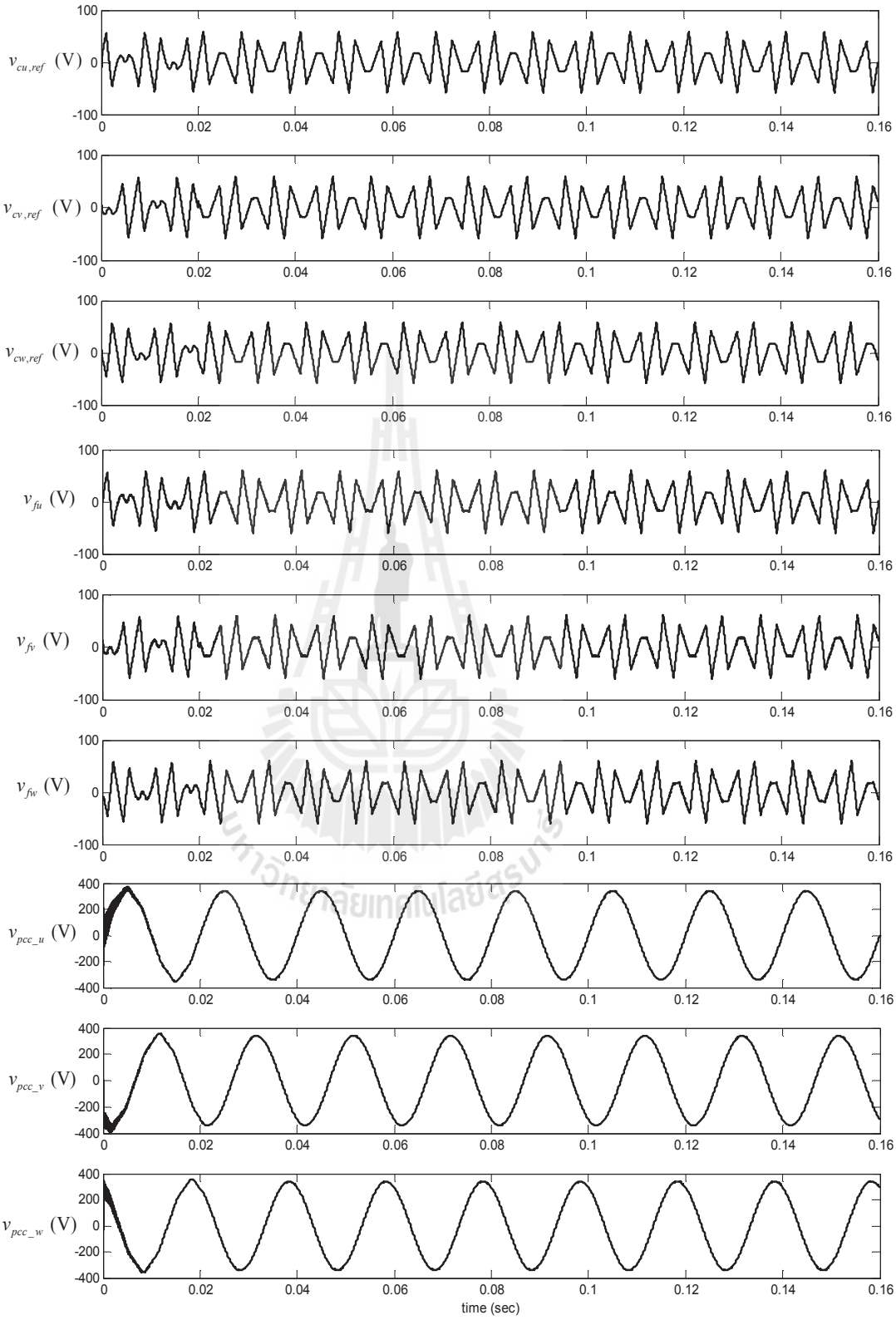
จากรูปที่ 8.12 ถึงรูปที่ 8.14 เป็นรูปผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์, 220 โวลต์ และ 146 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งรูปดังกล่าวได้แสดงการจำลองสถานการณ์ที่ช่วงเวลา 0 วินาที ถึง 1.6 วินาที โดยที่มีการคำนวณแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ด้วยวิธี DQF ตามที่แสดงไว้ในบทที่ 4 และการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยและสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลที่ได้ คือ แรงดันหลังการชดเชยทั้งสามเฟสที่จุด PCC ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น อีกทั้ง $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชย กรณีที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.24741% กรณีที่ระดับแรงดัน 220 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.26783% และกรณีที่ระดับแรงดัน 146 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.28921% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 และเมื่อพิจารณาจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์ สามารถนำมาใช้กับระบบที่ระดับแรงดัน 220 โวลต์ และ 146 โวลต์ ได้เนื่องจากลักษณะโหลดที่มีอันดับของแรงดันฮาร์มอนิกที่เหมือนกันสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 8.15 ซึ่งในรูปนี้เป็นรูปสเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1 จะสังเกตได้ว่ามีปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 เกิดขึ้นทั้งสามระดับแรงดัน และเมื่อพิจารณาใน

แบบของอัตราส่วนร้อยละที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์ จะพบว่าอันดับที่ 5 จะเท่ากับ 11.19559% อันดับที่ 7 จะเท่ากับ 5.58931% อันดับที่ 11 จะเท่ากับ 1.65872% และอันดับที่ 13 จะเท่ากับ 1.19615% โดยที่อันดับที่ 1 จะเท่ากับ 100% เมื่อดำเนินการพิจารณาโหลดแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับ 220 โวลต์ สามารถนำมาพิจารณาเป็นอัตราส่วนร้อยละได้ดังนี้ อันดับที่ 5 จะเท่ากับ 10.67835% อันดับที่ 7 จะเท่ากับ 5.32839% อันดับที่ 11 จะเท่ากับ 1.78885% และอันดับที่ 13 จะเท่ากับ 1.29080% และระบบสุดท้ายที่จะพิจารณา คือ ระบบที่แรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับ 143 โวลต์ เมื่อนำแรงดันโหลดฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันดังกล่าวมาพิจารณาเป็นอัตราส่วนร้อยละได้ดังนี้ อันดับที่ 5 จะเท่ากับ 12.05730% อันดับที่ 7 จะเท่ากับ 6.02207% อันดับที่ 11 จะเท่ากับ 1.38269% และอันดับที่ 13 จะเท่ากับ 0.99823% อีกทั้งยังสามารถนำอันดับฮาร์มอนิกแบบที่เป็นอัตราส่วนร้อยละของทั้งสามระดับแรงดันมาวาดกราฟสเปกตรัมอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1 ได้ดังรูปที่ 8.16 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนร้อยละแต่ละอันดับของระบบ 146 โวลต์ และ 220 โวลต์ เทียบกับของระบบ 183 โวลต์ จะพบว่ามีค่าอัตราส่วนร้อยละที่มีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมของที่ระบบ 183 โวลต์ จึงมีความคงทนต่อกับระบบ 146 โวลต์ และ 220 โวลต์ อีกทั้งยังมีสมรรถนะในการฉีดแรงดันชดเชยที่ดี

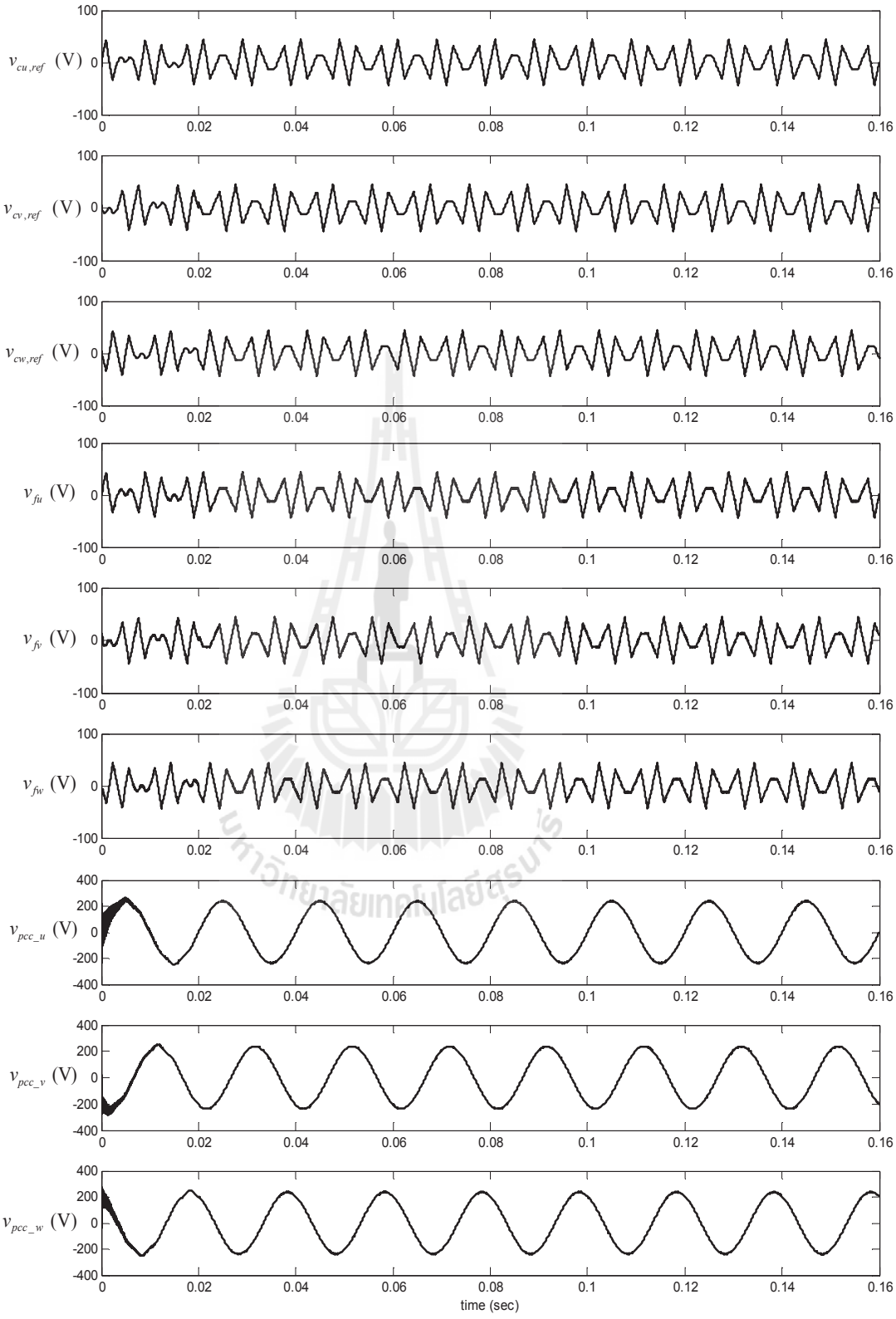
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



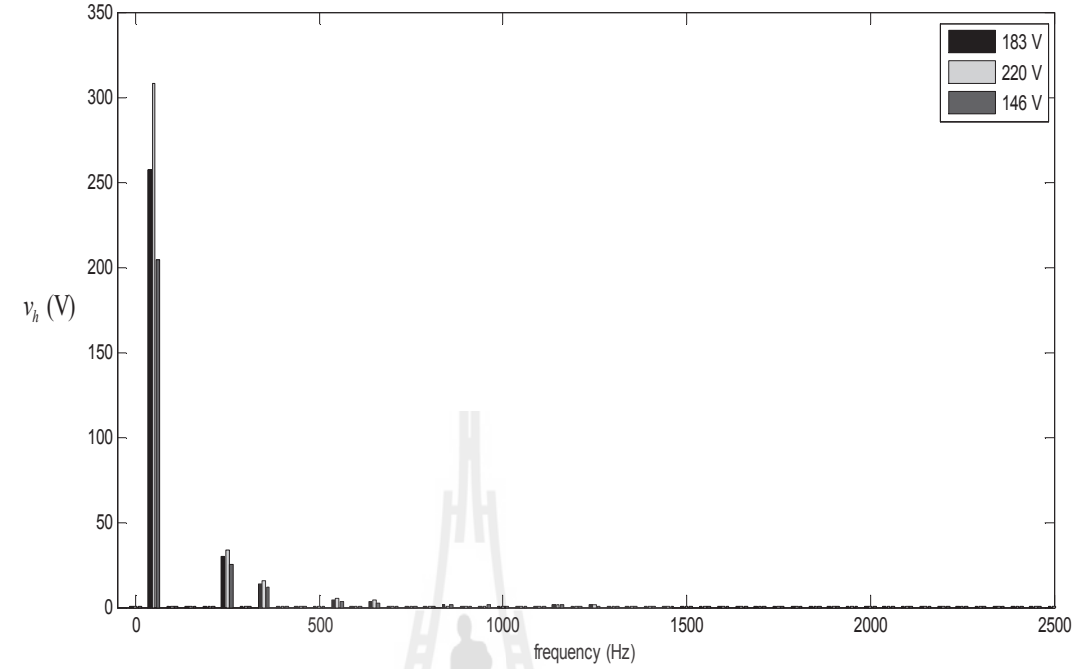
รูปที่ 8.12 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 183 โวลต์



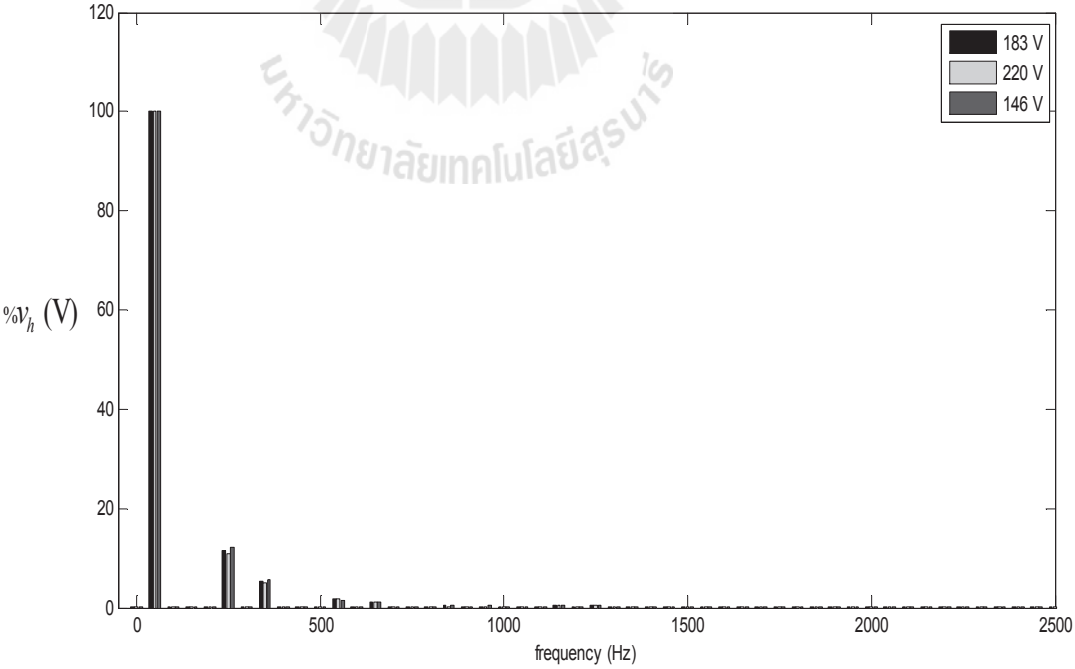
รูปที่ 8.13 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 220 โวลต์



รูปที่ 8.14 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ระดับแรงดัน 146 โวลต์



รูปที่ 8.15 สเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1



รูปที่ 8.16 สเปกตรัมในรูปของอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 1

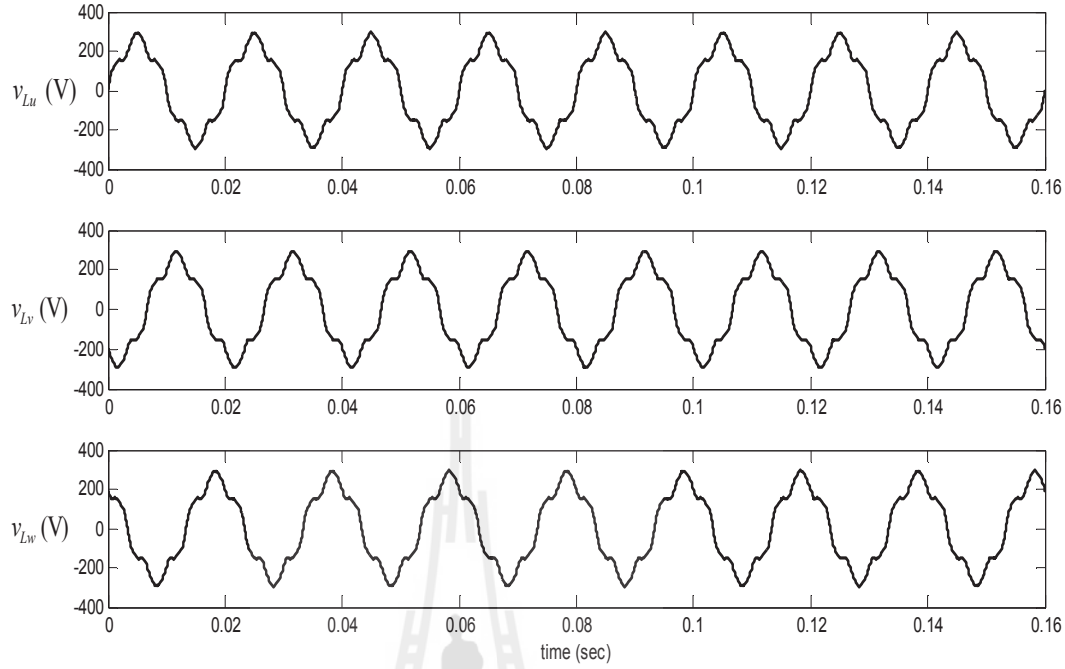
8.5 การจำลองสถานการณ์กรณีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่ากันแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม

การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่ากันแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้ได้ดำเนินการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมดังรูปที่ 8.2 ซึ่งในรูปดังกล่าวเป็นโหลดแรงดันฮาร์มอนิกที่ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้สร้างขึ้นมาจากสมการที่ (8-1) ทั้งนี้โหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์เป็นผู้กำหนดอันดับฮาร์มอนิกในอันดับต่าง ๆ และขนาดของแอมพลิจูดได้ ซึ่งในรูปดังกล่าวใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF โดยใช้ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสในการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยเช่นเดิม และเพื่อเป็นการทดสอบความคงทนของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบจากหัวข้อที่ 8.3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 127.99 โวลต์ ค่าแถบฮีสเตอรีซีส เท่ากับ 0.06074 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1.19 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 193.92 μF สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นไปที่ฮาร์มอนิกแต่ละอันดับเพื่อที่จะมุ่งประเด็นไปที่อันดับของฮาร์มอนิกที่มีผลต่อการสมรรถนะการฉีดแรงดันชดเชย โดยในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบทั้งหมดด้วยกัน 4 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ 1 จะมุ่งเน้นไปที่แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ระบบที่ 2 จะมุ่งเน้นไปที่แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ระบบที่ 3 จะมุ่งเน้นไปที่แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และระบบที่ 4 จะมุ่งเน้นไปที่แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 โดยในระบบที่ 1 สามารถพิจารณาการสร้างแรงดันฮาร์มอนิกได้ในสมการที่ (8-2) ถึงสมการที่ (8-4) ซึ่งในสมการดังกล่าวจะมีขนาดของแรงดันจะประมาณ 185.4 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) เท่ากับ 15.8% ซึ่งสามารถพิจารณาแรงดันโหลดฮาร์มอนิกของระบบที่ 1 ได้ดังรูปที่ 8.17

$$v_{Lu} = 259\sin(\omega t) + 40\sin(5\omega t) + 5\sin(7\omega t) + 5\sin(11\omega t) + 5\sin(13\omega t) \quad (8\text{-}2)$$

$$v_{Lv} = 259\sin(\omega t - 120^\circ) + 40\sin(5\omega t - 600^\circ) + 5\sin(7\omega t - 840^\circ) + 5\sin(11\omega t - 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t - 1560^\circ) \quad (8\text{-}3)$$

$$v_{Lw} = 259\sin(\omega t + 120^\circ) + 40\sin(5\omega t + 600^\circ) + 5\sin(7\omega t + 840^\circ) + 5\sin(11\omega t + 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t + 1560^\circ) \quad (8\text{-}4)$$



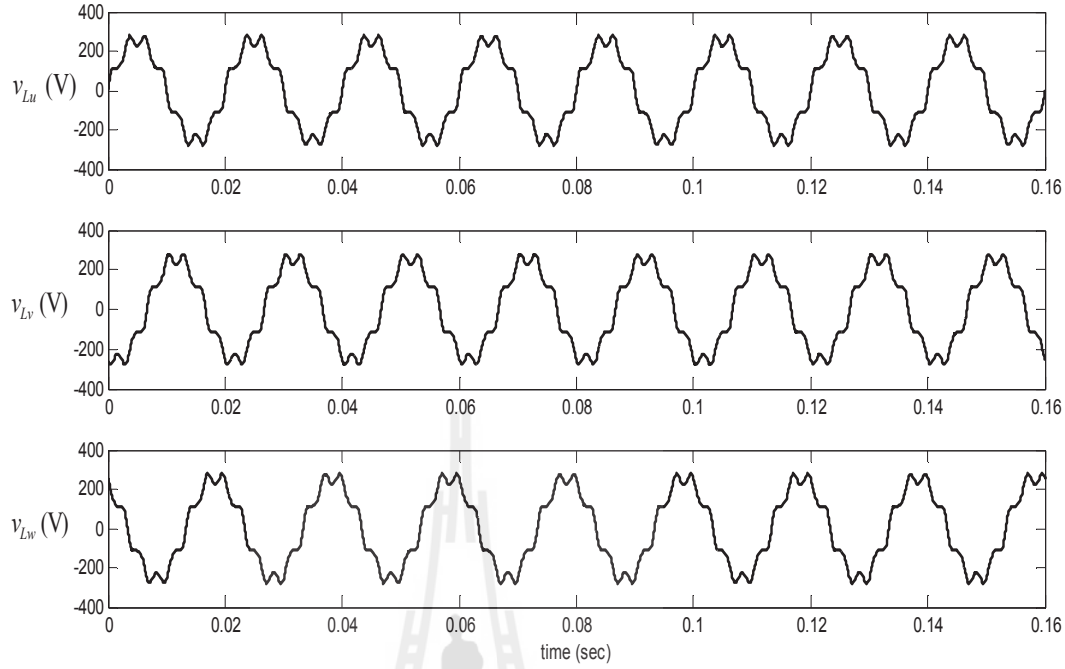
รูปที่ 8.17 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 1

ในส่วนของระบบที่ 2 ที่พิจารณาเป็นการมุ่งเน้นไปที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ซึ่งสามารถพิจารณาการสร้างแรงดันฮาร์มอนิกได้จากสมการที่ (8-5) ถึงสมการที่ (8-7) ซึ่งในสมการดังกล่าวจะมีขนาดของแรงดันจะประมาณ 185.4 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 15.8% เช่นเดียวกันกับระบบก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถพิจารณาแรงดันโหลดฮาร์มอนิกของระบบที่ 2 ได้ดังรูปที่ 8.18

$$v_{Lu} = 259\sin(\omega t) + 5\sin(5\omega t) + 40\sin(7\omega t) + 5\sin(11\omega t) + 5\sin(13\omega t) \quad (8\text{-}5)$$

$$v_{Lv} = 259\sin(\omega t - 120^\circ) + 5\sin(5\omega t - 600^\circ) + 40\sin(7\omega t - 840^\circ) + 5\sin(11\omega t - 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t - 1560^\circ) \quad (8\text{-}6)$$

$$v_{Lw} = 259\sin(\omega t + 120^\circ) + 5\sin(5\omega t + 600^\circ) + 40\sin(7\omega t + 840^\circ) + 5\sin(11\omega t + 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t + 1560^\circ) \quad (8\text{-}7)$$



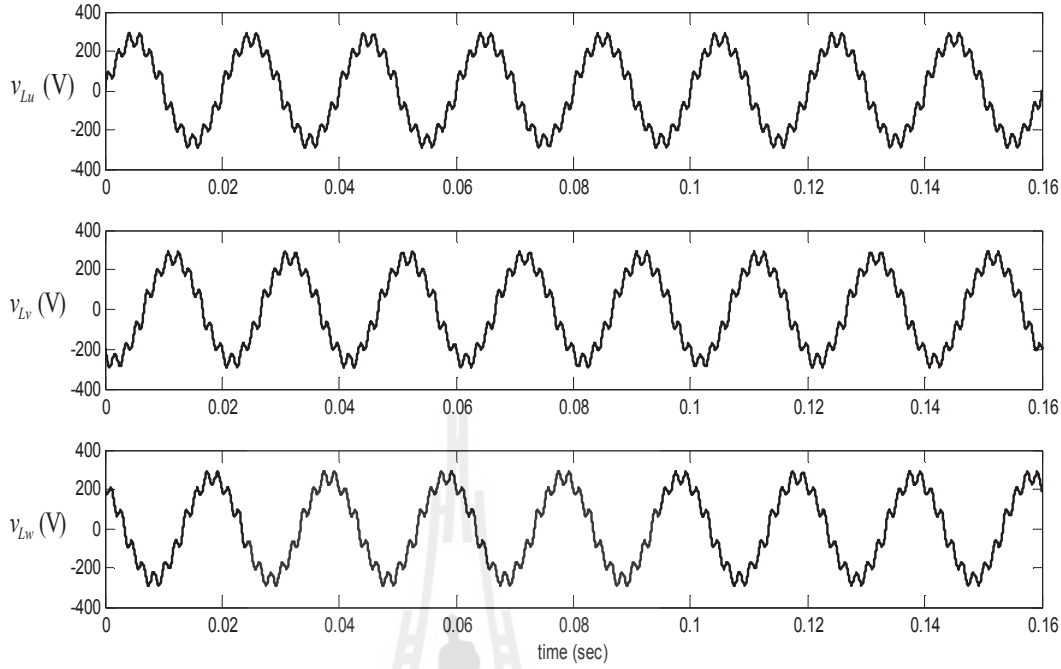
รูปที่ 8.18 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 2

ในส่วนของระบบที่ 3 ที่พิจารณาเป็นการมุ่งเน้นไปที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งสามารถพิจารณาการสร้างแรงดันฮาร์มอนิกได้จากสมการที่ (8-8) ถึงสมการที่ (8-10) ซึ่งในสมการดังกล่าวจะมีขนาดของแรงดันจะประมาณ 185.4 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 15.8% เช่นเดียวกันกับระบบที่ 1 และระบบที่ 2 ซึ่งสามารถพิจารณาแรงดันโหลดฮาร์มอนิกของระบบที่ 3 ได้ดังรูปที่ 8.19

$$v_{Lu} = 259\sin(\omega t) + 5\sin(5\omega t) + 5\sin(7\omega t) + 40\sin(11\omega t) + 5\sin(13\omega t) \quad (8\text{-}8)$$

$$v_{Lv} = 259\sin(\omega t - 120^\circ) + 5\sin(5\omega t - 600^\circ) + 5\sin(7\omega t - 840^\circ) + 40\sin(11\omega t - 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t - 1560^\circ) \quad (8\text{-}9)$$

$$v_{Lw} = 259\sin(\omega t + 120^\circ) + 5\sin(5\omega t + 600^\circ) + 5\sin(7\omega t + 840^\circ) + 40\sin(11\omega t + 1320^\circ) + 5\sin(13\omega t + 1560^\circ) \quad (8\text{-}10)$$



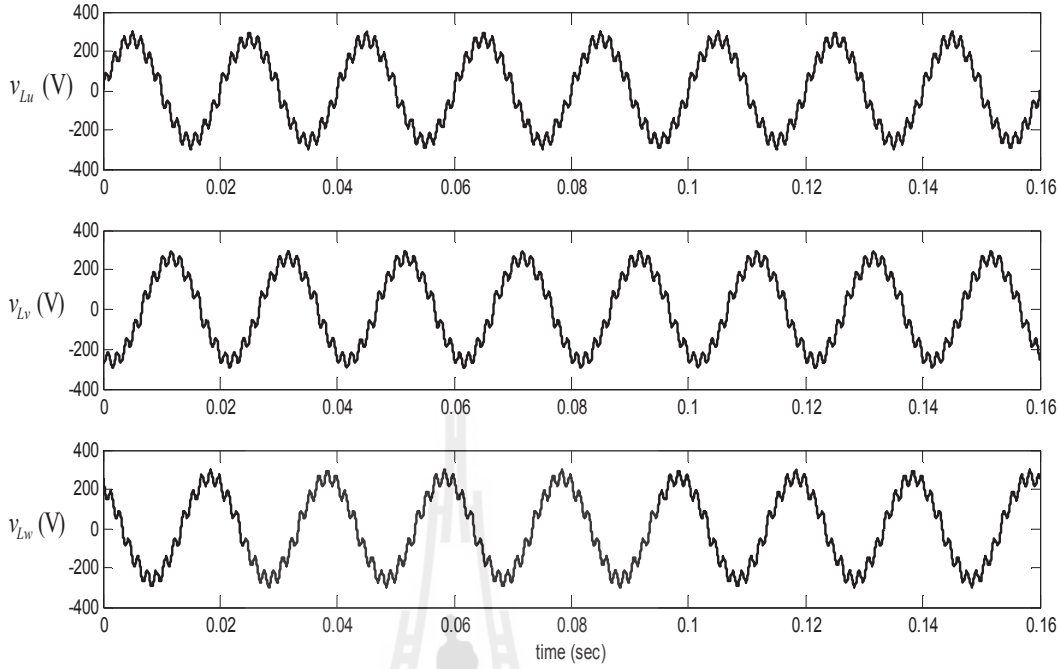
รูปที่ 8.19 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 3

ในส่วนของระบบที่ 4 ที่พิจารณาเป็นการมุ่งเน้นไปที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ซึ่งสามารถพิจารณาการสร้างแรงดันฮาร์มอนิกได้จากสมการที่ (8-11) ถึงสมการที่ (8-13) ซึ่งในสมการดังกล่าวจะมีขนาดของแรงดันจะประมาณ 185.4 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบความเพี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 15.8% เช่นเดียวกันกับระบบที่กล่าวมาไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถพิจารณาแรงดันโหลดฮาร์มอนิกของระบบที่ 4 ได้ดังรูปที่ 8.20

$$v_{Lu} = 259\sin(\omega t) + 5\sin(5\omega t) + 5\sin(7\omega t) + 5\sin(11\omega t) + 40\sin(13\omega t) \quad (8\text{-}11)$$

$$v_{Lv} = 259\sin(\omega t - 120^\circ) + 5\sin(5\omega t - 600^\circ) + 5\sin(7\omega t - 840^\circ) + 5\sin(11\omega t - 1320^\circ) + 40\sin(13\omega t - 1560^\circ) \quad (8\text{-}12)$$

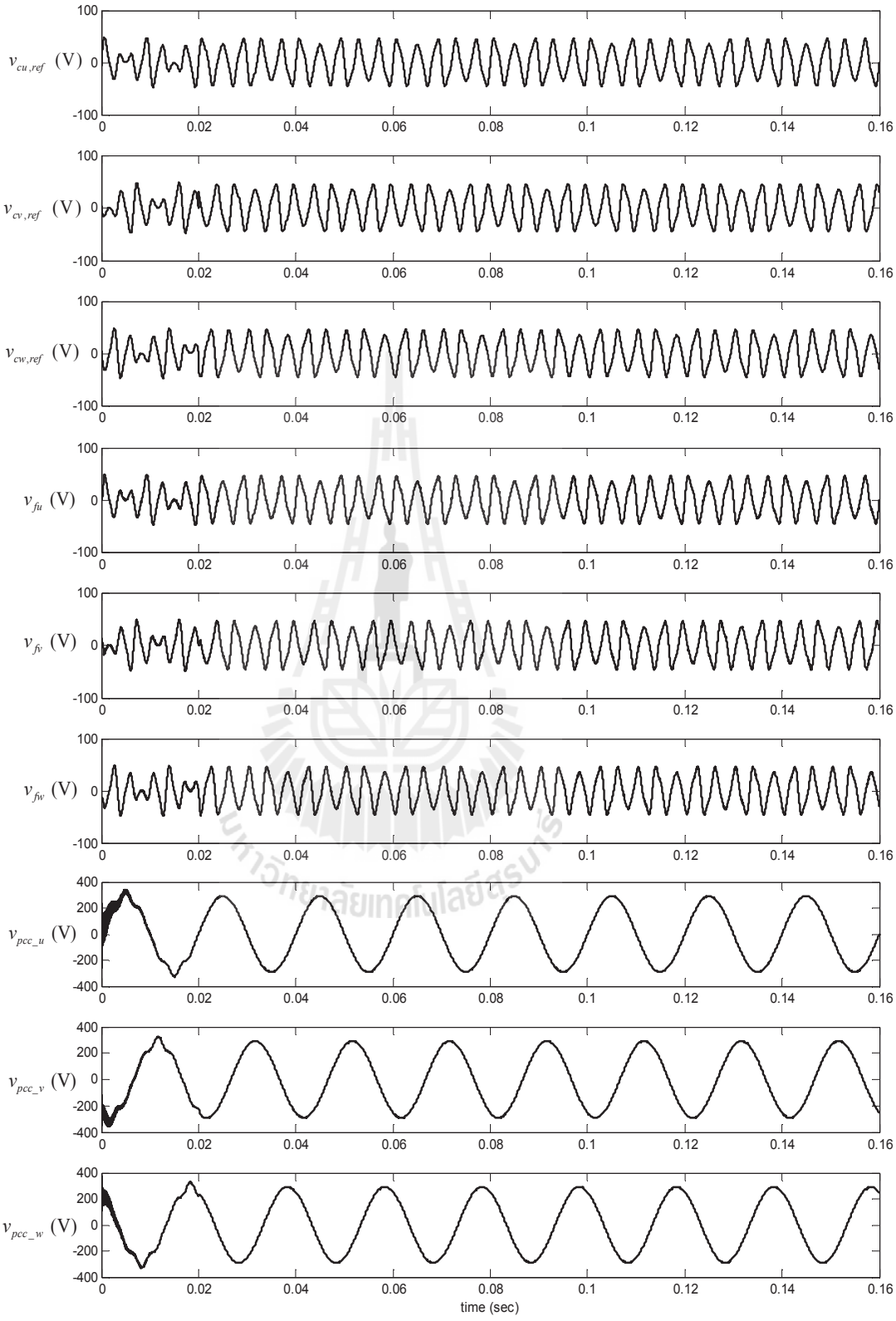
$$v_{Lw} = 259\sin(\omega t + 120^\circ) + 5\sin(5\omega t + 600^\circ) + 5\sin(7\omega t + 840^\circ) + 5\sin(11\omega t + 1320^\circ) + 40\sin(13\omega t + 1560^\circ) \quad (8\text{-}13)$$



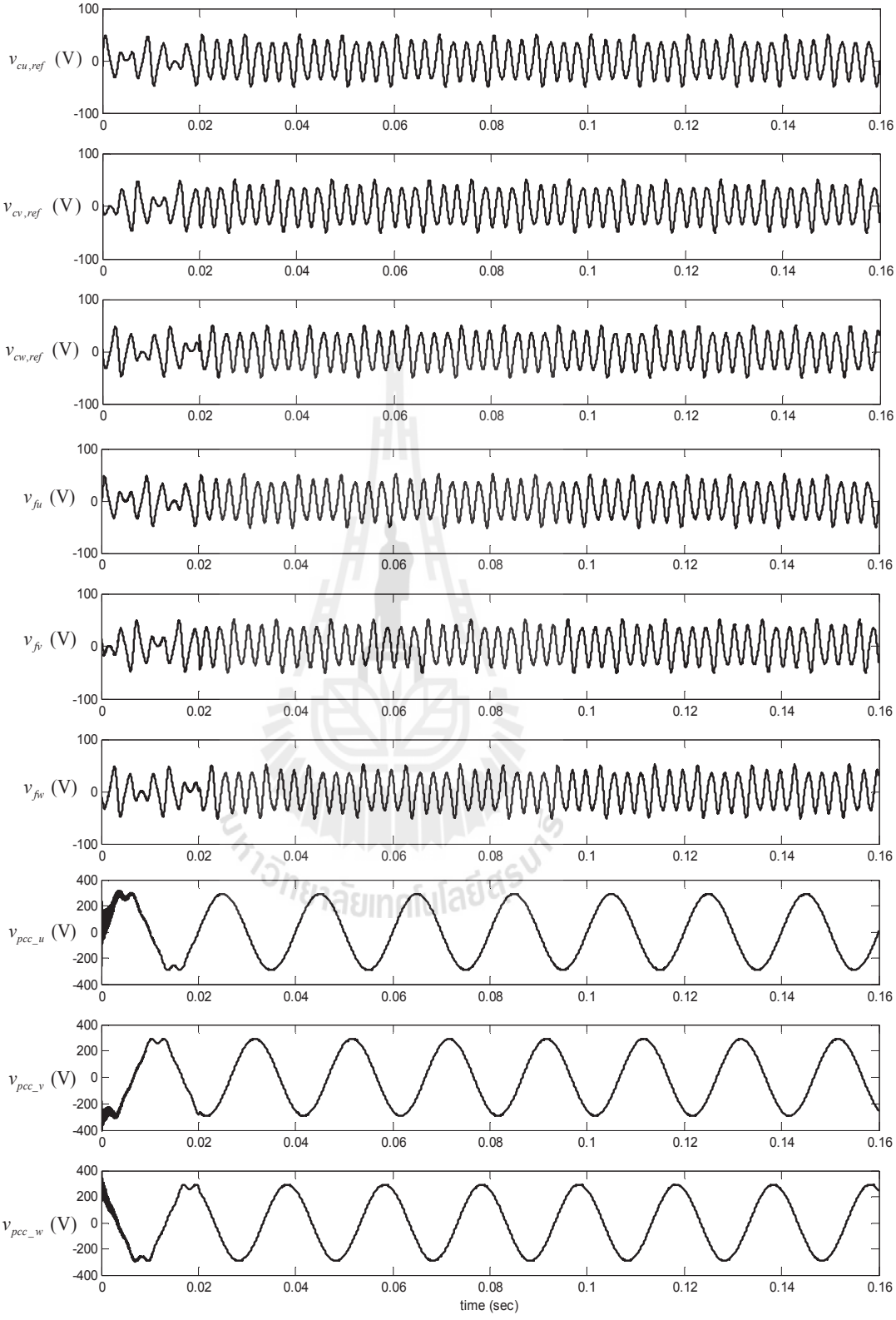
รูปที่ 8.20 แรงดันโหลดฮาร์มอนิกระบบที่ 4

ในรูปที่ 8.21 ถึงรูปที่ 8.24 เป็นรูปผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 1 ถึง ระบบที่ 4 ตามลำดับ โดยจะเริ่มพิจารณาที่รูปที่ 8.21 ถึงรูปที่ 8.23 ซึ่งรูปดังกล่าวได้แสดงการจำลองสถานการณ์ที่ช่วงเวลา 0 วินาที ถึง 1.6 วินาที โดยที่มีการคำนวณแรงดันอ้างอิงสามเฟสด้วยวิธี DQF และการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสามเฟสด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยและสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลที่ได้ คือ แรงดันหลังการชดเชยทั้งสามเฟสที่จุด PCC มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น อีกทั้ง $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชย กรณีระบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.23519% กรณีระบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.23009% และกรณีระบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.34452% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ในส่วนของรูปที่ 8.24 ซึ่งในรูปนี้ดำเนินการจำลองสถานการณ์ของระบบที่ 4 ที่เวลา 0 วินาที ถึง 1.6 วินาที ในรูปดังกล่าวจะมีการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงสามเฟสด้วยวิธี DQF จากการที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 8.3 ทำให้การควบคุมแรงดันชดเชยไม่สามารถเป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงได้ ผลที่ได้ คือ แรงดันที่จุด PCC มีลักษณะที่เกิดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกมากกว่าเดิม จนทำให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยของระบบที่ 4 มีค่าเท่ากับ 17.23874 % และเมื่อพิจารณาแรงดันโหลดฮาร์มอนิกของระบบต่าง ๆ จึงนำมาวาดกราฟสเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 2 ได้ดังรูปที่ 8.25 โดย

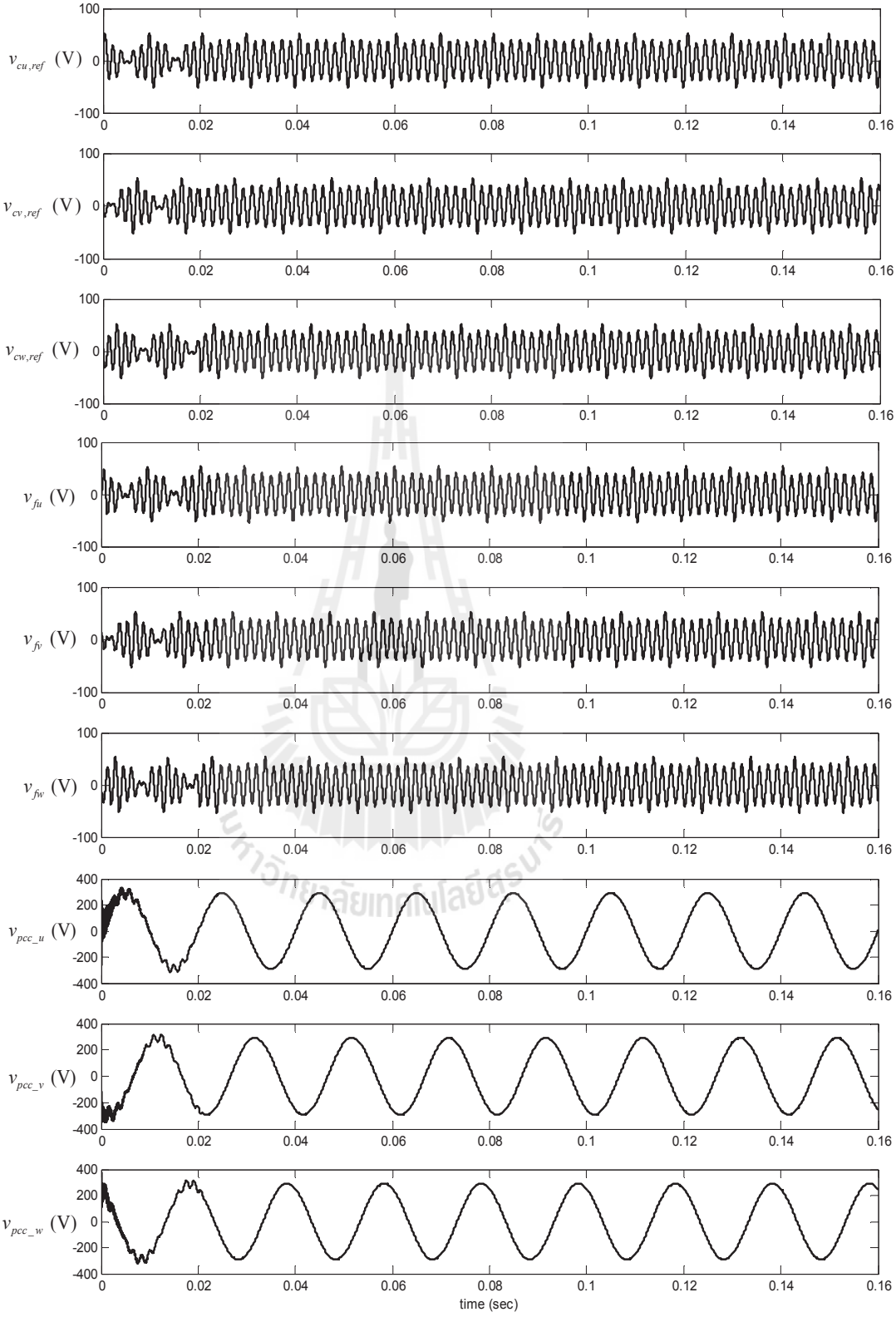
พิจารณาที่รูปดังกล่าวจะพบว่าระบบที่ 1 เป็นการเน้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ระบบที่ 2 เป็นการเน้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ระบบที่ 3 เน้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และระบบที่ 4 เป็นการเน้นที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 เมื่อพิจารณาที่ระบบที่ 1 สามารถนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละจะได้ว่า อันดับที่ 5 เท่ากับ 15.44402% ส่วนอันดับที่ 7 อันดับ 11 และอันดับที่ 13 แต่ละอันดับจะเท่ากับ 1.93050% ในส่วนของระบบที่ 2 เป็นการเน้นที่อันดับที่ 7 และเมื่อนำมาคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละจะได้ 15.44402% ส่วนอันดับอื่น ๆ แต่ละอันดับจะเท่ากับ 1.93050% ส่วนระบบที่ 3 เป็นการเน้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และเมื่อนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละจะได้ว่า อันดับที่ 11 เท่ากับ 15.44402% ส่วนอันดับอื่น ๆ แต่ละอันดับจะเท่ากับ 1.93050% และระบบที่ 4 เน้นที่อันดับที่ 13 และเมื่อนำมาคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละจะได้ 15.44402% ส่วนอันดับอื่น ๆ แต่ละอันดับจะเท่ากับ 1.93050% และเมื่อนำมาวาดกราฟสเปกตรัมในรูปของอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 2 จะได้ดังรูปที่ 8.26 และสุดท้ายเมื่อพิจารณาระบบที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 8.3 จะพบว่ามีฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ที่สูง และจะมีอันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 บ้างเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้ระบบที่ 1 และระบบที่ 2 จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 8.3 มาใช้ได้ ในส่วนของระบบที่ 3 เป็นเพราะอันดับฮาร์มอนิกมีอันดับที่ใกล้เคียงกับระบบในหัวข้อที่ 8.3 จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์มาใช้ได้ และที่ระบบที่ 4 มีอันดับฮาร์มอนิกที่แตกต่างจากระบบที่ออกแบบไว้จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะฉะนั้นการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสอันดับของฮาร์มอนิกจึงมีผลอย่างมากต่อผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ทั้งนี้การนำค่าพารามิเตอร์มาประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น ๆ ที่มีอันดับฮาร์มอนิกแตกต่างจากระบบที่ออกแบบไว้ จะสามารถใช้ได้กับเฉพาะบางระบบเท่านั้น และฮาร์มอนิกบางอันดับเท่านั้น ทางที่ดีควรมีการออกแบบใหม่เพื่อสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก



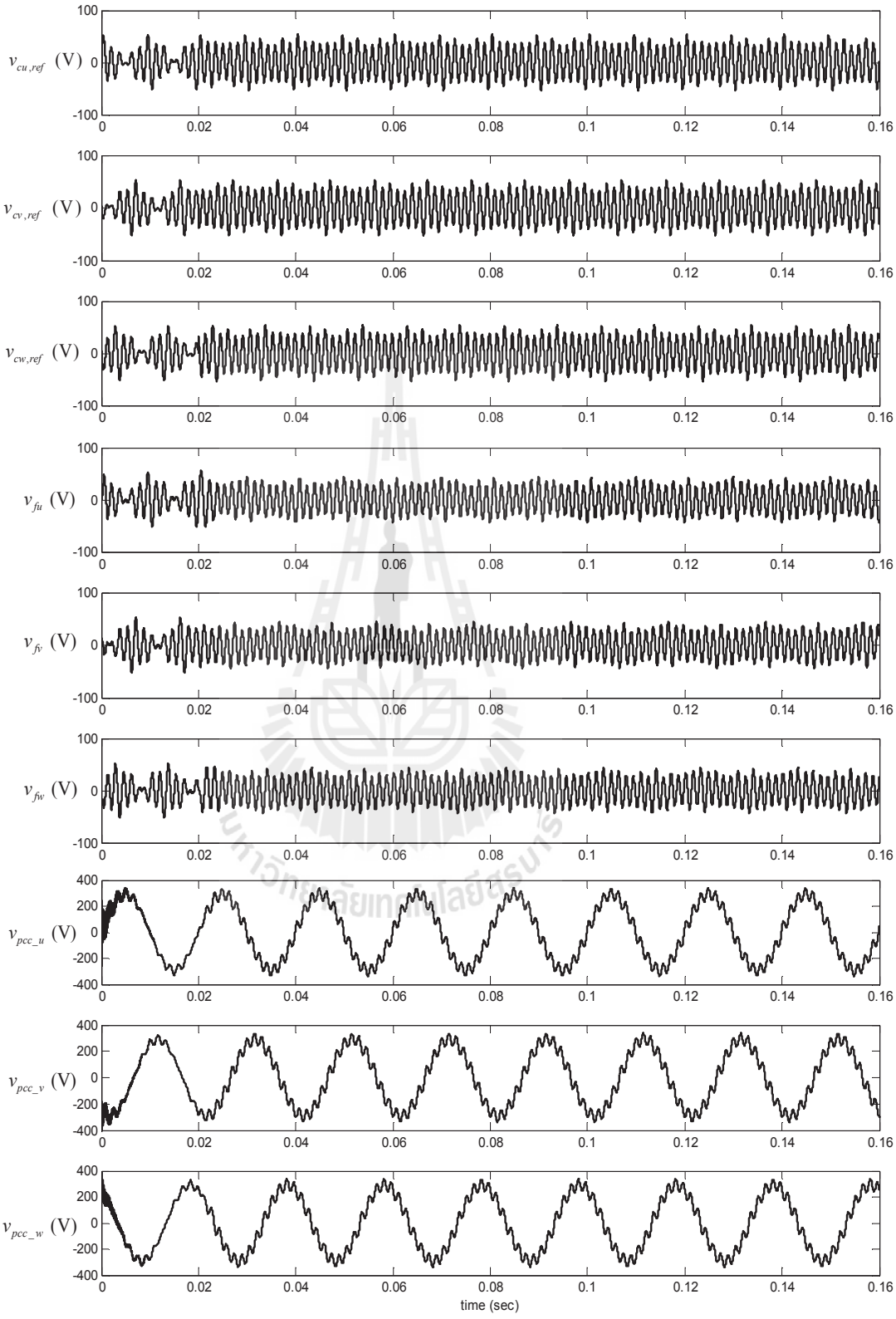
รูปที่ 8.21 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 1



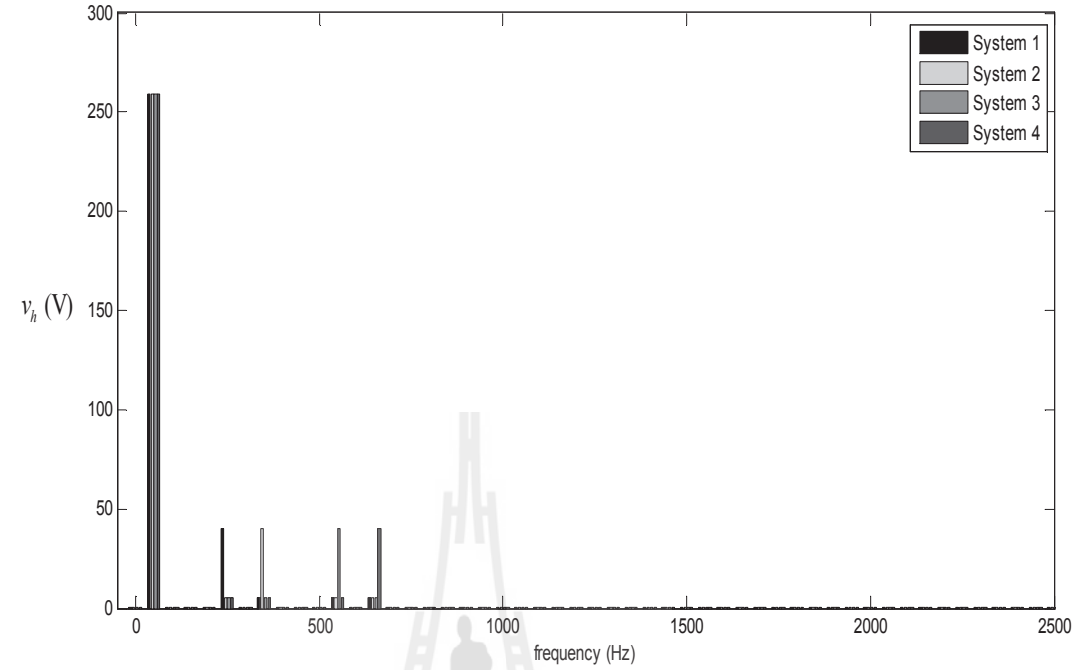
รูปที่ 8.22 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 2



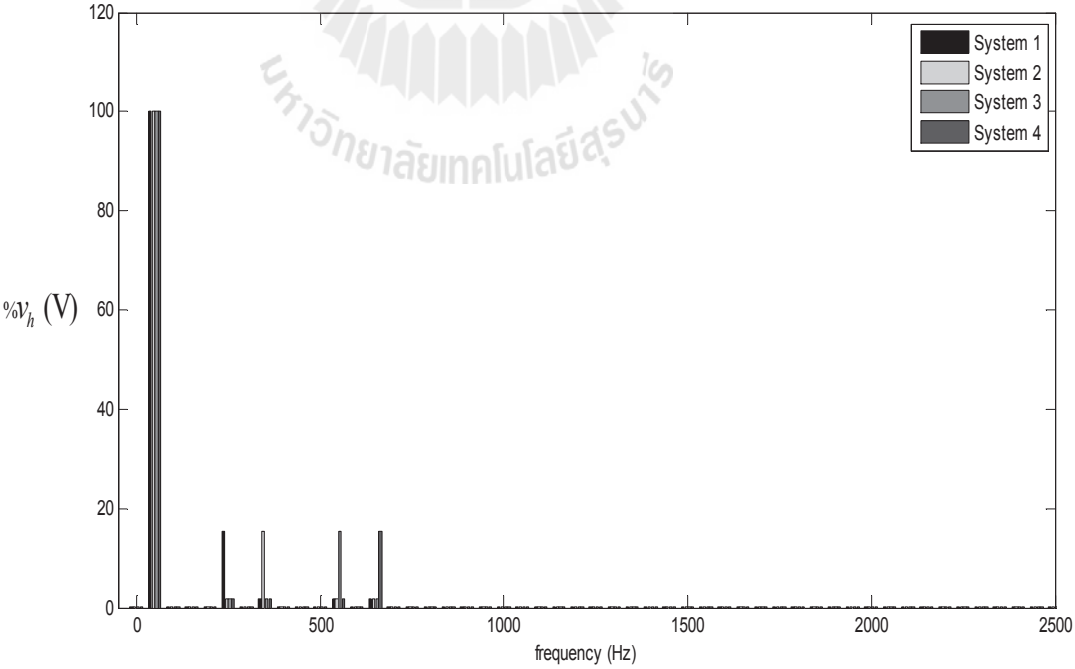
รูปที่ 8.23 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 3



รูปที่ 8.24 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ 4



รูปที่ 8.25 สเปกตรัมของแรงดันโหลดฮาร์มอนิแบบที่ 2



รูปที่ 8.26 สเปกตรัมในรูปของอัตราส่วนร้อยละของแรงดันโหลดฮาร์มอนิกแบบที่ 2

8.6 สรุป

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุมโดยที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใช้เท่าเดิม แต่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าหลักที่โหลดแรงดันฮาร์มอนิก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน และแบบที่ 2 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่าเดิมแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม อีกทั้งยังนำเสนอการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไป และการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ผลที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS แบบปกติทั่วไปให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการออกแบบ เมื่อทำการจำลองสถานการณ์กับแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่ใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบมีความคงทนที่สามารถควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอีกด้วย ถึงแม้จะเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดก็ตาม ในส่วนของการจำลองสถานการณ์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่ากันแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม โดยการจำลองสถานการณ์นี้จะเน้นไปที่อันดับต่าง ๆ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์จะพบว่าตัวควบคุมมีความคงทนเฉพาะบางอันดับของฮาร์มอนิกที่ทำการทดสอบ สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสอันดับของฮาร์มอนิกจึงมีผลอย่างมากต่อผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ทั้งนี้การนำค่าพารามิเตอร์ประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น ๆ ที่มีอันดับฮาร์มอนิกแตกต่างจากระบบที่ออกแบบไว้ จะสามารถใช้ได้กับเฉพาะบางระบบเท่านั้น และฮาร์มอนิกบางอันดับเท่านั้น ทางที่ดีควรมีการออกแบบใหม่เพื่อสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน

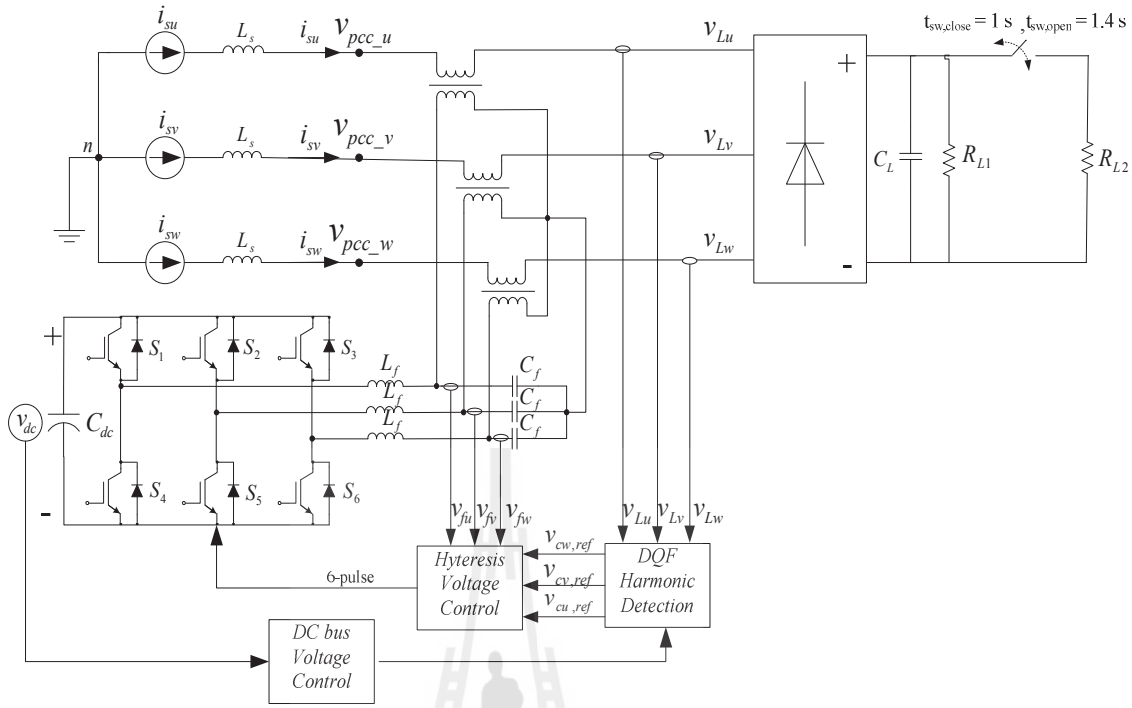
บทที่ 9
การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

9.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้จะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดังกล่าวได้พึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 นอกจากนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์รวมถึงการอภิปรายผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเช่นกัน

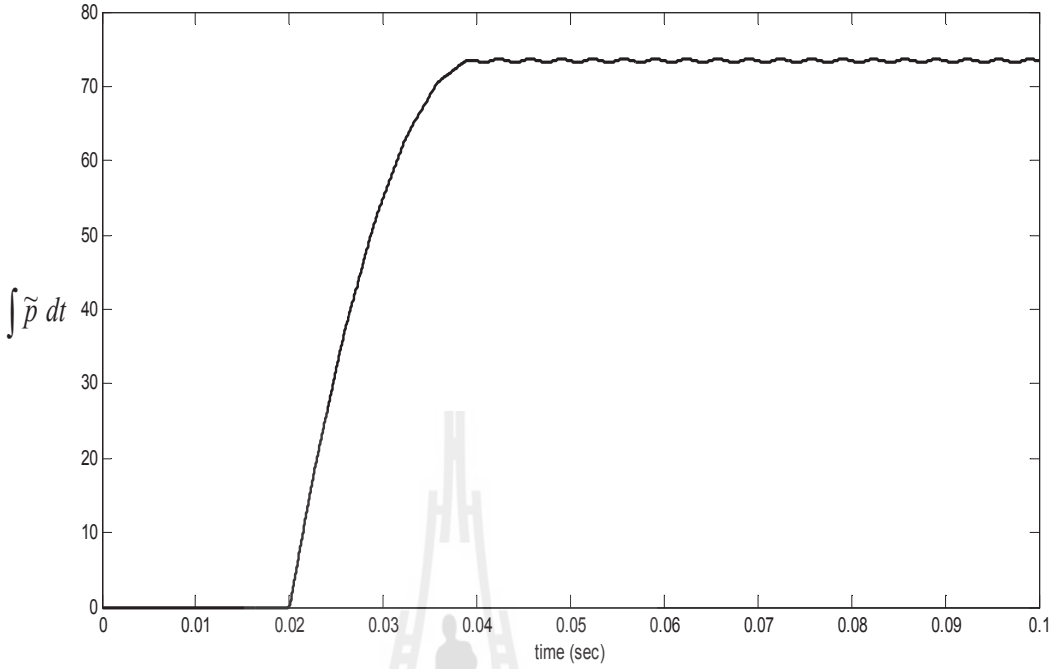
9.2 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะใช้ระบบเดียวกันกับการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสตามรูปที่ 6.1 ในบทที่ 6 ซึ่งในรูปที่ 6.1 จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ แต่ในรูปที่ 9.1 ใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามที่ได้ออกแบบไว้ ระบบในภาพรวมที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากรูปที่ 9.1 สังเกตได้ว่ามีบล็อก DC bus Voltage Control เพิ่มเข้ามาสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เพื่อคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 300 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวให้ผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกดีที่สุดโดยดูได้จากบทที่ 6 ส่วนการออกแบบค่า C_{dc} จะคำนึงถึงค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (9-1) จากสมการดังกล่าว ค่ากำลังงาน $\tilde{p}(t)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ($\frac{dE}{dt}$) ที่ตัวเก็บประจุเทียบกับเวลา เมื่อจัดเทอมสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในเทอมอินทิเกรต จะได้ดังสมการที่ (9-2) และจากสมการดังกล่าวการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดสำหรับใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ($C_{dc,\min}$) แสดงได้ดังสมการที่ (9-3) โดยที่ค่า $\int \tilde{p}(t)dt$ คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในสถาวะคงตัว ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

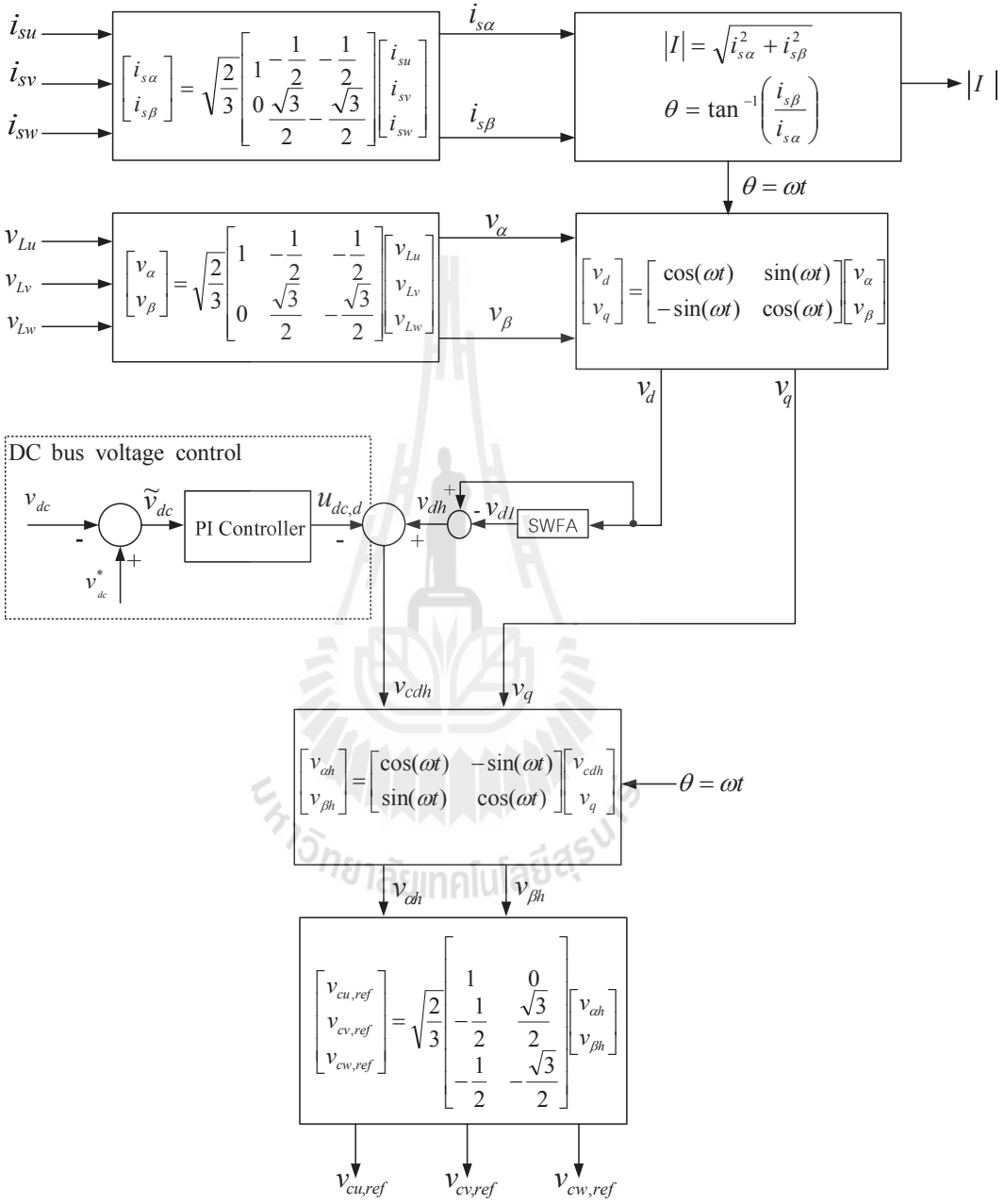
$$\tilde{p}(t) = v_{dc} i_{dc} = \frac{dE}{dt} \tag{9-1}$$

$$E = \int \tilde{p}(t)dt = \int (v_{dc} \cdot C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt})dt = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 \tag{9-2}$$

$$C_{dc,\min} = \frac{2 \cdot \int \tilde{p}(t)dt}{v_{dc}^2} = \frac{2(73.5)}{300^2} = 1633 \ \mu\text{F} \ (\text{เลือกใช้ค่า } C_{dc} = 1700 \ \mu\text{F}) \tag{9-3}$$

จากสมการที่ (9-3) กำหนดให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^*) เท่ากับ 300 โวลต์ ซึ่งได้จากการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 6 และค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 73.5 วัตต์ โดยค่ากำลังดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 9.2 ในสภาวะคงตัว เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (9-3) จะได้ค่าตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1633 μF ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ที่ 1700 μF และในส่วนของบล็อก PI controller จะแสดงการออกแบบและผลการควบคุมในหัวข้อที่ 9.3 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ไม่ได้พิจารณาการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง แต่ถ้ามี

การพิจารณาการควบคุมดังกล่าว แผนภาพการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้วิธี DQF จะได้ดังรูปที่ 9.3 ดังนี้



รูปที่ 9.3 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

จากรูปที่ 9.3 บล็อกการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (DC bus voltage control) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) เข้ามาแทรกอยู่ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี (v_{dh}) ของขั้นตอนการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในส่วนอินพุตของตัวควบคุมพีไอ คือ ผลต่างของค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^{*}) กับค่าแรงดันบัสไฟตรงค่าจริงที่ได้จากการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{dc}) ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ ($u_{dc,d}$) จะถูกนำไปหักลบกับปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี โดยผลต่างของปริมาณทั้งสอง คือ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก (v_{cdh}) โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

9.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวเก็บประจุให้คงที่ ณ จุดการทำงานที่เหมาะสมค่าหนึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมรรถนะในการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนแกนดีคิว จะอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยเริ่มต้นวิเคราะห์จากสมการอนุพันธ์ของแรงดันบัสไฟตรงดังสมการที่ (9-4) เมื่อดำเนินการจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ (9-5) และจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ($i_{dc} = C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt}$) แทนความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ (9-5) จะได้ดังสมการที่ (9-6) ซึ่งรายละเอียดที่มาของสมการได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{d_d}{C_{dc}} i_{fd} + \frac{d_q}{C_{dc}} i_{fq} \tag{9-4}$$

$$C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} = d_d i_{fd} + d_q i_{fq} \tag{9-5}$$

$$i_{dc} = d_d i_{fd} + d_q i_{fq} \tag{9-6}$$

โดยที่ $C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt}$ คือ พลานต์ของระบบที่พิจารณาให้มีการควบคุมแรงดัน

ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{dc})

i_{dc} คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C_{dc})

จากสมการที่ (9-6) ทำการแทนค่าฟังก์ชันสถานะการสวิตช์บนแกนดีคิว ตามที่ได้อธิบายไว้ในสมการที่ (5-31) ของบทที่ 5 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9-7) ค่า i_{fd} ในสมการดังกล่าว คือ สัญญาณเอาต์พุตสำหรับตัวควบคุมในส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจได้นิยามตัวแปร i_{fd} ขึ้นมาใหม่เป็น $u_{dc,d}$ ดังนั้นสามารถเขียนแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง i_{dc} และ $u_{dc,d}$ ดังสมการที่ (9-8)

$$i_{dc} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} . \frac{M}{2} . \frac{3}{2} \right) i_{fd} \tag{9-7}$$

$$\frac{i_{dc}}{u_{dc,d}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \tag{9-8}$$

จาก $i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}$ นำมาพิจารณาการแปลงลาปลาซเป็นเทอมพลานต์ของระบบ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (9-9) และจากสมการที่ (9-8) ใช้การแปลงลาปลาซจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (9-10)

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{1}{C_{dc} s} \tag{9-9}$$

$$\frac{I_{dc}}{U_{dc,d}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \tag{9-10}$$

จากสมการที่ (9-9) และ (9-10) บล็อกไดอะแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 9.4 เมื่อพิจารณาตัวควบคุมพีไอทางโดเมนเวลา จะได้ดังสมการที่ (9-11) จากนั้นทำการแปลงลาปลาซจะได้ดังสมการที่ (9-12) และสามารถจัดเทอมให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (9-13)

$$u_{dc,d} = K_{PV} \tilde{v}_{dc} + K_{IV} \int \tilde{v}_{dc} dt \tag{9-11}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

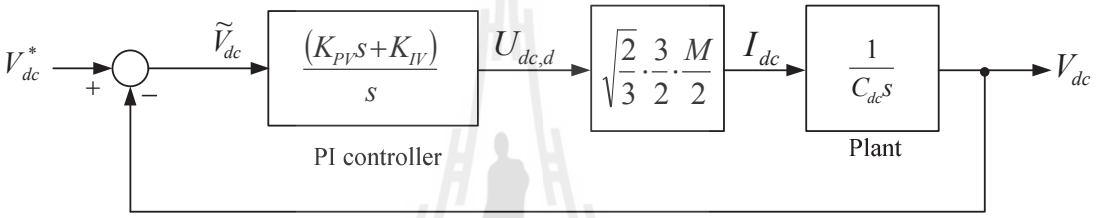
โดยที่ $\tilde{v}_{dc} = v^*_{dc} - v_{dc}$

v^*_{dc} คือ แรงดันอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ

v_{dc} คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$$U_{dc,d} = K_{PV}\tilde{V}_{dc} + \frac{K_{IV}\tilde{V}_{dc}}{s} \tag{9-12}$$

$$\frac{U_{dc,d}}{\tilde{V}_{dc}} = \frac{(K_{PV}s + K_{IV})}{s} \tag{9-13}$$



รูปที่ 9.4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 9.4 เมื่อดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด จะได้ดังสมการที่ (9-14) และสมการที่ (9-15)

$$\frac{V_{dc}}{V^*_{dc}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{M}{2}\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{C_{dc}s^2}\right)}{1+\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{M}{2}\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{C_{dc}s^2}\right)} \tag{9-14}$$

$$\frac{V_{dc}}{V^*_{dc}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{M}{2}\cdot\frac{1}{C_{dc}}\cdot\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s^2 + (\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{M}{2}\cdot\frac{K_{PV}}{C_{dc}})s + \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{M}{2}\cdot\frac{K_{IV}}{C_{dc}}}\right) \tag{9-15}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และค่า K_{IV} ของตัวควบคุมพีไอ จะใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของสมการที่ (9-15) กับ

พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (9-16) โดยกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_{nv}) เท่ากับ 10π rad/sec ค่าอัตราส่วนการเข้าสู่สถานะคงตัว (ζ) เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ และค่าดัชนีมอดูเลต (modulation index) เท่ากับ 0.25 ณ จุดการทำงานของแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นนี้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (9-17) และสมการที่ (9-18) ตามลำดับ

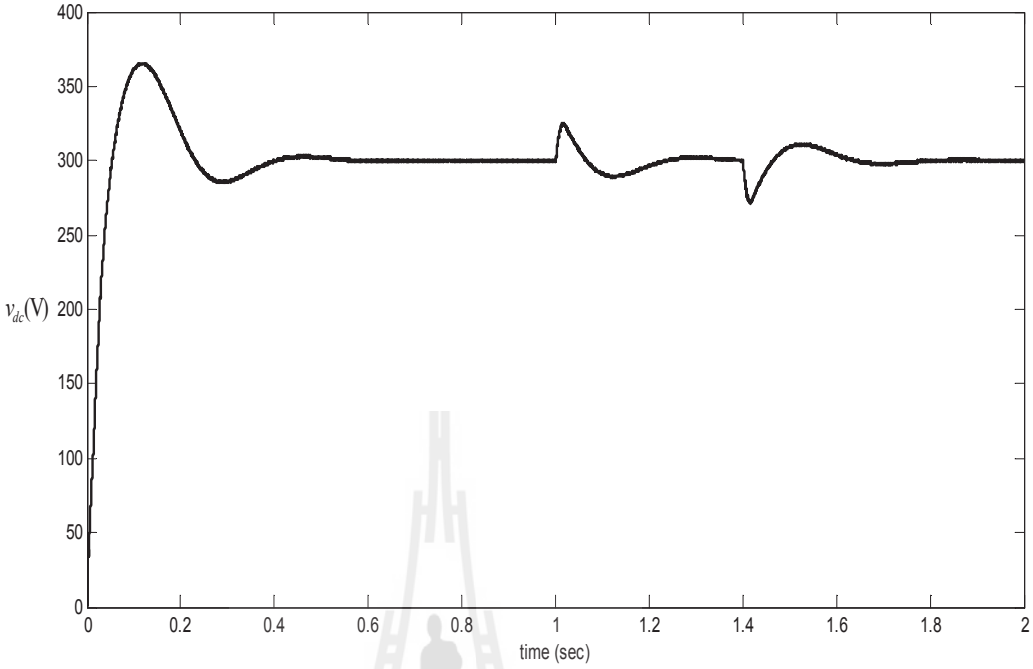
$$G(s) = \frac{\omega_{nv}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{nv}s + \omega_{nv}^2} \tag{9-16}$$

$$K_{PV} = \frac{8\sqrt{3}\zeta\omega_{nv}C_{dc}}{3\sqrt{2}M} = \frac{8\sqrt{3}\times\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\times 10\pi\times 1700\times 10^{-6}}{3\sqrt{2}\times 0.25} = 0.49 \tag{9-17}$$

$$K_{IV} = \frac{4\sqrt{3}C_{dc}\omega_{nv}^2}{3\sqrt{2}M} = \frac{4\sqrt{3}\times\left(1700\times 10^{-6}\right)\times(10\pi)^2}{3\sqrt{2}\times 0.25} = 10.96 \tag{9-18}$$

9.4 การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล

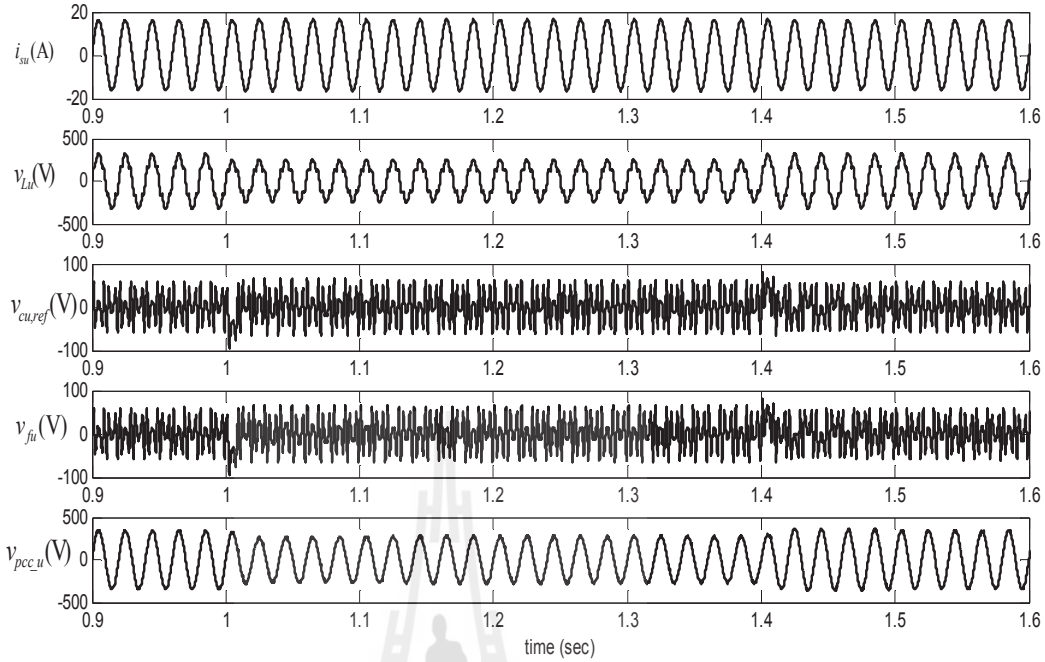
การจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบดังที่นำเสนอไว้ข้างต้น ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ใช้ระบบดังแสดงในรูปที่ 9.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) มีค่าเท่ากับ 2 mH ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) มีค่าเท่ากับ 100 μF ค่าแรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ และค่าแถบฮีสเตอรีซีส (HB) มีค่าเท่ากับ 0.1 โวลต์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดีที่สุดโดยดูได้จากบทที่ 6 การจำลองสถานการณ์ในบทนี้พารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมา คือ ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีค่าเท่ากับ 1700 μF ซึ่งได้จากการออกแบบจากผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟดังสมการที่ (9-3) ในการออกแบบกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^*) มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ ค่า K_{PV} มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งได้จากการออกแบบในสมการที่ (9-17) และค่า K_{IV} มีค่าเท่ากับ 10.96 ซึ่งได้จากการออกแบบในสมการที่ (9-18) นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญสำหรับการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก คือ การคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งในบทนี้ใช้วิธีการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี DQF สามารถพิจารณาได้ดังแผนภาพการคำนวณดังรูปที่ 9.3



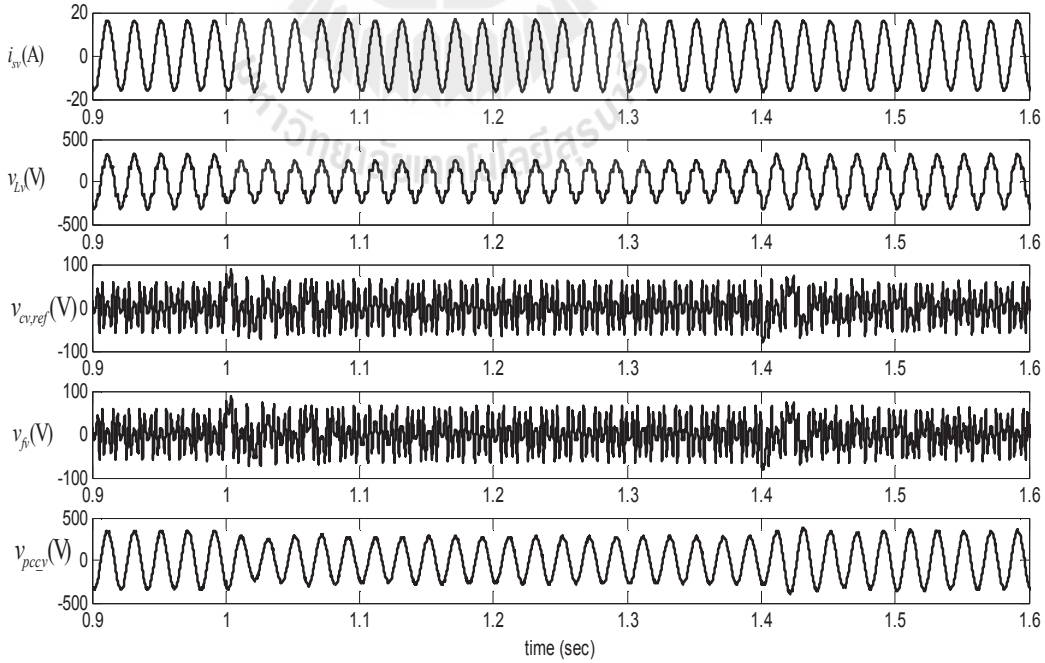
รูปที่ 9.5 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง

การจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0 ถึง 2 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานของวงจรเรียงกระแส โดยที่โหลดตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ 1 μF เท่าเดิมตลอดการจำลองสถานการณ์ ในช่วงเวลา 0 ถึง 1 วินาที โหลดตัวต้านทาน (R_{L1}) จะเท่ากับ 0.1 MΩ และที่เวลา 1 วินาที ถึง 1.4 วินาที จะขนานโหลดตัวต้านทาน (R_{L2}) เท่ากับ 100 Ω กับโหลดตัวต้านทานก่อนหน้านี้ และที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 1.4 วินาที เป็นต้นไปจะกลับมาใช้โหลดตัวต้านทาน 1 MΩ เช่นเดิม

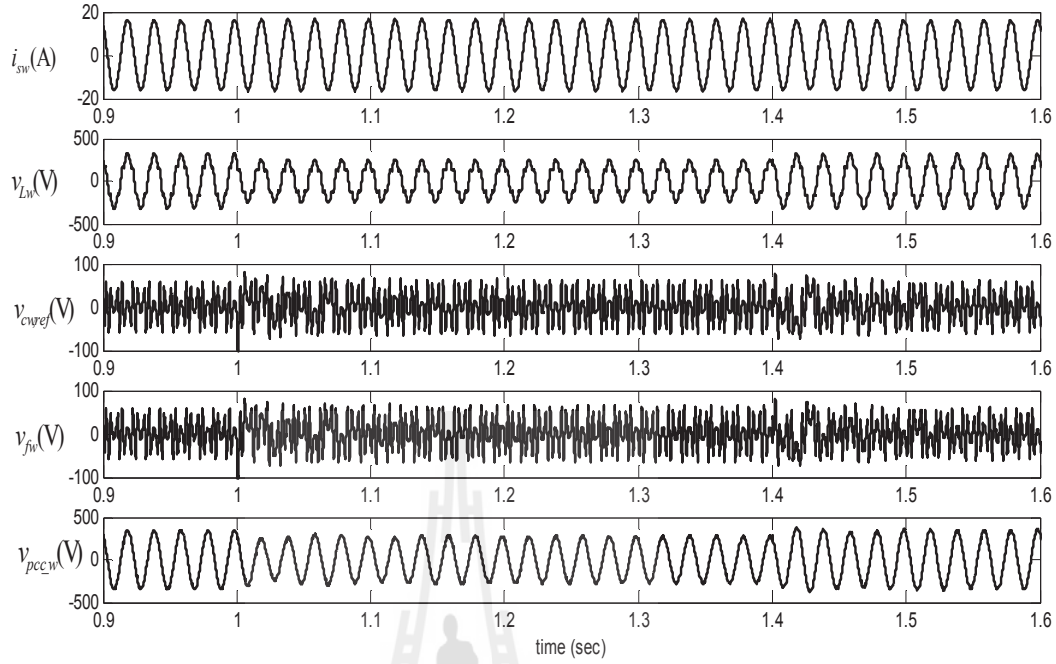
ผลการจำลองสถานการณ์ของค่าแรงดันบัสไฟตรง สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 9.5 และจากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ในช่วงก่อนมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ เท่ากับ 300 โวลต์ โดยใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.5 วินาที ภายหลังช่วงเวลาตั้งแต่ 1 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน แรงดันบัสไฟตรงมีการสั่นไกวในช่วงเวลา 1 วินาที ถึง 1.3 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวมีการปรับเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงประมาณ 325 โวลต์ ถึง 290 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 0.3 วินาที สำหรับปรับตัวเข้าสู่ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ 300 โวลต์ เช่นเดิม ต่อมาเวลาตั้งแต่ 1.4 วินาที มีการปรับค่าของโหลดตัวต้านทานอีกครั้ง ทำให้ค่าแรงดันบัสไฟตรง มีการสั่นไกวจนกระทั่งกลับมาคงที่ เท่ากับ 300 โวลต์ ดังเดิม



รูปที่ 9.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส *u*



รูปที่ 9.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส *v*



รูปที่ 9.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส w

จากรูปที่ 9.6 ถึงรูปที่ 9.8 เป็นผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u,v,w ตามลำดับ โดยจะแสดงผลการจำลองสถานการณ์ที่ช่วงเวลา 0.9 วินาที ถึง 1.6 วินาที จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าในช่วงก่อนเวลา 1 วินาที โหลดของวงจรเรียงกระแสจะใช้โหลดตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1 μF ขนานกับโหลดตัวต้านทาน เท่ากับ 0.1 MΩ สัญญาณของแรงดันที่โหลดทั้งสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) มีค่ายอดแรงดันในแต่ละเฟสประมาณ 311 โวลต์ และที่เวลา 1 วินาที ถึง 1.4 วินาที มีการขนานโหลดตัวต้านทานขนาด 100 Ω เพิ่มเข้าไปจะพบว่าแรงดันที่โหลดในแต่ละเฟสมีค่ายอดแรงดันประมาณ 250 โวลต์ และที่เวลา 1.4 วินาที เป็นต้นไปได้ใช้โหลดเช่นเดิมก่อนหน้านี้ และในการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันที่โหลดมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 12.83% ในสภาวะก่อนชดเชย โดยภายหลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่มีการคำนวณแรงดันอ้างอิงสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ด้วยวิธี DQF ตามแผนภาพที่ 9.3 และการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยและสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ผลที่ได้ คือ แรงดันหลังการชดเชยทั้งสามเฟสที่จุด PCC ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น อีกทั้ง $\%THD_{v,av}$ ยังลดลงเหลือเพียง 0.31% ทั้งนี้รายละเอียดค่า $\%THD_v$ ในกรณีก่อนการชดเชยและหลังการชดเชย แสดงดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยเมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

$\%THD_v$	เฟส			$\%THD_{v,av}$
	u	*v*	*w*	
ก่อนการชดเชย	12.83	12.83	12.84	12.83
หลังการชดเชย	0.31	0.31	0.30	0.31

9.5 สรุป

ผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุ จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรดังกล่าวให้มีค่าคงที่ตามที่ออกแบบไว้ตลอดการทำงาน ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ชัดเจนว่า สมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้สามารถคงค่าแรงดันตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิผล และวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมยังสามารถฉีดแรงดันชดเชยได้ตามลักษณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันหลังการชดเชยที่จุด PCC มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น จึงทำให้ $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันมีค่าลดลง และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 10
สรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยงานวิจัยได้เริ่มต้นจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้า พบว่า องค์ประกอบการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสามารถแบ่งออกได้ 4 ส่วน ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการกำจัดฮาร์มอนิก คือ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก โดยรายละเอียด ความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก และข้อกำหนดมาตรฐานของฮาร์มอนิก รายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิง จึงส่งผลโดยตรงต่อระบบควบคุมแรงดันชดเชย หากการคำนวณแรงดันอ้างอิงเกิดข้อผิดพลาดหรือไม่ถูกต้อง สมรรถนะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกก็จะไม่ดีด้วยเช่นกัน ในบทที่ 4 จึงนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ และนำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกันทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (วิธี SRF) วิธีดีคิวเอฟ (วิธี DQF) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (วิธี PQ) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธี (PQF) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD) และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (วิธี SDF) และได้จำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยการตรวจจับวิธีต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกพบว่า การที่นำ SWFA มาแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีข้อดี คือ ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ไม่ต้องเลือกความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำหรือวงจรกรองผ่านสูงตามวิธีแบบดั้งเดิม

ในอดีต อีกทั้งการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวในการใช้วิธี SWFA ให้ผลการลู่เข้าที่เร็ว ผลการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ผลลัพธ์ที่ดีและผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดี ข้อด้อย คือ เสียเวลาในการจัดเก็บข้อมูลในคาบแรก ในส่วนของการนำวงจรกรองผ่านสูงมาใช้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการใช้งาน ข้อด้อย คือ ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ต้องเลือกความถี่ตัดให้เหมาะสม มีช่วงเวลาประวิงจึงทำให้ลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวช้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิค SWFA มาใช้ในส่วนของการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้งานในอนาคต ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธี DQF สำหรับคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ใช้กฎของแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองบนปริมาณแกนสามเฟส รวมถึงการแปลงแบบจำลองดังกล่าวไปอยู่บนแกนดีคิว ด้วยหลักการแปลงของปาร์ค ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากจะนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้งานด้านการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง รวมถึงศึกษาด้านพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยมีความสำคัญมากสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะกับการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยเป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมีความซับซ้อนและยังไม่ปรากฏการออกแบบมาในอดีต ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการพึ่งพาการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลจากการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง สำหรับผลการจำลองสถานการณ์จากการออกแบบโดยการดูพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะให้ค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกออกมาที่ดีและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิผลมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก โดยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการออกแบบ คือ วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิผลวิธีหนึ่ง และผลการ

ค้นหาด้วยวิธีนี้ จะส่งผลให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดอีกทั้งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 สำหรับการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ให้ผลการลู่เข้าของ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยที่ค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติ อีกทั้งยังให้ผลลัพธ์ที่ดีอีกด้วย ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีส พบว่าการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น จะให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกมีค่า $\%THD_{v,av}$ ที่ดีกว่าการค้นหาด้วยวิธี ATS แบบปกติทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่พิจารณา เมื่อทำการทดสอบสมรรถนะการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยพบว่า ตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสที่ออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงได้เป็นอย่างดี ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุม โดยที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมใช้เท่าเดิม แต่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าหลักที่โหลดแรงดันฮาร์มอนิก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน และแบบที่ 2 แรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่าเดิมแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม ทั้งนี้เพื่อทดสอบความคงทนของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 8 โดยในบทดังกล่าวได้นำเสนอ การออกแบบด้วยวิธี ATS แบบปกติ และการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ผลที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธี ATS แบบปกติให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธี ATS แบบกำหนดค่าเริ่มต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการออกแบบ เมื่อทำการจำลองสถานการณ์กับแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่ใกล้เคียงกันโดยจะเปลี่ยนเฉพาะค่าแอมพลิจูดของแรงดัน จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบมีความคงทนที่สามารถควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอีกด้วย ถึงแม้จะเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดก็ตาม ในส่วนของการจำลองสถานการณ์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าตัวประกอบความเพี้ยนที่เท่ากันแต่มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิม โดยการจำลองสถานการณ์นี้จะเน้นไปที่อันดับต่าง ๆ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์จะพบว่าตัวควบคุมมีความคงทนเฉพาะบางอันดับของฮาร์มอนิกที่ทำการทดสอบ สำหรับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสอันดับของฮาร์มอนิกจึงมีผลอย่างมากต่อผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ทั้งนี้การนำค่าพารามิเตอร์ประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น ๆ ที่มีอันดับฮาร์มอนิกแตกต่างจากระบบที่ออกแบบไว้ จะสามารถใช้ได้กับเฉพาะบางระบบเท่านั้น และฮาร์มอนิกบางอันดับเท่านั้น

การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ตลอดการทำงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงดันบัสไฟตรงมีผลต่อสมรรถนะการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยนี้วิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าตัวควบคุมพีไอมีความสามารถควบคุมค่าแรงดันให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ อีกทั้งยังสามารถกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกได้เช่นกัน ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 9

10.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีงานภาคปฏิบัติสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน รวมถึงระบบควบคุมต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เพื่อยืนยันผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณา

2. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแบบวงปิด เพื่อประโยชน์สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ รวมถึงสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรดังกล่าว

3. ควรมีการศึกษาค้นคว้า เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ประเภทหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดทั้งกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิก

4. ควรพิจารณาแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแทนแหล่งจ่ายกระแส เพื่อให้สมจริงกับในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

กองพล อารีรักษ์. (2549). **การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552).1. **ปัญญาเชิงคำนวณ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Abdelkhalek, O., and Benachaiba, C. (2009). Sensitivity Assessment of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods of Current Harmonics Under Non-Sinnusoidal Condition for Shunt Active Power Filter. **Journal of Electrical &Electronics Engineering.** 9(1): 801-807.

Antchev, M.H., Petkova, M.P., and Gurgulicov, V.T. (2007). Sliding mode control of a single-phase series active power filter, **IEEE Conference Computer as Tool**, 1344-1349.

Arrillaga, J., and Watson, N. R. (2003). **Power System Harmonics.** England: John Wiley & Sons,Ltd.

Asiminoaei, L., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2005). Evaluation of Hamnonic Detection Methods for Active Power Filter Applications, **IEEE Conference Publications**, 1: 635-641.

Bose, B.K. (1990). An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System, **IEEE Transaction on Indrustrial Electronics**, 31(5): 402-408.

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.

Chang, G. W., and Chen, W. C. (2006). A New Reference Compensation Voltage Strategy for Series Active Power Filter Control, **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, 21(3): 1754-1756.

Chang, G. W., Chen, S. K., Chin, Y. C., and Chen, W. C. (2006). An *a-b-c* Reference Frame-Based Compensation Strategy for Series Active Power Filter Control, **IEEE Conference Industrial Eletronics and Applications**, 1-4.

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.

El-Habrouk, M., Darwish, M.K., and Mehta, P. (2000). Active power filter: A review, **IET Journals & Magazines**, 147(5): 403-413.

Fuchs**,** E.F. (1987). Sensitivity of Electrical appliances to Harmonics and Fractional Harmonic of the *p*ower system's voltage. Part II: Television sets, Induction Watthour Meters and Universal Machines, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2(2): 437-443.

Furuhashi, T., Okuma, S., and Uchikawa, Y. (1990). A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power, **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, 37(1): 86-90.

George, J. W. (2001). **Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design.** New York: Springer.

Grady, W.M., Samotyj, M.J., and Noyola, A.H. (1990). Survey of Active Power Line Conditiong Methodologies, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 5(3): 1536-1542.

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.**

Jou, H-L., Wu, J-C. and Wu, K-D. (2001). Parallel Operation of Passive Power Filter and Hybrid Power Filter for Harmonic Suppression. **IET journals on Generation, Transmission and Distribution.** 148: 8-14.

Kanaan, H.Y., and Al-Haddad, K. (2004). A Linear Decoupling Multiple-Loops Control Scheme Applied to a Three-Phase Series Active Power Filter for Voltage Harmonic Cancellation and Reactive Power Compensation, **IEEE Conference on Harmonics and Quality of Power**,11: 299-304.

Kanan, H.Y., Assi, A.A., Sleiman, J.B., Aoun, M., Asmar, C. and Al-Haddad, K. (2003). Design of a New Multiple-Loops Linear Controller for a Three-Phase Series Active Voltage Harmonic Compensator, **IEEE International Conference on Industrial Technology**, 1: 575-580.

Khoor, M.S., Machmoum, M., and Le Doeuff, R. (2004). A New Analogical Method of Voltage Perturbation Extraction for Series Active Power Filters, **IEEE Conference Power Electronics Specialists**, 6: 4273-4277.

Kim, Y.S., Kim, J.S., and Ko, S.H. (2004). Three-phase three-wire series active power filter which compensates for harmonics and reactive power, **IEE Proc.-Eletr. Power Appl**., 151(3): 276-282.

Lai, H., Liang, J., and Wu, W. (2007). Research of Harmonic Detection and Fuzzy-PID Control in Series Active Power Filter, **IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**, 2957 – 2962.

Libano, F.B., Braga, R.A.M., Willmann, G., and Muller, S.L. (2002). Application of Neural Networks for the Control Strategy for Series Active Power Filters, **IEEE Conference Harmonics and Quality of Power**, 2: 519-523.

Liccardo, F., Marino, P., Schiano C., and Visciano, N. (2003). Three-phase Robust Series Compensator for Voltage Disturbances, **IEEE Bology PowerTech Conference**

Mekri, F., Machmoun, M., Ait-Ahmed, N., and Mazari, B. (2010). A comparative study of voltage controllers for series active power filter, **ELSVIER Electric Power Systems Research**, 615-626.

Mekri, F., Machmoum, M., Mazari, B., and Ait Ahmed, N. (2007). Determination of Voltage References for Series Active Power Filter Based on a Robust PLL System, **IEEE Conference Industrial Electronics**, 473-478.

Na, H., Jian, W. and Dianguo, X. (2006). A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics.** 2: 1155–1160.

Peng, F. Z., Akagi, H., and Nabae, A. (1988). A New Approach to Compensation in Power Systems. **IEEE meeting**. 1: 874-880.

Qun, W., Weizheng, Y., Jinjun, L., and Zhaoan, W. (1999). A Control Approach for Detecting Source Current and Series Active Power Filter, **IEEE Internationnal Conference on Power Electronics and Drive Systems**, 2: 910-914.

Rahmani, S., Al-Haddad, K., and Fnaiech, F. (2002). A Series Hybrid Power Filter To Compensate Harmonic Currents and Voltages, **IEEE Conference Publications**, 1: 644-649.

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.

Singh, B., Al-Haddad, K., and Chandra, A. (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, **IEEE Transaction on Industrial Eletronics**, 46(5): 960-971.

Soares, V., Verdelho P. and Marques, G. (1997). Active Power Filter Control Circuit Based on the Instantaneous Active and Reactive Current id-iq Method. **IEEE Conference on Power Electronics Specialists 1997 (PESC '97).** 2: 1096-1101.

Srianthumrong, S. (2003). **Study of Series Active and Shunt Hybrid Filters for Harmonic Compensation of Large-Capacity Three-Phase Diode Rectifiers.** Ph.D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology, Japan.

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.

Tey, L.H., and So, P.L. (2001). System Harmonics Compensation using PWM Voltage Source Inverter-Based Active Filters, **IEEE Porto Power Tech Conference.**

Wagner, V. E. (1993). Effects of Harmonics on Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(2): 672-680.

Wang, Z., Wang, Q., Yao, W., and Liu, J. (2001). A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 16(3): 301-310.

Young-Seok, K., Jin-Sun, K., and Soo-Hyun, K. (2003). A Study on the Control Method of Series Active Power Filter for Compensation of Harmonics and Reactive Power, **IEEE Conference Publications**, 1:457-460.

Yusof, Y., and Rahim, N.A. (2009). Series Hybrid Power Filter Based on SVPWM-VSI to Compensate for Source Current Harmonics and Voltage Unbalance, **IEEE Conference Publications,** 1-6.

Zawawi, A. E., Youssef, K.H. and Sebakhy, O. A. (2007). Recursive Least Squares Harmonic Identification in Active Power Filter**s. European Control Conference 2007,(ECC'07).**

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาค่า v_d และ v_q

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณหาค่า v_d และ v_q

การพิจารณาหาค่าแรงดันบนแกนดี (v_d) และแรงดันบนแกนคิว (v_q) จะเริ่มต้นจากการใช้อนุกรมฟูริเยร์ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการแยกเป็นการใช้อนุกรมฟูริเยร์สำหรับแรงดันเฟส u เฟส v และเฟส w ได้ดังสมการที่ (ก-1) ถึงสมการที่ (ก-3) ตามลำดับ

$$v_{Lu} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnu} \cos(n\omega t) \tag{ก-1}$$

$$v_{Lv} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnv} \cos(n\omega t - \frac{n2\pi}{3}) \tag{ก-2}$$

$$v_{Lw} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnw} \cos(n\omega t + \frac{n2\pi}{3}) \tag{ก-3}$$

โดยที่ V_{mnu} , V_{mnv} , V_{mnw} คือ แรงดันที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ

n คือ อันดับของฮาร์มอนิก

เมื่อพิจารณาอนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันทั้งสามเฟสที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงสามารถสรุปค่าแรงดันทั้งสามเฟสที่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ

อันดับของฮาร์มอนิก	ปริมาณแรงดัน
อันดับที่ 1	$v_{1u} = V_{m1u} \cos(\omega t)$ $v_{1v} = V_{m1v} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{1w} = V_{m1w} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 2	$v_{2u} = V_{m2u} \cos(2\omega t)$ $v_{2v} = V_{m2v} \cos(2\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V_{m2v} \cos(2\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{2w} = V_{m2w} \cos(2\omega t + \frac{4\pi}{3}) = V_{m2w} \cos(2\omega t - \frac{2\pi}{3})$

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

อันดับที่ 3	$v_{3u} = V_{m3u}\cos(3\omega t)$ $v_{3v} = V_{m3v}\cos(3\omega t - \frac{6\pi}{3}) = V_{m3v}\cos(3\omega t)$ $v_{3w} = V_{m3w}\cos(3\omega t + \frac{6\pi}{3}) = V_{m3w}\cos(3\omega t)$
อันดับที่ 4	$v_{4u} = V_{m4u}\cos(4\omega t)$ $v_{4v} = V_{m4v}\cos(4\omega t - \frac{8\pi}{3}) = V_{m4v}\cos(4\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{4w} = V_{m4w}\cos(4\omega t + \frac{8\pi}{3}) = V_{m4w}\cos(4\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 5	$v_{5u} = V_{m5u}\cos(5\omega t)$ $v_{5v} = V_{m5v}\cos(5\omega t - \frac{10\pi}{3}) = V_{m5v}\cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{5w} = V_{m5w}\cos(5\omega t + \frac{10\pi}{3}) = V_{m5w}\cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 6	$v_{6u} = V_{m6u}\cos(6\omega t)$ $v_{6v} = V_{m6v}\cos(6\omega t - \frac{12\pi}{3}) = V_{m6v}\cos(6\omega t)$ $v_{6w} = V_{m6w}\cos(6\omega t + \frac{12\pi}{3}) = V_{m6w}\cos(6\omega t)$
อันดับที่ 7	$v_{7u} = V_{m7u}\cos(7\omega t)$ $v_{7v} = V_{m7v}\cos(7\omega t - \frac{14\pi}{3}) = V_{m7v}\cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{7w} = V_{m7w}\cos(7\omega t + \frac{14\pi}{3}) = V_{m7w}\cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 8	$v_{8u} = V_{m8u}\cos(8\omega t)$ $v_{8v} = V_{m8v}\cos(8\omega t - \frac{16\pi}{3}) = V_{m8v}\cos(8\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{8w} = V_{m8w}\cos(8\omega t + \frac{16\pi}{3}) = V_{m8w}\cos(8\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 9	$v_{9u} = V_{m9u}\cos(9\omega t)$ $v_{9v} = V_{m9v}\cos(9\omega t - \frac{18\pi}{3}) = V_{m9v}\cos(9\omega t)$ $v_{9w} = V_{m9w}\cos(9\omega t + \frac{18\pi}{3}) = V_{m9w}\cos(9\omega t)$

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

อันดับที่ 10	$v_{10u} = V_{m10u}\cos(10\omega t)$ $v_{10v} = V_{m10v}\cos(10\omega t - \frac{20\pi}{3}) = V_{m10v}\cos(10\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{10w} = V_{m10w}\cos(10\omega t + \frac{20\pi}{3}) = V_{m10w}\cos(10\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 11	$v_{11u} = V_{m11u}\cos(11\omega t)$ $v_{11v} = V_{m11v}\cos(11\omega t - \frac{22\pi}{3}) = V_{m11v}\cos(11\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{11w} = V_{m11w}\cos(11\omega t + \frac{22\pi}{3}) = V_{m11w}\cos(11\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 12	$v_{12u} = V_{m12u}\cos(12\omega t)$ $v_{12v} = V_{m12v}\cos(12\omega t - \frac{24\pi}{3}) = V_{m12v}\cos(12\omega t)$ $v_{12w} = V_{m12w}\cos(12\omega t + \frac{24\pi}{3}) = V_{m12w}\cos(12\omega t)$
อันดับที่ 13	$v_{13u} = V_{m13u}\cos(13\omega t)$ $v_{13v} = V_{m13v}\cos(13\omega t - \frac{26\pi}{3}) = V_{m13v}\cos(13\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{13w} = V_{m13w}\cos(13\omega t + \frac{26\pi}{3}) = V_{m13w}\cos(13\omega t + \frac{2\pi}{3})$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะปรากฏเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 โดยที่เมื่อรวมกับปริมาณแรงดันมูลฐานจะปรากฏดังสมการที่ (ก-4) ถึงสมการที่ (ก-6) ของแรงดันทั้งสามเฟสตามลำดับ

$$v_{Lu} = V_{m1u}\cos(\omega t) + V_{m5u}\cos(5\omega t) + V_{m7u}\cos(7\omega t) + V_{m11u}\cos(11\omega t) + V_{m13u}\cos(13\omega t) \quad \text{(ก-4)}$$

$$v_{Lv} = V_{m1v}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m5v}\cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m7v}\cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m11v}\cos(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m13v}\cos(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad \text{(ก-5)}$$

$$v_{Lw} = V_{m1w}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m5w}\cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m7w}\cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m11w}\cos(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m13w}\cos(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad \text{(ก-6)}$$

การแปลงแรงดันให้ไปอยู่บนแกนดีคิวจะเริ่มพิจารณาจากการแปลงปริมาณแรงดันบนแกนสามเฟสไปอยู่บนแกน α และ β โดยดำเนินการได้ดังสมการที่ (ก-7) และเมื่อทำการแปลงปริมาณแรงดันอยู่บนแกน α และ β จะได้ดังสมการที่ (ก-8)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Lu} \\ v_{Lv} \\ v_{Lw} \end{bmatrix} \quad \text{(ก-7)}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\frac{1}{2}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1u} \\ V_{m1v} \\ V_{m1w} \end{bmatrix} \\
&+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(5\omega t) & -\frac{1}{2}\cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m5u} \\ V_{m5v} \\ V_{m5w} \end{bmatrix} \\
&+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(7\omega t) & -\frac{1}{2}\cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m7u} \\ V_{m7v} \\ V_{m7w} \end{bmatrix} \\
&+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(11\omega t) & -\frac{1}{2}\cos(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\cos(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m11u} \\ V_{m11v} \\ V_{m11w} \end{bmatrix} \\
&+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(13\omega t) & -\frac{1}{2}\cos(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\cos(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m13u} \\ V_{m13v} \\ V_{m13w} \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad \text{(ก-8)}$$

เมื่อพิจารณาในสมการที่ (ก-9) และสมการที่ (ก-10) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ โดยดำเนินการแทนเอกลักษณ์ตรีโกณมิติลงในสมการที่ (ก-8) จะได้ดังสมการที่ (ก-11)

$$\cos(x-y)=\cos(x)\cos(y)+\sin(x)\sin(y) \tag{ก-9}$$

$$\cos(x+y)=\cos(x)\cos(y)-\sin(x)\sin(y) \tag{ก-10}$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(5\omega t) & \cos(7\omega t) & \cos(11\omega t) & \cos(13\omega t) \\ \sin(\omega t) & \sin(-5\omega t) & \sin(7\omega t) & \sin(-11\omega t) & \sin(13\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m5} \\ V_{m7} \\ V_{m11} \\ V_{m13} \end{bmatrix} \tag{ก-11}$$

โดยที่ขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับของทั้งสามเฟสมีขนาดเท่ากัน เมื่อทำการแปลงแรงดันสามเฟสมาอยู่บนแกน α และ β จึงดำเนินการแปลงแรงดันบนแกน α และ β ไปอยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยสมการที่ (ก-12) จะได้แรงดันบนแกนดีคิวดังสมการที่ (ก-13)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \tag{ก-12}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{3}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos(6\omega t) & \cos(6\omega t) & \cos(12\omega t) & \cos(12\omega t) \\ 0 & \sin(-6\omega t) & \sin(6\omega t) & \sin(-12\omega t) & \sin(12\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m5} \\ V_{m7} \\ V_{m11} \\ V_{m13} \end{bmatrix} \tag{ก-13}$$

เมื่อพิจารณาการแปลงปริมาณแรงดันที่อยู่บนแกนดีคิว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พบว่าค่าแอมพลิจูดของแรงดันที่ ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 คือ V_{m5}, V_{m7}, V_{m11} และ V_{m13} ตามลำดับ ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 จะปรากฏในอันดับที่ 6 เมื่อแรงดันดังกล่าวอยู่บนแกนดีคิว จะแตกต่างกันในส่วนของเครื่องหมาย ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 ซึ่งปรากฏอยู่อันดับที่ 12 โดยจะแตกต่างกันในส่วนของเครื่องหมายด้วยเช่นกัน ซึ่งสรุปปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่ปรากฏบนแกนดีคิว

อันดับฮาร์มอนิกบนแกนสามเฟส	ลำดับเฟส	อันดับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิว (หมุนที่ความถี่มูลฐานของระบบ)
5	ลบ	6 (ลำดับเฟสลบ)
7	บวก	6 (ลำดับเฟสบวก)
11	ลบ	12 (ลำดับเฟสลบ)
13	บวก	12 (ลำดับเฟสบวก)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณค่ากำลังแอกทีฟ (p)

กำลังไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันสองส่วน ในส่วนแรก คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (p) อธิบายได้ดังสมการที่ (ข-1) และค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟส ($p_{3\phi}$) คำนวณได้ตามสมการที่ (ข-2) เมื่อแปลงให้อยู่บนแกน α และ β ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน α และ β ($p_{\alpha\beta}$) แสดงได้ดังสมการที่ (ข-3) ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกนดีคิว (p_{dq}) คำนวณได้จากดังสมการที่ (ข-4)

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \tag{ข-1}$$

$$p_{3\phi} = \mathbf{v}_{uvw}^{T} \cdot \mathbf{i}_{uvw} = \begin{bmatrix} v_u & v_v & v_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = v_u i_u + v_v i_v + v_w i_w \tag{ข-2}$$

$$p_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}^{T} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \tag{ข-3}$$

$$p_{dq} = \mathbf{v}_{dq}^{T} \cdot \mathbf{i}_{dq} = \begin{bmatrix} v_d & v_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = v_d i_d + v_q i_q \tag{ข-4}$$

ส่วนที่สอง คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q) แสดงได้ดังสมการที่ (ข-5) โดยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งสามเฟส ($q_{3\phi}$) ดูได้จากสมการที่ (ข-6) สามารถแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่บนแกน α และ β ($q_{\alpha\beta}$) ได้ดังสมการที่ (ข-7) และถ้าพิจารณาบนแกนดีคิวค่ากำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกนดีคิว (q_{dq}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ข-8)

$$q = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \tag{ข-5}$$

$$q_{3\phi} = \mathbf{v}_{uvw} \times \mathbf{i}_{uvw} = \begin{bmatrix} q_u \\ q_v \\ q_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} v_v & v_w \\ i_v & i_w \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_w & v_u \\ i_w & i_u \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_u & v_v \\ i_u & i_v \end{vmatrix} \end{bmatrix} \quad \text{(ข-6)}$$

$$q_{\alpha\beta} = \mathbf{v}_{\alpha\beta} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ i_\alpha & v_\beta \end{vmatrix} = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad \text{(ข-7)}$$

$$q_{dq} = \mathbf{v}_{dq} \times \mathbf{i}_{dq} = \begin{vmatrix} v_d & v_q \\ i_d & i_q \end{vmatrix} = v_d i_q - v_q i_d \quad \text{(ข-8)}$$

การพิจารณาหาค่ากำลังแอกทีฟทั้งบนแกนสามเฟสและบนแกน α, β และ 0 เริ่มต้นจากการใช้อนุกรมฟูริเยร์โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้แยกเป็นการใช้อนุกรมฟูริเยร์สำหรับแรงดันเฟส u เฟส v และเฟส w ได้ดังสมการที่ (ข-9) ถึงสมการที่ (ข-11) ตามลำดับ

$$v_{Lu} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnu} \sin(n\omega t) \quad \text{(ข-9)}$$

$$v_{Lv} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnv} \sin(n\omega t - \frac{n2\pi}{3}) \quad \text{(ข-10)}$$

$$v_{Lw} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnw} \sin(n\omega t + \frac{n2\pi}{3}) \quad \text{(ข-11)}$$

โดยที่ V_{mnu} , V_{mnv} , V_{mnw} คือ แรงดันที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ

n คือ อันดับของฮาร์มอนิก

โดยเมื่อพิจารณาอนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันทั้งสามเฟส ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้แสดงค่าแรงดันทั้งสามเฟสที่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ

อันดับของฮาร์มอนิก	ปริมาณแรงดัน
อันดับที่ 1	$v_{1u} = V_{m1u}\sin(\omega t)$ $v_{1v} = V_{m1v}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{1w} = V_{m1w}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 2	$v_{2u} = V_{m2u}\sin(2\omega t)$ $v_{2v} = V_{m2v}\sin(2\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V_{m2v}\sin(2\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{2w} = V_{m2w}\sin(2\omega t + \frac{4\pi}{3}) = V_{m2w}\sin(2\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 3	$v_{3u} = V_{m3u}\sin(3\omega t)$ $v_{3v} = V_{m3v}\sin(3\omega t - \frac{6\pi}{3}) = V_{m3v}\sin(3\omega t)$ $v_{3w} = V_{m3w}\sin(3\omega t + \frac{6\pi}{3}) = V_{m3w}\sin(3\omega t)$
อันดับที่ 4	$v_{4u} = V_{m4u}\sin(4\omega t)$ $v_{4v} = V_{m4v}\sin(4\omega t - \frac{8\pi}{3}) = V_{m4v}\sin(4\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{4w} = V_{m4w}\sin(4\omega t + \frac{8\pi}{3}) = V_{m4w}\sin(4\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 5	$v_{5u} = V_{m5u}\sin(5\omega t)$ $v_{5v} = V_{m5v}\sin(5\omega t - \frac{10\pi}{3}) = V_{m5v}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{5w} = V_{m5w}\sin(5\omega t + \frac{10\pi}{3}) = V_{m5w}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 6	$v_{6u} = V_{m6u}\sin(6\omega t)$ $v_{6v} = V_{m6v}\sin(6\omega t - \frac{12\pi}{3}) = V_{m6v}\sin(6\omega t)$ $v_{6w} = V_{m6w}\sin(6\omega t + \frac{12\pi}{3}) = V_{m6w}\sin(6\omega t)$
อันดับที่ 7	$v_{7u} = V_{m7u}\sin(7\omega t)$ $v_{7v} = V_{m7v}\sin(7\omega t - \frac{14\pi}{3}) = V_{m7v}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{7w} = V_{m7w}\sin(7\omega t + \frac{14\pi}{3}) = V_{m7w}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3})$

ตารางที่ ข.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

อันดับที่ 8	$v_{8u} = V_{m8u}\sin(8\omega t)$ $v_{8v} = V_{m8v}\sin(8\omega t - \frac{16\pi}{3}) = V_{m8v}\sin(8\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{8w} = V_{m8w}\sin(8\omega t + \frac{16\pi}{3}) = V_{m8w}\sin(8\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 9	$v_{9u} = V_{m9u}\sin(9\omega t)$ $v_{9v} = V_{m9v}\sin(9\omega t - \frac{18\pi}{3}) = V_{m9v}\sin(9\omega t)$ $v_{9w} = V_{m9w}\sin(9\omega t + \frac{18\pi}{3}) = V_{m9w}\sin(9\omega t)$
อันดับที่ 10	$v_{10u} = V_{m10u}\sin(10\omega t)$ $v_{10v} = V_{m10v}\sin(10\omega t - \frac{20\pi}{3}) = V_{m10v}\sin(10\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{10w} = V_{m10w}\sin(10\omega t + \frac{20\pi}{3}) = V_{m10w}\sin(10\omega t + \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 11	$v_{11u} = V_{m11u}\sin(11\omega t)$ $v_{11v} = V_{m11v}\sin(11\omega t - \frac{22\pi}{3}) = V_{m11v}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{11w} = V_{m11w}\sin(11\omega t + \frac{22\pi}{3}) = V_{m11w}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3})$
อันดับที่ 12	$v_{12u} = V_{m12u}\sin(12\omega t)$ $v_{12v} = V_{m12v}\sin(12\omega t - \frac{24\pi}{3}) = V_{m12v}\sin(12\omega t)$ $v_{12w} = V_{m12w}\sin(12\omega t + \frac{24\pi}{3}) = V_{m12w}\sin(12\omega t)$
อันดับที่ 13	$v_{13u} = V_{m13u}\sin(13\omega t)$ $v_{13v} = V_{m13v}\sin(13\omega t - \frac{26\pi}{3}) = V_{m13v}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{13w} = V_{m13w}\sin(13\omega t + \frac{26\pi}{3}) = V_{m13w}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3})$

โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะปรากฏเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 โดยที่เมื่อรวมกับความถี่มูลฐานจะได้เป็นสมการแรงดันที่มีฮาร์มอนิกของทั้งสามเฟสดังสมการที่ (ข-12) ถึงสมการที่ (ข-14)

$$v_{Lu} = V_{m1u}\sin(\omega t) + V_{m5u}\sin(5\omega t) + V_{m7u}\sin(7\omega t) + V_{m11u}\sin(11\omega t)$$

$$+V_{m13u}\sin(13\omega t) \qquad \text{(ข-12)}$$

$$v_{Lv} = V_{m1v}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m5v}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m7v}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3})$$
$$+V_{m11v}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m13v}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) \qquad \text{(ข-13)}$$

$$v_{Lw} = V_{m1w}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m5w}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m7w}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3})$$
$$+V_{m11w}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m13w}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \qquad \text{(ข-14)}$$

ในการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสจะคำนวณได้จากสมการที่ (ข-2) เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (ข-12) ถึงสมการที่ (ข-14) จะได้ดังสมการที่ (ข-15)

$$p_{3\phi} = \left[V_{m1u}\sin(\omega t) \quad V_{m1v}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad V_{m1w}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})\right]\cdot\begin{bmatrix} I_{su}\sin(\omega t) \\ I_{sv}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$
$$+\left[V_{m5u}\sin(5\omega t) \quad V_{m5v}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad V_{m5w}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3})\right]\cdot\begin{bmatrix} I_{su}\sin(\omega t) \\ I_{sv}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$
$$+\left[V_{m7u}\sin(7\omega t) \quad V_{m7v}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad V_{m7w}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3})\right]\cdot\begin{bmatrix} I_{su}\sin(\omega t) \\ I_{sv}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$
$$+\left[V_{m11u}\sin(11\omega t) \quad V_{m11v}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad V_{m11w}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3})\right]\cdot\begin{bmatrix} I_{su}\sin(\omega t) \\ I_{sv}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$+\left[V_{m13u}\sin(13\omega t)\quad V_{m13v}\sin(13\omega t-\frac{2\pi}{3})\quad V_{m13w}\sin(13\omega t+\frac{2\pi}{3})\right]\cdot\begin{bmatrix}I_{su}\sin(\omega t)\\ I_{sv}\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3})\\ I_{sw}\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3})\end{bmatrix} \tag{ข-15}$$

เมื่อพิจารณาในสมการที่ (ข-16) และสมการที่ (ข-17) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ โดยดำเนินการแทนเอกลักษณ์ตรีโกณมิติลงในสมการที่ (ข-15) จะได้ดังสมการที่ (ข-18)

$$\sin^2(x)+\sin^2(x-\frac{2\pi}{3})+\sin^2(x+\frac{2\pi}{3})=\frac{3}{2} \tag{ข-16}$$

$$\sin(x)\sin(y)+\sin(x-\frac{2\pi}{3})\sin(y-\frac{2\pi}{3})+\sin(x+\frac{2\pi}{3})\sin(y-\frac{2\pi}{3})=\frac{3}{2}\cos(x-y) \tag{ข-17}$$

$$\begin{aligned}p_{3\phi}=\frac{3}{2}[&I_{su}V_{m1}-I_{su}V_{m5}\cos(6\omega t)+I_{su}V_{m7}\cos(6\omega t)\\&-I_{su}V_{m11}\cos(12\omega t)+I_{su}V_{m13}\cos(12\omega t)]\end{aligned} \tag{ข-18}$$

การคำนวณค่ากำลังแอกทีฟบนแกน α, β และ 0 จะดำเนินการดังสมการที่ (ข-3) ในคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกน α, β และ 0 ต้องทำการแปลงปริมาณแรงดันและกระแสไปอยู่บนแกน α, β และ 0 ดังสมการที่ (ข-19) โดยเมื่อทำการแปลงแกนของแรงดันและกระแสจะได้ดังสมการที่ (ข-20) และสมการที่ (ข-21) ตามลำดับ และดำเนินการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟแบนแกน α, β และ 0 จะได้ดังสมการที่ (ข-22)

$$\begin{bmatrix}f_\alpha\\ f_\beta\\ f_0\end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_u\\ f_v\\ f_w\end{bmatrix} \tag{ข-19}$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1u} \\ V_{m1v} \\ V_{m1w} \end{bmatrix}$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(5\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(5\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m5u} \\ V_{m5v} \\ V_{m5w} \end{bmatrix}$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(7\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m7u} \\ V_{m7v} \\ V_{m7w} \end{bmatrix}$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(11\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m11u} \\ V_{m11v} \\ V_{m11w} \end{bmatrix}$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(13\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m13u} \\ V_{m13v} \\ V_{m13w} \end{bmatrix} \quad \text{(ข-20)}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{su} \\ I_{sv} \\ I_{sw} \end{bmatrix} \quad \text{(ข-21)}$$

$$p_{\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}[I_{su}V_{m1} - I_{su}V_{m5}\cos(6\omega t) + I_{su}V_{m7}\cos(6\omega t) \\ - I_{su}V_{m11}\cos(12\omega t) + I_{su}V_{m13}\cos(12\omega t)] \quad \text{(ข-22)}$$

การคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสและแกน α, β และ 0 เมื่อพิจารณาปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับของสามเฟสจะปรากฏว่ามีปริมาณแอมพลิจูดที่เท่ากันทุกเฟสและในการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสและบนแกน α, β และ 0 จะมีค่าเท่ากันและมีความถี่ในแต่ละอันดับเท่ากันอีกด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**************************************************************************
โปรแกรมการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอรีซีสด้วย
วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว
โดย นายเอนก ง้อตระกูล
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2555
**************************************************************************
โปรแกรม ATS.m
N = 4;                                  % N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
xlimit = [600 1 0.008 0.0003;           % แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
        52.5 0 0.0005 0.0.00001];       % แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
for r = 1:20
S(r,:) = ((xlimit(1, :)-xlimit(2, :)).*rand(1, N))+xlimit(2, :);
end                                     % สุ่มคำตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของการค้นหา
                                        ของ พารามิเตอร์แต่ละตัวจำนวน 20 ชุด

S(r,:)=[300 0.1 0.002 0.0001];          %เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับกรณีที่มีการ
                                        กำหนดค่าเริ่มต้น

for k = 1: size(S,1)
        Vdc=S(k,1);                     % ทำการส่งค่า Vdc ไปยังโปรแกรม simulink
        HB=S(k,2);                      % ทำการส่งค่า HBไปยังโปรแกรม simulink
        Lf=S(k,3);                      % ทำการส่งค่า Lf ไปยังโปรแกรม simulink
        Cf=S(k,4);                      % ทำการส่งค่า Cf ไปยังโปรแกรม simulink
        sim('System_inverter_hysteresis_system_1')
                                        % สั่งจำลองสถานการณ์โปรแกรม simulink ชื่อไฟล์
                                        System_inverter_hysteresis_system_1
        W=THD(50001);                   %โปรแกรม simulink จะส่งค่า THD กลับมาไว้ใน W
        costvalue(k,1)=W;
end                                     % ประเมินคำตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
```

```
[best_error, index] = min(costvalue);   % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
                                        และเก็บไว้ใน best_error
S0 = S(index, :);                       % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                        น้อยที่สุดไว้ใน S0
max_count = 10000;                      % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา
best_neighbor = S0;                     % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                        มีค่าน้อยที่สุด
neighbor_list = zeros(6, N);            % รีเซตค่าใน neighbor_list
radius = 0.5;                           % กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้น
Number_neighb = 5;                      % กำหนดการสุ่มค่าใกล้เคียง
overall_best_error = best_error;        % ปรับค่า overall_best_error = best_error
overall_neighbor = best_neighbor;       % ปรับค่า overall_neighbor = best_neighbor
n = 0;                                  % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการซ้ำของคำตอบ
t = 0;                                  % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = 0;                                 % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = 0;                                % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
count = 0;                              % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนรอบการค้นหา
n_backtracking = 0;                     % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการเรียกใช้กลไกการ
                                        เดินย้อนรอย
tic;                                    % เริ่มต้นคำนวนเวลาในการค้นหา
% เริ่มโปรแกรม ATS
t = t+1;                                % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt = tt+1;                              % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt = ttt+1;                            % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1) = count;                     % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5) = best_neighbor;           % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                        ของ local
local(t,6) = best_error;                % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ local
tabu_list(tt,1) = count;                % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
```

```
tabu_list(tt,2:5) = best_neighbor;          % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                            ของ tabu_list
tabu_list(tt,6) = best_error;               % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ tabu_list
best_error_list(ttt,1) = count;             % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:5) = best_neighbor;   % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                            ของ best_error_list
best_error_list(ttt,6) = best_error;        % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ
                                            best_error_list
for count = 1: max_count
        S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0);
                                            % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่าใกล้เคียง
                                            รอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน
                                            % อินพุตของโปรแกรมนี้คือ Number_neighb, radius,
                                            xlimit และ S0
                                            % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) เท่ากับจำนวน
                                            Number_neighb
error=[];                                   %ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                            ของค่าใกล้เคียงที่ได้จากการสุ่ม
for k=1:size(S1,1)
        Vdc=S1(k,1);                        % ทำการส่งค่า Vdc ไปยังโปรแกรม simulink
        HB=S1(k,2);                         % ทำการส่งค่า HB ไปยังโปรแกรม simulink
        Lf=S1(k,3);                         % ทำการส่งค่า Lf ไปยังโปรแกรม simulink
         Cf=S1(k,4);                        % ทำการส่งค่า Cf ไปยังโปรแกรม simulink
         sim('System_inverter_hysteresis_system_1')
                                            % สั่งจำลองสถานการณ์โปรแกรม simulink ชื่อไฟล์
                                            System_inverter_hysteresis_system_1
        W=THD(50001);                       %ประเมินค่าใกล้เคียงใน S1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
        error(k,1)=W;                       %เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าใกล้เคียงทั้งหมด
end
```

```
[best_error1,index]=min(error);          %หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในบรรดาค่า
                                         ใกล้เคียง และเก็บไว้ใน best_error1
best_neighbor1=S1(index,:);              %เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าใกล้เคียงที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                                         วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไว้ใน best_neighbor1
        if best_error1<best_error
        best_error=best_error1;          %ปรับค่า best_error ถ้า best_error1<best_error
                                         โดยแทนค่า best_error ด้วย best_error1
        best_neighbor=S1(index,:);       %แทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย S1(index,:)
        else                             %ไม่เช่นนั้นแล้ว
        best_neighbor=S0;                %แทนค่า best_neighbor ด้วย S0
end
    neighbor_list(k,1:size(S0,2)) = [best_neighbor1];
                                         % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มี
                                         ค่าน้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list
    neighbor_list(k,size(S0,2)+1) = best_error1;
                                         % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
                                         % ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ในคอลัมน์ที่ 3
                                         ของ neighbor_list
    if (count>1)
        if (tabu_list(count,6)>best_error)
        n = n+1;
        else
        n = 0;
        end
    end                                  % ตรวจสอบการซ้ำของคำตอบโดยการเปรียบเทียบ
                                         ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของ
                                         คำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n
    tt = tt+1;                           % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
    tabu_list(tt,1) = count;             % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
```

```
    tabu_list(tt,2:5) = best_neighbor1;     % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                            ของ tabu_list
    tabu_list(tt,6) = best_error1;          % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ tabu_list
    ttt =  ttt+1;                           % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
    best_error_list(ttt,1) = count;         % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
    best_error_list(ttt,2:5) = best_neighbor;
                                            % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                            ของ best_error_list
    best_error_list(ttt,6) = best_error;    % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ
                                            best_error_list
    disp([count tabu_list(count,6) best_error n n_backtracking ])
                                            % แสดงค่า count, tabu_list(count,6), best_error, n
                                            และ n_backtracking
% เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.5 && radius>1e-3
    radius = radius/1.3;
end                                         % เงื่อนไขที่ 1) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.5
                                            ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.05 && radius>1e-3
    radius = radius/1.3;
end                                         % เงื่อนไขที่ 2) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.05
                                            ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.01&& radius>1e-3
    radius = radius/1.3;
end                                         % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.01
                                            ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.008&& radius>1e-3
    radius = radius/1.3;
end                                         % เงื่อนไขที่ 4) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.008
                                            ให้ทำการปรับลดรัศมี
```

```
if  (best_error<0.15)                    % ตรวจสอบเกณฑ์ยุติการค้นหา
                                         เมื่อ best_error < 0.15
    t = t+1;                             % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
    tt = tt+1;                           % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
disp([count best_error overall_best_error])
                                         % แสดงค่า count, best_error และ overall_best_error
local(t,1) = count;                      % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2) = tabu_list(count,2);         % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 2 ของcount ไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 2 ของ local
local(t,3) = tabu_list(count,3);         % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 3 ของcount ไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 3 ของ local
local(t,4) = tabu_list(count,4);         % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 4 ของcount ไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 4 ของ local
local(t,5) = tabu_list(count,5);         % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 5 ของcount ไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 5 ของ local
local(t,6) = tabu_list(count,6);         % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 6 ของcount ไว้ใน
                                         คอลัมน์ที่ 6 ของ local
break;                                   % ยุติการค้นหา
end
% เริ่มกลไกการเดินย้อนรอย
if n>=10000                              % ถ้าจำนวนการซ้ำของคำตอบเท่ากับ 10000
n_backtracking = n_backtracking+1;       % เพิ่มค่า n_backtracking
TEMP = tabu_list(count-3:count+1,:);
                                         % จัดลำดับ rank ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                         ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อน
                                         รอยการค้นหา
                                         % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                         ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));            % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                         ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
```

```
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:);          % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
                                    ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,6) = 0;                  % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                    ด้วยศูนย์
                                    % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                    เพียง 4 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                    ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:);          % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                    พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK
TEMP(INDEX,6) = 0;                  % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                    ด้วยศูนย์
                                    % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                    เพียง 3 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                    ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:);          % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                    พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK
TEMP(INDEX,6) =  0;                 % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                    ด้วยศูนย์
                                    % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                    เพียง 2 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                    ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:);          % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                    พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK
```

```
TEMP(INDEX,6) = 0;                  % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                    ด้วยศูนย์
                                    % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                    เพียง 1 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                    % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                    ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:);          % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                    พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK
TEMP(INDEX,6) = 0;                  % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                    ด้วยศูนย์
                                    % ขณะนี้ใน TEMP จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้
                                    ทำการจัดลำดับอีกต่อไป
neighbor = RANK(5,2:5);             % แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน
                                    RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                                    วัตถุประสงค์แตกต่างจากคำตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบ
                                    กับอีก 4 ลำดับที่เหลือใน RANK
S0 = neighbor;                      % ปรับค่า S0 = neighbor
if best_error<overall_best_error
        overall_best_error = best_error;
        overall_best_neighbor = best_neighbor;
                                    % ถ้า best_error < overall_best_error ให้ปรับค่า
                                    overall_best_error โดยแทนค่า overall_best_error ด้วย
                                    best_error และแทนค่าพารามิเตอร์
                                    overall_best_neighbor ด้วย best_neighbor
t = t+1;                            % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
local(t,1) = count;                 % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5) = best_neighbor;       % เก็บค่า best_neighborไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                    ของ local
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
local(t,6) = best_error;                % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ local
end
best_error = RANK(5,6);                 % แทนค่า best_error ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                        ลำดับที่ 5 ใน RANK
n = 0;                                  % ปรับค่า n = 0
else                                    % ไม่เช่นนั้นแล้ว
S0 = best_neighbor;                     % แทนค่า S0 ด้วย best_neighbor
best_error = best_error;                % แทนค่า best_error ด้วย best_error
    end
end
if overall_best_error<best_error
best_error = overall_best_error;
best_neighbor = overall_best_neighbor;
                                        % ถ้า overall_best_error<best_error
                                        ให้ปรับค่า best_error
                                        โดยแทนค่า best_error ด้วย overall_best_error
                                        และแทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor
                                        ด้วย overall_best_neighbor
end
time = toc;                             % ยุติการคำนวณเวลาการค้นหา
count                                   % แสดงจำนวนรอบการค้นหา
best_error                              % แสดงค่า best_error
Vdc= best_neighbor(1)                   % แสดงค่า Vdc
HB = best_neighbor(2)                   % แสดงค่า HB
Lf = best_neighbor(3)                   % แสดงค่า Lf
Cf = best_neighbor(4)                   % แสดงค่า Cf
figure(1)
plot([0:1:count], best_error_list(:,6))  % พล็อตกราฟระหว่าง count กับ best_error_list
xlabel('number of cycle')               % แสดงชื่อแกน x เป็น number of cycle
ylabel('%THD_v_,_a_v ')                 % แสดงชื่อแกน y เป็น %THD
```

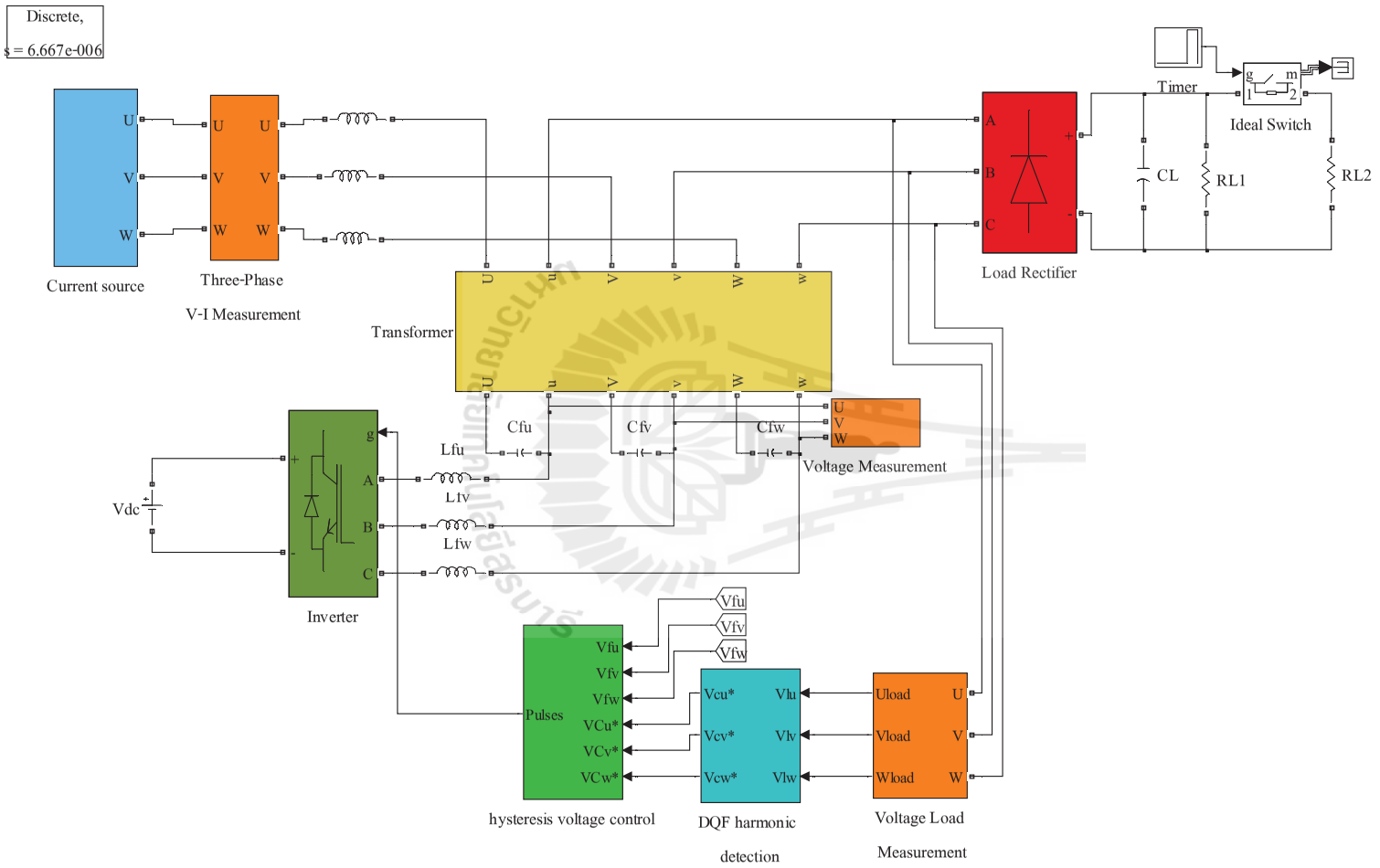
โปรแกรม random_neigh.m

```
function S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0)
                                        % โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
                                        ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
                                        % อินพุตของโปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
                                        xlimit และ S0
                                        % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
                                        Number_neighb
for u = 1: Number_neighb
    for k = 1: size(xlimit,2)
        S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
                                        % ทำการสุ่มค่าใกล้เคียงโดยเรียกใช้โปรแกรม rand1
                                        โดยให้ทำการสุ่มค่าในช่วง -1 ถึง 1
        while ( S1(u,k)>xlimit(1,k) | S1(u,k)<xlimit(2,k) )
                                        % ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและ
                                        ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
                                        มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดให้ทำการ
                                        สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่
        S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
        end
    end
end
return                                  % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม rand1.m

```
function x = rand1(a,b)          % โปรแกรม rand1 เป็นโปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่กำหนด
                                 % อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์ a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b
                                 % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่มค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b
x = a+rand*(b-a);                % สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b
return                           % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



โปรแกรม simulink ชื่อไฟล์ System_inverter_hysteresis_system_1

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และจดลิขสิทธิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

A. Ngotakun, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "**Control of Series Active Power Filter Using Fuzzy Logic Controller**", *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2012, pp.1-4.

เอนก ง้อตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และ กองพัน อารีรักษ์, "**การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม**", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35*, 12-14 ธันวาคม 2555, หน้า 489-492.

เอนก ง้อตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์, "**การเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม**", *การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาปีการศึกษา 2554*, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 7 ตุลาคม 2554, หน้า 1221-1232.

รายการจดลิขสิทธิ์

กองพล อารีรักษ์ และ เอนก ง้อตระกูล, "บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟสำหรับโปรแกรม SIMULINK", 2 พฤศจิกายน 2554, เลขที่คำขอ 266183

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายเอนก ง้อตระกูล เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2530 เริ่มศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนสุพรรณภูมิ ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนกรรณสูตศึกษาลัย จังหวัดสุพรรณบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2552 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปี พ.ศ.2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม และปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 รวมถึงได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัย เรื่อง การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม จากสำนักงบประมาณ (ภายใต้การพิจารณาจัดสรรโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ) ปีงบประมาณ 2554 ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การกำจัดฮาร์มอนิก วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี