



รายงานการวิจัย

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
แบบอนุกรม
(Harmonic Voltage Detection Method for Series
Active Power Filters)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
แบบอนุกรม
(Harmonic Voltage Detection Method for Series
Active Power Filters)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกดังกล่าวมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับจาก 6 วิธี คือ วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส วิธีดีคิวเอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม รวมถึงศึกษาการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมในงานวิจัยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ที่มีการออกแบบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ การศึกษาเปรียบเทียบดังกล่าวพึงพาการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อก SimPowerSystems ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีที่สุด และภายหลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม พบว่า ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่จุด PCC มีค่าลดลงอย่างมาก อีกทั้งยังอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE std.519-1992

Abstract

The research presents the harmonic voltage elimination using a series active power filter for balanced three-phase power systems. There are six methods for performance comparison study of a harmonic voltage detection such as synchronous reference frame method, DQF method, instantaneous power theory method, instantaneous power theory with Fourier method, synchronous detection method and synchronous detection with Fourier method. In addition, the dynamic model of series active power filter is proposed in this research. The hysteresis control is applied to control the compensating voltage for a harmonic mitigation. The voltage source inverter with the DC bus voltage control using a PI controller is used as the series active power filter in this research. The SimPowerSystems block with Simulink of MATLAB programming is used for simulation in the research. The simulation results show that the DQF method is the best algorithm for a harmonic voltage detection. In addition, a harmonic quantity of the voltages at PCC point is also reduced after compensation. Moreover, the %THD of the source currents follows the IEEE std.519-1992.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนายเอนก งามตระกูล ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินการสร้างโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง



กองพล อารีรักษ์
กุมภาพันธ์ 2556

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย	5
2 ปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอง กำลังแอกทีฟ.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	14
2.6 สรุป	15
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ความหมายของฮาร์มอนิก.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	นิยามของฮาร์โมนิกแบบต่าง ๆ	17
3.4	ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (voltage distortion factor)	27
3.5	แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก.....	18
3.6	ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิก	18
3.7	การกำจัดฮาร์โมนิก	19
3.8	ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์โมนิก	22
3.9	สรุป	25
4	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	26
4.1	บทนำ.....	26
4.2	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนคิกิว.....	26
4.3	การจำลองสถานการณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับ แรงดันฮาร์โมนิก	27
4.4	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีการอั้งอิงซิงโครนัส	29
4.5	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีคิกิวเอฟ.....	31
4.6	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง.....	34
4.7	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์. 37	
4.8	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส	39
4.9	การตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์40	
4.10	ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับ แรงดันฮาร์โมนิก	42
4.11	สรุป	54
5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	56
5.1	บทนำ.....	56
5.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนสามเฟส.....	56
5.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนคิกิว	59
5.4	การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5	สรุป	81
6	การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	
	ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	82
6.1	บทนำ	82
6.2	การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้	
	ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	82
6.3	หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	84
6.4	การฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	85
6.5	ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล	101
6.6	สรุป	104
7	การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	105
7.1	บทนำ	105
7.2	การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	105
7.3	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	109
7.4	การจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล	111
7.5	สรุป	115
8	สรุป	116
8.1	สรุป	116
8.2	ข้อเสนอแนะ	118
	รายการอ้างอิง	119
	ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่า v_d และ v_q	124
	ภาคผนวก ข. การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p)	130
	ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดลิขสิทธิ์	138
	ประวัติผู้วิจัย	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม..... 6
2.2	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรรองกำลังแอกทีฟ..... 8
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรองกำลังแอกทีฟ 9
2.4	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก 11
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ 12
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ 14
3.1	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก..... 23
3.2	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV) 23
3.3	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 69,001 V ถึง 161 kV) 24
3.4	ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน >161 kV) 24
4.1	ผลการจำลองสถานการณ์..... 53
5.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 1) 70
5.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 2) 74
5.3	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 3) 77
6.1	การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง 86
6.2	การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรรอง 90
6.3	การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรง..... 94
6.4	การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮิสเตอร์ซิส..... 98
7.1	ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยเมื่อมีการควบคุม แรงดันบัสไฟตรง 115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	องค์ประกอบกรรการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม 3
3.1	วงจรกรองกำลังพาสซีฟ 20
3.2	วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 21
3.3	วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1 21
3.4	วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 2 22
3.5	ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE Std 519-1992 22
4.1	แผนภาพการแปลงของปาร์ค 27
4.2	วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 28
4.3	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF 29
4.4	สเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง 31
4.5	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี DQF 32
4.6	แผนภาพคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณแรงดันที่ความถี่มูลฐานบนแกนดี 33
4.7	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ 34
4.8	สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง 36
4.9	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF 37
4.10	แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และคำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน 38
4.11	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี SD 39
4.12	แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์โมนิกด้วยวิธี SDF 40
4.13	แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณกำลังแอกทีฟรวมทั้งความถี่มูลฐาน 41
4.14	แรงดันสามเฟสก่อนการชดเชย 42
4.15	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์โมนิกที่ใช้วิธี SRF 43
4.16	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์โมนิกที่ใช้วิธี DQF 44
4.17	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์โมนิกที่ใช้วิธี PQ 46
4.18	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์โมนิกที่ใช้วิธี PQF 47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD.....	49
4.20 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.02 \text{ sec}$).....	50
4.21 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF ($t_{start} = 0.04 \text{ sec}$).....	51
5.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ..	58
5.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของระบบที่พิจารณา	62
5.3 ระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม simulink ร่วมกับ โปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems	68
5.4 แบบจำลองของวงจรอินเวอร์เตอร์อุดมคติสำหรับการจำลองสถานการณ์	69
5.5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}	70
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}	71
5.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}	71
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}	72
5.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}	72
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}	74
5.11 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}	75
5.12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}	75
5.13 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}	76
5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}	76
5.15 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}	78
5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}	78
5.17 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}	79
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}	79
5.19 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}	80
6.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม	83
6.2 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส	84
6.3 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก.....	88
6.5 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก.....	88
6.6 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม.....	89
6.7 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$	89
6.8 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก.....	92
6.9 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก.....	92
6.10 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม.....	93
6.11 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$	93
6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย.....	95
6.13 ผลของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ค่าน้อย.....	96
6.14 ผลของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ค่ามาก.....	97
6.15 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$	97
6.16 ผลของค่าแถบฮีสเตอร์ซีสมีค่ามาก.....	99
6.17 ผลของค่าแถบฮีสเตอร์ซีสมีค่าน้อย.....	100
6.18 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอร์ซีสมีที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$	100
6.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส u	101
6.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส v	102
6.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส w	102
6.22 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย.....	103
7.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เมื่อมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง.....	106
7.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ.....	107
7.3 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุม แรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	108
7.4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	110
7.5 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัลไฟตรง.....	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส u	113
7.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส v	114
7.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเฟส w	114



บทที่ 1

บทนำ

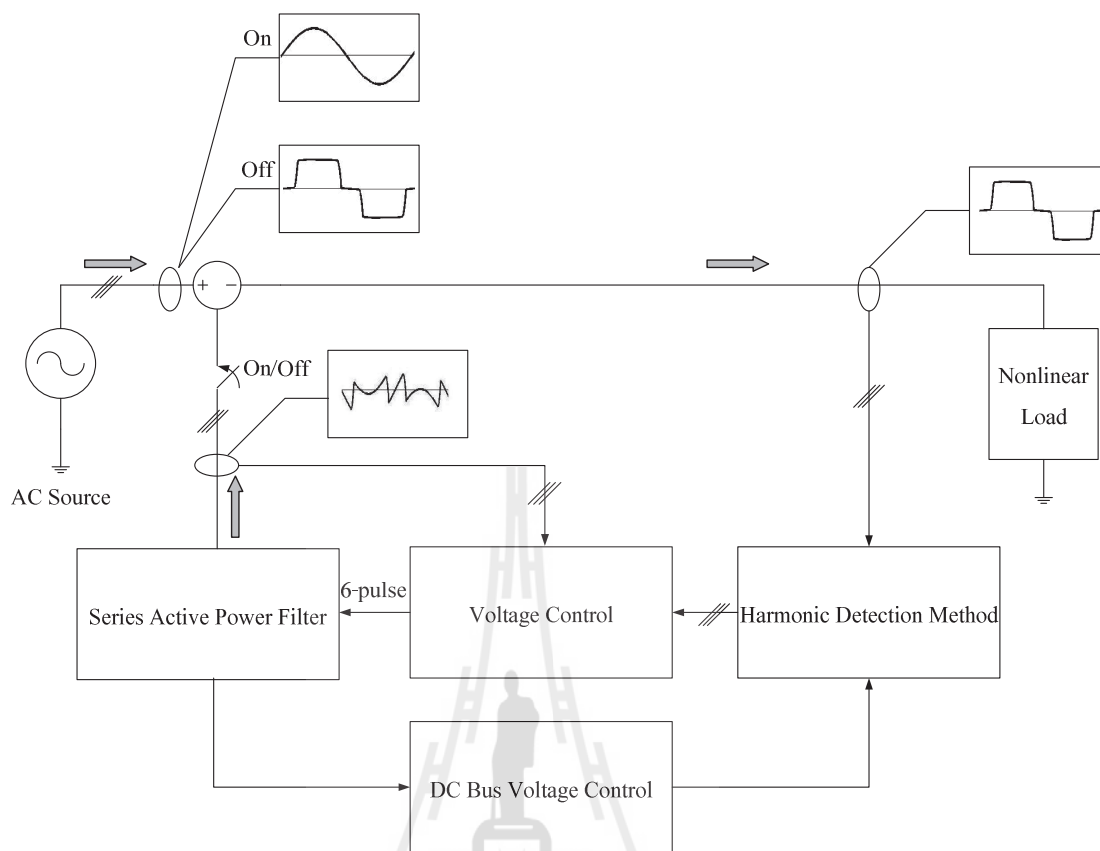
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการใช้งานอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นกันอย่างกว้างขวาง อาทิ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หม้อแปลงไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์ดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เหล่านี้ก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ ดังเช่น ทำให้มีเตอร์วัดค่าไฟฟ้าวัดค่าผิดพลาด (Fuchs, 1987)(Elham and Makrm, 1992) เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด (Ho and Liu, 2001) เกิดกำลังงานสูญเสีย (Rice, 1986) และความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน (Wagner, 1993) เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ทางการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นเพื่อทำให้ปัญหาทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกลดน้อยลง ซึ่งในอดีตได้มีการแก้ไขปัญหาด้านฮาร์มอนิกด้วยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Peng, Akagi, and Nabae, 1988) แต่เนื่องจากวงจรดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบ และยังมีน้ำหนักมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Singh, Al-Haddad and Chandra, 1999) ขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกสูง ซึ่งการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่อาศัยอุปกรณ์สวิตชิ่งในการฉีดแรงดันชดเชยเพื่อหักล้างกับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น 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) ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (Mekri, Machmoum, Ait-Ahmed, and Mazari, 2010) พีชชีลอจิก (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 และในส่วน

ที่ 3 เป็นการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงซึ่งการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังกล่าวนิยมใช้ตัวควบคุมพีไอ (Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech, 2002)

งานวิจัยนี้มีการนำเสนอการเปรียบเทียบการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธีต่าง ๆ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และการควบคุมการบิดแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสรวมไปถึงการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ กระบวนการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ในรูปดังกล่าวจะประกอบไปด้วยโหลดไม่เชิงเส้น (nonlinear load) ที่ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ ส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic Detection Method) จะมีหน้าที่ตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและสร้างสัญญาณแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชย ในขณะที่การควบคุมแรงดันชดเชย (Voltage Control) จะทำหน้าที่ควบคุมการบิดแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง ส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (Series Active Power Filter) จะทำหน้าที่ชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้าหลัก และสุดท้ายเป็นการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (DC Bus Voltage Control) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมโดยสรุปของงานวิจัย





รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2.2 เพื่อคิดค้นวิธีการใหม่สำหรับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ทั้งบนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว

1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้และดำเนินการออกแบบทางด้าน การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส

1.2.5 เพื่อศึกษาองค์ความรู้ทางด้าน การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

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
- 1.5.2 ได้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่มีสมรรถนะดีกว่าเดิม
- 1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟสและบนแกนดีคิว

1.5.4 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมการฉีดแรงดันชนิดเซพด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์รวมถึงวิธีการออกแบบ

1.5.5 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1.5.6 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

บทที่ 3 กล่าวถึงความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดแรงดันฮาร์มอนิก การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก รวมถึงข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

บทที่ 4 นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ที่ใช้วิธีการอ้างอิงซิงโครนัส วิธีดีคิวแอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ วิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูรีเยร์

บทที่ 5 นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟสและใช้หลักการแปลงของปาร์คสำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว โดยมีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมการฉีดแรงดันชนิดเซพด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์ ซึ่งรายละเอียดในบทนี้จะนำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์ การฉีดแรงดันชนิดเซพที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์ และการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม โดยมีการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการควบคุม

บทที่ 7 นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมพร้อมตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์ที่ใช้การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการจำลองสถานการณ์ในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

บทที่ 8 เป็นบทสรุปภาพรวมของงานวิจัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูล ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยดังกล่าวได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

1990	Grady, Samotyj, and Noyola	นำเสนอการใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะใช้ความถี่ในการสวิตช์น้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน
1999	Singh, Al-Haddad, and Chandra	นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและแหล่งจ่ายแรงดันกับการใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (ต่อ)

2000	El-Habrouk, Darwish, and Mehta	เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งในบทความระบุว่า ความซับซ้อนในการควบคุมของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีความง่ายกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส การตอบสนองของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส กำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าน้อยกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส
2001	Tey, and So	นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ
2006	Akagi	นำเสนอโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ ที่มีวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน รวมไปถึงการนำเสนอความเหมาะสมของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิดกับการนำไปใช้งาน

จากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในตารางที่ 2.1 สามารถสรุปเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งในตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด ด้วยเหตุนี้จึงเลือกวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมาใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

คุณสมบัติ	ชนิดของวงจรรองกำลังแอกทีฟ	
	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด แหล่งจ่ายแรงดัน	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด แหล่งจ่ายกระแส
ระบบไฟฟ้ากำลัง	สามเฟส	สามเฟส
แหล่งสะสมพลังงาน	ตัวเก็บประจุ	ตัวเหนี่ยวนำ
ความซับซ้อนในการควบคุม	ง่าย	ยาก
ความไวในการตอบสนองต่อการ ทำงาน	เร็ว	ปานกลาง
ความอ่อนตัวต่อการ เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ของระบบไฟฟ้า	ดี	ไม่ดี
กำลังงานสูญเสียต่าง ๆ	ปานกลาง	มาก
ประสิทธิภาพในการกำจัด ฮาร์มอนิก	ดี	ดี
ราคา	ถูก	แพง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชย ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกอยู่หลายวิธี และในแต่ละวิธีมีรูปแบบการคำนวณที่แตกต่างกันในการนำเสนอจึงนำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยเช่นกันเพื่อเป็นแนวทางนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก และหัวข้อนี้จึงนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Furuhashi, Okuma, and Uchikawa	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ในการตรวจจับฮาร์มอนิก งานวิจัยนี้ได้กำหนดความหมายของกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งไว้ด้วย
1999	Qun, Weizheng, Jinjun, and Zhaoan	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งหรือวิธี PQ ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้วงรอบการล็อกเฟส (Phase Lock Loop) มาใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิก
2002	Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech	นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนคิควหรือวิธี 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 ในส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกในโดเมนเวลาจะประกอบด้วย

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้องด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

		<p>วิธี Synchronous Fundamental</p> <p>วิธี Synchronous Individual Harmonic</p> <p>วิธี Instantaneous Power</p> <p>วิธี Generalized Integrators</p> <p>โดยในบทความนี้ได้สรุปความเหมาะสมของแต่ละวิธีในการนำไปใช้ตรวจจับฮาร์มอนิก</p>
2006	Chang, and Chen	<p>นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส หรือวิธี SD ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและได้ทำการจำลองสถานการณ์ในการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก</p>
2006	Chang, K. Chen, Chin, and C. Chen	<p>นำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี a-b-c Reference Frame ซึ่งในบทความดังกล่าวได้นำเสนออัลกอริทึมเกี่ยวกับการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและทำการจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก</p>
2007	Sujitjorn, K-L Areerak, and Kulworawanichpong	<p>นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคิว (DQ axis with Fourier) หรือวิธี DQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสี่สายแบบไม่สมดุล โดยผลการจำลองสถานการณ์มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกกับอีก 2 วิธี คือ วิธี SRF และวิธี Sliding Window Fourier Analysis (SWFA) ซึ่งวิธี DQF ให้ผลการตรวจจับที่ดีกว่าอีกสองวิธี และสามารถปรับให้ระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลก่อนการชดเชย กลับสู่สถานะสมดุลภายหลังการชดเชยได้</p>
2009	Abdelkhalek, and Benachaiba	<p>นำเสนอเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SD โดยทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่อเข้ากับโหลดสมดุล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์ซึ่งผล</p>

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

		การทดสอบ พบว่า กรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ทั้งสองวิธีให้ผลการตรวจจับดีทั้งคู่แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์วิธี PQ ให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกดีกว่าวิธี SD
--	--	---

จากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในตารางที่ 2.3 สามารถทราบถึงข้อดีและข้อเสียของการตรวจจับฮาร์มอนิกแต่ละวิธี และสรุปข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก

สถานะโหลดของระบบ ไฟฟ้ากำลัง	วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก					
	วิธี PQ	วิธี SRF	วิธี SD	วิธี a-b-c ref. frame	วิธี SWFA	วิธี DQF
สมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิก						
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ต่อกับโหลดสมดุล	ดี	ดี	ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ต่อกับโหลดไม่สมดุล	ดี	ดี	ไม่ดี	ดี	ดี	ดี
การชดเชยกำลังรีแอกทีฟหรือปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง						
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ต่อกับโหลดสมดุล	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี
ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ที่ต่อกับโหลดไม่สมดุล	ดีมาก	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี
คุณสมบัติด้านการคำนวณ						
ความยุ่งยากซับซ้อนใน การคำนวณ	ปาน กลาง	ปาน กลาง	ปาน กลาง	ไม่ ซับซ้อน	ซับซ้อน	ซับซ้อน
ความเร็วในการคำนวณ	เร็ว	เร็ว	เร็ว	เร็ว	เร็วมาก	เร็ว

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

การควบคุมให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถชดเชยแรงดันได้ตามลักษณะรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ถือเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดัน โดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การควบคุมแรงดันแบบเชิงเส้น (linear control) และการควบคุมแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear control) ซึ่งงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Bose	นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันโดยการใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส
2002	Libano, Braga, Willmann, and Muller	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่อาศัยหลักการทำงานเป็นแบบการเรียนรู้ด้วยตัวเองแล้วนำกลับมาควบคุม ซึ่งวิธีนี้จะค่อนข้างซับซ้อนมาก
2004	Kanaan, and Al-Haddad	นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันชดเชยฮาร์มอนิก รวมไปถึงการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในขณะที่ทำการควบคุมการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก
2004	Khoor, Machmoum, and Doeuff	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี รวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ
2007	Antchev, Petkova, and Gurgulicov	นำเสนอการควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Sliding mode control) สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม วิธีนี้อาศัยการเทียบเวลาในแต่ละจุดเพื่อทำการเลื่อนจุดข้อมูลในการควบคุม

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

2007	Lan, Liang, and Wu	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้วิธีพีซี-พีไอดี ในการควบคุมการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
2007	Mekri, Machmoun, Mazari, and Ait Ahmed	บทความนี้นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชยในสามรูปแบบ ได้แก่ การควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ การควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบ RST และการควบคุมแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก ซึ่งในบทความได้มุ่งเน้นให้เห็นถึงองค์ประกอบของการนำวงรอบการลือกเฟสมาเข้าร่วมกับการควบคุมแบบต่าง ๆ
2009	Yusof, and Rahim	นำเสนอการควบคุมด้วยวิธี Space Vector Pulse Width modulation หรือวิธี SVPWM ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการควบคุมการชดเชยแรงดันสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
2010	Mekri, Machmoun, Ait Ahmed, and Mazari	นำเสนอการควบคุมแรงดันชดเชย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มการควบคุมแรงดันชดเชยแบบเชิงเส้นประกอบด้วย วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) วิธีการควบคุมแบบ RST กลุ่มการควบคุมแรงดันชดเชยแบบไม่เป็นเชิงเส้นประกอบด้วย วิธีฮิสเตอร์ซิสแบบคงค่าแถบ วิธีฮิสเตอร์ซิสแบบปรับค่าแถบ วิธีฮิสเตอร์ซิสร่วมกับพีซีลอจิก ซึ่งผลการควบคุมในกลุ่มของไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเป็นเชิงเส้น

จากตารางที่ 2.5 สามารถเรียนรู้วิธีการควบคุมวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการควบคุมแรงดันชดเชย รวมไปถึงความยากง่ายและความซับซ้อนของวิธีการควบคุมแต่ละวิธี เพื่อนำไป

ประยุกต์ในงานวิจัยและนำไปพัฒนาอีกต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Soares, Verdelho, and Marques	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยทำการควบคุมค่าผลต่างระหว่างค่าแรงดันสูงสุดกับค่าแรงดันต่ำสุด ($\Delta v_{dc} = v_{dc,max} - v_{dc,min}$) แทนการควบคุม v_{dc} โดยตรง
1998	Bruyant, Machmoum, And Chevrel	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุม 2 ชนิด คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ และแบบ RST การออกแบบตัวควบคุมทั้งสองชนิดดังกล่าว อาศัยสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุ สำหรับการออกแบบตัวควบคุม
2001	Z. Wang, Q. Wang, Yao, and Liu	นำเสนอการออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรงและค่าตัวเก็บประจุสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอการหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรรองความถี่สวิตช์สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และการนำตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเข้าไปเชื่อมต่อภายในอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ
2002	Rahmani, Al-Haddad, and Fnaiech	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และนำเสนอการนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้เข้าไปเชื่อมต่อภายในอัลกอริทึมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

		วิธี SRF
2003	Kanan, Assi, Sleiman, Aoun, Asmar, and Al-Haddad	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม รวมทั้งยังนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยเช่นกัน
2007	Zawawi, Youssef, and Sebakhy	นำเสนอการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยควบคุมค่า Δv_{dc} แทนการควบคุม v_{dc} โดยตรง

จากตารางที่ 2.6 นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามวัตถุประสงค์ อีกทั้งความซับซ้อนในการออกแบบไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการวิจัย และการพัฒนาประสิทธิภาพของการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมให้เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

3.1 บทนำ

ปัจจุบันปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ลดน้อยลงหรือหมดไป ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์มอนิกจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก 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 ที่เป็นสัญญาณรายคาบนิยามให้นุกรมฟูรีเยร์ที่อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติดังอธิบายไว้ในสมการที่ (3-1) เมื่อ $f(t)$ คือ สัญญาณรายคาบใด ๆ ที่ขึ้นอยู่กับเวลา t

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

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

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

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

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

จากสมการข้างต้น T คือ คาบของสัญญาณ (วินาที)

n คือ อันดับของฮาร์โมนิก

ω_0 คือ ความถี่มูลฐานเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

3.3 นิยามของฮาร์โมนิกแบบต่าง ๆ

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

อินเตอร์ฮาร์โมนิก (*interharmonic*) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

คาแรคเตอร์ิสติกฮาร์โมนิก (*characteristic harmonic*) คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งมีอันดับฮาร์โมนิกเป็นไปตามสมการที่ (3-5)

$$n = kp \pm 1 \quad (3-5)$$

จากสมการข้างต้น n คือ อันดับของฮาร์โมนิก

k คือ จำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

p คือ จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

นัยคาแรคเตอร์ิสติกฮาร์โมนิก (*non-characteristic harmonic*) คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า เช่นเดียวกับกรณีคาแรคเตอร์ิสติกฮาร์โมนิกแต่มีอันดับฮาร์โมนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (3.5)

ทริเพิลฮาร์โมนิก (*triple harmonic*) คือ ฮาร์โมนิกที่มีอันดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 6 และ 9 เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอันดับศูนย์ (*zero sequence*) ในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวทรัล (George, 2001)

3.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (voltage distortion factor)

มาตรฐานสากล IEEE ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion: %THD) เป็นการบ่งบอกปริมาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาจบ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion: %THD_v) ดังสมการที่ (3-6) ดังนี้

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

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

-อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค เช่น เต้าหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค เครื่องเชื่อมไฟฟ้า แบบอาร์ค 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) และกำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) เพิ่มขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงลดลง

-ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ 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 ไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิด (Arrillaga and Watson, 2003)

-ผลของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) ในระบบสื่อสารซึ่งอาจส่งผลให้ข้อมูลในการสื่อสารมีความคลาดเคลื่อนได้

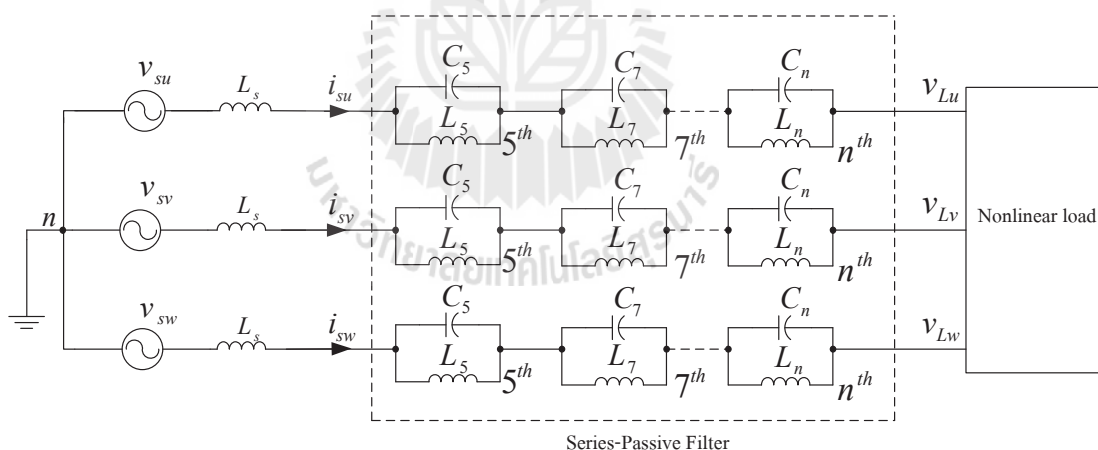
3.7 การกำจัดฮาร์มอนิก

การกำจัดฮาร์มอนิกมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก รวมถึงต้องมีความเข้าใจระบบไฟฟ้ากำลังที่มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากความเข้าใจฮาร์มอนิกดังกล่าวจะส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษาค้นคว้า พบว่า วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิกมีด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

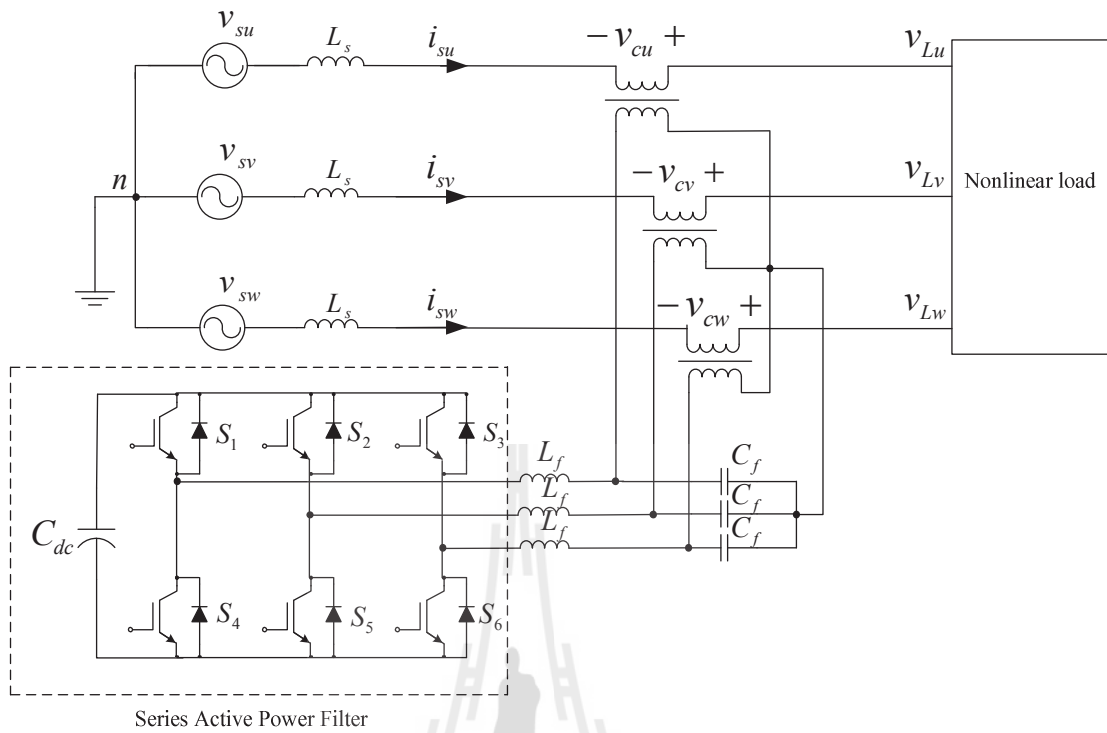
-การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (passive power filter) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งวงจรดังกล่าวทำหน้าที่ดูดซับฮาร์มอนิก ซึ่งปกติจะเป็นฮาร์มอนิกบางอันดับเท่านั้น ชนิดของวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป คือ วงจรกรองแบบดีจูน วงจรกรองแบบจูน และวงจรกรองผ่านสูง (Jou, Wu J-C., and Wu K-D., 2001)

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

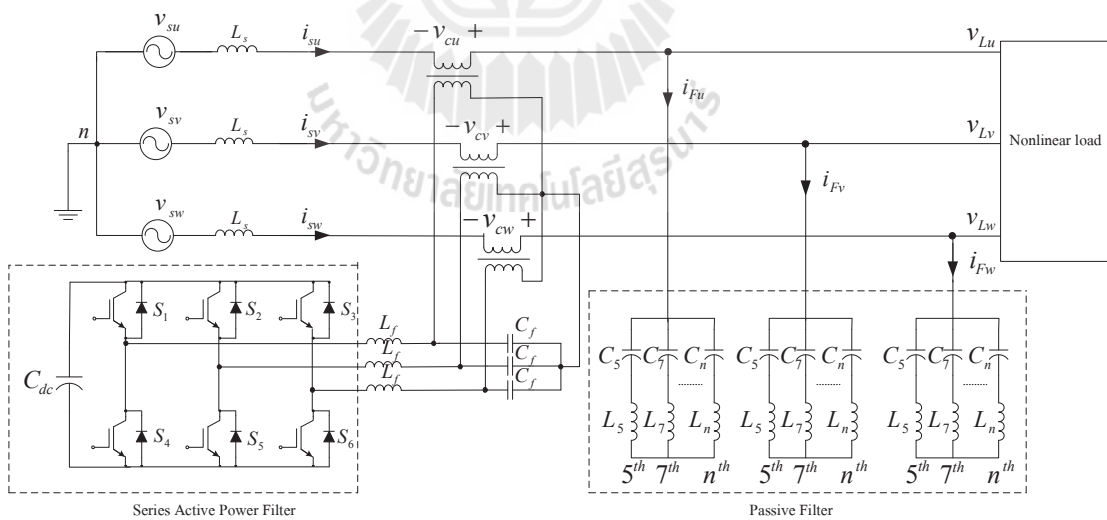
-การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (hybrid power filter) คือ การผสมผสานนำข้อดีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังพาสซีฟมาใช้ร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1 คือ การผสมผสานกันระหว่างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนาน (Na, Jian, and Dianguo, 2006) และในรูปที่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



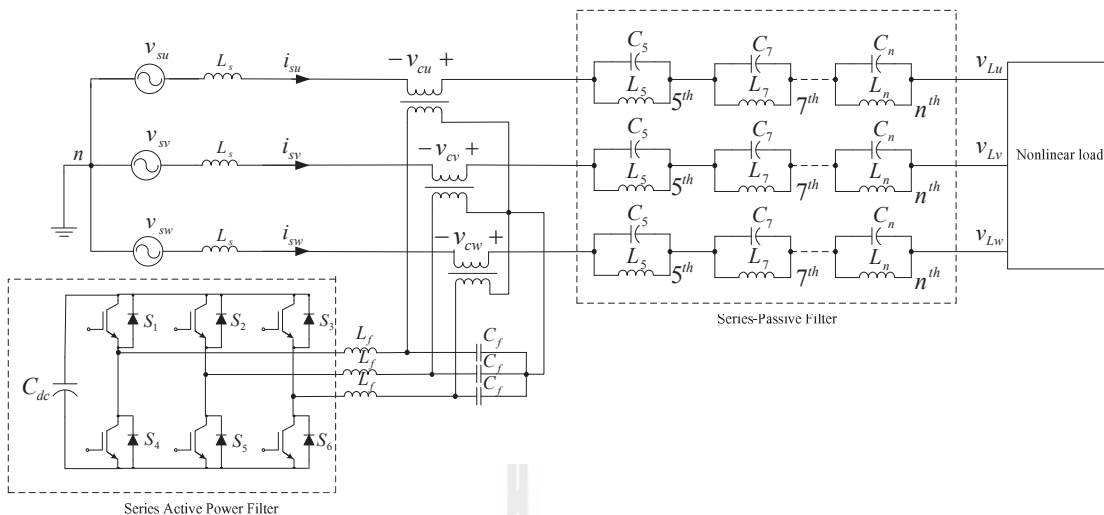
รูปที่ 3.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ



รูปที่ 3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ



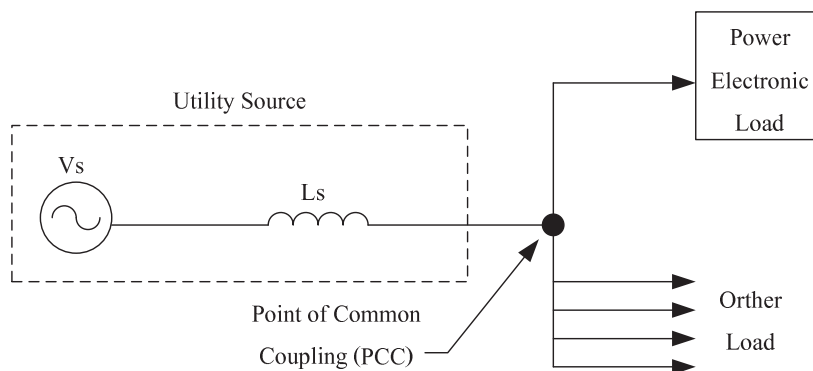
รูปที่ 3.3 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 1



รูปที่ 3.4 วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์แบบที่ 2

3.8 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่บ่งบอกถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสำหรับอ้างอิงในระดับสากลจะใช้การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างกริดไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งขีดจำกัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกและขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ 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 ₁ (%)
	n<11	11<n<17	17<n<23	23<n<35	35≤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 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป
(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 ₁ (%)
	$n < 11$	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$23 < n < 35$	$35 \leq n$	
<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 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป
(แรงดัน >161 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{sc}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					TDD ₁ (%)
	$n < 11$	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$23 < n < 35$	$35 \leq n$	
<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 อันดับฮาร์โมนิก นอกจากนี้การพิจารณาขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับคู่ (even harmonic limit) ของตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 จะมีค่าเท่ากับ 25% ของขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับเลขคี่ (odd harmonic limit) ของแต่ละตาราง และเมื่อพิจารณามาตรฐานจากตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 สังเกตได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกที่ยอมรับได้ 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 กรอบมาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับ 3 5 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7% ในขณะที่อันดับ 11 13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5% และค่า

ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมแบบ %TDD_I (total demand distortion) ต้องไม่เกิน 8% โดยที่ค่า %TDD_I ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (3-7) ดังนี้

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

3.9 สรุป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับฮาร์โมนิกถือเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาค้นหาเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งความหมายของฮาร์โมนิก นิยามของฮาร์โมนิก ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิก การกำจัดฮาร์โมนิก และข้อกำหนดมาตรฐานของฮาร์โมนิกที่ได้นำเสนอในบทนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์โมนิกในบทต่อไป

บทที่ 4

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

4.1 บทนำ

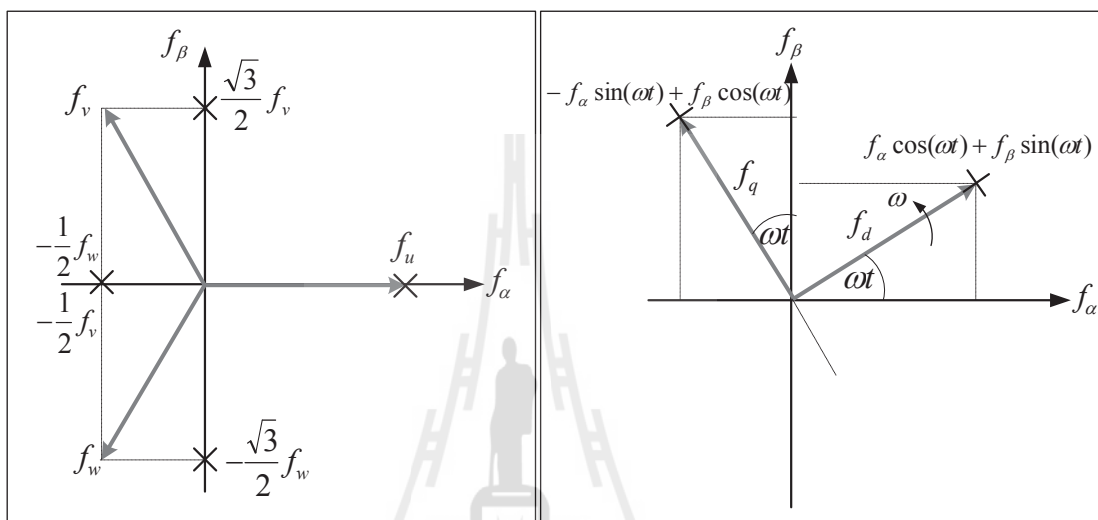
การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง สำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และจากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกันทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีการบออ้างอิงเชิงโคโรน่า วิธีดีคิวเอฟ วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง ประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธีการตรวจจับเชิงโคโรน่า และวิธีการตรวจจับเชิงโคโรน่าประกอบกับวิธีฟูริเยร์ อีกทั้งยังนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิว นอกจากนี้ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกและมีการทดสอบสมรรถนะการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 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 จากขั้นตอนการแปลงปริมาณไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้น เรียกว่า การแปลงของปาร์ค (Park's Transformation) โดยมีแผนภาพแสดงการแปลงปริมาณต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.1

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

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

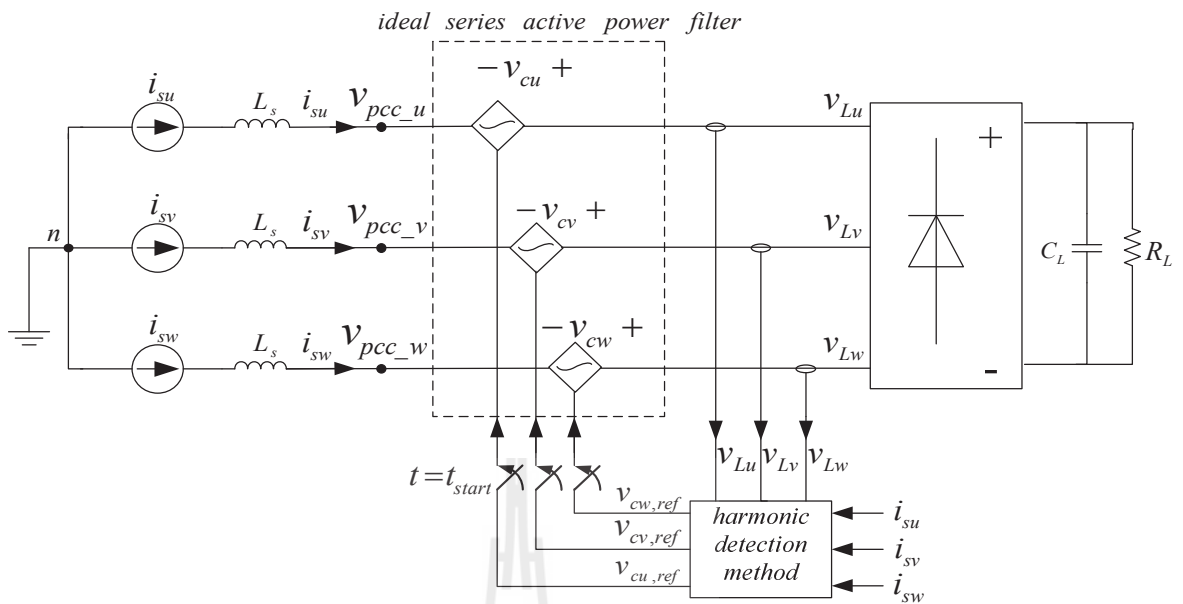


(ก) การแปลงแกนสามเฟสเป็นแกน α และ β (ข) การแปลงแกน α และ β เป็นแกนดัดคิว
รูปที่ 4.1 แผนภาพการแปลงของปาร์ก

จากรูปที่ 4.1 (ก) งานวิจัยได้พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟสสมดุลดั่งมุมเฟสของ f_u , f_v และ f_w จะทำมุมห่างกันเท่ากับ $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน จึงไม่พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence) สำหรับแกน α และ β จะต้องทำมุมตั้งฉากโดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส u ในขณะที่แกนดัดคิวทำมุมตั้งฉากกันหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω ดังรูปที่ 4.1 (ข)

4.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

การจำลองสถานการณ์ในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก จึงไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวควบคุมการฉีดแรงดันชดเชย การควบคุมแรงดันบัลไฟตรง และการทำงานของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ดังนั้นจึงเลือกใช้การจำลองของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอุดมคติ ซึ่งทำหน้าที่ฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ คือค่าแรงดันชดเชยจะมีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ

การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากรูปดังกล่าวใช้แหล่งจ่ายกระแสขนาด 17 แอมแปร์ต่อเฟส ตัวเหนี่ยวนำทางด้านแหล่งจ่าย (L_s) เท่ากับ 0.1 mH ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 0.1 M Ω ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ 1 μ F 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 และเมื่อพิจารณาการคิดแรงดันชดเชยของเฟส u จะมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (4-3)

$$v_{pcc_u} = v_{Lu} - v_{cu} \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4-3) เมื่อพิจารณาการทำงานในเฟส u ที่ไม่มีการคิดแรงดันชดเชย (v_{cu}) ค่าแรงดันที่จุด PCC (v_{pcc_u}) จะเท่ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลด (v_{Lu}) ซึ่งจะมีการผิดเพี้ยนของรูปปร่างสัญญาณ จึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ แต่ถ้าทำการคิดแรงดันชดเชยดังสมการที่ (4-3) ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดหักลบค่าแรงดันชดเชยจึงทำให้ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณ ไซน์มากขึ้น ทั้งนี้

เนื่องจากการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นส่งผลให้รูปสัญญาณมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลดน้อยลง ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานจะยังคงเท่าเดิม สำหรับผลการทดสอบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในแต่ละเฟส (Total Harmonic Voltage Distortion: %THD_{v,k}) ดังสมการที่ (4-4) โดยการเฉลี่ยเป็น %THD_{v,av} ตามสมการที่ (4-5) เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

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

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

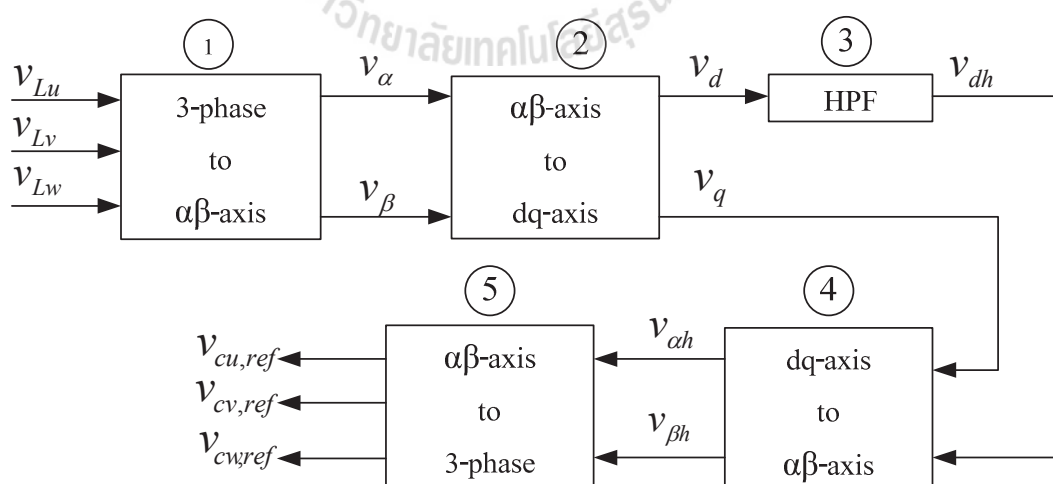
จากสมการข้างต้น v_n คือ ค่าของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

v_1 คือ ค่าของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

k คือ เฟสของแรงดัน

4.4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการอ้อมอิงซิงโครนัส

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



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

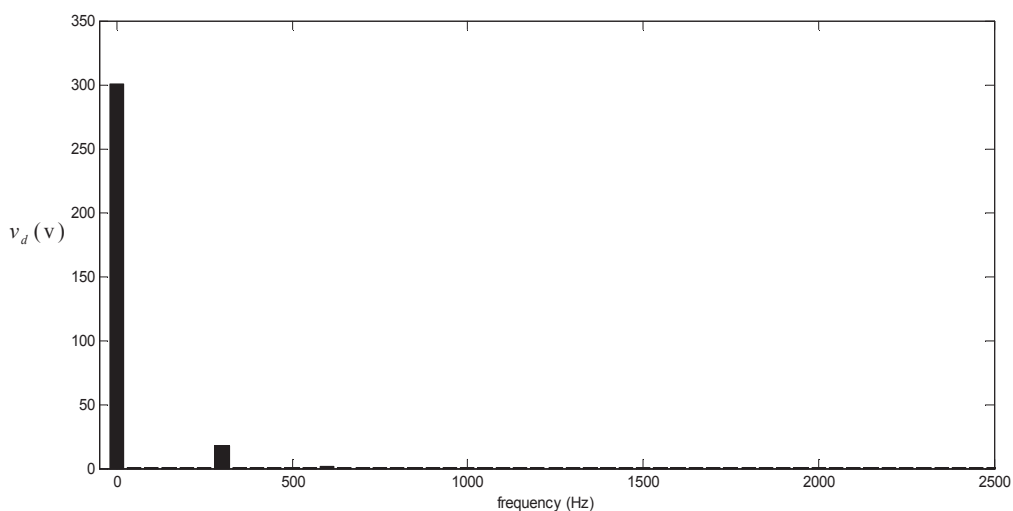
ขั้นตอนที่ 1 แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่โหลด คือ v_{Lu} , v_{Lv} และ v_{Lw} เป็นแรงดันไฟฟ้า บนแกน α และ β (v_α , v_β) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-6)

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

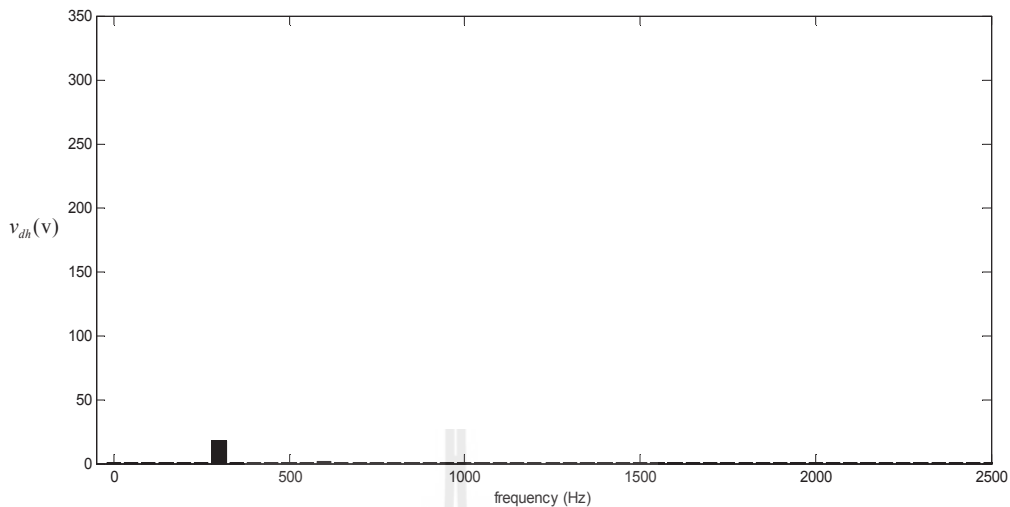
ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้แรงดันไฟฟ้าบนแกน α และ β จะดำเนินการแปลงค่าไปยังบนแกนหมุนดีคิว (v_d , v_q) ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-7) โดยค่า ω ที่ปรากฏในสมการมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมของระบบ ซึ่ง v_d และ v_q จะหมุนด้วยอัตราเร็วเท่ากับความเร็วเชิงมุม ในประเทศไทยมีความถี่เชิงมุมเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 314.16 เรเดียนต่อวินาที

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

ขั้นตอนที่ 3 คือ การแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐาน เมื่อพิจารณาบนแกนหมุนดีคิวที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่แรงดันฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ ด้วยเหตุนี้การแยกปริมาณฮาร์มอนิก (v_{dh}) ออกจากแรงดันรวมบนแกนดีคิวสามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีคิวรูปที่ 4.4 (ก) จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานจะปรากฏที่ 0 Hz ซึ่งเป็นสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกจะปรากฏที่ความถี่อื่น ๆ ที่มากกว่า 0 Hz ซึ่งเป็นสัญญาณกระแสสลับ การแยกปริมาณทั้งสองออกจากกันจะใช้วงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter: HPF) โดยในงานวิจัยนี้เลือกความถี่ตัดของ HPF ที่ 5 Hz และภายหลังผ่าน HPF สเปกตรัมของแรงดันบนแกนดีคิวจะเป็นดังรูปที่ 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)

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

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

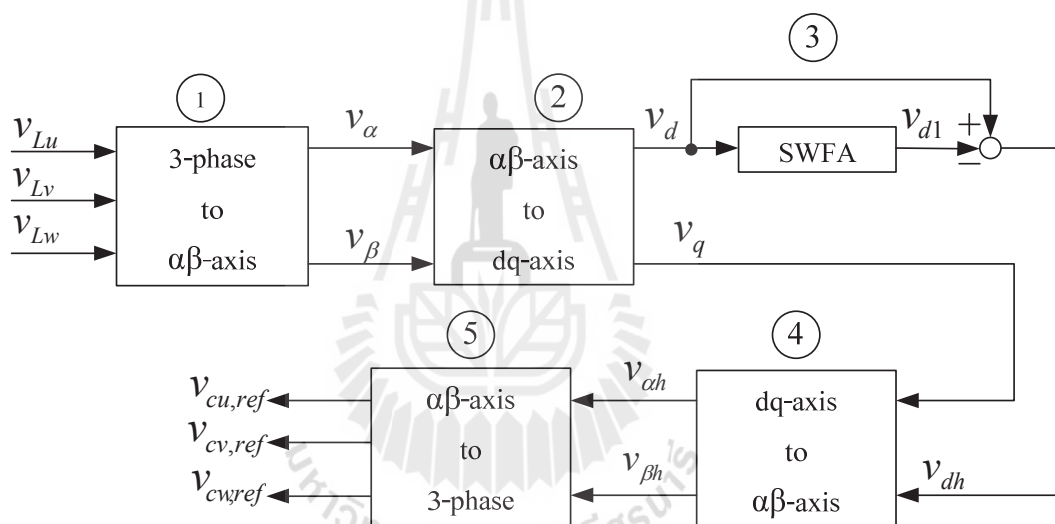
$$\begin{bmatrix} v_{cu,ref} \\ v_{cv,ref} \\ v_{cw,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha h} \\ v_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

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 ออกจาก

ปริมาณที่ความถี่มูลฐาน โดยวิธี DQF จะใช้วิธี SWFA (Sliding Window Fourier Analysis) ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกแทนการใช่วงจรกรองผ่านสูง

การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดี จะเริ่มพิจารณาจากสมการที่ (4-10) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูริเยร์ ซึ่งในสมการที่ (4-10) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันกระแสตรง และองค์ประกอบของแรงดันกระแสสลับ ในการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกออกจากปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน (v_{d1}) ซึ่งปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานพิจารณาได้จากสมการที่ (4-11) โดยจะคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรงเท่านั้น ซึ่งการคำนวณหาค่า A_{0d} สามารถได้จากการแทนค่า $h=0$ 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} ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้นี้ ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}^{(new)}$ ในทุกรอบของการรับข้อมูลค่าแรงดัน v_d ค่าใหม่ทำให้ได้ค่าแรงดัน v_{d1} ในทุกรอบการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที หลังจากที่ได้คำนวณค่าแรงดัน v_{d1} นำค่าแรงดันดังกล่าวไปหักลบออกจากค่าแรงดัน v_d จะได้ค่า

แรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมดในระบบบนแกนดี (v_{dh}) หลังจากนั้นดำเนินการคำนวณแรงดันอ้างอิงตามขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 ในวิธีการของ SRF สำหรับรายละเอียดการคำนวณด้วยวิธี SWFA นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.6

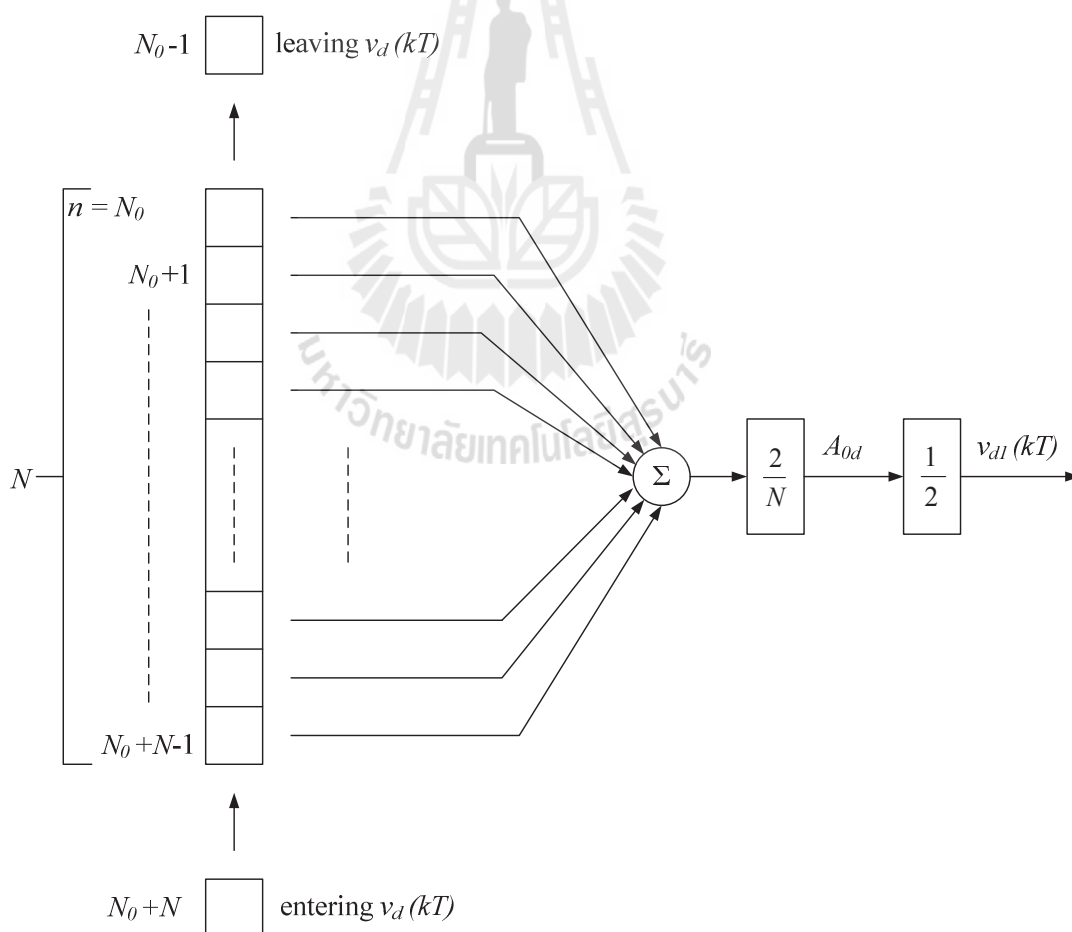
$$v_d(kT) = \frac{A_{0d}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \quad (4-10)$$

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

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

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

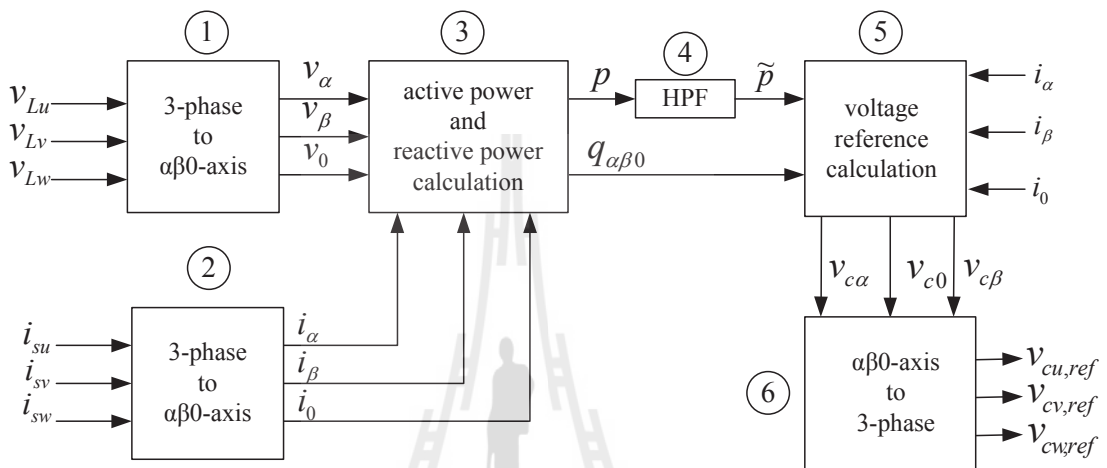
$$[A_{0d}^{(new)}] = [A_{0d}^{(old)}] - \frac{2}{N} [v_d[N_0 - 1]T] + \frac{2}{N} [v_d[N_0 + N]T] \quad (4-14)$$



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)

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

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

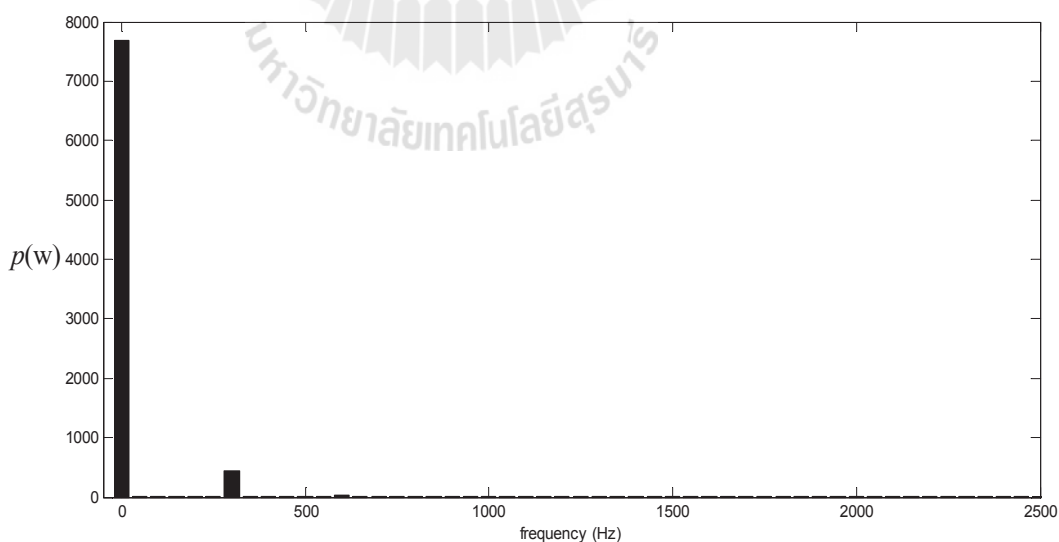
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix}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

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

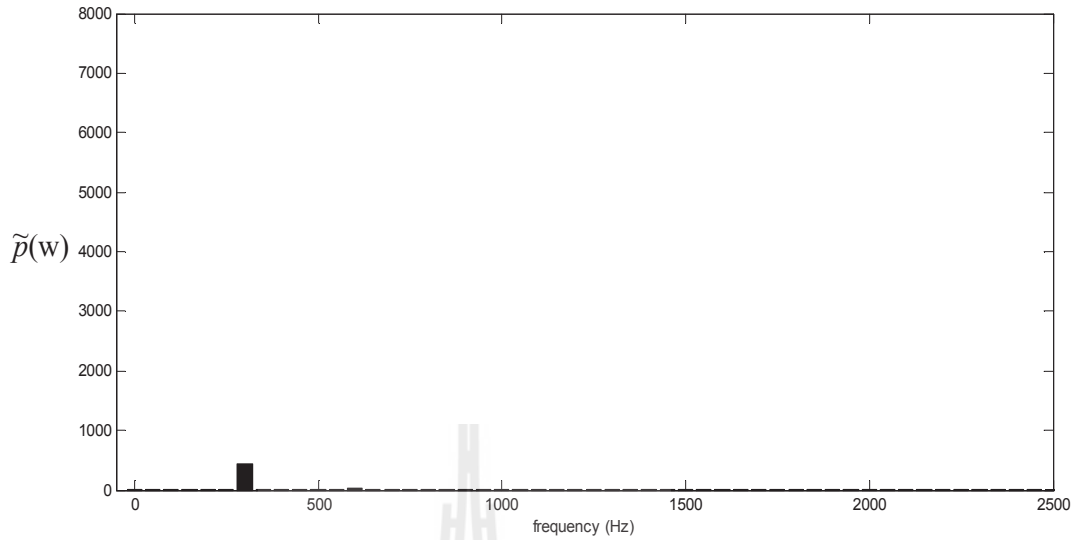
$$p = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (4-17)$$

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

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



(ก) ก่อนผ่าน HPF



(ข) หลังผ่าน HPF

รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟก่อนและหลังผ่านวงจรกรองผ่านสูง

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

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

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

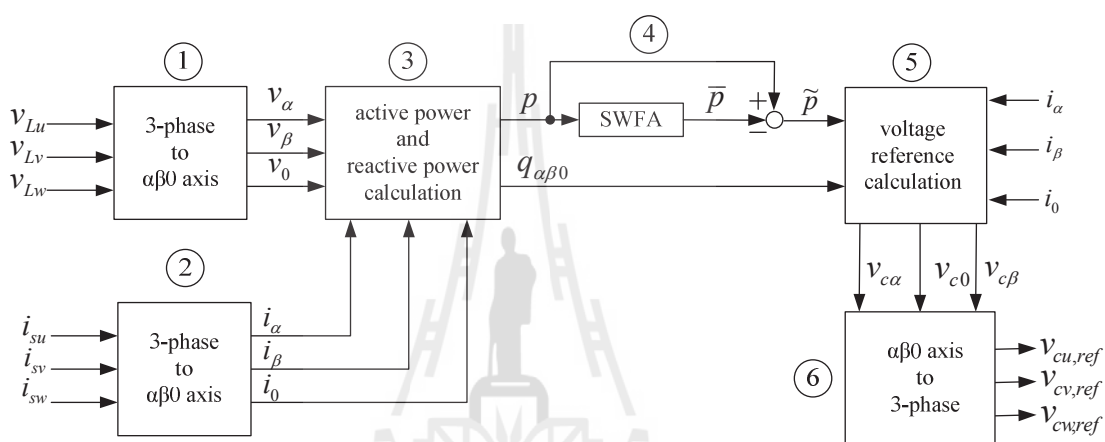
$$\mathbf{v}_{c(\alpha\beta)} = \mathbf{v}_{ph(\alpha\beta)} + \mathbf{v}_{q(\alpha\beta)} \quad (4-21)$$

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

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

4.7 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF เป็นการพัฒนาต่อยอดจากวิธี PQ ซึ่งแผนภาพการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF จะแสดงดังรูปที่ 4.9 ในการคำนวณหาค่าแรงดันด้วยวิธี PQF จะแตกต่างจากวิธี PQ ในส่วนของ การแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังแอกทีฟ 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}

ค่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้า 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

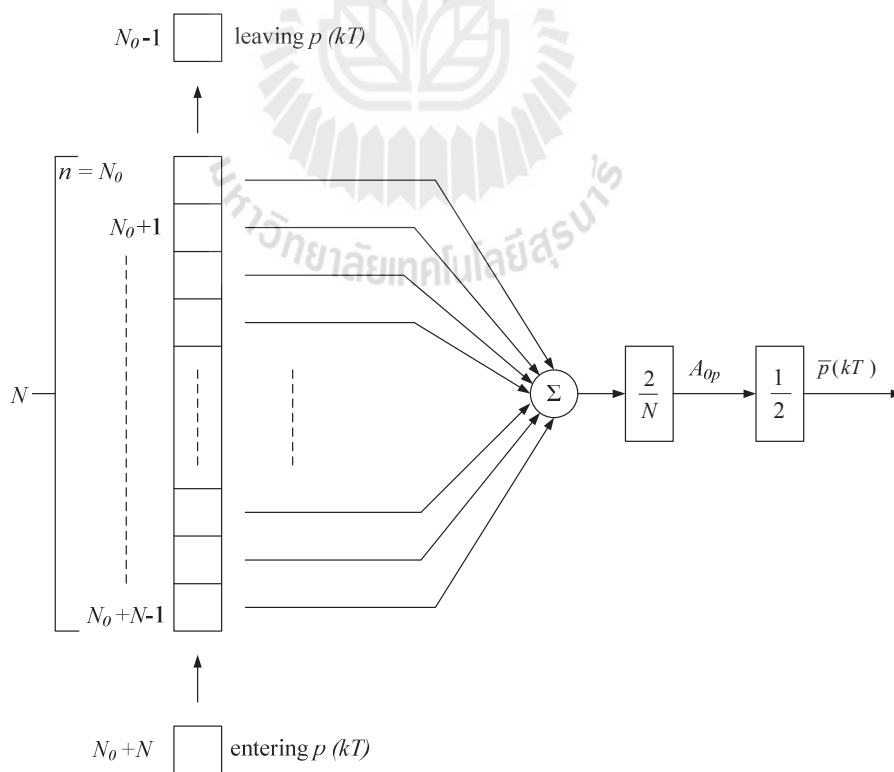
$$p(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{4-23}$$

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

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

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

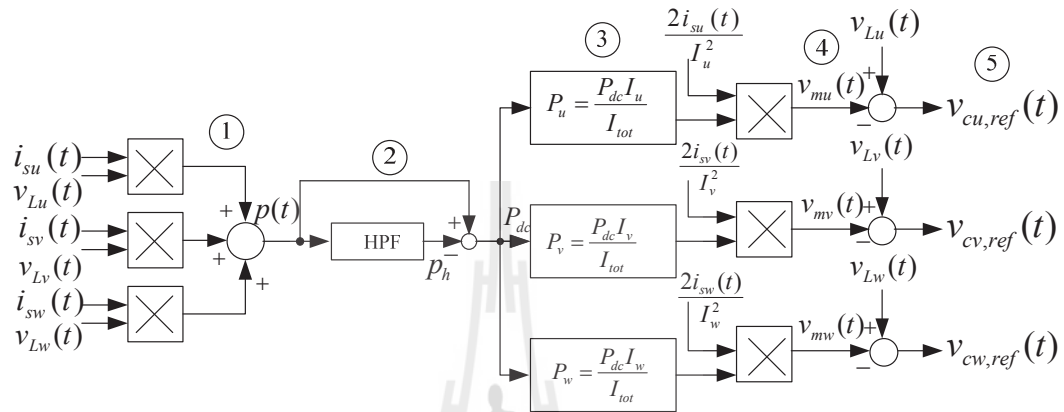
$$[A_{0p}^{(new)}] = [A_{0p}^{(old)}] - \frac{2}{N} [p[N_0 - 1]T] + \frac{2}{N} [p[N_0 + N]T] \tag{4-27}$$



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 จำนวนค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟในแต่ละเฟส และนำค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟในแต่ละเฟสมารวมกันจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม $p(t)$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-28)

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

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการแยกปริมาณมูลฐาน (องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง: P_{dc}) ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมออกจากปริมาณฮาร์มอนิก (องค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ: p_h) โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (HPF) เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกนสามเฟสกับค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกน α , β และ 0 พบว่าจะมีปริมาณแอมพลิจูดและความถี่ของอันดับฮาร์มอนิกแต่ละอันดับมีค่าเท่ากัน ในการเลือกความถี่ตัดผู้วิจัยจึงเลือกที่ความถี่ 5 Hz (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 ($I_{tot} = I_u + I_v + I_w$)

$$P_u = \frac{P_{dc}I_u}{I_{tot}} \quad (4-29)$$

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

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

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

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

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

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

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

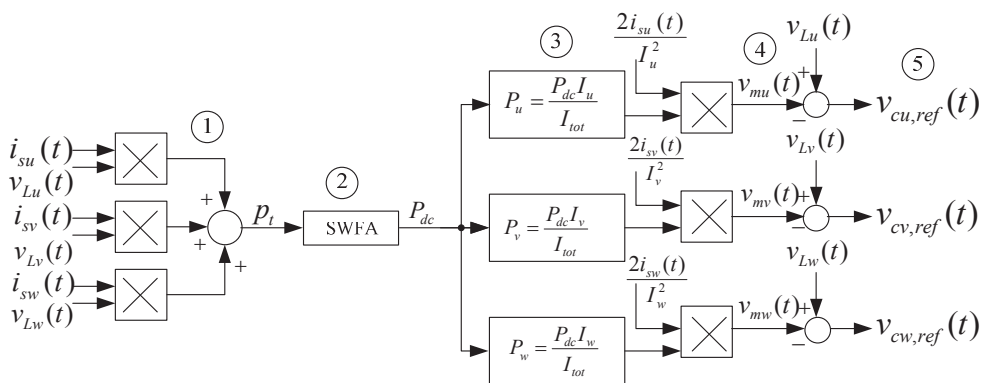
$$v_{cu,ref}(t) = v_{Lu}(t) - v_{mu}(t) \tag{4-35}$$

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

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

4.9 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบด้วยวิธีฟูริเยร์

การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบด้วยวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี SDF เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี SD ในหัวข้อที่ 4.8 โดยมีแผนภาพการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.12 ในการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี SDF จะแตกต่างจากวิธี SD ในส่วนของการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังไฟฟ้าแยกที่ประมวลจากปริมาณที่ความถี่มูลฐาน 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

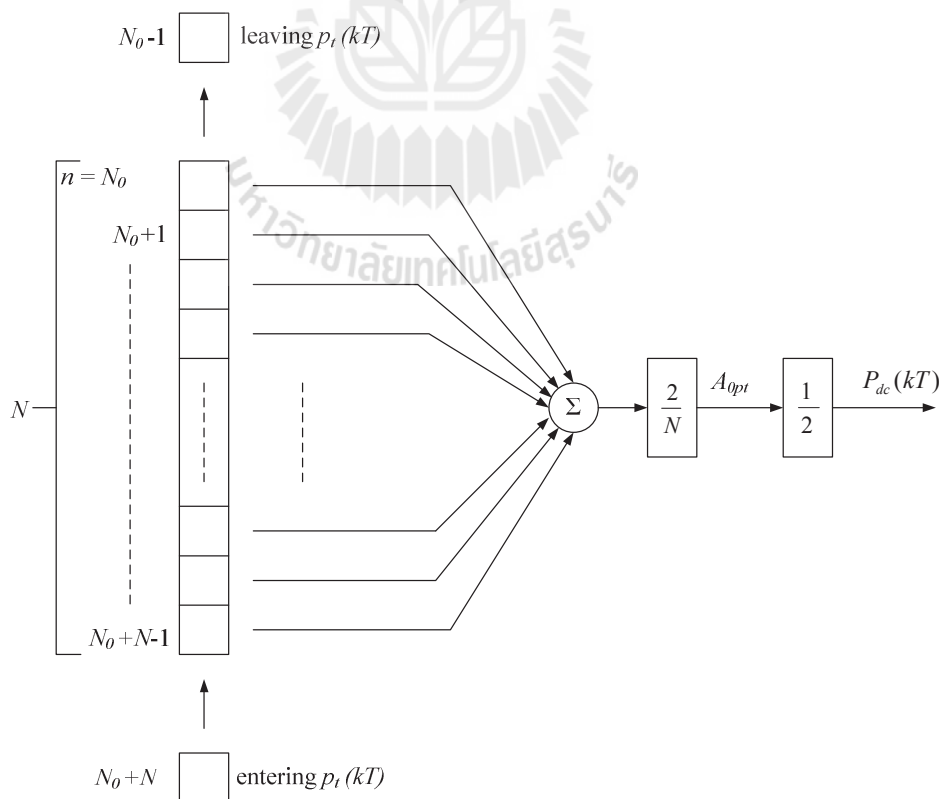
$$p_t(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{4-38}$$

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

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

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

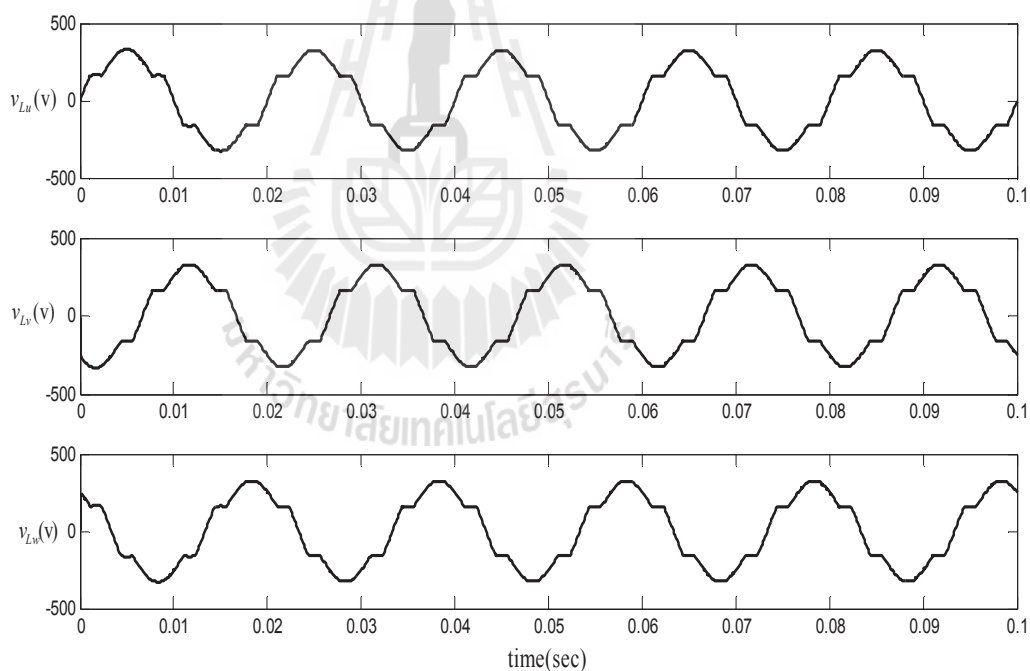
$$[A_{0p_t}^{(new)}] = [A_{0p_t}^{(old)}] - \frac{2}{N} [p_t[N_0 - 1]T] + \frac{2}{N} [p_t[N_0 + N]T] \tag{4-42}$$



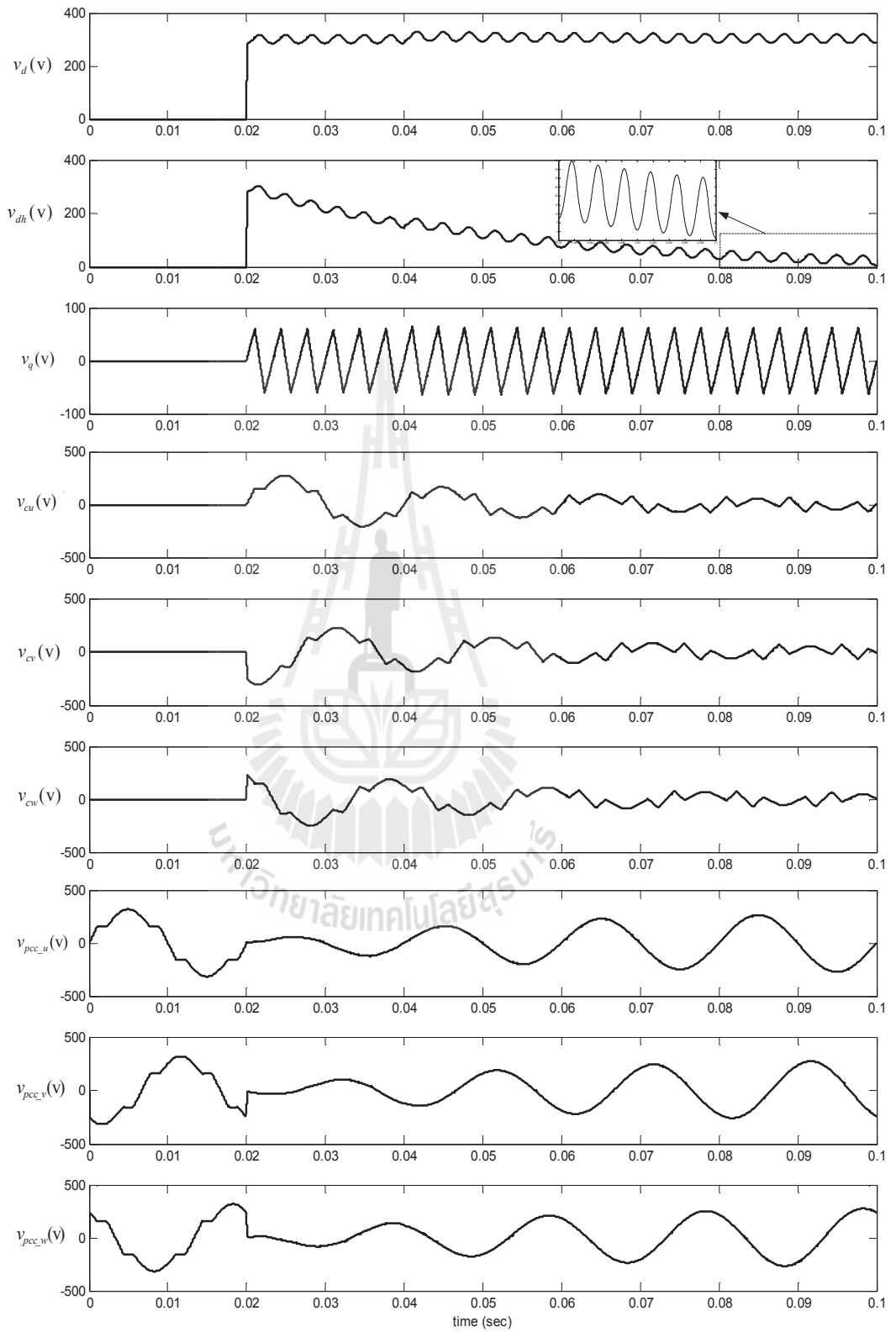
รูปที่ 4.13 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณกำลังแอกทีฟรวมที่ความถี่มูลฐาน

4.10 ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิก

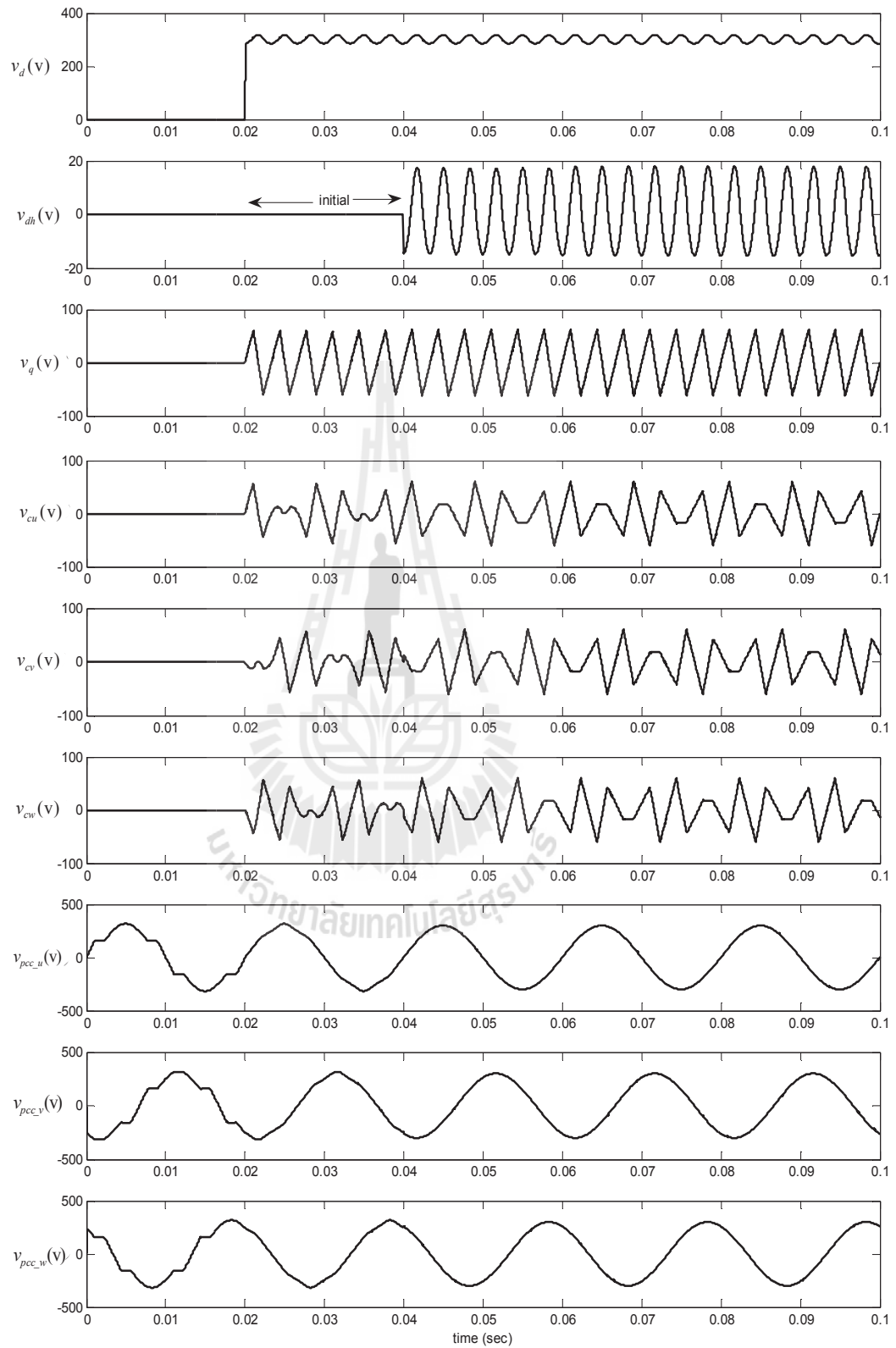
การจำลองสถานการณ์การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้จะใช้โครงสร้างการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.2 โดยดัชนีชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกใช้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในแต่ละเฟสภายหลังการชดเชย ($\%THD_{v,av}$) ตามสมการที่ (4.5) เป็นสำคัญ เมื่อพิจารณาแรงดันที่จุด PCC ก่อนการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก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



รูปที่ 4.14 แรงดันสามเฟสก่อนการชดเชย



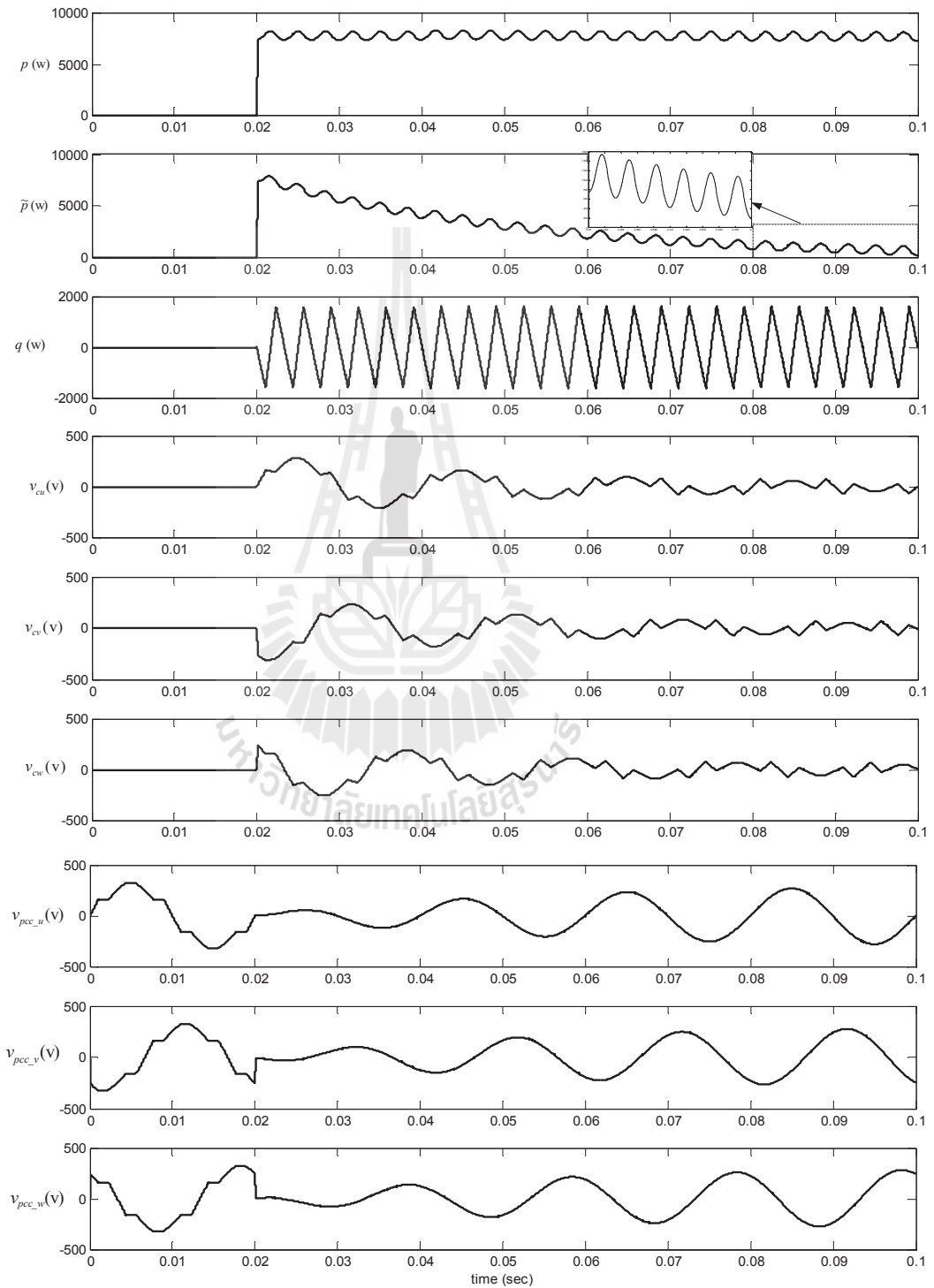
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SRF



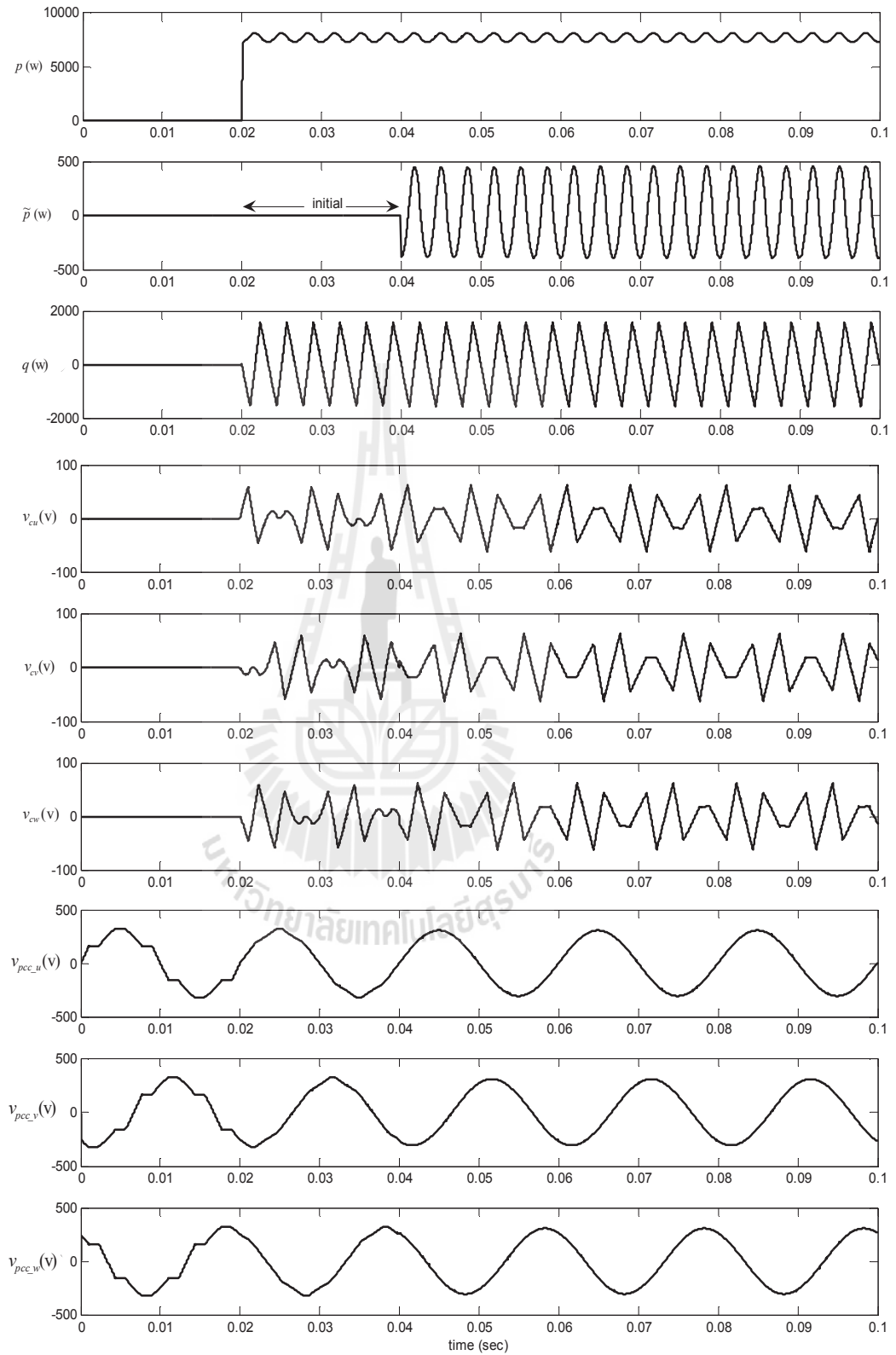
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์โมนิกที่ใช้วิธี DQF

จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SRF และวิธี DQF ตามลำดับ โดยการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 วิธี จะเหมือนกันทุกประการแต่จะแตกต่างกันเพียงการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกออกจากปริมาณแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ในส่วนของวิธี SRF จะใช้การแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ตัด 5 Hz 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 แกวที่ 4 ถึงแกวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{cu}, v_{cv}, v_{cw}) เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป แรงดันชดเชยจะมีแอมพลิจูดที่สูงแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที เนื่องจากการแยกปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.16 แกวที่ 4 ถึงแกวที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟสเช่นกัน จะสังเกตได้ว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที เป็นผลของแรงดันบนแกนคิวที่ชดเชยเข้าสู่ระบบเท่านั้น และเมื่อเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปจึงชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกทั้งบนแกนดีและแกนคิว รวมถึงชดเชยกำลังรีแอกทีฟด้วยเช่นกัน ในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แกวที่ 7 ถึงแกวที่ 9 เป็นแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาทีแรงดันที่จุด PCC มีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด และเมื่อเวลา 0.02 วินาที เป็นต้นไปแรงดัน

ที่จุด PCC จึงมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ที่มีการเริ่มชดเชยแรงดันที่เวลา 0.02 วินาที สามารถดู %THD_v หลังการชดเชยได้ในตารางที่ 4.1



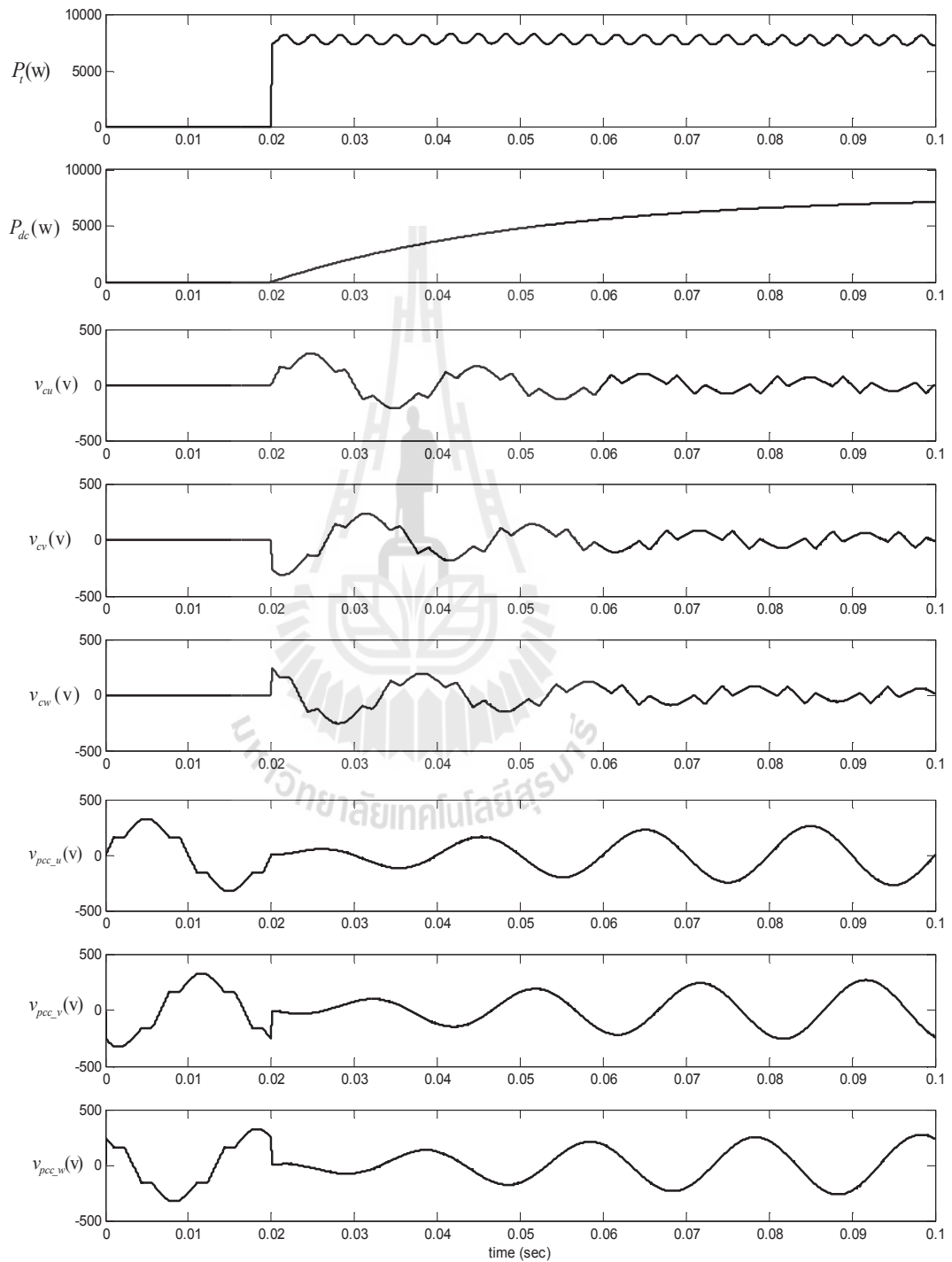
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ



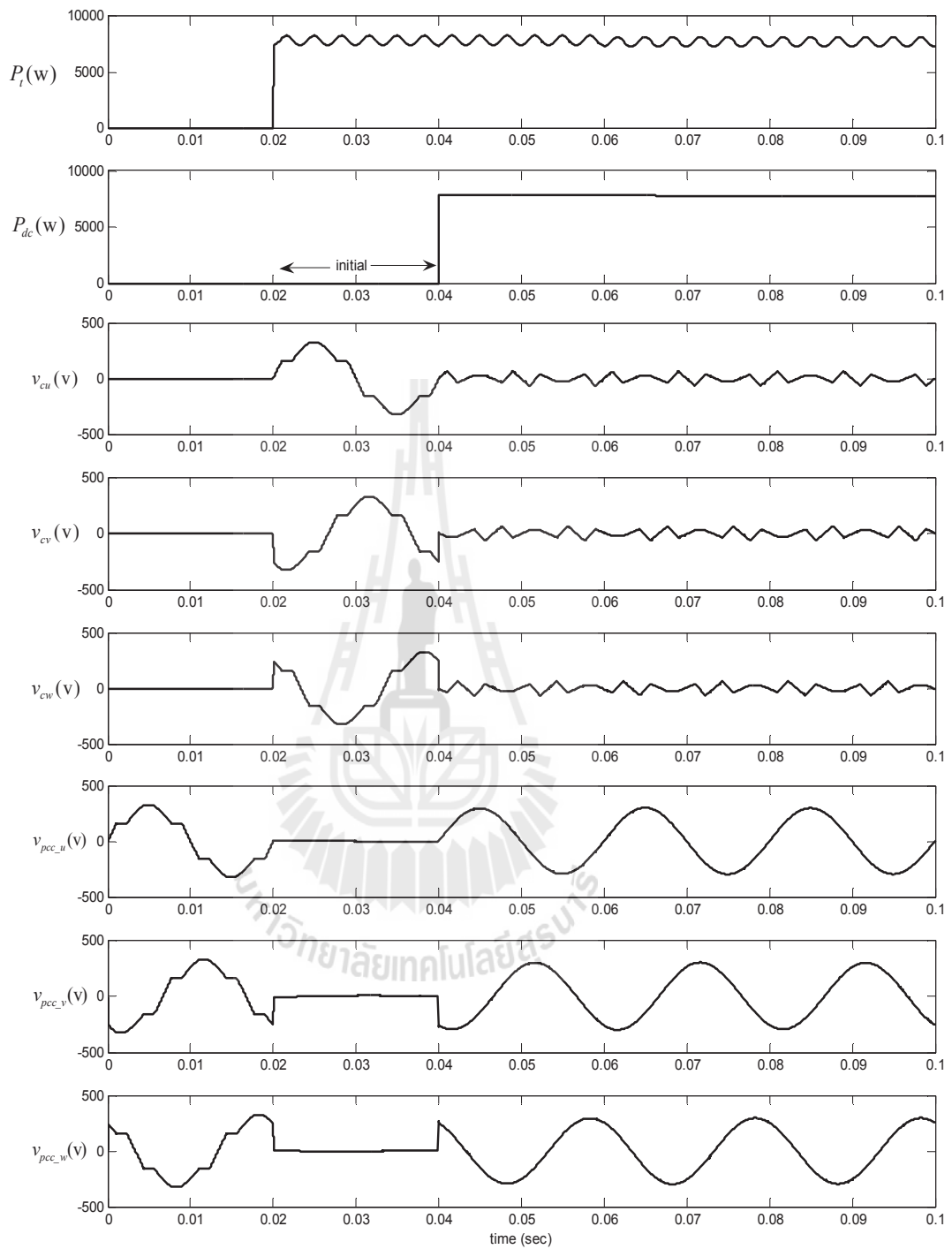
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQF

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 เป็นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี PQ และวิธี PQF ตามลำดับ โดยในการจำลองสถานการณ์จะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ แต่จะแตกต่างกันเพียงวิธีการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน ซึ่งวิธี PQ จะใช้วงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ตัด 5 Hz ในการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก และวิธี PQF จะใช้ SWFA ในการแยกกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกออกจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน โดยการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 วิธี จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.02 วินาที ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แฉกที่ 1 เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) เมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวจะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานรวมกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก ส่วนในรูปที่ 4.17 เมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟผ่านวงจรกรองผ่านสูงจึงได้เป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก (\tilde{p}) จะปรากฏอยู่ในแฉกที่ 2 ของรูปดังกล่าว ซึ่งเมื่อพิจารณารูปดังกล่าวปรากฏว่าจะมีเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูงทำให้การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที และในรูปที่ 4.18 เมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟผ่าน SWFA ก็จะได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก และเมื่อพิจารณาในรูปดังกล่าวพบว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที จะเป็นช่วงของการเก็บข้อมูลในช่วงแรกเพื่อทำการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกในคาบถัดไป จากภาคผนวก ข. ค่าปริมาณกำลังไฟฟ้ามูลฐานจะปรากฏที่ความถี่ 0 Hz ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 จะปรากฏที่ความถี่ 300 Hz ในส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 จะปรากฏที่ความถี่ 600 Hz โดยเมื่อเทียบกับความถี่มูลฐานของกระแสและแรงดันเท่ากับ 50 Hz สำหรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (q) จะไม่ทำการแยกปริมาณฮาร์มอนิก เนื่องจากการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี PQ และวิธี PQF จะมีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไปพร้อมกัน ในรูปที่ 4.17 แฉกที่ 4 ถึงแฉกที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป แรงดันชดเชยจะมีแอมพลิจูดที่สูงแล้วจึงเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที เนื่องจากการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.18 แฉกที่ 4 ถึงแฉกที่ 6 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟสเช่นกัน จะสังเกตได้ว่าที่เวลา 0.02 วินาที ถึง 0.04 วินาที เป็นผลของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ชดเชยเข้าสู่ระบบ และเมื่อเวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไปจึงชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกพร้อม ๆ กับการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แฉกที่ 7 ถึงแฉกที่ 9 เป็นแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส เมื่อพิจารณาที่ก่อนเวลา 0.02 วินาที แรงดันที่จุด PCC มีลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่โหลด และเมื่อเวลา 0.02 วินาที เป็นต้นไปแรงดันที่จุด PCC ในรูปที่ 4.17 จะเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ตามเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูง และในรูปที่ 4.18 จะเริ่มมีลักษณะใกล้เคียง

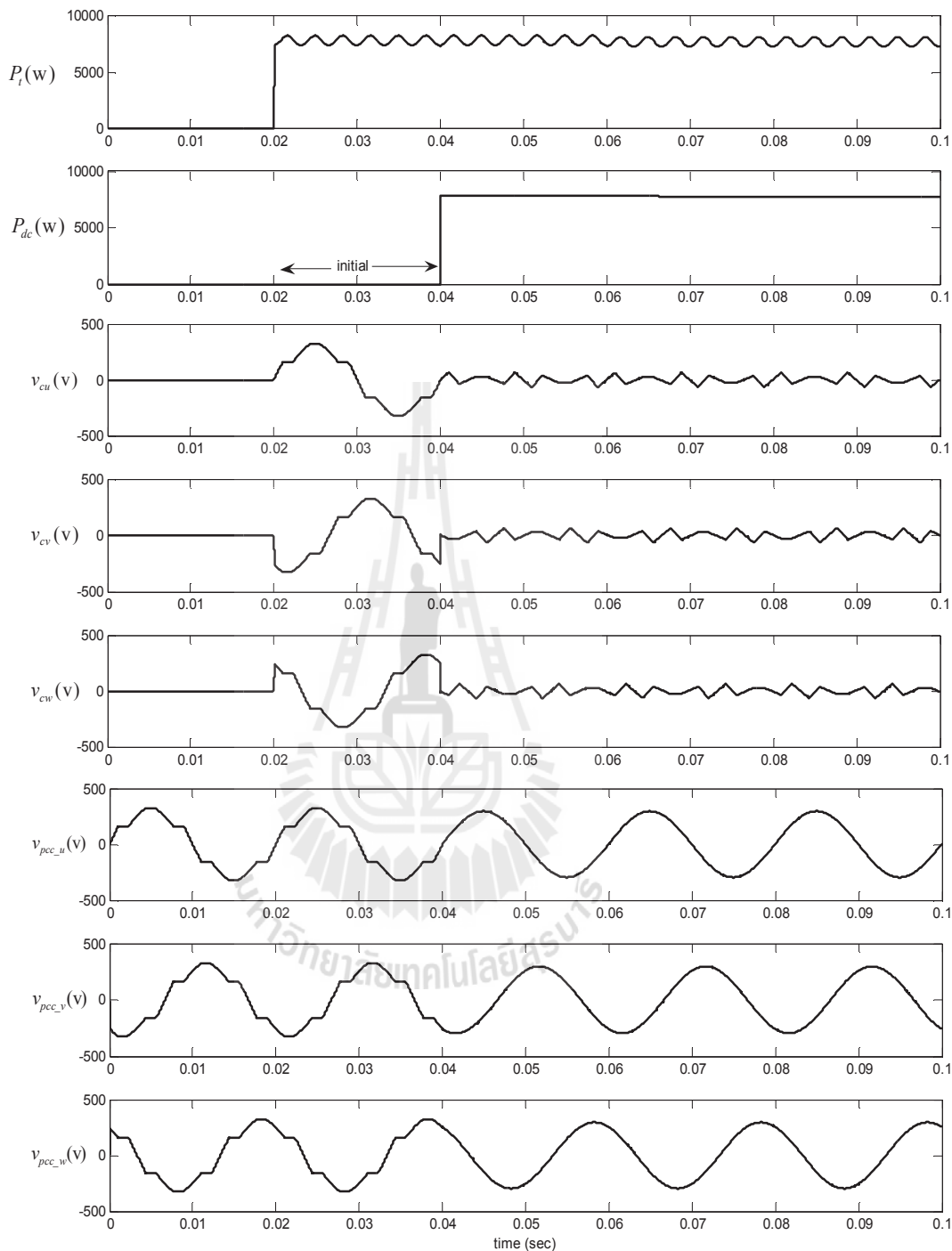
สัญญาณไซน์เมื่อเริ่มทำการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก สามารถดู $\%THD_v$ หลังการชดเชยได้ใน ตารางที่ 4.1



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 Hz ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก สำหรับการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมของวิธี SD จะเหมือนกับการแยก

กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของวิธี PQ แต่ในวิธี SD จะใช้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐาน (P_{dc}) มาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง โดยในการจำลองสถานการณ์จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่เวลา 0.02 วินาที ซึ่งในรูปที่ 4.19 จะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวม (p_r) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมดังกล่าวประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกรวมกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน ในรูปดังกล่าวเมื่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมผ่านวงจรกรองผ่านสูงจะได้เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐาน เมื่อพิจารณารูปกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานปรากฏว่าจะมีเวลาประวิงของวงจรกรองผ่านสูงทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.08 วินาที ในรูปที่ 4.19 แถวที่ 3 ถึงแถวที่ 5 เป็นแรงดันชดเชยสามเฟส เมื่อพิจารณาที่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไปแรงดันชดเชยจะมีค่าแอมพลิจูดที่เท่ากับแรงดันที่โหลดแล้วจึงเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลา 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 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมมูลฐานมีการเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เร็วกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง 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 ค่า

กำลังไฟฟ้าแอกทีฟแต่ละเฟสก็จะเท่ากับศูนย์โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (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 ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเริ่มฉีดแรงดันชดเชยที่ 0.04 วินาที แทนการฉีดที่ 0.02 วินาที สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 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 มาแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีข้อดีคือ ผู้วิจัยไม่ต้องเลือกความถี่ตัดและลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็ว ผลการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ผลลัพธ์ที่ดีและผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดี ข้อด้อย คือ เสียเวลาในการจัดเก็บข้อมูลในคาบแรก ในส่วนของการนำวงจรกรองผ่านสูงมาใช้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการใช้งาน ข้อด้อย คือ ผู้วิจัยต้องเลือกความถี่ตัดให้เหมาะสม มีช่วงเวลาประวิงจึงทำให้ลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวช้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิค SWFA มาใช้ในส่วนของการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้งานในอนาคต และงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี 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 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธี DQF สำหรับคำนวณแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

สำหรับงานวิจัยในบทที่ 4 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ
ได้รับการตีพิมพ์ และยื่นจดลิขสิทธิ์ดังนี้

- กองพล อารีรักษ์ และ เอนก จ้อยตระกูล, “บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ
สำหรับ โปรแกรม SIMULINK”, 2 พฤศจิกายน 2554, เลขที่คำขอ 266183

- เอนก จ้อยตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และ กองพันธ์ อารีรักษ์, “การตรวจจับแรงดัน
ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม”, *การประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35*, 14 ธันวาคม 2555, หน้า 489-492.



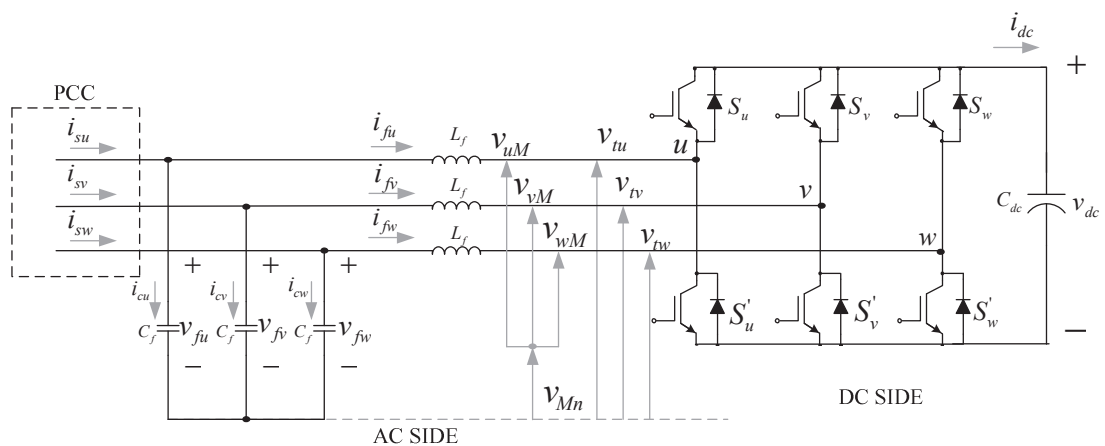
บทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

5.1 บทนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรรีโวลต์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แบบจำลองที่ได้จะใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมรวมถึงใช้ออกแบบตัวควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนแกนสามเฟส และดำเนินการแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคว โดยใช้หลักการแปลงของปาร์ค นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลกับการจำลองสถานการณ์ที่พึ่งพาชุดบล็อก SimPowerSystems ในโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะนำไปสู่การใช้งานทางด้านกรองกำลังแรงดันฮาร์มอนิกต่อไป

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนสามเฟส



รูปที่ 5.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

จากรูปที่ 5.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ใช้ไอจีบีทีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทางด้านเอซี (AC SIDE) ของวงจรดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสสามเฟสที่จุด PCC (Point of Common Coupling) ผ่านตัวเก็บประจุวงจรรอง (C_f) และตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง (L_f) ทั้งสามเฟส โดยมีแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ที่มีผลโดยตรงต่อการบิดแรงดันชดเชย (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีลักษณะรูปสัญญาณใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิง ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) ที่ได้จากการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาทางด้านดีซี (DC SIDE) พบว่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีบทบาทหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน เพื่อใช้สำหรับการบิดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบ รวมถึงแรงดันบัลไฟตรง (v_{dc}) ที่ตกคร่อม C_{dc} จะต้องได้รับการควบคุมเพื่อให้ได้จุดการทำงานที่เหมาะสม

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

$$v_{fu} = L_f \frac{di_{fu}}{dt} + v_{iu} \quad (5-1)$$

$$v_{fv} = L_f \frac{di_{fv}}{dt} + v_{iv} \quad (5-2)$$

$$v_{fw} = L_f \frac{di_{fw}}{dt} + v_{iw} \quad (5-3)$$

โดยที่ $v_{iu} = v_{uM} + v_{Mn}$, $v_{iv} = v_{vM} + v_{Mn}$ และ $v_{iw} = v_{wM} + v_{Mn}$ ค่าดังกล่าว คือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ของเฟส u, v, w ตามลำดับ

หลังจากได้สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง จึงดำเนินการพิจารณาหาสมการอนุพันธ์ของแรงดันที่ตัวเก็บประจุวงจรรอง โดยกฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) จะได้ดังสมการที่ (5-4) ถึงสมการที่ (5-6)

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

$$\frac{dv_{fv}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{sv} - \frac{1}{C_f} i_{fv} \quad (5-5)$$

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

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตั้งขอบเขต ที่จะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามสายสมดุลเท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์จะไม่กล่าวถึงปริมาณไฟฟ้าลำดับศูนย์ (zero sequence) จึงส่งผลให้ความสัมพันธ์ของแรงดันชดเชยทั้งสามเฟสและกระแสที่จุด PCC เป็นดังสมการที่ (5-7)

และสมการที่ (5-8) ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวร่วมกับสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) ในสถานะคงตัว จะสามารถจัดความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5-9)

$$v_{fu} + v_{fv} + v_{fw} = 0 \quad (5-7)$$

$$i_{su} + i_{sv} + i_{sw} = 0 \quad (5-8)$$

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

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

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

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

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

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

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)

$$v_{kM} = c_k v_{dc} \quad (5-14)$$

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

$$c_k = \begin{cases} 1, S_k = on, S'_k = off \\ 0, S_k = off, S'_k = on \end{cases} \quad (5-16)$$

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

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

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

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

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

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

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

จากการอธิบายแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมบนปริมาณไฟฟ้าสามเฟสในข้างต้น สามารถเขียนเป็นแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ ดังสมการที่ (5-22)

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

5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนแกนดีคิว จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนสามเฟส ผ่านเมตริกซ์การแปลงแกนของปาร์ก ดังสมการที่ (5-23) เพื่อให้แบบจำลองอยู่บนแกนดีคิว จากสมการดังกล่าวกำหนดให้ f_u , f_v และ f_w คือ ปริมาณทางไฟฟ้า

ของเฟส 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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_1) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ -\sin(\omega t + \phi_1) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{bmatrix}$$

$$\cdot \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix} \quad (5-27)$$

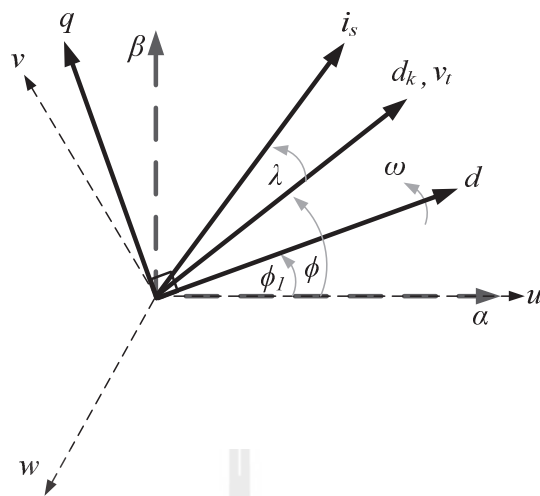
$$\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ -\sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (5-28)$$

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

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

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

จากการอธิบายข้างต้นเกี่ยวกับเวกเตอร์ของแบบจำลองในระบบ พบว่า เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตมีมุมเฟสเริ่มต้นเดียวกันกับเวกเตอร์ฟังก์ชันสถานะสวิตช์ เท่ากับ ϕ ซึ่งทำมุมต่างเฟสกับมุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์กระแสที่จุด PCC (i_s) เท่ากับ λ และแกนดีควหมุนด้วยความเร็ว เท่ากับ ω rad/s ที่มุมเฟสเริ่มต้น เท่ากับ ϕ_1 ดังนั้น เวกเตอร์ของแบบจำลองบนแกนดีควในระบบที่พิจารณา สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเฟสเซอร์ไดอะแกรม ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของระบบที่พิจารณา

จากรูปดังกล่าวผู้วิจัยกำหนดให้มุมเฟสเริ่มต้นของเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุต (v_t) ทำมุมเดียวกับมุมเฟสเริ่มต้นของแกนหมุนดีคิว ($\phi = \phi_l$) และไม่พิจารณาผลของมุมเหลือ (λ) ซึ่งเกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ในสายส่ง ผลจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สมการที่ (5-28) และสมการที่ (5-30) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (5-31) และสมการที่ (5-32) ตามลำดับ

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

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

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง

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

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

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

เทอมของ $\frac{d}{dt} ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix})$ ที่ปรากฏในสมการที่ (5-34) จะต้องใช้กฎอนุพันธ์ของผลคูณ

เมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-35) เพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวลงในสมการที่ (5-34) จะได้ดังสมการที่ (5-36)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแรงดันขดขยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรอง

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

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

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

เทอมของ $\frac{d}{dt} ([\mathbf{K}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \end{bmatrix})$ ที่ปรากฏในสมการที่ (5-43) จะต้องใช้กฎอนุพันธ์ของผลคูณ

เมตริกซ์ ดังสมการที่ (5-44) เพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวลงในสมการที่ (5-43) จะได้ดังสมการที่ (5-45)

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

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

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

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

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

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

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแรงดันบัสไฟตรง

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

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

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

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

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

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

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

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

5.4 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดในข้างต้น เมื่อได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง (model validation) จะทำให้แบบจำลองดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น สำหรับการนำไปใช้เพื่อออกแบบระบบควบคุม ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นกรนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองตามสมการที่ (5-54) บน m-file ในโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการสร้างระบบที่พิจารณาตามรูปที่ 5.1 บนโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems โดยมีรายละเอียดการจำลองสถานการณ์ของทั้ง 2 ส่วน ดังนี้

การจำลองสถานการณ์ระบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนตีกิว

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

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5-54)$$

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

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

u คือ อินพุตของแบบจำลอง ($u = i_s$)

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

$$A = [A_{11} \quad A_{12} \quad A_{13} \quad A_{14} \quad A_{15}]$$

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

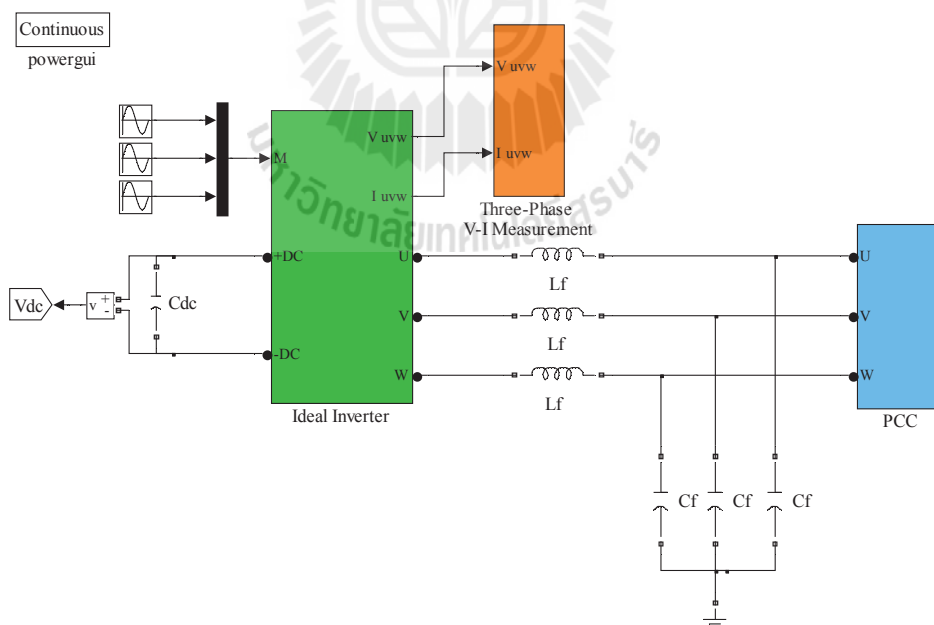
$$A_{13} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \\ -\omega \\ 0 \end{bmatrix}, A_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_f} \\ \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A_{15} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L_f} \cos(\phi - \phi_1) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}}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

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

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

การจำลองสถานการณ์ระบบ โดยอาศัยชุดบล็อก SimPowerSystems ร่วมกับ simulink

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



รูปที่ 5.3 ระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

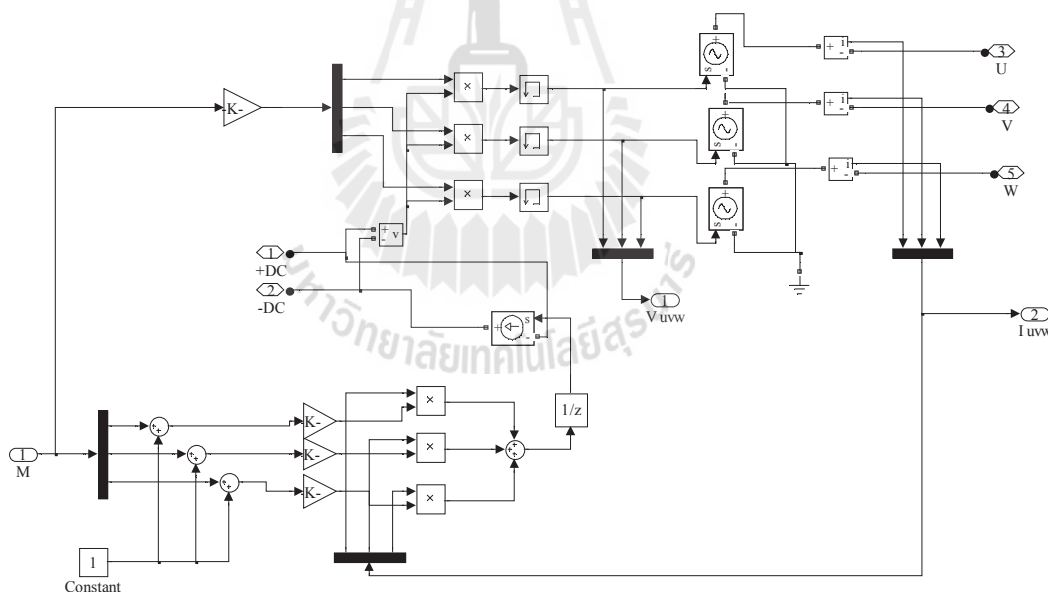
จากรูปที่ 5.4 เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรรีโวลต์แบบอุดมคติที่สร้างจากสมการทางคณิตศาสตร์สมการที่ (5-55) ถึงสมการที่ (5-58) โดยในส่วนของสมการที่ (5-55) ถึงสมการที่ (5-57) จะเป็นสมการของแรงดันเอาต์พุตของวงจรรีโวลต์ และในสมการที่ (5-58) จะเป็นสมการกระแสของวงจรรีโวลต์ ทั้งนี้ค่าดัชนีมอดูเลต (M) จะมีผลต่อแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรรีโวลต์ และสาเหตุที่ใช้วงจรรีโวลต์แบบอุดมคติเพื่อที่จะลดผลกระทบของการสวิตช์

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

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

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

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



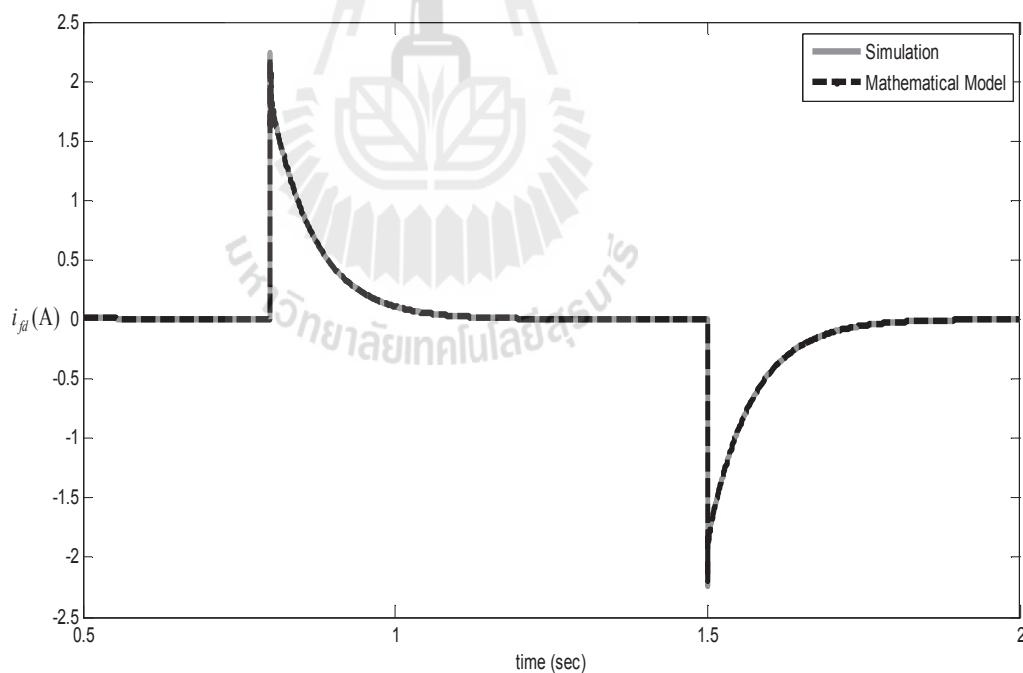
รูปที่ 5.4 แบบจำลองของวงจรรีโวลต์อุดมคติสำหรับการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.1 ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 ชุด ดังตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.3 ตามลำดับ การทดสอบมีวัตถุประสงค์ คือ การตรวจสอบความ

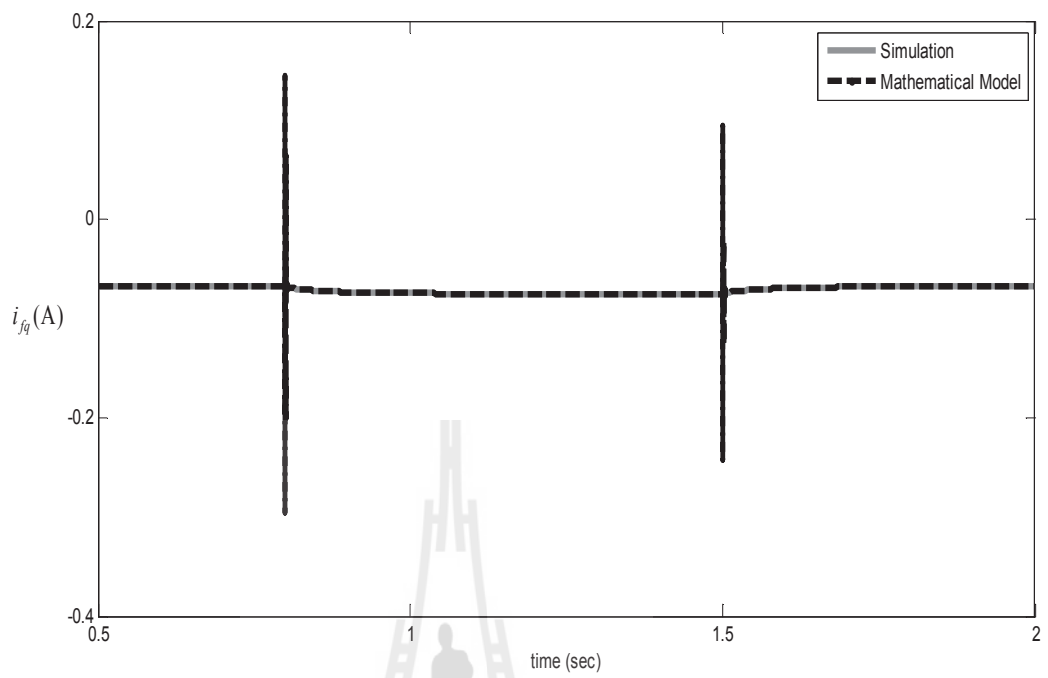
ถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว ด้วยการเปรียบเทียบรูปสัญญาณของ i_{fd} , i_{fq} , v_{fd} , v_{fq} และ v_{dc} กับชุดบล็อกที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 1)

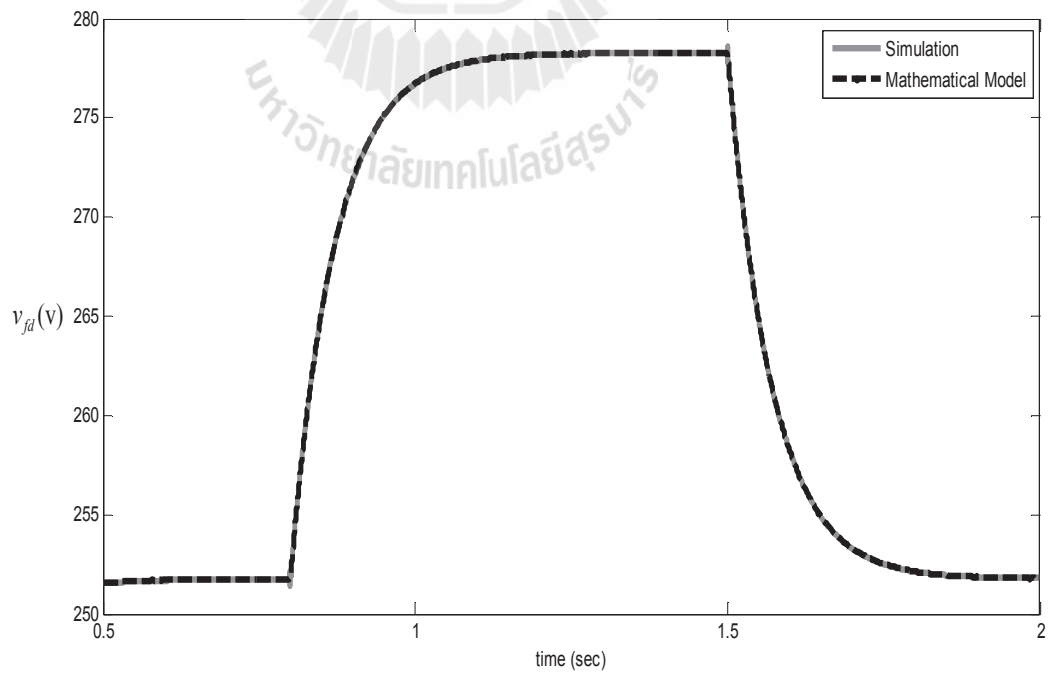
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 19 \text{ A}$ ($t = 0 - 0.8 \text{ sec}, 1.5 - 2 \text{ sec}$), $i_s = 21 \text{ A}$ ($t = 0.8 - 1.5 \text{ sec}$)
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50 \text{ Hz}$
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 1000 \text{ }\mu\text{F}$
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 1 \text{ }\mu\text{H}$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



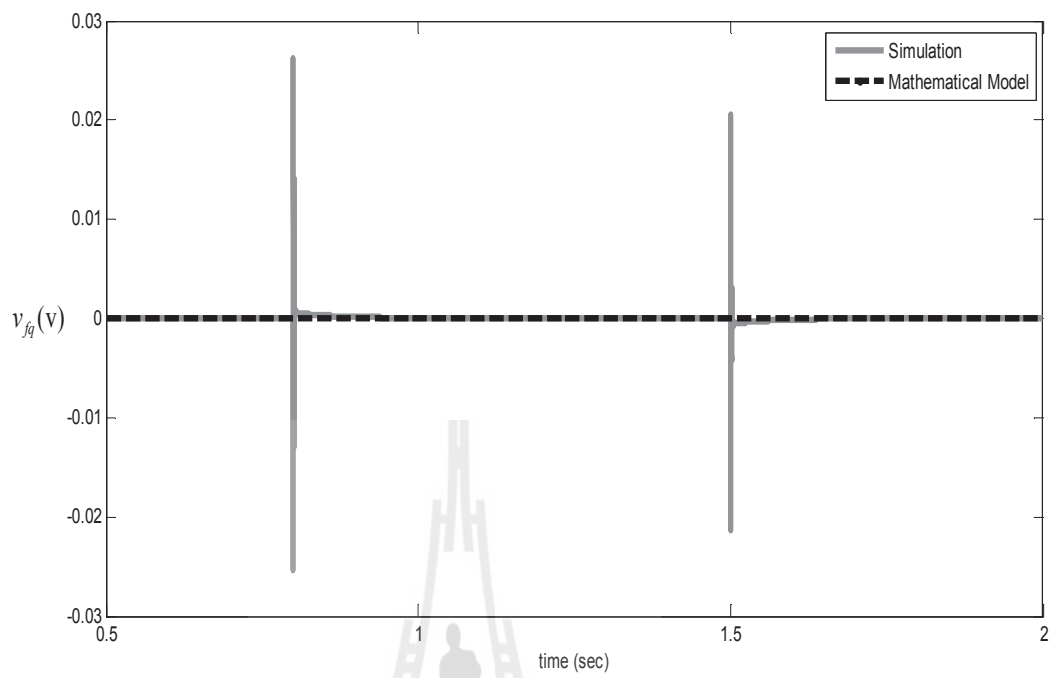
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fd}



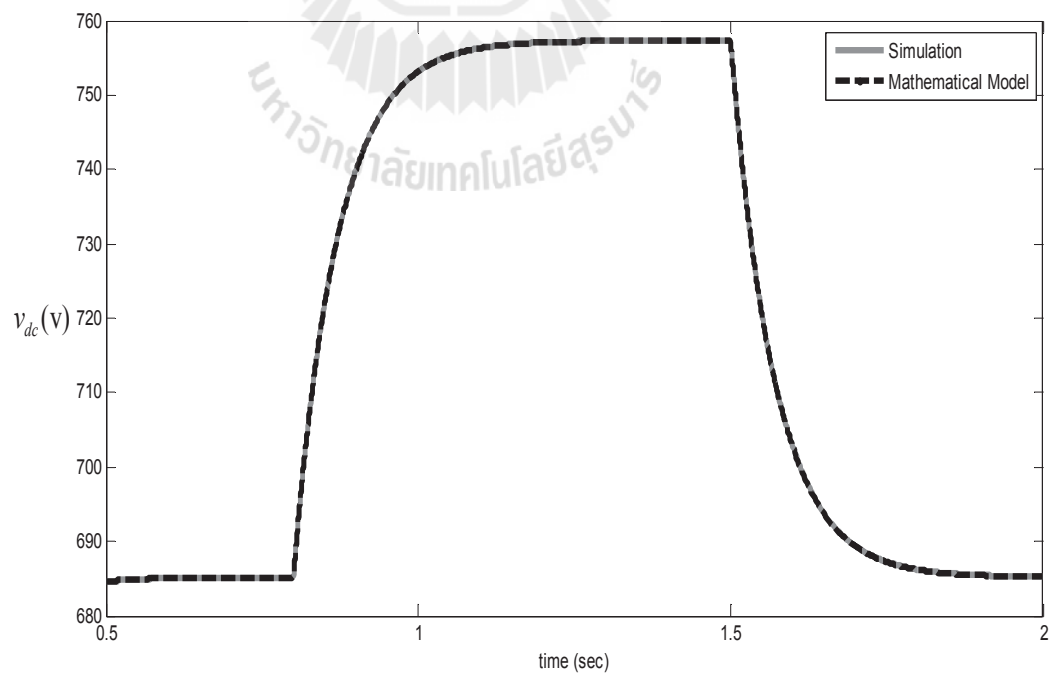
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fd}



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับค่า v_{fq}

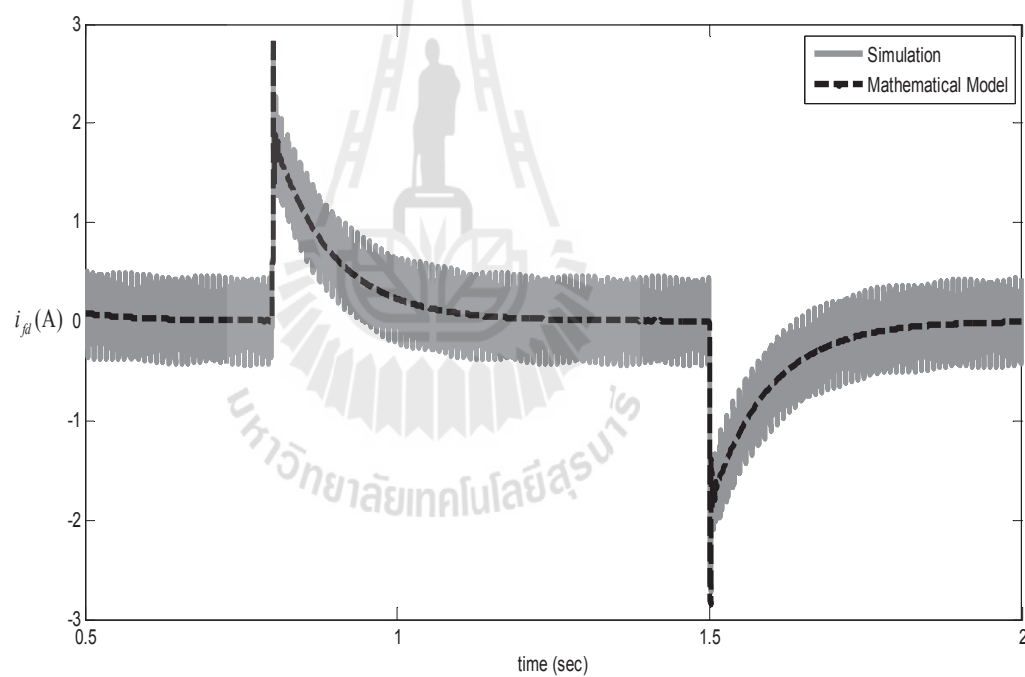


รูปที่ 5.9 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับค่า v_{dc}

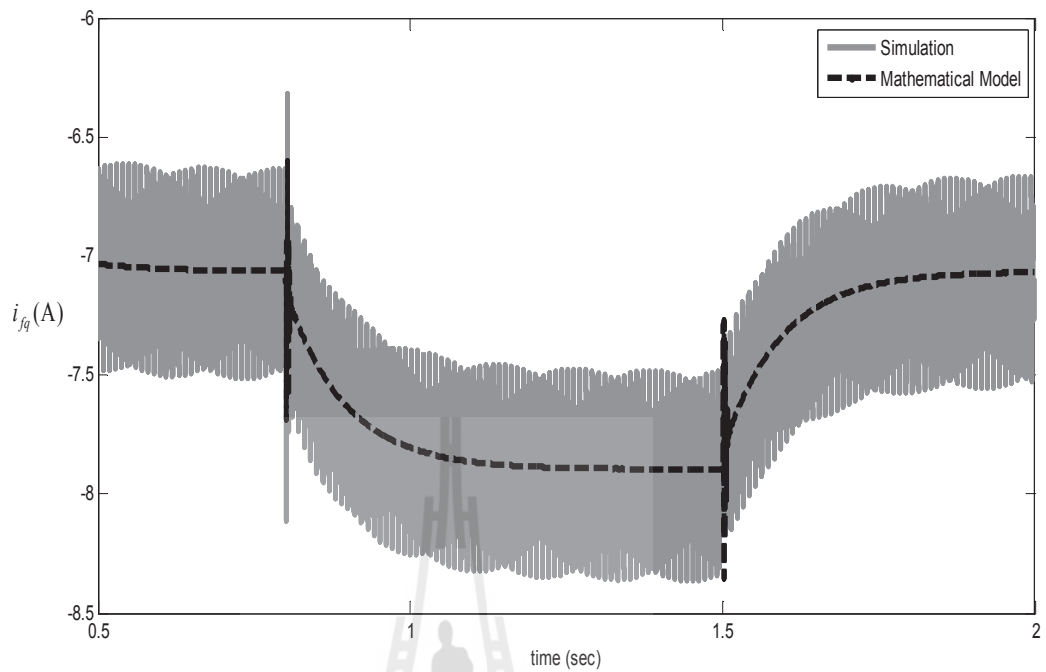
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของค่า i_{fd} , i_{fq} , v_{fd} , v_{fq} และ v_{dc} โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1 (ชุดที่ 1) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิว แสดงด้วยเส้นประสีดำ และผลที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSystems ของโปรแกรม simulink แสดงด้วยเส้นสีเทา สังเกตได้ว่าการจำลองสถานการณ์จะพิจารณาในช่วงเวลาตั้งแต่ 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 ควบคู่ไปกับการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองการเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ในช่วงก่อนเวลา 0.8 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุด PCC ที่เวลา 0.8 วินาที และ 1.5 วินาที ส่งผลให้การตอบสนองของค่า i_{fd} และ i_{fq} มีลักษณะสั้นไวกว้างเล็กน้อย 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 จะมีการลักษณะสั้นไวกว้างเล็กน้อย 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 ให้ผลการตอบสนองทั้งสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราว มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับรูปสัญญาณที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSystems ดังกล่าวในข้างต้น แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องผู้วิจัยจึงได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 2)

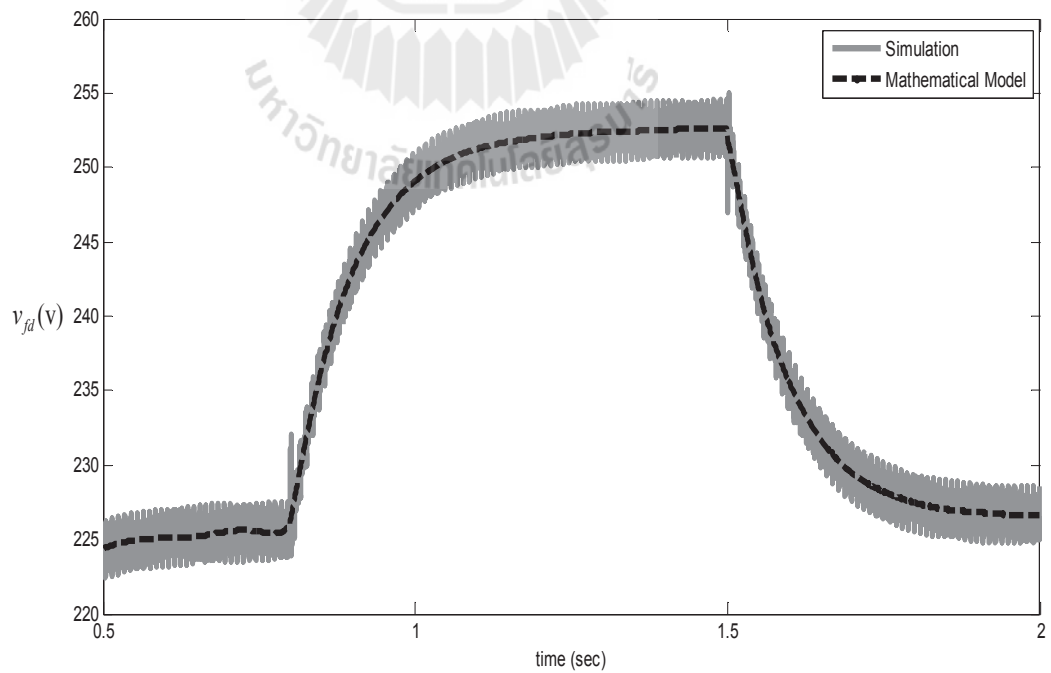
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 17 \text{ A}$ ($t = 0 - 0.8 \text{ sec}, 1.5 - 2 \text{ sec}$), $i_s = 19 \text{ A}$ ($t = 0.8 - 1.5 \text{ sec}$)
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50 \text{ Hz}$
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 1700 \text{ }\mu\text{F}$
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 2 \text{ mH}$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



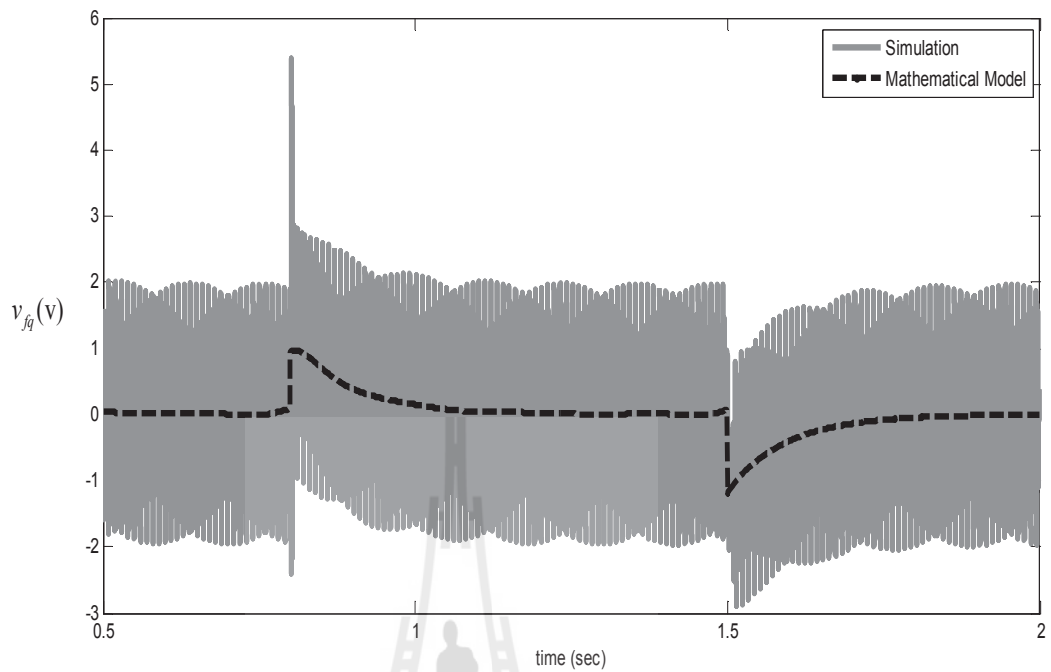
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{gd}



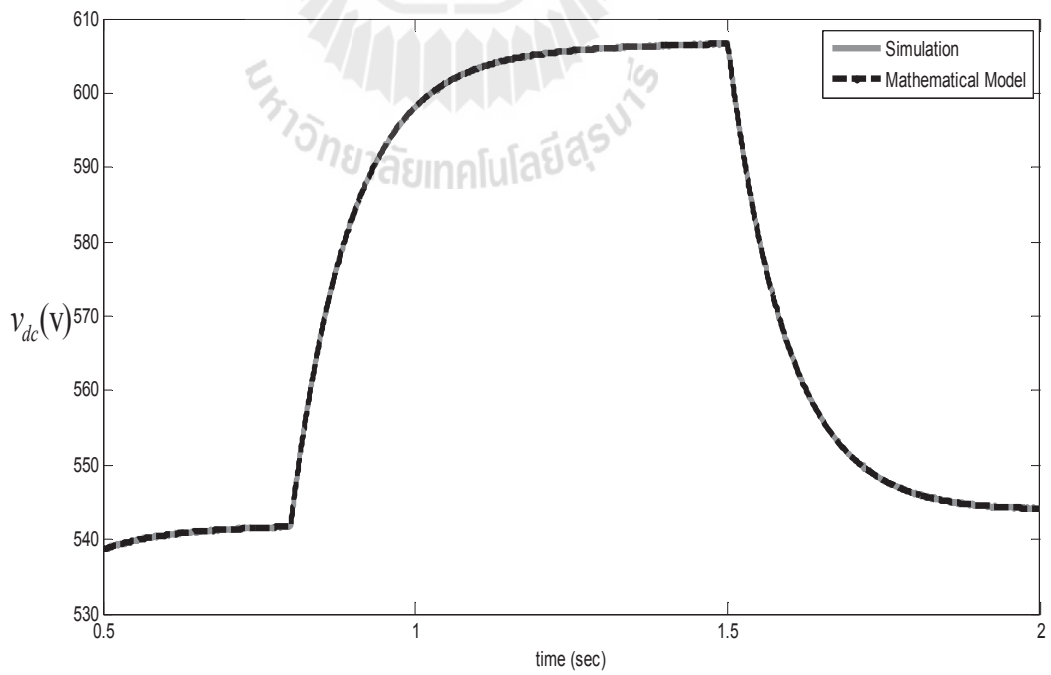
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{fq}

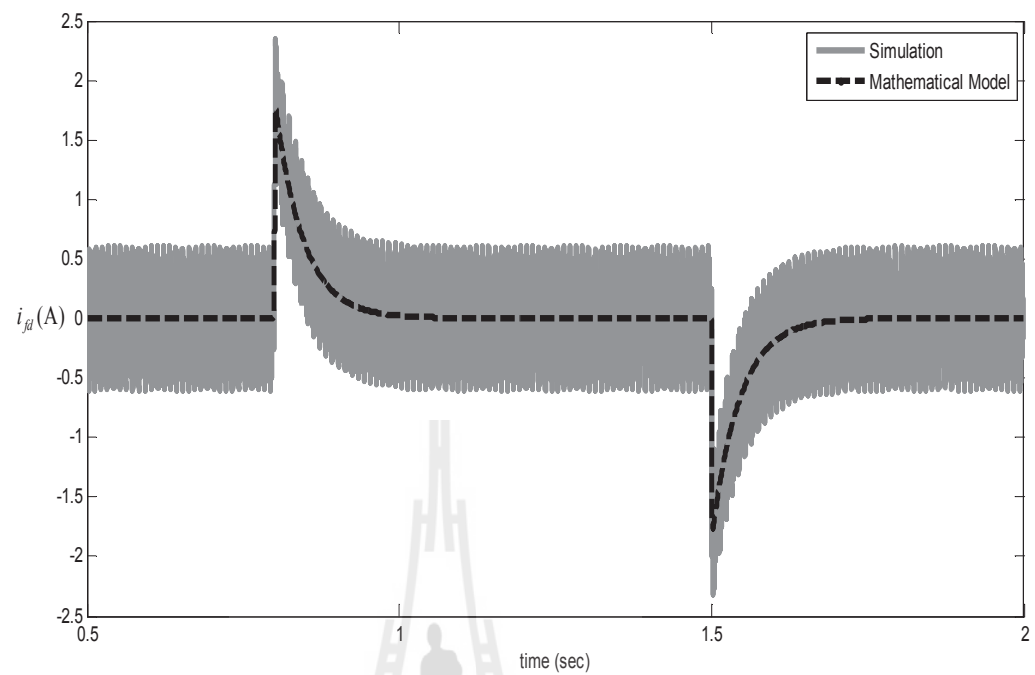


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า v_{dc}

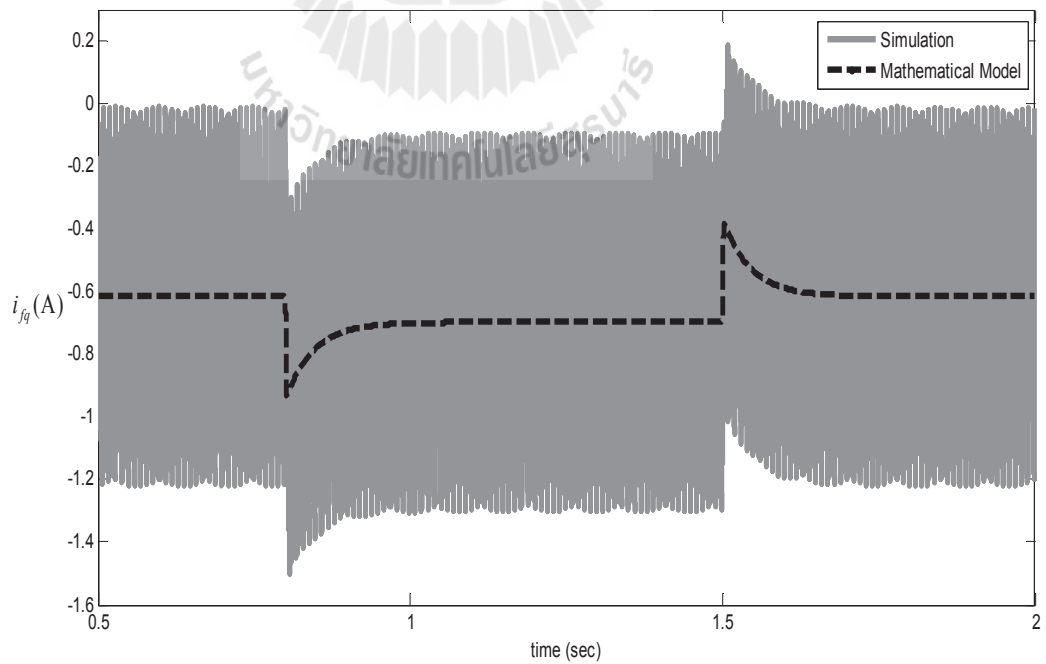
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.14 เป็นผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของค่า i_{fd} , i_{fq} , v_{fd} , v_{fq} และ v_{dc} โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.2 (ชุดที่ 2) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนคิวิเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystems การจำลองสถานการณ์จะเหมือนกับการจำลองสถานการณ์ของพารามิเตอร์ชุดที่ 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 แอมแปร์ ตั้งแต่เวลา 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 ซึ่งผลที่ได้เป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนคิวิมีความถูกต้อง

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ (ชุดที่ 3)

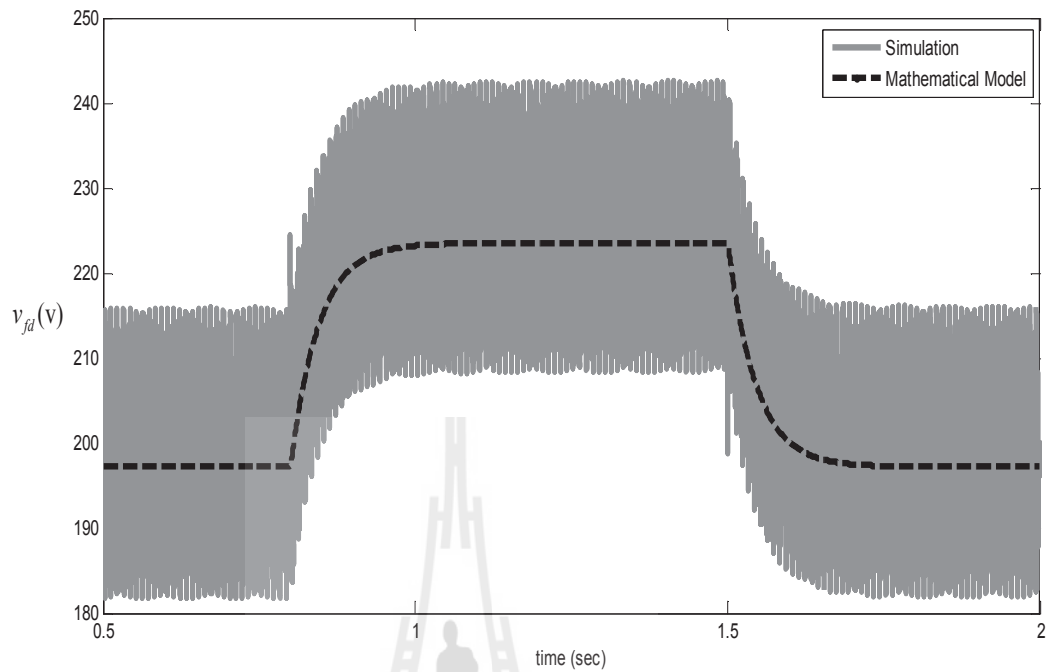
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
กระแสที่จุด PCC	$i_s = 15 \text{ A}$ ($t = 0 - 0.8 \text{ sec}, 1.5 - 2 \text{ sec}$), $i_s = 17 \text{ A}$ ($t = 0.8 - 1.5 \text{ sec}$)
ความถี่ของระบบ	$f_s = 50 \text{ Hz}$
ตัวเก็บประจุดีซี	$C_{dc} = 500 \text{ }\mu\text{F}$
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	$L_f = 8 \text{ mH}$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



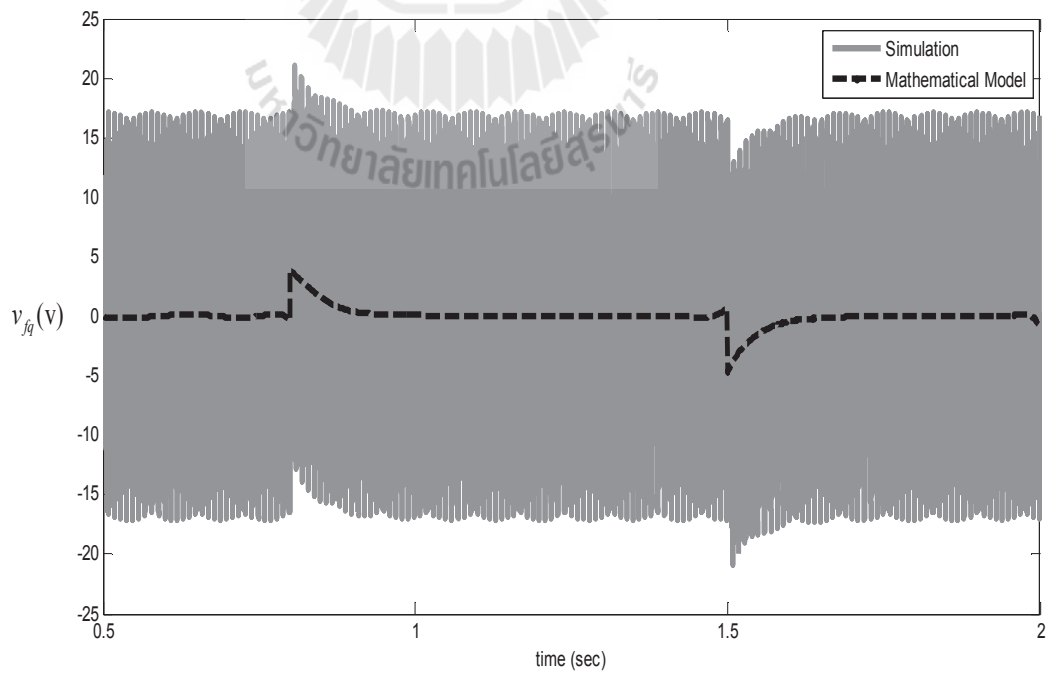
รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fi}



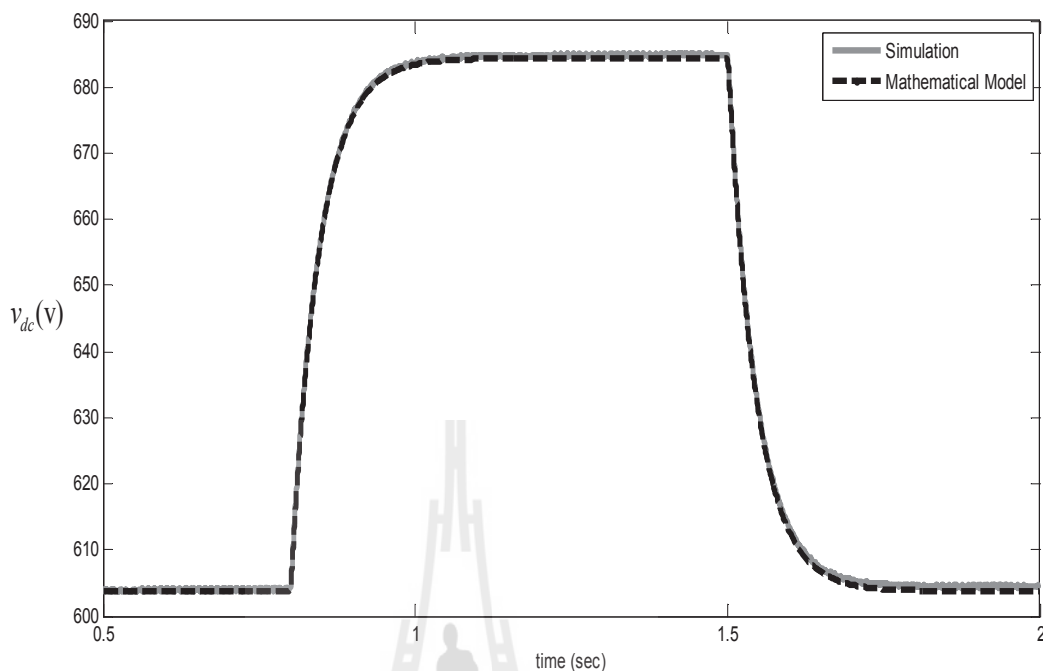
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบค่า i_{fq}



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) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดิวเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystems ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จะคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าพารามิเตอร์ในชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในการจำลองสถานการณ์ได้มีการปรับเปลี่ยนอินพุต 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 จากผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดที่ 3 จะยังคงยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนดีคิวมีความถูกต้อง

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

5.5 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่นำเสนอในบทนี้ ใช้กฎของแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองบนปริมาณสามเฟส รวมถึงการแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิว ด้วยหลักการแปลงของปาร์ค ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนแกนสามเฟสมีความสำคัญต่อการอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่อยู่บนแกนดีคิวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม อีกทั้งผู้วิจัยได้มีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง โดยรายละเอียดการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้งานจะนำเสนอไว้ในบทถัดไป

บทที่ 6

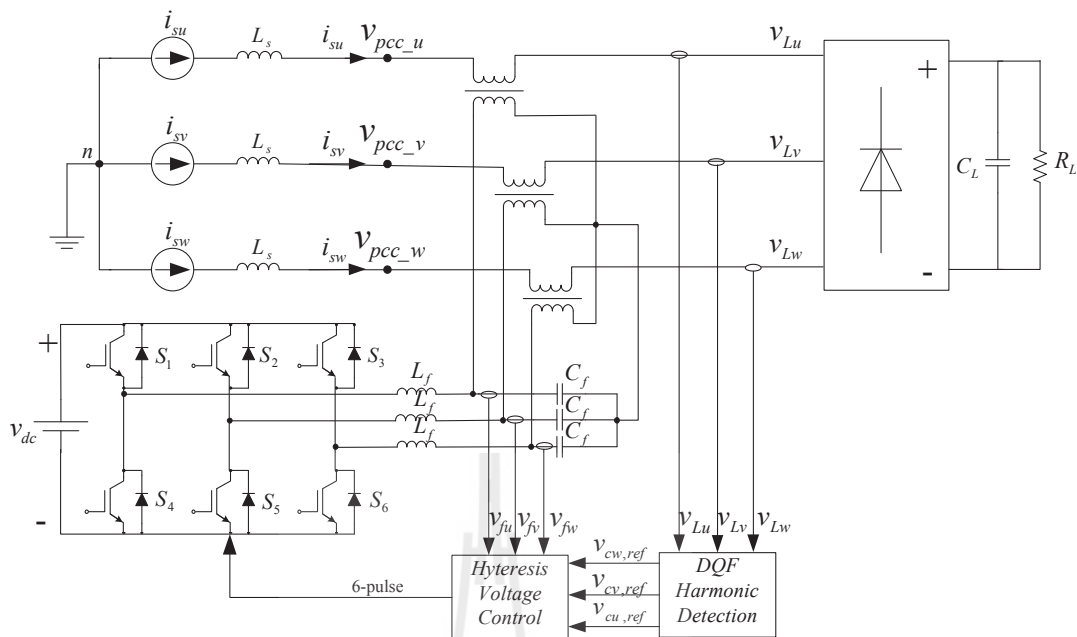
การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

6.1 บทนำ

การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยเป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน และการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF รวมถึงไปถึงหลักการของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมรวมถึงค่าแถบฮีสเตอร์ซิส เนื่องจากในการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมนั้นมีความซับซ้อนและในอดีตไม่ปรากฏการออกแบบดังกล่าวอย่างเป็นทางการ ดังนั้นในบทนี้จะมีการนำเสนอ ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลที่ได้จากการสังเกตค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

6.2 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ใช้ ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสจะใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 6 ตัว เพื่อทำหน้าที่ฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบ ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

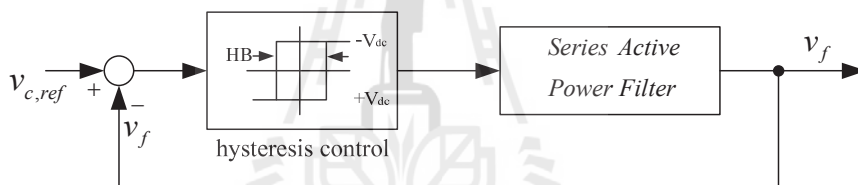
จากรูปที่ 6.1 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจะใช้วิธี DQF ซึ่งเป็นวิธีที่มีสมรรถนะดีที่ได้จากการเปรียบเทียบจากบทที่ 4 ซึ่งพิจารณาได้จากบล็อก DQF Harmonic Detection ส่วนบล็อก Hysterisis Voltage Control เป็นบล็อกสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถลดแรงดันชดเชยได้ตามรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ไอจีบีทีจะทำงานเป็นกึ่งและในแต่ละกึ่งจะทำงานอิสระต่อกันซึ่งพบว่า ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแส จึงส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นตามรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิง ในทำนองเดียวกันเมื่อไอจีบีทีตัวบนหยุดนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะนำกระแสแทน ส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าลดลง ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาการลดแรงดันชดเชยจะได้ตามสมการที่ (6-1) ดังนี้

$$v_{pcc_u} = v_{Lu} - v_{fu} \quad (6-1)$$

จากสมการที่ (6-1) พิจารณาการทำงานในกรณีเฟส u เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีกรีดแรงดันชดเชย (v_{fu}) ค่าแรงดันที่จุด PCC (v_{pcc_u}) จะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลด (v_{Lu}) ซึ่งจะมีการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ เมื่อทำการกรีดแรงดันชดเชยดังสมการที่ (6-1) ค่าแรงดันที่จุด PCC จะเท่ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดหักลบกับค่าแรงดันชดเชยจึงทำให้ค่าแรงดันที่จุด PCC มีลักษณะรูปสัญญาณเป็นรูปไซน์มากขึ้น

6.3 หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

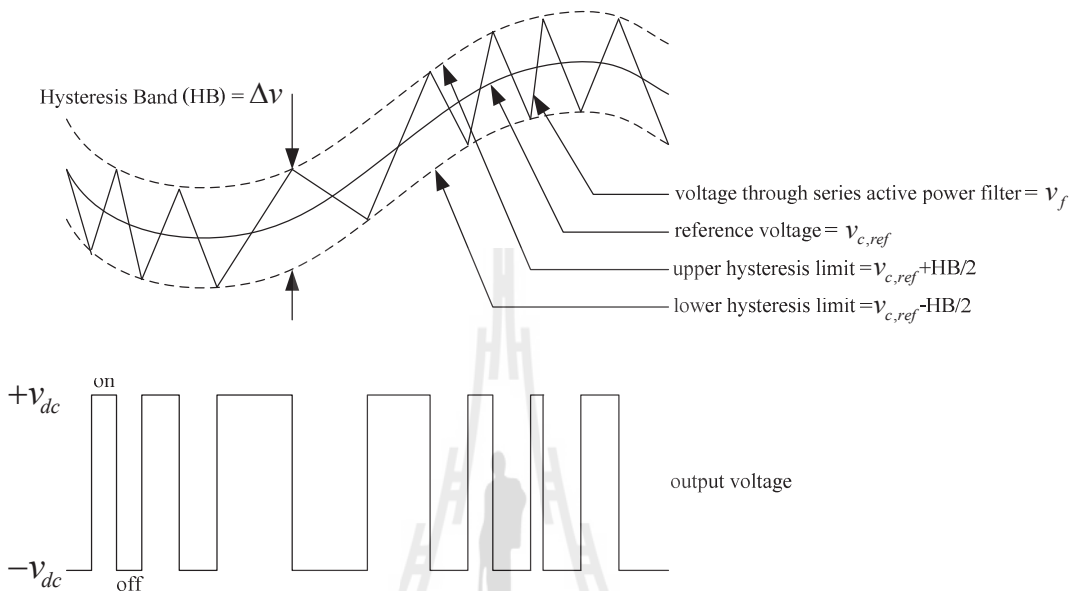
การควบคุมแรงดันชดเชยมีความสำคัญมากสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะกับการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถดูโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสได้ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งรูปดังกล่าวเป็นการควบคุมแบบวงรอบปิดที่มีการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณแรงดันอ้างอิง ($v_{c,ref}$) กับสัญญาณแรงดันชดเชย (v_f) จะได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน (error) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณส่งไปยังตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส เพื่อที่จะปรับสัญญาณแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง โดยสัญญาณแรงดันชดเชยจะได้จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งรายละเอียดการควบคุมด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสจะแสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 6.3 แถบฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis Band: HB) คือ ขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชย (v_f) ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส ซึ่งค่าแรงดันชดเชยดังกล่าวสามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้โดยอาศัยการควบคุมการทำงานของการสวิตช์ไอจีบีที และเมื่อพิจารณาการทำงานในกรณีหนึ่งเฟส ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างหยุดนำกระแส จะทำให้แรงดันชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบนของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (upper hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะหยุดนำกระแส ในขณะที่ไอจีบีทีตัวล่างนำกระแสแทน ส่งผลให้แรงดันชดเชยมีค่าลดลง เมื่อค่าแรงดันลดลงจนถึงค่าขอบเขตล่างของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (lower hysteresis limit) ไอจีบีทีตัวบนก็จะนำกระแสและไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแสอีกครั้ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงานโดยค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ตัวเก็บประจุวงจรกรอง

(C_f) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) การอธิบายพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.3 ลักษณะการควบคุมรูปคลื่นสัญญาณด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

6.4 การฉีดแรงดันชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

การฉีดแรงดันชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลัง แยกทีฟแบบอนุกรมและค่าแถบฮิสเตอร์ซิส มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบอนุกรมที่จะส่งผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก โดยในการจำลองสถานการณ์จะใช้วงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบอนุกรมดังแสดงไว้ในรูปที่ 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 μ F โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นที่จุด PCC ด้วยเหตุนี้บดบังการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเข้ามามีบทบาทเพื่อตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบโดยการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงบนแกนสามเฟส ($v_{cu,ref}$, $v_{cv,ref}$, $v_{cw,ref}$) สำหรับเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบ

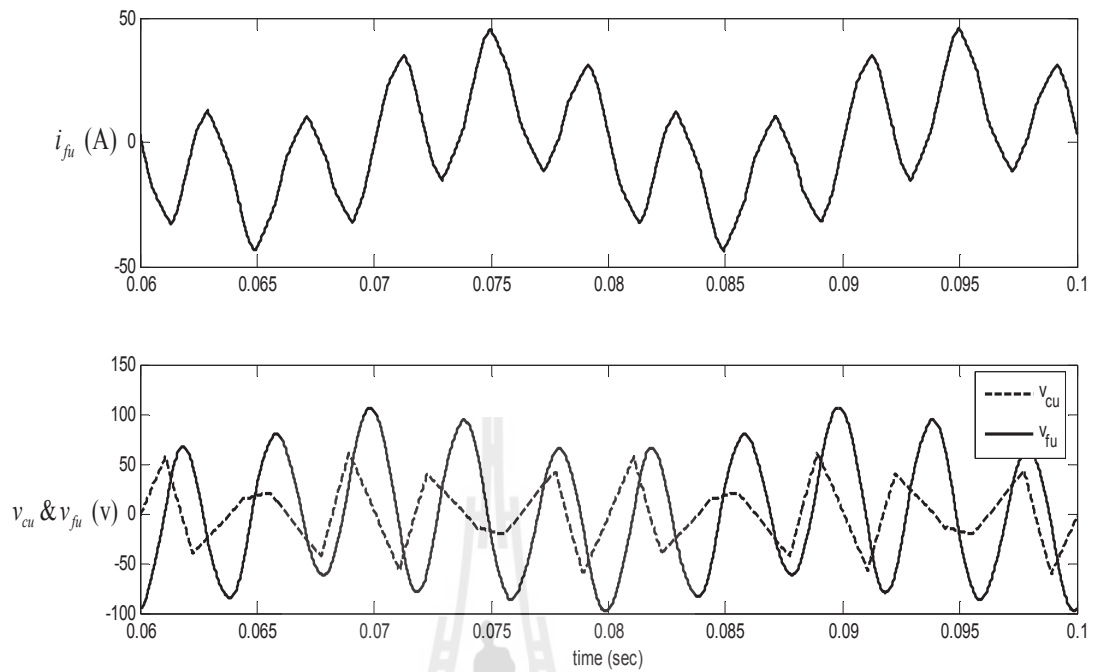
อนุกรม ซึ่งการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสจะใช้การควบคุมแบบวงรอบปิดดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 เพื่อทำการสร้างสัญญาณพัลส์ไปสั่งไอจีบีทีให้ทำงานตามที่ต้องการ การสังเกตพฤติกรรมค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ วงจรกรอง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง ค่าแรงดันบัสไฟตรง และค่าแถบฮีสเทอรีซิส ในการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่าความผิดเพี้ยนเฉลี่ย ($\%THD_{v,av}$) หลังการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเป็นหลัก

ตารางที่ 6.1 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

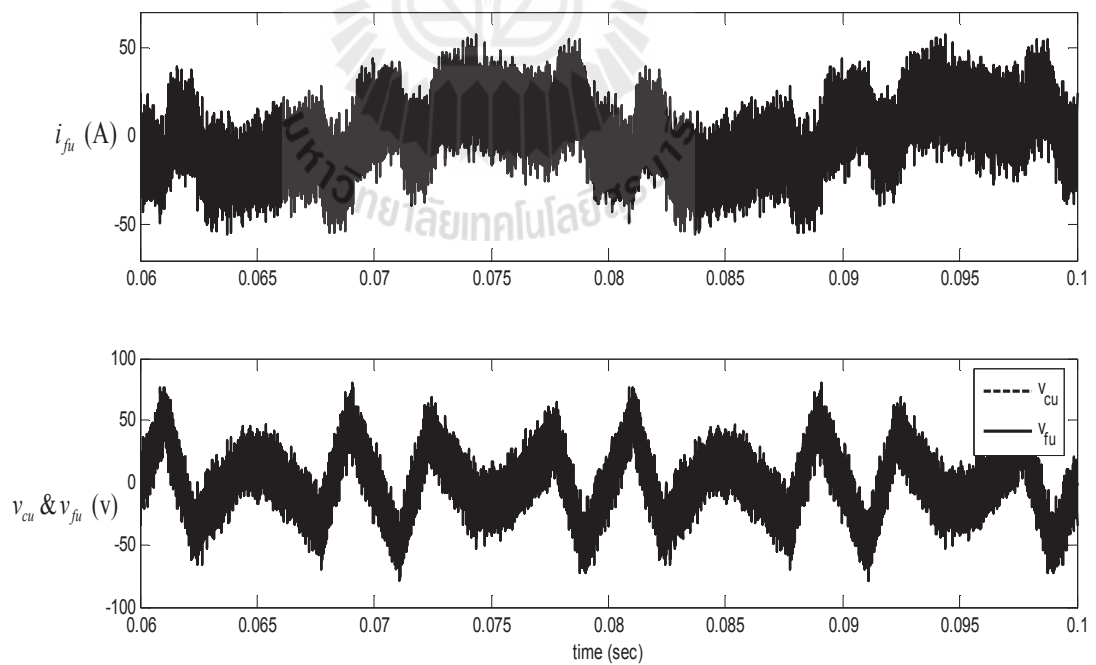
ค่าพารามิเตอร์ L_f (mH)	$\%THD_{v,av}$			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 200$ v, $C_f = 50$ μ F, $HB = 0.5$ v)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 300$ v, $C_f = 100$ μ F, $HB = 0.1$ v)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 400$ v, $C_f = 80$ μ F, $HB = 0.1$ v)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 500$ v, $C_f = 200$ μ F, $HB = 0.001$ v)
0.1	3.56	4.71	6.36	7.45
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 μ F และแถบฮีสเทอรีซิส (HB) เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μ F และแถบฮีสเทอรีซิส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 400 โวลต์ ตัวเก็บประจุ

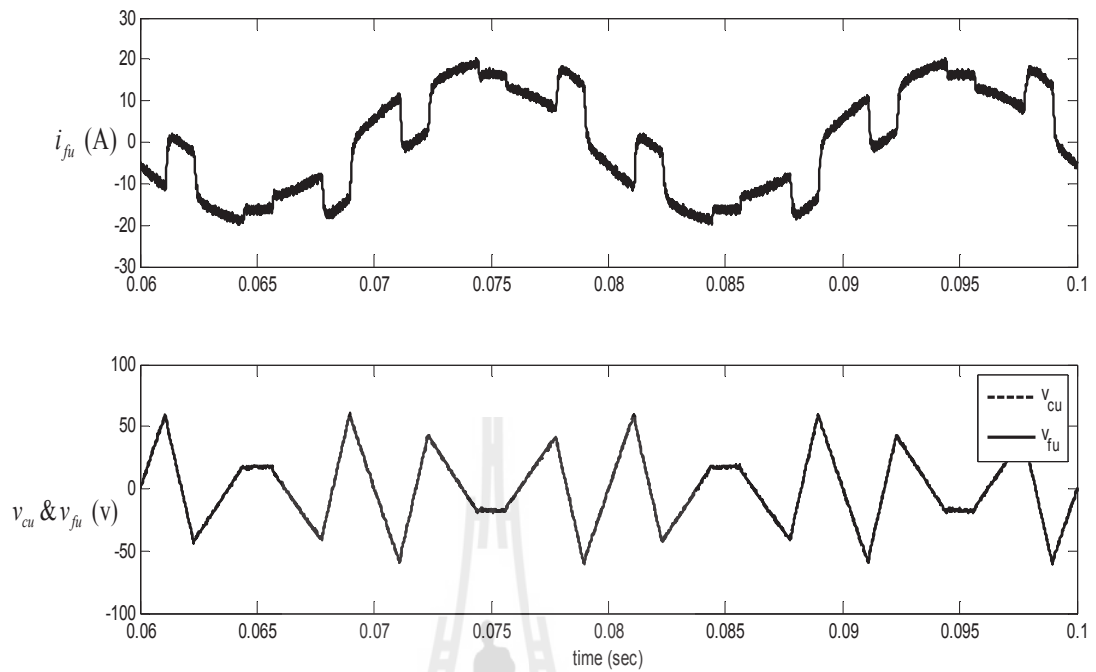
วงจรรอง เท่ากับ $80 \mu\text{F}$ และแถบฮีสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.1 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรรอง เท่ากับ $200 \mu\text{F}$ และแถบฮีสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.001 โวลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันและพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ จะส่งผลกระทบต่อ การชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน แต่ในตารางที่ 6.1 จะมุ่งไปที่ประเด็นของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง โดยการสังเกตพฤติกรรมของค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองจะดำเนินการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำ ดังกล่าวกับพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เพื่อยืนยันว่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก เมื่อพิจารณาสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง ($L_f \frac{di_f}{dt}$) โดยที่ $\frac{di_f}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรองเทียบกับเวลา และพิจารณาในรูปของความชันของรูปสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรรองที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดันชดเชยมีการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่เข้าเนื่องมาจากมีความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรองที่น้อย สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.4 โดยในรูปดังกล่าวจะใช้พารามิเตอร์ในชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง เท่ากับ 10 mH และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรรองที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้การลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่เร็วมากจนเกิดเป็นสัญญาณกระเพื่อม เนื่องจากมีความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรรองมีค่ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสจึงเร็วเกินไปสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.5 ซึ่งในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง เท่ากับ 0.1 mH การสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรรองในตารางที่ 6.1 พบว่าพารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ตัวเหนี่ยวนำวงจรรองเท่ากับ 2 mH ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยที่เหมาะสมที่สุดและสามารถดูได้จากรูปที่ 6.6 ซึ่งเป็นรูปผลของการใช้ตัวเหนี่ยวนำวงจรรองที่เหมาะสม จะพบว่าแรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง และจากตารางดังกล่าว สามารถนำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งในรูปนี้จะแสดงให้เห็นอยู่ 2 ประเด็น ประเด็นที่ 1 คือ เมื่อเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองจะมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก โดยสังเกตได้จาก $\%THD_{v,av}$ โดยในช่วงก่อน 0.5 mH จะพบว่ามีค่าที่สูง และในช่วงตั้งแต่ 8 mH ขึ้นไปก็จะมีค่าที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองช่วงที่เหมาะสม คือ 0.5 mH ถึง 8 mH ประเด็นที่ 2 คือ ถึงแม้ว่าค่าแรงดันบัลไฟตรง ตัวเก็บประจุวงจรรอง และแถบฮีสเตอร์ซิสไม่เหมือนกันก็ตาม แต่ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองที่เหมาะสมก็จะอยู่ในช่วง 0.5 mH ถึง 8 mH สำหรับในงานวิจัยนี้ที่มีโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรองค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงดังกล่าว



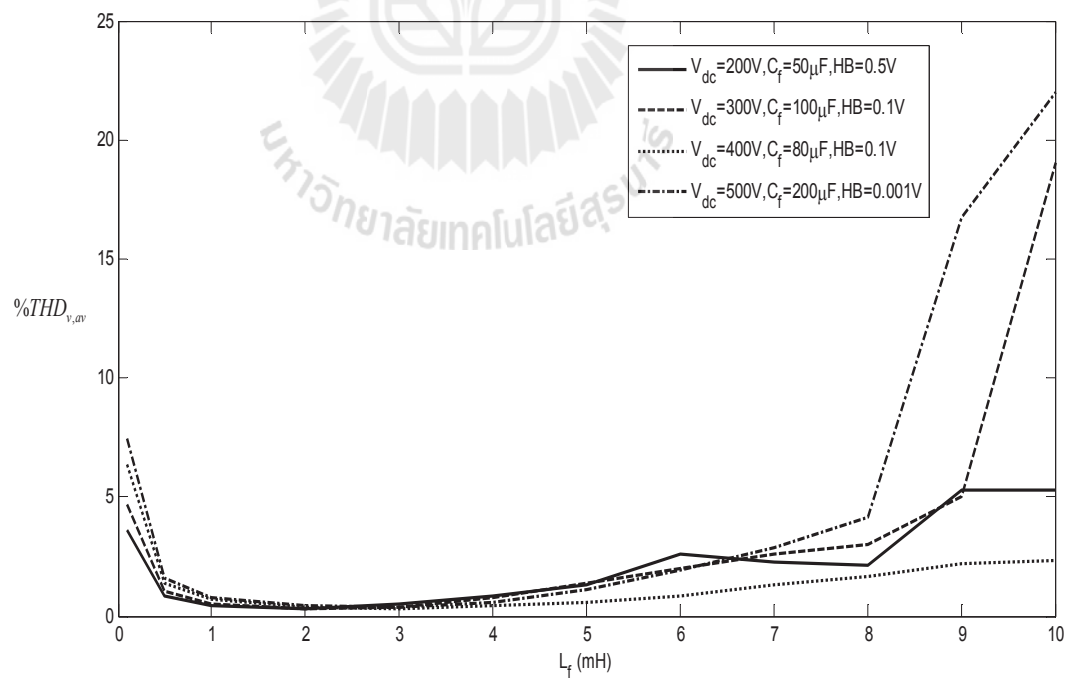
รูปที่ 6.4 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่่มาก



รูปที่ 6.5 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 6.6 ผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม



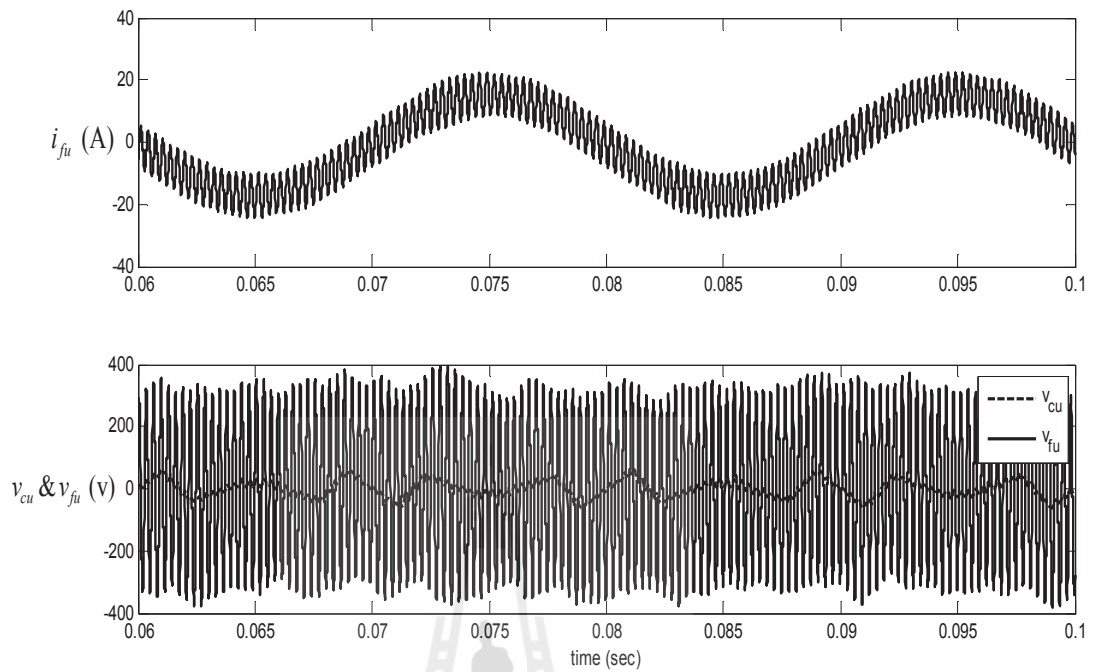
รูปที่ 6.7 พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 6.2 การสังเกตพฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรอง

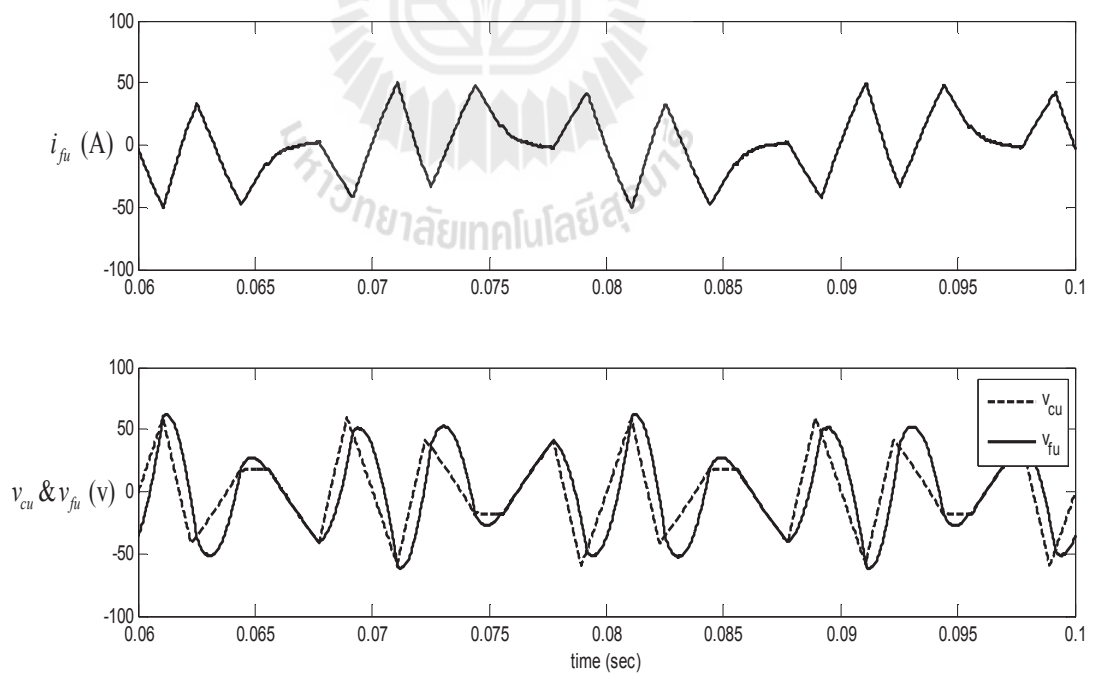
ค่าพารามิเตอร์ $C_f(\mu\text{F})$	%THD _{v,av}			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 60 \text{ v}$, $L_f = 1 \text{ mH}$, $HB = 0.5 \text{ v}$)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 200 \text{ v}$, $L_f = 3 \text{ mH}$, $HB = 1 \text{ v}$)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 500 \text{ v}$, $L_f = 6 \text{ mH}$, $HB = 0.001 \text{ v}$)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 550 \text{ v}$, $L_f = 5 \text{ mH}$, $HB = 0.05 \text{ v}$)
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
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 แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 60 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 1 mH และแถบฮีสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 200 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH และแถบฮีสเตอร์ซิส เท่ากับ 1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6 mH และแถบฮีสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.001 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 550 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH และแถบฮีสเตอร์ซิส 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 อัตราการเปลี่ยนแปลงของ

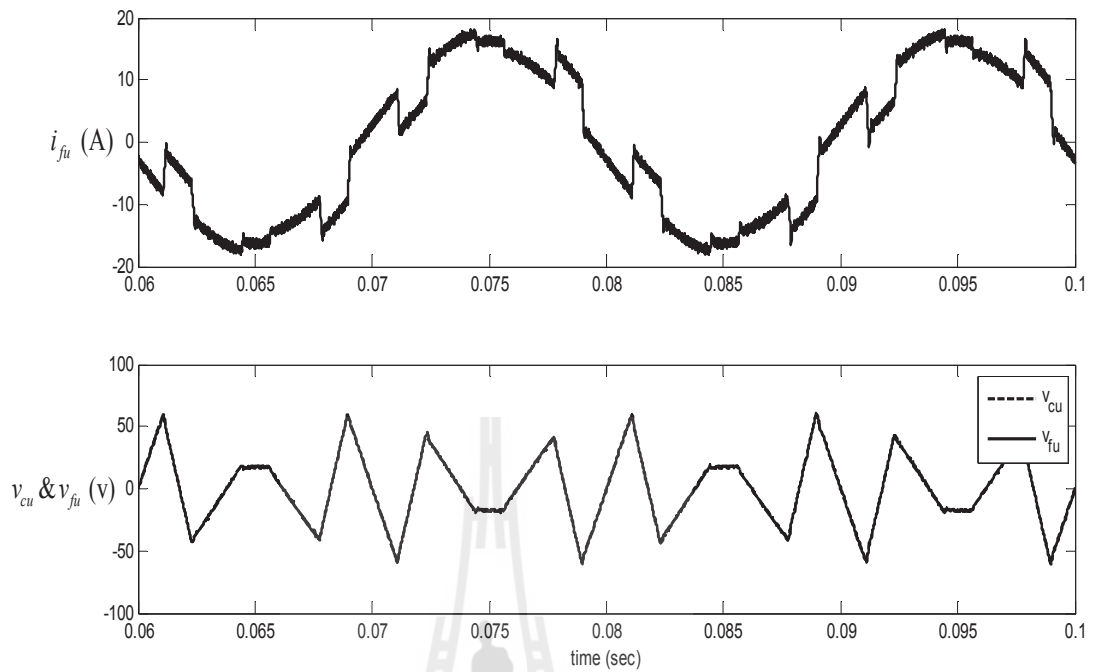
แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองเทียบกับเวลา และเมื่อพิจารณาในรูปของความชันของรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรอง โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้การลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่เร็วมากจนทำให้เกิดเป็นสัญญาณกระเพื่อมเนื่องมาจากมีความชันที่มากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองจึงเร็วเกินไป สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.8 โดยในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ $1 \mu\text{F}$ และเมื่อพิจารณาที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงจรกรองมีการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ช้าเนื่องจากมีความชันที่น้อย สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.9 โดยในรูปดังกล่าวใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 3 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ $500 \mu\text{F}$ จากตารางที่ 6.2 พบว่าพารามิเตอร์ชุดที่ 4 ที่ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ $50 \mu\text{F}$ เป็นค่าที่ส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่าที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองตัวอื่น ๆ และสามารถดูได้จากรูปที่ 6.10 จะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงมาก และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.11 โดยในรูปดังกล่าวเป็นรูปของค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ซึ่งจะพบว่าที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองมีขนาดเล็ก เช่น $1 \mu\text{F}$, $5 \mu\text{F}$ และ $10 \mu\text{F}$ จะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ มีค่ามาก และที่ตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่ เช่นที่ $400 \mu\text{F}$ และ $500 \mu\text{F}$ ก็จะทำให้ $\%THD_{v,av}$ มากด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้และโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง $10 \mu\text{F}$ ถึง $300 \mu\text{F}$ และในรูปดังกล่าว พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันบัสไฟตรง ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง และแถบฮีสเทอรีซิส ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองที่เหมาะสมจะยังคงอยู่ในช่วงดังกล่าว ทั้งนี้ในการเลือกตัวเก็บประจุวงจรกรองควรมีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินไปจากขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันได้ไหลเข้าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป



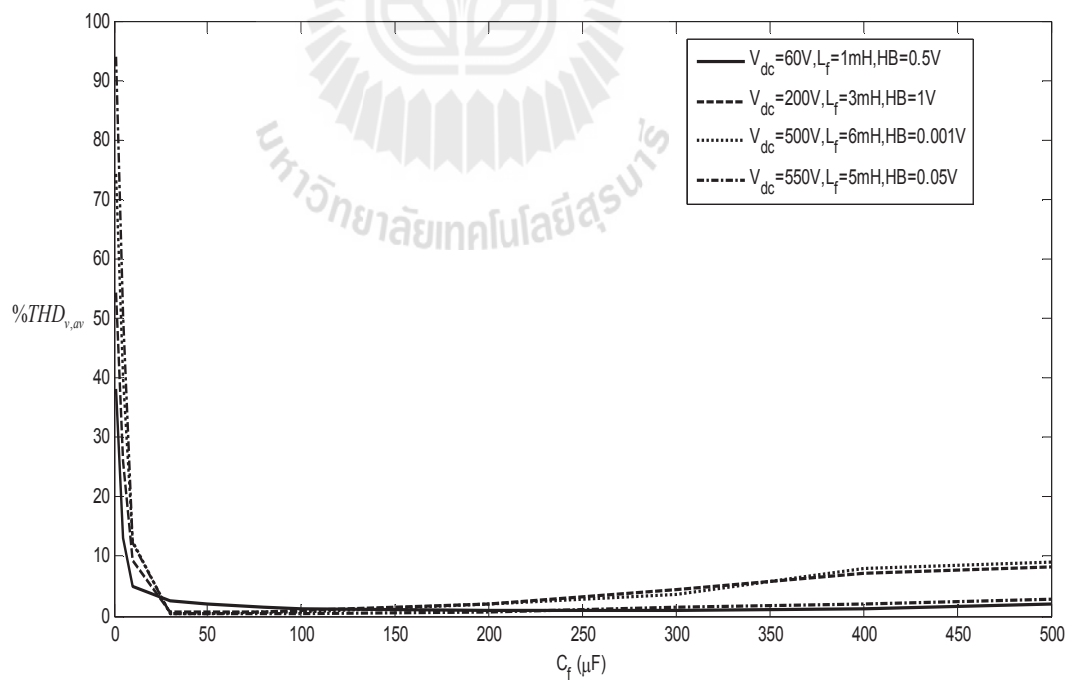
รูปที่ 6.8 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 6.9 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดใหญ่มาก



รูปที่ 6.10 ผลของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีขนาดเหมาะสม



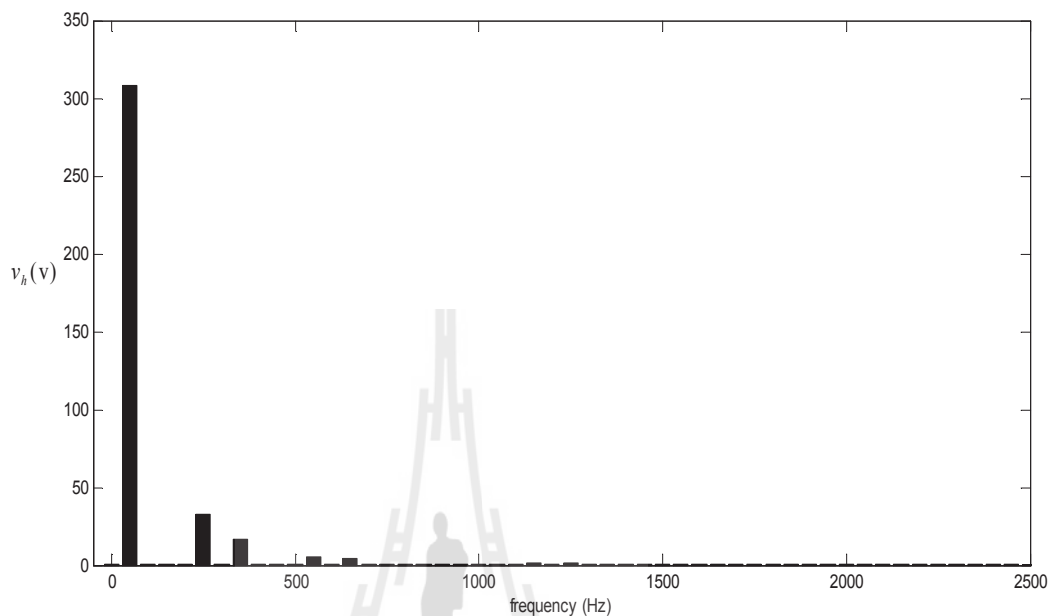
รูปที่ 6.11 พฤติกรรมของตัวเก็บประจุวงจรกรองที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$

ตารางที่ 6.3 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัลไฟตรง

ค่าพารามิเตอร์ v_{dc} (v)	%THD _{v,av}			
	ชุดที่ 1 ($C_f = 80 \mu\text{F}$, $L_f = 4 \text{ mH}$, $HB = 0.5 \text{ v}$)	ชุดที่ 2 ($C_f = 50 \mu\text{F}$, $L_f = 5 \text{ mH}$, $HB = 0.1 \text{ v}$)	ชุดที่ 3 ($C_f = 300 \mu\text{F}$, $L_f = 2 \text{ mH}$, $HB = 0.005 \text{ v}$)	ชุดที่ 4 ($C_f = 200 \mu\text{F}$, $L_f = 3 \text{ mH}$, $HB = 0.001 \text{ v}$)
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 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของค่าแรงดันบัลไฟตรง ซึ่งในตารางดังกล่าวจะดำเนินการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด ชุดที่ 1 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 4 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 80 μF และแถบฮิสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.5 โวลต์ ชุดที่ 2 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF และแถบฮิสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ชุดที่ 3 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 300 μF และแถบฮิสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.005 โวลต์ และชุดที่ 4 คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 3 mH ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF และแถบฮิสเตอร์ซิส เท่ากับ 0.001 โวลต์ ซึ่ง

พารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด เป็นพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน แต่จะดำเนินการเปลี่ยนค่าแรงดันบัลไฟตรงที่เท่ากัน เพื่อยืนยันว่าแรงดันบัลไฟตรงมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์โมนิก

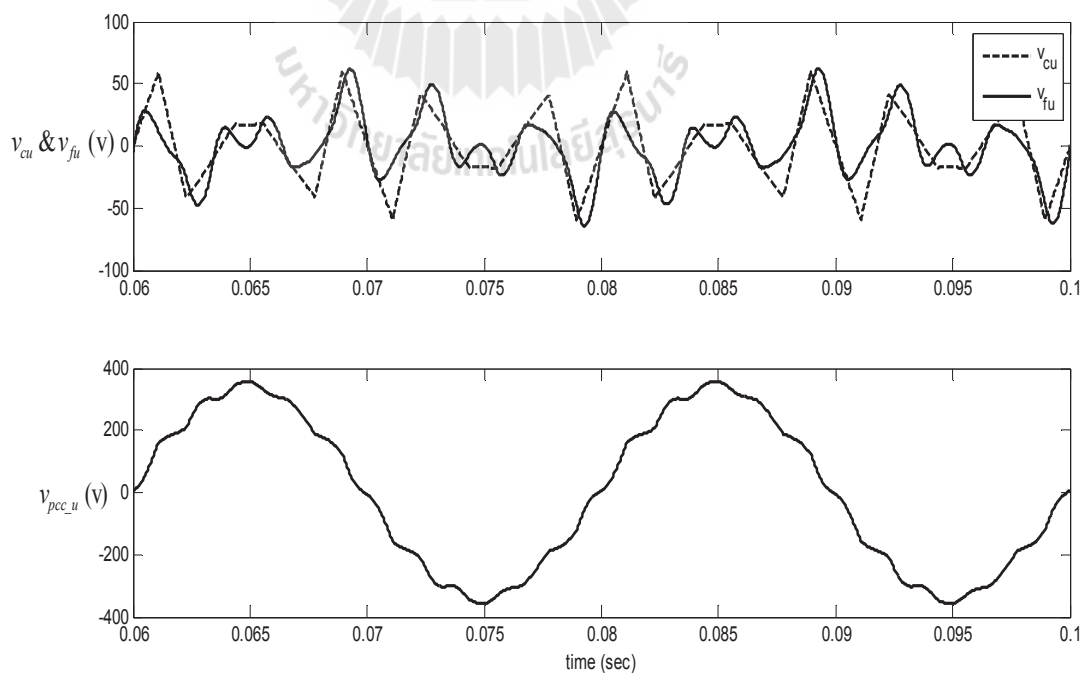


รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย

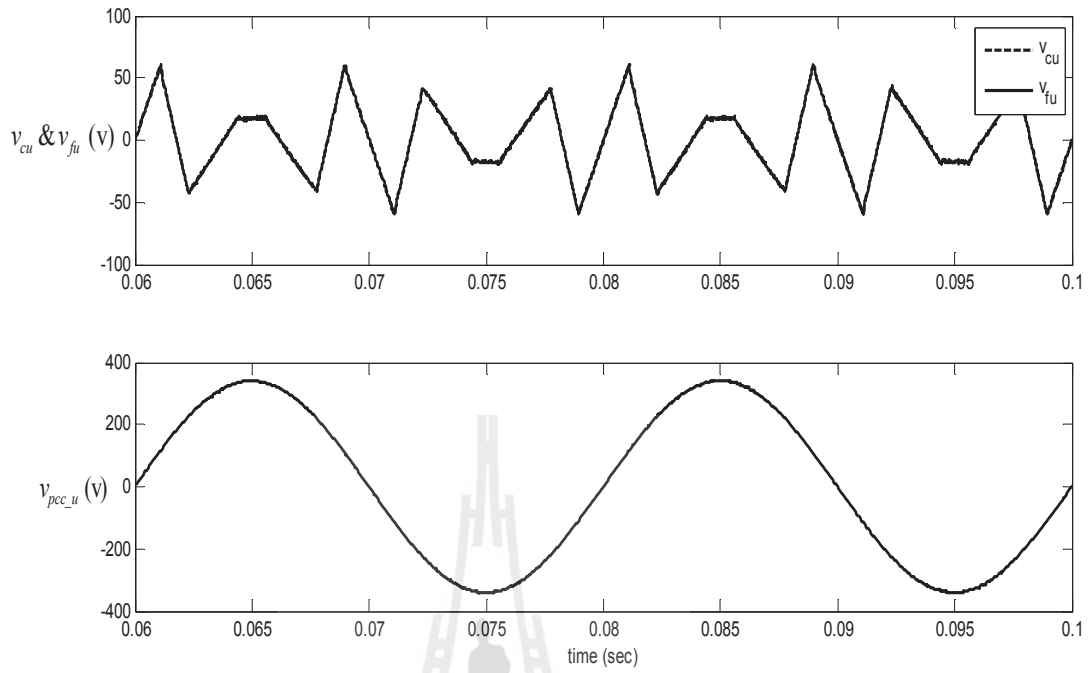
$$v_{dc} \geq \frac{3}{2} v_{h,max} \quad (6-2)$$

จากรูปที่ 6.12 เป็นรูปสเปกตรัมของแรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชย จะพบว่าแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 เป็นแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่มีค่าสูงสุด ($v_{h,max}$) โดยแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 จะมีค่าประมาณ 35 โวลต์ ในการคำนวณหาค่าแรงดันบัลไฟตรงจะดำเนินการคำนวณจากสมการที่ (6-2) (Wang, Wang, Yao, and Liu, 2001) เมื่อแทนค่าแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่มีค่าสูงสุดลงในสมการดังกล่าวจะได้ว่า แรงดันบัลไฟตรงจะต้องมีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 52.5 โวลต์ ในการสังเกตพฤติกรรมของแรงดันบัลไฟตรงจะดำเนินการสังเกตพฤติกรรมของแรงดันบัลไฟตรงตั้งแต่ 52.5 โวลต์ ถึง 750 โวลต์ สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 6.3 เมื่อพิจารณาในสมการที่ (5-21) ในบทที่ 5 จะพบว่าค่าแรงดันบัลไฟตรงจะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ และพิจารณาสมการที่ (5-1) ถึงสมการที่ (5-3) พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ยังขึ้นอยู่กับค่าแรงดันบัลไฟตรงอีกด้วย ทั้งนี้ค่าแรงดันบัลไฟตรงจึงมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์โมนิก และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.3 พบว่าที่แรงดันบัลไฟตรงมีค่าแรงดันที่น้อยจะส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยมีค่าที่สูงแต่จะยังสามารถชดเชยแรงดันฮาร์โมนิกได้ และสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.13 ในรูปดังกล่าวเป็นผลของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่มีค่าน้อยโดย

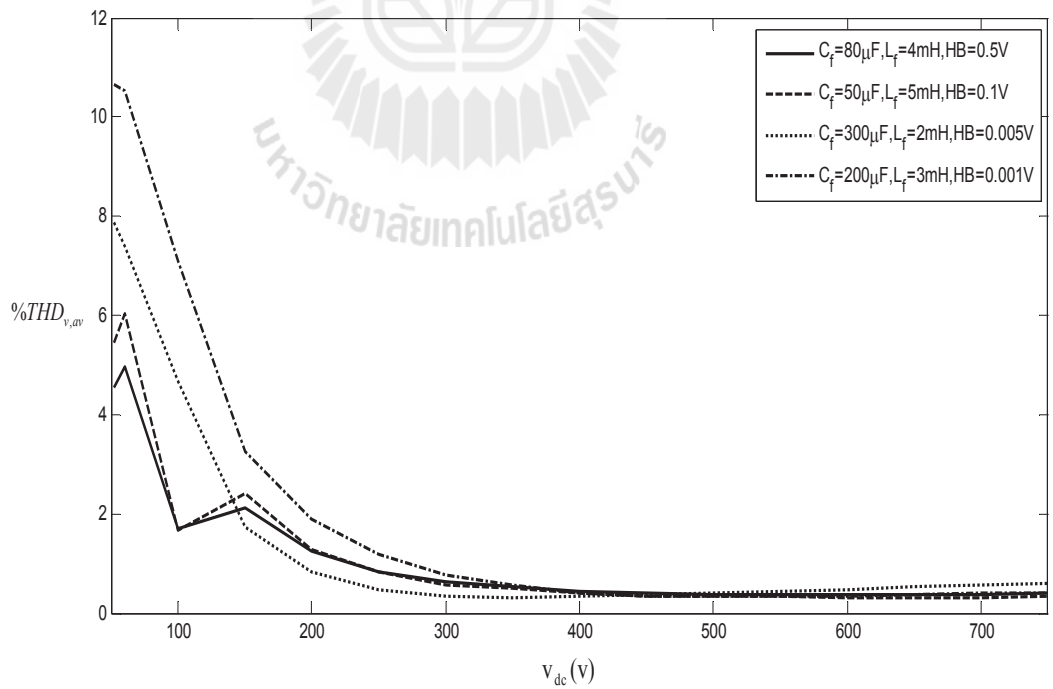
จะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ค่าแรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 52.5 โวลต์ ซึ่งผลที่ได้ คือ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยลงมาระดับหนึ่งแต่ยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากแรงดันบัลไฟตรงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบ เพราะฉะนั้นแรงดันบัลไฟตรงจึงต้องมีค่าแรงดันที่มากจึงจะสามารถมีสมรรถนะในการฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบที่ดี และเมื่อค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่ามากขึ้น สมรรถนะในการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.14 ในรูปนี้เป็นรูปผลของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่มีค่ามาก โดยในรูปนี้จะใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ที่ค่าแรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 750 โวลต์ ผลที่ได้จากรูปนี้ คือ แรงดันชดเชยมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงจึงส่งผลให้ $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยออกมา มีค่าที่ค่อนข้างดี จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาวาดกราฟของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่มีผลต่อ $\%THD_{v,av}$ ได้ดังรูปที่ 6.15 จากรูปดังกล่าวพบว่าที่ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าที่มากขึ้น $\%THD_{v,av}$ หลังการชดเชยจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และในการเลือกช่วงของค่าแรงดันบัลไฟตรงไม่ควร มีค่าที่สูงเกินไป เมื่อต้องคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต ตัวอย่างเช่น ที่ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่า 600 โวลต์ ถึง 750 โวลต์ จะเห็นได้ว่า $\%THD_{v,av}$ มีการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อย เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตผู้วิจัยจึงเลือกที่ 600 โวลต์ เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้และโหลดแรงดันฮาร์มอนิกชนิดนี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงของค่าแรงดันบัลไฟตรงตั้งแต่ 52.5 โวลต์ ถึง 600 โวลต์



รูปที่ 6.13 ผลของค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ค่าน้อย



รูปที่ 6.14 ผลของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ค่ามาก

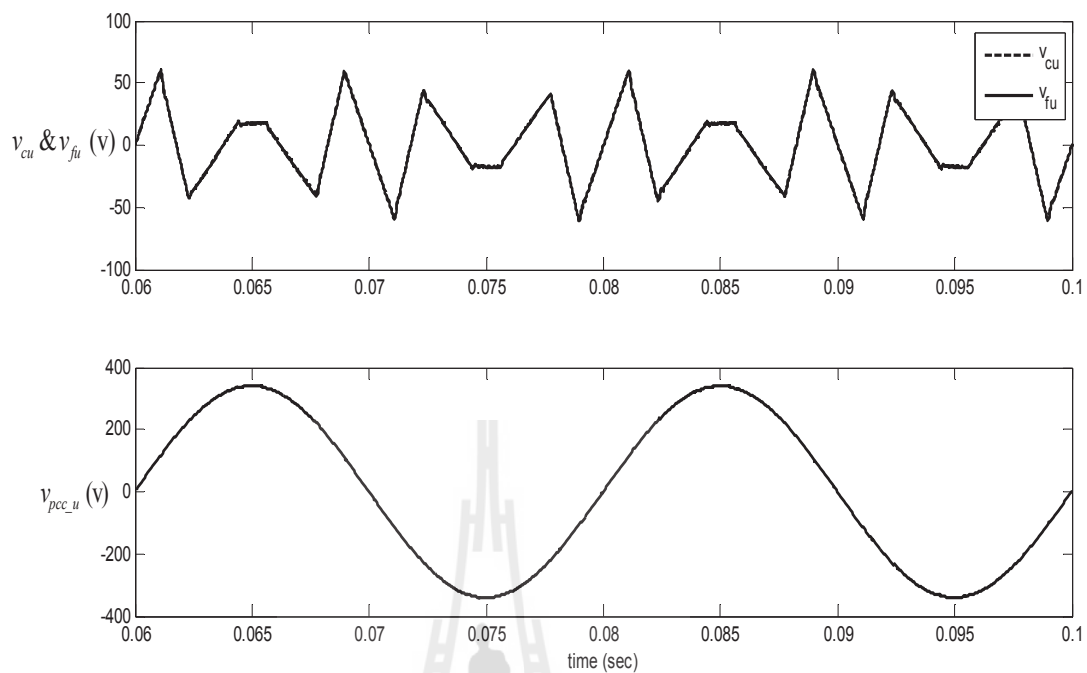


รูปที่ 6.15 พฤติกรรมของค่าแรงดันบัสไฟตรงที่มีผลต่อ %THD_{v,av}

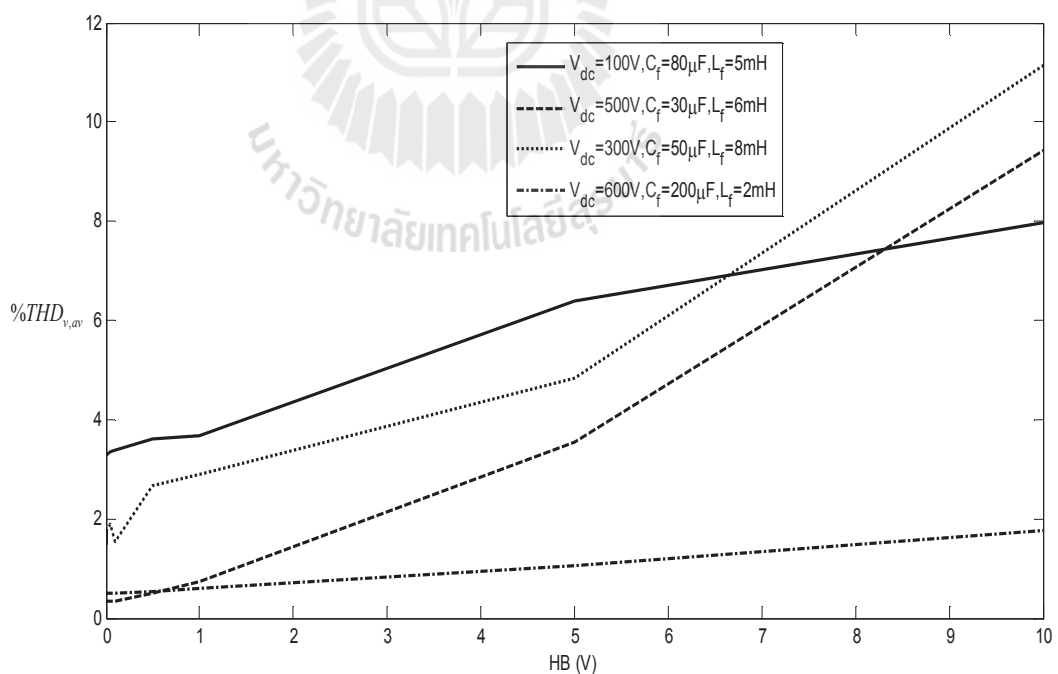
ตารางที่ 6.4 การสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอร์ซิส

ค่าพารามิเตอร์ $HB(v)$	%THD _{v,av}			
	ชุดที่ 1 ($v_{dc} = 100 v$, $C_f = 80 \mu F$, $L_f = 5 mH$)	ชุดที่ 2 ($v_{dc} = 500 v$, $C_f = 30 \mu F$, $L_f = 6 mH$)	ชุดที่ 3 ($v_{dc} = 300 v$, $C_f = 50 \mu F$, $L_f = 8 mH$)	ชุดที่ 4 ($v_{dc} = 600 v$, $C_f = 200 \mu F$, $L_f = 2 mH$)
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
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 เป็นการสังเกตพฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอร์ซิส เพื่อเป็นการยืนยันว่าพารามิเตอร์ของแถบฮีสเตอร์ซิสมีผลต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก จึงได้เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ชุด ชุดที่ 1 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 100 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 80 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 5 mH ชุดที่ 2 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 500 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 30 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 6 mH ชุดที่ 3 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 50 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 8 mH และชุดที่ 4 คือ แรงดันบัลไฟตรง เท่ากับ 600 โวลต์ ตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 200 μF และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH โดยในการสังเกตพฤติกรรมของแถบฮีสเตอร์ซิส สามารถพิจารณาได้จากขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชยในรูปที่ 6.3 และเมื่อพิจารณาที่แถบฮีสเตอร์ซิสมีค่ามากจะทำให้ขอบเขตการสวิงของแรงดันชดเชยมีขอบเขตที่กว้างจึงทำให้สัญญาณแรงดันชดเชยมีสมรรถนะในการลู่ตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงไม่ดี สามารถพิจารณา

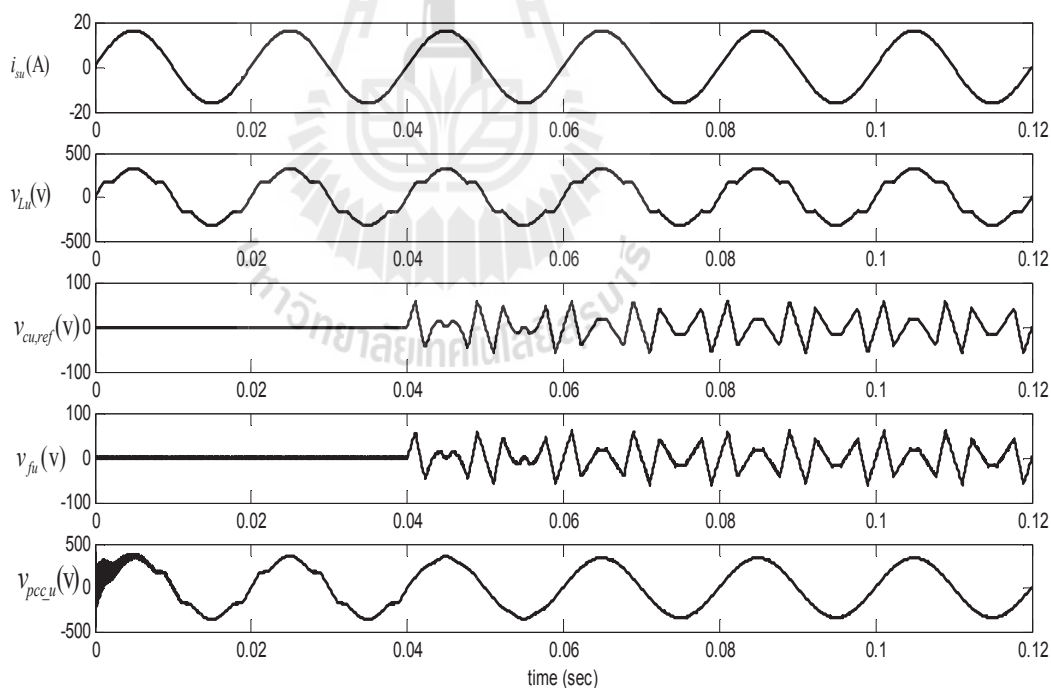


รูปที่ 6.17 ผลของค่าแถบฮีสเตอร์รีซีสมิก้าน้อย

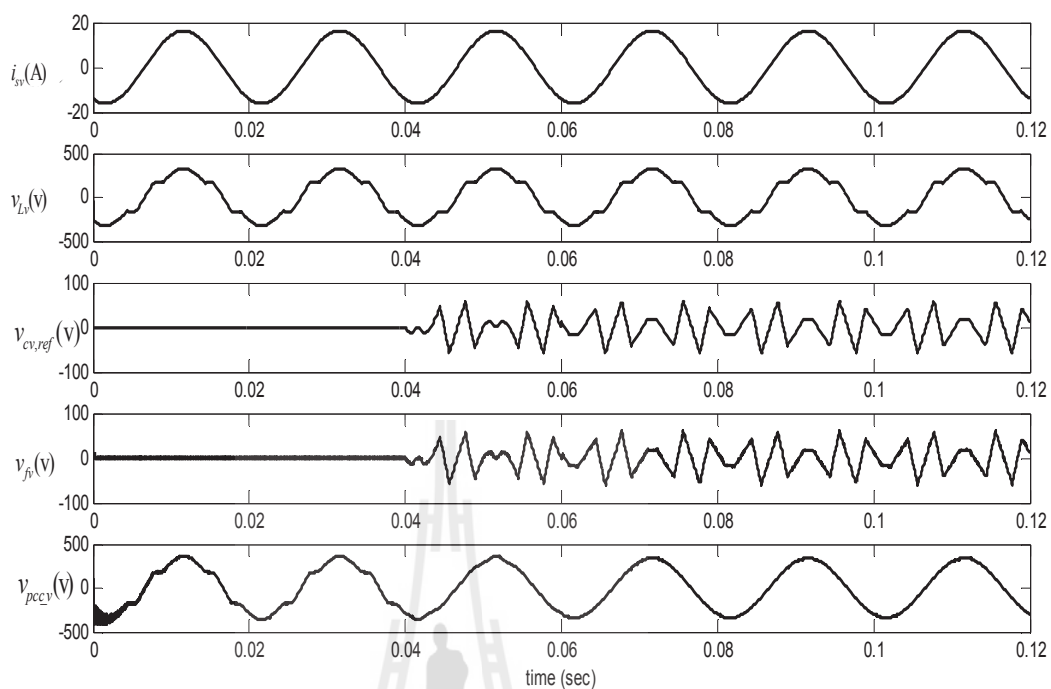
รูปที่ 6.18 พฤติกรรมของค่าแถบฮีสเตอร์รีซีสมิก้าน้อยที่มีผลต่อ %THD_{v,av}

6.5 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

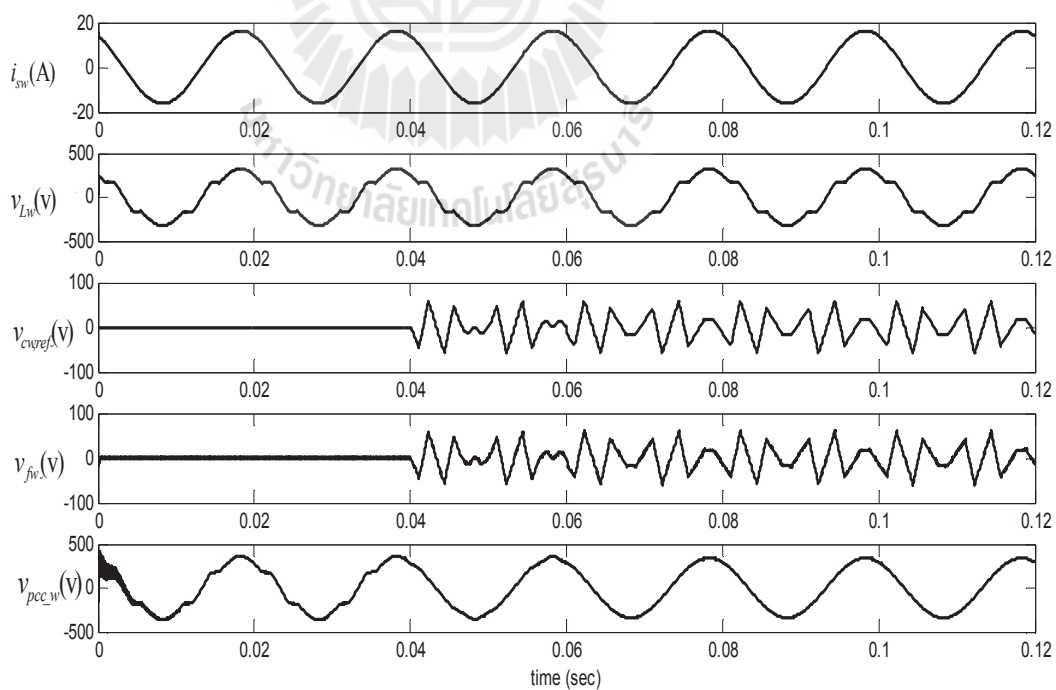
การจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสควบคุมการบิดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมของระบบดังรูปที่ 6.1 จะใช้การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งการจำลองสถานการณ์ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์จากการสังเกตพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ตัวเก็บประจุวงจรกรอง แรงดันบัสไฟตรง และแถบฮีสเทอรีซิส ในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.4 ตามลำดับ โดยผู้วิจัยจะเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จากตารางทั้ง 4 ตาราง ที่ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุดมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ ซึ่งในตารางที่ 6.1 จะพบว่าที่ แรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ แถบฮีสเทอรีซิส เท่ากับ 0.1 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง เท่ากับ 2 mH และตัวเก็บประจุวงจรกรอง เท่ากับ 100 μ F ให้ค่า $\%THD_{v,av}$ ที่น้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีการควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส



รูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส u

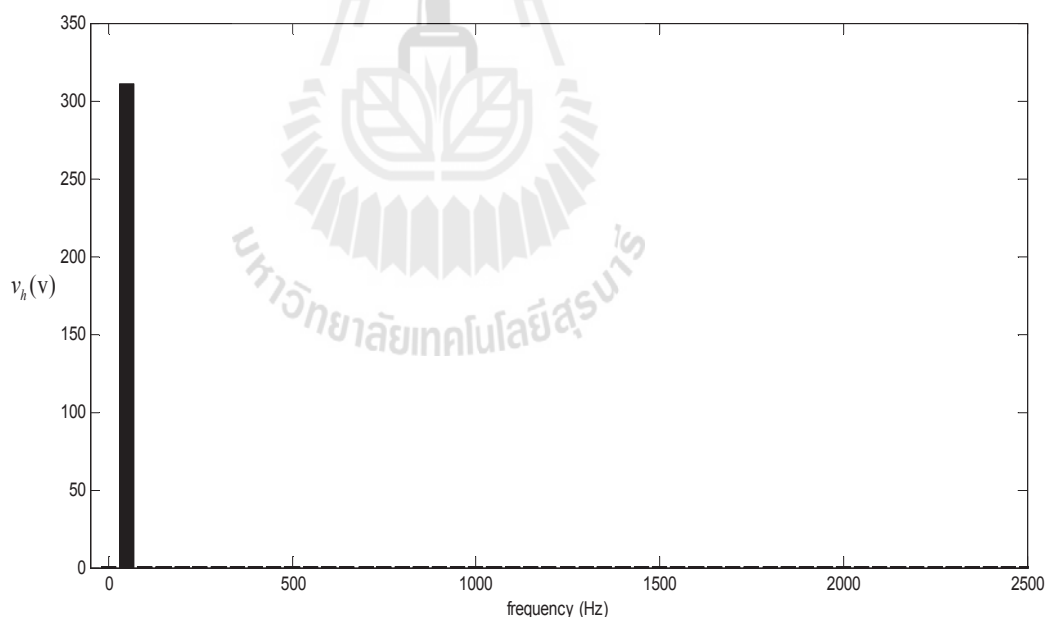


รูปที่ 6.20 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส v



รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยกรณีเฟส w

จากรูปที่ 6.19 ถึงรูปที่ 6.21 ช่วงเวลา 0 ถึง 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยให้แก่ระบบ เมื่อพิจารณาแรงดันที่จุด PCC ทั้งสามเฟส ($v_{pcc_u}, v_{pcc_v}, v_{pcc_w}$) จะพบว่า มีลักษณะเหมือนกับแรงดันที่โหลดทั้งสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) ต่อมาที่เวลา 0.04 ถึง 0.12 วินาที จะเริ่มฉีดแรงดันชดเชยทั้งสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ซึ่งจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส มีสมรรถนะที่สามารถควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟส ($v_{cu,ref}, v_{cv,ref}, v_{cw,ref}$) เมื่อฉีดแรงดันชดเชยจะสังเกตเห็นได้ว่ารูปสัญญาณแรงดันที่จุด 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% ซึ่งค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวและตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสให้ผลการจำลองสถานการณ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการฉีดแรงดันชดเชยให้มีสมรรถนะที่ดีและอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992



รูปที่ 6.22 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ หลังมีการฉีดแรงดันชดเชย

นอกจากนี้ในรูปที่ 6.12 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ก่อนมีการฉีดแรงดันชดเชยจะสังเกตเห็นได้ว่าขณะที่ยังไม่มีการฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบจะพบว่าปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ อาทิ เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 โดยปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการฉีดแรงดันชดเชยโดยมีตัวควบคุม

ฮีสเตอร์ซีสควบคุมการฉีดแรงดันชดเชย จะสังเกตได้ว่าลักษณะสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกดังรูปที่ 6.22 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกทุกอันดับจะมีปริมาณลดน้อยลงมาก และคงเหลือเฉพาะปริมาณแรงดันที่มีความถี่มูลฐาน ดังนั้น การจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมของพารามิเตอร์วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมและตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส ให้ผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการควบคุมแรงดันชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิง และให้ผลการเลือกช่วงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม

6.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมีความซับซ้อนและยังไม่ปรากฏการออกแบบมาในอดีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการพึ่งพาการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลจากการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง สำหรับผลการจำลองสถานการณ์จากการออกแบบโดยการดูพฤติกรรมของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะให้ค่าความผิดพลาดของแรงดันฮาร์มอนิกออกมาที่ดีและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 และในบทต่อไปจะนำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

บทที่ 7

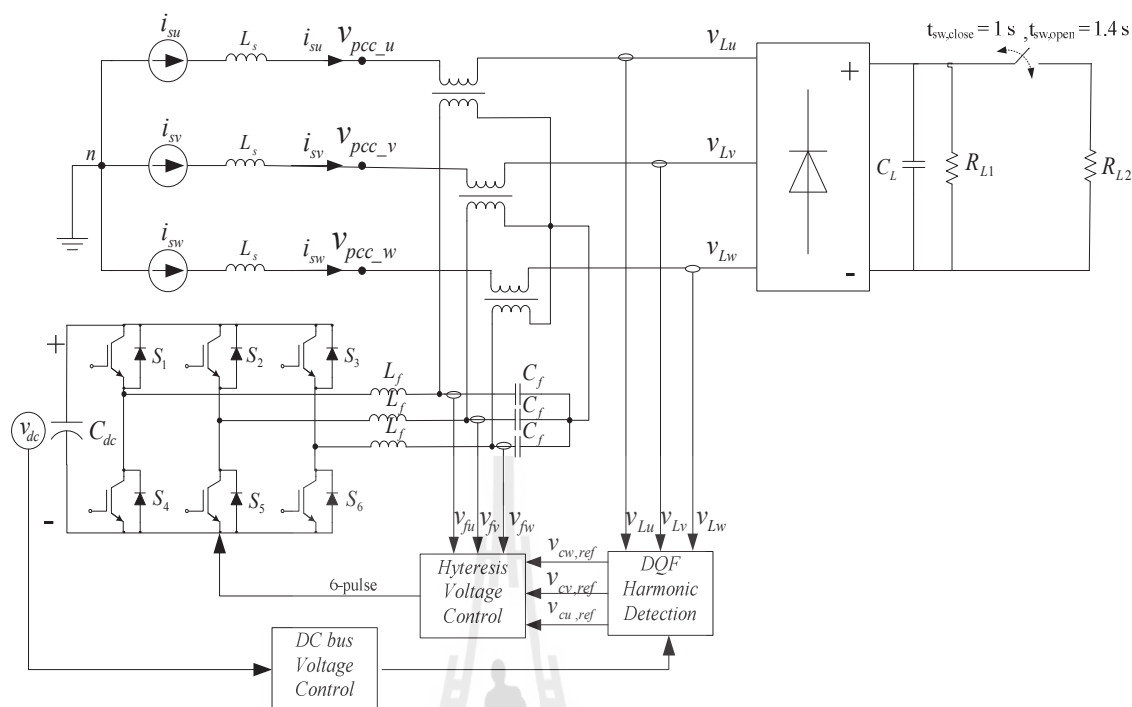
การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

7.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิก การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้จะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดังกล่าวได้พึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 นอกจากนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์รวมถึงการอภิปรายผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเช่นกัน

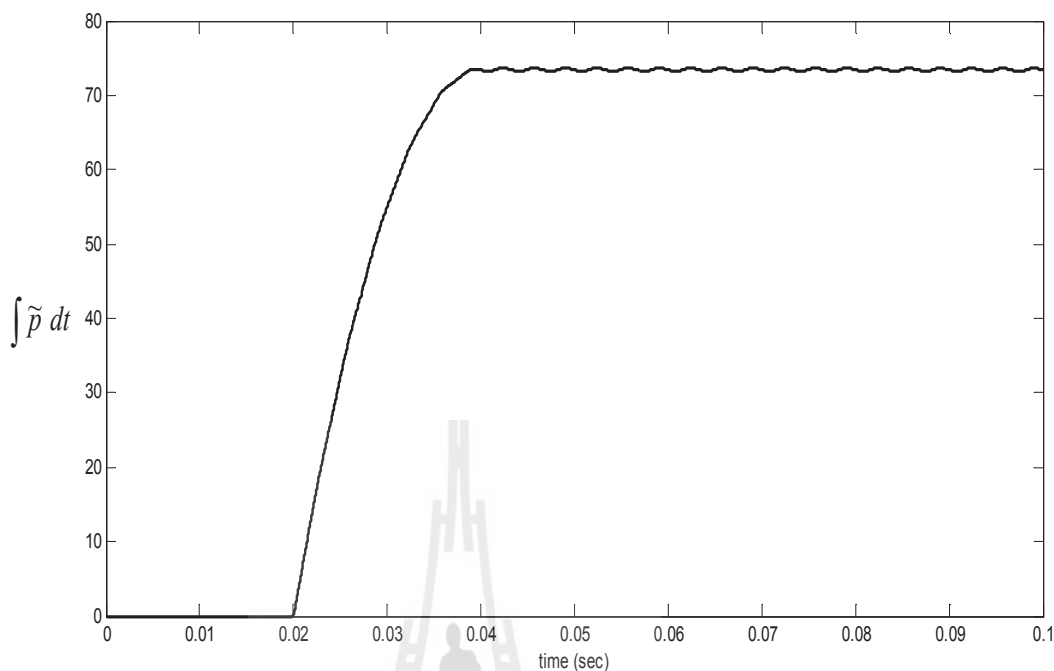
7.2 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะใช้ระบบเดียวกันกับการควบคุมแรงดันชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสตามรูปที่ 6.1 ในบทที่ 6 ซึ่งในรูปที่ 6.1 จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ แต่ในรูปที่ 7.1 ใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามที่ได้ออกแบบไว้ ระบบในภาพรวมที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม
เมื่อมีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากรูปที่ 7.1 สังเกตได้ว่ามีบล็อก DC bus Voltage Control เพิ่มเข้ามาสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เพื่อคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 300 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวให้ผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกดีที่สุด โดยดูได้จากบทที่ 6 ส่วนการออกแบบค่า C_{dc} จะคำนึงถึงค่าพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (7-1) จากสมการดังกล่าว ค่ากำลังงาน $\tilde{p}(t)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ($\frac{dE}{dt}$) ที่ตัวเก็บประจุเทียบกับเวลา เมื่อจัดเทอมสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในเทอมอินทิเกรต จะได้ดังสมการที่ (7-2) และจากสมการดังกล่าวการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดสำหรับใช้ในงานวิจัย ($C_{dc,min}$) แสดงได้ดังสมการที่ (7-3) โดยที่ค่า $\int \tilde{p}(t)dt$ คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในสถานะคงตัว ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 7.2



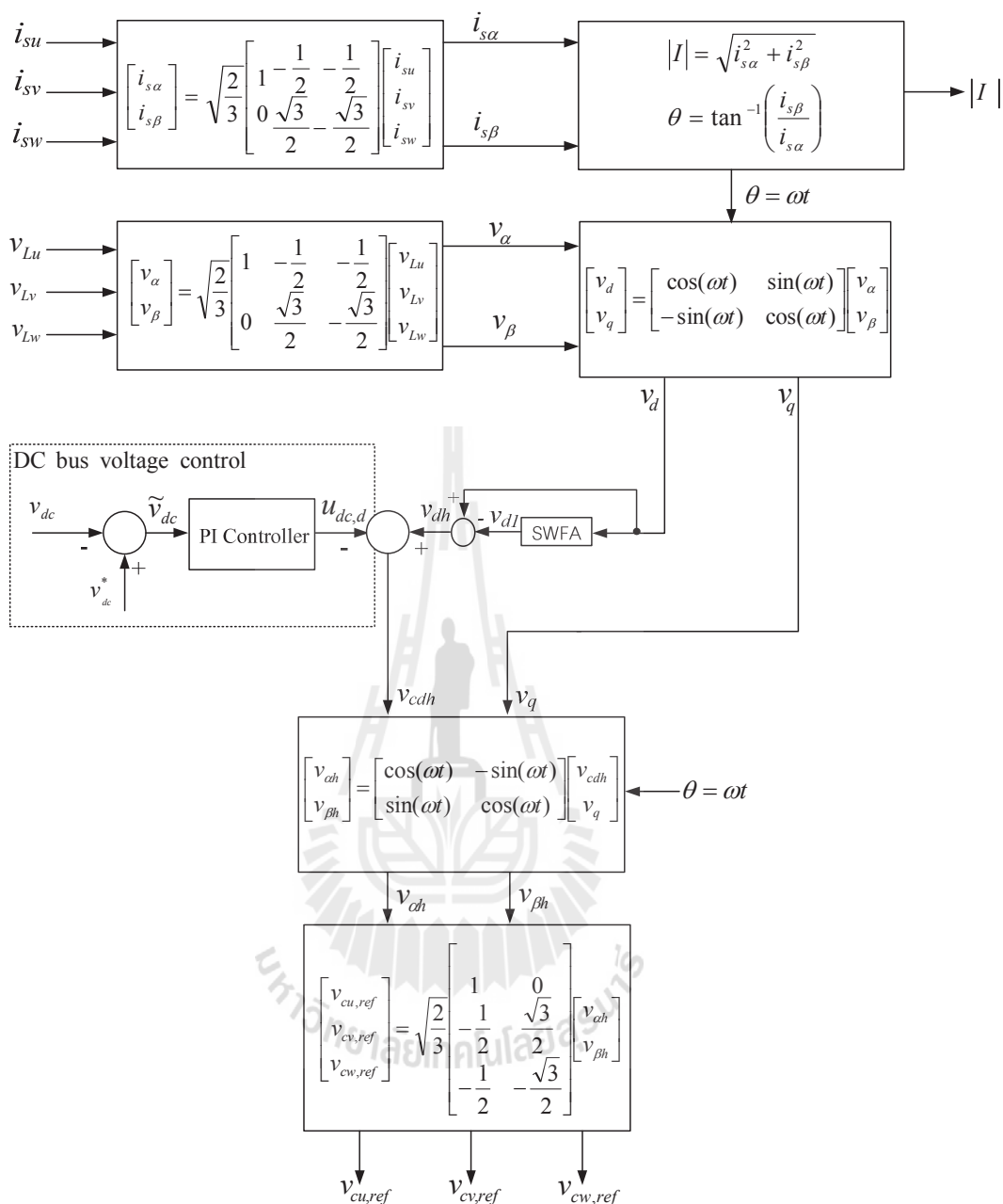
รูปที่ 7.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

$$\tilde{p}(t) = v_{dc} i_{dc} = \frac{dE}{dt} \quad (7-1)$$

$$E = \int \tilde{p}(t) dt = \int (v_{dc} \cdot C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}) dt = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 \quad (7-2)$$

$$C_{dc, \min} = \frac{2 \cdot \int \tilde{p}(t) dt}{v_{dc}^2} = \frac{2(73.5)}{300^2} = 1633 \mu\text{F} \quad (\text{เลือกใช้ค่า } C_{dc} = 1700 \mu\text{F}) \quad (7-3)$$

จากสมการที่ (7-3) กำหนดให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^*) เท่ากับ 300 โวลต์ ซึ่งได้จากการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 6 และค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 73.5 วัตต์ โดยค่ากำลังดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 7.2 ในสถานะคงตัว เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (7-3) จะได้ค่าตัวเก็บประจุ เท่ากับ 1633 μF ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ที่ 1700 μF และในส่วนของบล็อกตัวควบคุม PI (PI controller) จะแสดงการออกแบบและผลการควบคุมในหัวข้อที่ 7.3 การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ไม่ได้พิจารณาการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง แต่ถ้ามีการพิจารณาการควบคุมดังกล่าว แผนภาพการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้วิธี DQF จะได้ดังรูปที่ 7.3 ดังนี้



รูปที่ 7.3 แผนภาพการคำนวณการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

จากรูปที่ 7.3 บล็อกการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (DC bus voltage control) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอเข้ามาแทรกอยู่ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี (v_{dh}) ของขั้นตอนการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ในส่วนอินพุตของตัวควบคุมพีไอคือ ผลต่างของค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^*) กับค่าแรงดันบัสไฟตรงค่าจริงที่ได้จากการวัด

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{dc}) ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ ($u_{dc,d}$) จะถูกนำไปหักลบกับปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดี โดยผลต่างของปริมาณทั้งสอง คือ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกบนแกนดีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก (v_{cdh}) โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

7.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของตัวเก็บประจุให้คงที่ ณ จุดการทำงานที่เหมาะสมค่าหนึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมรรถนะในการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรงบนแกนดีคิว จะอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยเริ่มต้นวิเคราะห์จากสมการอนุพันธ์ของแรงดันบัลไฟตรงดังสมการที่ (7-4) เมื่อดำเนินการจัดรูปใหม่จะได้สมการที่ (7-5) และจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ($i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}$) แทนความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ (7-5) จะได้ดังสมการที่ (7-6) ซึ่งรายละเอียดที่มาของสมการได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{d_d}{C_{dc}} i_{fd} + \frac{d_q}{C_{dc}} i_{fq} \quad (7-4)$$

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = d_d i_{fd} + d_q i_{fq} \quad (7-5)$$

$$i_{dc} = d_d i_{fd} + d_q i_{fq} \quad (7-6)$$

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

ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{dc})

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

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

$$i_{dc} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \right) i_{fd} \quad (7-7)$$

$$\frac{i_{dc}}{u_{dc,d}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \quad (7-8)$$

จาก $i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}$ นำมาพิจารณาการแปลงลาปลาซเป็นเทอมพลานต์ของระบบ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (7-9) และจากสมการที่ (7-8) ใช้การแปลงลาปลาซจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (7-10)

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{1}{C_{dc}s} \quad (7-9)$$

$$\frac{I_{dc}}{U_{dc,d}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{3}{2} \quad (7-10)$$

จากสมการที่ (7-9) และ (7-10) บล็อกไดอะแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 เมื่อพิจารณาตัวควบคุมพีไอทางโดเมนเวลา จะได้ดังสมการที่ (7-11) จากนั้นทำการแปลงลาปลาซจะได้ดังสมการที่ (7-12) และสามารถจัดเทอมให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (7-13)

$$u_{dc,d} = K_{PV} \tilde{v}_{dc} + K_{IV} \int \tilde{v}_{dc} dt \quad (7-11)$$

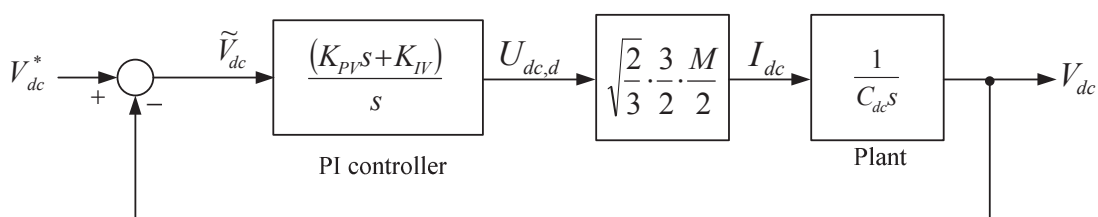
โดยที่ $\tilde{v}_{dc} = v_{dc}^* - v_{dc}$

v_{dc}^* คือ แรงดันอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ

v_{dc} คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$$U_{dc,d} = K_{PV} \tilde{V}_{dc} + \frac{K_{IV} \tilde{V}_{dc}}{s} \quad (7-12)$$

$$\frac{U_{dc,d}}{\tilde{V}_{dc}} = \frac{(K_{PV}s + K_{IV})}{s} \quad (7-13)$$



รูปที่ 7.4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 7.4 เมื่อดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด จะได้ดังสมการที่ (7-14) และสมการที่ (7-15)

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{2} \left(\frac{K_{PV}S + K_{IV}}{C_{dc}S^2} \right)}{1 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{2} \left(\frac{K_{PV}S + K_{IV}}{C_{dc}S^2} \right)} \quad (7-14)$$

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{1}{C_{dc}} \cdot \left(\frac{K_{PV}S + K_{IV}}{s^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{K_{PV}}{C_{dc}} \right) s + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{K_{IV}}{C_{dc}}} \right) \quad (7-15)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และค่า K_{IV} ของตัวควบคุมพีไอ จะใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของสมการที่ (7-15) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (7-16) โดยกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_{nv}) เท่ากับ 10π rad/sec ค่าอัตราส่วนการหน่วง (ζ) เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ และค่าดัชนีมอดูเลต (modulation index) เท่ากับ 0.25 ณ จุดการทำงานของแรงดันบัสไฟตรง เท่ากับ 300 โวลต์ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นนี้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (7-17) และสมการที่ (7-18) ตามลำดับ

$$G(s) = \frac{\omega_{nv}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{nv}s + \omega_{nv}^2} \quad (7-16)$$

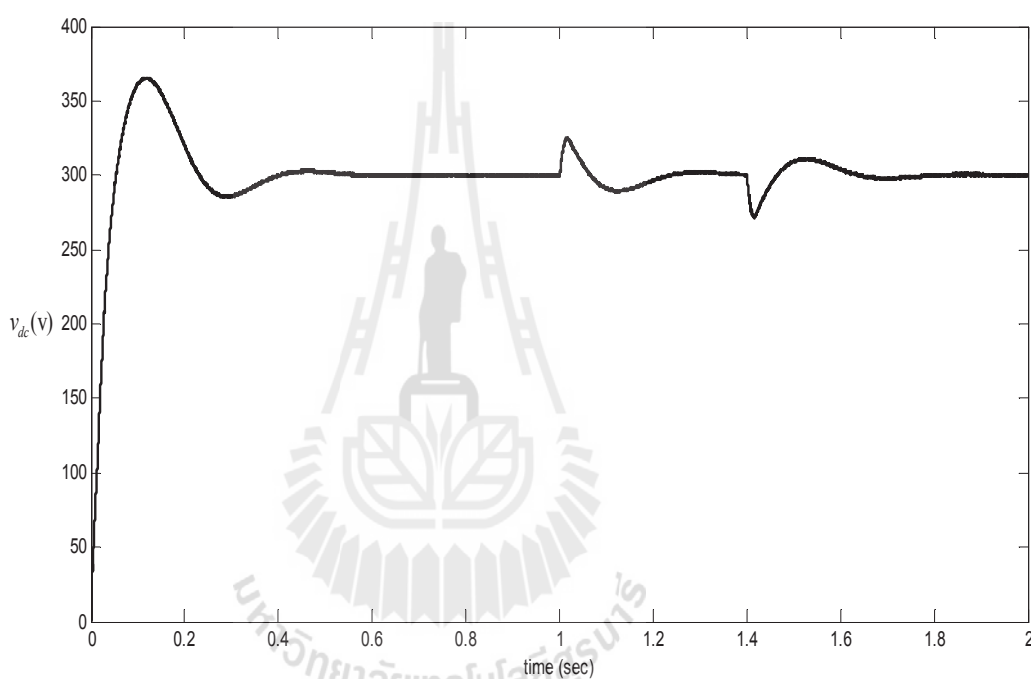
$$K_{PV} = \frac{8\sqrt{3}\zeta\omega_{nv}C_{dc}}{3\sqrt{2}M} = \frac{8\sqrt{3} \times \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \times 10\pi \times 1700 \times 10^{-6}}{3\sqrt{2} \times 0.25} = 0.49 \quad (7-17)$$

$$K_{IV} = \frac{4\sqrt{3}C_{dc}\omega_{nv}^2}{3\sqrt{2}M} = \frac{4\sqrt{3} \times (1700 \times 10^{-6}) \times (10\pi)^2}{3\sqrt{2} \times 0.25} = 10.96 \quad (7-18)$$

7.4 การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในบัพที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ได้จากการออกแบบดังที่นำเสนอไว้ข้างต้น ระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์ใช้ระบบดังแสดงในรูปที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่ควบคุมแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) มีค่าเท่ากับ 2 mH ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรอง (C_f) มีค่าเท่ากับ 100 μ F ค่าแรงดันบัสไฟตรง (v_{dc}) มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ และค่าแถบฮีสเทอรีซิส (HB) มีค่าเท่ากับ 0.1 โวลต์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดีที่สุดโดยดูได้จากบทที่ 6 การจำลองสถานการณ์ในบัพนี้พารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมา คือ

ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) มีค่าเท่ากับ $1700 \mu\text{F}$ ซึ่งได้จากการออกแบบจากผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังสมการที่ (7-3) ในการออกแบบกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (v_{dc}^*) มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ ค่า K_{pV} มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งได้จากการออกแบบในสมการที่ (7-17) และค่า K_{pI} มีค่าเท่ากับ 10.96 ซึ่งได้จากการออกแบบในสมการที่ (7-18) นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญสำหรับการจำลองสถานการณ์การ กำจัดแรงดันฮาร์มอนิก คือ การคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งในบทยี่ใช้วิธีการคำนวณหาค่า แรงดันอ้างอิงด้วยวิธี DQF สามารถพิจารณาได้ดังแผนภาพการคำนวณดังรูปที่ 7.3

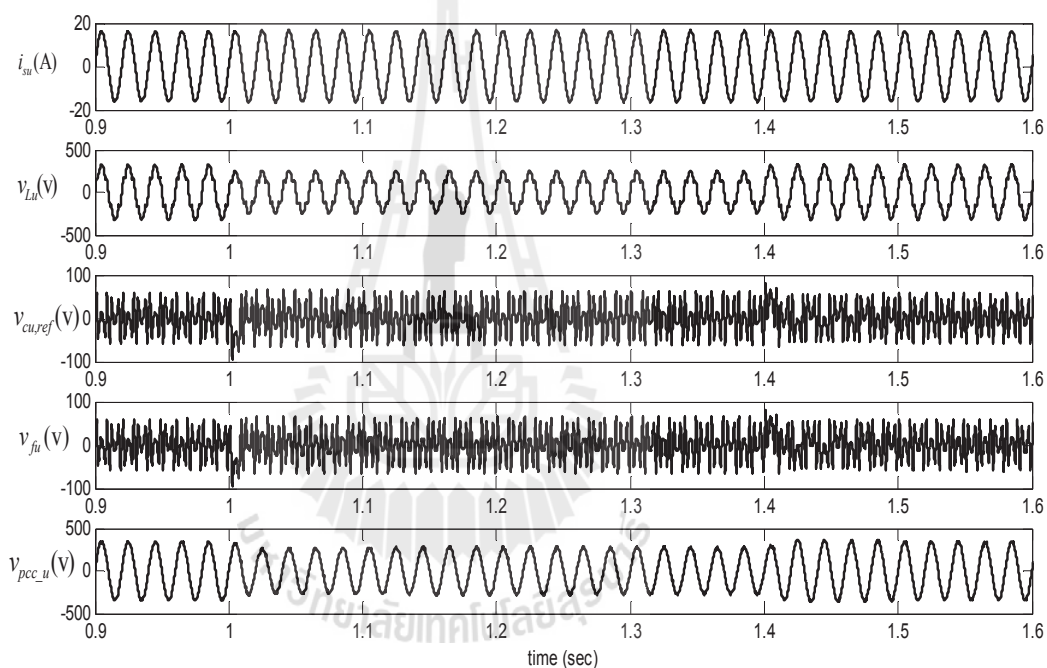


รูปที่ 7.5 ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันบัสไฟตรง

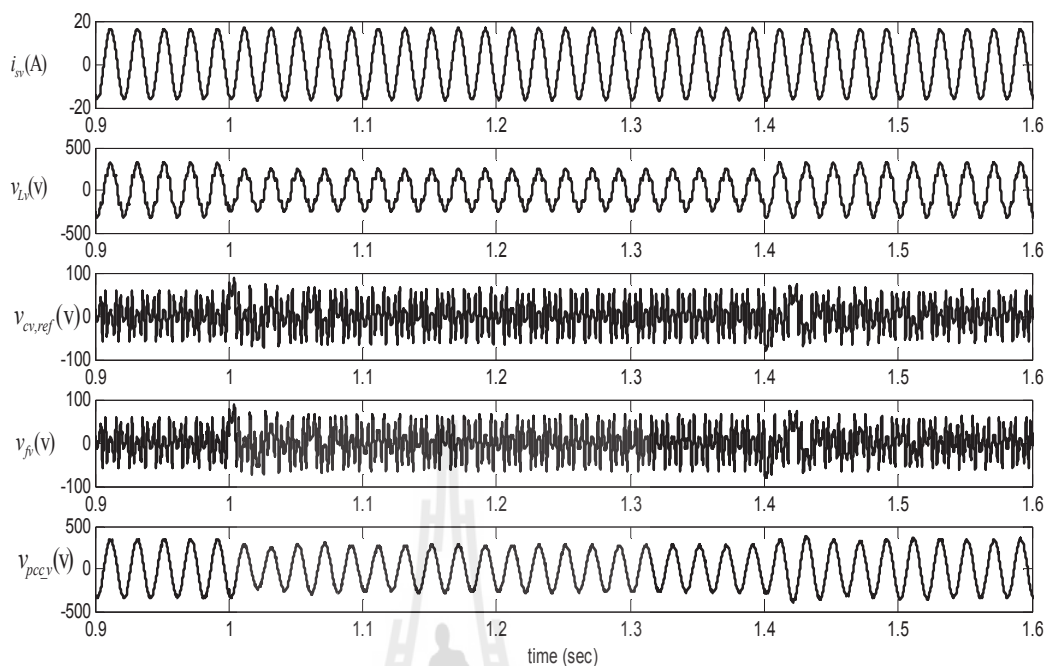
การจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0 ถึง 2 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน ของวงจรเรียงกระแส โดยที่โหลดตัวเก็บประจุ (C_L) เท่ากับ $1 \mu\text{F}$ เท่าเดิมตลอดการจำลอง สถานการณ์ ในช่วงเวลา 0 ถึง 1 วินาที โหลดตัวต้านทาน (R_{L1}) จะเท่ากับ $0.1 \text{ M}\Omega$ และที่เวลา 1 วินาที ถึง 1.4 วินาที จะขนานโหลดตัวต้านทาน (R_{L2}) เท่ากับ 100Ω กับโหลดตัวต้านทานก่อน หน้านี้ และที่ช่วงเวลาดังแต่ 1.4 วินาที เป็นต้นไปจะกลับมาใช้โหลดตัวต้านทาน $1 \text{ M}\Omega$ เช่นเดิม

ผลการจำลองสถานการณ์ของค่าแรงดันบัสไฟตรง สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 7.5 และ จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ในช่วง

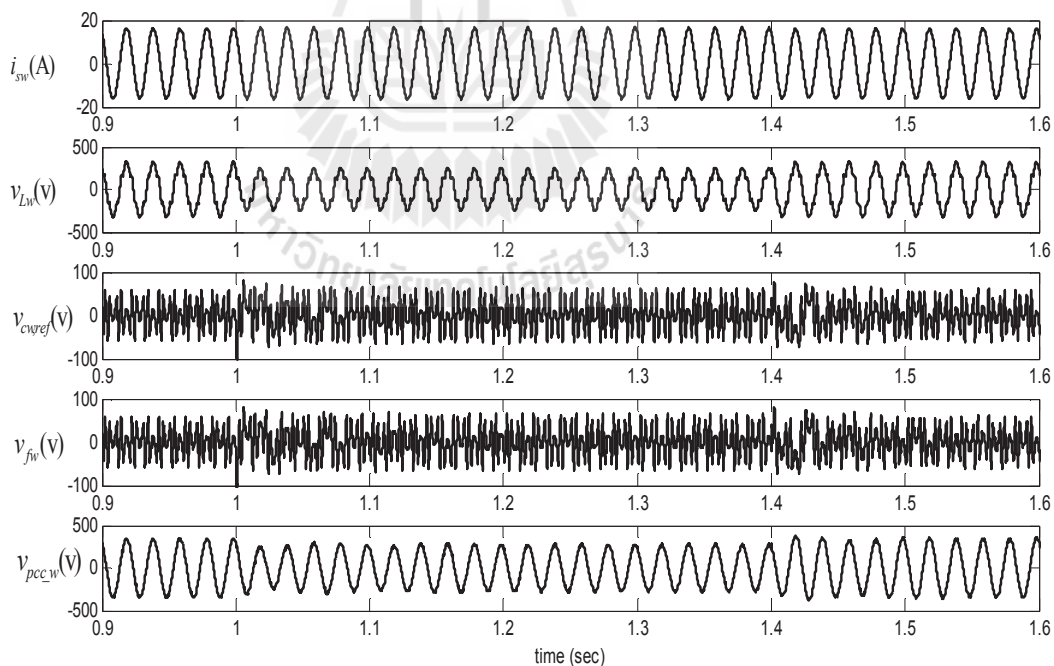
ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้เท่ากับ 300 โวลต์ โดยใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.5 วินาที ภายหลังจากช่วงเวลาตั้งแต่ 1 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน แรงดันบัสไฟตรงมีการสั่นไหวในช่วงเวลา 1 วินาที ถึง 1.3 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวมีการปรับเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงประมาณ 325 โวลต์ ถึง 290 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 0.3 วินาที สำหรับปรับตัวเข้าสู่ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ 300 โวลต์ เช่นเดิม ต่อมาเวลาตั้งแต่ 1.4 วินาที มีการปรับค่าของโหลดตัวต้านทานอีกครั้ง ทำให้ค่าแรงดันบัสไฟตรง มีการสั่นไหวจนกระทั่งกลับมากังที่ เท่ากับ 300 โวลต์ ดังเดิม



รูปที่ 7.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณิเฟส u



รูปที่ 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณิเฟส v



รูปที่ 7.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณิเฟส w

จากรูปที่ 7.6 ถึงรูปที่ 7.8 เป็นผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u, v, w ตามลำดับ โดยจะแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลา 0.9 วินาที ถึง 1.6 วินาที จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า

ในช่วงก่อนเวลา 1 วินาที โหลดของวงจรเรียงกระแสจะใช้โหลดตัวเก็บประจุ เท่ากับ $1 \mu\text{F}$ ขนานกับโหลดตัวต้านทาน เท่ากับ $0.1 \text{ M}\Omega$ สัญญาณของแรงดันที่โหลดทั้งสามเฟส (v_{Lu}, v_{Lv}, v_{Lw}) มีค่ายอดแรงดันในแต่ละเฟสประมาณ 311 โวลต์ และที่เวลา 1 วินาที ถึง 1.4 วินาที มีการขนานโหลดตัวต้านทานขนาด 100Ω 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 7.3 และการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยสามเฟส (v_{fu}, v_{fv}, v_{fw}) ด้วยตัวควบคุมสัดส่วนจะสังเกตได้ว่าแรงดันชดเชยและสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน 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 7.1

ตารางที่ 7.1 ผลการจำลองสถานการณ์ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยเมื่อมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

$\%THD_v$	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

7.5 สรุป

ผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบอนุกรมที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุ จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรดังกล่าวให้มีค่าคงที่ตามที่ออกแบบไว้ตลอดการทำงาน ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ชัดเจนว่า สมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้สามารถคงค่าแรงดันตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบอนุกรมยังสามารถฉีดแรงดันชดเชยได้ตามลักษณะแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการตรวจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันหลังการชดเชยที่จุด PCC มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น จึงทำให้ $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันมีค่าลดลง และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992

บทที่ 8

สรุป

8.1 สรุป

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยงานวิจัยได้เริ่มต้นจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้า พบว่าองค์ประกอบการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสามารถแบ่งออกได้ 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 เนื่องจากการคำนวณแรงดันอ้างอิง จึงส่งผลโดยตรงต่อระบบควบคุมแรงดันชดเชย หากการคำนวณแรงดันอ้างอิงเกิดข้อผิดพลาดหรือไม่ถูกต้อง สมรรถนะการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกก็จะไม่ดีด้วยเช่นกัน ในบทที่ 4 จึงนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนคิดิว โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ และนำเสนอการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยกันทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (วิธี SRF) วิธีดีคิวเอฟ (วิธี DQF) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (วิธี PQ) วิธีทฤษฎีกำลังขณะหนึ่งประกอบกับวิธีฟูริเยร์ วิธี (PQF) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD) และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสประกอบกับวิธีฟูริเยร์ (วิธี SDF) และได้จำลองสถานการณ์การกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกพบว่า การที่นำ SWFA มาแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีข้อดี คือ ผู้วิจัยไม่ต้องเลือก

ความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำหรือวงจรกรองผ่านสูงตามวิธีแบบดั้งเดิมในอดีต อีกทั้งการเข้าสู่สภาวะคงตัวในการใช้วิธี SWFA ให้ผลการเข้าสู่ที่เร็ว ผลการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้ผลลัพธ์ที่ดี และผลการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกที่ดี ข้อด้อย คือ เสียเวลาในการจัดเก็บข้อมูลในคาบแรก ในส่วนของการนำวงจรกรองผ่านสูงมาใช้มีข้อดี คือ ง่ายต่อการใช้งาน ข้อด้อย คือ ผู้วิจัยต้องเลือกความถี่ตัดให้เหมาะสม มีช่วงเวลาประวิงจึงทำให้ผู้เข้าสู่สภาวะคงตัวช้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิค SWFA มาใช้ในส่วนของการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้งานในอนาคต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกวิธี DQF สำหรับคำนวณแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ใช้กฎของแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองบนปริมาณแกนสามเฟส รวมถึงการแปลงแบบจำลองดังกล่าวไปอยู่บนแกนดีคว ด้วยหลักการแปลงของปาร์ก ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากจะนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้งานด้านการออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัลไฟตรง รวมถึงศึกษาด้านพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

การควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยมีความสำคัญมากสำหรับการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะกับการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในการควบคุมการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสมีให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยเป็นไปตามสัญญาณแรงดันอ้างอิงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมมีความซับซ้อนและยังไม่ปรากฏการออกแบบมาในอดีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการสังเกตพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยการพึ่งพาการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลจากการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง สำหรับผลการจำลองสถานการณ์จากการออกแบบโดยการดูพฤติกรรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะให้ค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกออกมาที่ดีและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ตลอดการทำงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงดันบัลไฟตรงมีผลต่อสมรรถนะการฉีดแรงดันชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมโดยตรง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงด้วยวิธี DQF ที่มีการควบคุมแรงดัน
บัลไฟตรง และนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ซึ่งผลการ
จำลองสถานการณ์ พบว่าตัวควบคุมพีไอมีความสามารถควบคุมแรงดันให้เป็นที่ไปตามที่ออกแบบไว้
 อีกทั้งยังสามารถกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกได้เช่นกัน ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีงานภาคปฏิบัติสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมที่มีโครงสร้างเป็นวงจร
อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน รวมถึงระบบควบคุมต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในงานวิจัย
วิทยานิพนธ์ เพื่อยืนยันผลการกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณา

2. ควรพิจารณาแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแทนแหล่งจ่ายกระแส
เพื่อให้สมจริงกับในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุยฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Abdelkhalik, O., and Benachaiba, C. (2009). Sensitivity Assessment of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods of Current Harmonics Under Non-Sinusoidal Condition for Shunt Active Power Filter. **Journal of Electrical & Electronics Engineering**, 9(1): 801-807.
- Akagi, H. (2006). Modern active filters and traditional passive filters, **Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, 54(3): 255-269.
- 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 Harmonic 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 Industrial 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.

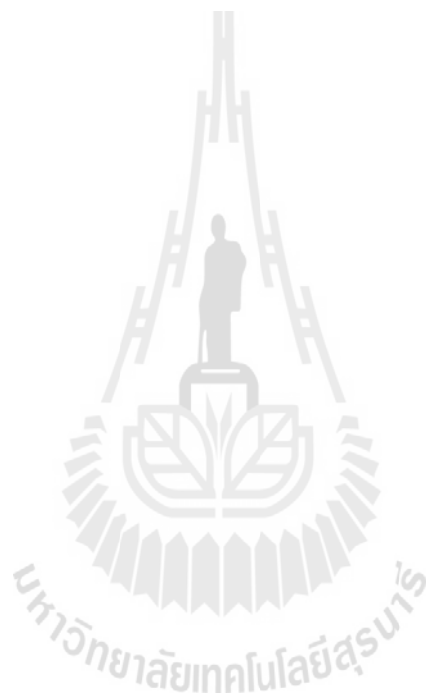
- Chang, G. W., Chen, S. K., Chin, Y. C., and Chen, W. C. (2006). An *a-b-c* Reference Frame-Based Compensation Strategy for Series Active Power Filter Control, **IEEE Conference Industrial Electronics and Applications**, 1-4.
- Elham, B.M., Clarence, L.W., and Adly, A.G. (1992). A Harmonic Analysis 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 power 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 Conditioning 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.-Electr. Power Appl.**, 151(3): 276-282.
- Lan, 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 International 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 Electronics**, 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 i_d - i_q 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 Filters. **European Control Conference 2007,(ECC'07)**.



ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาค่า v_d และ v_q



การคำนวณหาค่า v_d และ v_q

การพิจารณาหาค่าแรงดันบนแกนดี (v_d) และแรงดันบนแกนคว (v_q) เริ่มต้นจากการใช้ออนุกรมฟูรีเยร์โดยในงานวิจัย ผู้วิจัยได้แยกเป็นการใช้ออนุกรมฟูรีเยร์สำหรับแรงดันเฟส u เฟส v และเฟส w ได้ดังสมการที่ (ก.1) ถึงสมการที่ (ก.3) ตามลำดับ

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

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

$$v_{Lw} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mnw} \cos\left(n\omega t + \frac{n2\pi}{3}\right) \quad (\text{ก.3})$$

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

เมื่อพิจารณาออนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดันทั้งสามเฟส ผู้วิจัยจึงได้แสดงค่าแรงดันทั้งสามเฟส ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ

อันดับของฮาร์มอนิก	ปริมาณแรงดัน
อันดับที่ 1	$v_{1u} = V_{m1u} \cos(\omega t)$ $v_{1v} = V_{m1v} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $v_{1w} = V_{m1w} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$
อันดับที่ 2	$v_{2u} = V_{m2u} \cos(2\omega t)$ $v_{2v} = V_{m2v} \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = V_{m2v} \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$ $v_{2w} = V_{m2w} \cos\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = V_{m2w} \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
อันดับที่ 3	$v_{3u} = V_{m3u} \cos(3\omega t)$ $v_{3v} = V_{m3v} \cos\left(3\omega t - \frac{6\pi}{3}\right) = V_{m3v} \cos(3\omega t)$ $v_{3w} = V_{m3w} \cos\left(3\omega t + \frac{6\pi}{3}\right) = V_{m3w} \cos(3\omega t)$

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

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	$v_{9u} = V_{m9u} \cos(9\omega t)$ $v_{9v} = V_{m9v} \cos(9\omega t - \frac{18\pi}{3}) = V_{m9v} \cos(9\omega t)$ $v_{9w} = V_{m9w} \cos(9\omega t + \frac{18\pi}{3}) = V_{m9w} \cos(9\omega t)$
อันดับที่ 10	$v_{10u} = V_{m10u} \cos(10\omega t)$ $v_{10v} = V_{m10v} \cos(10\omega t - \frac{20\pi}{3}) = V_{m10v} \cos(10\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{10w} = V_{m10w} \cos(10\omega t + \frac{20\pi}{3}) = V_{m10w} \cos(10\omega t + \frac{2\pi}{3})$

ตารางที่ ก.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

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	$v_{13u} = V_{m13u} \cos(13\omega t)$ $v_{13v} = V_{m13v} \cos(13\omega t - \frac{26\pi}{3}) = V_{m13v} \cos(13\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{13w} = V_{m13w} \cos(13\omega t + \frac{26\pi}{3}) = V_{m13w} \cos(13\omega t + \frac{2\pi}{3})$

ในงานวิจัยนี้จะปรากฏเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11 และ 13 เมื่อรวมกับปริมาณแรงดันมูลฐานจะปรากฏดังสมการที่ (ก.4) ถึงสมการที่ (ก.6) โดยสมการดังกล่าวเป็นสมการของแรงดันทั้งสามเฟส

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

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

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

การแปลงแรงดันไปอยู่บนแกนดีควิจะเริ่มจากการแปลงปริมาณแรงดันบนแกนสามเฟสไปอยู่บนแกน α และ β โดยดำเนินการได้ดังสมการที่ (ก.7) เมื่อการแปลงปริมาณแรงดันอยู่บนแกน α และ β จะได้ดังสมการที่ (ก.8)

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

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

พิจารณาในสมการที่ (ก.9) และสมการที่ (ก.10) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ โดยดำเนินการแทนเอกลักษณ์ตรีโกณมิติลงในสมการที่ (ก.8) จะได้ดังสมการที่ (ก.11)

$$\cos(x - y) = \cos(x)\cos(y) + \sin(x)\sin(y) \quad (\text{ก.9})$$

$$\cos(x + y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y) \quad (\text{ก.10})$$

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

โดยที่ขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับของทั้งสามเฟสมีขนาดเท่ากัน เมื่อทำการแปลงแรงดันสามเฟสมาอยู่บนแกน α และ β จึงดำเนินการแปลงแรงดันบนแกน α และ β ไปอยู่บนแกนดีควิโดยอาศัยสมการที่ (ก.12) จะได้แรงดันบนแกนดีควิดังสมการที่ (ก.13)

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

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

เมื่อพิจารณาการแปลงปริมาณแรงดันให้อยู่บนแกนดีควินั้น ในงานวิจัยนี้พบว่าค่าแอมพลิจูดของแรงดันที่ 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 เมื่อแรงดันดังกล่าวอยู่บนแกนดีควิ จะแตกต่างกันในส่วนของเครื่องหมาย ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 ซึ่งปรากฏอยู่อันดับที่ 12 โดยจะแตกต่างกันในส่วนของเครื่องหมายด้วยเช่นกัน ซึ่งสรุปปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่ปรากฏบนแกนดีควิ

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

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเอกทีฟ (p)



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}) คำนวณได้จากสมการที่ (ข.4)

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \quad (\text{ข.1})$$

$$p_{3\phi} = \mathbf{v}_{uvw}^T \cdot \mathbf{i}_{uvw} = [v_u \quad v_v \quad v_w] \cdot \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = v_u i_u + v_v i_v + v_w i_w \quad (\text{ข.2})$$

$$p_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}^T \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = [v_\alpha \quad v_\beta \quad v_0] \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (\text{ข.3})$$

$$p_{dq} = \mathbf{v}_{dq}^T \cdot \mathbf{i}_{dq} = [v_d \quad v_q] \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = v_d i_d + v_q i_q \quad (\text{ข.4})$$

ส่วนที่สอง คือ ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q) แสดงได้ดังสมการที่ (ข.5) โดยค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่งสามเฟส ($q_{3\phi}$) คุ้ได้จากสมการที่ (ข.6) สามารถแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่บนแกน α และ β ($q_{\alpha\beta}$) ได้ดังสมการที่ (ข.7) และถ้าพิจารณาบนแกนดีคิวค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกนดีคิว (q_{dq}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ข.8)

$$q = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (\text{ข.5})$$

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

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

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

การพิจารณาค่ากำลังแอกทีฟทั้งบนแกนสามเฟสและบนแกน α , β และ 0 เริ่มต้นจากการใช้อนุกรมฟูรีเยร์โดยในงานวิจัย ผู้วิจัยได้แยกเป็นการใช้อนุกรมฟูรีเยร์สำหรับแรงดันเฟส 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 แรงดันที่อันดับฮาร์โมนิกต่าง ๆ
 n คือ อันดับของฮาร์โมนิก

โดยเมื่อพิจารณาอนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดันทั้งสามเฟส ผู้วิจัยจึงได้แสดงค่าแรงดันทั้งสามเฟสที่ฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ

อันดับของฮาร์โมนิก	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	$v_{2u} = V_{m2u} \sin(2\omega t)$ $v_{2v} = V_{m2v} \sin(2\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V_{m2v} \sin(2\omega t + \frac{2\pi}{3})$ $v_{2w} = V_{m2w} \sin(2\omega t + \frac{4\pi}{3}) = V_{m2w} \sin(2\omega t - \frac{2\pi}{3})$

ตารางที่ ข.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

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	$v_{7u} = V_{m7u} \sin(7\omega t)$ $v_{7v} = V_{m7v} \sin(7\omega t - \frac{14\pi}{3}) = V_{m7v} \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{7w} = V_{m7w} \sin(7\omega t + \frac{14\pi}{3}) = V_{m7w} \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3})$
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	$v_{9u} = V_{m9u} \sin(9\omega t)$ $v_{9v} = V_{m9v} \sin(9\omega t - \frac{18\pi}{3}) = V_{m9v} \sin(9\omega t)$ $v_{9w} = V_{m9w} \sin(9\omega t + \frac{18\pi}{3}) = V_{m9w} \sin(9\omega t)$

ตารางที่ ข.1 แรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ (ต่อ)

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	$v_{13u} = V_{m13u} \sin(13\omega t)$ $v_{13v} = V_{m13v} \sin(13\omega t - \frac{26\pi}{3}) = V_{m13v} \sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $v_{13w} = V_{m13w} \sin(13\omega t + \frac{26\pi}{3}) = V_{m13w} \sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3})$

โดยงานวิจัยนี้จะปรากฏเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อันดับที่ 7 อันดับที่ 11 และอันดับที่ 13 เมื่อรวมกับที่ความถี่มูลฐานจะได้เป็นสมการแรงดันที่มีฮาร์มอนิกของทั้งสามเฟสดังสมการที่ (ข.12) ถึงสมการที่ (ข.14)

$$v_{Lu} = V_{m1u} \sin(\omega t) + V_{m5u} \sin(5\omega t) + V_{m7u} \sin(7\omega t) + V_{m11u} \sin(11\omega t) + V_{m13u} \sin(13\omega t) \quad (\text{ข.12})$$

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

$$\begin{aligned}
v_{Lw} = & V_{m1w} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + V_{m5w} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m7w} \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\
& + V_{m11w} \sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_{m13w} \sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3})
\end{aligned} \tag{ข.14}$$

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

$$\begin{aligned}
p_{3\phi} = & \begin{bmatrix} V_{m1u} \sin(\omega t) & V_{m1v} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & V_{m1w} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{su} \sin(\omega t) \\ I_{sv} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} V_{m5u} \sin(5\omega t) & V_{m5v} \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) & V_{m5w} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{su} \sin(\omega t) \\ I_{sv} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} V_{m7u} \sin(7\omega t) & V_{m7v} \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & V_{m7w} \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{su} \sin(\omega t) \\ I_{sv} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} V_{m11u} \sin(11\omega t) & V_{m11v} \sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & V_{m11w} \sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{su} \sin(\omega t) \\ I_{sv} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} V_{m13u} \sin(13\omega t) & V_{m13v} \sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & V_{m13w} \sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{su} \sin(\omega t) \\ I_{sv} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{sw} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{ข.15}$$

พิจารณาในสมการที่ (ข.16) และสมการที่ (ข.17) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ โดยดำเนินการแทนเอกลักษณ์ตรีโกณมิติลงในสมการที่ (ข.15) จะได้สมการที่ (ข.18)

$$\sin^2(x) + \sin^2\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin^2\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{3}{2} \quad (\text{ข.16})$$

$$\sin(x)\sin(y) + \sin\left(x - \frac{2\pi}{3}\right)\sin\left(y - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(x + \frac{2\pi}{3}\right)\sin\left(y - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{3}{2}\cos(x - y) \quad (\text{ข.17})$$

$$p_{3\phi} = \frac{3}{2}[I_{su}V_{m1} - I_{su}V_{m5}\cos(6\omega t) + I_{su}V_{m7}\cos(6\omega t) - I_{su}V_{m11}\cos(12\omega t) + I_{su}V_{m13}\cos(12\omega t)] \quad (\text{ข.18})$$

การคำนวณค่ากำลังแอกทีฟบนแกน α , β และ 0 จะดำเนินการดังสมการที่ (ข.3) การที่จะได้ค่ากำลังแอกทีฟบนแกน α , β และ 0 ต้องทำการแปลงปริมาณแรงดันและกระแสไปอยู่บนแกน α , β และ 0 ดังสมการที่ (ข.19) โดยเมื่อทำการแปลงแกนของแรงดันและกระแสจะได้สมการที่ (ข.20) และสมการที่ (ข.21) ตามลำดับ และดำเนินการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกน α , β และ 0 จะได้สมการที่ (ข.22)

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

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

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

$$\begin{aligned}
& + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(7\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m7u} \\ V_{m7v} \\ V_{m7w} \end{bmatrix} \\
& + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(11\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(11\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m11u} \\ V_{m11v} \\ V_{m11w} \end{bmatrix} \\
& + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(13\omega t) & -\frac{1}{2}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(13\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m13u} \\ V_{m13v} \\ V_{m13w} \end{bmatrix} \quad (\text{ข.20})
\end{aligned}$$

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

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

การคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสและแกน α , β และ 0 เมื่อพิจารณาปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับของสามเฟสจะปรากฏว่ามีปริมาณแอมพลิจูดเท่ากันทุกเฟสและในการคำนวณหาค่ากำลังแอกทีฟบนแกนสามเฟสและบนแกน α , β และ 0 จะมีค่าเท่ากันและมีความถี่ในแต่ละอันดับเท่ากันอีกด้วย

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และจดลิขสิทธิ์



บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และจดลิขสิทธิ์

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. 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.

2. เอนก งามตระกูล, กองพล อารีรักษ์ และ กองพันธ์ อารีรักษ์, "การตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับซึ่งโครน์สสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35*, 14 ธันวาคม 2555, หน้า 489-492.

รายการจดลิขสิทธิ์

1. กองพล อารีรักษ์ และ เอนก งามตระกูล, "บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟสำหรับโปรแกรม SIMULINK", 2 พฤศจิกายน 2554, เลขที่คำขอ 266183

ประวัติผู้วิจัย

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

