



ตัวควบคุมเอพไอพีไอดีที่ดีที่สุดสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟส

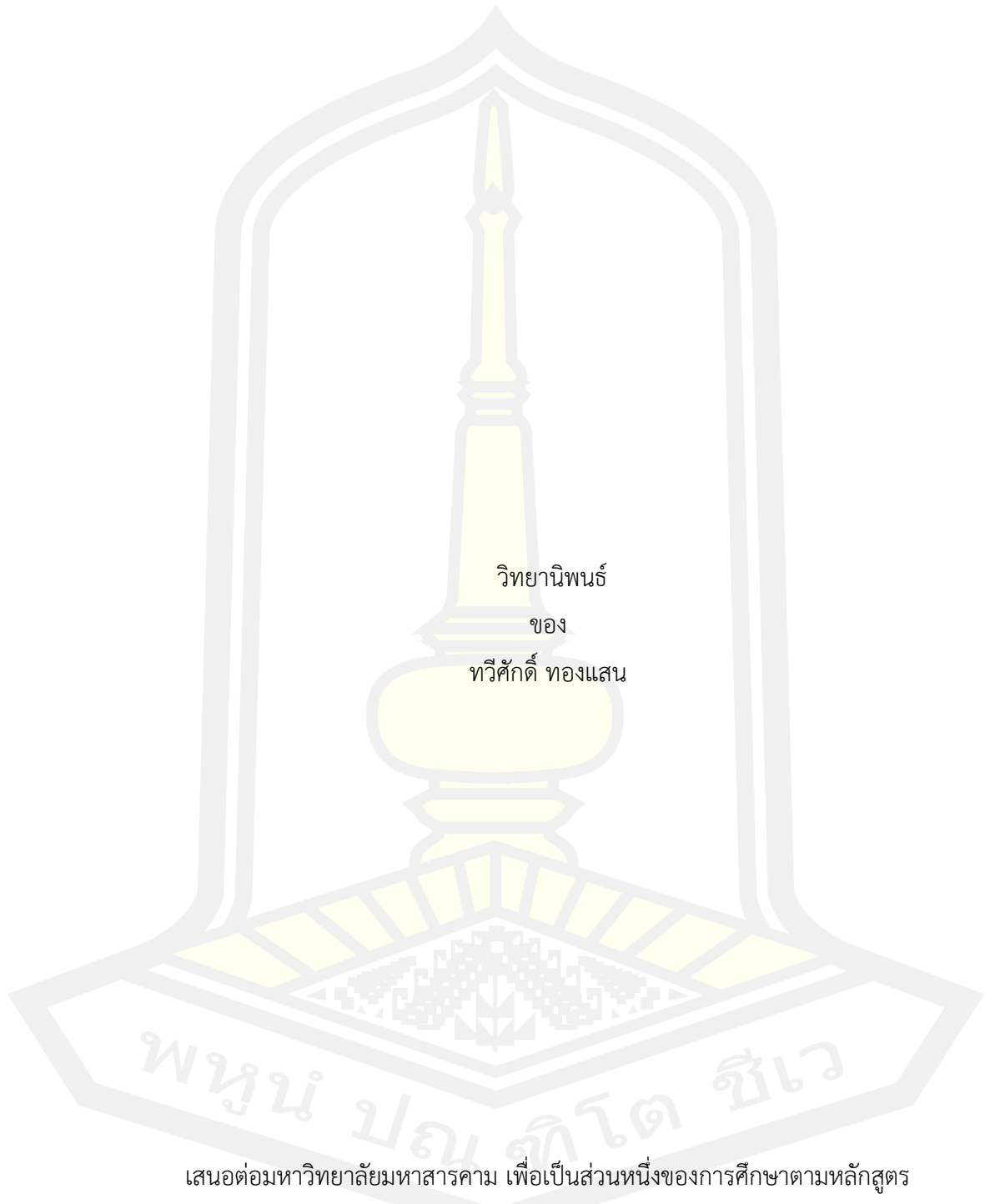
วิทยานิพนธ์
ของ
ทวิศักดิ์ ทองแสน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตัวควบคุมเอฟไอโอทีที่ดีที่สุดสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟส



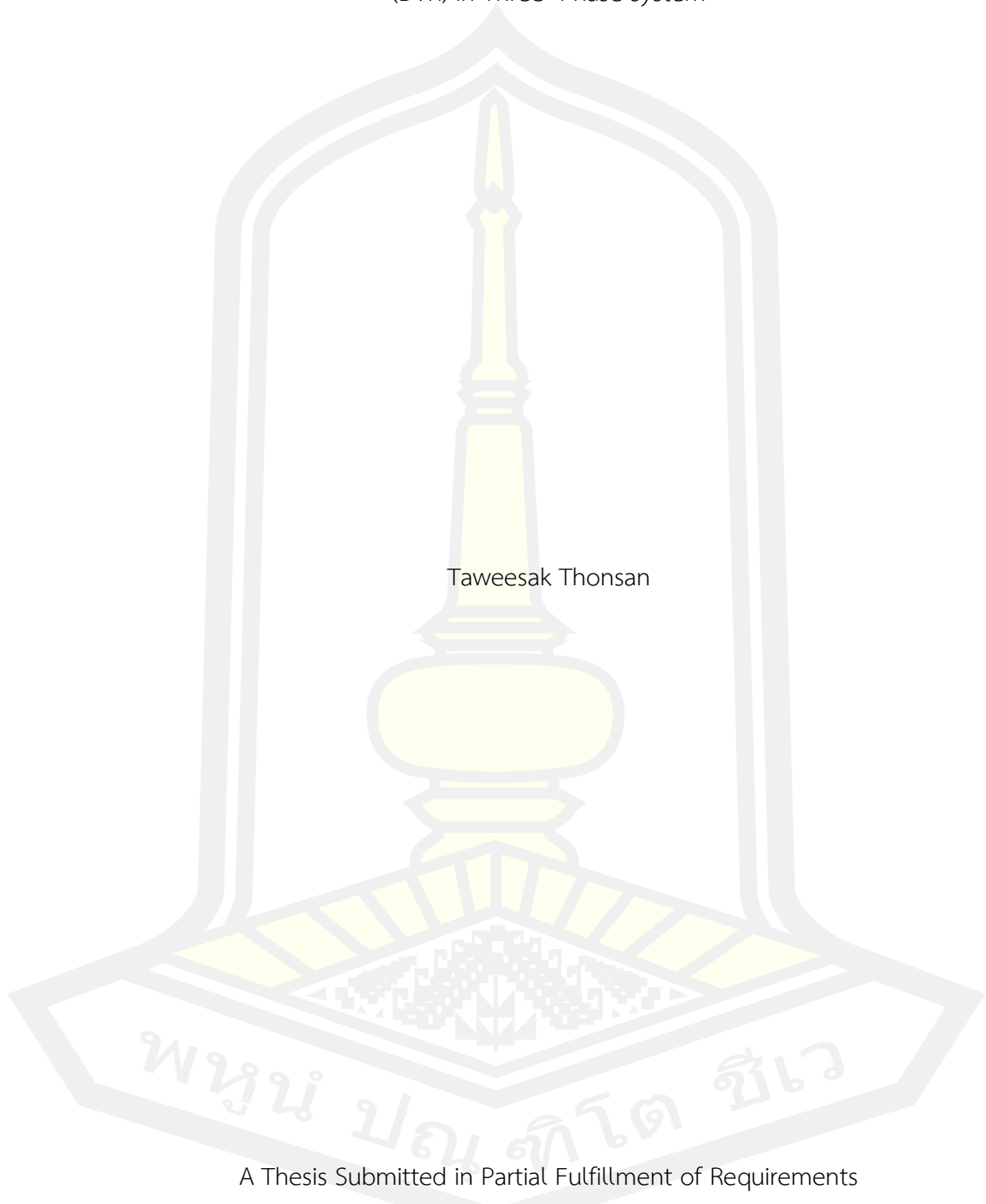
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

An Optimal Fractional Order PID (FOPID) controller for Dynamic Voltage Restorer
(DVR) in Three Phase system

Taweesak Thonsan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

January 2022

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายทวีศักดิ์ ทองแสน แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนนะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

.....กรรมการ

(อ. ดร. บัญชา วัฒนนะ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ตัวควบคุมเอพไอพีไอดีที่ดีที่สุดสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟส		
ผู้วิจัย	ทวิศักดิ์ ทองแสน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการหลักการชดเชยที่ไม่ซับซ้อนสำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟส ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิควัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm) ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 1 ชุดให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI ตัวควบคุม PID ตัวควบคุม FOPI และตัวควบคุม FOPID สำหรับแก้ปัญหาความผิดปกติจากแหล่งจ่ายในกรณี แรงดันตกแบบสมดุลงาน แรงดันเกินแบบสมดุลงานทั้งสามเฟส แรงดันตกแบบไม่สมดุลงานและแรงดันเกินแบบไม่สมดุลงาน นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาความผิดปกติหรือฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าในกรณีฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินและฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน รวมไปถึงมีการทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับเทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) และเทคนิคค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้ (Teaching-Learning-Based Optimization) ซึ่งผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าเทคนิควัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm) สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้มาตรฐาน IEEE std. 519-2014 และ CBMEMA curve ได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ

คำสำคัญ : อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต, ตัวควบคุม FOPID, ตัวควบคุม FOPI, เทคนิควัฏจักรของน้ำ

TITLE	An Optimal Fractional Order PID (FOPID) controller for Dynamic Voltage Restorer (DVR) in Three Phase system		
AUTHOR	Taweesak Thonsan		
ADVISORS	Assistant Professor Theerayuth Chatchanayuenyong , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

ABSTRACT

This study proposed low complexity control scheme for voltage control of a dynamic voltage restorer (DVR) in three-phase system. The Water Cycle Algorithm technique (WCA) was applied to four controllers: PI, PID, FOPI and FOPID controllers to find out optimal value for all controllers. The value could be used to correct main power quality problems in four cases: balanced voltage sag, balanced voltage swell, unbalanced voltage sag, and unbalanced voltage swell. Moreover, WCA was also employed to correct a single line and double line to ground fault. The results were compared to Particle Swarm Optimization (PSO) and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO). The results from MATLAB/Simulink software show that WCA technique performs better than other techniques in correcting the problems according to IEEE std. 519-2014 and CBMEMA curve.

Keyword : Dynamic Voltage Restorer, FOPID Controller, FOPI Controller, Water Cycle Algorithm

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ ซาติชนะยีนยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ต้นแบบทางการศึกษา คำนคว้า ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษา แนะนำ รวมถึงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ สำหรับการช่วยเหลือแนะนำ รวมถึงให้คำปรึกษาด้านวิชาการในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวเป็นอย่างสูง สำหรับโอกาสทางการศึกษา ทุนทรัพย์ และการช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเป็นกำลังใจตลอดมา ปราศจากบุคคลข้างต้นนี้ ผู้วิจัยจักไม่สามารถสำเร็จการศึกษาได้เลย

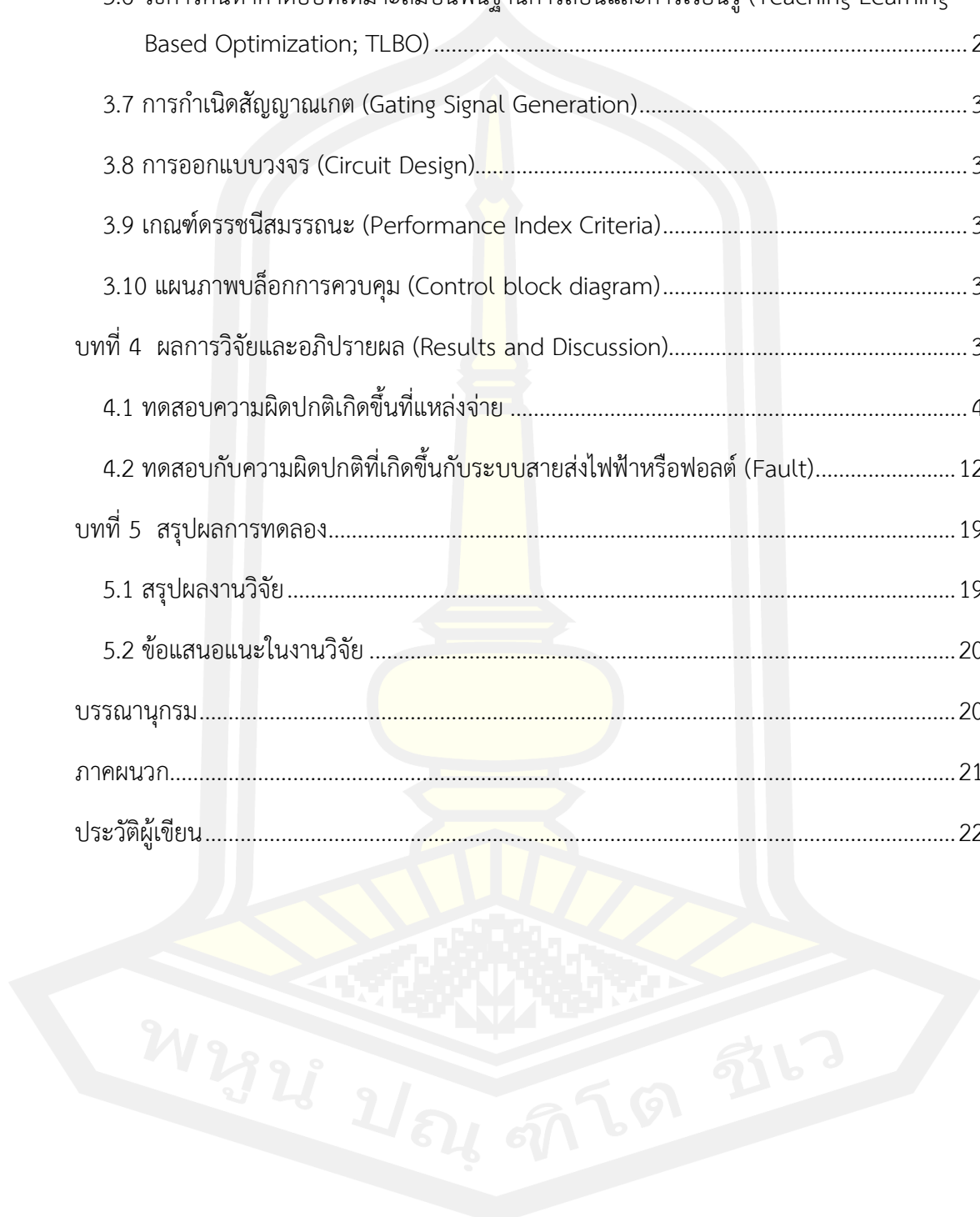
ทวีศักดิ์ ทองแสน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎี.....	7
2.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 โครงสร้างของตัวอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	22
3.2 หลักการชดเชยแรงดันอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	22
3.3 การควบคุม Fractional Order PID (FOPID) (แบบลำดับเศษส่วนย่อย)	24
3.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm Optimization (WCA).....	25

3.5 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization)	28
3.6 วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้ (Teaching-Learning-Based Optimization; TLBO)	29
3.7 การกำเนิดสัญญาณเกต (Gating Signal Generation).....	31
3.8 การออกแบบวงจร (Circuit Design).....	31
3.9 เกณฑ์ตรวจประเมินสมรรถนะ (Performance Index Criteria).....	35
3.10 แผนภาพบล็อกการควบคุม (Control block diagram).....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and Discussion).....	39
4.1 ทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย	40
4.2 ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์.....	124
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	194
5.1 สรุปผลงานวิจัย	194
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	203
บรรณานุกรม.....	204
ภาคผนวก.....	216
ประวัติผู้เขียน.....	223



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สรุปงานวิจัยและการใช้งานอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตร่วมกับตัวควบคุมต่างๆ	6
ตาราง 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต	37
ตาราง 3 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้า	38
ตาราง 4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมจากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	40
ตาราง 5 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	63
ตาราง 6 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่ไหลจากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	65
ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมจากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	66
ตาราง 8 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	91
ตาราง 9 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่ไหลจากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	93
ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่ได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)	95
ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่ได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) (ต่อ).....	96
ตาราง 12 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO).....	121
ตาราง 13 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่ไหลจากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)	123

ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	124
ตาราง 15 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	145
ตาราง 16 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA).....	146
ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	147
ตาราง 18 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	168
ตาราง 19 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO).....	169
ตาราง 20 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO).....	170
ตาราง 21 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO).....	191
ตาราง 22 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO).....	192
ตาราง 23 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย	195
ตาราง 24 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย	198
ตาราง 25 การเปรียบเทียบ The total harmonics distortions (% THD) ของแรงดันที่โหลดของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย	199

ตาราง 26 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) 200

ตาราง 27 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) 202

ตาราง 28 การเปรียบเทียบค่า The total harmonics distortions (% THD) ของแรงดันที่โหลดของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault)..... 203



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต.....	3
ภาพประกอบ 2 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน.....	7
ภาพประกอบ 3 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1].....	7
ภาพประกอบ 4 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบอนุกรม [1].....	8
ภาพประกอบ 5 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบผสม [1].....	9
ภาพประกอบ 6 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1]	9
ภาพประกอบ 7 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบผสมชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1]	10
ภาพประกอบ 8 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 3 เฟส 4 สายแบบขนาน [1].....	10
ภาพประกอบ 9 กระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ชั่วคราวที่เกิดจากฟ้าผ่า [6].....	12
ภาพประกอบ 10 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสั้นชั่วคราวจากการสวิตซ์ิ่งตัวเก็บประจุ [6].....	13
ภาพประกอบ 11 แรงดันไฟฟ้าที่สั้นชั่วคราวแบบความถี่ต่ำจากการกระตุ้นตัวเก็บประจุ [6].....	13
ภาพประกอบ 12 แรงดันไฟฟ้าดับชั่วคราวเนื่องจากความผิดพลาด [6].....	14
ภาพประกอบ 13 แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใด (Instantaneous) จากความผิดพลาดแบบ หนึ่งเฟสลงดิน [6].....	15
ภาพประกอบ 14 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะแบบทันทีทันใด (Instantaneous) จากความผิดพลาดแบบ หนึ่งเฟสลงดิน [6].....	16
ภาพประกอบ 15 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากสายบ่อนที่จ่ายให้กับโหลดที่พิกอ้าย [6].....	17
ภาพประกอบ 16 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์สเปคตรัมของ ASD [6].....	18
ภาพประกอบ 17 รูปคลื่นรอยบากจากการทำงานของวงจรแปลงผัน [6].....	19
ภาพประกอบ 18 แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมจากการทำงานของเตาหลอมแบบอาร์ค [6].....	20

ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของตัวกระทำฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลำดับเศษส่วนย่อยในระบบควบคุม [4]	24
.....	
ภาพประกอบ 20 แผนภาพวัฏจักรของน้ำ (water cycle) [42]	25
ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงการไหลของน้ำจากลำธาร ลงสู่แม่น้ำและไหลลงสู่ทะเล [42]	26
ภาพประกอบ 22 ไดอะแกรมแสดงการกำเนิดสัญญาณเกตสำหรับอินเวอร์เตอร์	31
.....	
ภาพประกอบ 23 วงจรสมมูลแหล่งจ่าย ($V_{01}+V_r$)	33
.....	
ภาพประกอบ 24 แผนภาพบล็อกการควบคุม (Control block diagram)	36
.....	
ภาพประกอบ 25 การติดตั้งอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง	37
.....	
ภาพประกอบ 26 ภาพจำลองการทำงานอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง	38
.....	
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	41
.....	
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	41
.....	
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	42
.....	
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA 4	42
.....	
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	43
.....	
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	43
.....	
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	44
.....	
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	44
.....	

ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	45
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	45
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	45
ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	46
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	47
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI.....	47
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	47
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	48
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	48
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	49
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	49
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	50
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	50
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	50

ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	51
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	51
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	52
ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	52
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	53
ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	53
ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	54
ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	54
ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	55
ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	55
ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	55
ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	56
ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	56

ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	57
ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	57
ภาพประกอบ 64 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	58
ภาพประกอบ 65 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	58
ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	59
ภาพประกอบ 67 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	59
ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	60
ภาพประกอบ 69 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	60
ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	61
ภาพประกอบ 71 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	61
ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	61
ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	62
ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	62

ภาพประกอบ 75 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	67
ภาพประกอบ 76 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO	68
ภาพประกอบ 77 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO	68
ภาพประกอบ 78 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	68
ภาพประกอบ 79 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	69
ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	69
ภาพประกอบ 81 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	70
ภาพประกอบ 82 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	70
ภาพประกอบ 83 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	71
ภาพประกอบ 84 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	71
ภาพประกอบ 85 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	72
ภาพประกอบ 86 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	72
ภาพประกอบ 87 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	73

ภาพประกอบ 88 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO	73
ภาพประกอบ 89 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO	74
ภาพประกอบ 90 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	74
ภาพประกอบ 91 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	75
ภาพประกอบ 92 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	75
ภาพประกอบ 93 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	76
ภาพประกอบ 94 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	76
ภาพประกอบ 95 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	77
ภาพประกอบ 96 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO	77
ภาพประกอบ 97 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	78
ภาพประกอบ 98 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO	78
ภาพประกอบ 99 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	79
ภาพประกอบ 100 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO	79

ภาพประกอบ 101 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	80
ภาพประกอบ 102 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	80
ภาพประกอบ 103 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	81
ภาพประกอบ 104 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	81
ภาพประกอบ 105 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	82
ภาพประกอบ 106 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	82
ภาพประกอบ 107 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	82
ภาพประกอบ 108 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	83
ภาพประกอบ 109 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	83
ภาพประกอบ 110 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	84
ภาพประกอบ 111 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	85
ภาพประกอบ 112 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	85
ภาพประกอบ 113 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	86

ภาพประกอบ 114 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	86
ภาพประกอบ 115 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO	87
ภาพประกอบ 116 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	87
ภาพประกอบ 117 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	88
ภาพประกอบ 118 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	88
ภาพประกอบ 119 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	89
ภาพประกอบ 120 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	89
ภาพประกอบ 121 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	90
ภาพประกอบ 122 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO	90
ภาพประกอบ 123 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	96
ภาพประกอบ 124 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	97
ภาพประกอบ 125 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	97
ภาพประกอบ 126 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	98

ภาพประกอบ 127 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	98
ภาพประกอบ 128 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	99
ภาพประกอบ 129 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	99
ภาพประกอบ 130 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	100
ภาพประกอบ 131 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	100
ภาพประกอบ 132 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	101
ภาพประกอบ 133 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO	101
ภาพประกอบ 134 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	102
ภาพประกอบ 135 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	103
ภาพประกอบ 136 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	103
ภาพประกอบ 137 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	104
ภาพประกอบ 138 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	104
ภาพประกอบ 139 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	105

ภาพประกอบ 140 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	105
ภาพประกอบ 141 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	106
ภาพประกอบ 142 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	106
ภาพประกอบ 143 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	107
ภาพประกอบ 144 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	107
ภาพประกอบ 145 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO	108
ภาพประกอบ 146 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	108
ภาพประกอบ 147 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	109
ภาพประกอบ 148 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	109
ภาพประกอบ 149 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	110
ภาพประกอบ 150 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลตในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	110
ภาพประกอบ 151 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	111
ภาพประกอบ 152 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	111

ภาพประกอบ 153 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัว ควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	112
ภาพประกอบ 154 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วย เทคนิค TLBO	112
ภาพประกอบ 155 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัว ควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	113
ภาพประกอบ 156 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัว ควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	113
ภาพประกอบ 157 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วย เทคนิค TLBO	114
ภาพประกอบ 158 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัว ควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	114
ภาพประกอบ 159 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัว ควบคุม PI	115
ภาพประกอบ 160 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	115
ภาพประกอบ 161 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัว ควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	116
ภาพประกอบ 162 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัว ควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	116
ภาพประกอบ 163 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	117
ภาพประกอบ 164 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัว ควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	117
ภาพประกอบ 165 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที่ 4 ของตัว ควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	118

ภาพประกอบ 166 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	118
ภาพประกอบ 167 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	119
ภาพประกอบ 168 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO.....	119
ภาพประกอบ 169 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	120
ภาพประกอบ 170 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO.....	120
ภาพประกอบ 171 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	125
ภาพประกอบ 172 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	126
ภาพประกอบ 173 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	126
ภาพประกอบ 174 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	127
ภาพประกอบ 175 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	127
ภาพประกอบ 176 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	128
ภาพประกอบ 177 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	128
ภาพประกอบ 178 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	129

ภาพประกอบ 179 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	129
ภาพประกอบ 180 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	129
ภาพประกอบ 181 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	130
ภาพประกอบ 182 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	130
ภาพประกอบ 183 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	131
ภาพประกอบ 184 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	131
ภาพประกอบ 185 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	132
ภาพประกอบ 186 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	132
ภาพประกอบ 187 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA	133
ภาพประกอบ 188 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	133
ภาพประกอบ 189 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	134
ภาพประกอบ 190 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA.....	134
ภาพประกอบ 191 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA	135

ภาพประกอบ 192 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	135
ภาพประกอบ 193 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	136
ภาพประกอบ 194 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	136
ภาพประกอบ 195 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA.....	137
ภาพประกอบ 196 ฟลด์ ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	137
ภาพประกอบ 197 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	138
ภาพประกอบ 198 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA	138
ภาพประกอบ 199 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	139
ภาพประกอบ 200 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA.....	139
ภาพประกอบ 201 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	140
ภาพประกอบ 202 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	140
ภาพประกอบ 203 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	141
ภาพประกอบ 204 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA	141

ภาพประกอบ 205 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	142
ภาพประกอบ 206 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	142
ภาพประกอบ 207 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	143
ภาพประกอบ 208 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	143
ภาพประกอบ 209 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	144
ภาพประกอบ 210 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA.....	144
ภาพประกอบ 211 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	148
ภาพประกอบ 212 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	149
ภาพประกอบ 213 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	149
ภาพประกอบ 214 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	150
ภาพประกอบ 215 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	150
ภาพประกอบ 216 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	151
ภาพประกอบ 217 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	151

ภาพประกอบ 218 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	152
ภาพประกอบ 219 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	152
ภาพประกอบ 220 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	153
ภาพประกอบ 221 ฟลลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	153
ภาพประกอบ 222 ฟลลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	154
ภาพประกอบ 223 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	154
ภาพประกอบ 224 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	155
ภาพประกอบ 225 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	155
ภาพประกอบ 226 ฟลลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	156
ภาพประกอบ 227 ฟลลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	156
ภาพประกอบ 228 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	157
ภาพประกอบ 229 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	157
ภาพประกอบ 230 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	157

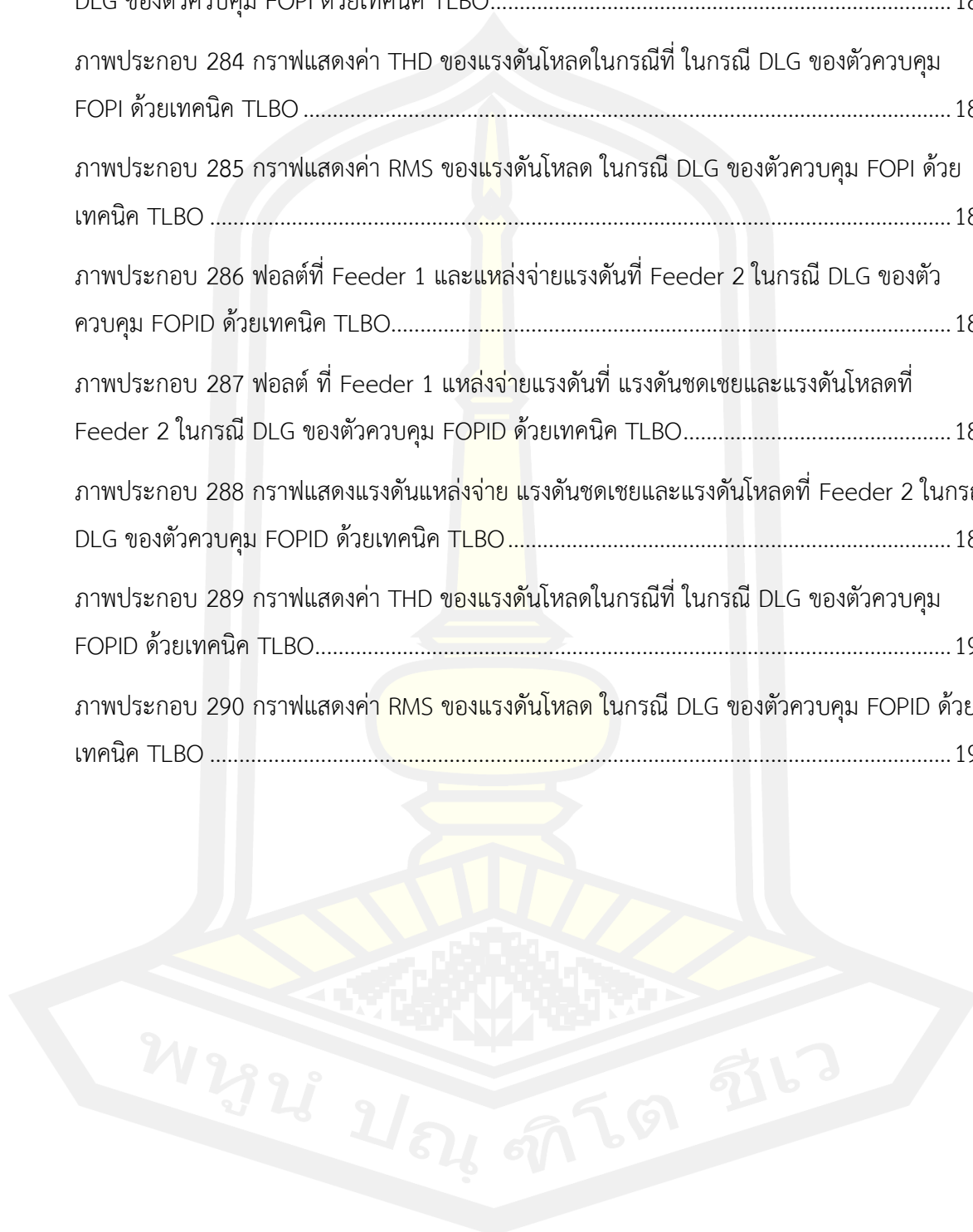
ภาพประกอบ 231 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	158
ภาพประกอบ 232 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	159
ภาพประกอบ 233 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	159
ภาพประกอบ 234 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	160
ภาพประกอบ 235 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO.....	160
ภาพประกอบ 236 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	161
ภาพประกอบ 237 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	161
ภาพประกอบ 238 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	162
ภาพประกอบ 239 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	162
ภาพประกอบ 240 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO.....	162
ภาพประกอบ 241 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	163
ภาพประกอบ 242 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	163
ภาพประกอบ 243 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	164

ภาพประกอบ 244 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่อยู่ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	164
ภาพประกอบ 245 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO.....	165
ภาพประกอบ 246 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	165
ภาพประกอบ 247 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	166
ภาพประกอบ 248 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO	166
ภาพประกอบ 249 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่อยู่ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	167
ภาพประกอบ 250 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO.....	167
ภาพประกอบ 251 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	171
ภาพประกอบ 252 ฟลด์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	171
ภาพประกอบ 253 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	172
ภาพประกอบ 254 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่อยู่ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	172
ภาพประกอบ 255 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	173
ภาพประกอบ 256 ฟลด์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	173

ภาพประกอบ 257 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO	174
ภาพประกอบ 258 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	174
ภาพประกอบ 259 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	175
ภาพประกอบ 260 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO	175
ภาพประกอบ 261 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	176
ภาพประกอบ 262 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO.....	176
ภาพประกอบ 263 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	177
ภาพประกอบ 264 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO.....	177
ภาพประกอบ 265 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	178
ภาพประกอบ 266 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	178
ภาพประกอบ 267 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO	179
ภาพประกอบ 268 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	179
ภาพประกอบ 269 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	180

ภาพประกอบ 270 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO	180
ภาพประกอบ 271 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	181
ภาพประกอบ 272 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	181
ภาพประกอบ 273 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	182
ภาพประกอบ 274 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO.....	182
ภาพประกอบ 275 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO	183
ภาพประกอบ 276 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	183
ภาพประกอบ 277 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	184
ภาพประกอบ 278 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO	184
ภาพประกอบ 279 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO.....	185
ภาพประกอบ 280 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO	185
ภาพประกอบ 281 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	186
ภาพประกอบ 282 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	186

ภาพประกอบ 283 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO.....	187
ภาพประกอบ 284 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	187
ภาพประกอบ 285 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO	188
ภาพประกอบ 286 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	188
ภาพประกอบ 287 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	189
ภาพประกอบ 288 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	189
ภาพประกอบ 289 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO.....	190
ภาพประกอบ 290 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO	190



บทที่ 1

บทนำ

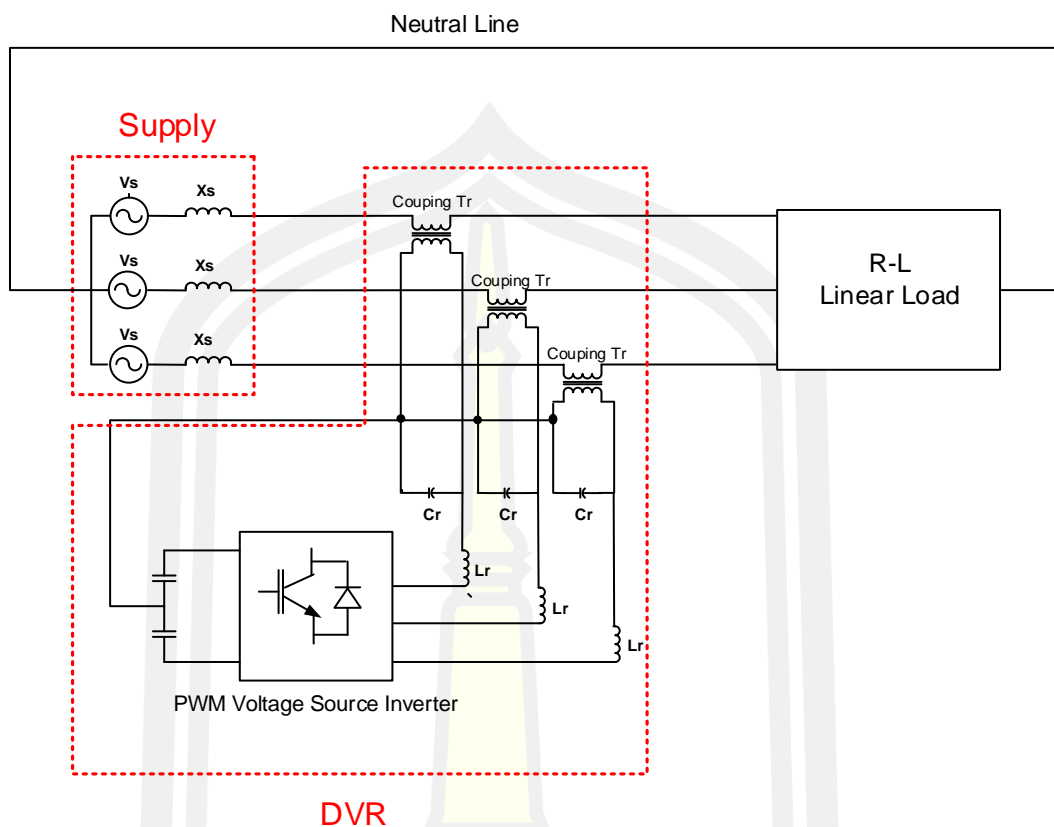
1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Sensitive load) ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ตึก อาคาร และโรงพยาบาล ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ตัวควบคุมกระบวนการผลิต อุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ พีแอลซี (PLC, Programmable logic controller) รีเลย์ และมอเตอร์ เป็นต้น [1] เมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้รับคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ไม่ดีจากแหล่งจ่าย จะส่งผลให้เกิดการทำงานผิดพลาด การทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพและยังส่งผลกระทบต่อมากมายตามมาหากเกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น ชีงงานหรือผลิตภัณฑ์เสียหาย กระบวนการผลิตล่าช้า รวมทั้งอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านั้นสั้นลง ถือเป็น การเพิ่มต้นทุนการผลิตโดยเปล่าประโยชน์ โดยรูปแบบความผิดปกติของคุณภาพกำลังไฟฟ้านั้น ได้แก่ แรงดันไม่สมดุล (Unbalance voltage) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sags) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage swells) และฮาร์โมนิก (Harmonics) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเกิดแรงดันตกและแรงดันเกินชั่วขณะจะถูกพบมากที่สุด [2-3] ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะนั้นจะมีความผิดปกติของค่าแรงดัน (rms) ลดลงจากค่าปกติประมาณ 10-90 % ช่วงความผิดปกติตั้งครั้งลูกคลื่นถึง 1 นาที สาเหตุมาจาก เช่น การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่หรือระบบเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่เข้าไปในระบบ เป็นต้น แรงดันเกินชั่วขณะนั้นจะมีความผิดปกติของค่าแรงดัน (rms) เพิ่มขึ้นประมาณ 110-180% ช่วงความผิดปกติตั้งครั้งลูกคลื่นถึง 1 นาที อาจมีสาเหตุมาจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ [4-5] โดยมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ IEEE Std.159-2014 [6]

จากการปริทัศน์เอกสารข้อมูลพบว่ามีหลากหลายอุปกรณ์ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาและลดความผิดปกติที่เกิดขึ้น ได้แก่ Unified Power Quality Conditioner (UPQC), Static Var Compensator (SVC), Dynamic Voltage Restorer (DVR) และ Distribution Static Synchronous Compensator (D) -STATCOM) เป็นต้น แต่พบว่าอุปกรณ์ที่ประสิทธิภาพและคุ้มค่าในการแก้ปัญหาคือความผิดปกติของคุณภาพกำลังไฟฟ้ามากที่สุด คือ Dynamic Voltage Restorer (DVR) หรืออุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต [7-9] มีหลายวิธีการและเทคนิคการควบคุมถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ DVR เป็นการศึกษาอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR ร่วมกับตัวควบคุม รวมไปถึง

ผลลัพธ์และข้อจำกัดของตัวควบคุมต่าง ๆ ดังนี้ ตัวควบคุม PI เป็นที่นิยมใช้ร่วมกับ DVR แต่พบว่าข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาในการแก้ปัญหาที่นาน ทำให้เกิดการล่าช้าในการชดเชย เมื่อเกิดความผิดปกติเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น และหลายงานวิจัยไม่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างหลากหลาย รวมไปถึงไม่พบงานวิจัยที่มีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิคต่าง ๆ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมอื่น ๆ และที่สำคัญเทคนิคการหาค่าที่ถูกใช้นั้นยังไม่ปรากฏว่ามีเทคนิคไหนที่ใช้พารามิเตอร์เพียง 1 ชุดแล้วสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาได้ทุกกรณี จึงทำให้ต้องหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้งเมื่อเกิดกรณีปัญหาใหม่

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนออุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR ร่วมกับ Water Cycle Algorithm (WCA) เทคนิคโดย Water Cycle Algorithm (WCA) ที่ประสบความสำเร็จการใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมให้แก่ตัวควบคุมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมด้านต่างๆ [20-24] แต่ยังไม่ปรากฏว่าถูกใช้ในร่วมกับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด 1 ชุดสำหรับการแก้ปัญหาหลัก ได้แก่ แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sags) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage swells) แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalance voltage sag) และแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalance voltage swell) ร่วมกับตัวควบคุม 4 ตัวคุม ได้แก่ Proportional-integral- (PI) controller, Proportional-integral-derivative (PID) controller, fractional order PI (FOPI) และ fractional order PID (FOPID) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะทำการเปรียบเทียบเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม Particle Swarm optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในระบบไฟฟ้าสามเฟส ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้การควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ร่วมกับ Water Cycle Algorithm (WCA) ในการแก้ปัญหาจากแหล่งจ่ายกรณีแรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ ทั้งในแบบสมดุลและไม่สมดุลในระบบสามเฟส

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ประยุกต์ใช้ (Water Cycle Algorithm, WCA) หาค่าที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุม 1 ชุดให้ควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ร่วมกับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟส

1.3.2 ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพร่วมกับตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ในการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ แรงดันตกแบบไม่สมดุลและแรงดันเกินแบบไม่สมดุล ในระบบไฟฟ้าสามเฟส

1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคนิค Water Cycle Algorithm, WCA), Particle Swarm optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 พัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1.4.2 ประยุกต์ใช้การควบคุมประยุกต์ใช้ Water Cycle Algorithm (WCA) ร่วมกับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต ในการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 คุณภาพกำลังไฟฟ้า หมายถึง ลักษณะของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย

1.5.2 อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น แรงดันตก แรงดันเกิน และความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า เป็นต้น

พหุ ประถมศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการปริทัศน์เอกสารข้อมูลพบว่ามีวิธีการหลายวิธีในการลดความผิดปกติของแรงดันที่เกิดขึ้นดังตาราง 1 เป็นการศึกษาอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR ร่วมกับตัวควบคุม รวมไปถึงผลลัพธ์และข้อจำกัดของตัวควบคุมต่าง ๆ ดังนี้ ตัวควบคุม PI เป็นที่นิยมใช้ร่วมกับ DVR แต่พบว่ามีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาในการแก้ปัญหาที่นาน ทำให้เกิดการล่าช้าในการชดเชย เมื่อเกิดความผิดปกติเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น และหลายงานวิจัยไม่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างหลากหลาย รวมไปถึงไม่พบงานวิจัยที่มีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิคต่าง ๆ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมอื่น ๆ และที่สำคัญเทคนิคการหาค่าที่ถูกใช้นั้นยังไม่ปรากฏว่ามีเทคนิคไหนที่ใช้พารามิเตอร์เพียง 1 ชุดแล้วสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาได้ทุกกรณี จึงทำให้ต้องหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้งเมื่อเกิดกรณีปัญหาใหม่

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนออุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR ร่วมกับ Water Cycle Algorithm (WCA) เทคนิคโดย Water Cycle Algorithm (WCA) ที่ประสบความสำเร็จการใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมให้แก่ตัวควบคุมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ [20-24] แต่ยังไม่ปรากฏว่าถูกใช้ในร่วมกับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต DVR เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด 1 ชุดร่วมกับตัวควบคุม 4 ตัวคุม ได้แก่ Proportional-integral- (PI) controller, Proportional-integral-derivative (PID) controller, fractional order PI (FOPI) และ fractional order PID (FOPID) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะทำการเปรียบเทียบเทคนิคการค่าที่เหมาะสม Particle Swarm optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในระบบไฟฟ้าสามเฟส

ตาราง 1 สรุปงานวิจัยและการใช้งานอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตร่วมกับตัวควบคุมต่างๆ

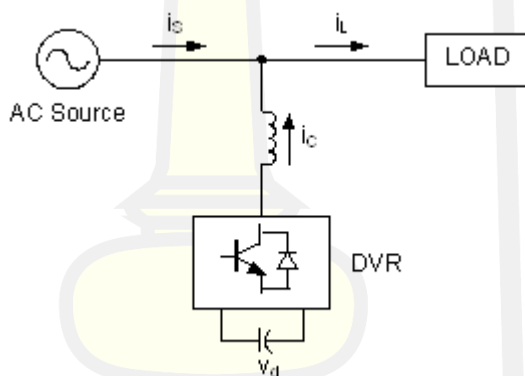
No.	Ref.	Year	Controller abbreviations		Optimal design Techniques	Power quality issues				
			Type	Comparative analysis		1	2	3	4	5
1	20	2015	PI	×	×	✓	×	✓	×	×
2	26	2017	PI	×	Fuzzy	×	×	×	×	✓
3	27	2018	PI	×	PSO	×	✓	✓	×	×
4	14	2018	ANN-based	×	GA	×	✓	✓	✓	✓
5	15	2019	ANN-based	×	ALO	✓	✓	✓	✓	×
6	28	2019	QN-PI	×	MVO	×	✓	×	×	✓
7	29	2019	PI	×	×	✓	×	✓	×	×
8	30	2019	PI	FOPID	GOA	✓	✓	✓	✓	✓
9	31	2020	PI	×	×	✓	✓	×	×	✓
10	32	2020	PI	×	×	✓	×	✓	×	×
11	33	2020	PI	×	HHO	✓	✓	✓	×	×
12	34	2021	PI	×	×	✓	×	✓	✓	×
13	35	2021	PI	×	Rao	✓	✓	✓	×	✓
14	Proposed		FOPID	PI,PID,FOPID	WCA	✓	✓	✓	✓	✓
<p>Remarks:</p> <p>Power quality issues:</p> <p>1. denotes balanced sag, 2. denotes balanced swell, 3. denotes unbalanced sag, 4. denotes unbalanced swell and 5. denotes THD Analysis</p> <p>Optimal design Techniques:</p> <p>PSO = Particle swarm optimization , QN=Quasi Newton, MVO =Multi verse optimization ALO =Ant-lion optimizer, GA =Genetic algorithm, GWO =Grey wolf optimization, GOA =Grasshopper optimization algorithm, and HHO= Harris Hawks Optimization</p>										

2.2 ทฤษฎี

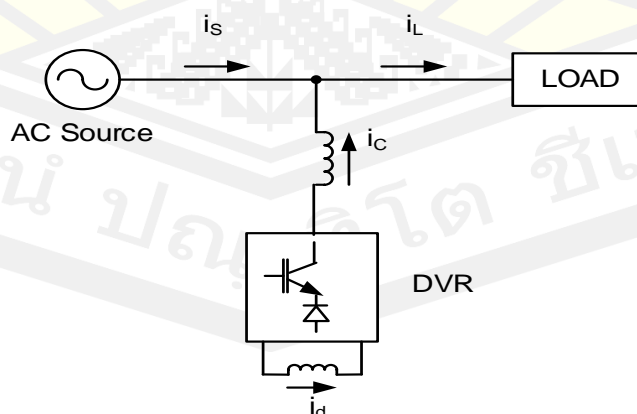
2.2.1 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer : DVR)

อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต หลักการทำงานคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกติดตั้งในระบบเพื่อทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดปัญหาแรงดันตกหรือแรงดันเกินในระบบ สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท

(1) แบ่งตามรูปแบบการทำงานของแหล่งจ่ายของอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต (Converter types base) สามารถแบ่งออก 2 ชนิด คือ แบบแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งโครงสร้างและลักษณะอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบแหล่งจ่ายแรงดันแสดงดังภาพประกอบ 2 และอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบแหล่งจ่ายกระแสแสดงดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 2 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน



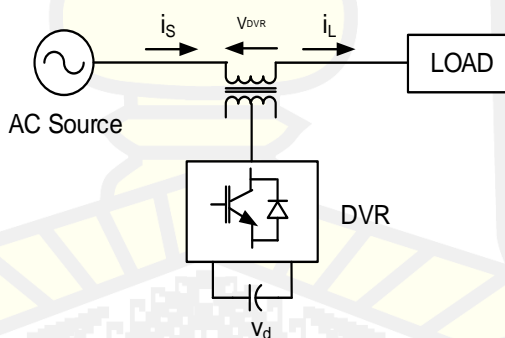
ภาพประกอบ 3 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1]

อุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter, VSI) จะประกอบด้วย คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เก็บรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อชดเชยแรงดัน ส่วนอุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter, CSI) จะประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำที่คอยชดเชยกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาระบบให้สมดุล โดยทั่วไปแล้วชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจะนิยมใช้มากกว่าแบบแหล่งจ่ายกระแส เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าและราคาถูกกว่า

(2) แบ่งตามรูปแบบการติดตั้งของอุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัต (Topology base) สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบผสมหรือแบบไฮบริด (Hybrid)

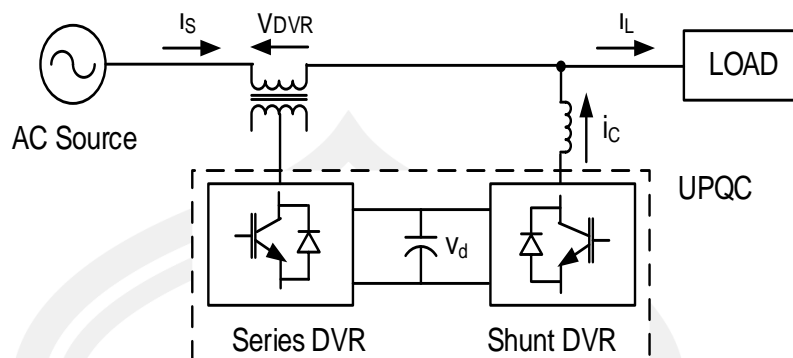
ก. อุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบขนาน แสดงดังภาพประกอบ 3 ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการแก้ไขความไม่สมดุลของกระแส ซึ่งจะเน้นการแก้ปัญหาเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะ

ข. อุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบอนุกรม แสดงดังภาพประกอบ 4 จะถูกเชื่อมต่อระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายมีหม้อแปลงเป็นจุดเชื่อมต่อ นิยมจะใช้กำจัดแรงดันฮาร์มอนิก แก้ไขความไม่สมดุลของแรงดัน และรักษาระดับแรงดันในระบบ 3 เฟส รวมทั้งใช้เพื่อลดส่วนประกอบแรงดันลำดับลบ ซึ่งจะเน้นแก้ปัญหาเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าโดยเฉพาะ



ภาพประกอบ 4 อุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบอนุกรม [1]

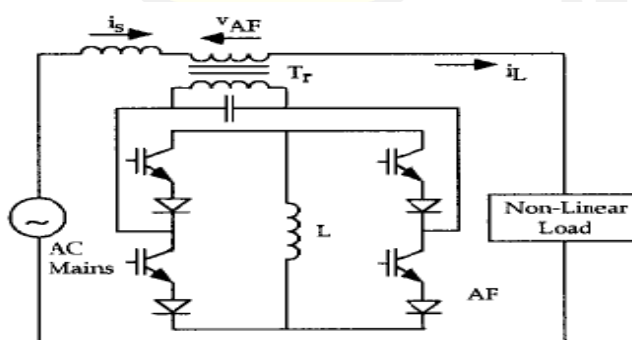
ค. อุปกรณ์กึ่งอินแรงดันพลวัตแบบผสมหรือแบบไฮบริด (Hybrid) แสดงดังภาพประกอบ 5 เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแบบอนุกรมและแบบขนาน ซึ่งเป็นแบบอุดมคติเพราะสามารถปัญหาได้ทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า แต่มีข้อเสียอยู่ที่ราคาแพงและการควบคุมที่ซับซ้อน



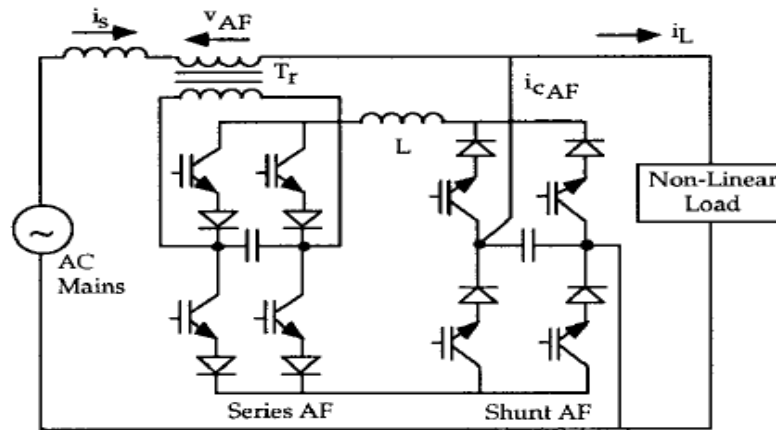
ภาพประกอบ 5 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแบบผสม [1]

(3) แบ่งตามระบบแหล่งจ่าย (Supply system based)

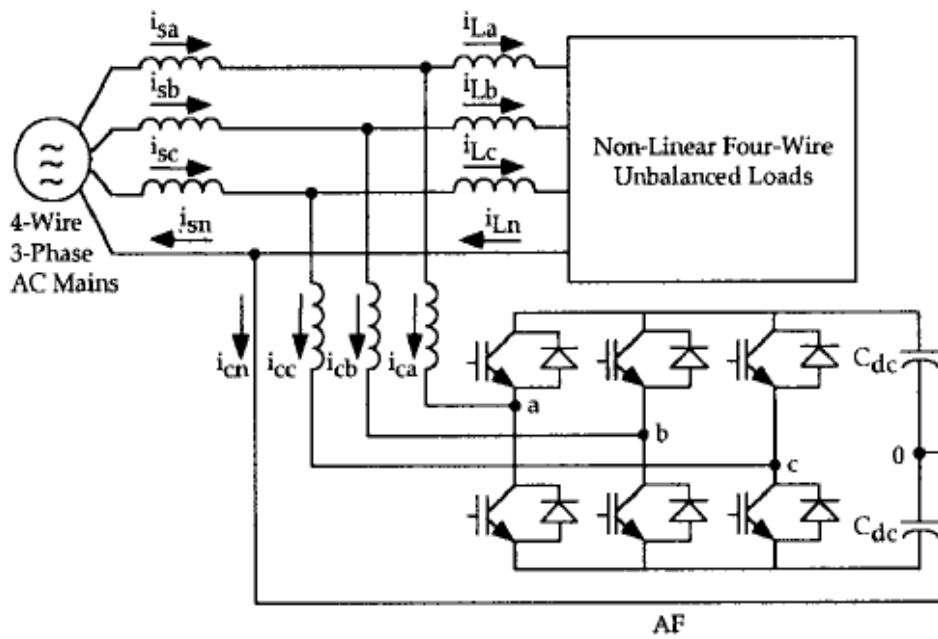
สามารถแบ่งออกได้เป็นสามระบบ คือ ระบบเฟสเดียว 2 สาย ระบบ 3 เฟส 3 สาย และระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งทั้งสามระบบดังกล่าวมานี้สามารถต่อวงจรได้ทั้งแบบอนุกรม แบบขนาน และแบบผสม ขึ้นอยู่กับความต้องการ ภาพประกอบ 6 แสดงถึงอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายกระแส ภาพประกอบ 7 แสดงถึงอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบผสมชนิดแหล่งจ่ายกระแส ภาพประกอบ 8 แสดงถึงอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 3 เฟส 4 สายแบบขนาน ตามลำดับ



ภาพประกอบ 6 อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบอนุกรมชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1]



ภาพประกอบ 7 อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตระบบ 1 เฟส 2 สายแบบผสมชนิดแหล่งจ่ายกระแส [1]



ภาพประกอบ 8 อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตระบบ 3 เฟส 4 สายแบบขนาน [1]

2.2.2 วิธีการควบคุม

วิธีการควบคุมซึ่งเป็นหัวใจของการปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) การตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส ไม่ว่าจะเป็นการตรวจจับที่โหลดหรือแหล่งจ่ายโดยอาจจะใช้ Transformer (PT's), CT's, Hall effect sensor หรือ Isolation amplifiers เป็นต้น ในการตรวจจับ

(2) คำสั่งการชดเชยแรงดันหรือกระแส เป็นส่วนสำคัญของการควบคุมการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคในโดเมนความถี่ (Frequency domain) หรือโดเมนเวลา (Time domain)

ก. การชดเชยในโดเมนความถี่ (Frequency domain) จะอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์ฟูเรียร์ของสัญญาณการผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสที่จะดึงออกมาเป็นคำสั่งชดเชย

ข. การชดเชยในโดเมนเวลา (Time domain) สัญญาณอ้างอิงจะคำนวณจากแรงดันหรือกระแสทันทีทันใด วิธีนี้จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสทันทีทันใด ภายในหนึ่งคาบเวลาซึ่งให้ผลตอบสนองที่เร็ว

(3) สัญญาณเกต (Gating signal) สำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าถูกกำเนิดโดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของการควบคุม เช่น PWM Hysteresis Sliding-mode หรือ Fuzzy -logic เป็นต้น

อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่ใช้ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบอนุกรม อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) เพื่อใช้ชดเชยแรงดันตก แรงดันเกิน และควบคุมแรงดันที่ขั้วของโหลดให้สมดุล สัญญาณแรงดันอ้างอิงจะคำนวณและสร้างจากในวิธีโดเมนเวลา (Time domain) ส่วนตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตนั้นจะใช้ตัวควบคุม Fractional Order PID ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตจะอธิบายในบทต่อไป

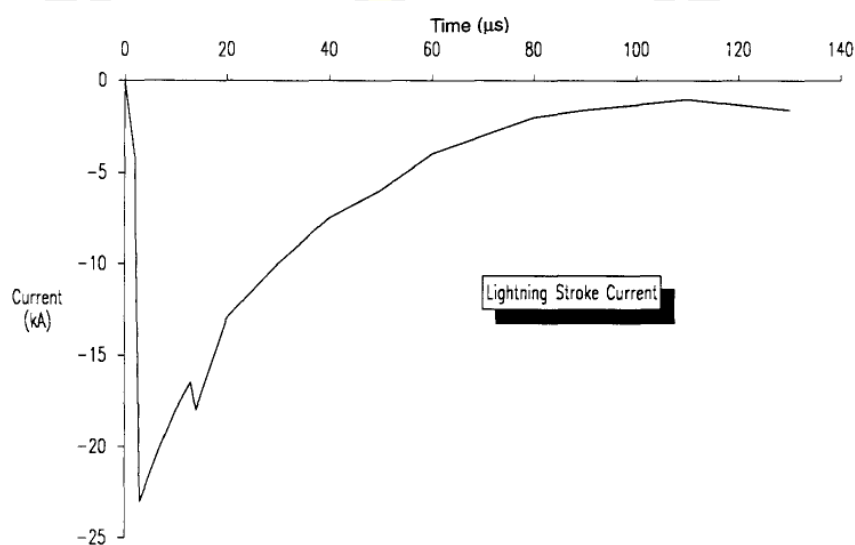
2.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้าคือ คุณลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการเสียหายขึ้น [1] คุณภาพกำลังไฟฟ้ายังสามารถแบ่งกลุ่มย่อยตามลักษณะเหตุการณ์ตามมาตรฐาน IEEE 1159-2014 [6] เป็นต้น

2.3.1 ภาวะชั่วครู่ (Transients) คือ ปรากฏการณ์ของภาวะทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า) ในเวลาทันทีทันใดจากภาวะคงตัวหนึ่งไปยังภาวะคงตัวอีกภาวะหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วแบ่ง

ออกเป็น 2 ชนิด คือ อิมพัลส์ (Impulsive) และการสั่น (Oscillatory) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของคลื่นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาชั่วครู่

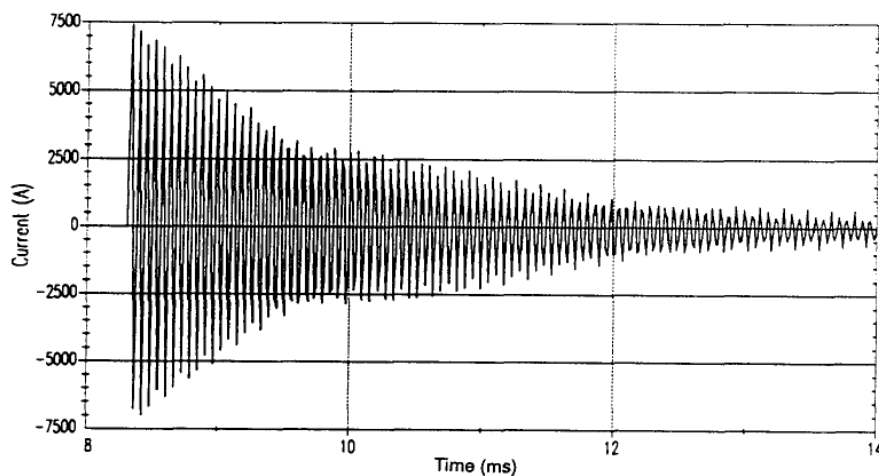
(1) อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive Transients) เกิดขึ้นทันทีทันใดและไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่กำลังในภาวะคงตัวของแรงดัน กระแส หรือทั้งสองอย่าง ซึ่งกำหนดให้มีทิศทางชั่วเพียงชั่วเดียว (เป็นชั่วบวกหรือลบ) โดยปกติกำหนดคุณลักษณะได้โดยเวลาการขึ้นของรูปคลื่นหรือเวลาที่ใช้ในการลดลงของรูปคลื่น ดังภาพประกอบ 9



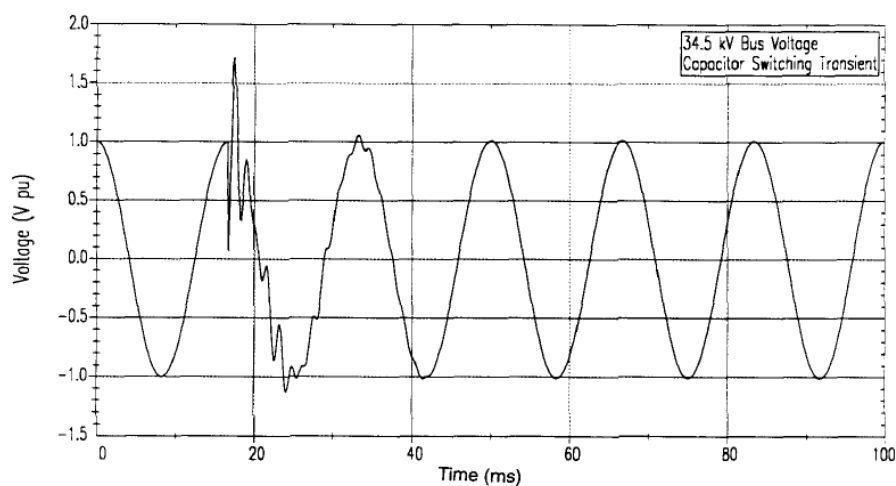
ภาพประกอบ 9 กระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า [6]

(2) ภาวะชั่วครู่แบบสั่น (Oscillatory Transients) เกิดขึ้นทันทีทันใดและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่กำลังของแรงดันหรือกระแสในภาวะคงตัว โดยรูปคลื่นมีทั้งชั่วบวกและลบ ดังภาพประกอบ 10 และภาพประกอบ 11

พหุ ประถม โท ชั่ว



ภาพประกอบ 10 กระแสไฟฟ้าที่สั่นชั่วครู่จากการสั่นชั่วคราวจากการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ [6]

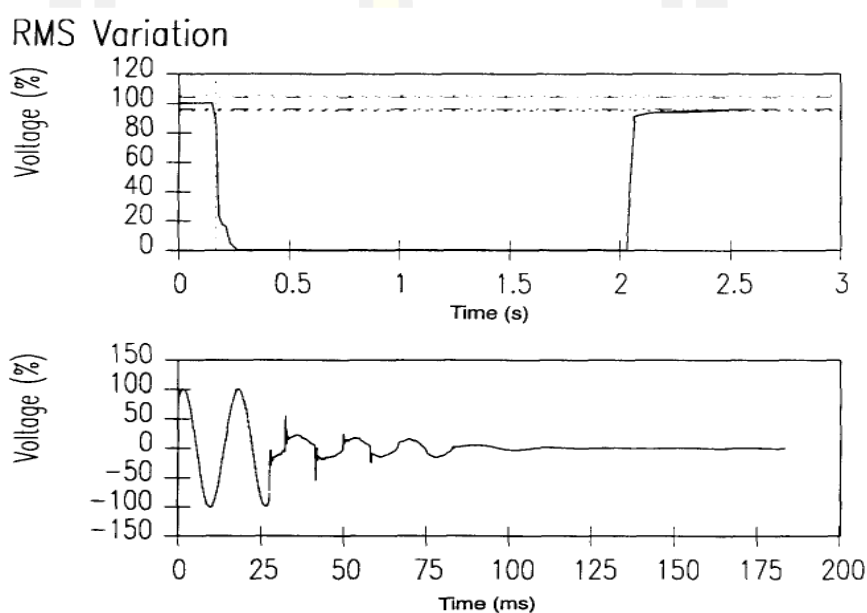


ภาพประกอบ 11 แรงดันไฟฟ้าที่สั่นชั่วครู่แบบความถี่ต่ำจากการกระตุ้นตัวเก็บประจุ [6]

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงเวลาสั้น (Short Duration Voltage Variations)

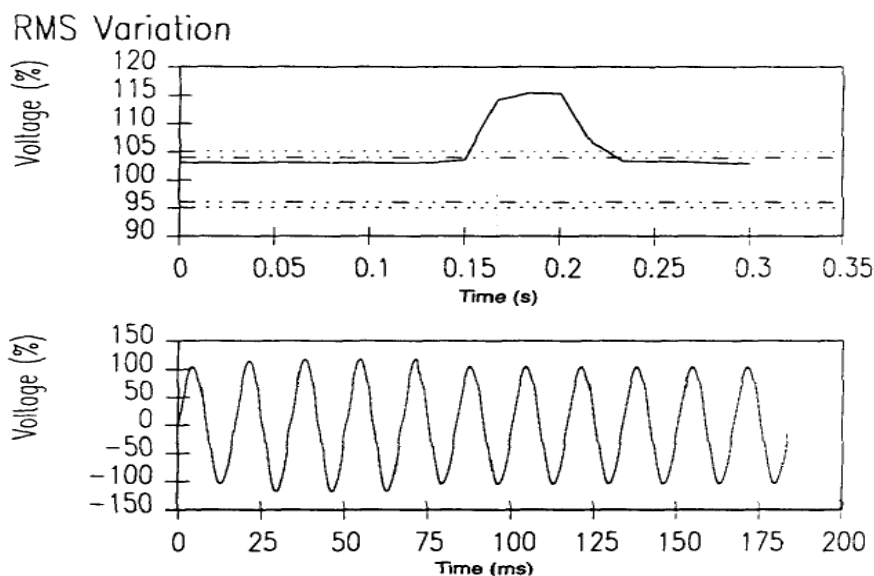
เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน RMS ที่มีระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที สามารถแบ่งกลุ่มตามช่วงเวลาของเหตุการณ์ คือ การเกิดแบบทันทีทันใด (Instantaneous) การเกิดแบบชั่วขณะ (Momentary) และการเกิดแบบชั่วคราว (Temporary) โดยมีสาเหตุเกิดจากความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า การจ่ายไฟให้กับโหลดขนาดใหญ่ที่มีกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นสูงมาก ทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ (Interruptions) แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Swell) หรือเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Sag)

(1) การเกิดไฟฟ้าดับ (Interruption) คือ ค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า RMS ลดลงต่ำกว่า 0.1 pu ในช่วงเวลา 0.5 – 3 วินาที สำหรับระยะเวลาชั่วคราว (Momentary) และ มากกว่า 3 วินาที – 1 นาที สำหรับระยะเวลาชั่วคราว (Temporary) ตัวอย่างการเกิดไฟฟ้าดับดังภาพประกอบ 5 แสดงการเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราวและทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะที่เฟสหนึ่งประมาณร้อยละ 20 นาน 3 คาบ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์ประมาณ 1.1 วินาที จนกระทั่งรีโคลเซอร์ทำงาน แรงดันไฟฟ้าจึงกลับสู่ภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง ดังภาพประกอบ 12



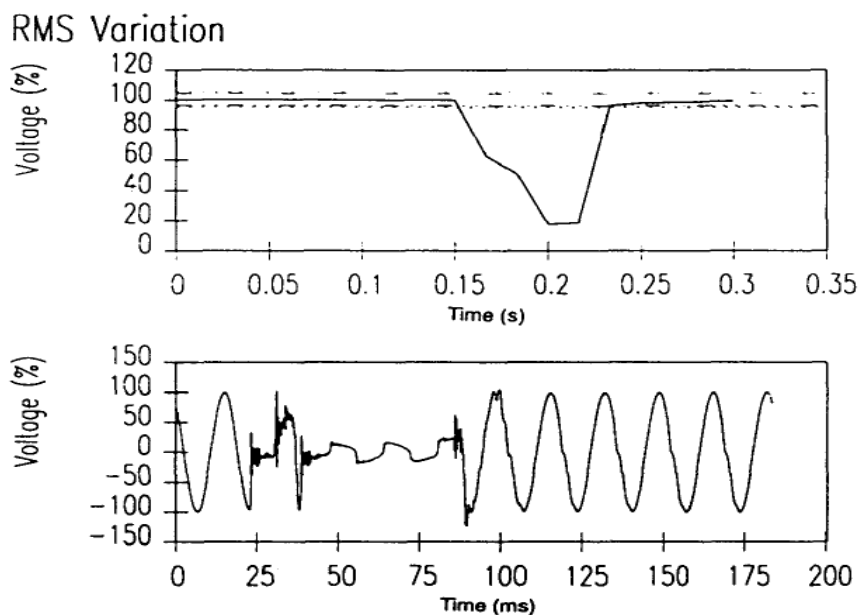
ภาพประกอบ 12 แรงดันไฟฟ้าดับชั่วคราวเนื่องจากความผิดปกติ [6]

(2) แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า RMS เพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 – 1.8 pu ที่ความถี่ระบบในระยะเวลา 0.5 – 30 คาบ สำหรับระยะเวลาทันทีทันใด (Instantaneous) มากกว่า 30 คาบ – 3 วินาที สำหรับระยะเวลาชั่วคราว (Momentary) และ มากกว่า 3 วินาที – 1 นาที สำหรับระยะเวลาชั่วคราว (Temporary) ดังภาพประกอบ 13



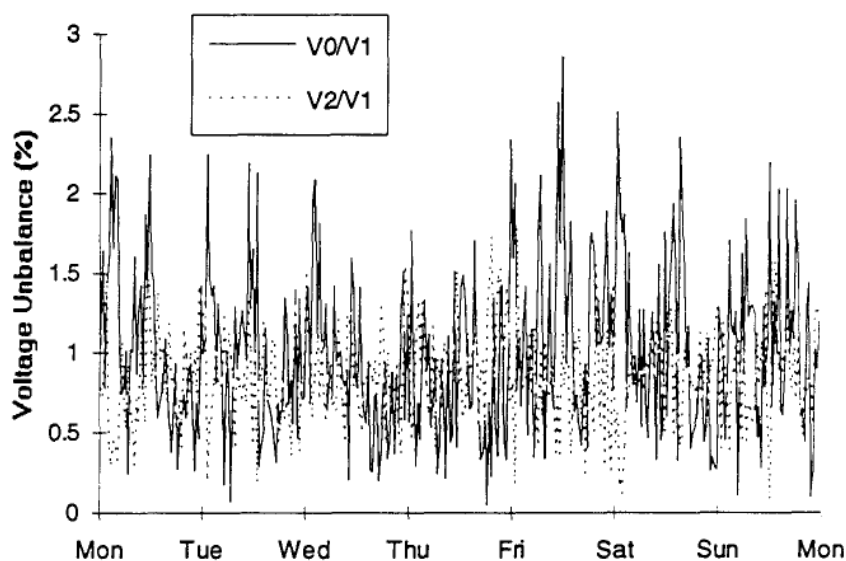
ภาพประกอบ 13 แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใด (Instantaneous) จากความผิดปกติของแบบหนึ่งเฟสลงดิน [6]

(3) แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag/Dip) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า RMS ลดลง ระหว่าง 0.1 – 0.9 pu ที่ความถี่ระบบในระยะเวลา 0.5 – 30 คาบ สำหรับระยะเวลาทันทีทันใด (Instantaneous) มากกว่า 30 คาบ – 3 วินาที สำหรับระยะเวลาชั่วขณะ (Momentary) และมากกว่า 3 วินาที – 1 นาที สำหรับระยะเวลาชั่วคราว (Temporary) คำว่า Sag หรือ Dip เป็นค่าที่ใช้เรียกแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะได้เหมือนกันโดย Sag เป็นค่าที่เรียกโดยมาตรฐาน IEEE ดังภาพประกอบ 14 ส่วน Dip เป็นค่าที่เรียกโดยมาตรฐาน IEC แต่ทั้งสองค่ามีความหมายที่ต่างกันดังจะได้อธิบายในหัวข้อเฉพาะต่อไป



ภาพประกอบ 14 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะแบบทันทีทันใด (Instantaneous) จากความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน [6]

2.3.3 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Voltage Imbalance) แสดงได้โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจากค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหารด้วยค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยแสดงในรูปแบบของร้อยละ นอกจากนี้ยังอธิบายได้โดยใช้องค์ประกอบสมมาตรจากการคำนวณอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Component) หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Component) ต่อองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Component) ภาพประกอบ 8 แสดงตัวอย่างของอัตราส่วนทั้งสองข้างต้นในหนึ่งสัปดาห์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากสายป้อนที่จ่ายให้กับโหลดชนิดที่อยู่อาศัย การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีขนาดน้อยกว่าร้อยละ 2 มักเกิดจากโหลดชนิดหนึ่งเฟสต่ออยู่ในระบบสามเฟส หรืออาจเกิดจากฟิวส์ในเฟสใดเฟสหนึ่งขาด ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากสายป้อนที่จ่ายให้กับโหลดที่พักอาศัย [6]

2.3.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงเวลานาน (Long Duration Voltage Variations)

เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน RMS ที่ความถี่กำลังนานเกิน 1 นาที อาจเป็นได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) แรงดันต่ำ (Under Voltage) การเกิดไฟฟ้าดับอย่างต่อเนื่อง (Sustained Interruptions) ซึ่งสาเหตุทั่วไปไม่ได้เกิดจากความผิดพลาด (Fault) แต่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้าหรือการสวิตซ์ซึ่งต่าง ๆ ในระบบ โดยแบ่งได้เป็น

(1) แรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) คือการเพิ่มขึ้นของค่า RMS เกิน 1.1 pu ที่ความถี่ระบบในช่วงเวลาเกิน 1 นาที เป็นผลมาจากการสวิตซ์ซึ่งโหลด เช่น การตัดโหลดขนาดใหญ่ออกทันที หรือการจ่ายไฟฟ้าให้ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

(2) แรงดันไฟฟ้าต่ำ (Under Voltage) คือการเพิ่มขึ้นของค่า RMS น้อยกว่า 0.9 pu ที่ความถี่ระบบในช่วงเวลาเกิน 1 นาที เป็นผลมาจากเหตุการณ์ที่ตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าเกิน อันได้แก่การจ่ายไฟให้กับโหลดไฟฟ้าขนาดใหญ่ในระบบหรือการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบ

(3) การเกิดไฟฟ้าดับอย่างต่อเนื่อง (Sustained Interruptions) คือ ภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดเป็นศูนย์ในเวลาเกิน 1 นาที เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงเวลานาน (Long Duration) แรงดันไฟฟ้าที่หายไปเกินกว่า 1 นาที ส่วนใหญ่เกิดจากการลัดวงจรถาวร การเกิดไฟฟ้าดับอย่างต่อเนื่องมีความหมายแตกต่างกับคำว่า ความขัดข้อง (Outage) ซึ่งนิยมใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า ซึ่งคำว่า Outage ตามมาตรฐาน IEEE 100 หมายถึง ภาวะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบทางานล้มเหลว ซึ่งไม่ได้มี

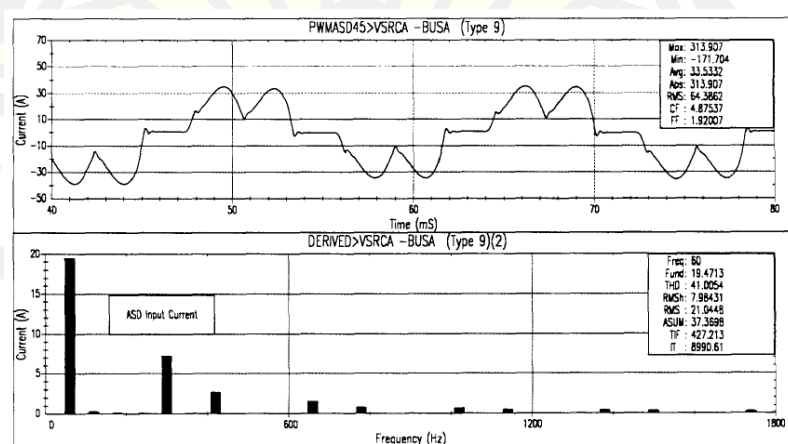
ความหมายเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า แต่คาดว่า Interruption หมายถึง การหายไปของแรงดันไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาสั้น

2.3.5 แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Voltage Imbalance) แสดงได้โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจากค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหารด้วยค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยแสดงในรูปแบบของร้อยละ นอกจากนี้ยังอธิบายได้โดยใช้อंकประกอบสมมาตรจากการคำนวณอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Component) หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Component) ต่อองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Component) ภาพประกอบ 8 แสดงตัวอย่างของอัตราส่วนทั้งสองข้างต้นในหนึ่งสัปดาห์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจากสายป้อนที่จ่ายให้กับโหลดชนิดที่อยู่อาศัย การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีขนาดน้อยกว่าร้อยละ 2 มักเกิดจากโหลดชนิดหนึ่งเฟสต่ออยู่ในระบบสามเฟส หรืออาจเกิดจากฟิวส์ในเฟสใดเฟสหนึ่งขาด

2.3.6 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortion) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นขายน้ในภาวะคงตัวที่ความถี่กำลังโดยแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบ คือ

(1) องค์ประกอบไฟตรง (DC Offset) คือ แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้นผสมในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กโลกรบกวน หรือเกิดจากวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half Wave) ตัวอย่างเช่น การยืดอายุการใช้งานของหลอดไฟแบบไส้ (Incandescent Lamp) โดยใช้วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดเพื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดไฟ

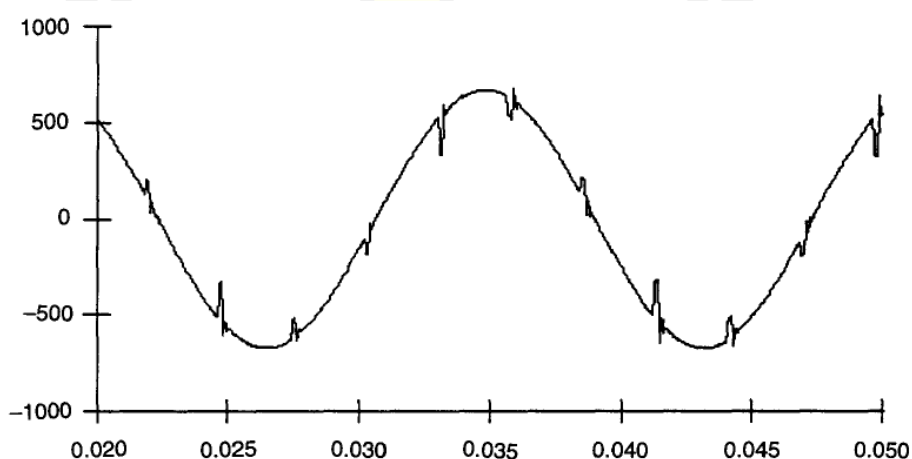
(2) ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) คือ องค์ประกอบรูปคลื่นขายน้ที่เป็นแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์สเปคตรัมของ ASD [6]

(3) อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonics) คือ องค์ประกอบรูปคลื่นไซน์ที่เป็นแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และไม่เป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) โดยมีสาเหตุหลักจากโหลดตัวแปลงความถี่สถิต (Static Frequency Converter) วงจรแปลงผันแบบ Cycloconverter มอเตอร์เหนี่ยวนำและอุปกรณ์เชื่อมต่อไฟฟ้า สัญญาณพาหะในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (Power Line Carrier) เป็นต้น

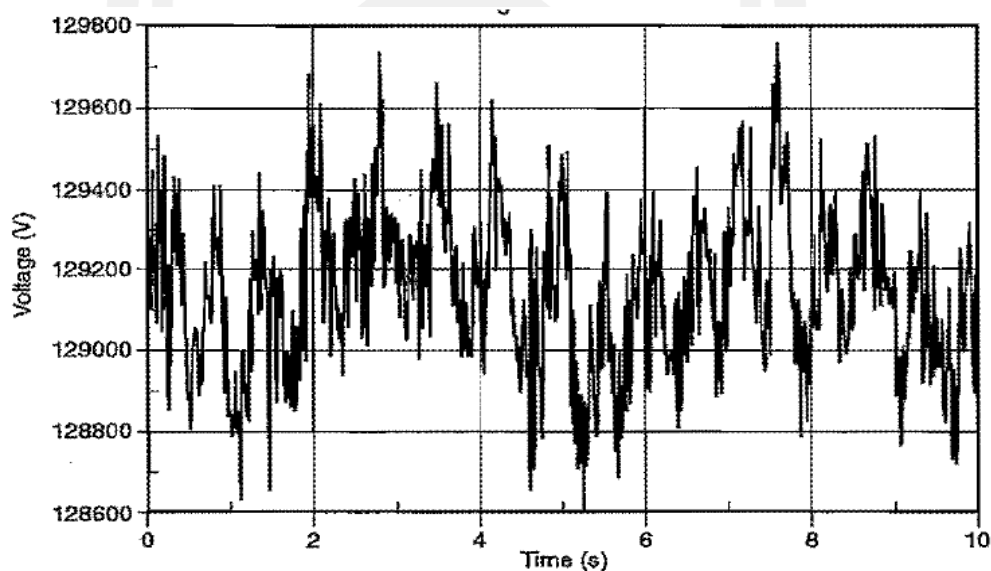
(4) รอยบาก (Notching) คือ การรบกวนแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ สม่ำเสมอหรือเป็นคาบ มีลักษณะคล้ายฮาร์โมนิกส์ สามารถแยกออกมาให้เห็นได้โดยใช้ฮาร์โมนิกส์สเปกตรัม เช่นเดียวกับฮาร์โมนิกส์แต่ถูกจัดให้เป็นกรณีพิเศษของฮาร์โมนิกส์ เพราะความถี่ที่เกี่ยวข้องกับรอยบากบนรูปคลื่นนั้นมักมีความถี่สูง ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 รูปคลื่นรอยบากจากการทำงานของวงจรแปลงผัน [6]

(5) สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ มีความถี่ต่ำกว่า 200 kHz อาจเกิดขึ้นบนรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในสายเฟสของระบบหรือพบในสายนิวทรัล หรือสายสัญญาณ สาเหตุมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรควบคุม อุปกรณ์เชื่อมต่อไฟฟ้า โหลดชนิดเรียงกระแสไฟฟ้า (Solid State Rectifier) และการต่อสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟ ปัญหาของสัญญาณรบกวนจะรุนแรงหากไม่มีการต่อลงดิน (Grounding) โดยทั่วไปสิ่งรบกวนประกอบด้วยสัญญาณผิดเพี้ยนที่ไม่ต้องการ ไม่สามารถแยกเป็นการผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์หรือภาวะชั่วครู่ และจะกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถโปรแกรมได้ (PLC) เป็นต้น

2.3.7 การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Fluctuation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ หรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสุ่มที่เกิดอย่างต่อเนื่อง ขนาดของการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วงปกติไม่เกิน 0.9 – 1.1 pu ตามมาตรฐาน ANSI C84.1-1982 ส่วนมาตรฐาน IEC 1000-3-3 ได้แบ่งชนิดแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมเป็นหลายแบบ โดยในที่นี้อ้างถึงมาตรฐาน IEC 1000-3-3 ชนิด D ซึ่งระบุถึงแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมแบบต่อเนื่องหรือแบบสุ่มที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง โหลดที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า เรียกว่า การกระพริบ (Flicker) ค่านี้ได้มาจากผลกระทบของแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมต่อการกระพริบของหลอดไฟ แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม คือ ปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่การกระพริบเป็นผลที่ไม่ต้องการของแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมในโหลดบางชนิด อย่างไรก็ตามสองค่านี้ถูกใช้ร่วมกันบ่อย นอกจากนี้ยังมีการใช้แรงดันไฟฟ้ากระพริบ (Voltage Flicker) ในการอธิบายการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสาเหตุให้เกิดการกระพริบ เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์ค โดยแรงดันไฟฟ้ากระพริบอธิบายในรูปแบบของขนาดร้อยละของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันฐาน ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมจากการทำงานของเตาหลอมแบบอาร์ค [6]

2.3.8 การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลัง (Power Frequency Variation)

การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลัง คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้ากำลังจากค่าที่กำหนด เช่น 60 Hz หรือ 50 Hz ไปจากเดิม ทำให้มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์กับความถี่ไฟฟ้า ความถี่ของกำลังไฟฟ้าเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบที่ขึ้นอยู่กับโหลดแต่ละชนิด และการตอบสนองของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ค่อนข้างน้อย ในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังพบได้น้อย แต่การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดกับโหลดอาจเกิดได้ถ้าโหลดนั้นรับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดที่แยกอิสระไม่ได้ต่อเข้ากับระบบใหญ่ของการไฟฟ้า เนื่องจากระบบควบคุมการปรับความถี่อาจไม่ตอบสนองได้ทัน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 โครงสร้างของตัวอุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์

วงจรกำลังของอุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์แสดงดังภาพประกอบ 1 ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน หม้อแปลงเชื่อมต่อแรงดันเฟสเดียว 3 ตัวและรีปเปลิเตอร์แบบพาสซีฟอันดับที่ 2 โดยอุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกับโพลตอร์-แอลและมอเตอร์โดยเชื่อมต่อกับระบบผ่านหม้อแปลง อุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์นี้โดยพื้นฐานแล้วเป็นอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงแรงดันกระแสตรงจากคาปาซิเตอร์หรือแหล่งเก็บพลังงานอื่นเป็นแรงดันกระแสสลับที่ปรับขนาดได้แล้วส่งเข้าไปในระบบผ่านทางหม้อแปลงเชื่อมต่อเพื่อแก้ไขความผิดปกติของแรงดัน

3.2 หลักการชดเชยแรงดันอุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์

นำเสนอหลักการชดเชยแรงดันอุปกรณ์กึ่งอินพลิวต์ โดยเริ่มต้นแรงดันอ้างอิงถูกสร้างดังสมการ 3.1

$$\begin{bmatrix} V_{ref,a} \\ V_{ref,b} \\ V_{ref,c} \end{bmatrix} = V_{rated} \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

แรงดันอ้างอิงถูกแปลงไปอยู่ในรูป abc-to-Dq0 ตามสมการ 3.2 โดยใช้ทฤษฎี Park transformation technique

$$\begin{bmatrix} V_{ref,d} \\ V_{ref,q} \\ V_{ref,0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{ref,a} \\ V_{ref,b} \\ V_{ref,c} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

แรงดันที่โหลดถูกวัดและแปลงให้อยู่ในรูป abc-to-Dq0 โดยใช้ทฤษฎี Park transformation technique ดังสมการ 3.3

$$\begin{bmatrix} V_{Load,d} \\ V_{Load,q} \\ V_{Load,0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{Load,a} \\ V_{Load,b} \\ V_{Load,c} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

แรงดันที่โหลดและแรงดันอ้างอิงที่อยู่ในรูป Dq0 ถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าผิดพลาดหรือ error signal (e_i) ดังสมการ

$$|e_{t,dq0}| = \sqrt{(V_{ref,d} - V_{Load,d})^2 + (V_{ref,q} - V_{Load,q})^2 + (V_{ref,0} - V_{Load,0})^2} \quad (3.4)$$

สัญญาณขาออกของตัวควบคุมที่ได้จะถูก synchronize ความถี่และมุมเฟส ด้วยทฤษฎี A phase-locked loop (PLL) ที่ถูกวัดจากแรงดันแหล่ง

สัญญาณ error signal (e_i) จากสมการ 3.4 จะถูกนำไปคำนวณหาค่า ITAE value และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุม ด้วยเทคนิค Water cycle optimization techniques หลังจากนั้นสัญญาณ (u_i) จากตัวควบคุมจะถูกแปลงกลับให้อยู่ในรูป abc frame เพื่อเป็นสัญญาณชุดเซียงแรงดันให้ระบบของเฟส A เฟส B และ เฟส C ดังสมการ 3.5

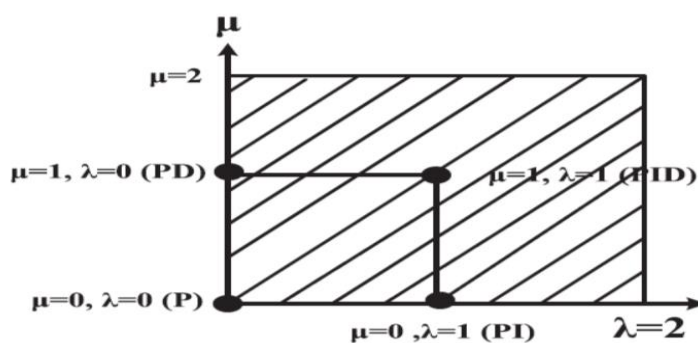
$$\begin{bmatrix} V_{c,a} \\ V_{c,b} \\ V_{c,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{t,d} \\ u_{t,q} \\ u_{t,0} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

และแรงดันชดเชย ($V_{C,abc}$) จะถูกส่งต่อไปที่ PWM generator เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ voltage source inverter (VSI) เพื่อสร้างแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบผ่านทางหม้อแปลง

3.3 การควบคุม Fractional Order PID (FOPID) (แบบลำดับเศษส่วนย่อย)

ในการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอน แบบลำดับเศษส่วนย่อยในระบบควบคุมแบบ สัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$) [4] ตัวปริพันธ์ (Integral) จะออกแบบให้กระทำในระบบแนวแกน μ ของตัวระนาบการควบคุม ส่วนตัวกระทำอนุพันธ์ (Derivative) ออกแบบให้กระทำในระบบแนวแกน λ ของระนาบการควบคุม อธิบายได้ตามสมการ 3.6 และภาพประกอบ 19

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D_i^{-\lambda} e(t) + k_d D^\mu e(t) \quad (3.6)$$



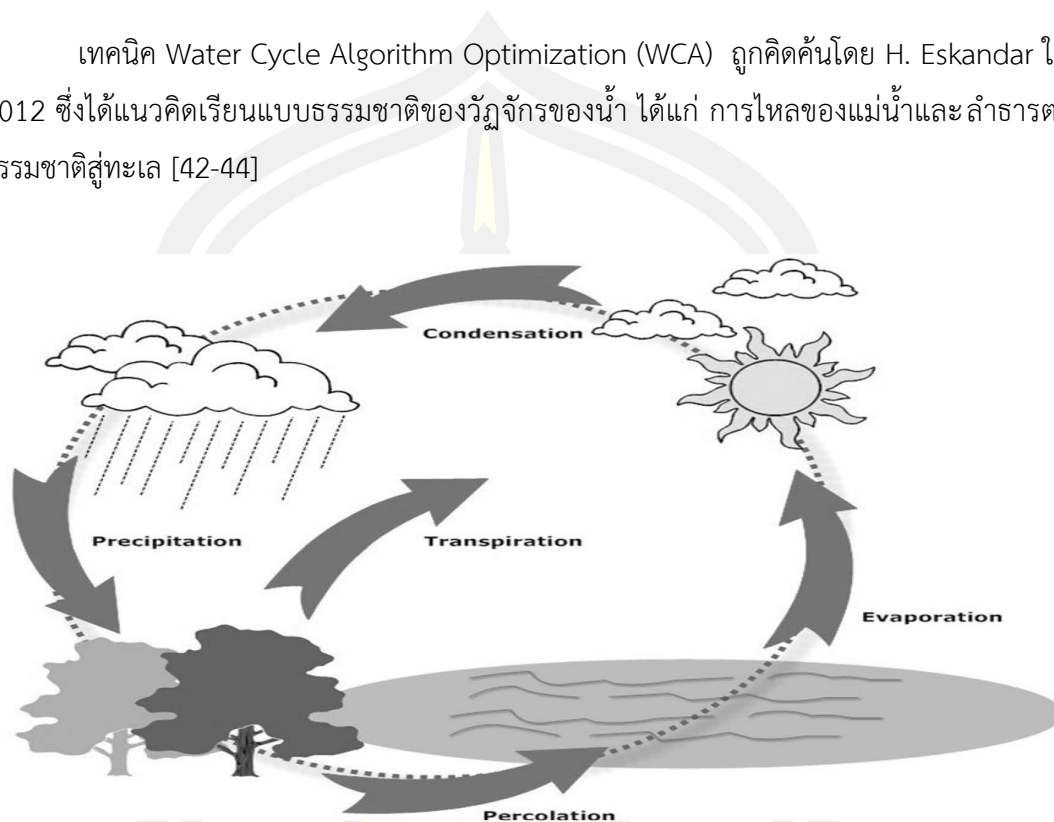
ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของตัวกระทำฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลำดับเศษส่วนย่อยในระบบควบคุม [4]

จากสมการ 3.6 ส่วนที่เกิดจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลำดับเศษส่วนย่อยคือตัวแปรที่ยกกำลังของตัวปริพันธ์ (Integral) และอนุพันธ์ (Derivative) นั่นคือตัวแปร λ และ μ วิเคราะห์การตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนจากสมการ 3.6 สามารถวิเคราะห์การตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลำดับเศษส่วนย่อย ดังสมการ 3.7

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu, (\lambda, \mu \geq 0) \quad (3.7)$$

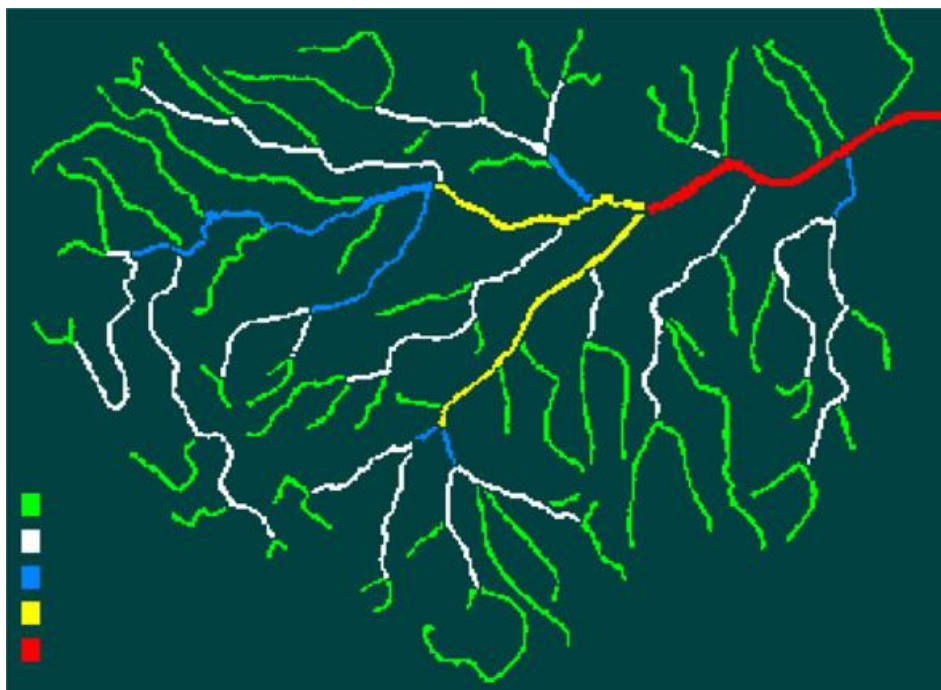
3.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm Optimization (WCA)

เทคนิค Water Cycle Algorithm Optimization (WCA) ถูกคิดค้นโดย H. Eskandar ในปี 2012 ซึ่งได้แนวคิดเรียนแบบธรรมชาติของวัฏจักรของน้ำ ได้แก่ การไหลของแม่น้ำและลำธารตามธรรมชาติสู่ทะเล [42-44]



ภาพประกอบ 20 แผนภาพวัฏจักรของน้ำ (water cycle) [42]

จากภาพประกอบที่ 20 เป็นแผนภาพอย่างง่ายสำหรับส่วนหนึ่งของวัฏจักรของน้ำ (water cycle) น้ำในแม่น้ำและทะเลสาบระเหยไปในขณะที่พืชปล่อยออก (คายน้ำ) น้ำในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสง น้ำระเหยไป สู่ชั้นบรรยากาศเพื่อสร้างเมฆซึ่งแล้ว ควบแน่นในบรรยากาศที่เย็นกว่า ปล่อยน้ำกลับสู่ โลกในรูปของฝนหรือหิมะ การกระบวนการนี้เรียกว่า วัฏจักรอุทกวิทยา (วัฏจักรของน้ำ) ในธรรมชาตินั้น เมื่อฝนตกลงมาสู่พื้นผิวโลกแล้ว น้ำจะไหลลงซึมลงสู่ดินเป็นน้ำใต้ดินเสียส่วนใหญ่ ซึ่งอัตราการซึมจะขึ้นอยู่กับประเภทของดิน หิน และปัจจัยประกอบอื่น ๆ โดยเรียกน้ำบาดาลและค่อย ๆ ซึมออกสู่มแม่น้ำลำธารและไหลออกทะเล ส่วนน้ำบนดินที่เหลือนั้นจะไหลลงสู่มแม่น้ำ ลำธาร และไหลไปสู่ทะเลถัดไป และสุดท้ายน้ำจะระเหยกลายเป็นไอขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ วัฏจักรของน้ำ จึงไม่มีเริ่มต้นไม่มีที่สิ้นสุด หมุนเวียนแบบนี้ตลอดเวลา ดังภาพประกอบ 21 เป็นภาพแสดงการไหลของน้ำจากลำธาร สู่แม่น้ำ และจากแม่น้ำไหลลงสู่ทะเล ซึ่งคล้ายกับต้นไม้หรือรากของต้นไม้



ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงการไหลของน้ำจากลำธาร ลงสู่แม่น้ำและไหลลงสู่ทะเล [42]

สำหรับการแก้ปัญหาด้วยเทคนิค Water cycle algorithm (WCA) เริ่มต้นด้วยน้ำฝน (Raindrops) คือค่ากลุ่มประชากรเริ่มต้นของเทคนิค และ ค่า x_i คือ ค่าตัวแปรที่จะทำการควบคุม ดังสมการ 3.8

$$\mathbf{Raindrop} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (3.8)$$

ที่ค่ากลุ่มประชากรของน้ำฝนทั้งหมด (Population of raindrops) ทั้งหมด จะถูกสร้างขึ้น จากสมการดังสมการ 3.9

$$\text{Population of raindrops} = \{x_j^i : j = 1 : N_{pop} \text{ and } k = 1 : N_{var}\} \quad (3.9)$$

โดยที่ N_{pop} คือ จำนวนประชากรของน้ำฝน (Raindrops) และ N_{var} คือ ตัวแปรในการตัดสินใจ (The decision variables) โดยค่า Fitness functions ของน้ำฝน (Raindrops) คือ C_i ดังสมการ 3.10

$$C_i = f(x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots, x_{N_{var}}^i), i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (3.10)$$

ค่าน้ำฝน (Raindrops) ที่ดีที่สุดจะถูกเลือกเป็นทะเล(Sea) ส่วนจำนวน น้ำฝน (Raindrops) ที่ดีนั้นจะถูกเลือกเป็นแม่น้ำ(River) และ น้ำฝน (Raindrops) ที่เหลือนั้นจะถือเป็นลำธารที่ไหลลงสู่ทะเลหรือแม่น้ำ ดังสมการ 3.11 และขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการไหล

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{C_n}{\sum_{n=1}^{N_{sr}} C_n} \right| \times N_{pop} \right\}, n = 1, 2, \dots, N_{sr} \quad (3.11)$$

ที่ NS_n คือ จำนวนของลำธาร (streams) ที่ไหลไปสู่แม่น้ำ (River) หรือทะเล(Sea) ส่วน N_{sr} คือ จำนวนของแม่น้ำ(River) หรือทะเล(Sea) ระยะทางของน้ำจากลำธาร (streams) ที่ไหลไปสู่แม่น้ำ (river) จะถูกสุ่มระยะทาง X ตามเส้นทางที่สามารถเชื่อมถึงกันได้ และใช้แนวความคิดเดียวกันนี้สำหรับการไหลของน้ำจากแม่น้ำไปทะเล โดยตำแหน่งใหม่ของลำธาร (streams) และแม่น้ำ (river) ได้จากสมการ 3.12 และ 3.13

$$X_{stream}^{i+1} = X_{stream}^i + \text{rand} \times C \times (X_{river}^i - X_{stream}^i) \quad (3.12)$$

$$X_{river}^{i+1} = X_{river}^i + \text{rand} \times C \times (X_{sea}^i - X_{river}^i) \quad (3.13)$$

โดย C คือ ค่าคงที่ระหว่าง 1 ถึง 2 และ Ran คือค่าการสุ่มในช่วง 0 ถึง 1

เพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่ local optimal ให้กระบวนการระเหยที่จะเกิดขึ้น เมฆที่จะก่อตัว และ น้ำฝนครั้งครั้งถัด (การสุ่มครั้งถัดไป) ตามสมการ 3.14 โดยกระบวนการระเหยจะเริ่ม เพื่อป้องกันไม่ให้ถูกล็อคในพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด คาดว่ากระบวนการระเหยจะเกิดขึ้น เมฆจะก่อตัว และฝนจะเริ่มขึ้น (โซลูชันแบบสุ่มใหม่) จะมีการทบทวนเงื่อนไข หากเป็นไปตามนั้น กระบวนการระเหยจะเริ่มขึ้น โดย คือ ค่าจำนวนน้อยมากใกล้ศูนย์

$$|X_{sea}^i - X_{river}^i| < d_{\max}, i = 1, 2, 3, \dots, N_{sr} - 1. \quad (3.14)$$

การระเหยแต่ละครั้ง ค่าของ d_{\max} จะเป็นดังสมการ

$$d_{\max}^{i+1} = d_{\max}^i - (d_{\max}^i / \text{max iteration}). \quad (3.15)$$

หลังจากขั้นตอนการระเหย กระบวนการฝนจะเริ่มขึ้น และกระแสน้ำใหม่ก็เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อดินใหม่ (โซลูชันแบบสุ่ม) ลำธารที่ไหลลงสู่ทะเลโดยตรงตามสมการต่อไปนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มการผลิตกระแสน้ำเพื่อเพิ่มทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่มีข้อจำกัดดังสมการ

$$X_{stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{\mu} \times \text{ran}(1, N_{var}) \quad (3.16)$$

ที่ μ ประมาณ 0.1

3.5 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization)

วิธีการแนวคิดวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ผีเสื้อหรือฝูงปลา โดยอาศัยการค้นหาแบบ กลุ่มประชากรแต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า “อนุภาค(Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้อนุภาคนี้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มบินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ระหว่างบินแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางเคลื่อนที่ต่อไปจนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเองหรืออนุภาคใกล้เคียง โดยการเปลี่ยนความเร็ว และการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละอนุภาค [46] ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง $pbest_{id}$ และ $gbest_{id}$ ดังสมการ 3.17 และ 3.18

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 \cdot \text{ran}() \cdot (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (gbest_{id} - x_{id}^t) \quad (3.17)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3.18)$$

เมื่อ n คือ จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

m คือ จำนวนตัวแปร

t คือ ครั้งที่ของการค้นหา

ω คือ ตัวเลขน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial weight factor)

c_1, c_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง

$rand_1(), rand_2$ คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง 0 ถึง 1

v'_i คือ ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t โดยที่ $v_d^{\min} \leq v'_{id} \leq v_d^{\max}$

ค่า V^{\max} ใช้ในการหาความละเอียดของคำตอบควรจะกำหนดค่าประมาณ 10-20 % ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว

ค่าคงที่ c_1 และ c_2 แทนน้ำหนักของความเร็วแบบสุ่มของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง $pbest$ และ $gbest$ ควรอยู่ระหว่าง 1.4-2.0 และการหาค่า ω ที่เหมาะสมควรใช้สมการ

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (3.19)$$

ค่าที่เหมาะสม คือ $\omega_{\max} = 0.9$ และ $\omega_{\min} = 0.4$

กระบวนการจะถูกรวนซ้ำจนกว่าจะถึงจำนวนการวนซ้ำที่กำหนด โดยขั้นตอนกระบวนการทำงานถูกแสดงใน [46-47]

3.6 วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้ (Teaching-Learning-Based Optimization; TLBO)

เทคนิควิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้ (Teaching-Learning-Based Optimization; TLBO) ได้แนวคิดจากกระบวนการสอน การเรียนรู้ หลักการทำงานสำคัญของเทคนิคนี้ คือ สามารถมีความรู้เพิ่มขึ้นในห้องเรียน ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการเรียนรู้จากครูและส่วนของการเรียนรู้จากเพื่อนในชั้นเรียน ดังนั้น เทคนิควิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้ จะมีกลุ่มประชากรคือจำนวนนักเรียน (Students) ส่วนตัวแปรของปัญหา คือ รายวิชาต่างๆ (Subjects) ส่วนฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) คือ เกรดของนักเรียนแต่ละคน โดยนักเรียนที่เก่งที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นครู (Teacher) [48-50]

เทคนิค TLBO อัลกอริทึมเริ่มต้นด้วยกระบวนการเริ่มต้น เพื่อเริ่มต้นกลุ่มประชากร N คือ จำนวนการแก้ปัญหาเบื้องต้นหรือนักเรียน x_i คือ ตัวแปรการสุ่มในพื้นที่ค้นหา โดยประชากรถูกกำหนดเป็น $x_i \in \{1, \dots, N\}$ หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการสอน-กระบวนการเรียนรู้ โดยขั้น

ตอนนี้จะแบ่งออกเป็นสองช่วง ในช่วงแรกคือครู และช่วงที่ 2 คือช่วงการเรียนรู้ โดยในช่วงแรกนักเรียนที่ดีที่สุดจะถูกเลือกเป็นครู $X_{teacher}$ หรือคนที่สามารถพัฒนาระดับความรู้ของนักเรียนทุกคนได้เกรดที่ดีที่สุดหรือ fitness values และเป้าหมายของในช่วงนี้ คือ พัฒนานักเรียนแต่ละคนในชั้นเรียนให้กลายเป็นครูในช่วงที่ 2 เป้าหมายคือ นักเรียนมีการเพิ่มพูนความรู้ผ่านการปฏิสัมพันธ์ระหว่างนักเรียนด้วยกัน ในช่วงนี้นักเรียนคนใดสามารถโต้ตอบกับเพื่อนร่วมชั้นคนอื่น ๆ เพื่อบรรลุการถ่ายทอดความรู้ทั้งสองขั้นตอนที่กล่าว กระบวนการจะถูกวนซ้ำ จนกว่าจะถึงจำนวนการวนซ้ำที่กำหนด โดยช่วงในช่วงแรก คือ พัฒนานักเรียนแต่ละคนในชั้นเรียนให้กลายเป็นครู คำนวณดังสมการ 3.20

$$x_{new}^{(t)} = X_i + r \cdot (X_{teacher} - TF \cdot X_{mean}), \quad (3.20)$$

โดยที่ x_i คือตำแหน่งนักเรียน $r \in \{1,2\}$ และ $TF \in \{1,2\}$ คือ ปัจจัยการสอน จะถูกทำการสุ่มเพื่อจุดประสงค์กระตุ้นให้เกิดการเรียนรู้ด้วยตัวเอง [48] และ X_{mean} หาได้จากสมการ

$$X_{mean} = \frac{1}{N} \sum_i^N X_{i,j}; \forall j \in D \quad (3.21)$$

D คือ มิติ (Dimension) ขอบเขตการค้นหา ขั้นตอนที่สองและขั้นตอนสุดท้าย คือ นักเรียนมีการเพิ่มพูนความรู้ผ่านการปฏิสัมพันธ์ระหว่างนักเรียนด้วยกัน คือ นักเรียนในชั้นเรียน (x_i) ถูกช่วยเหลือจากเพื่อนนักเรียนด้วยกันที่ได้เกรดสูงกว่าคือ X_j โดยนักเรียน x_i ถูกเลื่อนไปทาง X_j ดังสมการ

$$X_{new}^{(t)} = X_i + r \cdot (X_j - X_i) \quad (3.22)$$

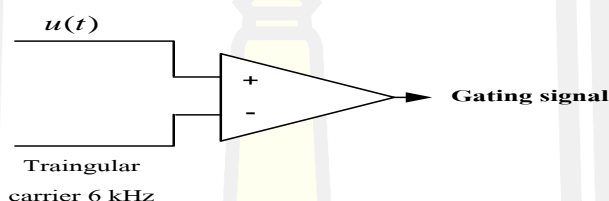
มีฉะนั้น x_i จะถูกย้ายออกจาก X_j ดังสมการ

$$X_{new}^{(t)} = X_i + r \cdot (X_i - X_j) \quad (3.23)$$

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของระยะสุดท้ายนี้คือการปรับปรุงเกรดของนักเรียนให้ดีขึ้น กระบวนการสอน-เรียนรู้นี้ ถูกวนซ้ำจนกว่าจะถึงจำนวนการวนซ้ำที่กำหนด ขั้นตอนกระบวนการทำงานถูกแสดงใน [48-50]

3.7 การกำเนิดสัญญาณเกต (Gating Signal Generation)

สัญญาณเกตสำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์ PWM จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่กำเนิดจากตัวควบคุม Fractional order PID ($u(t)$) กับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่คงที่ 6 kHz แสดงดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 ไดอะแกรมแสดงการกำเนิดสัญญาณเกตสำหรับอินเวอร์เตอร์

3.8 การออกแบบวงจร (Circuit Design)

หม้อแปลงเชื่อมต่อ (Coupling transformers)

หม้อแปลงเชื่อมต่อทำหน้าที่ในการแยกอินเวอร์เตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าและเป็นตัวเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายแรงดันที่ต้องการชดเชยเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง แรงดันสูงสุดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็นไปตามสมการ 3.24

$$V_{s,\max} = \frac{(V_{\text{rated}} - V_1) + (V_0 + V_2)}{\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของ MF และ UF ดังสมการ 3.25

$$V_{s,\max} = \left[\frac{1 - |MF|_{\min} (1 - |UF|_{\max})}{\sqrt{3}} \right] \cdot V_{\text{rated}} \quad (3.25)$$

แรงดันสูงสุดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับแรงดันมูลฐานสูงสุดของอินเวอร์เตอร์
เป็นไปตามสมการ 3.26

$$V_{p,\max} = M \cdot \frac{V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{2}, \quad (M = 1.0) \quad (3.26)$$

เมื่อ M คือ ดัชนีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ PWM

พิกัดพลังงานไฟฟ้าที่ปรากฏทั้งหมด (VA Rating) ของหม้อแปลงแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 1/3
ของ พิกัดของอินเวอร์เตอร์โดยเป็นไปตามสมการ 3.27

$$S_{\max}(\text{each TR}) = V_{s,\max} \cdot I_{rated} \quad (3.27)$$

เมื่อ I_{rated} คือ กระแสพิกัดโหลด

อัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลง (Turn ratio, a) จะถูกเลือกให้สอดคล้องกับแรงดันบัส
กระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ V_{dc} และแรงดันพิกัด V_{rated} ของโหลดที่เราต้องการดังนี้

$$TR \text{ turn ratio}(a) = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_{dc}/2}{V_{rated}/\sqrt{3}} \quad (3.28)$$

พิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏและพิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์

พิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏของอินเวอร์เตอร์ได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าปรากฏของหม้อแปลง
แต่ละตัวซึ่งแสดงตามสมการ 3.29

$$S_{\max}(\text{inverter}) = 3 \cdot V_{s,\max} \cdot I_{rated} \quad (3.29)$$

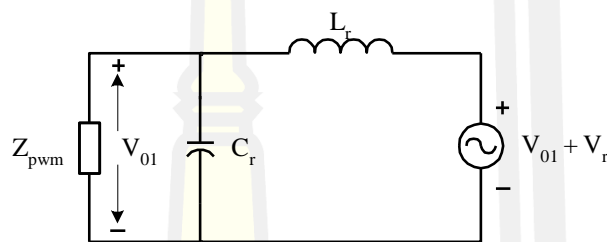
พิกัดการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$\hat{V}_{sw} = V_{dc}/2 \quad (3.30)$$

$$\hat{I}_{sw} = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{s,max} \cdot I_{rated}}{V_{p,max}} \quad (3.31)$$

ฟิลเตอร์แบบพาสซีฟสำหรับการกรองแรงดันกระเพื่อม

จากภาพประกอบ 1 หน้าที่ของ L_r และ C_r ที่ต่ออยู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแรงดันกระเพื่อม (Voltage ripples) เนื่องมาจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ PWM ภาพประกอบ 23 แสดงวงจรสมมูลของการสวิตช์ที่ทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม V_r [20]



ภาพประกอบ 23 วงจรสมมูลแหล่งจ่าย ($V_{01} + V_r$)

Z_{pwm} คือ แอมปีจูดของผลรวมของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย Z_s และอิมพีแดนซ์โหลด Z_L ซึ่งจะถูกมองเห็นจากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงดังแสดงในสมการ 3.32

$$Z_{pwm} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (Z_s + Z_L) \quad (3.32)$$

ความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองซึ่งจะเป็นไปตามสมการ 3.33

$$X_{crf} \ll X_{lrf} \ll Z_{pwm} \quad (3.33)$$

เมื่อ X_{crf} และ X_{lrf} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์และตัวเหนี่ยวนำของตัวกรองการกระเพื่อมตามลำดับ

เกณฑ์การออกแบบสำหรับ X_{crf} และ X_{lrf} ต้องทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่รีปเปิ้ลต้องมากกว่าแรงดันตกคร่อมในตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามที่ความถี่ที่ต้องถูกชดเชยแรงดันในตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่กว่าแรงดันในตัวเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างด้านล่างแสดงให้เห็นถึงการออกแบบตัวกรองเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดตามสมการ 3.33

ที่ความถี่ รีบเปิ้ล 6 KHz

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของโหลด R-L โหลด $R = 100 \Omega$, $L = 1 \text{ H}$ มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อิมพีแดนซ์โหลด R-L} : \quad Z_{R-L} &= R + j2\pi(6k)L \\ &= 100 + j37.7 \times 10^3 \Omega \\ |Z_{R-L}| &= 37.7 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของแหล่งจ่าย มีค่าดังนี้ $R_S = 0.724 \Omega$, $L_S = 19.2 \mu\text{H}$

$$\begin{aligned} \text{อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย} : \quad Z_S &= R_S + j2\pi(6k)L_S \\ &= 0.724 + j0.724 \Omega \\ |Z_S| &= 1.024 \Omega \end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \therefore |Z_{PWM}| &= |Z_S| + |Z_L| = 1.024 \Omega + 37.7 \text{ k}\Omega \\ |Z_{PWM}| &\approx 37.7 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของตัวกรอง มีค่าดังนี้ $C_r = 55 \mu\text{F}$, $L_r = 1 \text{ mH}$.

$$\begin{aligned} \text{ตัวกรอง} : \quad |X_{crf}| &= \left| \frac{1}{j\omega C_r} \right| = \frac{1}{2\pi(6k)(55\mu)} = 0.482 \Omega \\ |X_{lrf}| &= |j\omega L_r| = 2\pi(6k)(1m) = 37.67 \Omega \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$(X_{crf} = 0.482 \Omega) \ll (X_{lrf} = 37.67 \Omega) \ll (Z_{PWM} = 37.7 \text{ k}\Omega)$ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

3.33

ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของโหลด R-L โหลด $R = 100 \Omega$, $L = 1 \text{ H}$ มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อิมพีแดนซ์โหลด R-L} : \quad Z_{R-L} &= R + j2\pi(50)L \\ &= 100 + j314 = 329 e^{j72.3^\circ} \Omega \end{aligned}$$

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของแหล่งจ่าย มีค่าดังนี้ $R_S = 0.724 \Omega$, $L_S = 19.2 \mu\text{H}$

$$\begin{aligned}
 \text{อิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย} \quad : \quad Z_S &= R_S + j2\pi(50)L_S \\
 &= 0.724 + j0.603 \times 10^{-2} \Omega \\
 |Z_S| &= 0.724 \Omega \\
 \therefore Z_{PWM} &= Z_S + Z_L = (0.724 + j0.603 \times 10^{-2}) + (100 + j314) \\
 &= 100.7 + j314 \approx 329 e^{j72.2^\circ} \Omega
 \end{aligned}$$

อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของตัวกรอง มีค่าดังนี้ $C_r = 55 \mu\text{F}$, $L_r = 1 \text{ mH}$.

$$\begin{aligned}
 \text{ตัวกรอง} \quad : \quad |X_{cf}| &= \left| \frac{1}{j\omega C_r} \right| = \frac{1}{2\pi(50)(55\mu)} = 57.9 e^{-j90^\circ} \Omega \\
 |X_{lf}| &= |j\omega L_r| = 2\pi(50)(1\text{m}) = 0.314 e^{j90^\circ} \Omega \\
 |X_{lf}| &\approx 0.314 \Omega \\
 X_{cf} // Z_{PWM} &= \frac{(57.9 e^{-j90^\circ})(329 e^{j72.2^\circ})}{57.9 e^{-j90^\circ} + 329 e^{j72.2^\circ}} = 55.6 e^{-j87^\circ} \Omega
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $(X_{lf} = 0.314 \Omega) \ll (X_{cf} // Z_{PWM} = 55.6 \Omega)$ ซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.33

3.9 เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index Criteria)

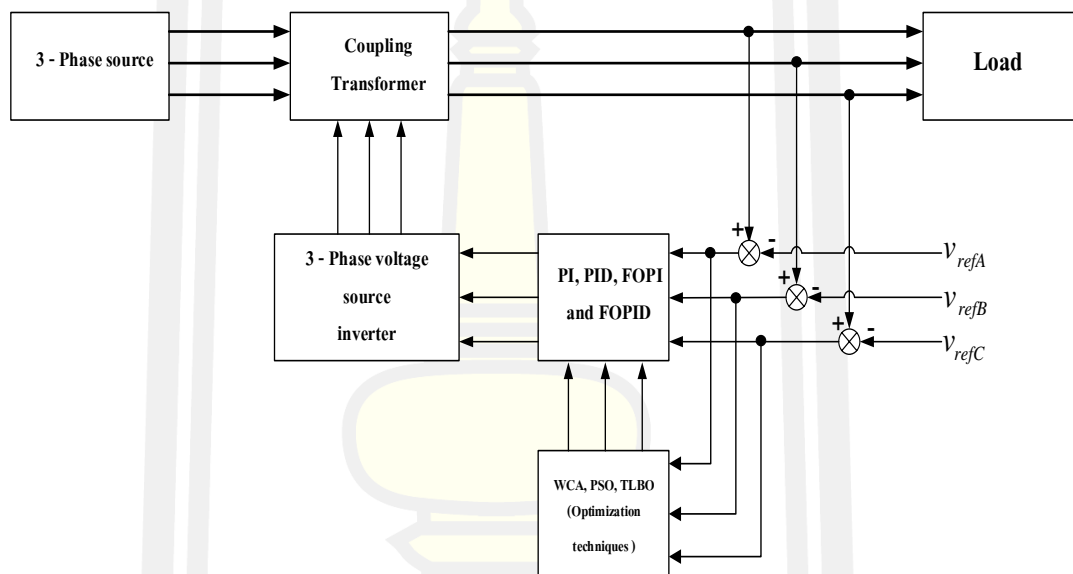
จุดมุ่งหมายของการออกแบบระบบควบคุมต่าง ๆ นั้น คือ การคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเหล่านั้น เราอาจจะตั้งมาตรการอะไรขึ้นมาอย่างหนึ่งและตั้งเป้าหมายของการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้ดีที่สุดตามมาตรการที่ตั้งไว้ นั้น มาตรการดังกล่าวที่นิยมใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ดีที่สุด (Optimal Control) เรียกว่า ดรรชนีสมรรถนะ (Performance Index) ซึ่งจะเป็นดรรชนีที่ชี้ว่าระบบที่ต้องการจะควบคุมการทำงานเป็นอย่างไรบ้างตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ การออกแบบหรือการคำนวณหาค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมด้วยวิธีนี้จะต้องออกแบบเพื่อให้ได้คำสั่งควบคุมของระบบนั้นเป็นเป็นสัญญาณคำสั่งที่ดีที่สุดภายใต้มาตรการหรือดรรชนีสมรรถนะที่กำหนดซึ่งอาจจะเป็นการหาค่าสั่งควบคุมที่ทำให้ค่าดรรชนีสมรรถนะมีค่าต่ำสุด โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ดังสมการ

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt \quad (3.34)$$

$e(t)$ คือค่าสัญญาณความผิดพลาด

3.10 แผนภาพบล็อกการควบคุม (Control block diagram)

ขั้นตอนการควบคุมในการแก้ไขและชดเชยแรงดันนั้น เริ่มต้นแรงดันอ้างอิงที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันที่โหลดก่อนจะป้อนให้กับตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID เพื่อทำการสร้างสัญญาณชดเชยเพื่อที่จะส่งให้กับอินเวอร์เตอร์สามเฟสทำการสวิตช์แรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบโดยผ่านหม้อแปลงเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพบล็อกการทำงานแสดงดังภาพประกอบ 24 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ของอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตแสดงดังตาราง 2

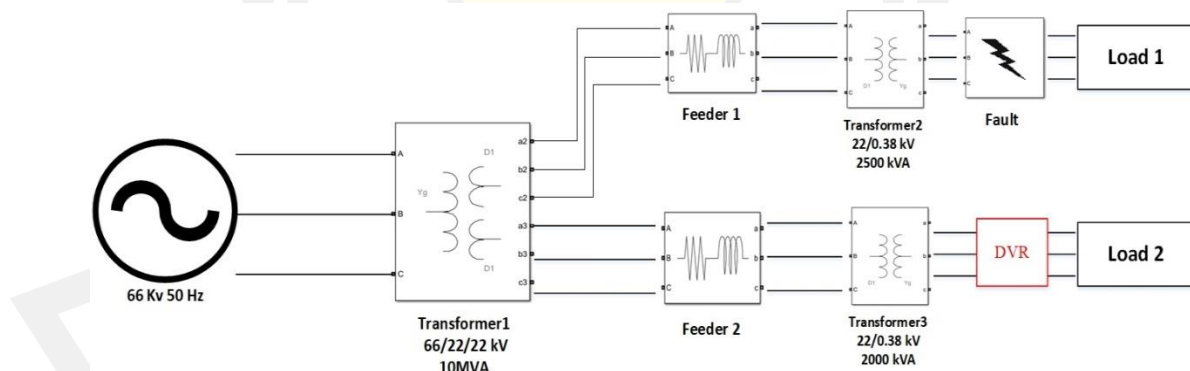


ภาพประกอบ 24 แผนภาพบล็อกการควบคุม (Control block diagram)

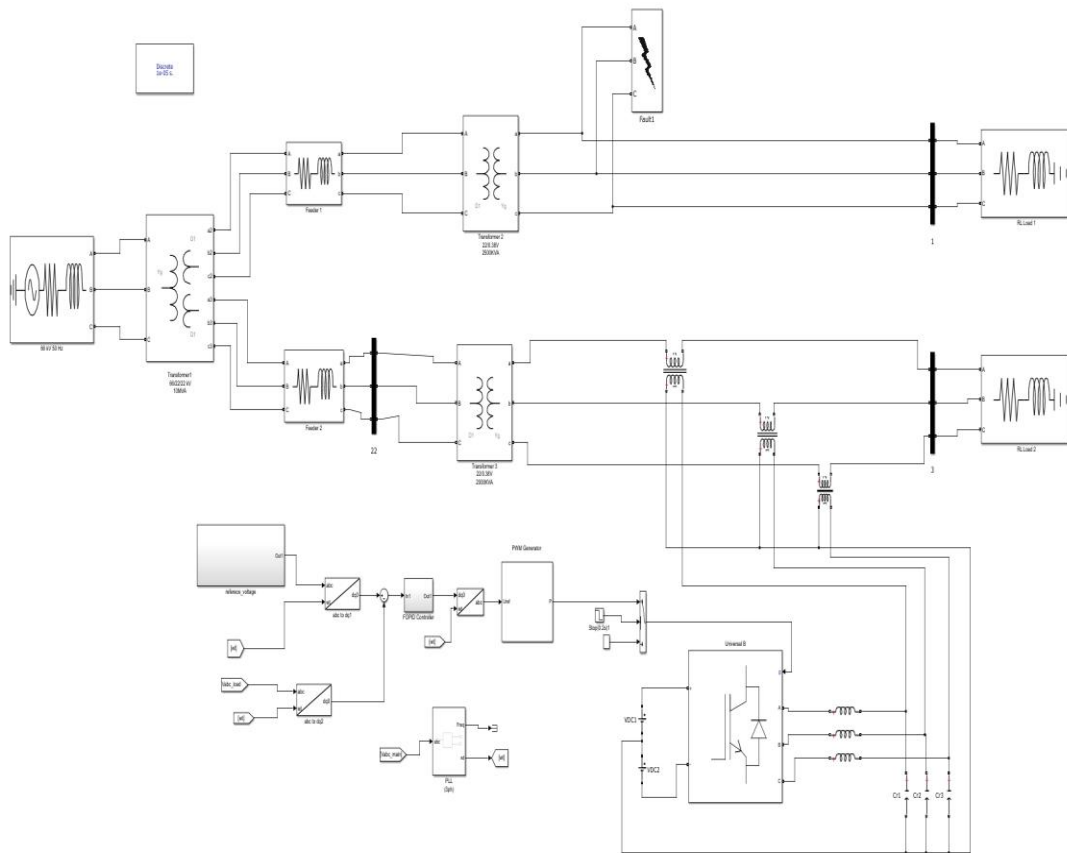
ตาราง 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต

Supply frequency	50 Hz
Voltage load	380 V
Series transformer turn ratio	1:1
DC link voltage	$\frac{380\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 2$
Invert switching frequency	6 kHz
Filter inductance	2.5 mH
Filter capacitance	55 μ F

ภาพประกอบ 25 แสดงการติดตั้งของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบสายส่งและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกแสดงดังตารางที่ 3 เพื่อทำการทดสอบอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 25 การติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง



ภาพประกอบ 26 ภาพจำลองการทำงานอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง

ตาราง 3 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้า

Utility (AC grid)	66 kV, 50 Hz
Transformers1	10 MVA, 66/22/22 kV
Transformers2	2500 kVA, 22/0.38 kV
Transformers3	2000 kVA, 22/0.38 kV
Feeder resistance	1 ohm
Feeder inductance	5 mH

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and Discussion)

เพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตและความถูกต้องหลักการชดเชยแรงดันของทั้ง 4 ตัวควบคุมที่ทำงานร่วมกับเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื้อหาบทนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการวิจัยทั้งในรูปแบบของผลการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink 2019b จำลองทดสอบสถานะผิดปกติพร้อมทั้ง 2 ระบบดังนี้

- 1) ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย 4 กรณี ได้แก่ แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags), แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced voltage swells), แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags) และแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells)
- 2) ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) 2 กรณี ได้แก่ ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน หรือ Single line to ground fault (SLG) และ ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินที่ หรือ Double line to ground fault (DLG)

โดยทุกกรณีอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตจะเริ่มต้นการชดเชยแรงดันที่เวลา 0.05-0.2 Sec พารามิเตอร์และค่าเริ่มต้นในการหาค่าที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ของทั้ง 3 เทคนิค

The controller parameter ได้แก่ K_p K_i K_d λ และ μ

The maximum iteration (L)=30 ;

The search agent size (N) = 50;

The lower boundary (lb)= 0.01 ;

The upper boundary (ub) = 30;

Number of variables (dim) = 5;

The maximum and minimum number of the decreasing factor $C_{max} = 1$; $C_{min} = 0.0004$

4.1 ทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วย 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) จำนวน 4 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags) เท่ากับ 50 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced voltage swells) 150 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags) ของเฟส A เฟส B และเฟส C ลดลง 80%, 70% และ 50% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells) ของเฟส A เฟส B และเฟส C เพิ่มขึ้น 120%, 130% และ 150% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด

4.1.1 เทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

ตาราง 4 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณี

ตาราง 4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมจากการทดสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

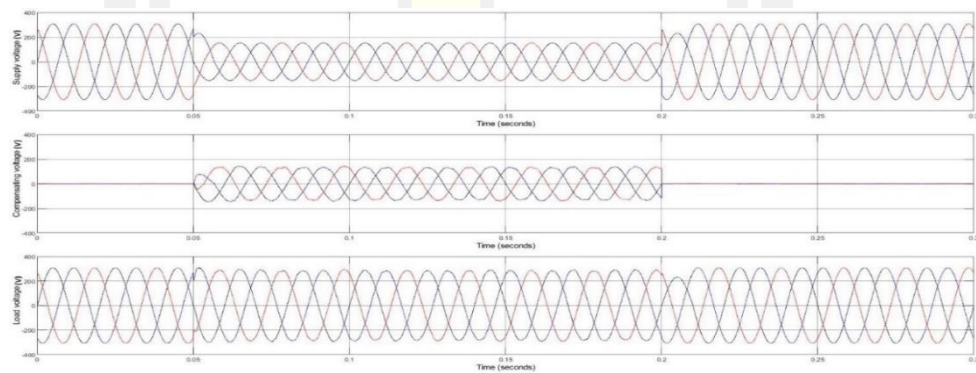
Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
		Kp	Ki	Kd	λ	μ		
PI	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3907	0.1788				0.0153	51.24
PID	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	30.0000	20.7080	0.0100			0.0117	51.49
FOPI	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3724	4.4513		1.6703		0.0153	46.62

Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
		Kp	Ki	Kd	λ	μ		
FOPID	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3988	1.0762	0.0100	1.6098	0.0100	0.0153	46.68

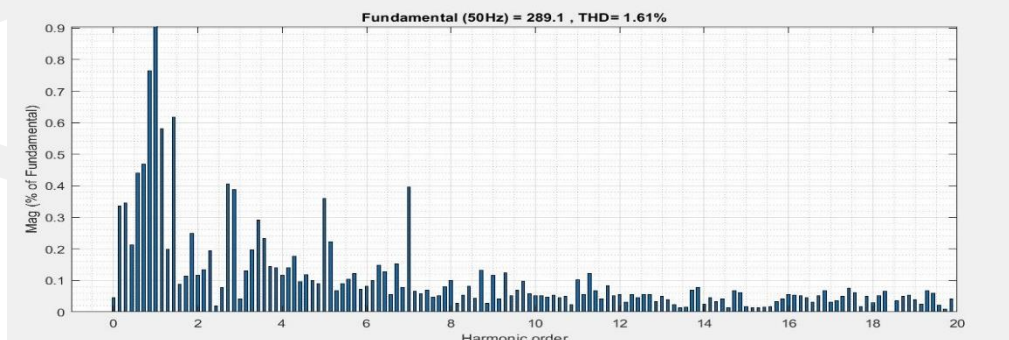
โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบ 27 ถึง 74

กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags)

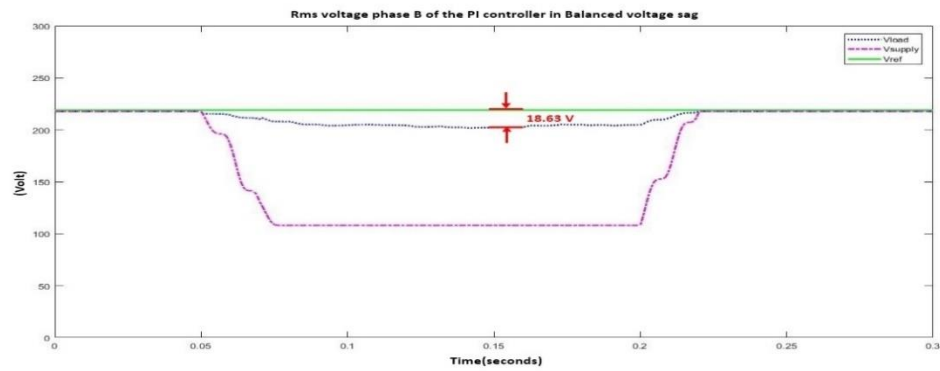
a) ตัวควบคุม PI



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

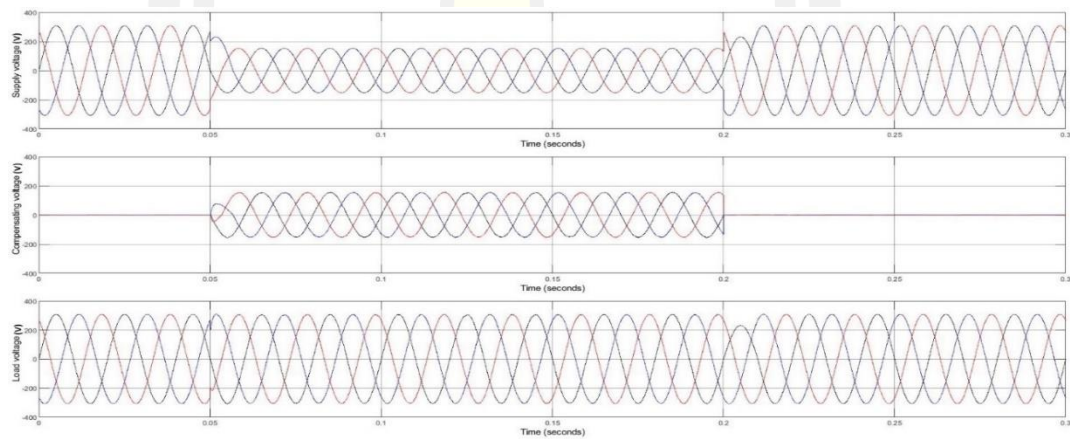


ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



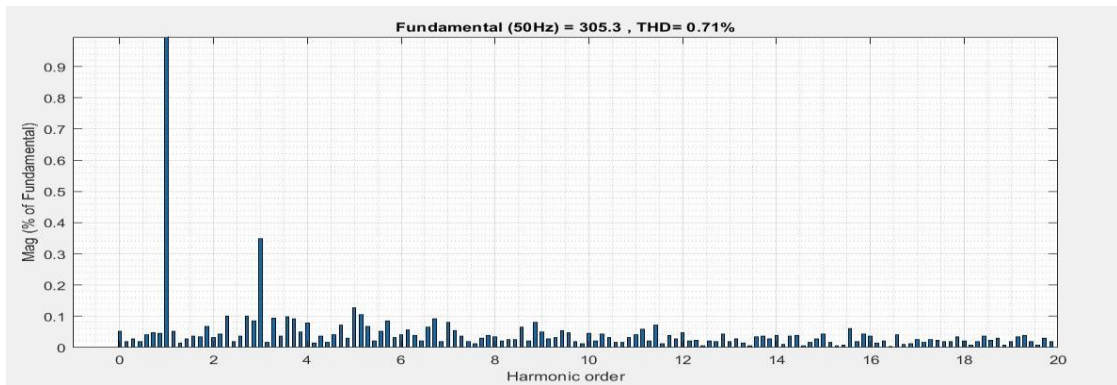
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

b) ตัวควบคุม PID

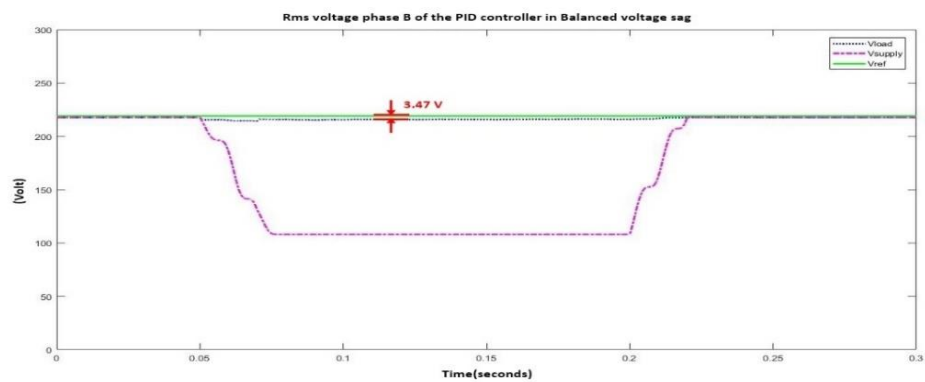


ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA 4

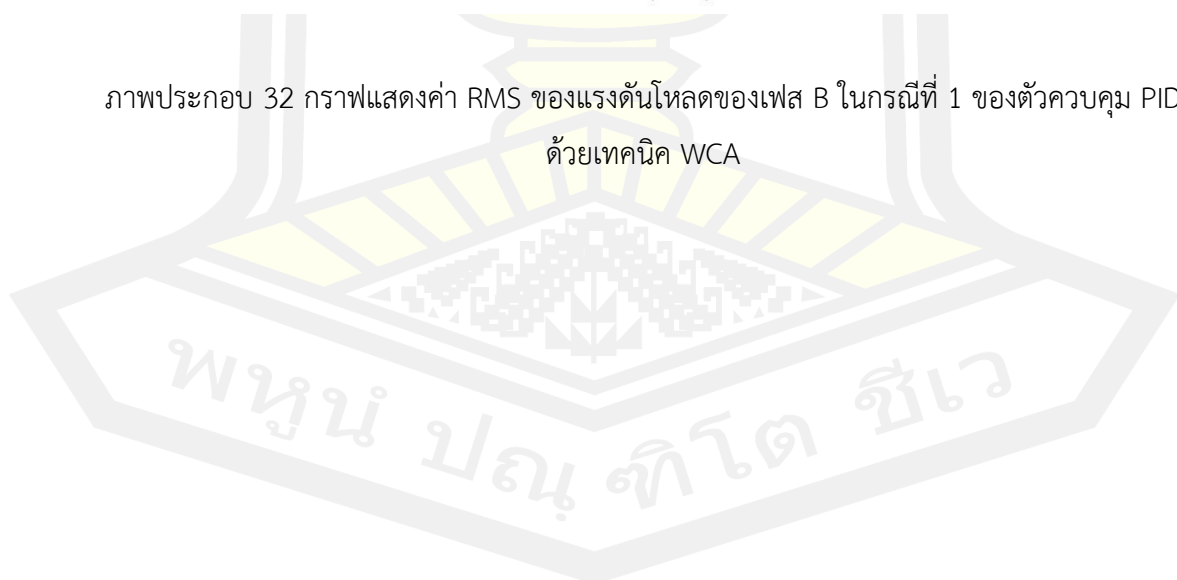
พหุบัณฑิต ชีวะ



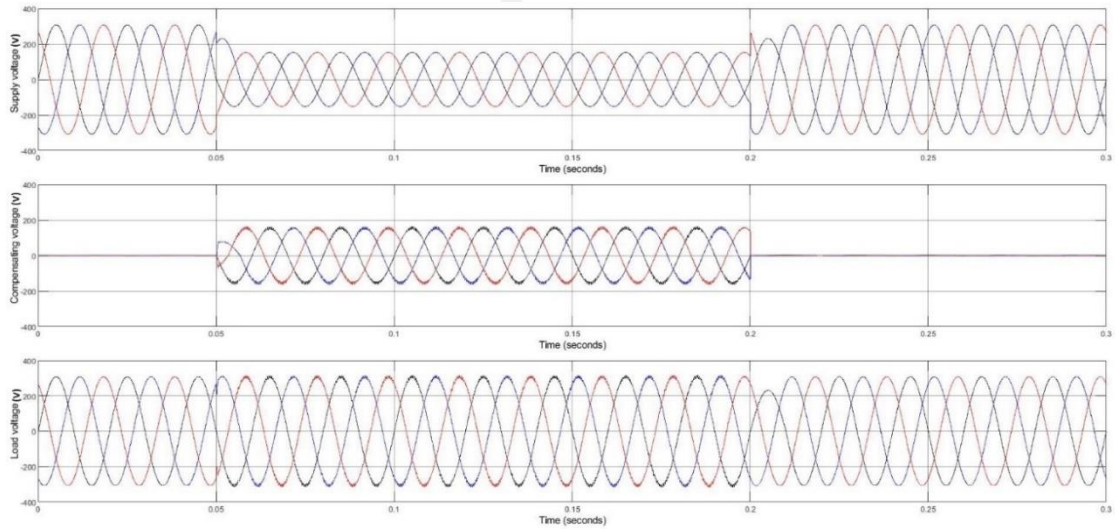
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหนดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



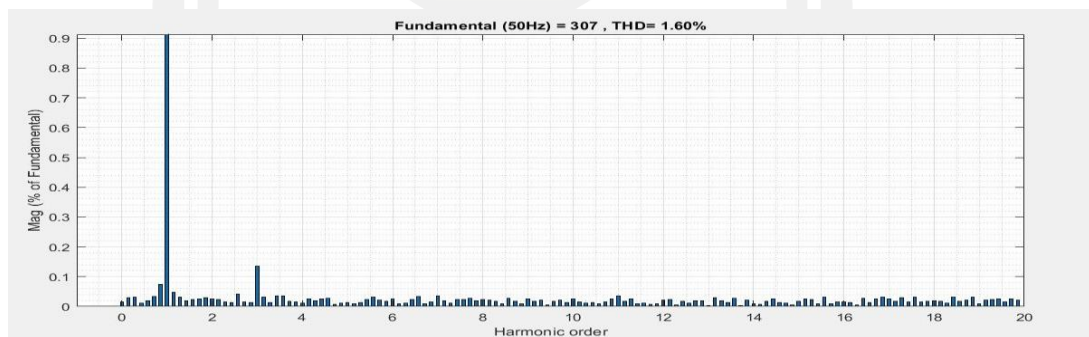
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหนดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



c) ตัวควบคุม FOPI

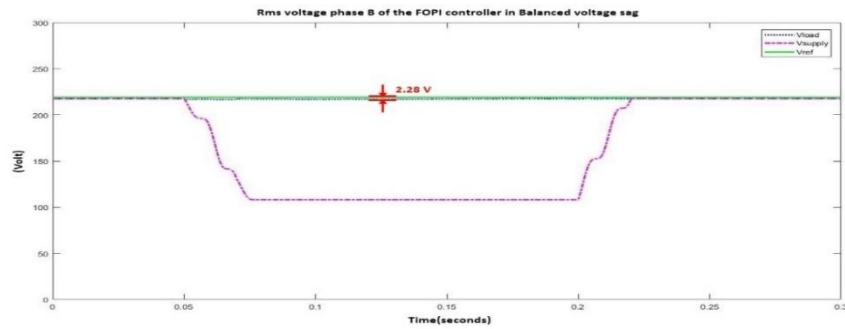


ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA



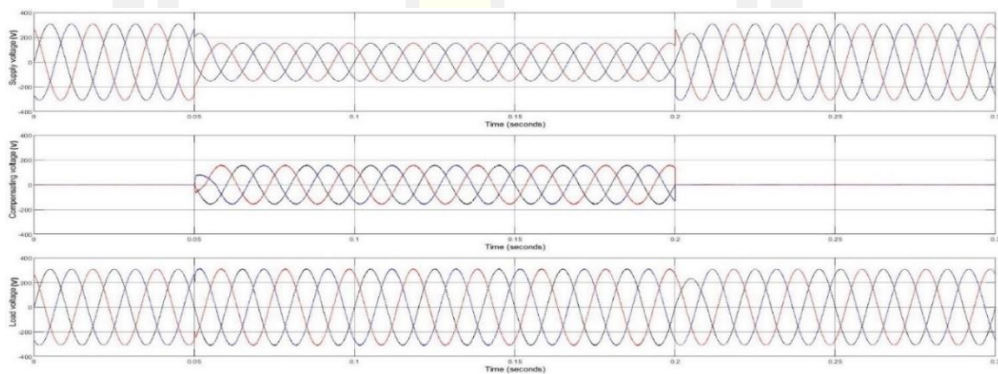
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

พหุ ประถมศึกษา

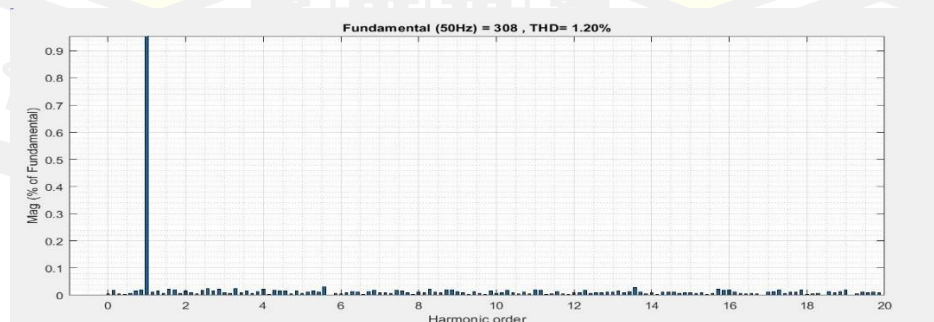


ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

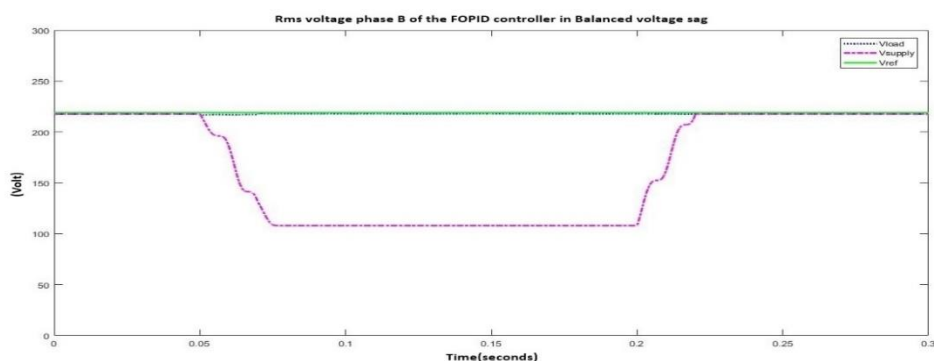
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

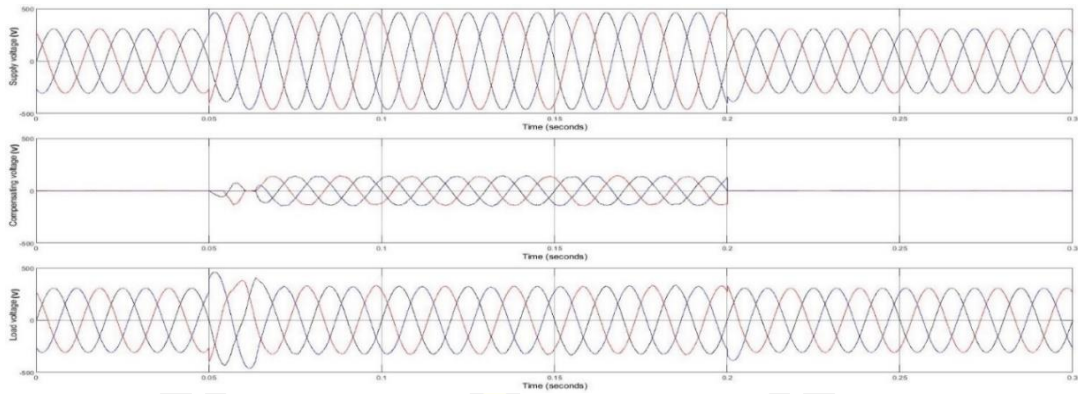


ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

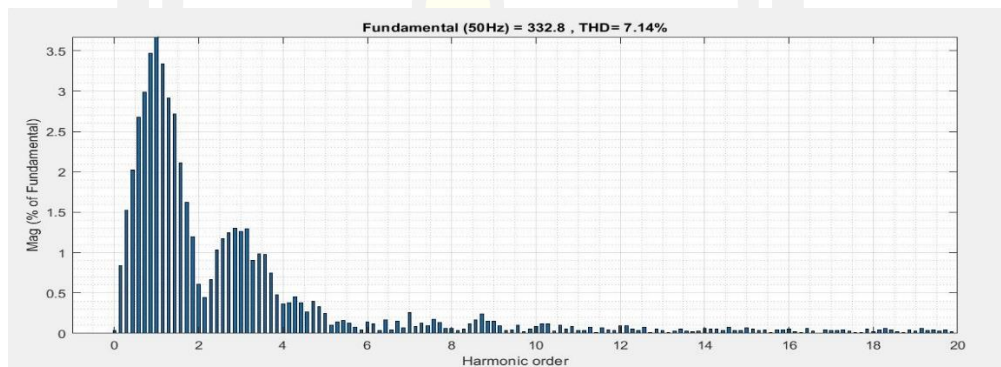
กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C เท่ากับ 50 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ทั้ง 4 ควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID สามารถชดเชยแรงดันตกแบบสมดุลทั้งสามเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้ง 4 ตัวควบคุม สำหรับตัวควบคุม PI ในภาพประกอบ 29 นั้น แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 18.63 โวลต์หรือประมาณ 8.74 % แต่ยังคงอยู่ระดับพิกัดที่ไม่มีผลกระทบต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน Computer and Business Equipment Manufacturers Association หรือ CBMEMA curve [48] ส่วนตัวควบคุม PID, FOPI และ FOPID นั้น สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ให้ใกล้เคียงกับแรงดันพิกัดและค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced voltage swells)

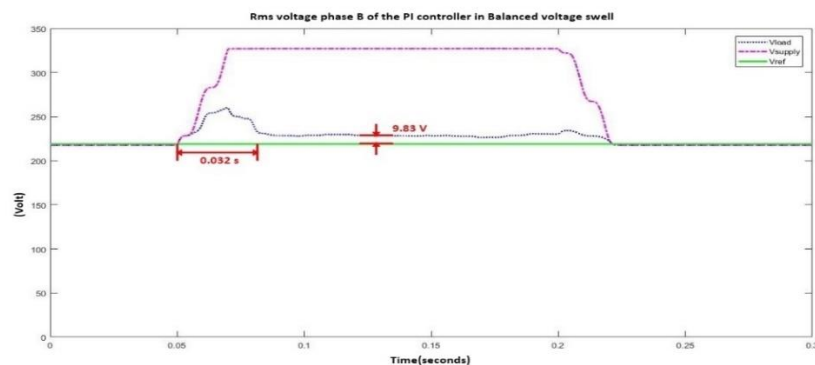
a) ตัวควบคุม PI



ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

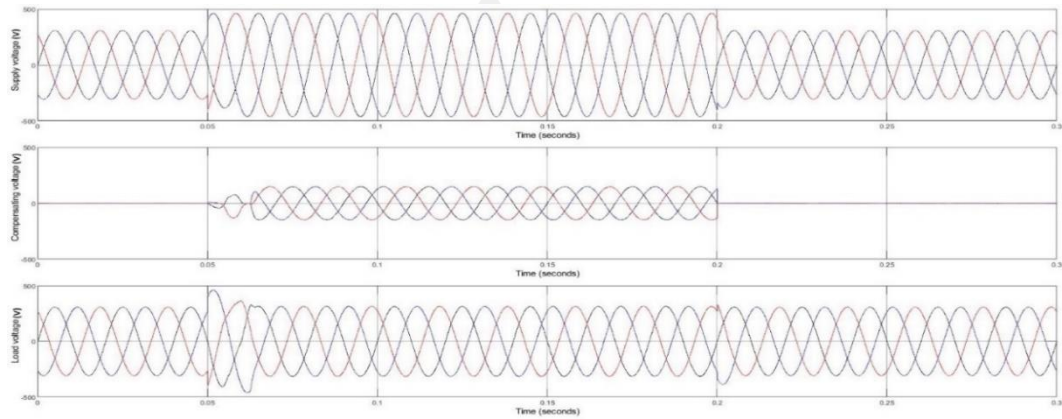


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที 2 ของตัวควบคุม PI

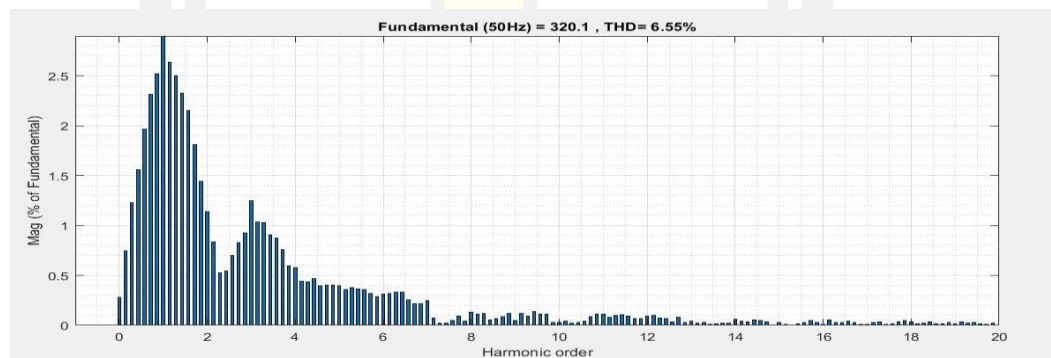


ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

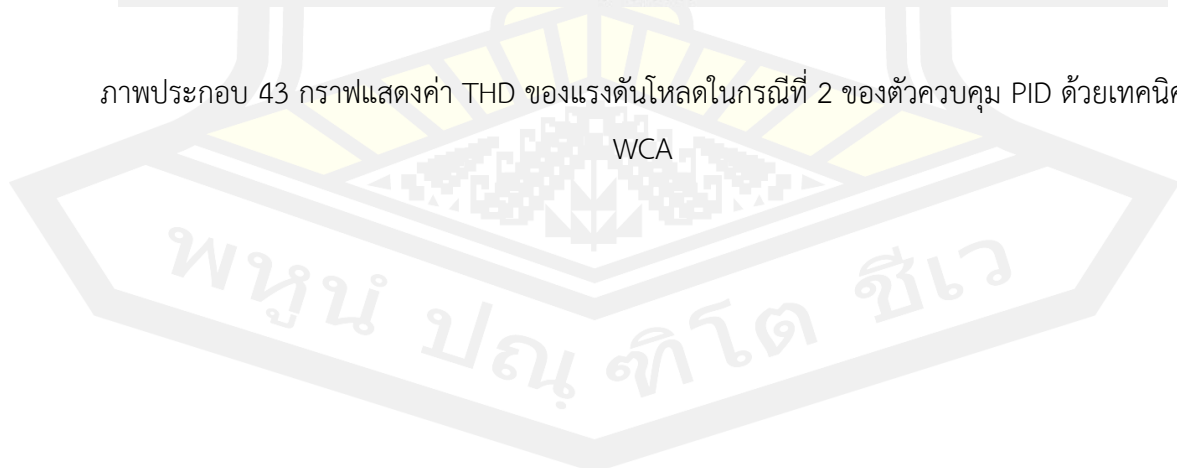
b) ตัวควบคุม PID

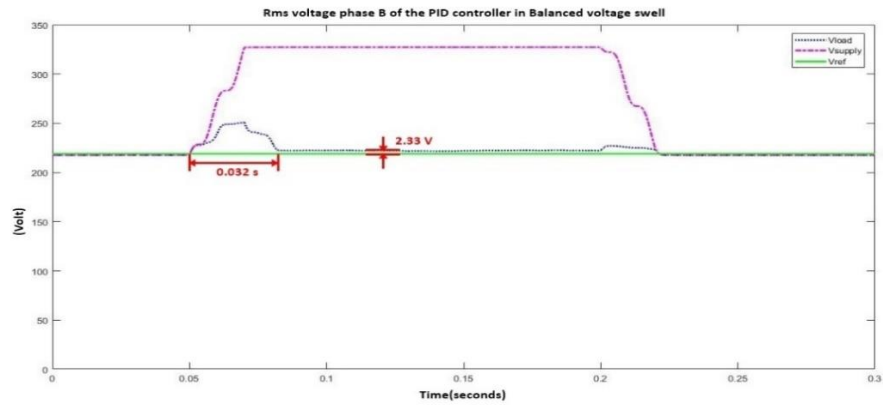


ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



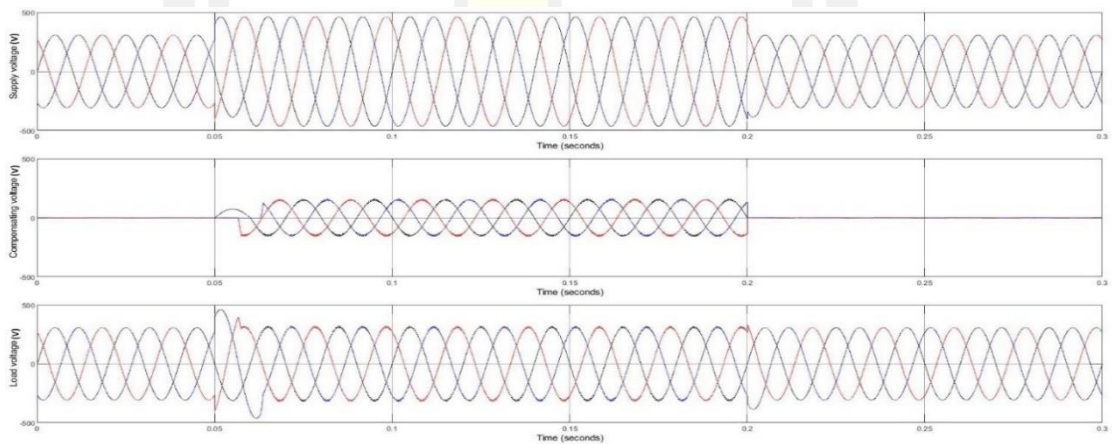
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



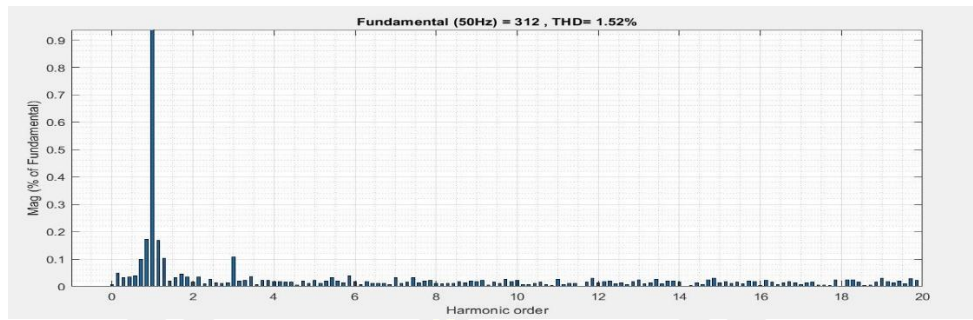


ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

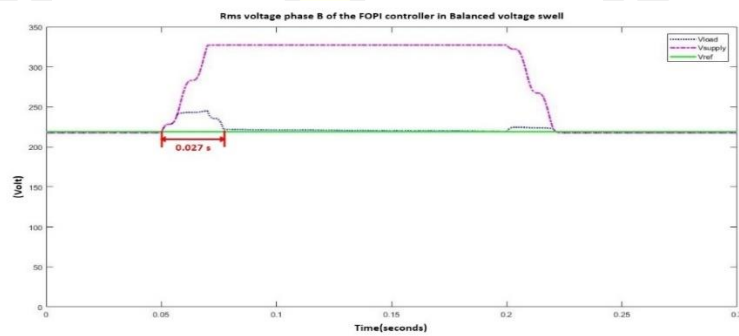
c) ตัวควบคุม FOPI



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

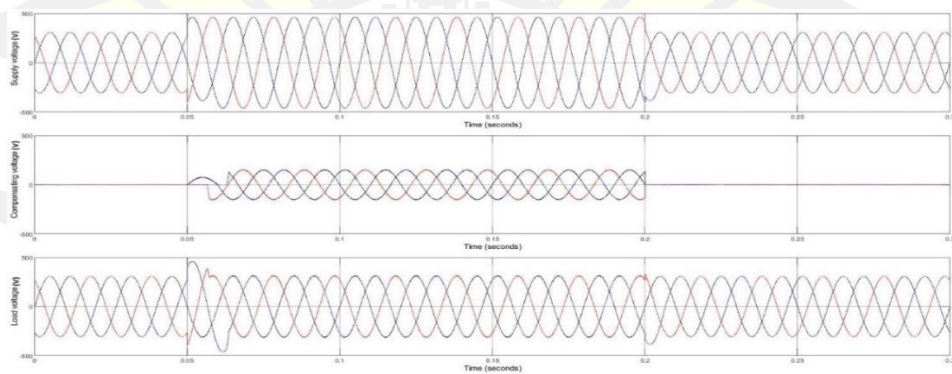


ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

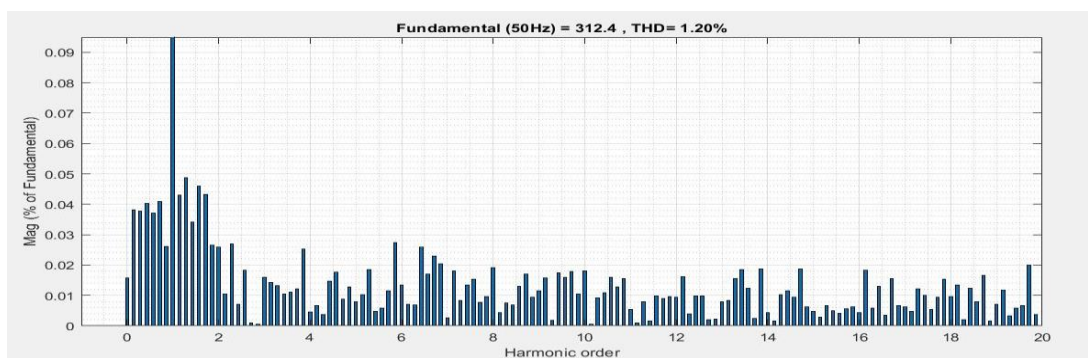


ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

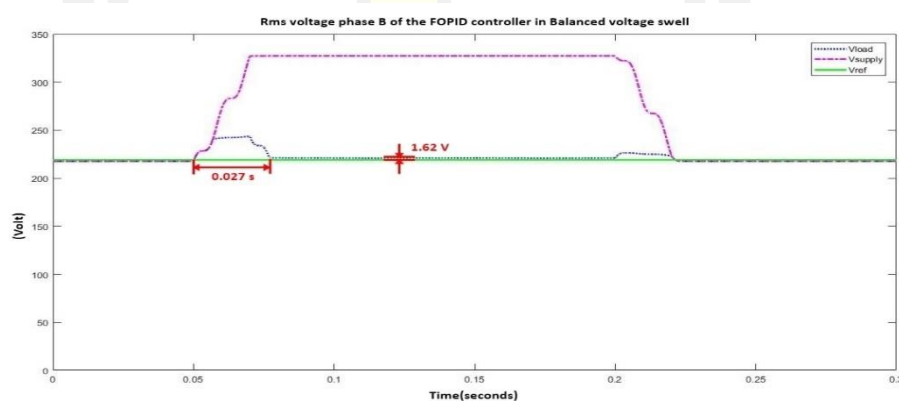
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

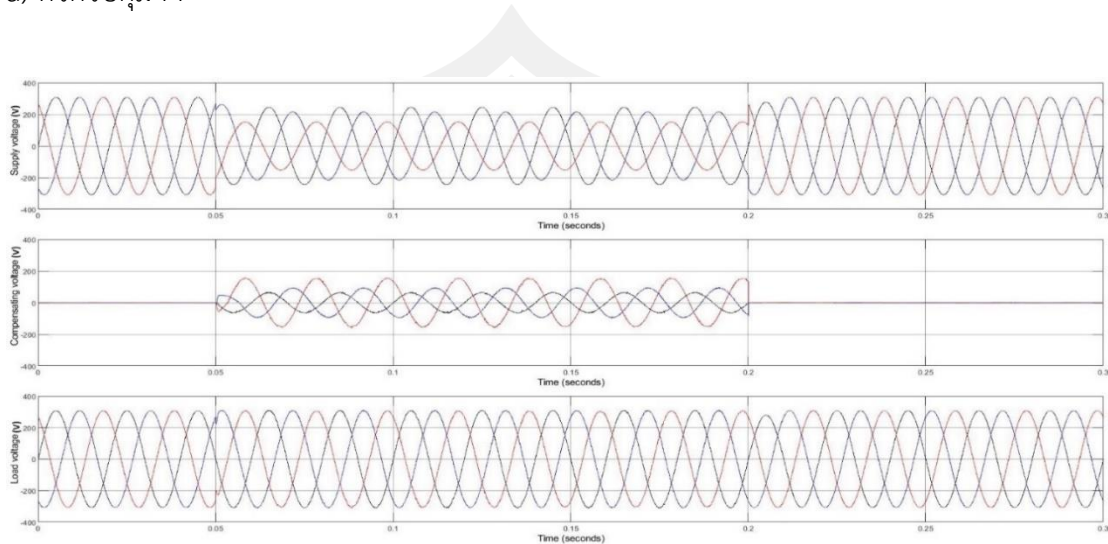


ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

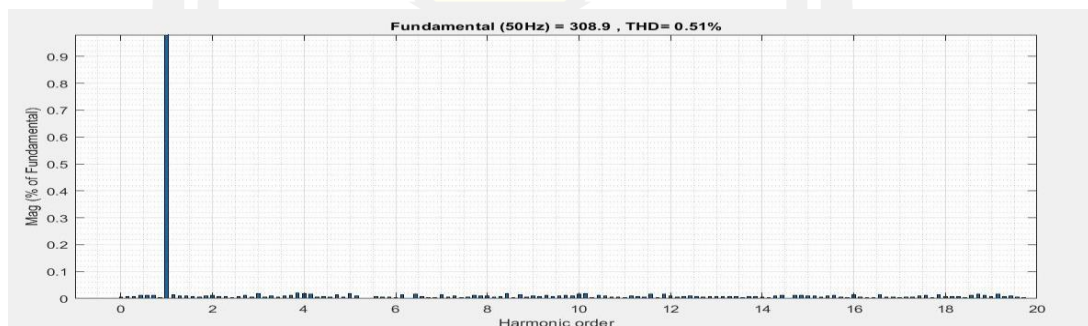
กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced voltage swell) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C เท่ากับ 150 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ตัวควบคุม PI ในภาพประกอบ 41 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 9.83 โวลต์หรือประมาณ 4.47 % และทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 1.35-1.62 Cycle (0.027-0.032 วินาที) ซึ่งเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48]. ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags)

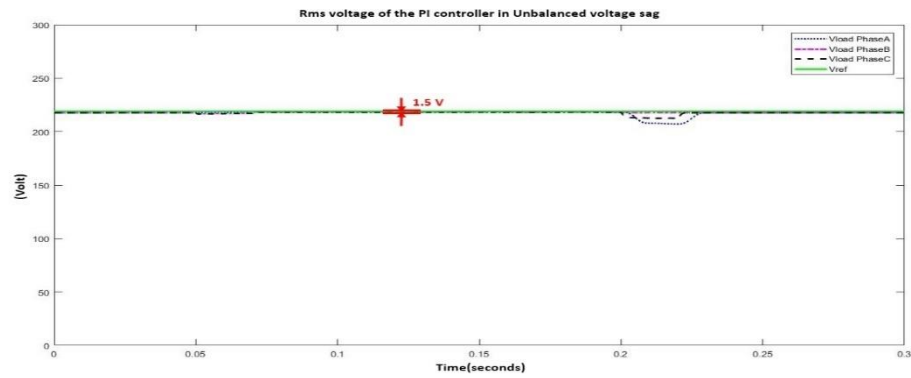
a) ตัวควบคุม PI



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

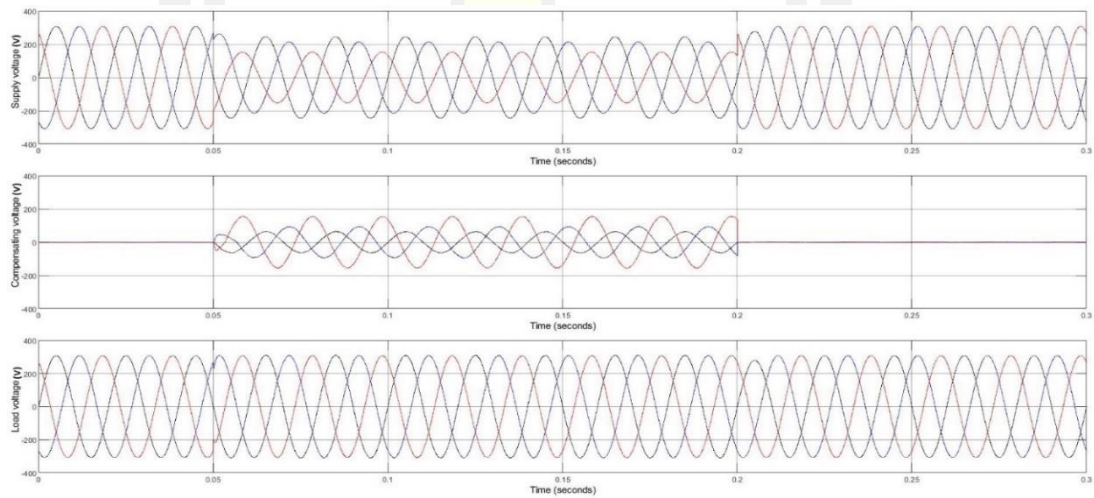


ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

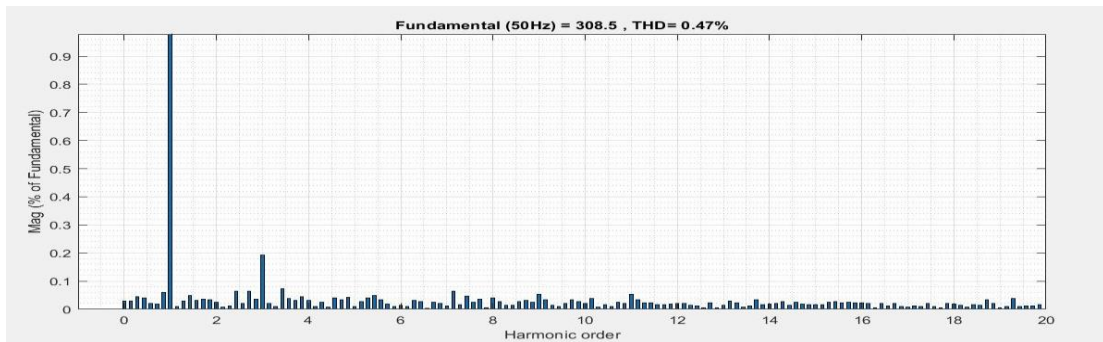


ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

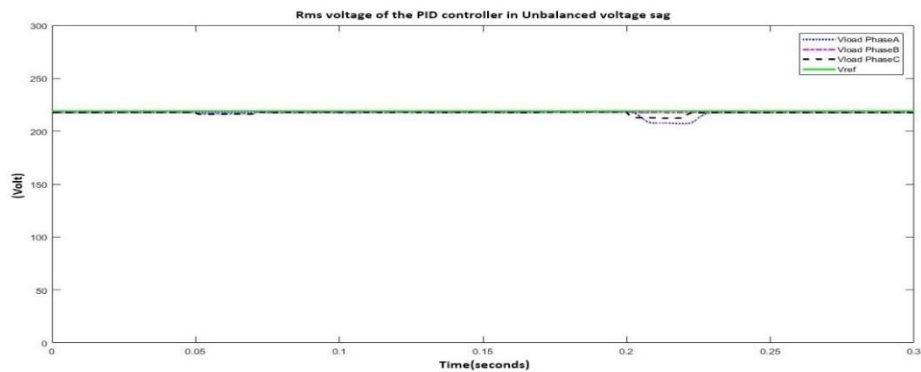
b) ตัวควบคุม PID



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

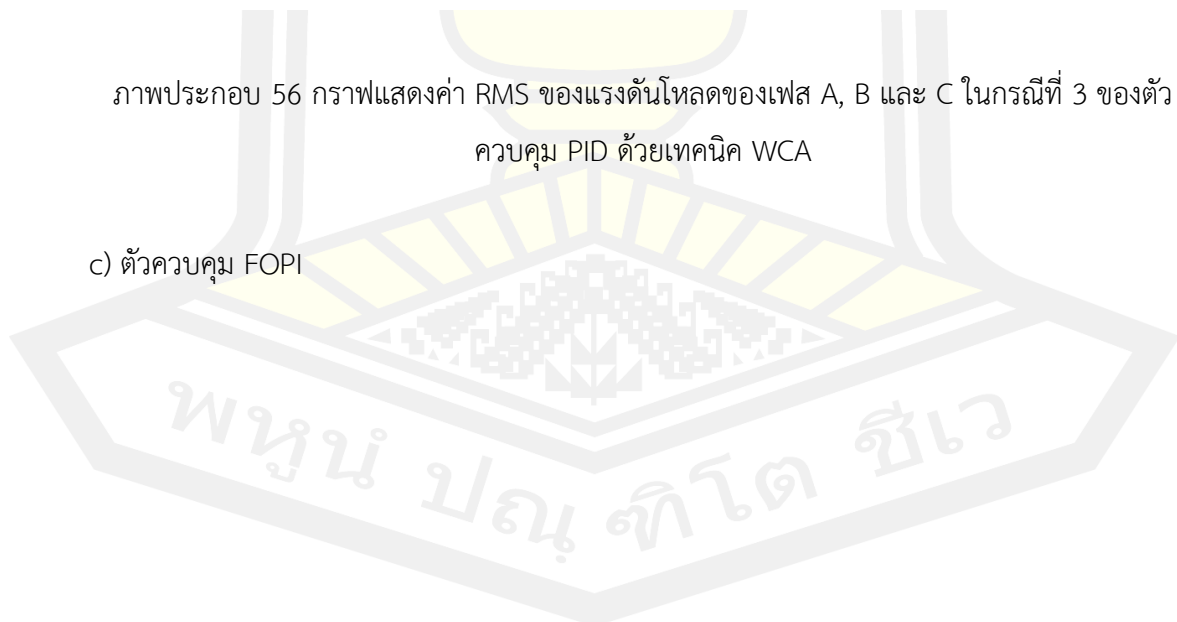


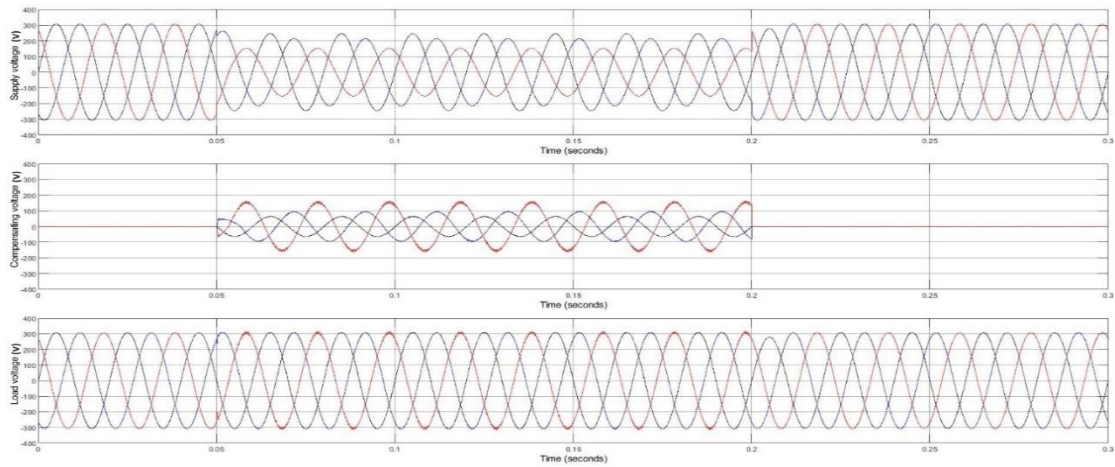
ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



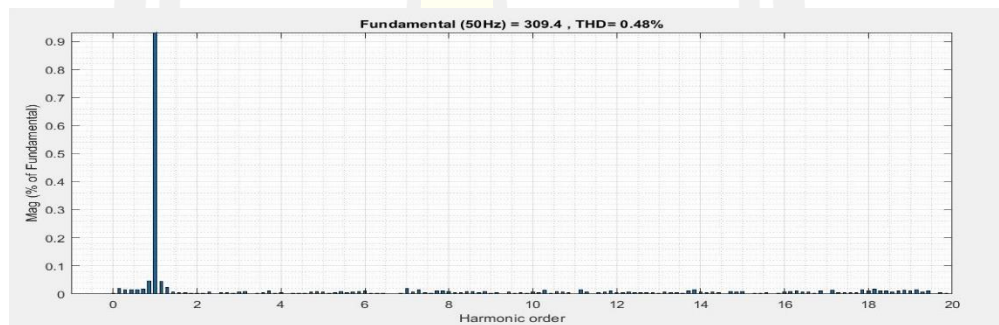
ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

c) ตัวควบคุม FOPI

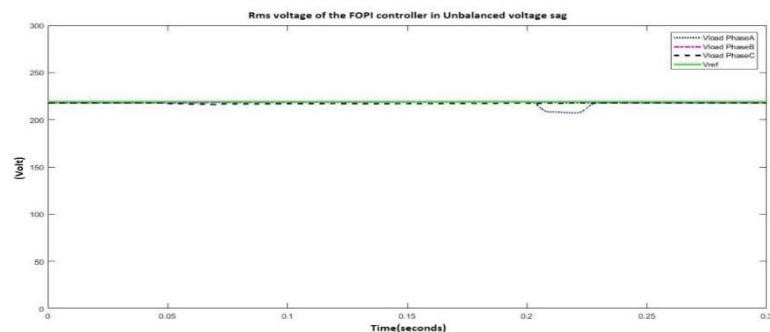




ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

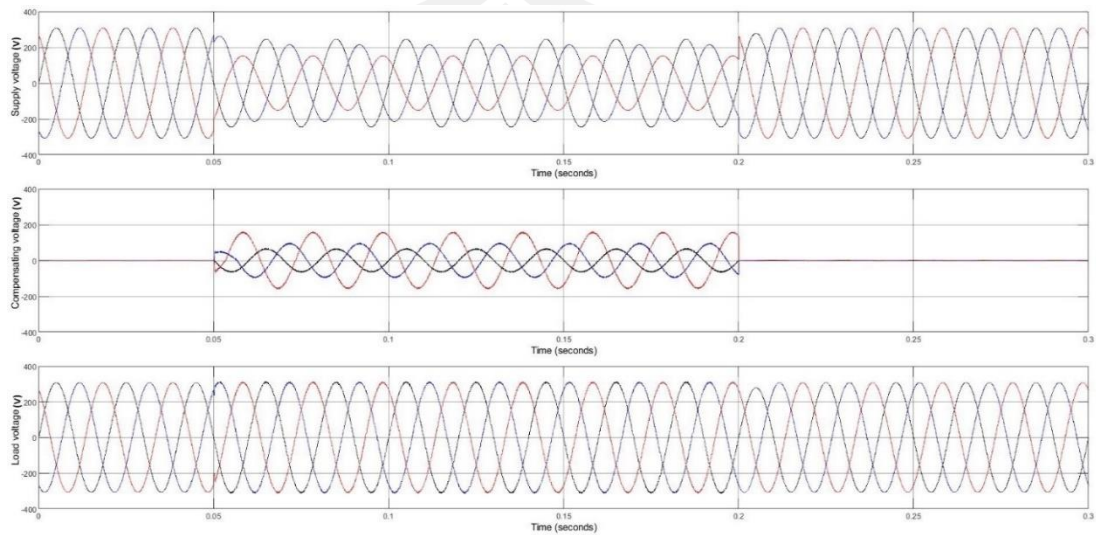


ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

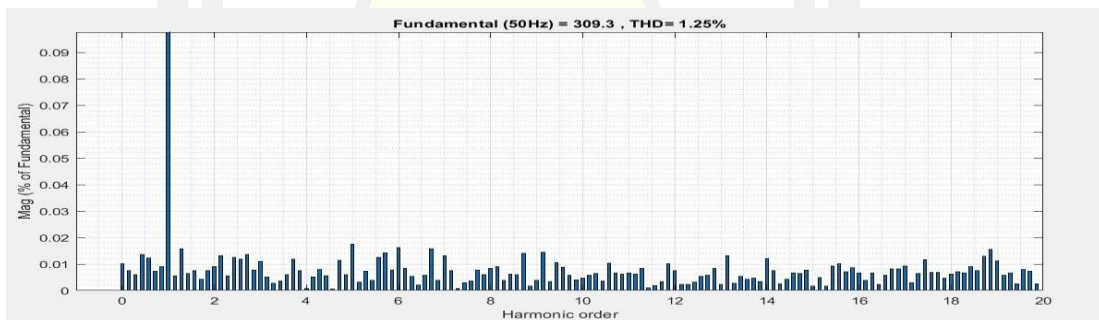


ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

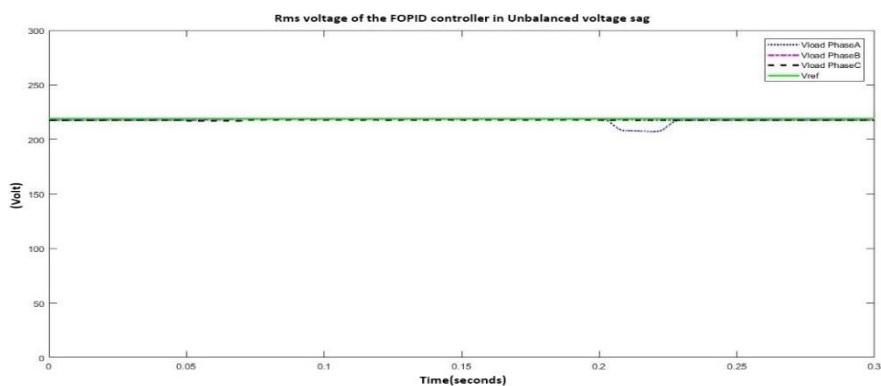
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

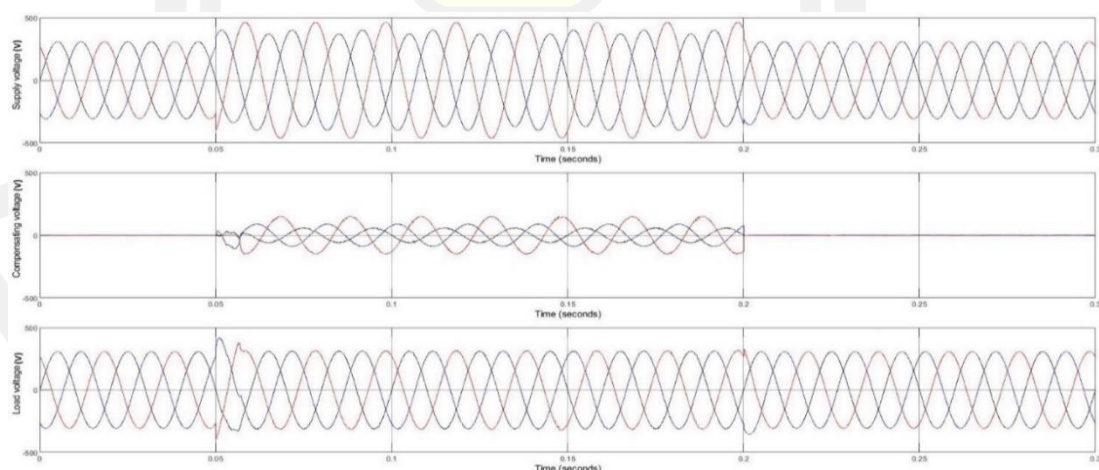


ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

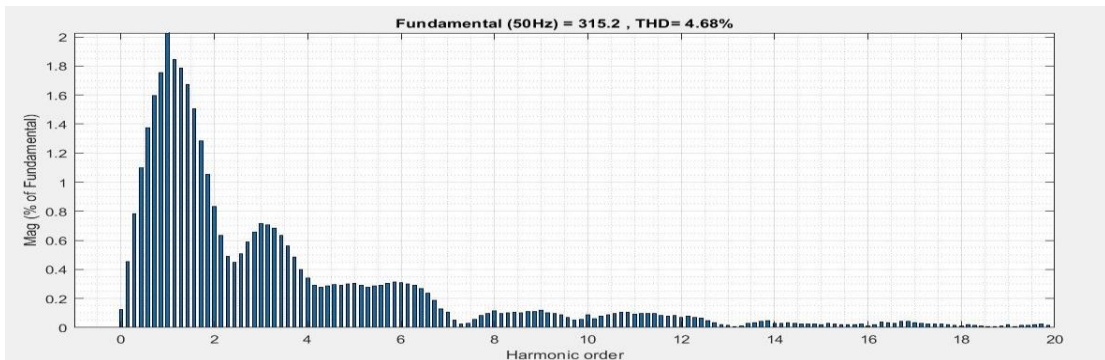
กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags) ของเฟส A เฟส B และเฟส C ลดลง 80%, 70% และ 50% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลอง พบว่า ทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โหลดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำใกล้เคียงกับแรงดันพิกัดอย่างดียิ่งเยี่ยม ดังภาพประกอบ 53, 56, 59 และ 62

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells)

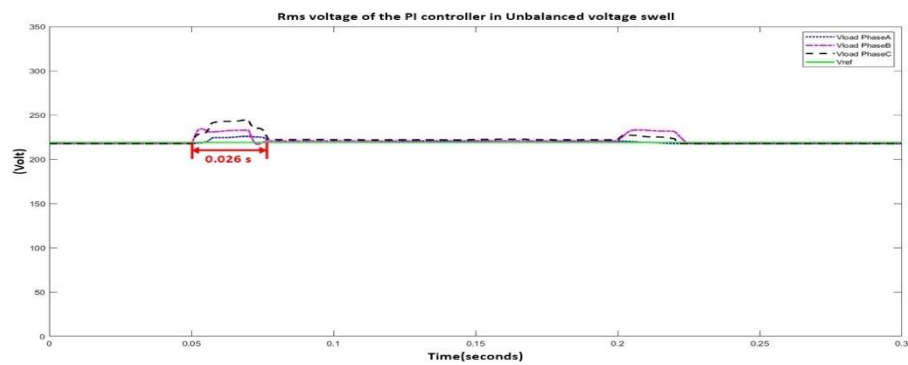
a) ตัวควบคุม PI



ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



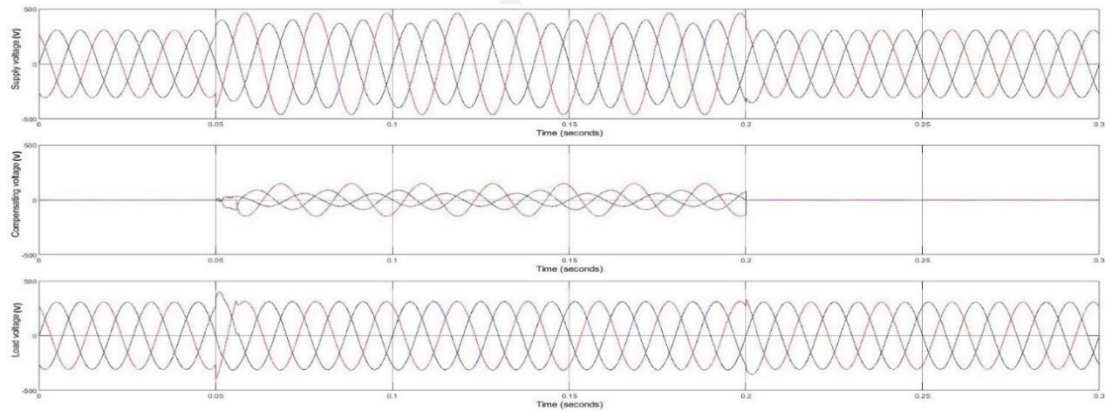
ภาพประกอบ 64 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



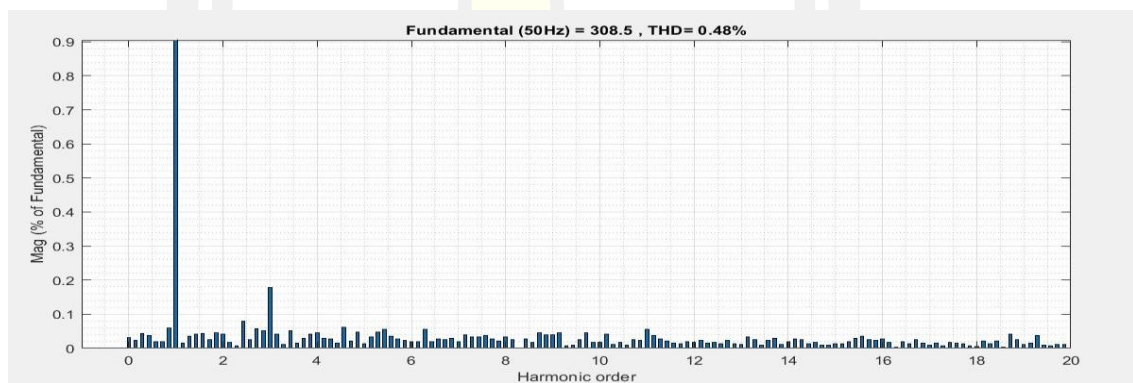
ภาพประกอบ 65 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

พหุบัณฑิต ชีวะ

b) ตัวควบคุม PID

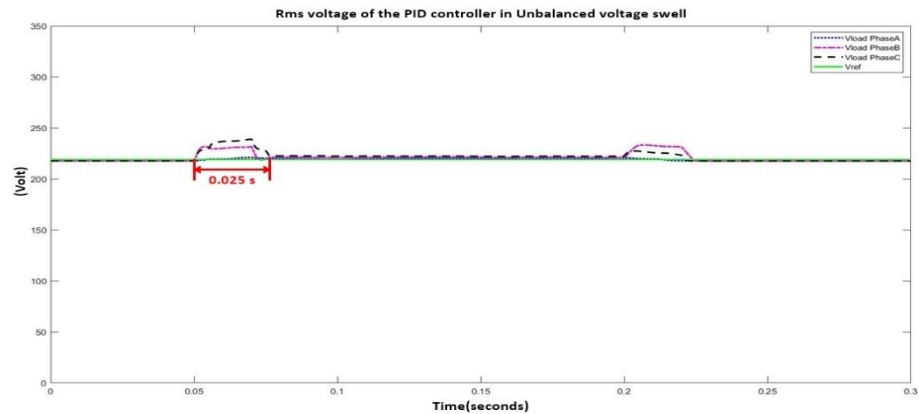


ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



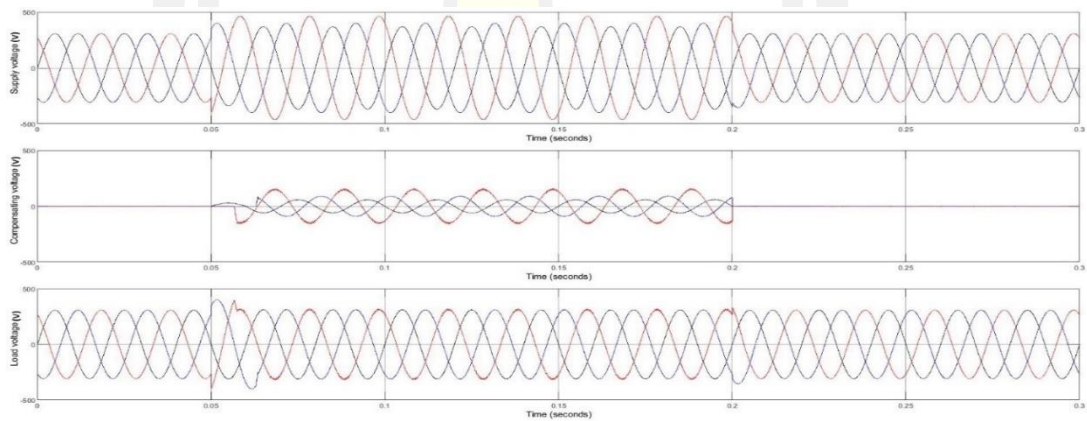
ภาพประกอบ 67 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

พหุ ประถม วิชา



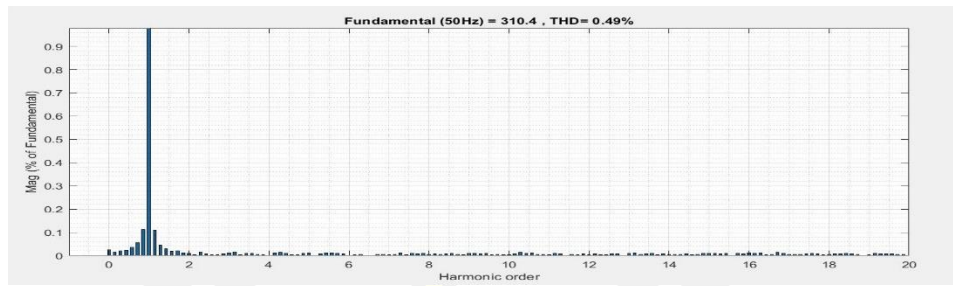
ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

c) ตัวควบคุม FOPI

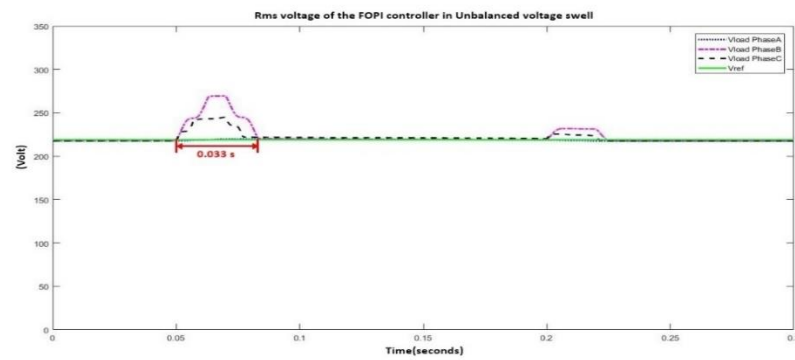


ภาพประกอบ 69 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

พหุบัณฑิต ชีวะ

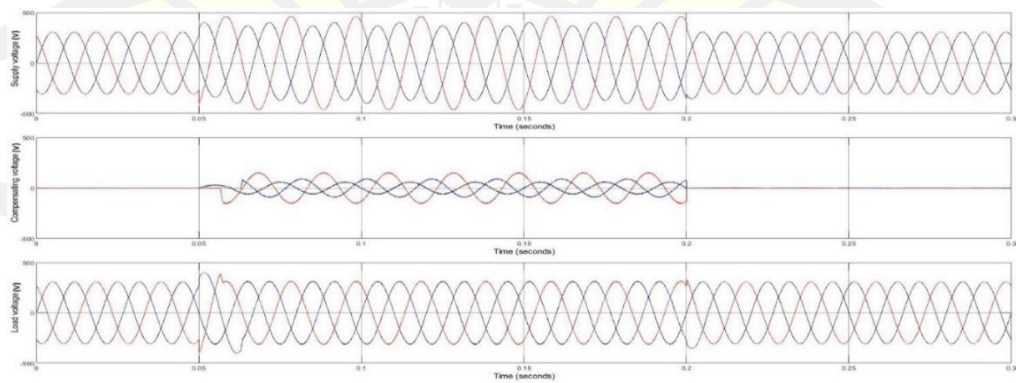


ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

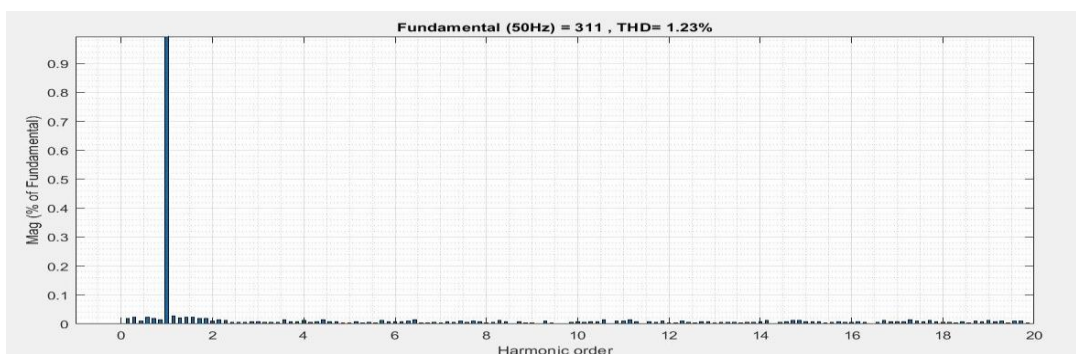


ภาพประกอบ 71 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

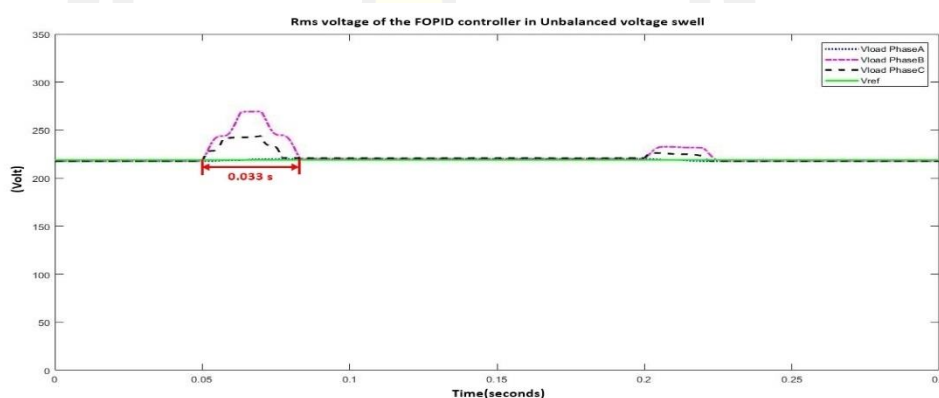
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells) ของเฟส A เฟส B และเฟส C เพิ่มขึ้น 120%, 130% และ 150% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลอง พบว่า ทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โหลดที่โหลดให้เข้าสู่ในช่วงสภาวะปกติประมาณ 1.27-1.64 Cycle หรือ 0.025-0.032 วินาที และค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันที่โหลดและแรงดันพิกัดหลังการชดเชยนั้น ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐาน CBMEMA curve [48] ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 4 ในการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์บรรณนิสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุมที่ได้จากเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี พบว่า ตัวควบคุม PID มีค่า $ITAE_{PID} = 0.0117$ ซึ่งต่ำสุดเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่นและตัวควบคุม PI, FOPI, FOPID มีค่าเท่ากันทั้งหมด คือ $ITAE_{PI} = ITAE_{FOPI} = ITAE_{FOPID} = 0.0153$

ตาราง 5 แสดงค่าการเปรียบเทียบ Response time และ %Steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 5 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Balanced voltage sag	Nearly promptly	8.47	Nearly promptly	1.58	Nearly promptly	1.04	Nearly promptly	~ 0
Case 2: Balanced voltage swell	32.32	4.47	32.49	1.06	27.02	~ 0	27.14	0.74
Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	0.68	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0
Case 4: Unbalanced voltage swell	26.40	~ 0	25.47	~ 0	32.80	~ 0	32.80	~ 0
Average	14.68	3.40	14.49	0.66	14.96	0.26	14.99	0.18

จากตาราง 5 ในการวิเคราะห์ Response time และวิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุลและกรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล จะเกิด Response time น้อยมากหรือมีการตอบสนองอย่างทันทีทันใด
- 2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส ตัวควบคุม FOPI และ FOPID มี Response time 27.02 ms และ 27.14 ms ตามลำดับ ซึ่งเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุม PI และ PID ที่มี Response time เท่ากับ 32.32 ms และ 32.49 ms ตามลำดับ

ส่วนในกรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลนั้น พบว่า ตัวควบคุม PI และ PID มี Response time เท่ากับ 26.40 ms และ 25.47 ms ตามลำดับ ซึ่งมีค่าตอบสนองที่เร็วกว่า ตัวควบคุม FOPI และ FOPID ที่ใช้เวลาเท่ากัน คือ 32.80 ms

- 3) จากค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 1-4 ที่ได้จากรายการ 4 พบว่า ค่า Response time ของทั้ง 4 ตัว จะมีค่าไม่แตกต่างกันเท่าไรช่วงเวลา 14.49 ms - 14.99 ms และ ในส่วนค่าเฉลี่ยของ % Steady - state error ของตัวควบคุม FOPI และ FOPID (FOPI = 0.26% และ FOPID = 0.18%) จะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI และ PID (PI = 3.40% และ PID = 0.66%) และจะเห็นได้ว่าตัวควบคุม PI จะมีค่าเฉลี่ย % Steady - state error มากกว่าทุกตัวควบคุมอย่างชัดเจนและประสิทธิภาพโดยรวมในการแก้ปัญหาต่ำสุดกว่าตัวควบคุมอื่น ๆ
- 4) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุลและกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส ตัวควบคุม PI มีค่า % Steady- state error สูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวควบคุมตัวอื่น ๆ
- 5) ในกรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลและกรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล ทุกตัวควบคุมมีค่า % Steady- state error ไม่แตกต่างกันมากเท่าไรและมีค่าใกล้เคียงศูนย์

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 6 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ทั้ง 4 กรณีปัญหาของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

ตาราง 6 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดจากการทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1 : Balanced voltage sag	1.61	0.71	1.60	1.20
Case 2 : Balanced voltage swell	7.14	6.55	1.52	1.20
Case 3 : Unbalanced voltage sag	0.51	0.47	0.48	1.25
Case 4 : Unbalanced voltage swell	4.68	0.48	0.49	1.23
Average	3.49	2.05	1.02	1.22

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากตาราง 6 จะเห็นได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล ตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 0.71\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 1.61\%$, $THD_{FOPI} = 1.60\%$, $THD_{FOPID} = 1.20\%$)
- 2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส ตัวควบคุม PI และ PID จะมีค่า THD สูงมาก คือ ($THD_{PI} = 7.14\%$, $THD_{PID} = 6.55\%$) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม FOPI และ FOPID คือ ($THD_{FOPI} = 1.52\%$, $THD_{FOPID} = 1.20\%$)
- 3) ในกรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลตัวควบคุม FOPID จะมีค่า $THD_{FOPID} = 1.25\%$ ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุมตัวอื่น ๆ ซึ่งมีค่า $THD_{PI} = 0.51\%$, $THD_{PID} = 0.47\%$, $THD_{FOPI} = 0.48\%$ ตามลำดับ
- 4) ในกรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลตัวควบคุม PI จะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบอื่นที่มีค่าค่อนข้างต่ำ

ซึ่งจากตาราง 6 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม PI จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม FOPI จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม FOPID จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 14.99 ms, % Steady-state error = 0.18 % และ THD = 1.22 % ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหา

คือ ตัวควบคุม PI ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 14.68 ms, %Steady-state error = 3.40 % และ THD = 3.49 % ตามลำดับ และเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 49 นาที

4.1.2 เทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

ตาราง 7 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณี

ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมจากการทดสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

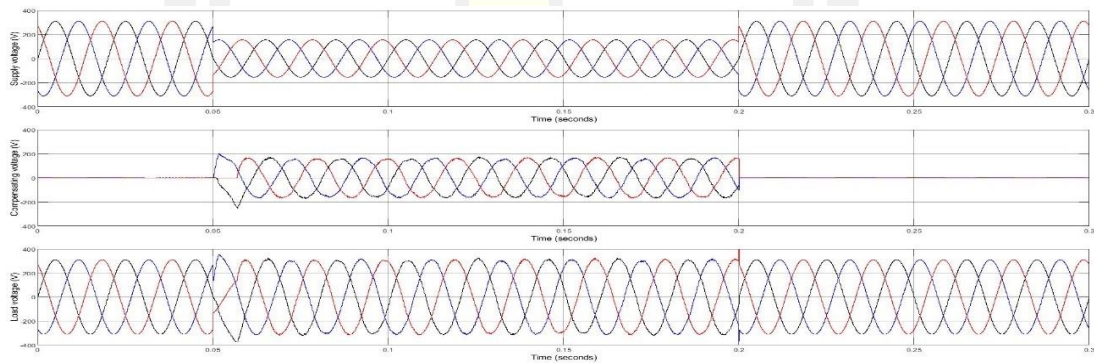
Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
PSO	PI	Case1:Balanced sag	20.7762	10.1138				0.0849	35.92
		Case2:Balanced swell	24.5325	15.4748				0.0767	35.61
		Case3:Unbalanced sag	0.4209	0.8605				0.0153	49.49
		Case4:Unbalanced swell	0.4079	0.01				0.0154	54.13
		Average						0.0481	43.79
	PID	Case1:Balanced sag	30	6.5484	11.2924			0.0849	31.62
		Case2:Balanced swell	1.5478	7.5424	5.6329			0.0766	35.83
		Case3:Unbalanced sag	29.7899	0.01	0.01			0.0117	38.68
		Case4:Unbalanced swell	30	8.9979	0.2732			0.0116	38.43
		Average						0.0462	36.14
	FOPI	Case1:Balanced sag	0.4225	2.3918		1.9393		0.0801	31.88
		Case2:Balanced swell	30	7.4315		0.551		0.0767	31.66
		Case3:Unbalanced sag	0.4334	4.1989		1.8411		0.0153	48.82
		Case4:Unbalanced swell	0.4272	5.4172		1.9761		0.0154	50.57
		Average						0.0469	40.73
	FOPID	Case1:Balanced sag	30	16.2337	0.01	0.7156	0.986	0.0791	31.52
		Case2:Balanced swell	25.14	17.7122	0.1	1.2277	0.25	0.0762	31.43

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
		Case3:Unbalanced sag	29.986	28.2438	1.3659	0.1	0.9953	0.0108	49.78
		Case4:Unbalanced swell	18.6788	24.5019	0.01	0.1001	0.9979	0.0107	50.93
		Average						0.0442	40.92

โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุมได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบ 75 ถึง 122

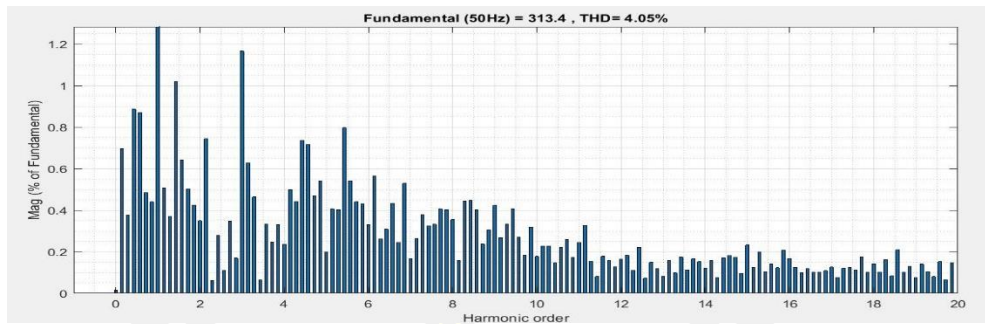
กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags)

a) ตัวควบคุม PI

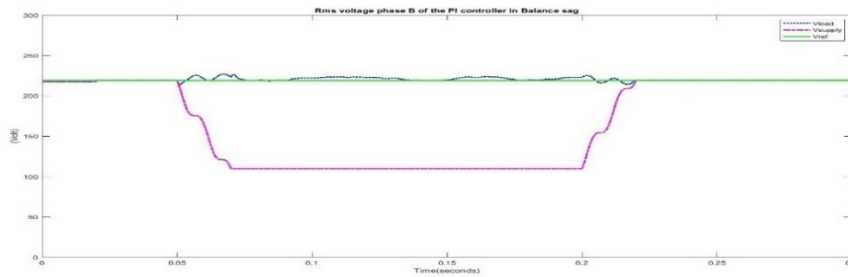


ภาพประกอบ 75 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

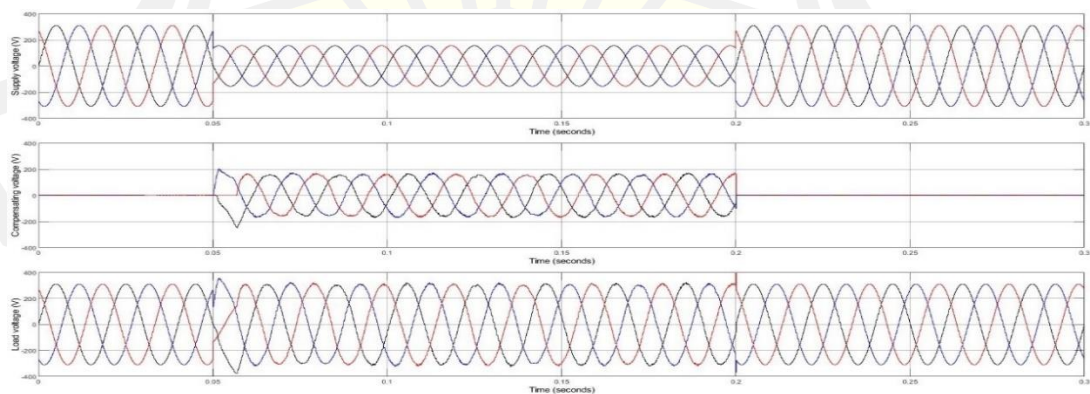


ภาพประกอบ 76 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

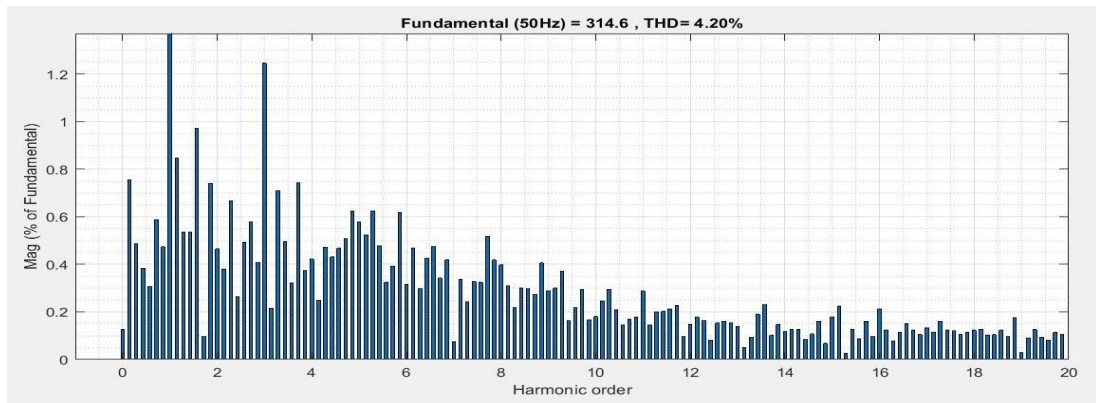


ภาพประกอบ 77 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

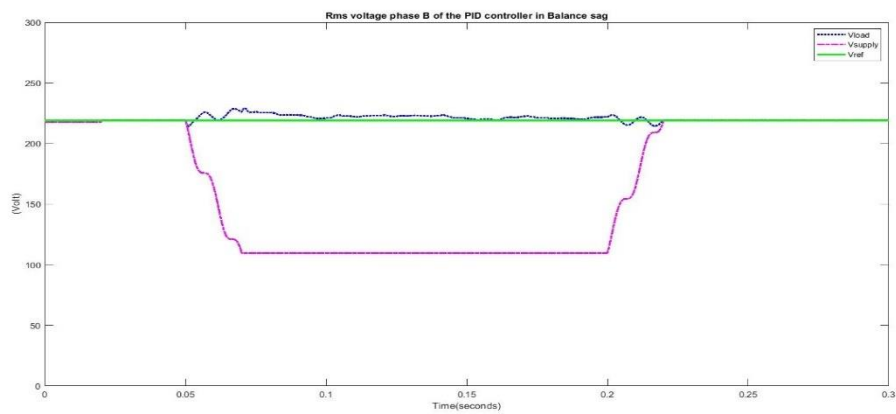
b) ตัวควบคุม PID



ภาพประกอบ 78 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



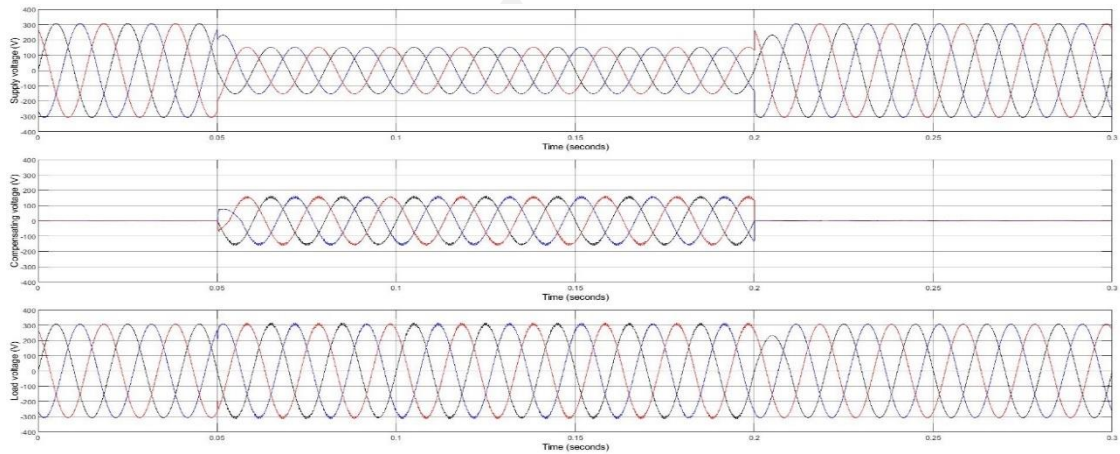
ภาพประกอบ 79 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



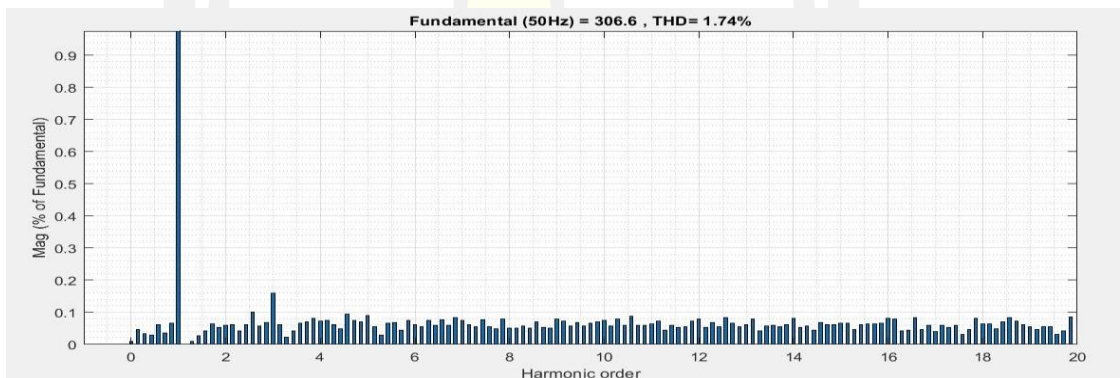
ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

c) ตัวควบคุม FOPI

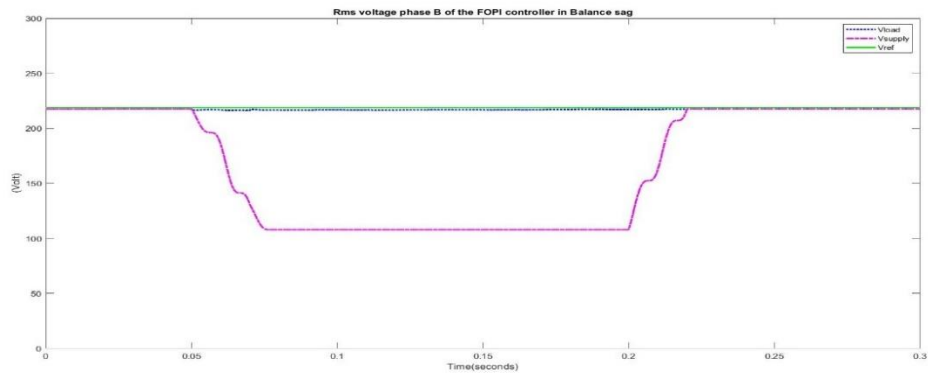


ภาพประกอบ 81 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



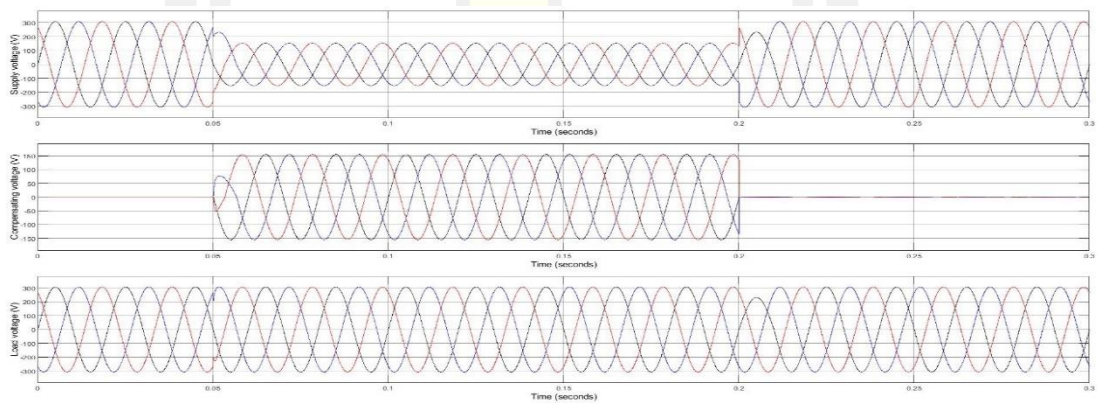
ภาพประกอบ 82 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

พหุ ประถม วิชา



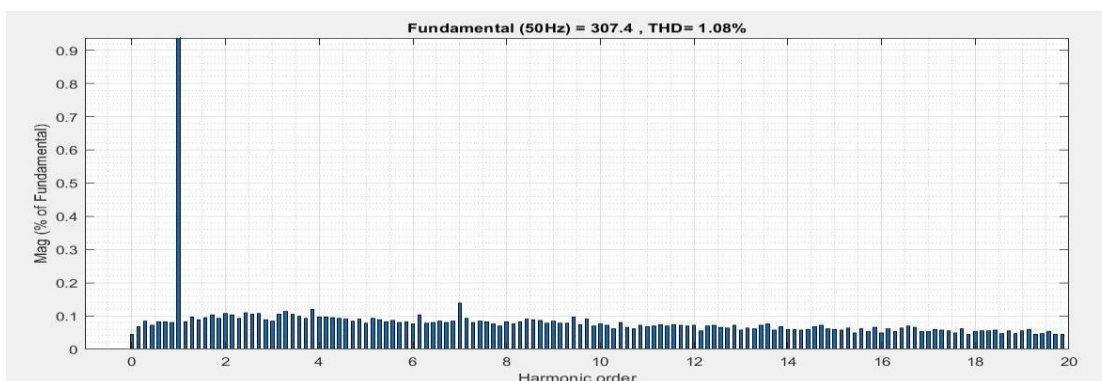
ภาพประกอบ 83 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

d) ตัวควบคุม FOPID

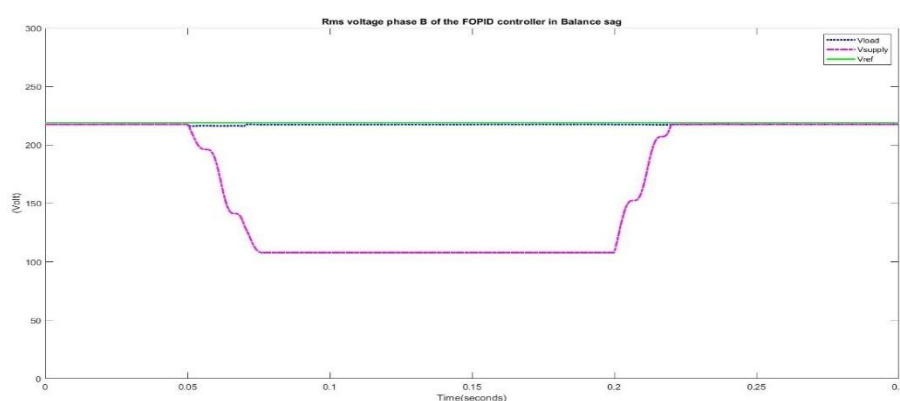


ภาพประกอบ 84 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 85 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

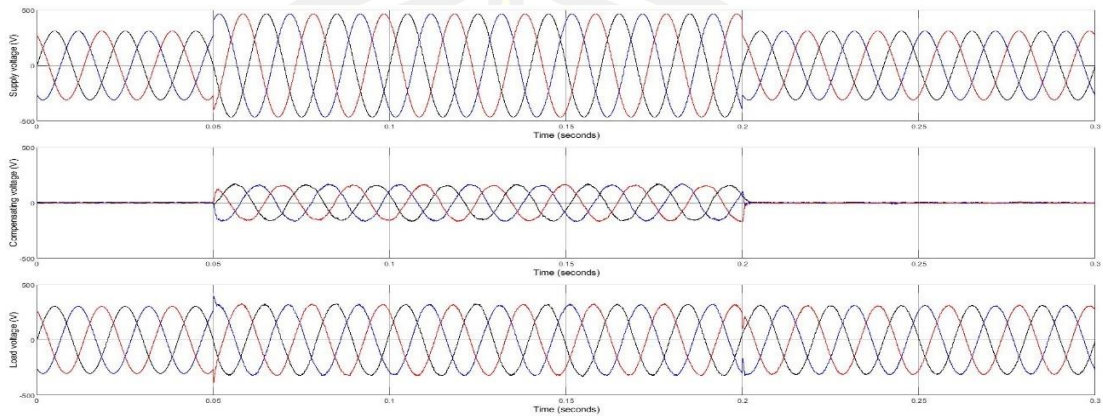


ภาพประกอบ 86 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

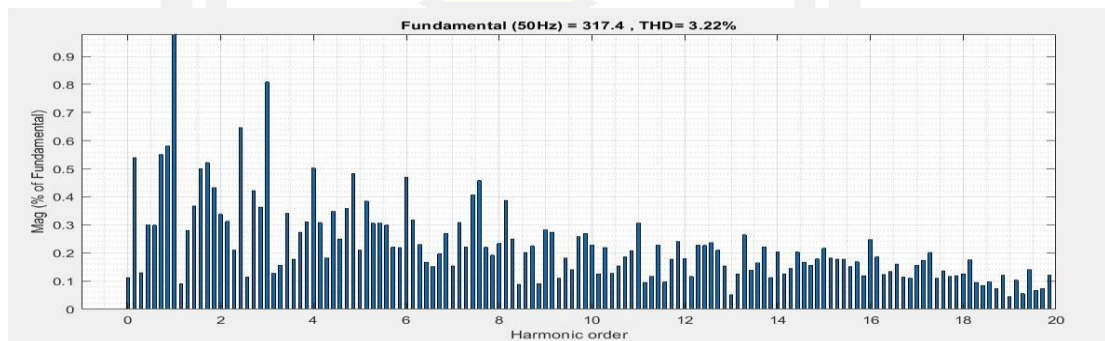
กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C ลดลงเท่ากับ 50% จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ทั้ง 4 ควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID สามารถชดเชยแรงดันตกแบบสมดุลทั้งสามเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ให้ใกล้เคียงกับแรงดันพิกัดอยู่ในระดับพิกัดที่ไม่มีผลกระทบต่อโวลต์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน Computer and Business Equipment Manufacturers Association หรือ CBMEMA curve [48] และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8% ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced voltage swells)

a) ตัวควบคุม PI

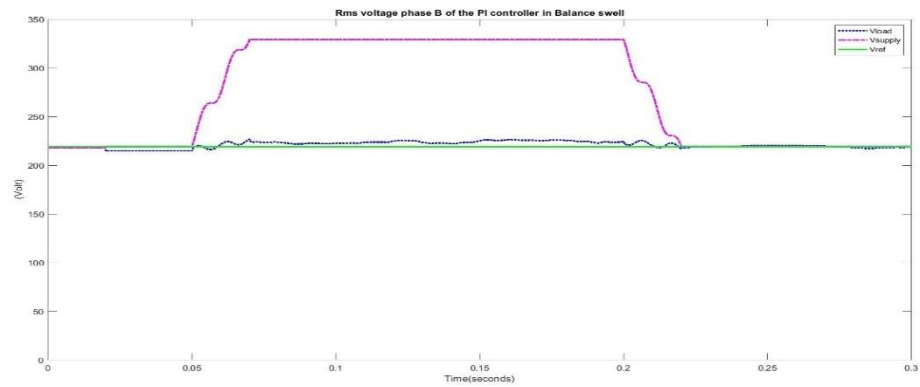


ภาพประกอบ 87 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



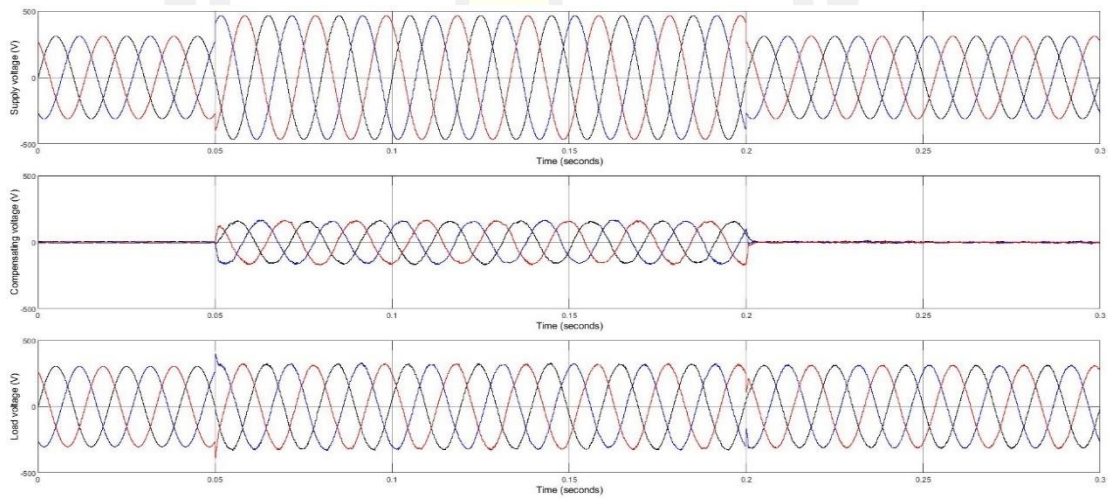
ภาพประกอบ 88 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

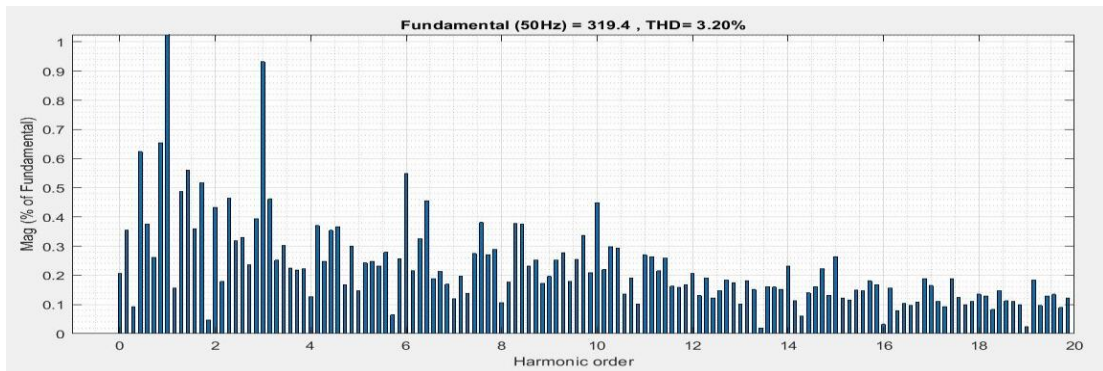


ภาพประกอบ 89 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

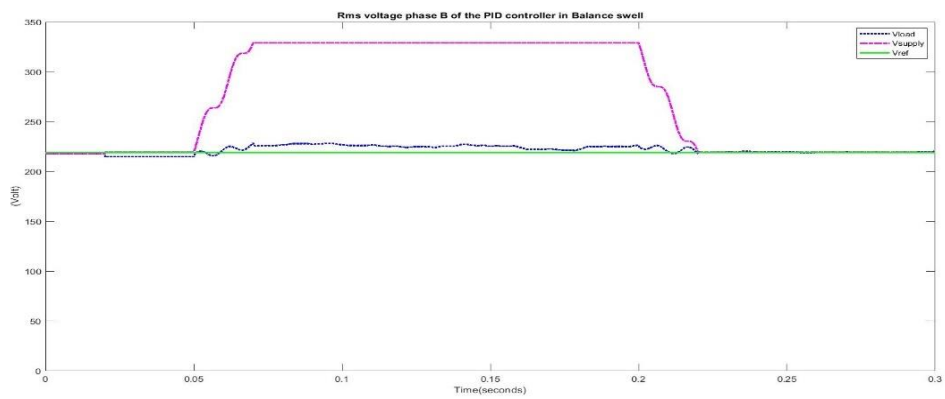
b) ตัวควบคุม PID



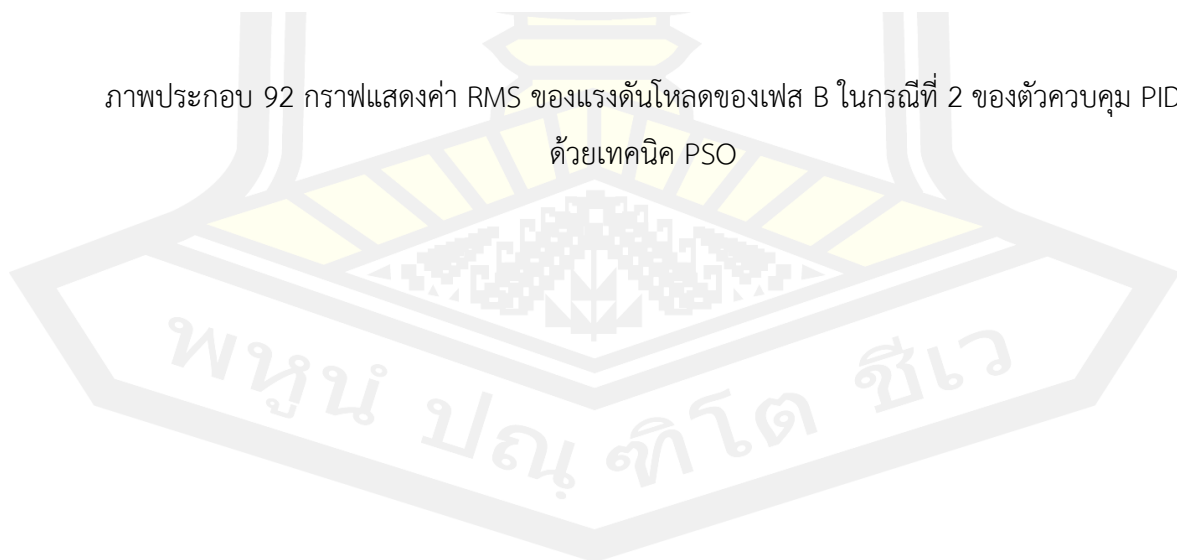
ภาพประกอบ 90 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



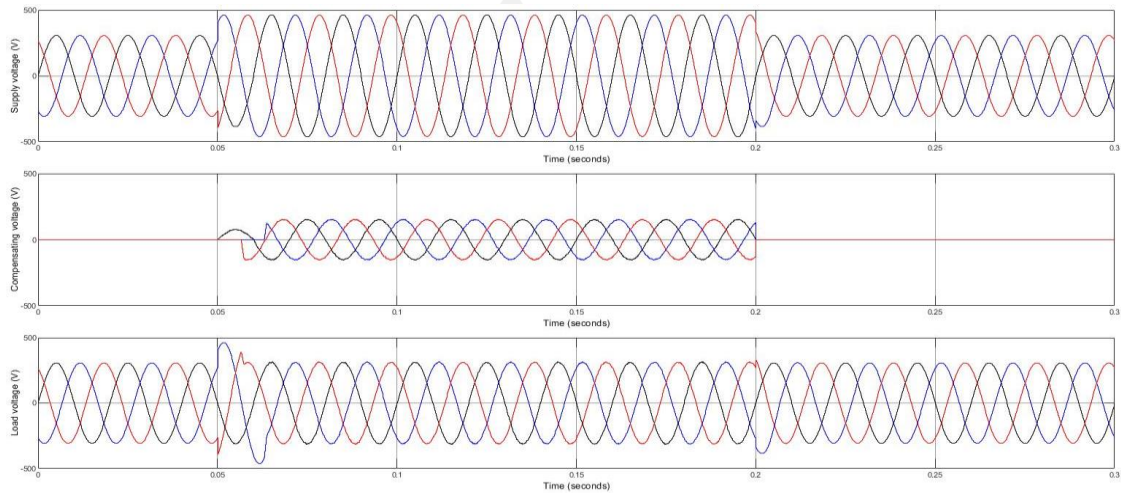
ภาพประกอบ 91 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหนดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



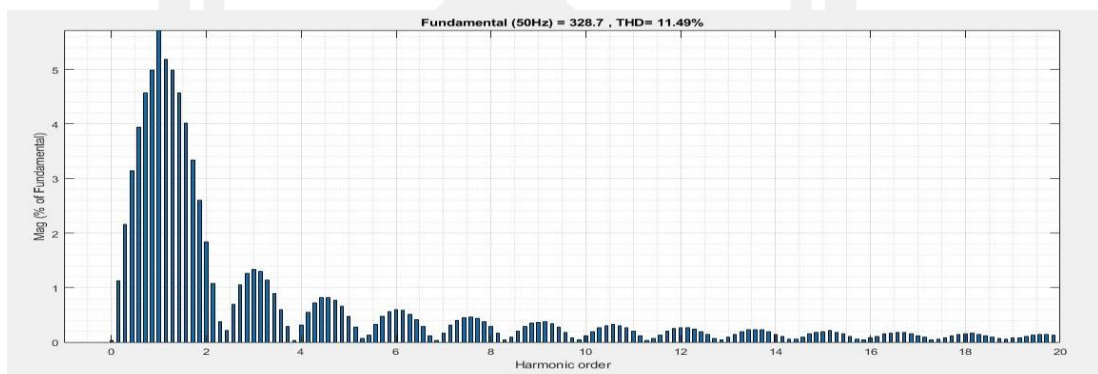
ภาพประกอบ 92 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหนดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



c) ตัวควบคุม FOPI

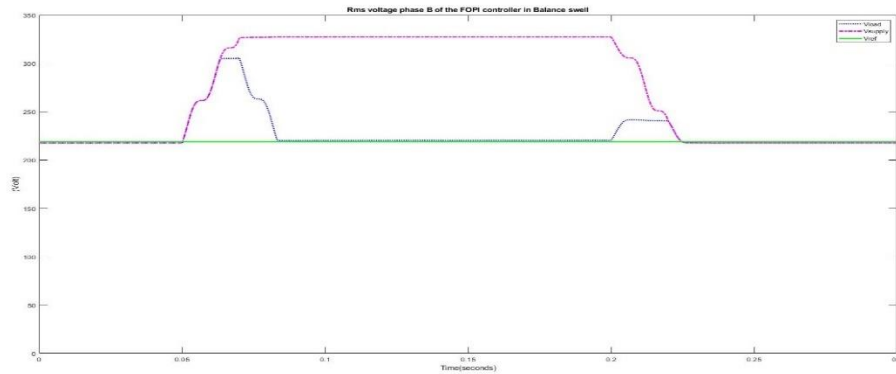


ภาพประกอบ 93 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



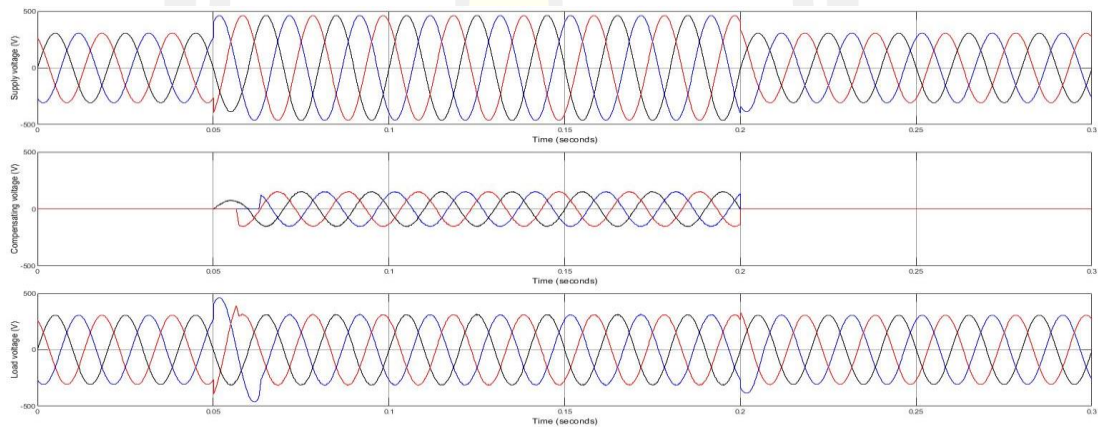
ภาพประกอบ 94 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



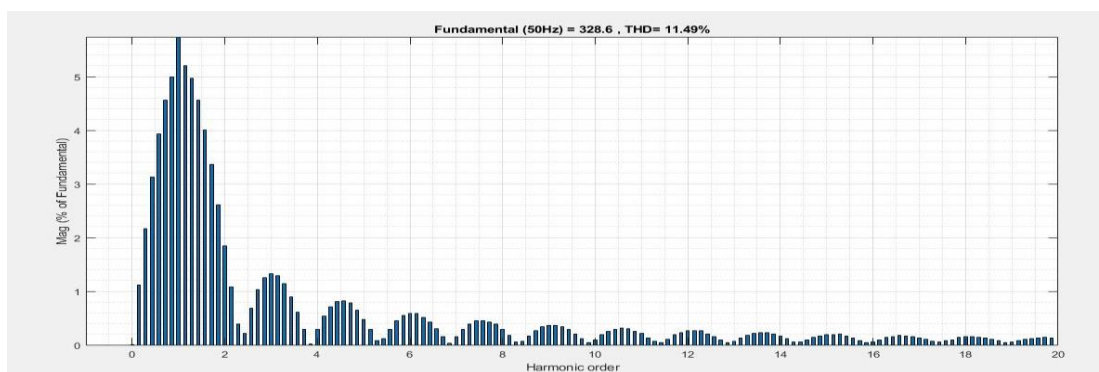
ภาพประกอบ 95 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

d) ตัวควบคุม FOPID

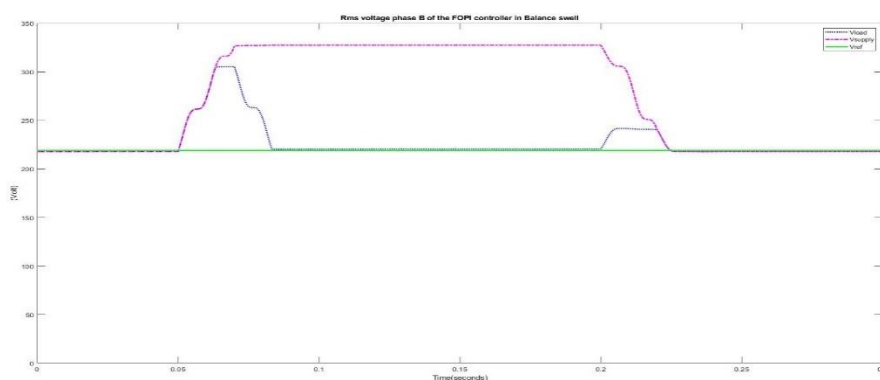


ภาพประกอบ 96 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 97 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

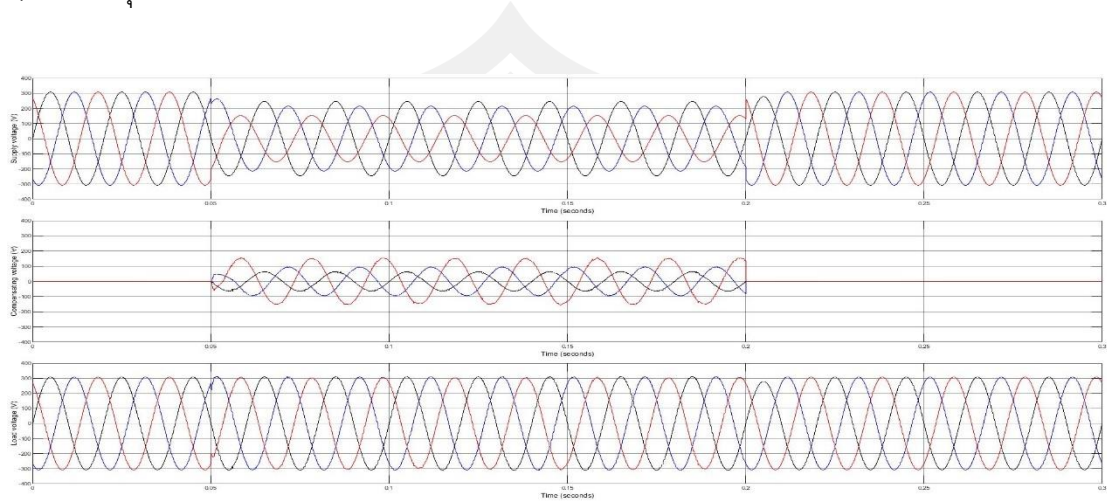


ภาพประกอบ 98 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

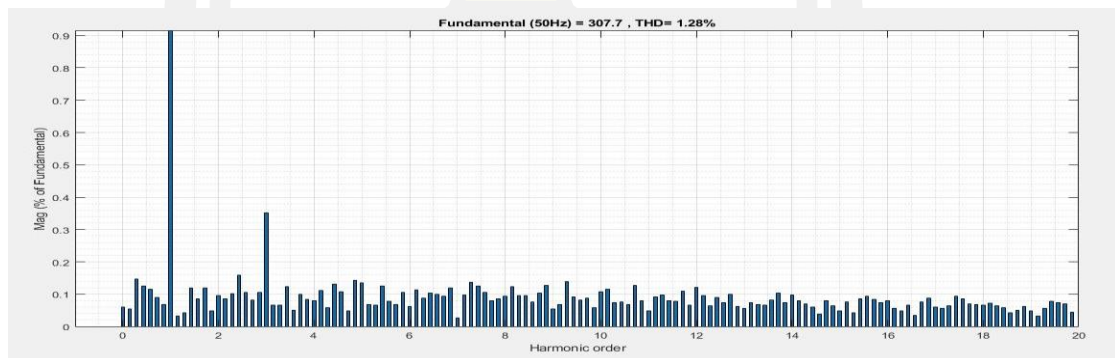
กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced voltage swell) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C เพิ่มขึ้นเท่ากับ 150 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ตัวควบคุม PID ในภาพประกอบ 4.66 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 9.17 V หรือประมาณ 4.17 % และทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 0 - 1.68 Cycle (0-33.60 ms) ซึ่งเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48]. และพบว่าตัวควบคุม FOPI และ FOPID ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) หลังการชดเชยเกินกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6] โดยมีค่าเท่ากัน คือ $THD_{FOPI} = THD_{FOPID} = 11.49 \%$

กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags)

a) ตัวควบคุม PI

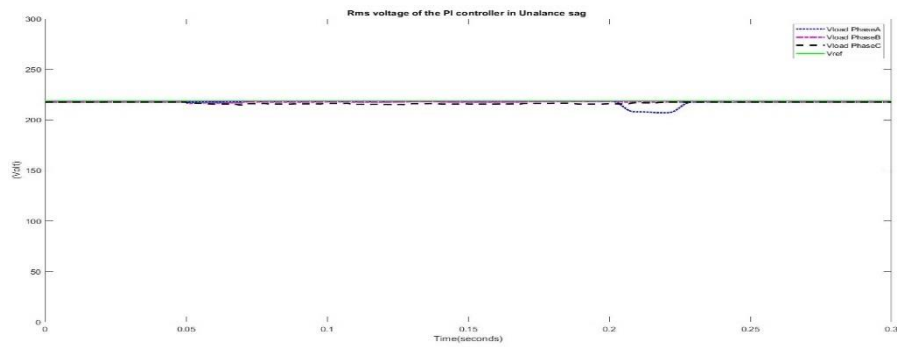


ภาพประกอบ 99 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



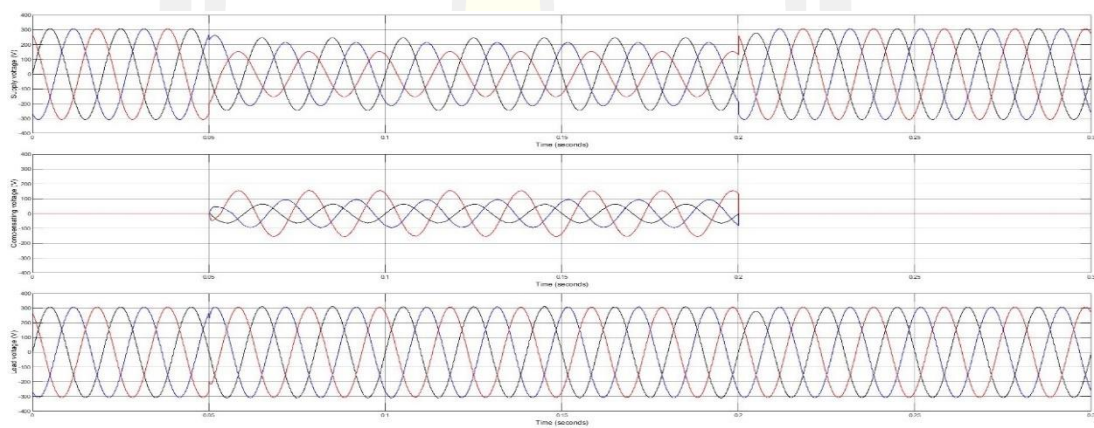
ภาพประกอบ 100 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



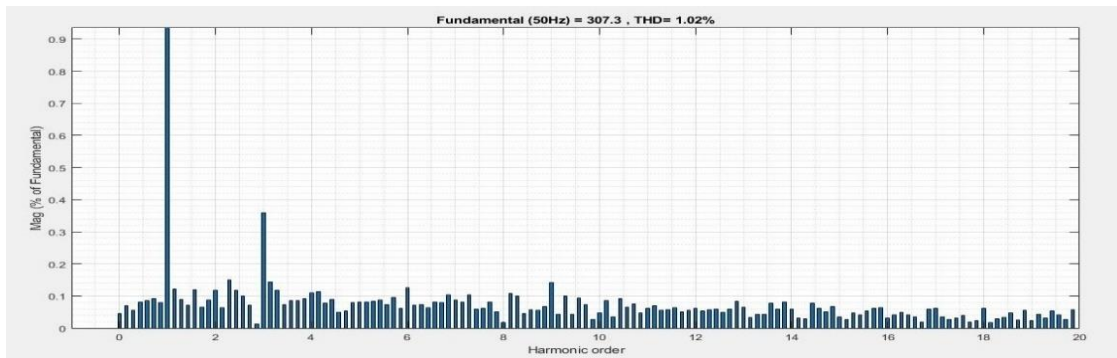
ภาพประกอบ 101 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

b) ตัวควบคุม PID

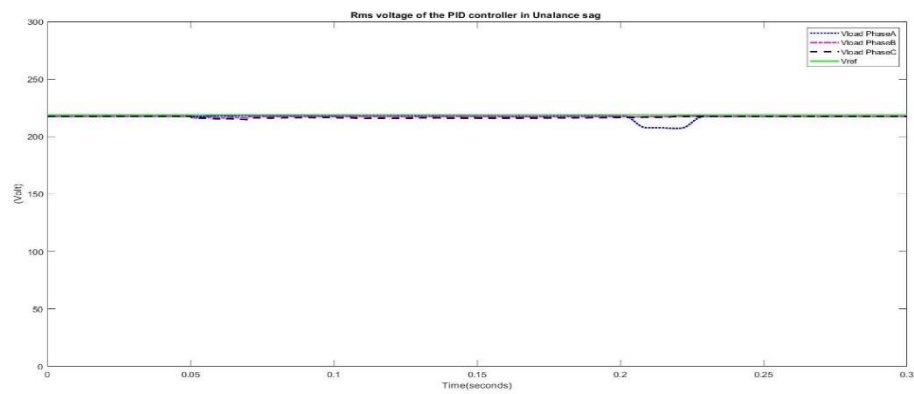


ภาพประกอบ 102 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

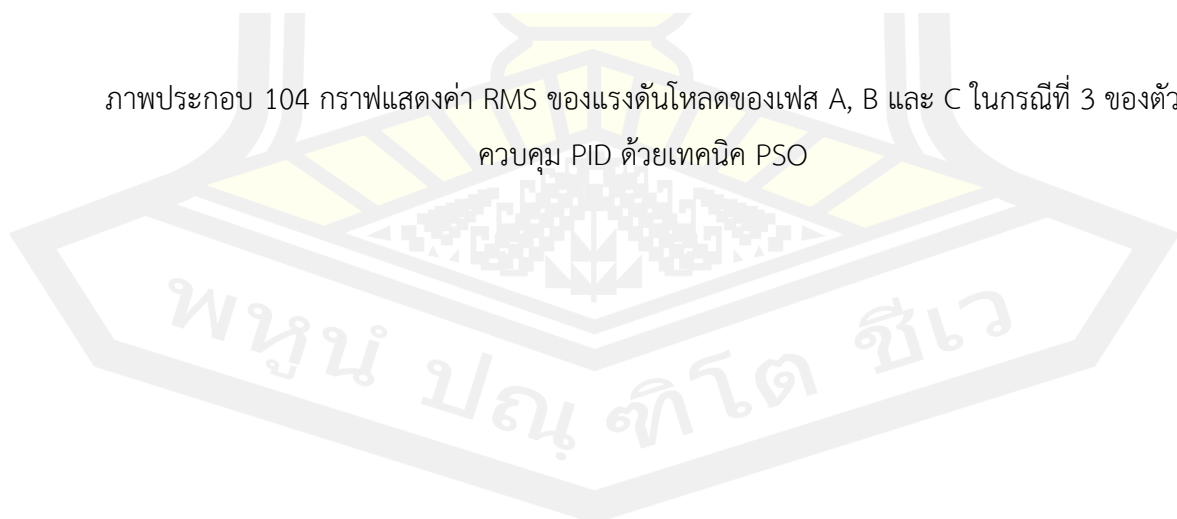
พหุบัณฑิต ชีวะ



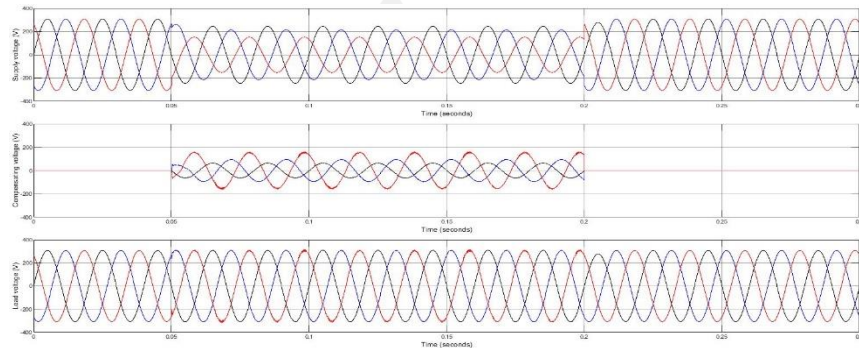
ภาพประกอบ 103 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



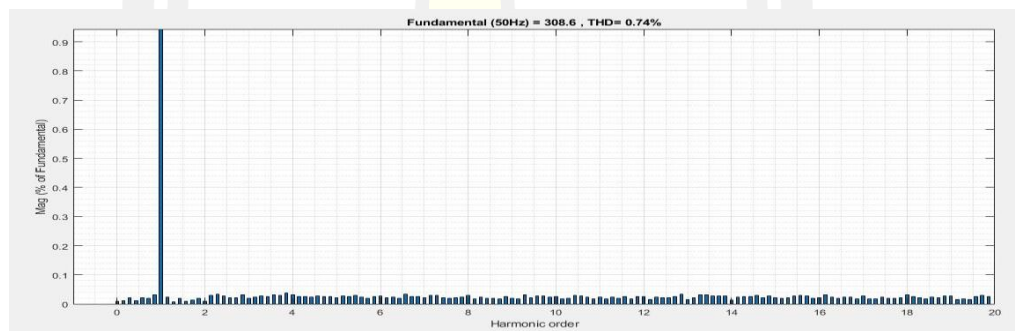
ภาพประกอบ 104 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



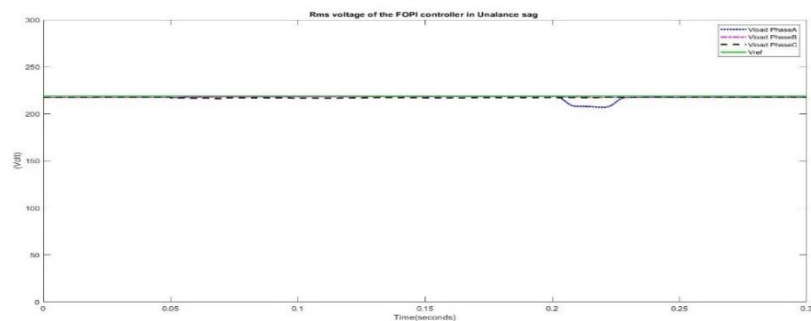
c) ตัวควบคุม FOPI



ภาพประกอบ 105 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

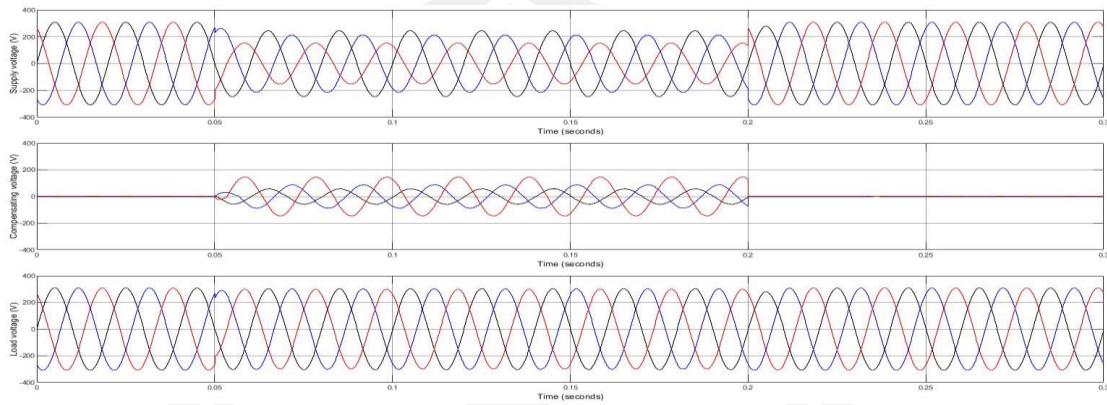


ภาพประกอบ 106 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

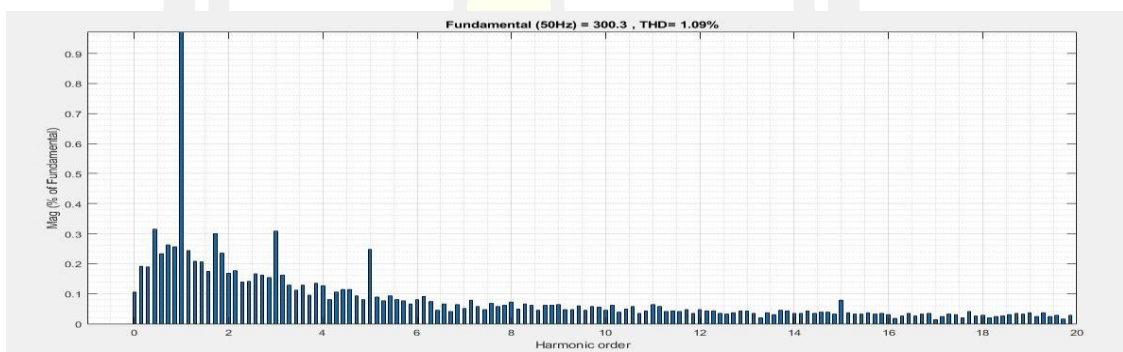


ภาพประกอบ 107 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

d) ตัวควบคุม FOPID

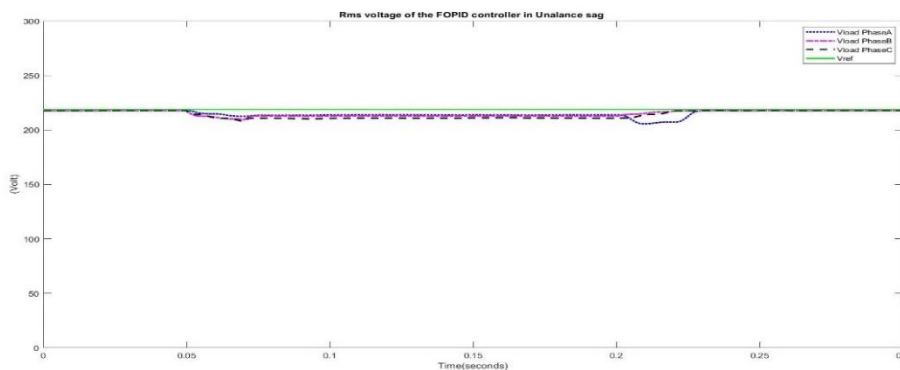


ภาพประกอบ 108 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



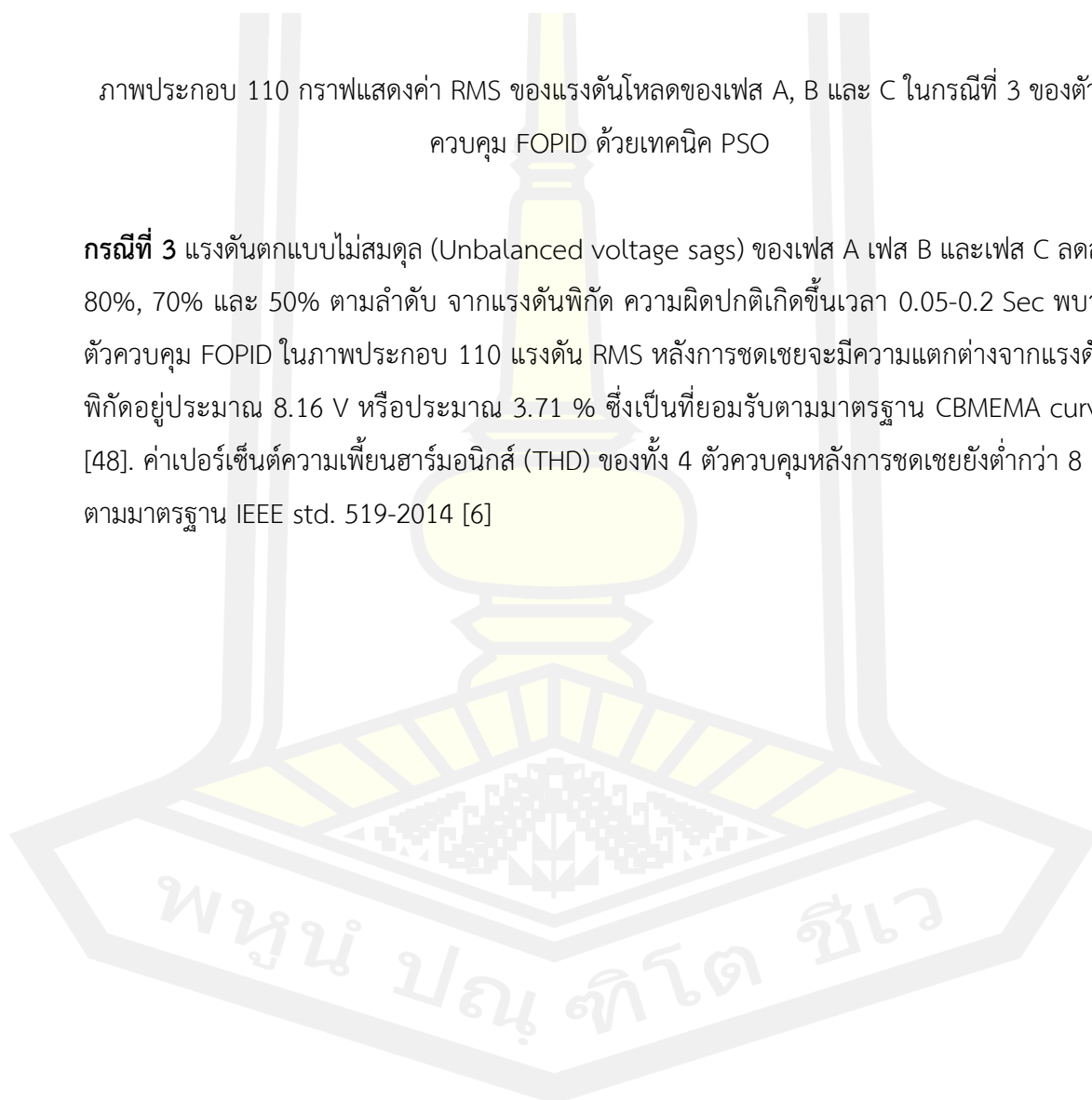
ภาพประกอบ 109 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

พหุ ประถม วิชา



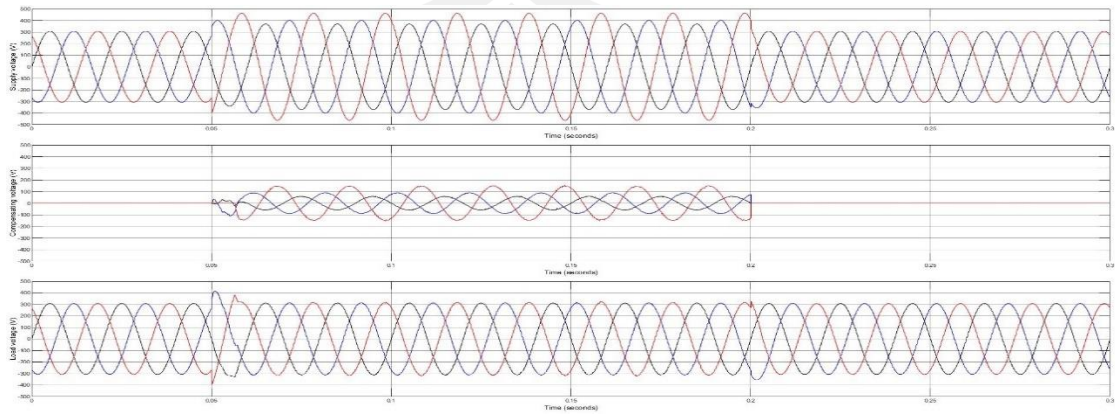
ภาพประกอบ 110 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags) ของเฟส A เฟส B และเฟส C ลดลง 80%, 70% และ 50% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่าตัวควบคุม FOPID ในภาพประกอบ 110 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 8.16 V หรือประมาณ 3.71 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48]. ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

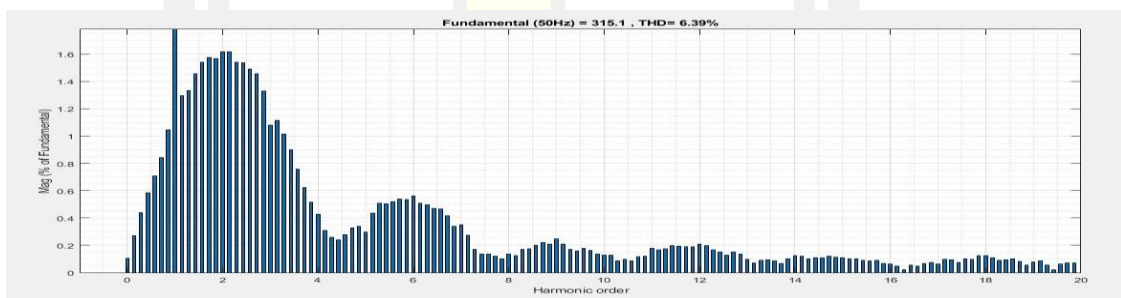


กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells)

a) ตัวควบคุม PI

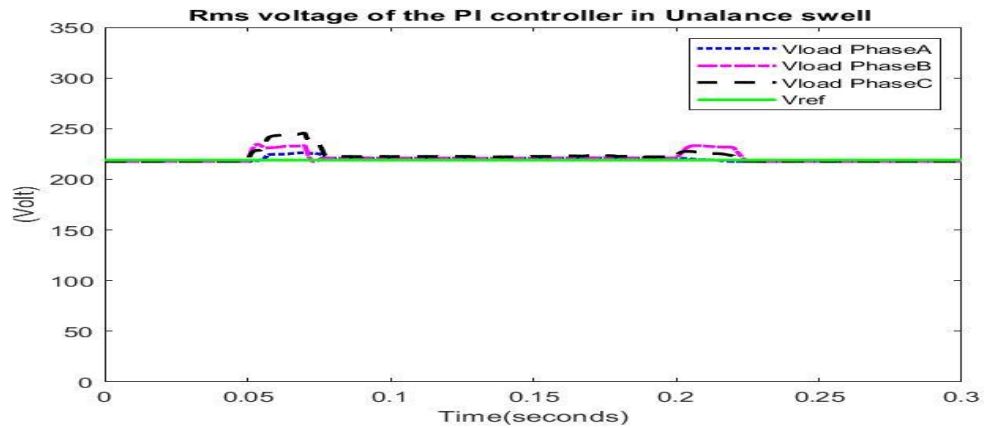


ภาพประกอบ 111 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



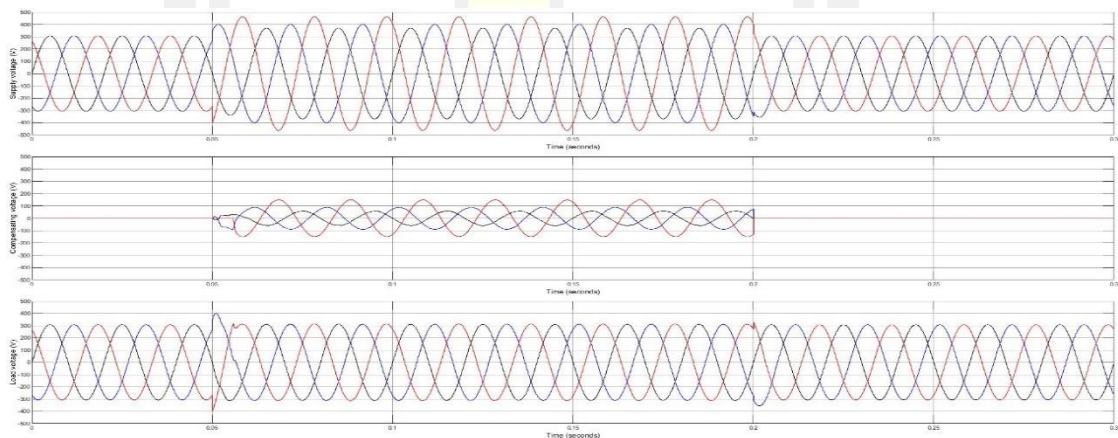
ภาพประกอบ 112 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

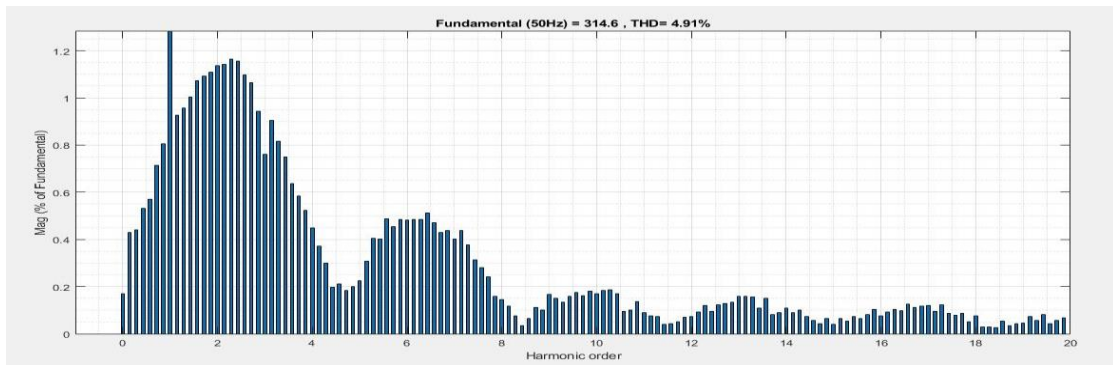


ภาพประกอบ 113 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

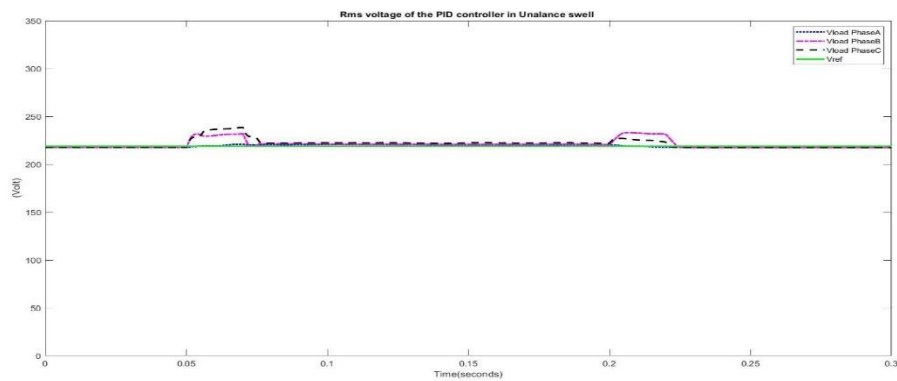
b) ตัวควบคุม PID



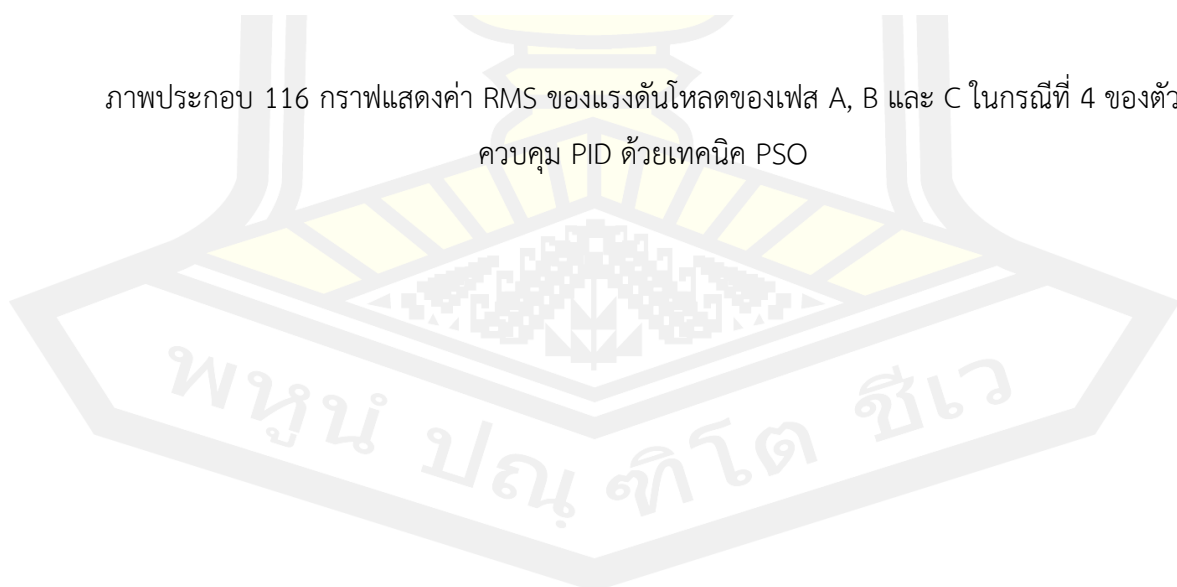
ภาพประกอบ 114 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



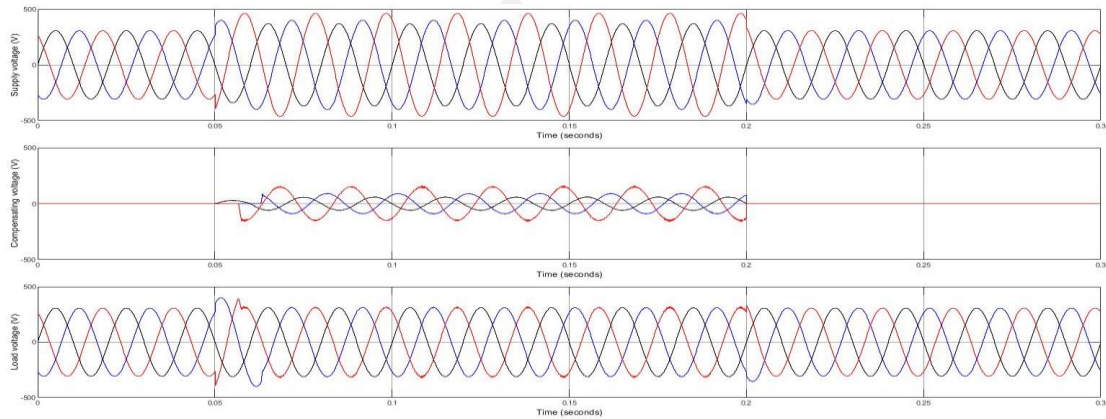
ภาพประกอบ 115 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



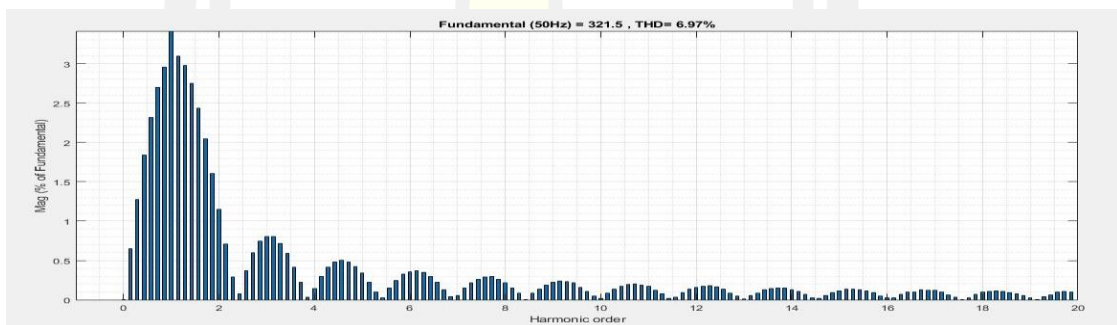
ภาพประกอบ 116 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



c) ตัวควบคุม FOPI

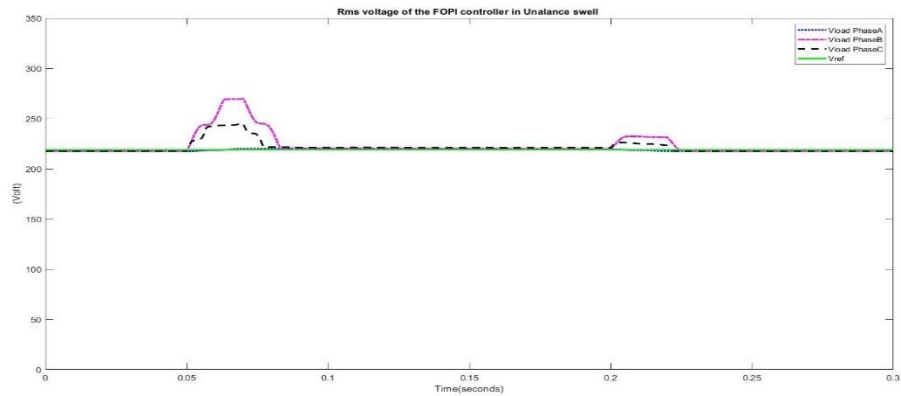


ภาพประกอบ 117 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



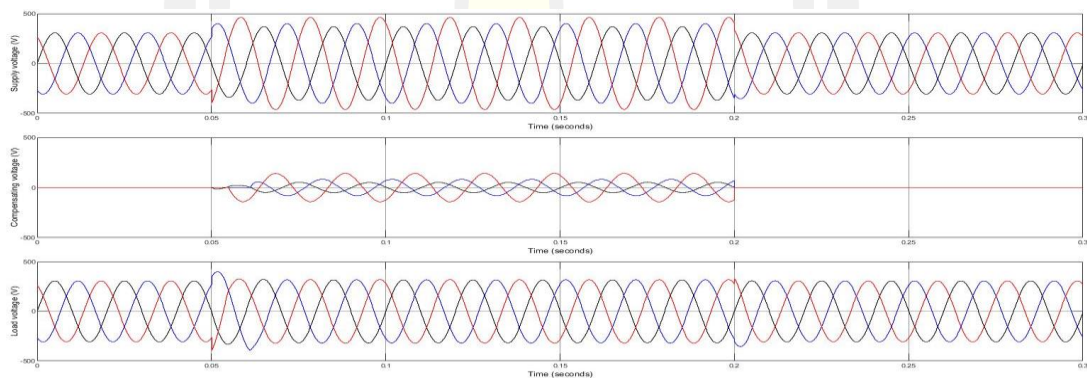
ภาพประกอบ 118 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



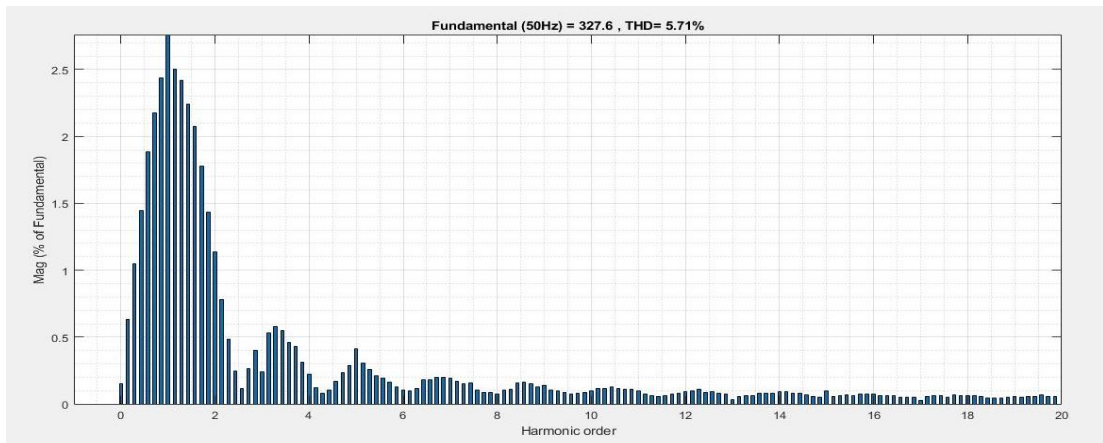
ภาพประกอบ 119 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

d) ตัวควบคุม FOPID

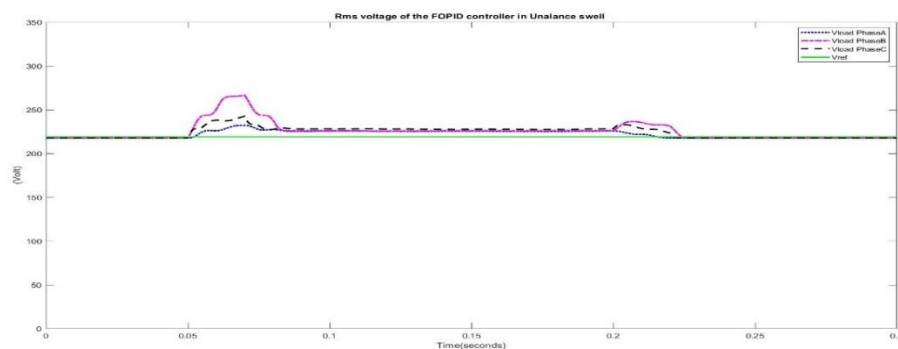


ภาพประกอบ 120 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 121 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 122 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells) ของเฟส A เฟส B และเฟส C เพิ่มขึ้น 120%, 130% และ 150% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลอง พบว่า ทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ที่โวลต์ให้เข้าสู่ในช่วงสภาวะปกติประมาณ 1.34 - 1.64 Cycle หรือ 26.75 - 32.86 ms และค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันที่โวลต์และแรงดันพิกัดหลังการชดเชยนั้น ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐาน CBMEMA curve [48] ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 7 ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุม ที่ได้จากเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี พบว่า ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย ITAE ต่ำที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0481
- 2) ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0462
- 3) ตัวควบคุม FOPI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0469
- 4) ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0442

ตาราง 8 แสดงค่าการเปรียบเทียบ Response time และ %Steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 8 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Balanced voltage sag	3.36	2.09	3.09	1.94	Nearly promptly	0.97	20.30	0.67
Case 2: Balanced voltage swell	Nearly promptly	2.90	Nearly promptly	4.17	33.34	~ 0	33.60	~ 0
Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	1.68	Nearly promptly	1.45	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	3.71
Case 4: Unbalanced voltage swell	27.15	1.86	26.75	1.60	32.86	~ 0	32.39	3.97
Average	7.63	2.13	7.46	2.29	16.55	0.24	21.57	2.09

จากตาราง 8 ในการวิเคราะห์ Response time และ วิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุลง พบว่า ตัวควบคุม FOPI จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม FOPID มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลงทั้งสามเฟส พบว่า ตัวควบคุม PI และ PID จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม FOPI และ FOPID มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 3) กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลง พบว่า ทุกตัวควบคุมจะเกิด Response time น้อยมากหรือมีการตอบสนองอย่างทันทีทันใด ส่วนตัวควบคุม FOPI จะมีค่า % Steady- state error ต่ำที่สุด
- 4) กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลงนั้น พบว่า ตัวควบคุม PID มี Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม FOPI มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 5) จากค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 1-4 ที่ได้จากตาราง 8 พบว่า ค่า Response time ตัวควบคุม PID และ PI จะมีค่าต่ำสุดใกล้เคียงกันระหว่าง 7.46 ms - 7.63 ms และในส่วนค่าเฉลี่ยของ % Steady - state error ของตัวควบคุม FOPI (FOPI = 0.24%) จะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI, PID และ FOPID (PI = 2.13 % , PID = 2.29 % และ FOPID = 2.09 %)

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 9 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ทั้ง 4 กรณีปัญหา ของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 9 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดจากการทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1 : Balanced voltage sag	4.05	4.20	1.74	1.08
Case 2 : Balanced voltage swell	3.22	3.20	11.49	11.49
Case 3 : Unbalanced voltage sag	1.28	1.02	0.74	1.09
Case 4 : Unbalanced voltage swell	6.39	4.91	6.97	5.71
Average	3.74	3.33	5.24	4.84

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากตาราง 9 จะเห็นได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล ตัวควบคุม FOPID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{FOPID} = 1.08\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 4.05\%$, $THD_{PID} = 4.20\%$, $THD_{FOPI} = 1.74\%$)
- 2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส ตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 3.20\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 3.32\%$, $THD_{FOPI} = THD_{FOPID} = 11.49\%$)
- 3) ในกรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลตัวควบคุม PI จะมีค่า $THD_{PI} = 1.28\%$ ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุมตัวอื่น ๆ ซึ่งมีค่า $THD_{PID} = 1.02\%$, $THD_{FOPI} = 0.74\%$, $THD_{FOPID} = 1.09\%$ ตามลำดับ
- 4) ในกรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลตัวควบคุม FOPI จะมีค่า $THD_{FOPI} = 6.97\%$ ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุมตัวอื่น ๆ ซึ่งมีค่า $THD_{PI} = 6.39\%$, $THD_{PID} = 4.91\%$, $THD_{FOPID} = 5.71\%$ ตามลำดับ

ซึ่งจากตาราง 9 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม FOPI จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม PID จะมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 7.46 ms, ค่าเฉลี่ย %

Steady-state error = 2.29 % และ ค่าเฉลี่ยTHD = 3.33 % ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหา คือ ตัวควบคุม FOPID ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time =21.57 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 2.09 % และค่า THD = 4.84 % ตามลำดับ และเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 40 นาที

4.1.3 เทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

ตาราง 10 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณี



ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
TLBO	PI	Case1:Balanced sag	0.0952	0.1209				0.0771	66.68
		Case2:Balanced swell	0.2166	0.1506				0.0693	71.83
		Case3:Unbalanced sag	0.3996	0.3928				0.0153	98.77
		Case4:Unbalanced swell	0.4144	0.0836				0.0154	100.21
		Average						0.0443	84.37
	PID	Case1:Balanced sag	0.01	0.6517	0.4344			0.0829	67.72
		Case2:Balanced swell	0.3802	0.01	0.01			0.0762	70.82
		Case3:Unbalanced sag	30	13.3619	3.25			0.0115	99.64
		Case4:Unbalanced swell	30	27.5657	0.01			0.0114	100.92
		Average						0.0455	84.78
	FOPI	Case1:Balanced sag	0.1899	0.6886		1.6269		0.0781	62.00
		Case2:Balanced swell	0.2373	0.9308		1.6588		0.0715	52.00
		Case3:Unbalanced sag	0.4338	0.282		0.1215		0.0153	99.99
		Case4:Unbalanced swell	0.445	0.394		0.1		0.0154	92.73
		Average						0.0451	76.68
	FOPID	Case1:Balanced sag	9.4388	3.3101	0.01	0.4364	0.8287	0.0821	61.30

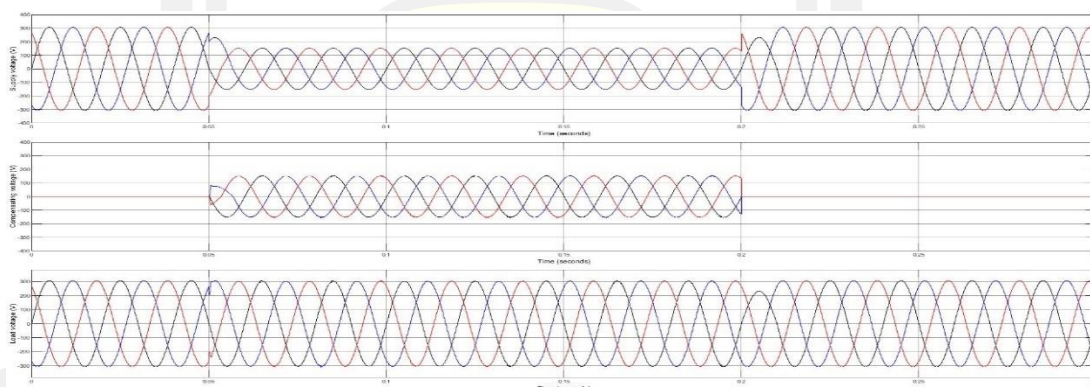
ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) (ต่อ)

Optimization techniques Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
		Kp	Ki	Kd	λ	μ		
	Case2:Balanced swell	30	27.8029	0.01	0.9052	0.9903	0.0707	59.21
	Case3:Unbalanced sag	0.2627	0.3723	0.0603	0.1349	0.1	0.0153	99.27
	Case4:Unbalanced swell	0.4162	0.2403	0.01	0.2471	0.146	0.0154	97.49
Average							0.0459	79.32

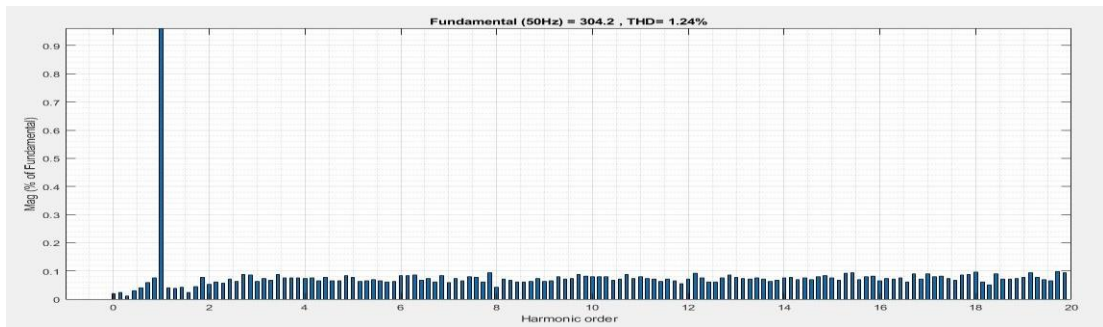
โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบ 97 ถึง 170

กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced voltage sags)

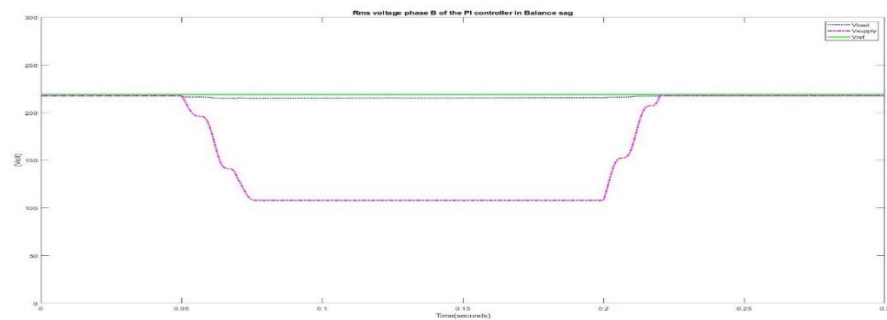
a) ตัวควบคุม PI



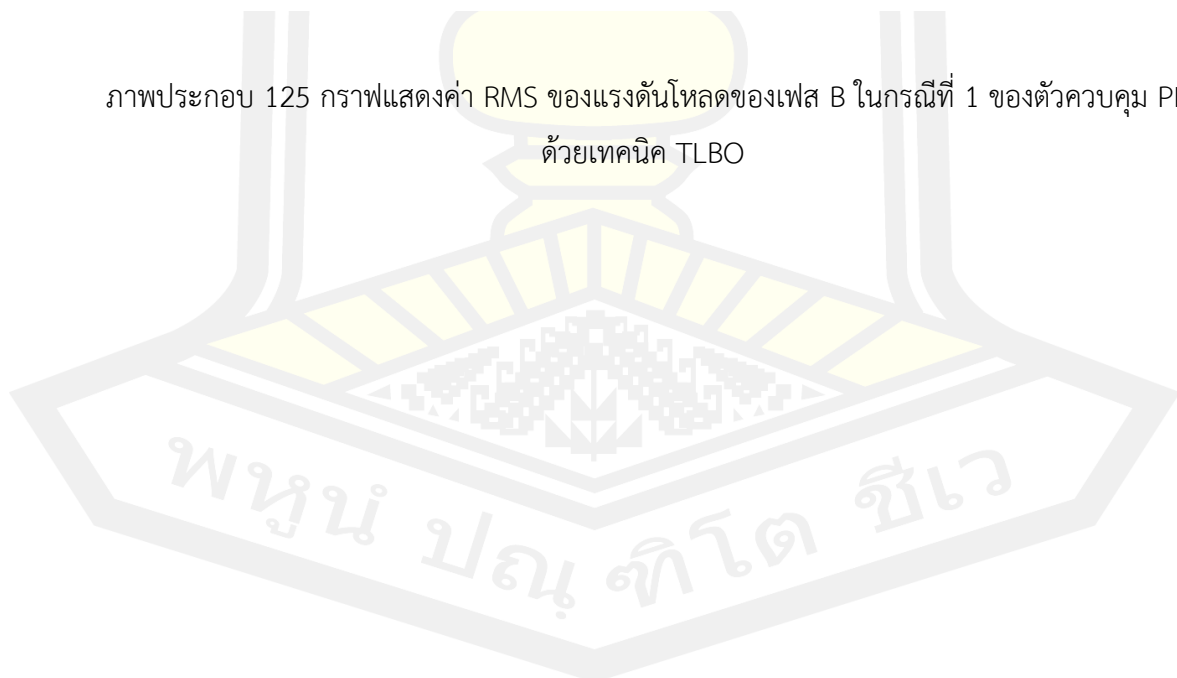
ภาพประกอบ 123 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



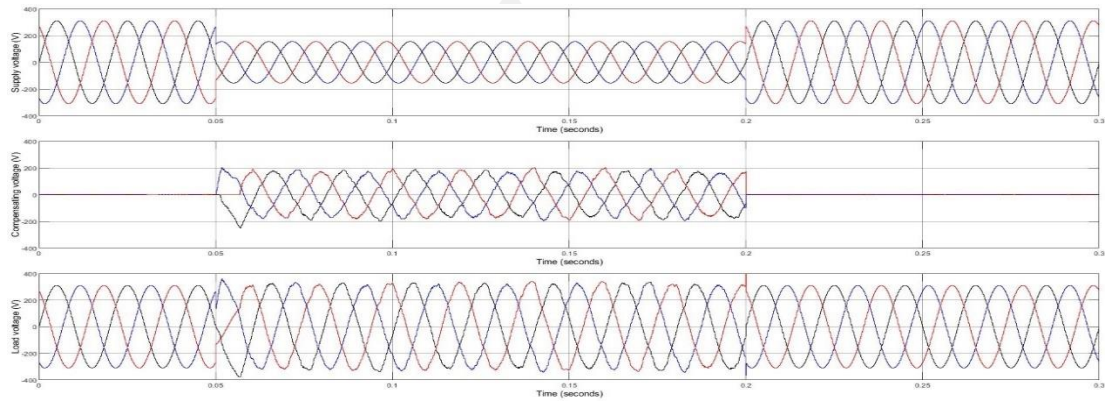
ภาพประกอบ 124 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



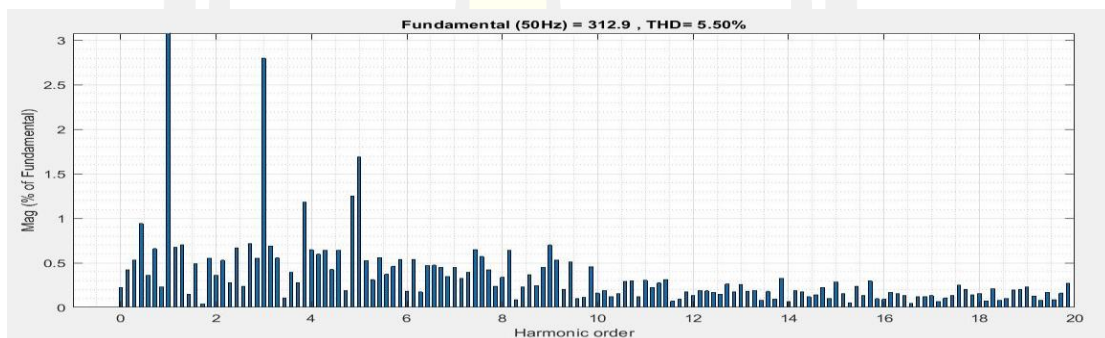
ภาพประกอบ 125 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



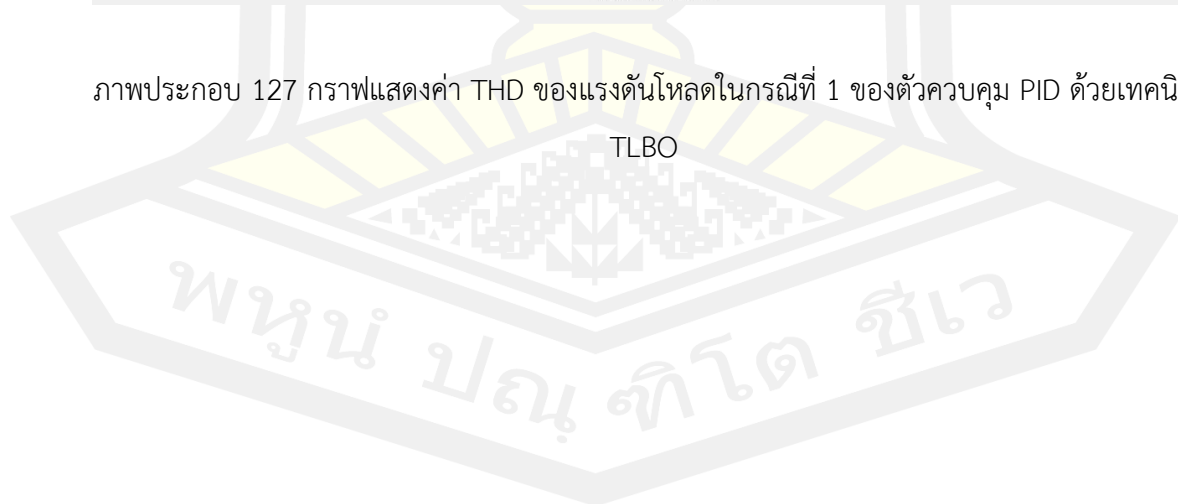
b) ตัวควบคุม PID

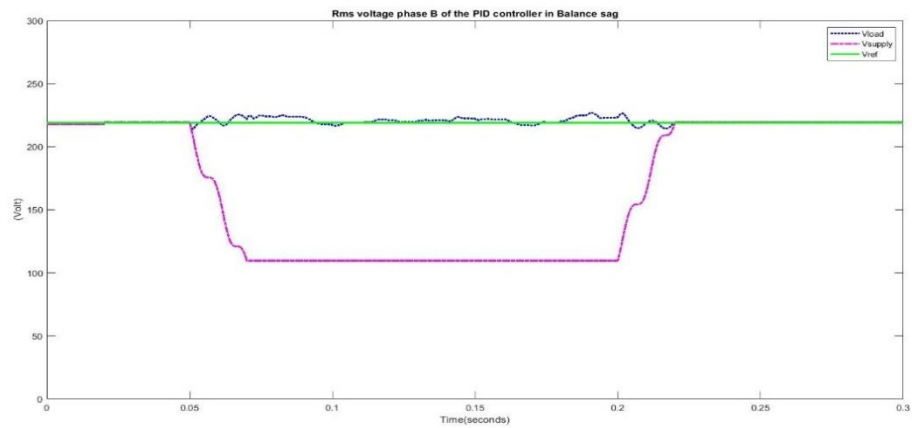


ภาพประกอบ 126 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



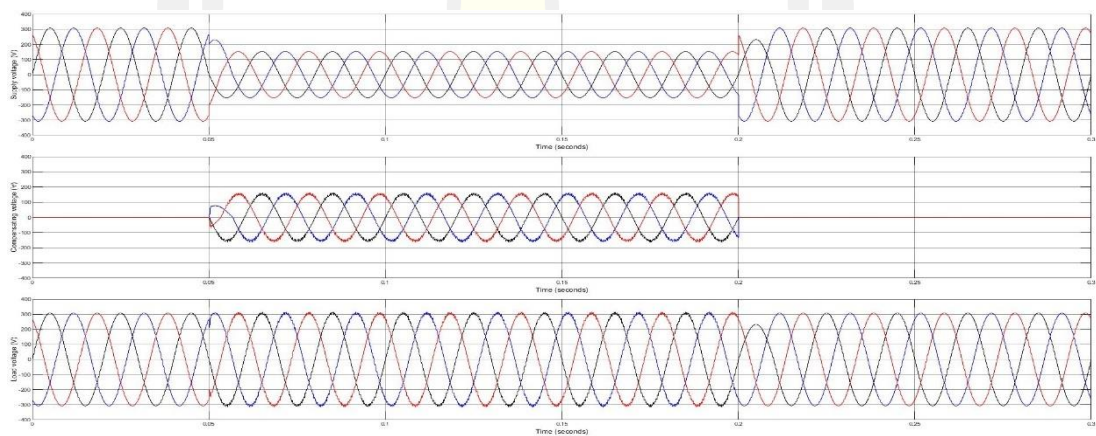
ภาพประกอบ 127 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



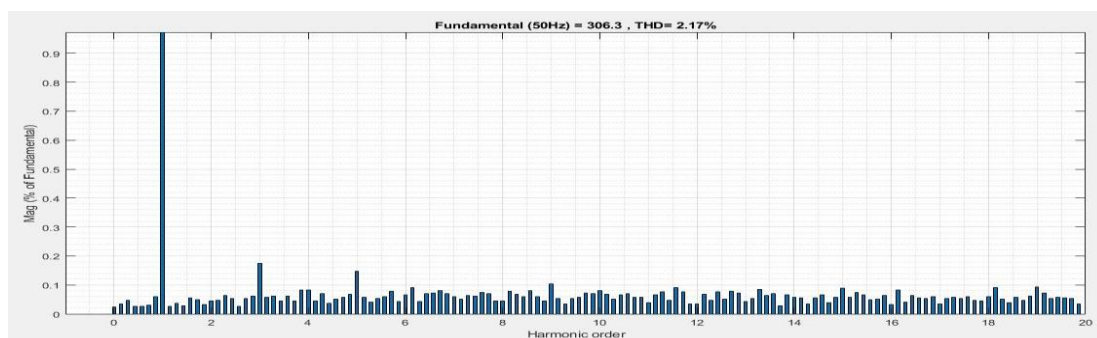


ภาพประกอบ 128 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO

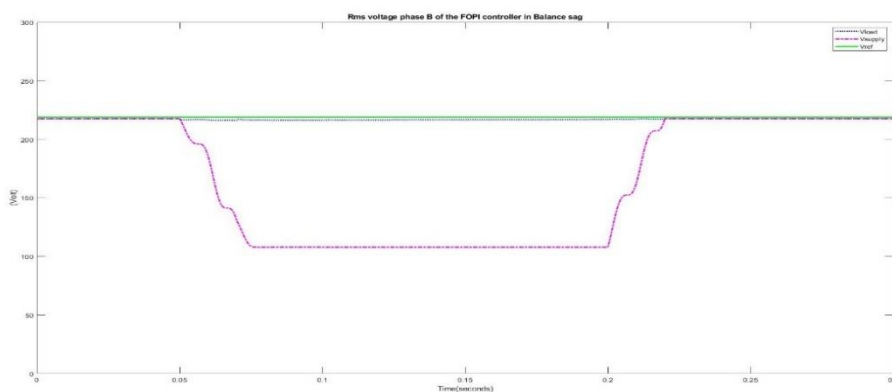
c) ตัวควบคุม FOPI



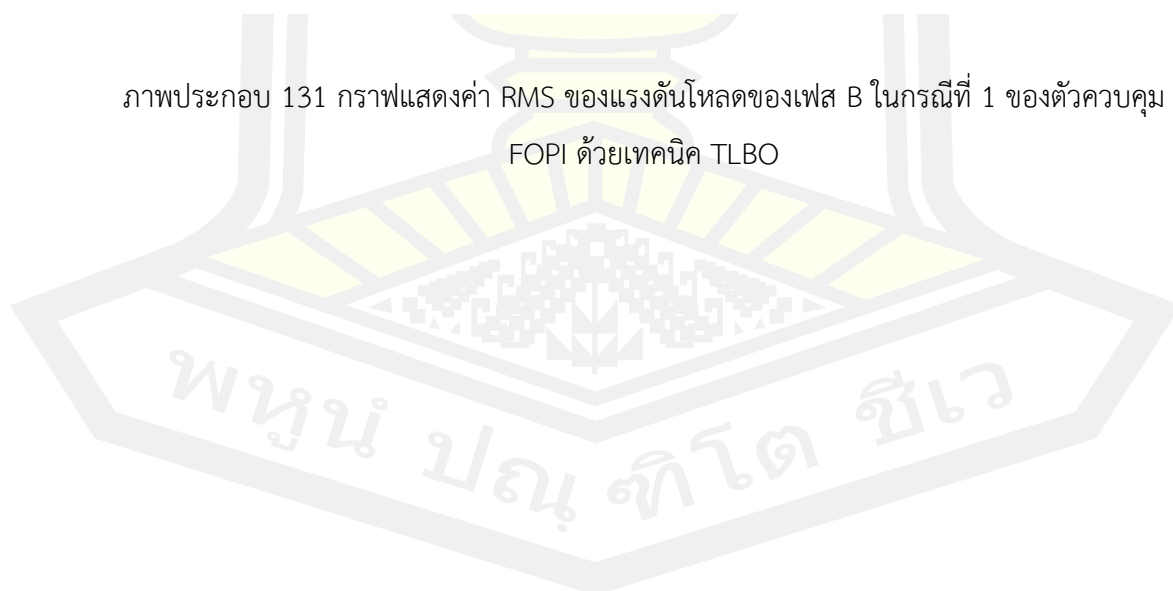
ภาพประกอบ 129 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



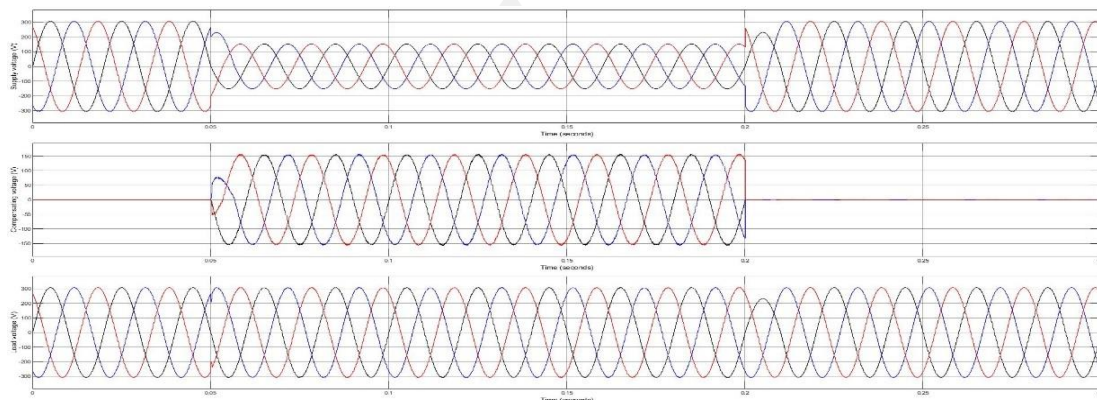
ภาพประกอบ 130 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



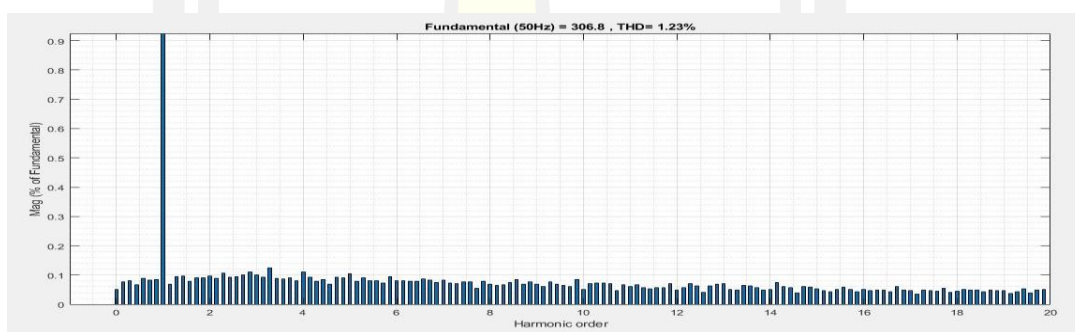
ภาพประกอบ 131 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



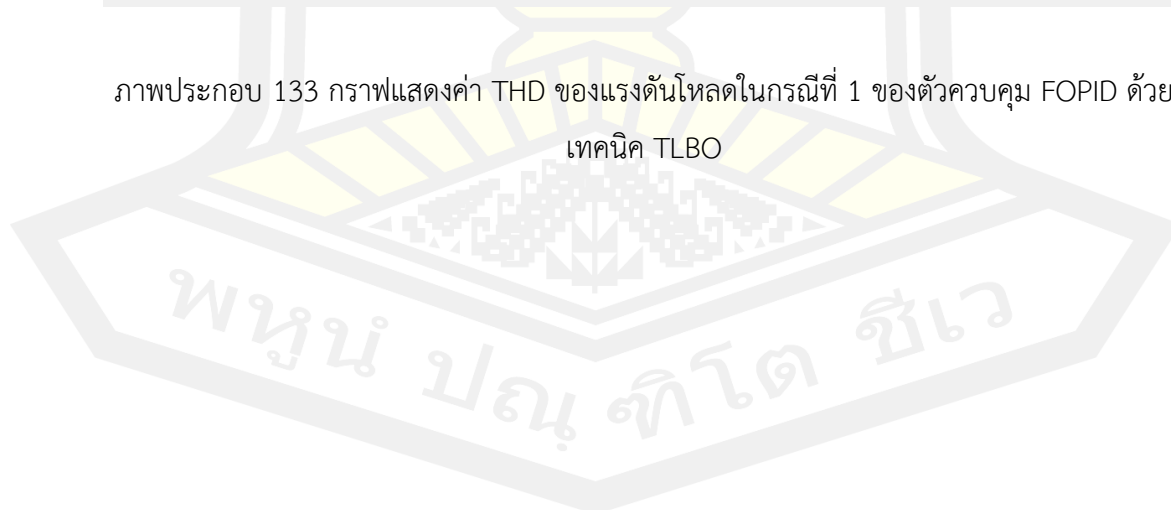
d) ตัวควบคุม FOPID

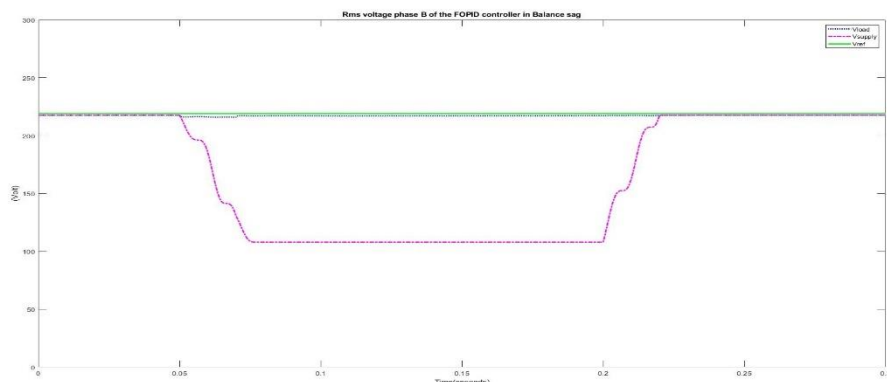


ภาพประกอบ 132 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



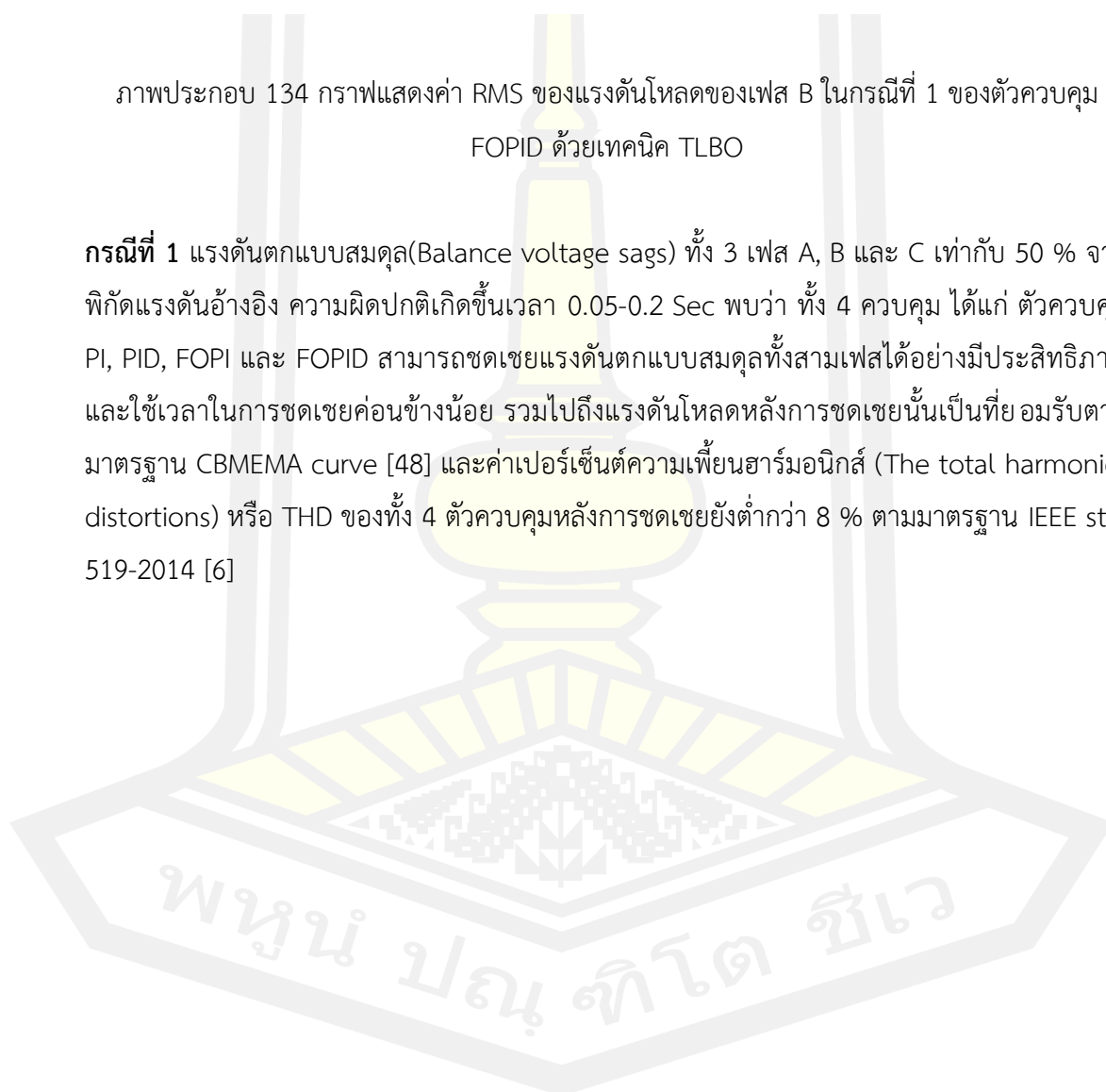
ภาพประกอบ 133 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO





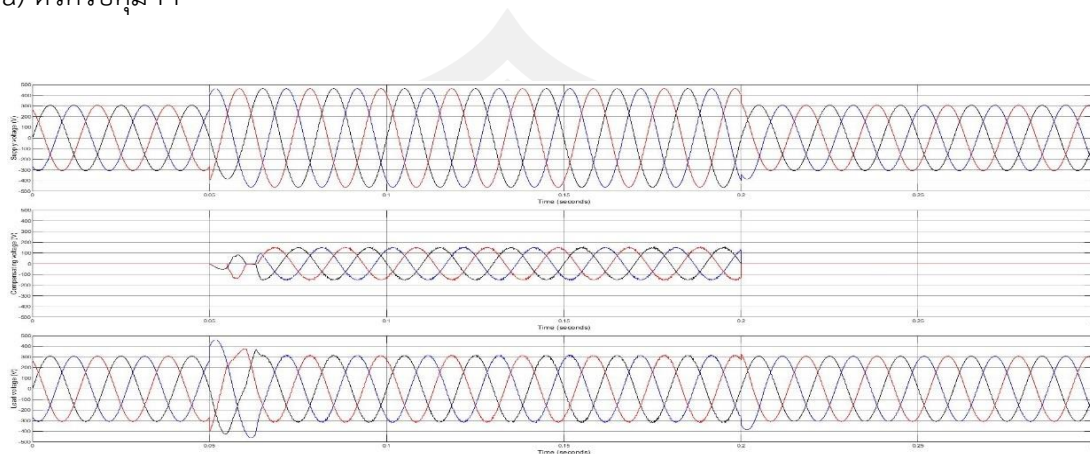
ภาพประกอบ 134 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 1 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

กรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล(Balance voltage sags) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C เท่ากับ 50 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ทั้ง 4 ควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID สามารถชดเชยแรงดันตกแบบสมดุลทั้งสามเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้เวลาในการชดเชยค่อนข้างน้อย รวมไปถึงแรงดันโหลดหลังการชดเชยนั้นเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48] และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

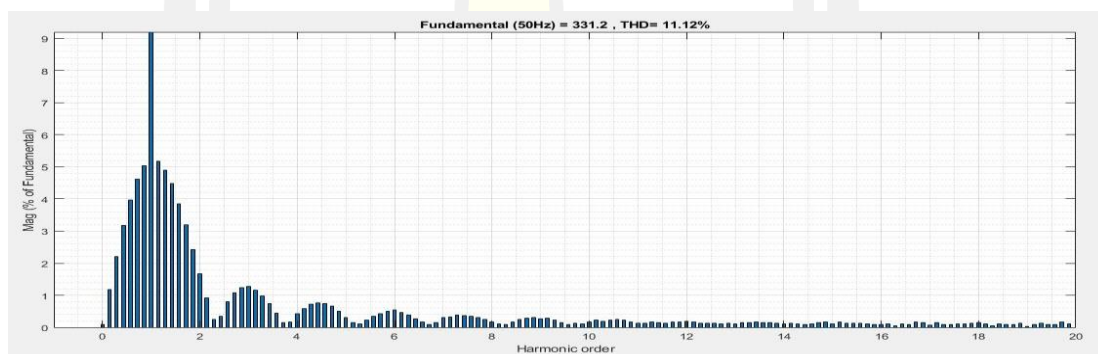


กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced voltage swells)

a) ตัวควบคุม PI

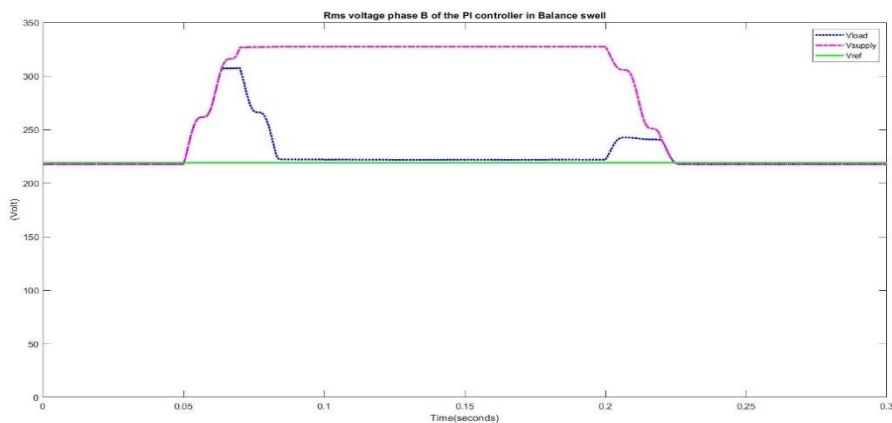


ภาพประกอบ 135 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



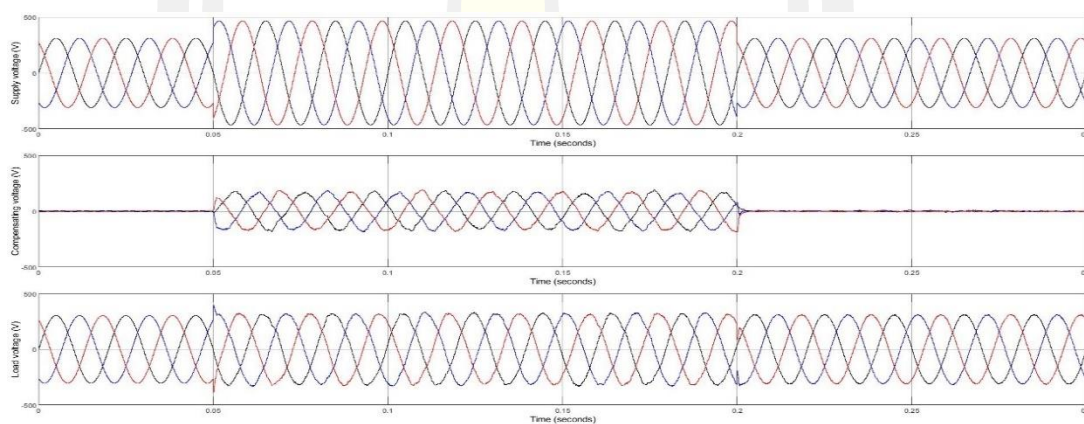
ภาพประกอบ 136 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ

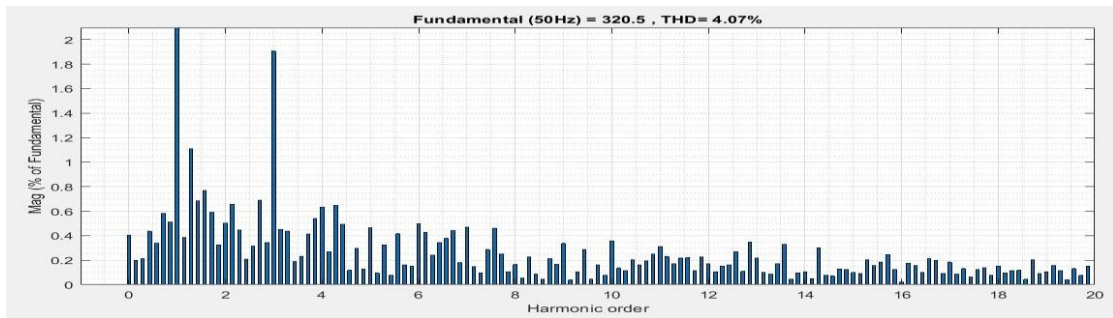


ภาพประกอบ 137 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

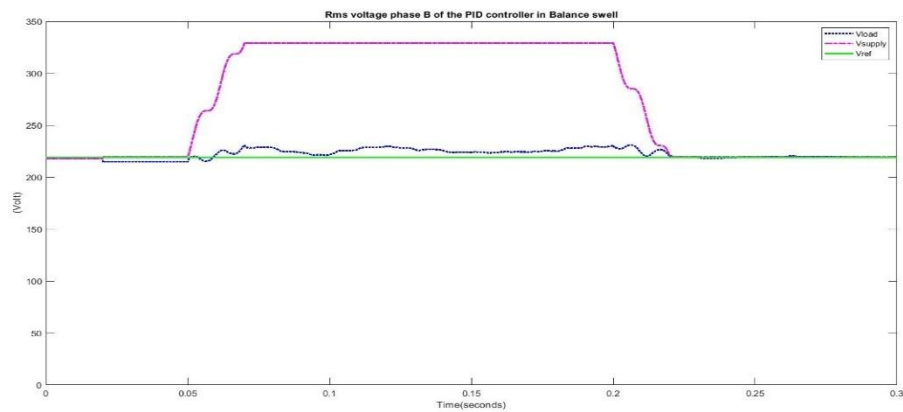
b) ตัวควบคุม PID



ภาพประกอบ 138 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



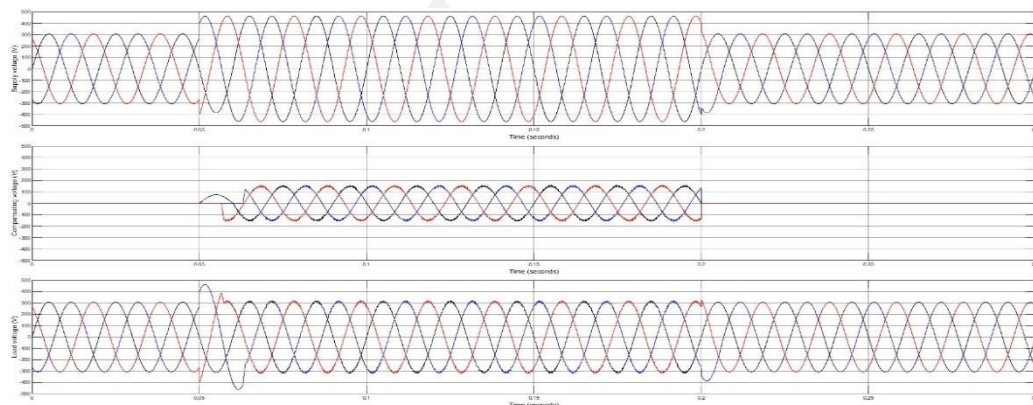
ภาพประกอบ 139 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



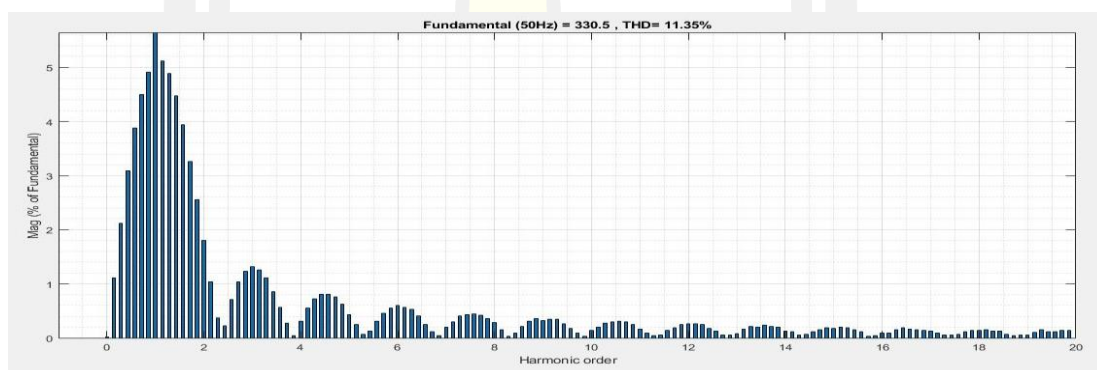
ภาพประกอบ 140 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



c) ตัวควบคุม FOPI

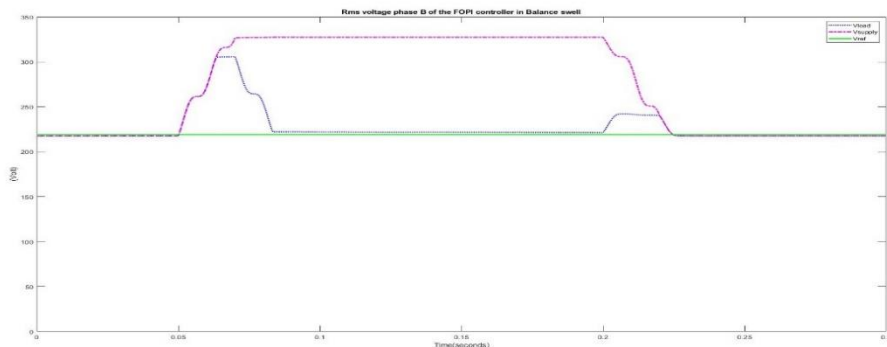


ภาพประกอบ 141 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโพลดในกรณีที 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



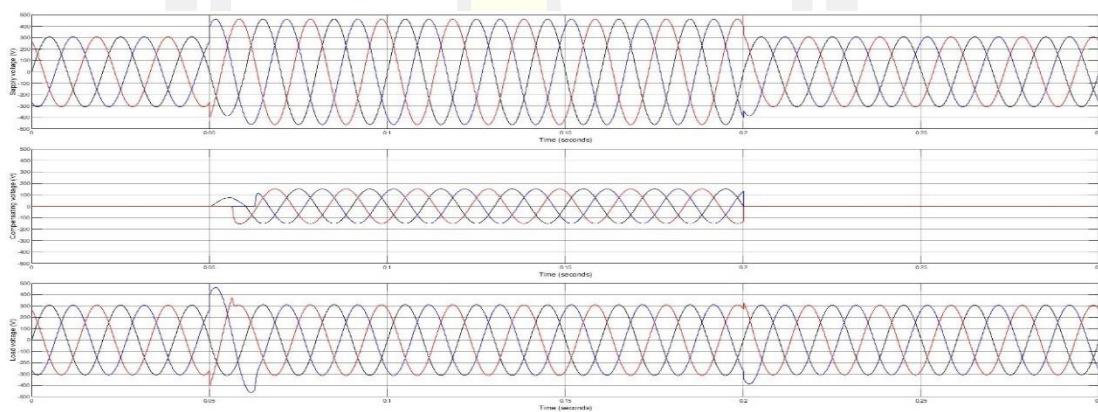
ภาพประกอบ 142 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที 2 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ



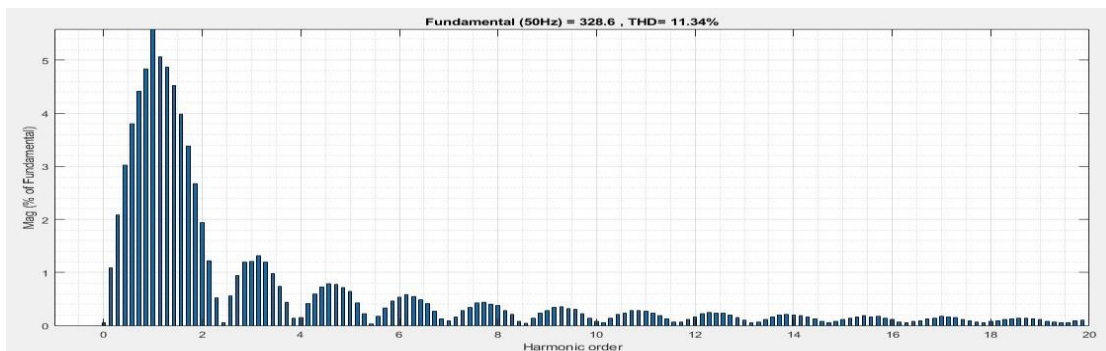
ภาพประกอบ 143 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

d) ตัวควบคุม FOPID

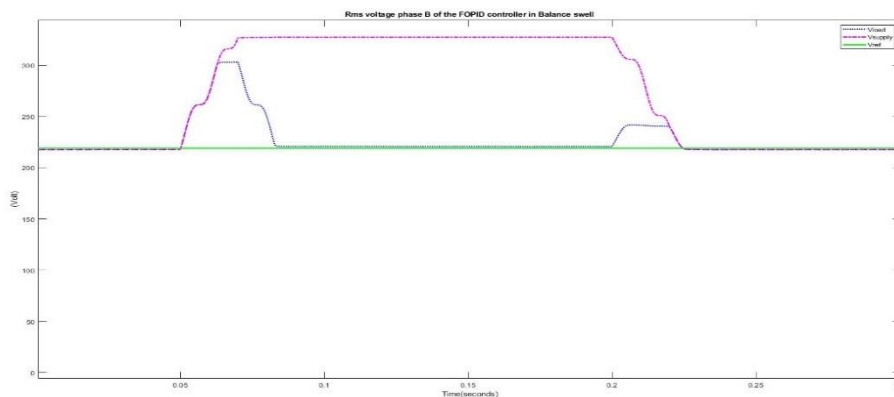


ภาพประกอบ 144 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 145 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลดในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

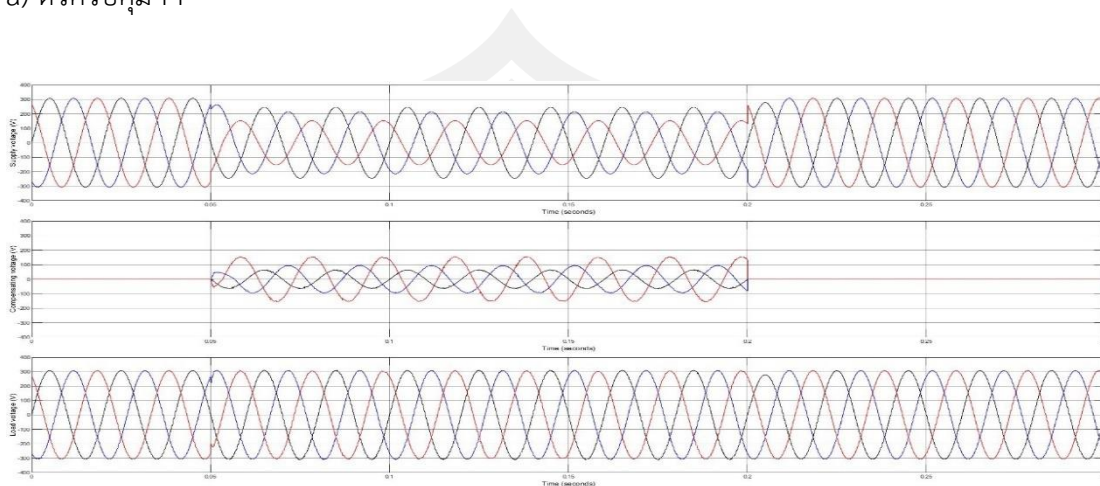


ภาพประกอบ 146 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลดของเฟส B ในกรณีที่ 2 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

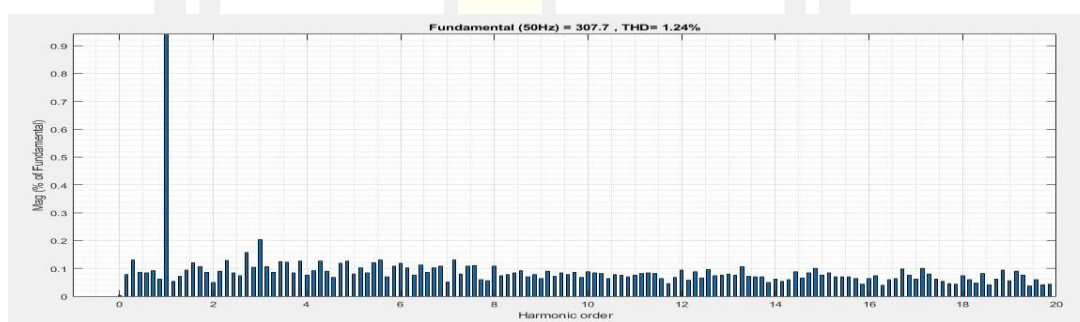
กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced voltage swell) ทั้ง 3 เฟส A, B และ C เท่ากับ 150 % จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ตัวควบคุม PID ในภาพประกอบ 140 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 10.44 V หรือประมาณ 4.75 % และทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 0 – 1.67 Cycle (0 - 33.87 ms) ซึ่งเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48]. และพบว่าตัวควบคุม PI, FOPI และ FOPID ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) หลังการชดเชยเกินกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6] โดยมีค่า $THD_{PI} = 11.12\%$, $THD_{FOPI} = 11.35\%$. และ $THD_{FOPID} = 11.34\%$.

กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags)

a) ตัวควบคุม PI

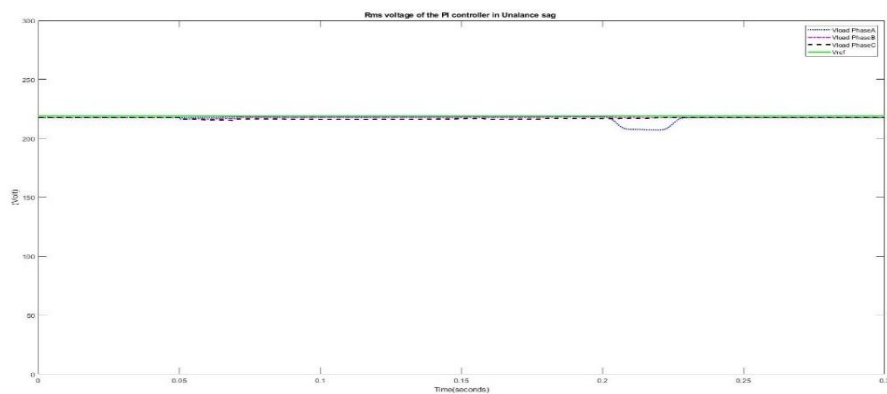


ภาพประกอบ 147 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



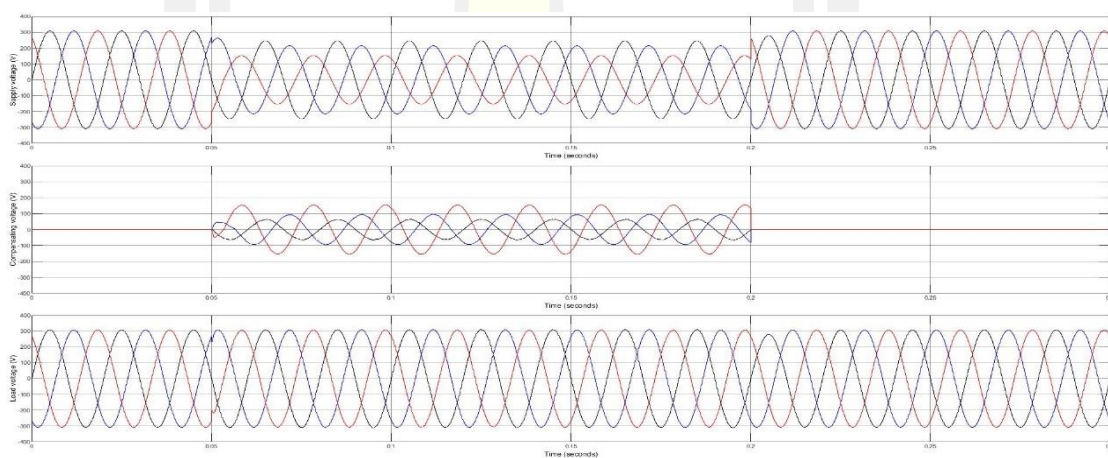
ภาพประกอบ 148 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุ ประถม วิชา

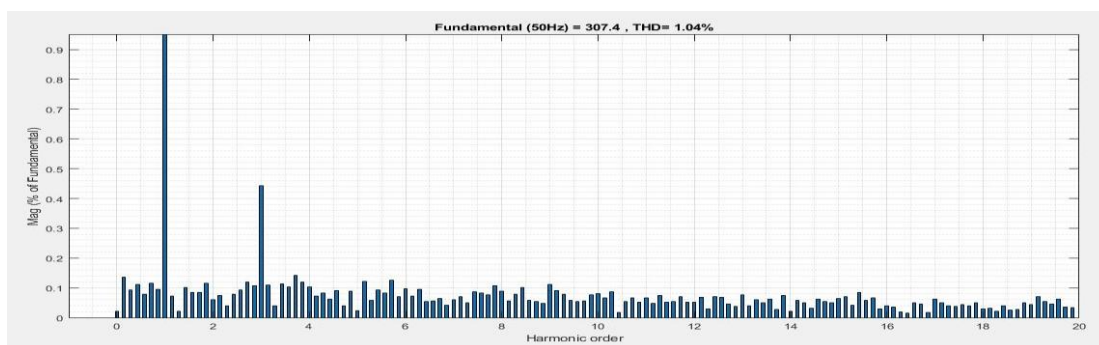


ภาพประกอบ 149 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

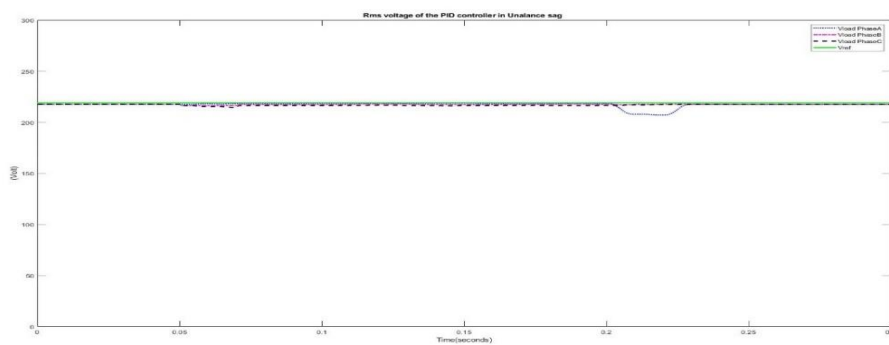
b) ตัวควบคุม PID



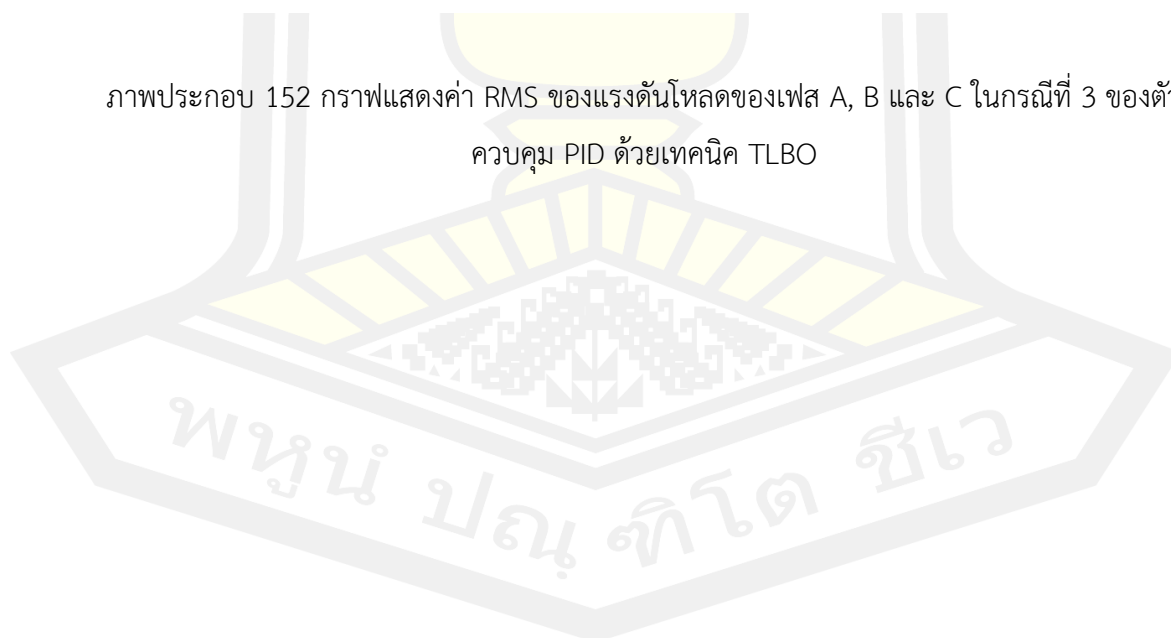
ภาพประกอบ 150 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



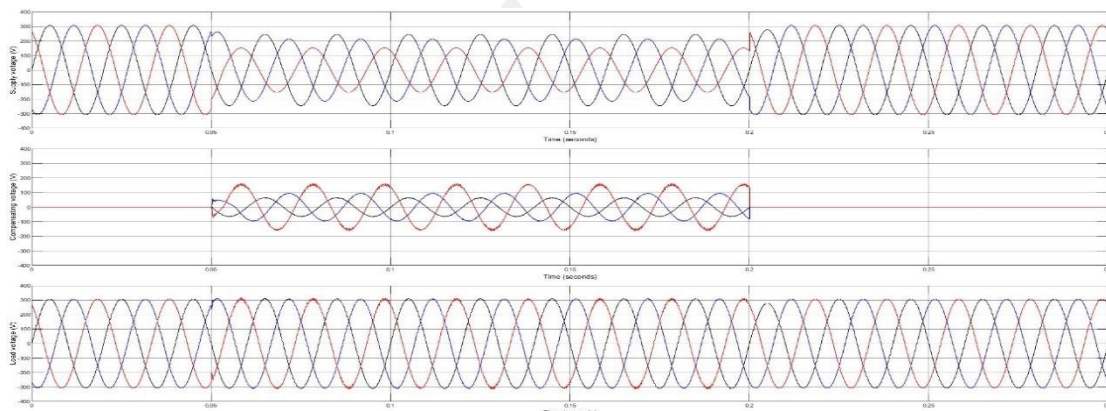
ภาพประกอบ 151 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



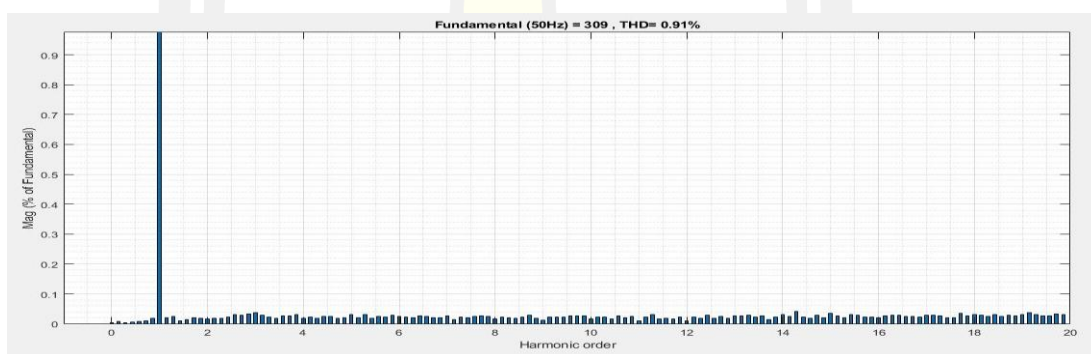
ภาพประกอบ 152 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



c) ตัวควบคุม FOPI

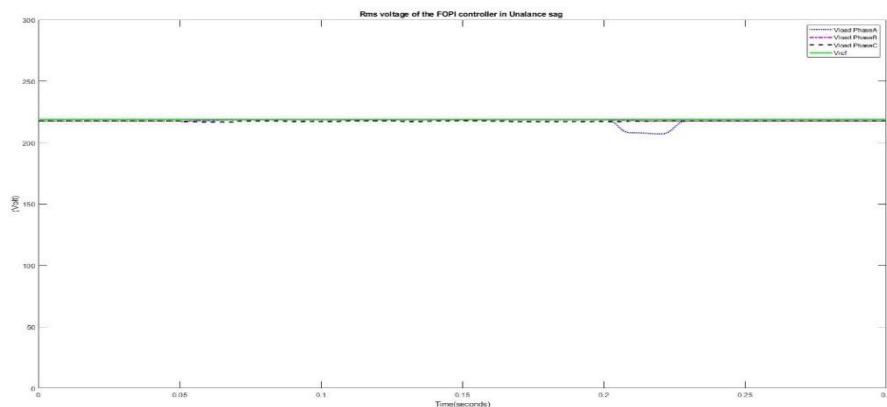


ภาพประกอบ 153 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



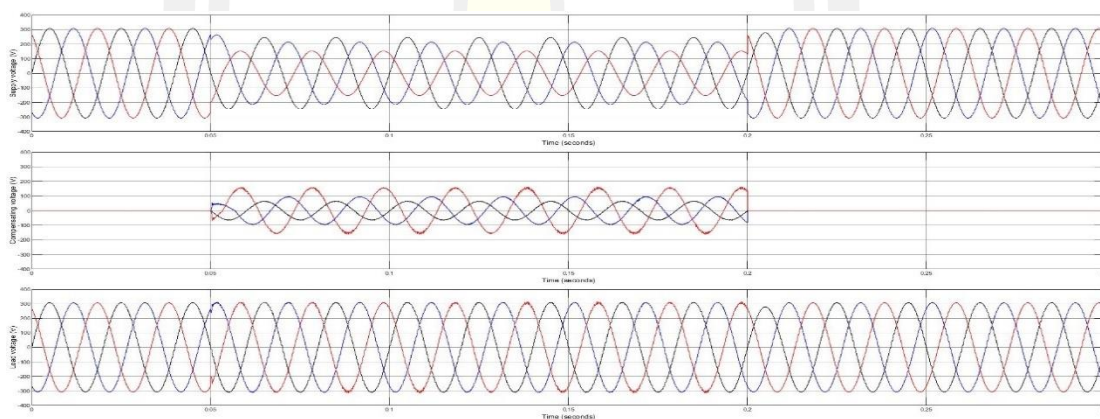
ภาพประกอบ 154 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุ ประถมศึกษา

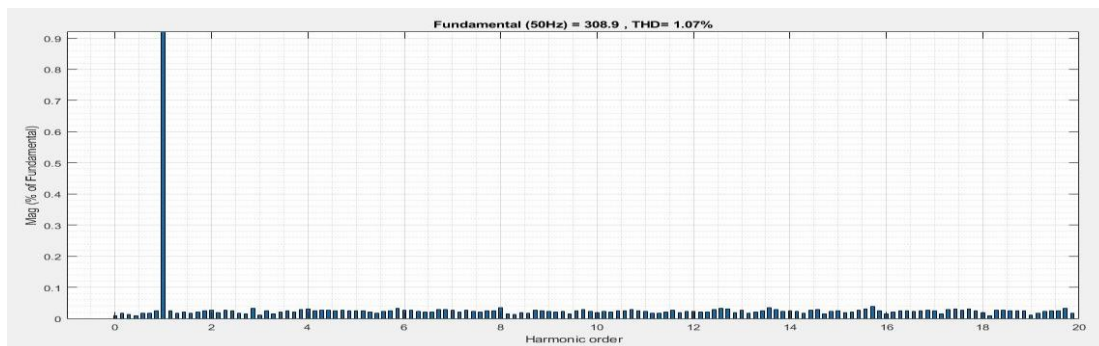


ภาพประกอบ 155 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

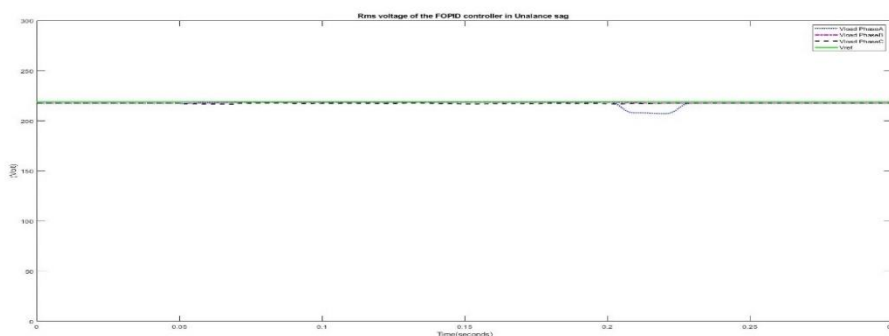
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 156 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 157 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

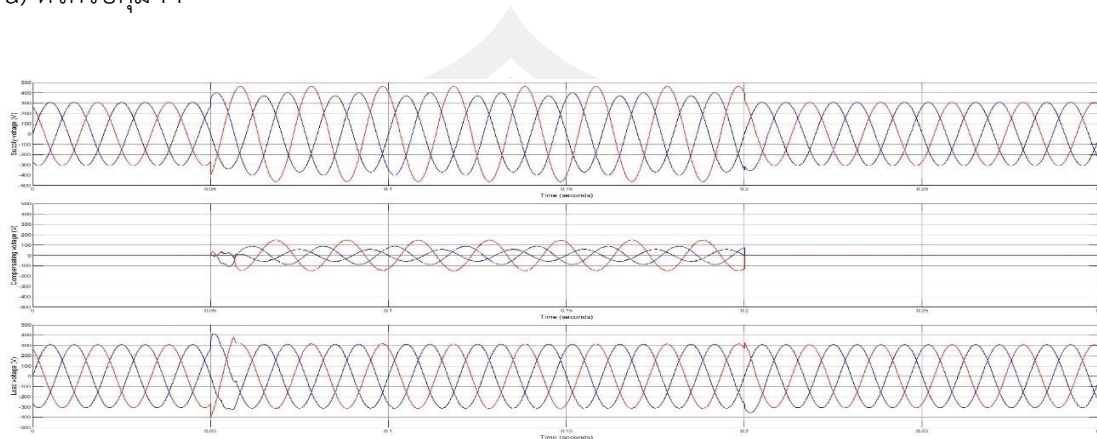


ภาพประกอบ 158 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 3 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

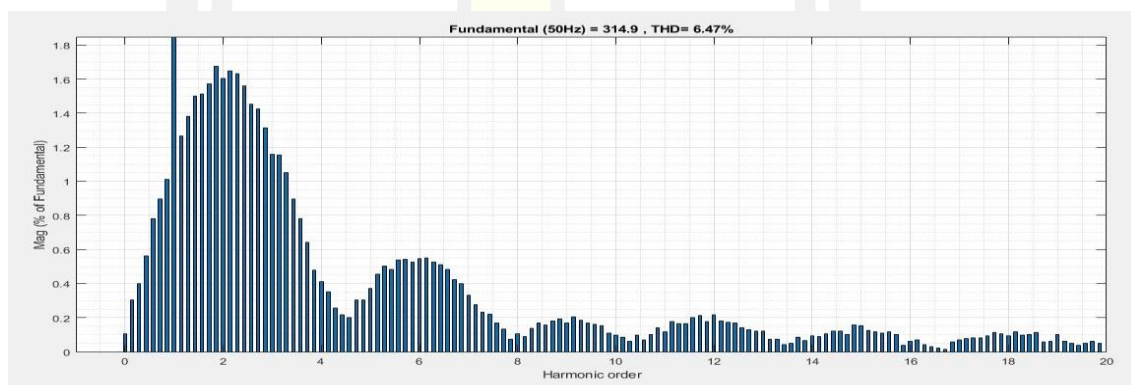
กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage sags) ของเฟส A เฟส B และเฟส C ลดลง 80%, 70% และ 50% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลองพบว่าทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำใกล้เคียงกับแรงดันพิกัดอย่างดีเยี่ยม และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells)

a) ตัวควบคุม PI

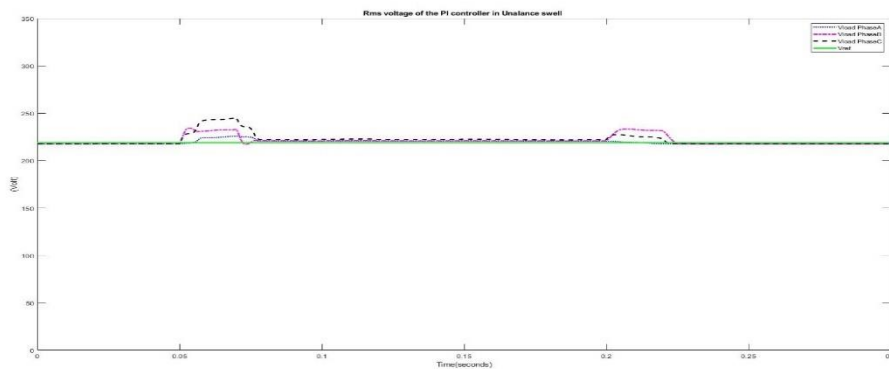


ภาพประกอบ 159 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI



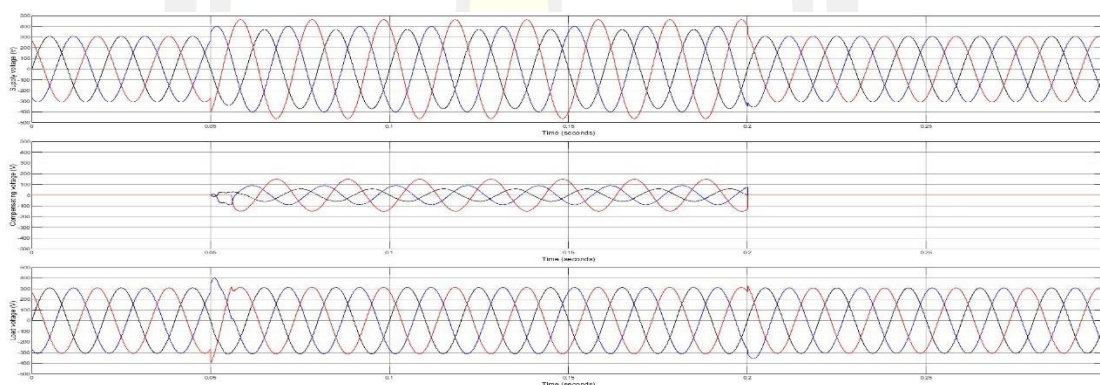
ภาพประกอบ 160 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุ ประถมศึกษา



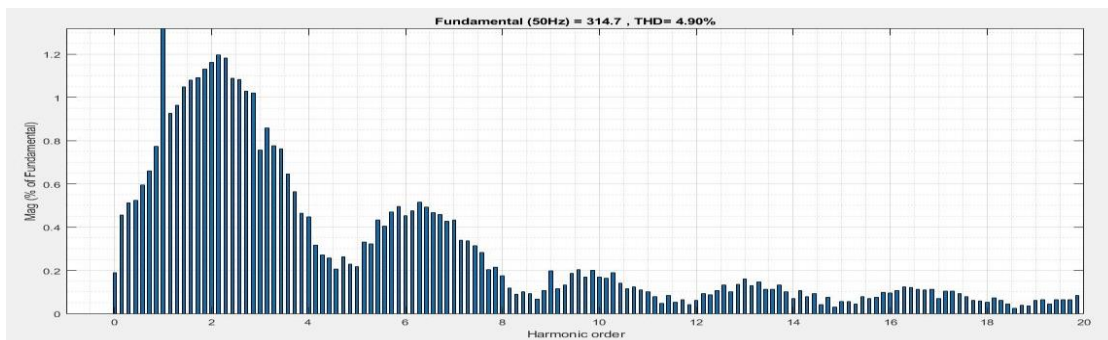
ภาพประกอบ 161 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

b) ตัวควบคุม PID

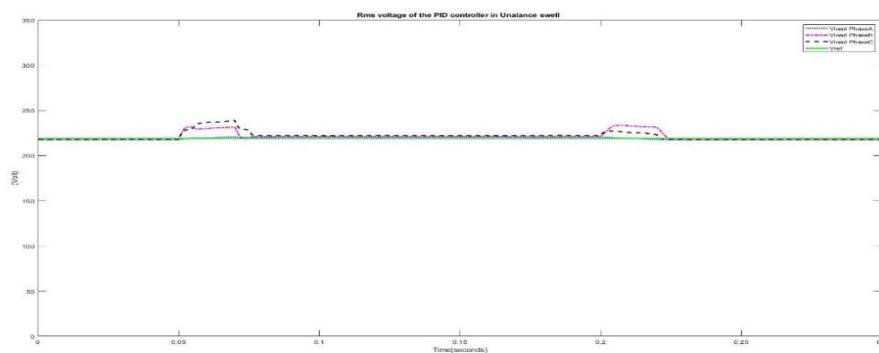


ภาพประกอบ 162 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO

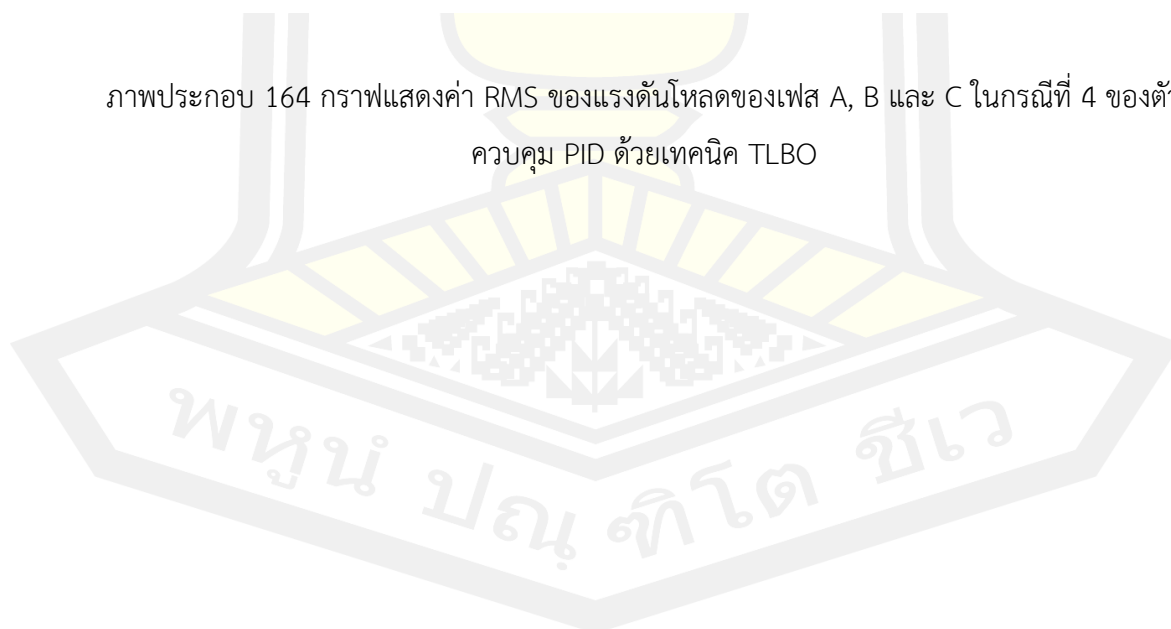
พหุบัณฑิต ชีวะ



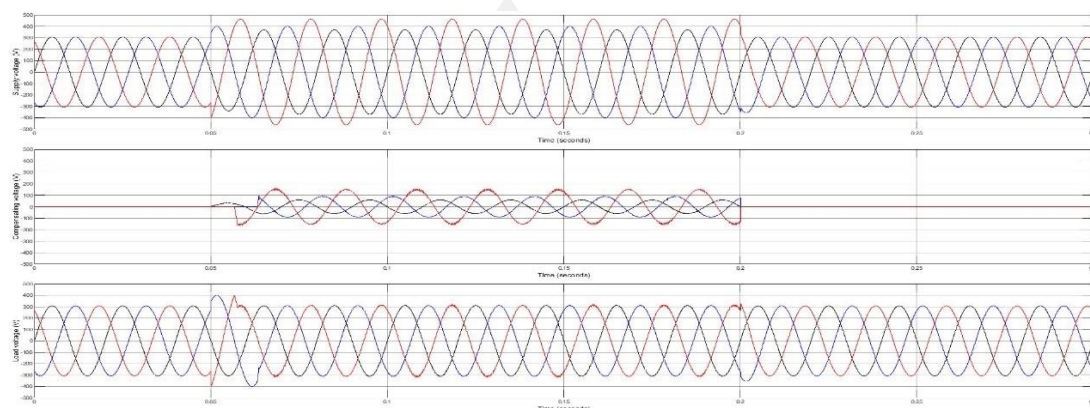
ภาพประกอบ 163 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



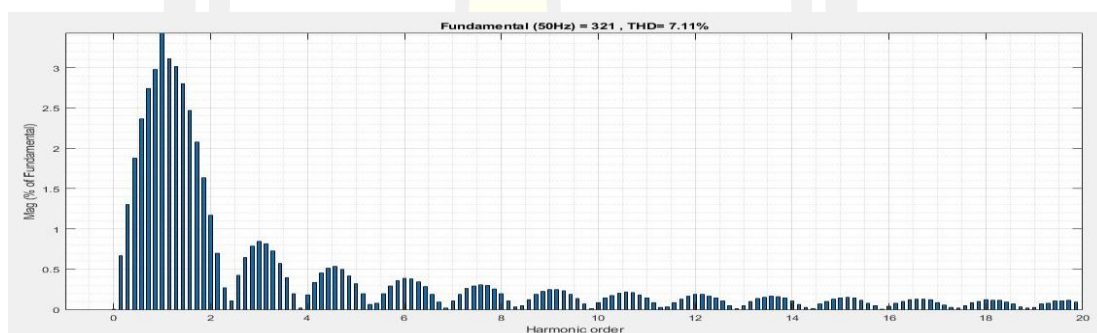
ภาพประกอบ 164 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลตของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



c) ตัวควบคุม FOPI

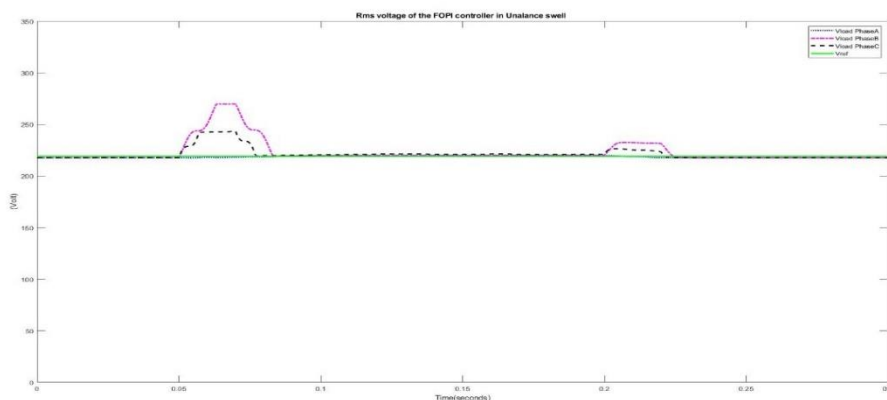


ภาพประกอบ 165 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหนดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



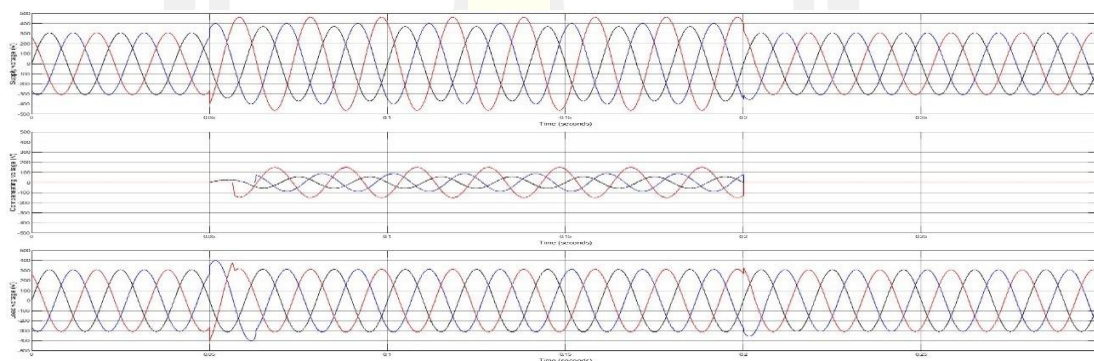
ภาพประกอบ 166 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหนดในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ



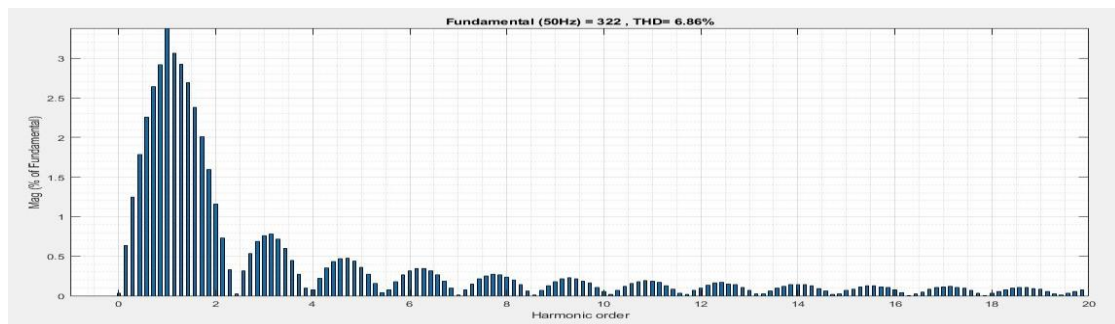
ภาพประกอบ 167 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

d) ตัวควบคุม FOPID

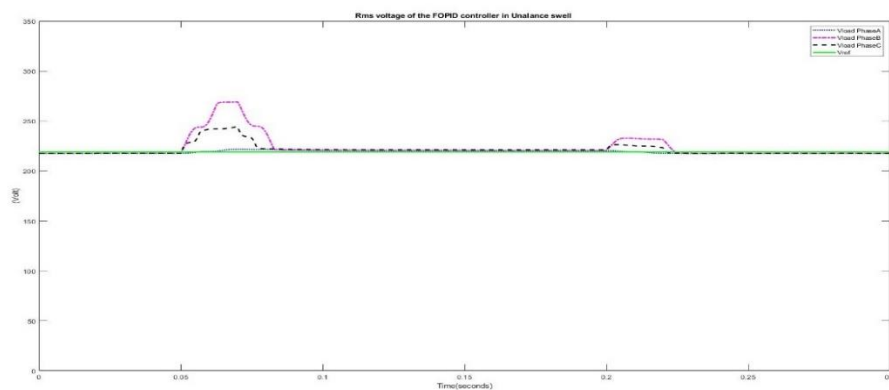


ภาพประกอบ 168 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันขดเคย์และแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 169 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 170 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ของเฟส A, B และ C ในกรณีที่ 4 ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced voltage swells) ของเฟส A เฟส B และเฟส C เพิ่มขึ้น 120%, 130% และ 150% ตามลำดับ จากแรงดันพิกัด ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลอง พบว่า ทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ได้เป็นอย่างดีและทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 1.32 – 1.66 Cycle (26.48 - 33.20 ms) พิกัดแรงดันหลังชดเชยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐาน CBMEMA curve [48] ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6].

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 10 ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกณฑ์ดรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุมที่ได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี พบว่า ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย ITAE ต่ำที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0443

ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0455

ตัวควบคุม FOPI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0451

ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี เท่ากับ 0.0459

ตาราง 12 แสดงค่าการเปรียบเทียบ Response time และ %Steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 12 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error จากการทดสอบความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Balanced voltage sag	Nearly promptly	1.86	3.36	2.30	Nearly promptly	1.16	Nearly promptly	0.84
Case 2: Balanced voltage swell	33.87	1.30	Nearly promptly	4.75	33.60	1.22	33.47	0.72
Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	1.16	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0
Case 4: Unbalanced voltage swell	28.50	1.51	26.48	1.55	33.20	~ 0	32.93	0.98
Average	15.59	1.17	7.46	2.44	16.70	0.59	16.60	0.63

จากตาราง 12 ในการวิเคราะห์ Response time และ วิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุลง พบว่า ตัวควบคุม PI, FOPI และ FOPID จะเกิด Response time น้อยมากหรือมีการตอบสนองอย่างทันทีทันใดและตัวควบคุม FOPID มีค่า % Steady-state error ต่ำสุดเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลงทั้งสามเฟส พบว่า ตัวควบคุม PID จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม FOPID มีค่า % Steady-state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 3) กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลง พบว่า ทุกตัวควบคุมจะเกิด Response time น้อยมากหรือมีการตอบสนองอย่างทันทีทันใด รวมไปถึง % Steady-state error ค่อนข้างต่ำมาก
- 4) กรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลงนั้น พบว่า ทุกตัวควบคุมจะเกิด Response time อยู่ใน ช่วง 26.48 ms - 33.20 ms และตัวควบคุม FOPI มีค่า % Steady-state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ
- 5) จากค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 1-4 ที่ได้จากราย 11 พบว่า ค่า Response time ตัวควบคุม PID จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.46 ms และในส่วนค่าเฉลี่ยของ % Steady-state error ของตัวควบคุม FOPI เท่ากับ 0.59% จะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI, PID และ FOPID (PI = 1.17 % , PID = 2.44 % และ FOPID = 0.63 %)

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 12 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ทั้ง 4 กรณีปัญหา ของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 13 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดจากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1 : Balanced voltage sag	1.24	5.50	2.17	1.23
Case 2 : Balanced voltage swell	11.12	4.07	11.35	11.34
Case 3 : Unbalanced voltage sag	1.24	1.04	0.91	1.07
Case 4 : Unbalanced voltage swell	6.47	4.90	7.11	6.86
Average	5.02	3.88	5.39	5.13

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากตาราง 12 จะเห็นได้ว่า

1) ในกรณีที่ 1 แรงดันตกแบบสมดุล ตัวควบคุม FOPID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่

$THD_{FOPID} = 1.23\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า $THD_{PI} = 1.24\%$, $THD_{PID} = 5.50\%$ และ $THD_{FOPI} = 1.23\%$ ตามลำดับ

2) ในกรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส ตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่

$THD_{PID} = 4.07\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า $THD_{PI} = 11.12\%$, $THD_{FOPI} = 11.35\%$ และ $THD_{FOPID} = 11.34\%$ ตามลำดับ

3) ในกรณีที่ 3 แรงดันตกแบบไม่สมดุลตัวควบคุม PI จะมีค่า $THD_{PI} = 1.24\%$ ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุมตัวอื่น ๆ ซึ่งมีค่า $THD_{PID} = 1.04\%$, $THD_{FOPI} = 0.91\%$ และ $THD_{FOPID} = 1.07\%$ ตามลำดับ

4) ในกรณีที่ 4 แรงดันเกินแบบไม่สมดุลตัวควบคุม FOPI จะมีค่า $THD_{FOPI} = 7.11\%$ ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุมตัวอื่น ๆ ซึ่งมีค่า $THD_{PI} = 6.47\%$, $THD_{PID} = 4.90\%$, $THD_{FOPID} = 6.86\%$ ตามลำดับ

ซึ่งจากตาราง 12 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม FOPI จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม PID จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 7.46 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 2.44 % และ ค่าเฉลี่ย THD = 3.88% ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหานี้ คือ ตัวควบคุม PI ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 15.59 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 3.40 % และค่าเฉลี่ย THD = 3.49 % ตามลำดับ และเทคนิค Teaching-

Learning-Based Optimization (TLBO) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 81 นาที หรือ 1 ชั่วโมง 21 นาที

4.2 ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault)

โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID) ที่เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์เกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จำนวน 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน หรือ Single line to ground fault (SLG)

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน หรือ Double line to ground fault (DLG)

4.2.1 เทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

ตารางที่ 13 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี

ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

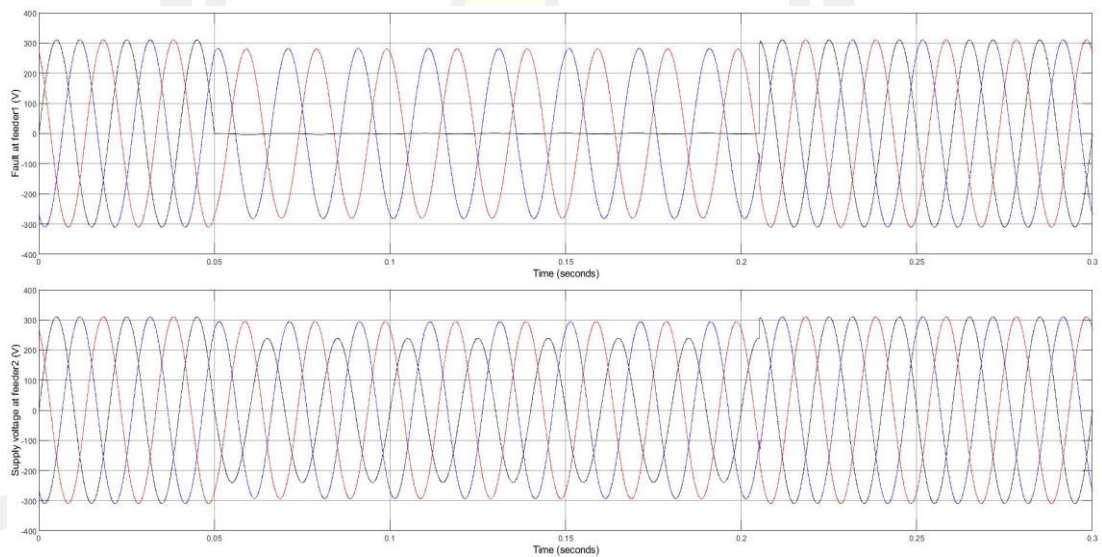
Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
WCA	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0303	0.0225				0.0126	51.01
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.6071	12.9299				0.0102	47.47
		Average						0.0114	49.24
	PID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	9.9209	2.0225			0.0070	50.73
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	29.5666	0.3977	0.01			0.0050	51.6
		Average						0.0060	51.165
	FOPI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0679	0.01		1.8886		0.0126	49.87

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.4495	14.8467		1.2458		0.0102	50.09
		Average						0.0114	49.98
	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.01	2.0091	0.01	0.0111	0.0225	0.0123	48.58
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.01	1.4569	0.0342	0.01	0.01	0.0101	52.17
		Average							0.0112

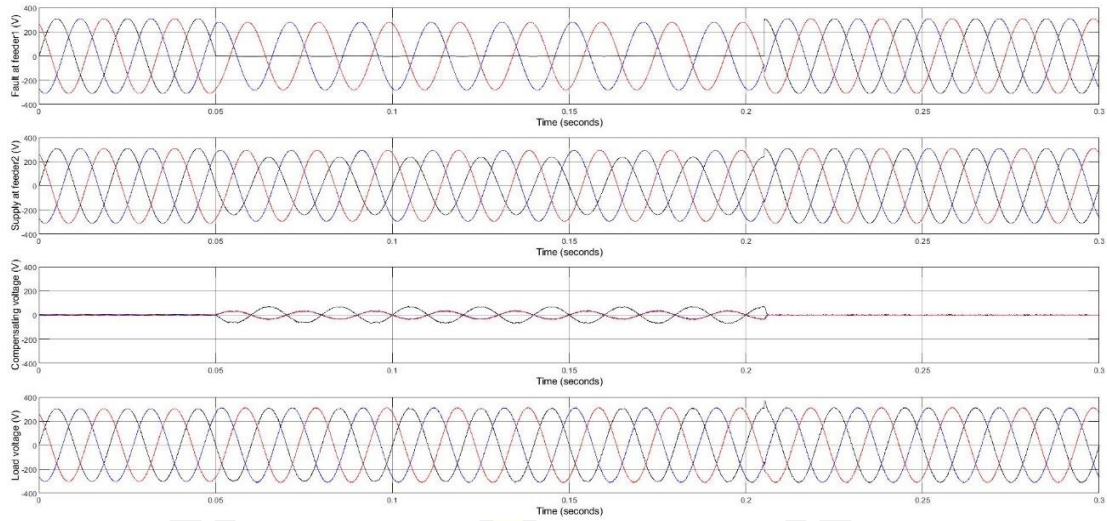
โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุมได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบที่ 171 ถึง 210

กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินหรือ Single line to ground fault (SLG)

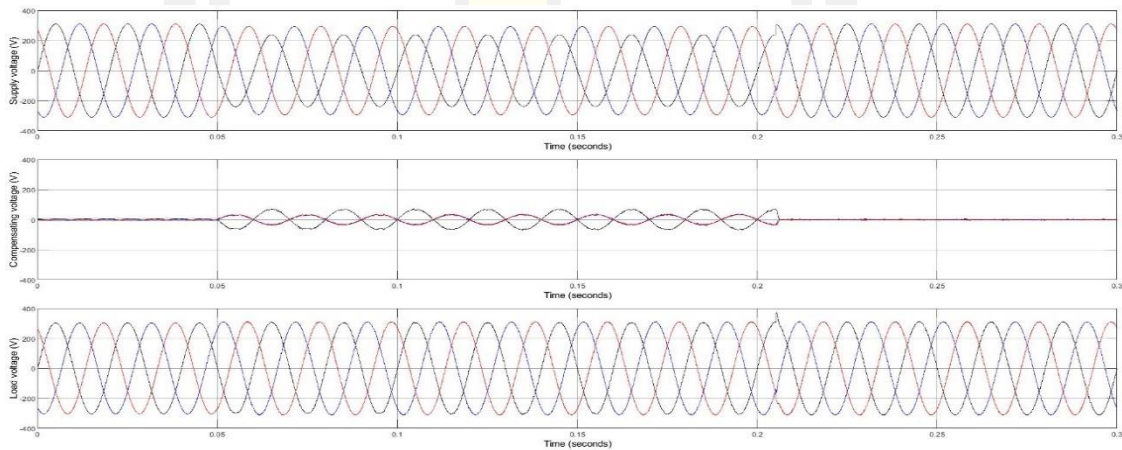
a) ตัวควบคุม PI



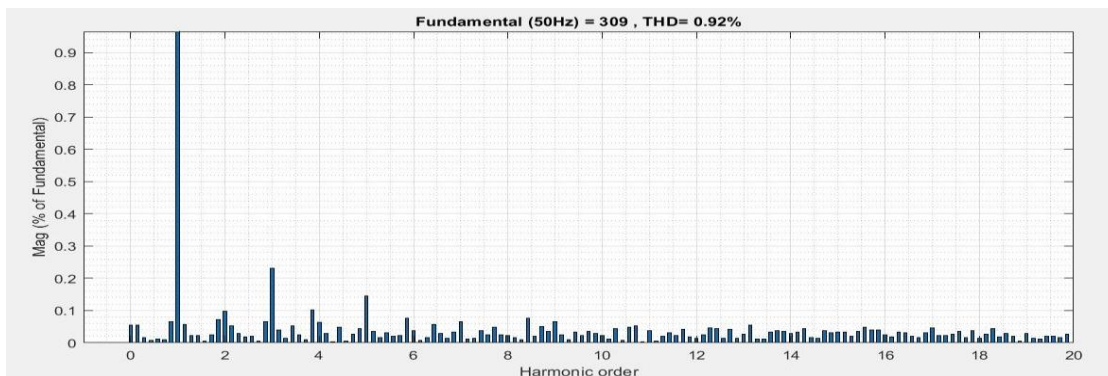
ภาพประกอบ 171 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



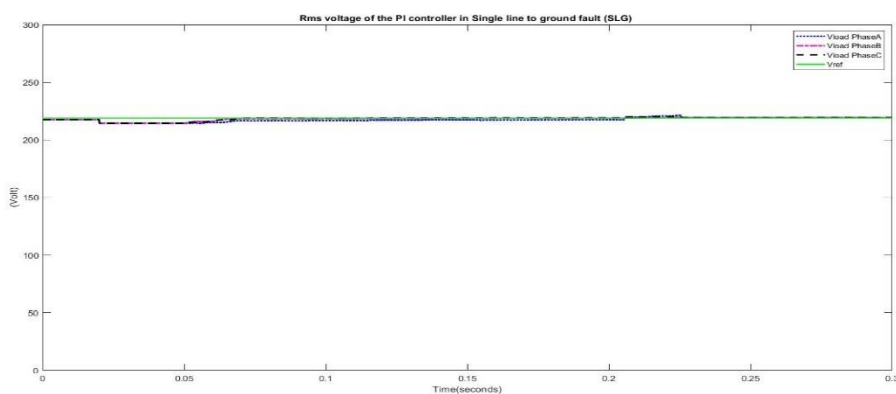
ภาพประกอบ 172 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



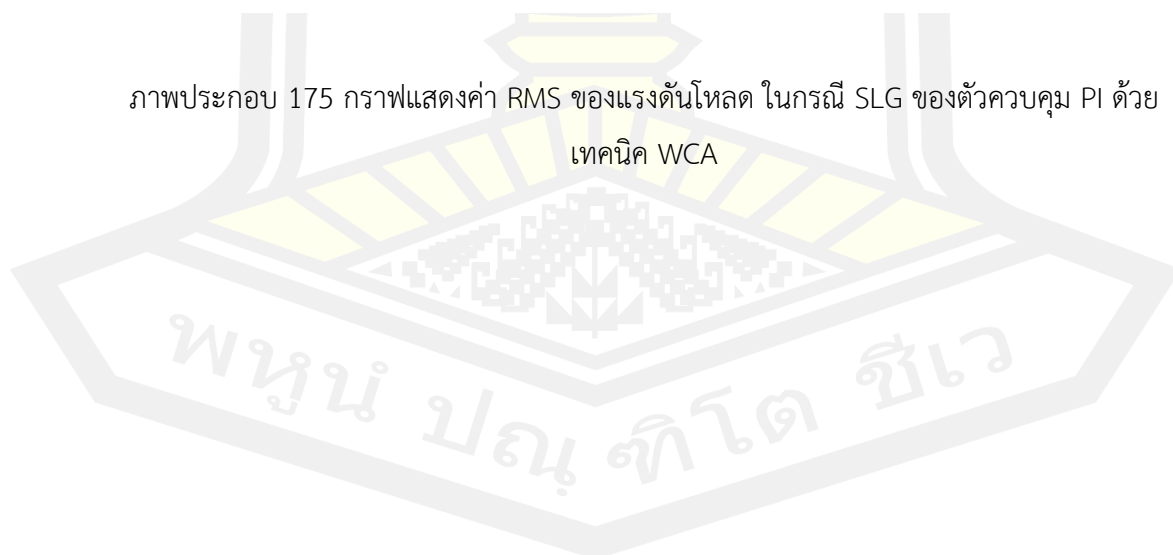
ภาพประกอบ 173 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



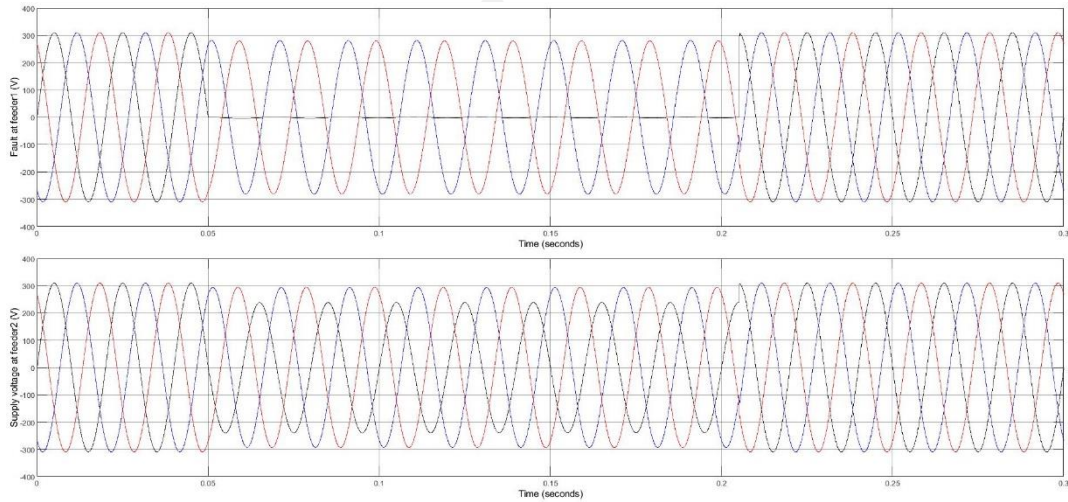
ภาพประกอบ 174 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่เกิดในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



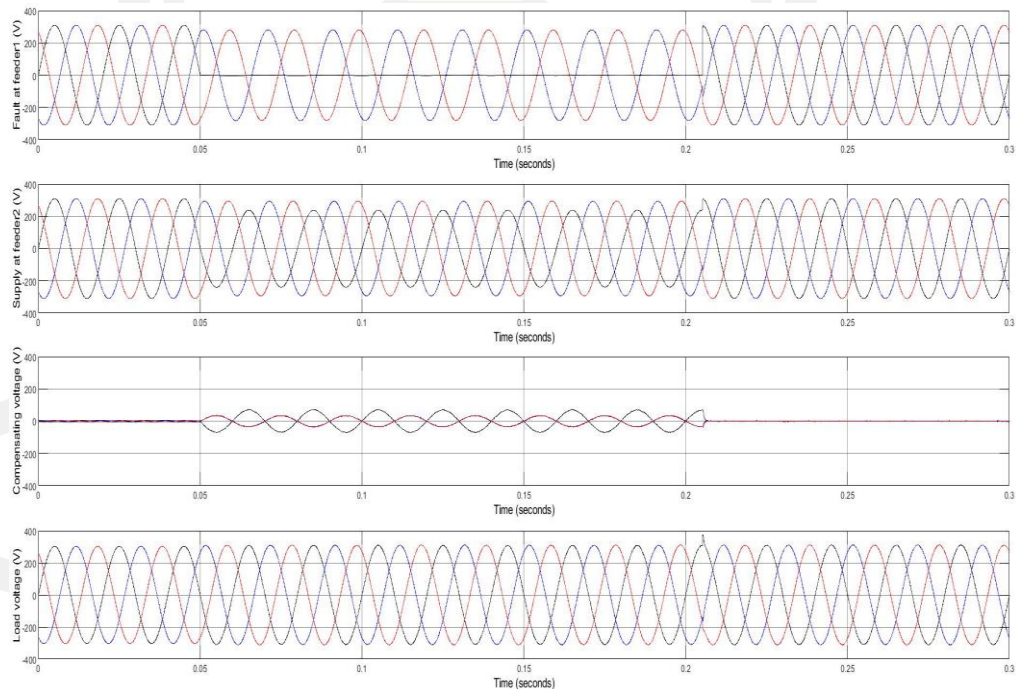
ภาพประกอบ 175 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



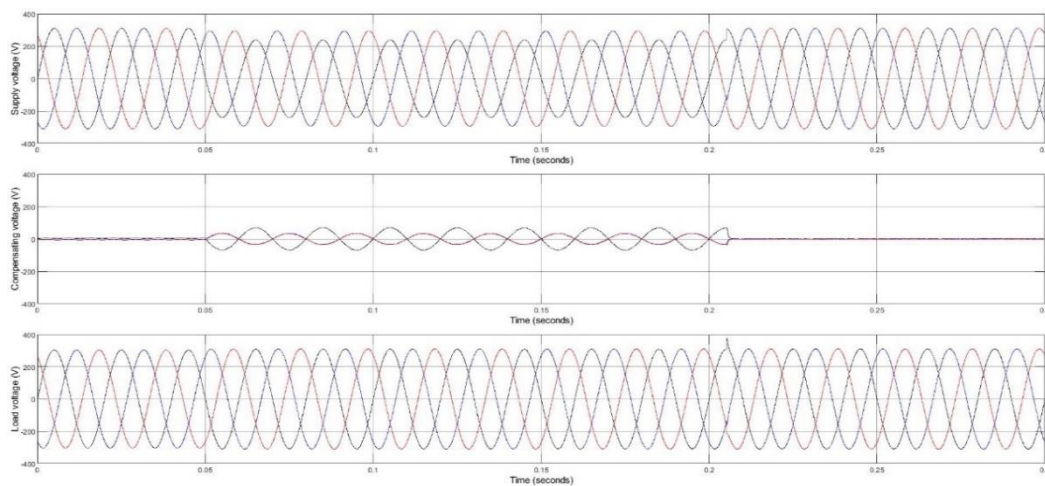
b) ตัวควบคุม PID



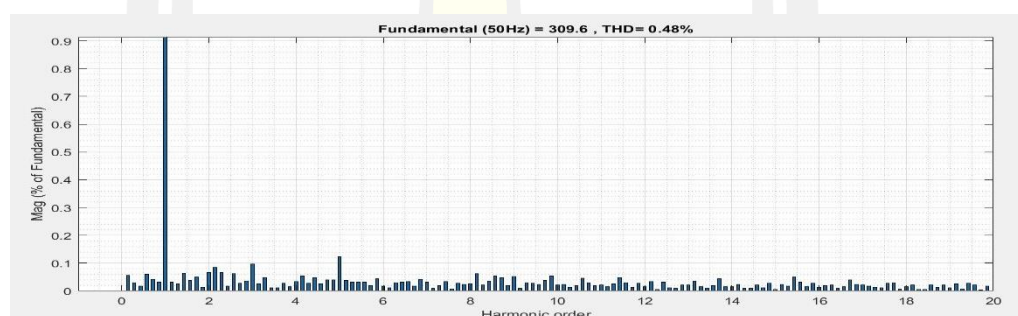
ภาพประกอบ 176 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



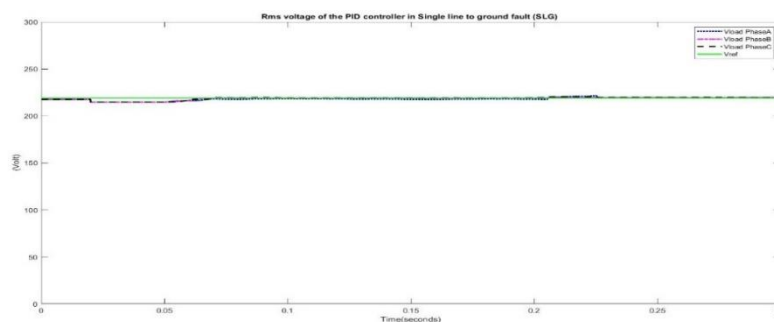
ภาพประกอบ 177 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 178 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

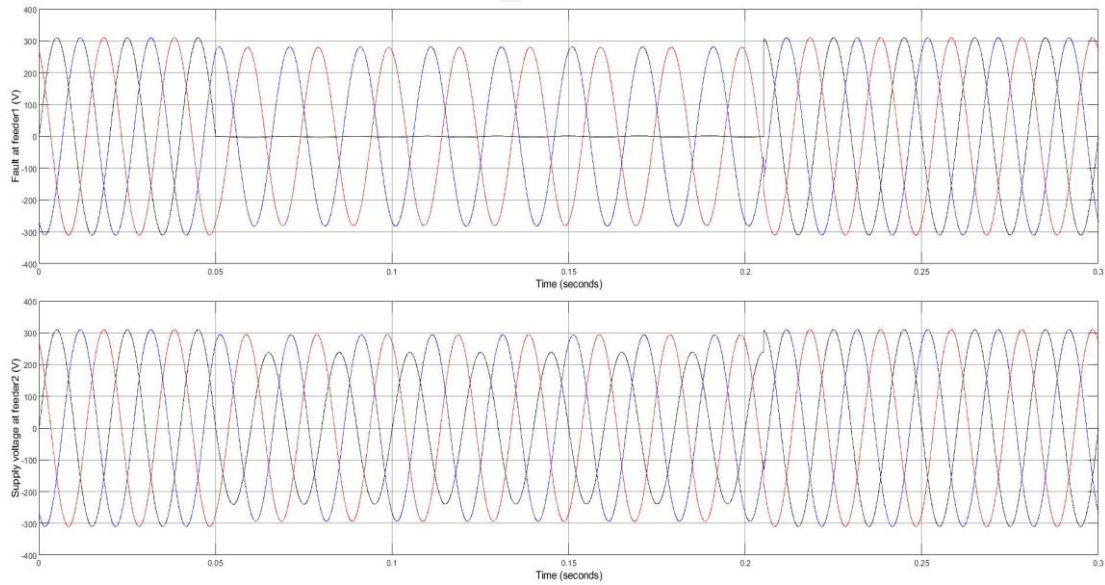


ภาพประกอบ 179 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

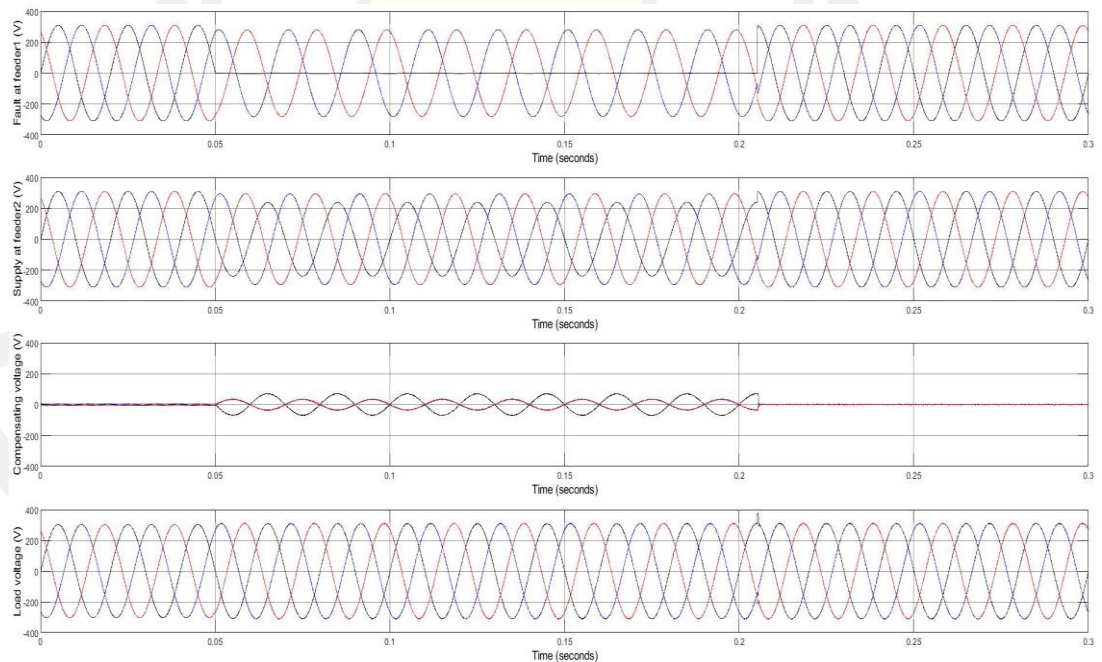


ภาพประกอบ 180 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA

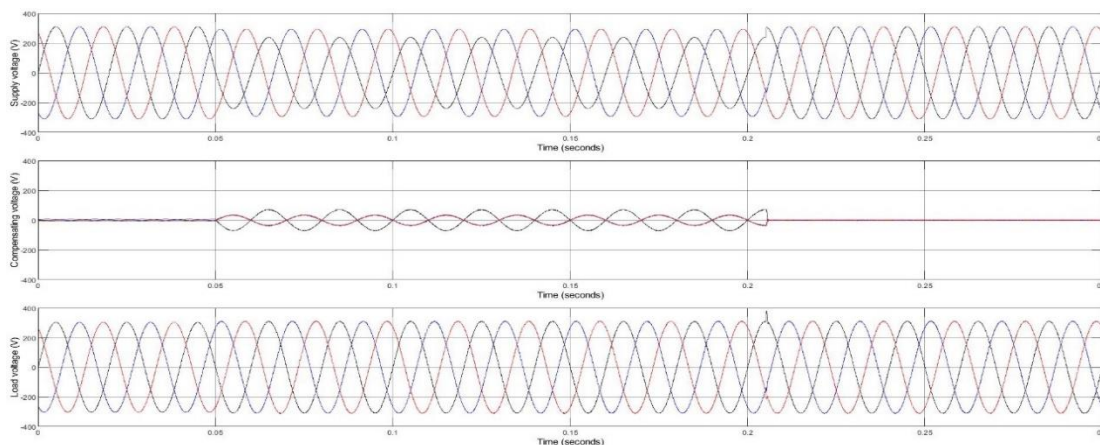
c) ตัวควบคุม FOPI



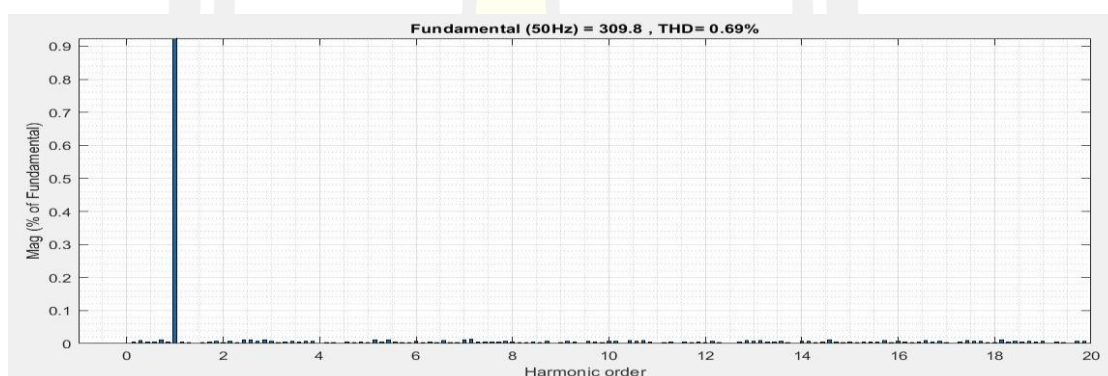
ภาพประกอบ 181 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 182 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

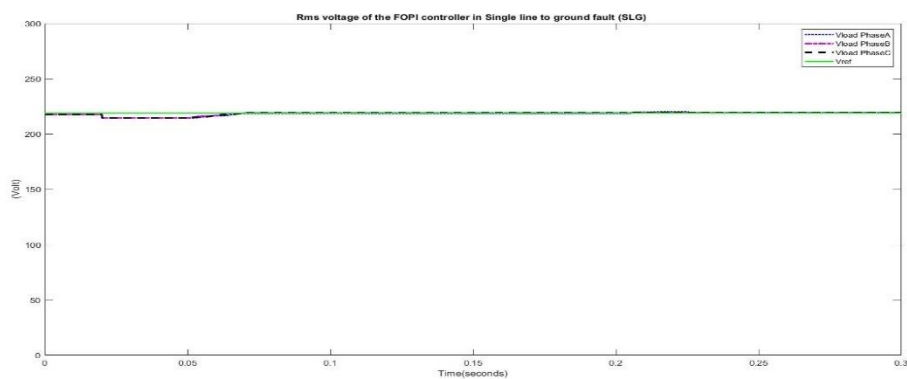


ภาพประกอบ 183 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA



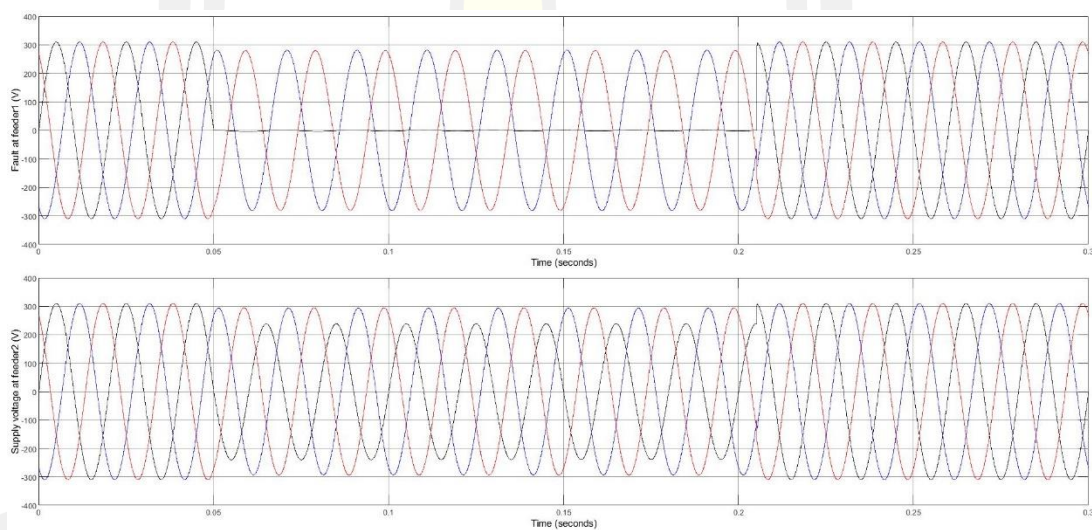
ภาพประกอบ 184 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

พหุบัณฑิต ชีวะ

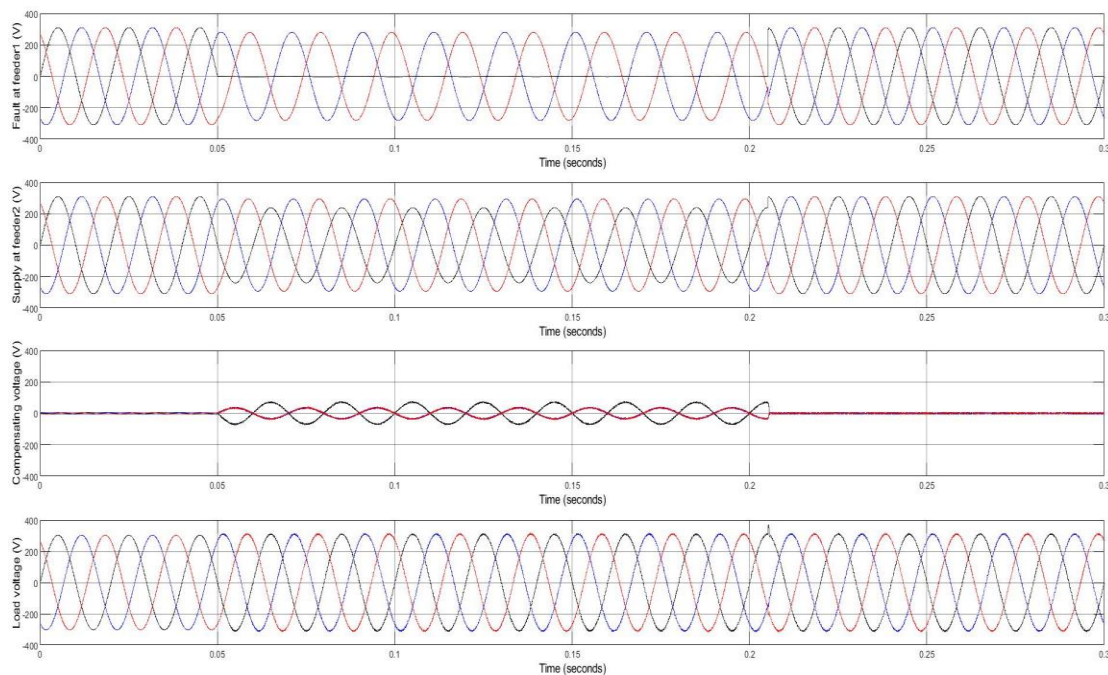


ภาพประกอบ 185 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

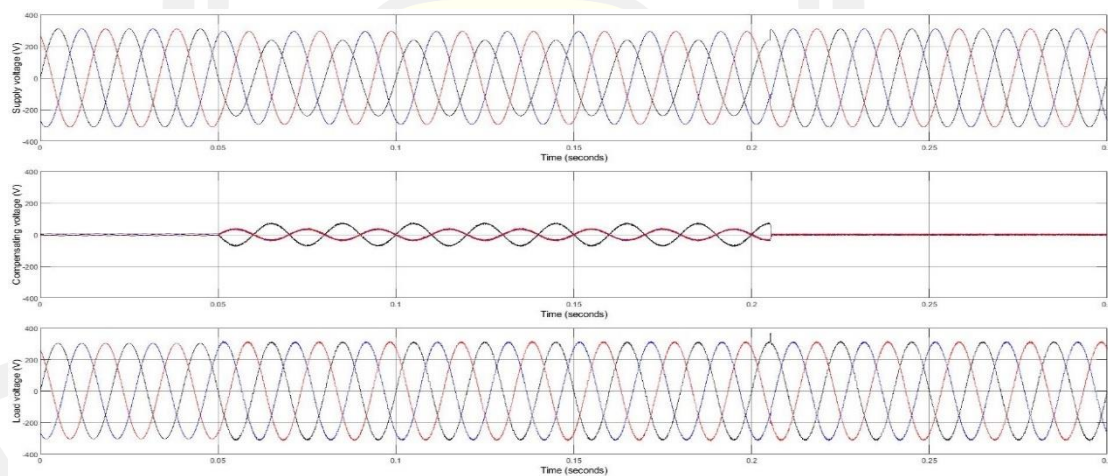
d) ตัวควบคุม FOPID



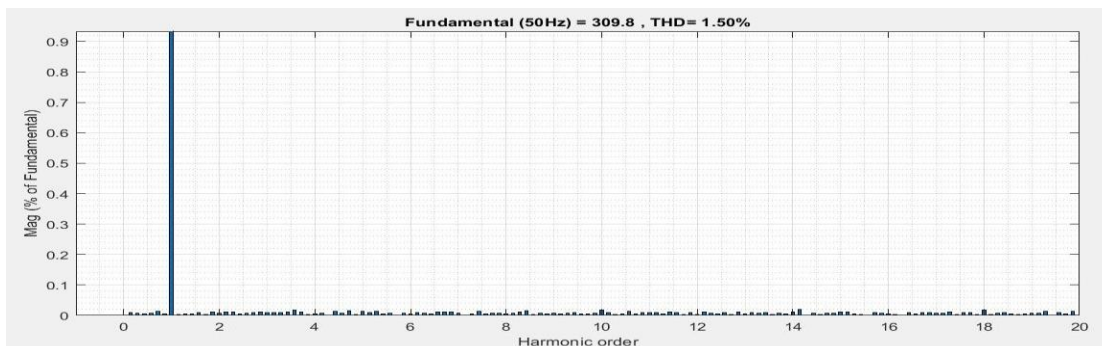
ภาพประกอบ 186 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



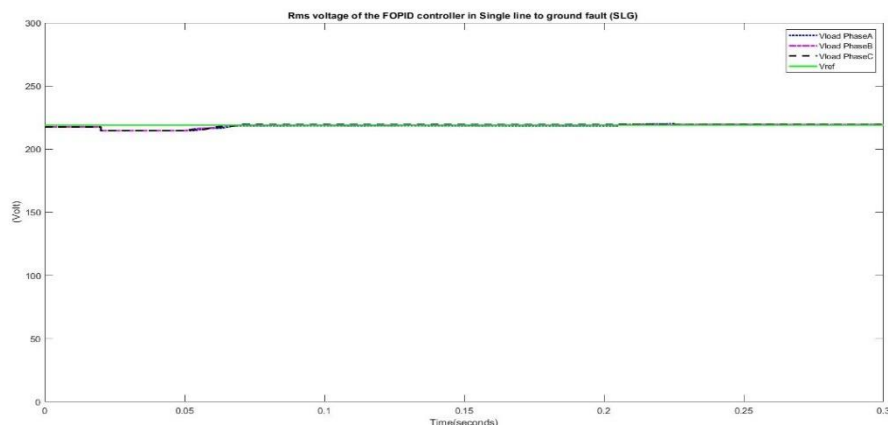
ภาพประกอบ 187 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 188 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 189 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่เกิดในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

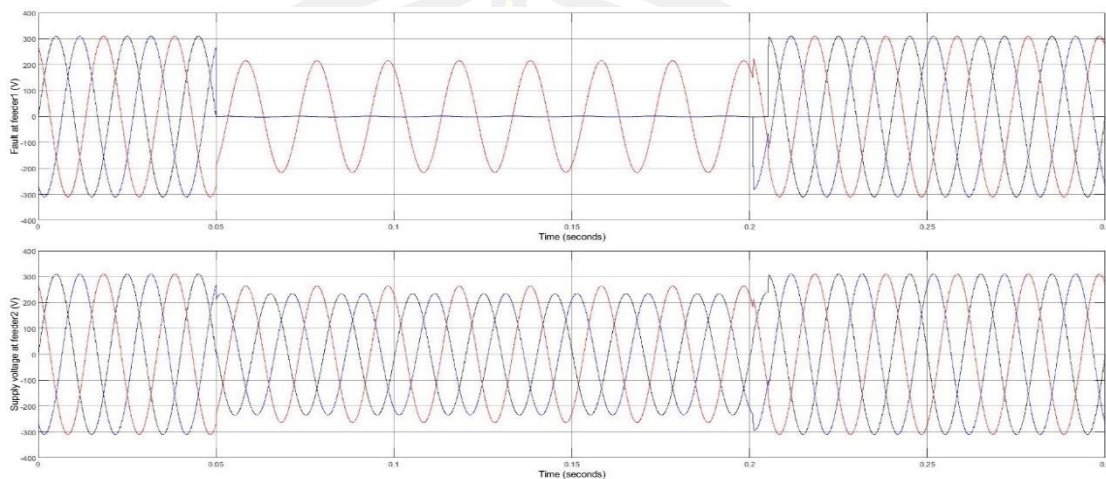


ภาพประกอบ 190 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

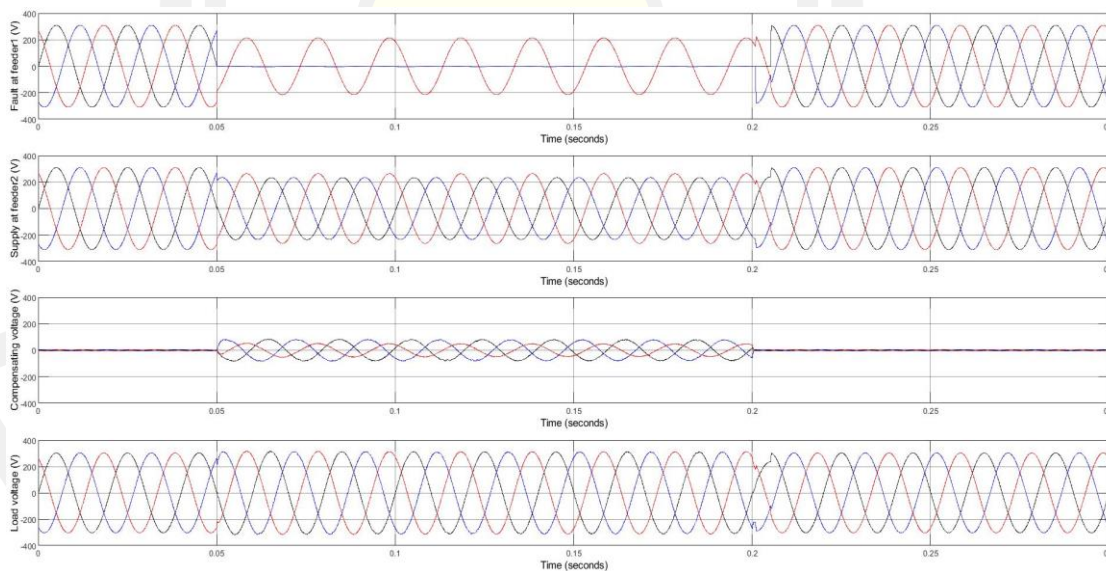
กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน หรือ Single line to ground fault (SLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่าทั้ง 4 ควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำใกล้เคียงกับแรงดันพิกัดได้เป็นอย่างดีและค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินหรือ Double line to ground fault (DLG)

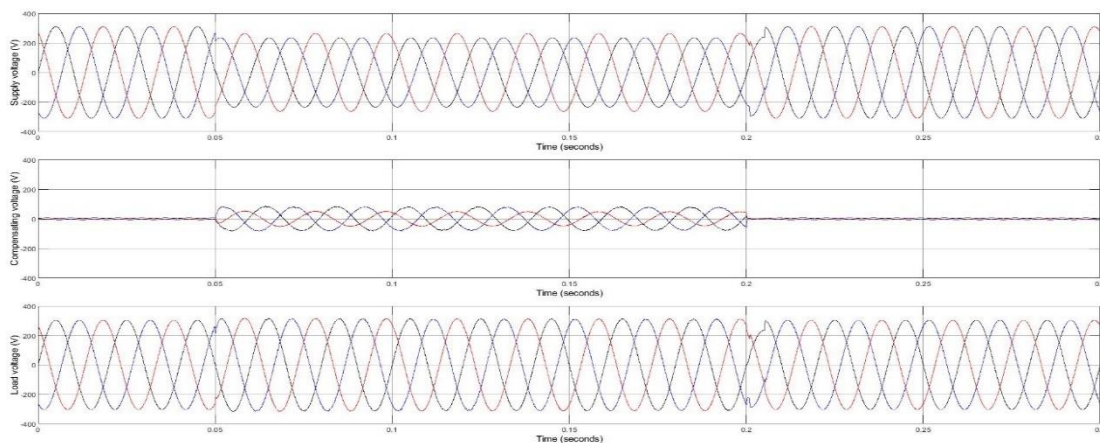
a) ตัวควบคุม PI



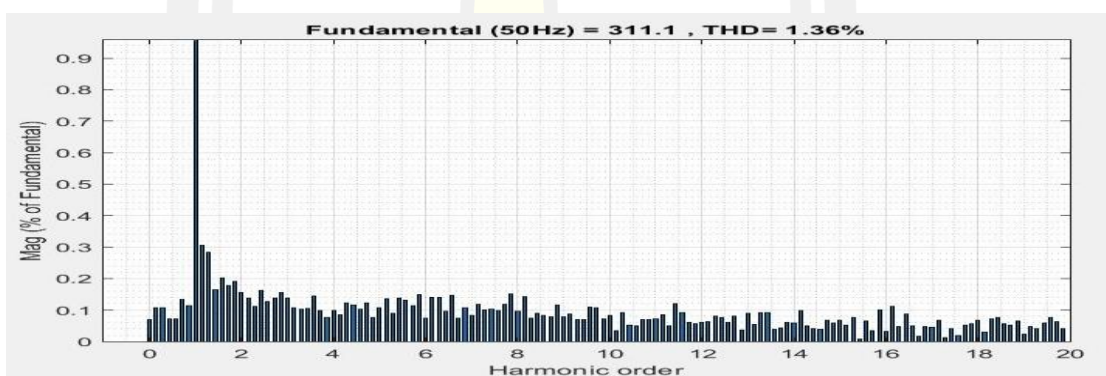
ภาพประกอบ 191 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



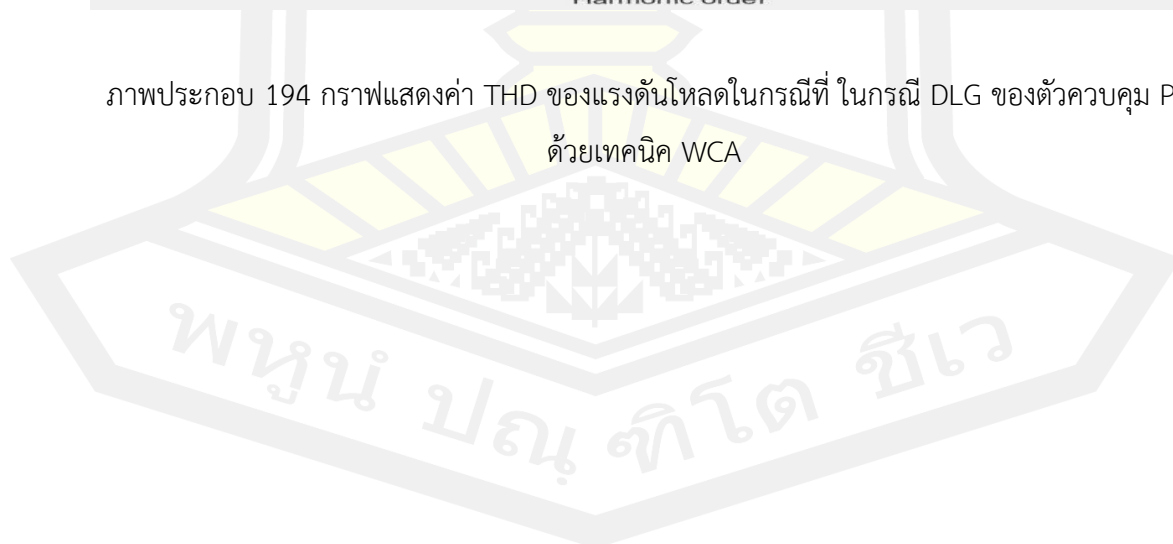
ภาพประกอบ 192 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

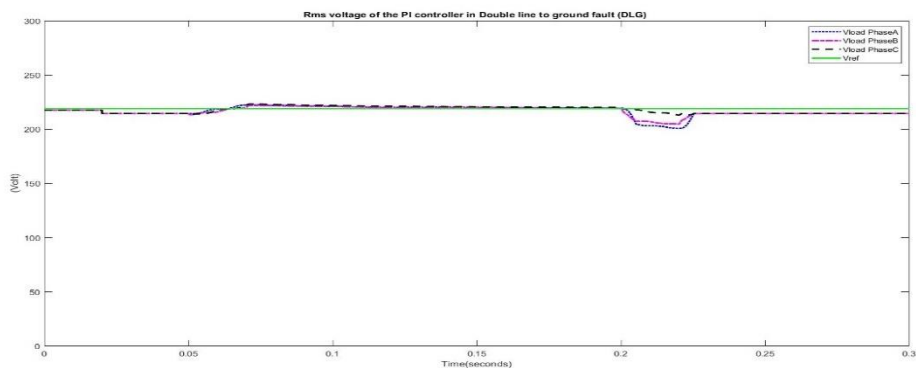


ภาพประกอบ 193 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



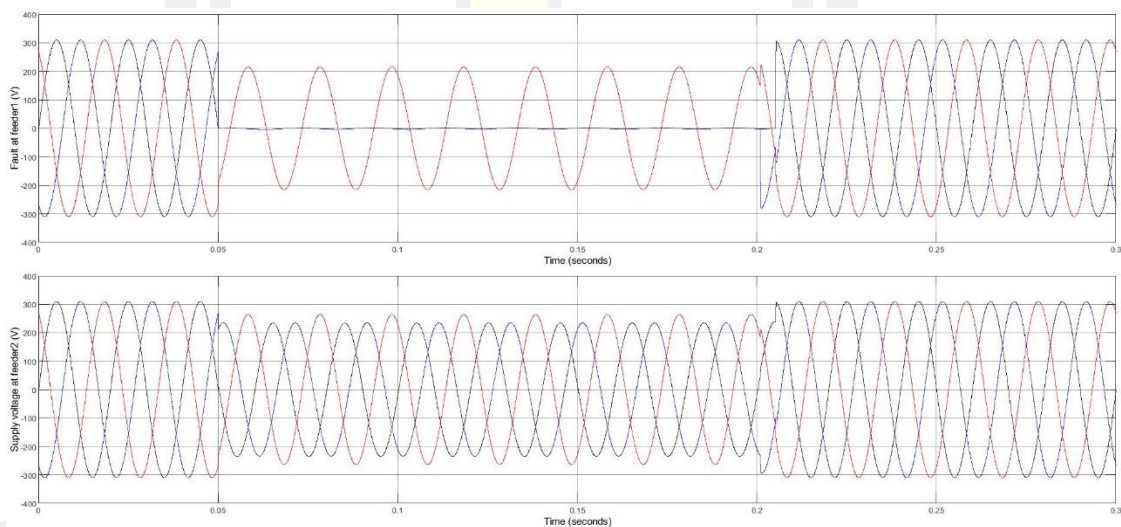
ภาพประกอบ 194 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA



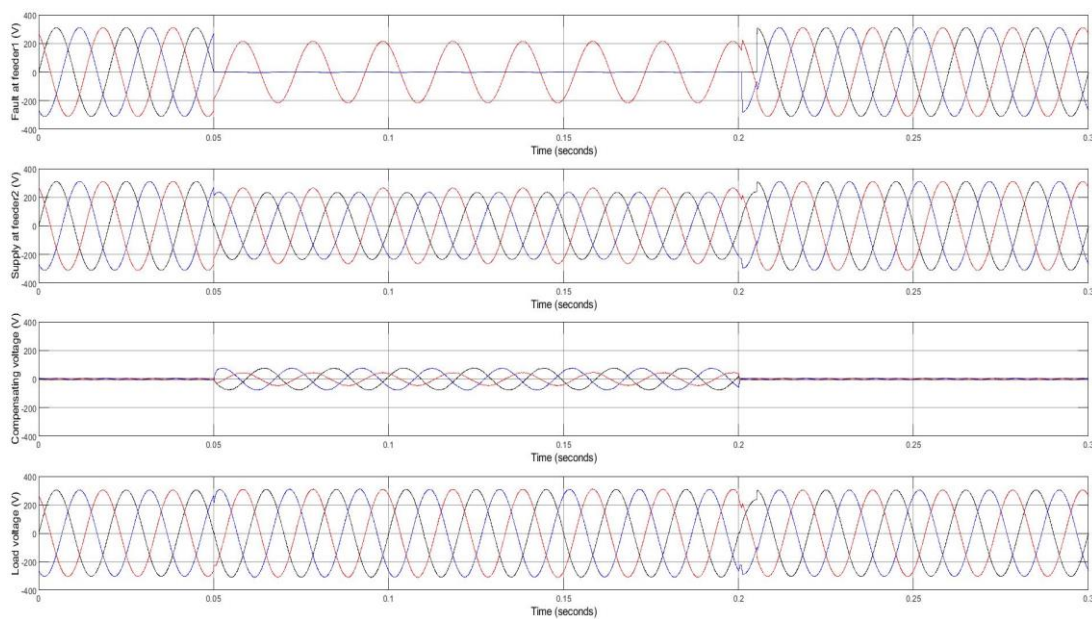


ภาพประกอบ 195 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค WCA

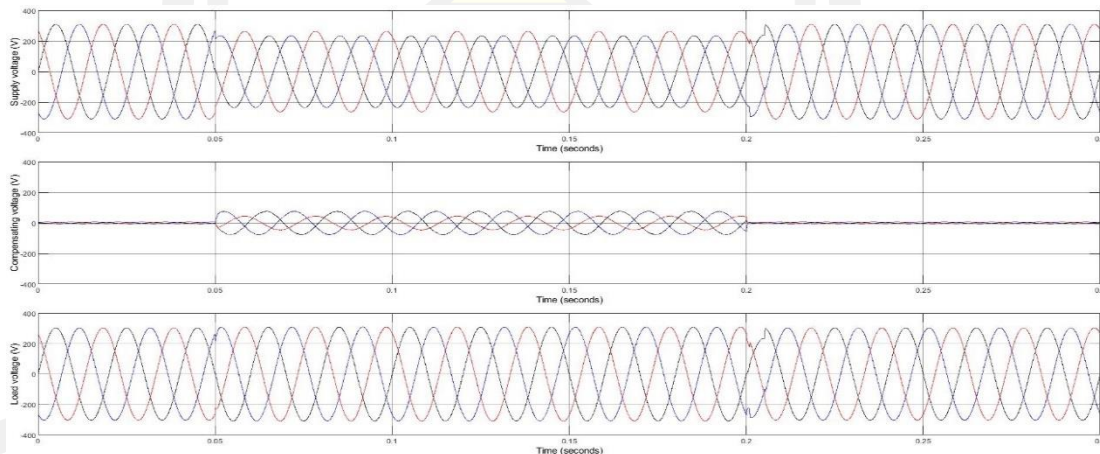
b) ตัวควบคุม PID



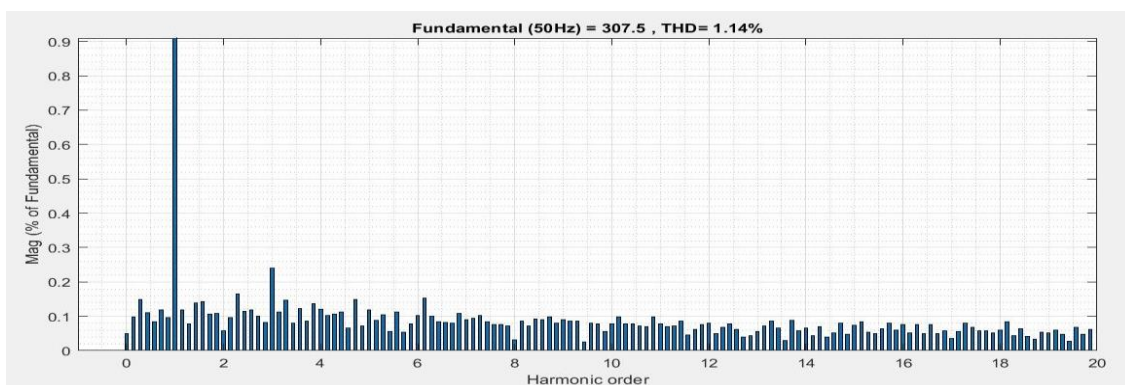
ภาพประกอบ 196 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



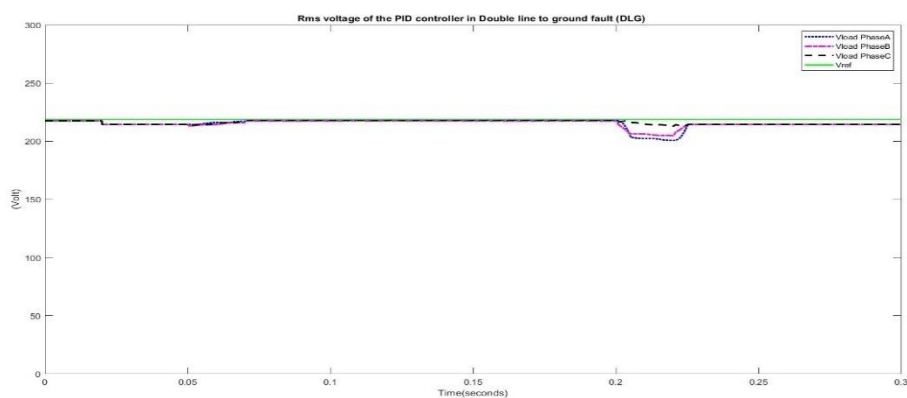
ภาพประกอบ 197 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 198 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



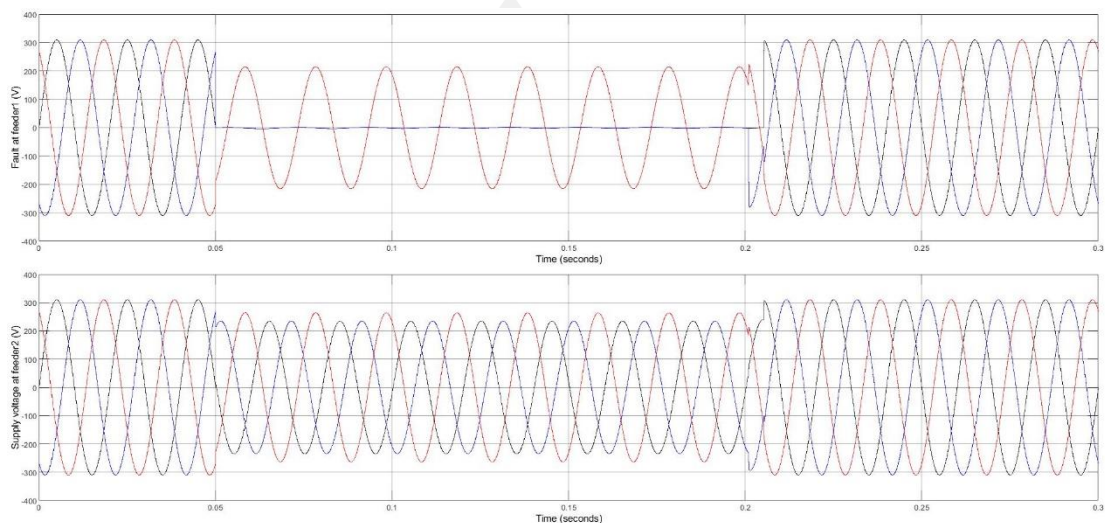
ภาพประกอบ 199 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโพลตในกรณีที ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



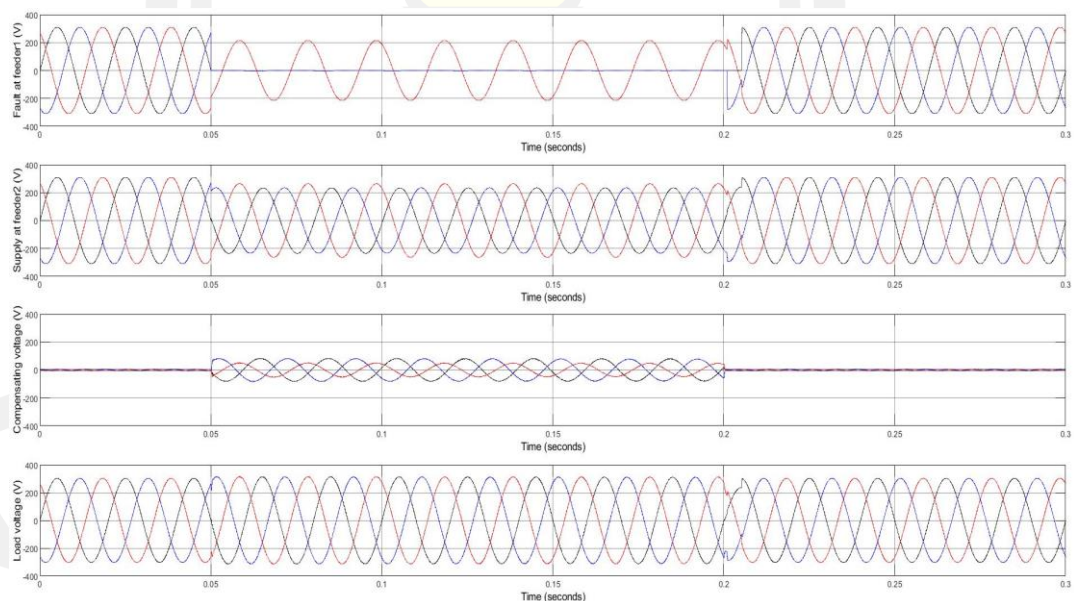
ภาพประกอบ 200 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโพลต ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค WCA



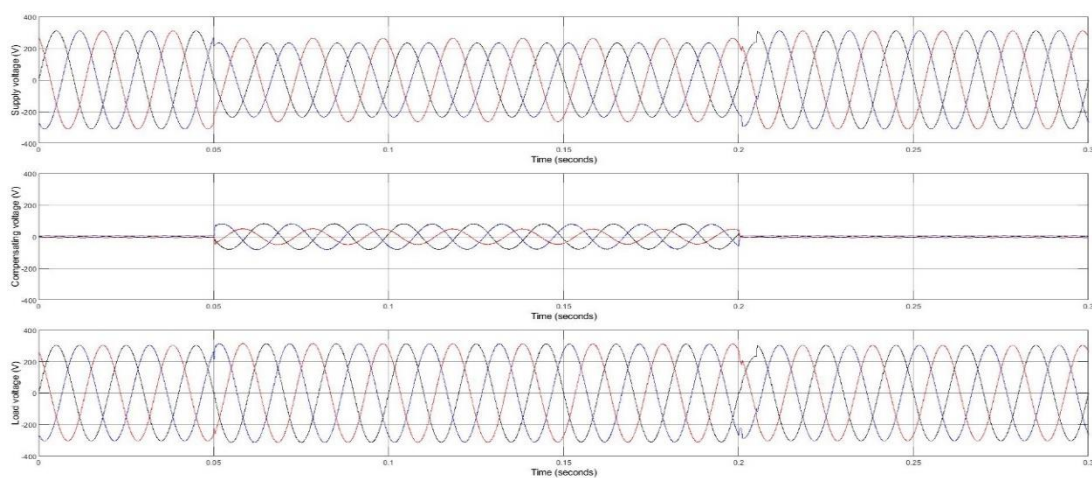
c) ตัวควบคุม FOPI



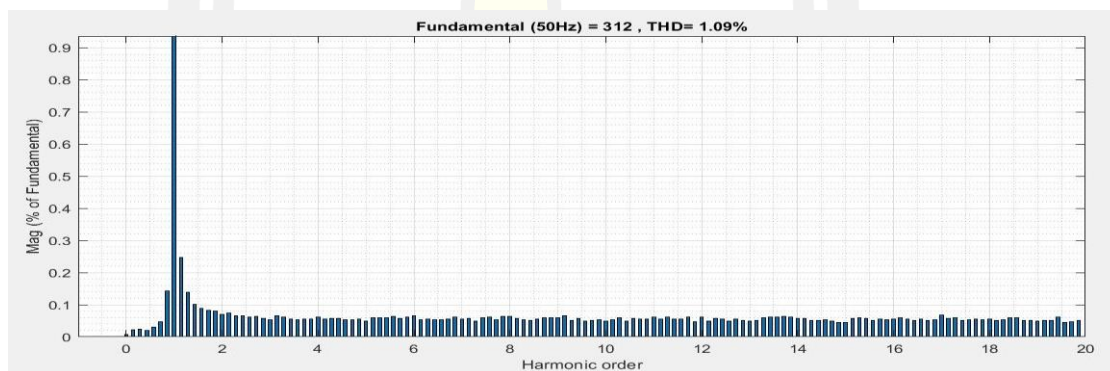
ภาพประกอบ 201 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 202 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

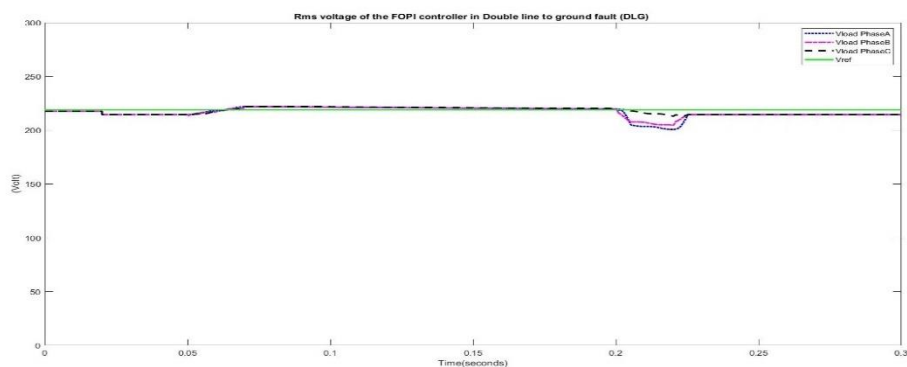


ภาพประกอบ 203 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA



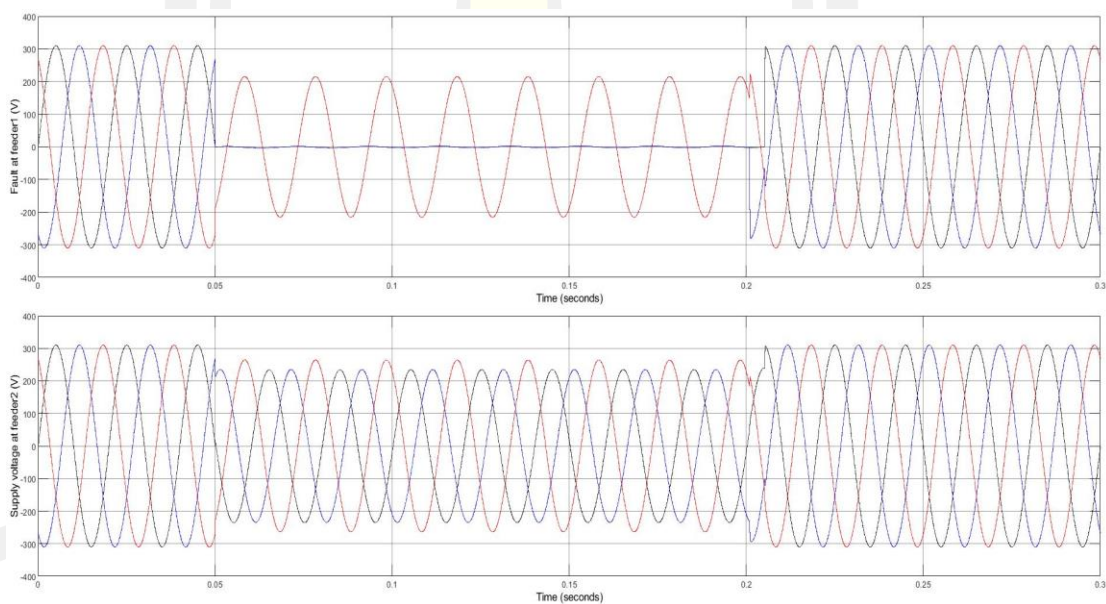
ภาพประกอบ 204 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค WCA

พหุ ประถมศึกษา

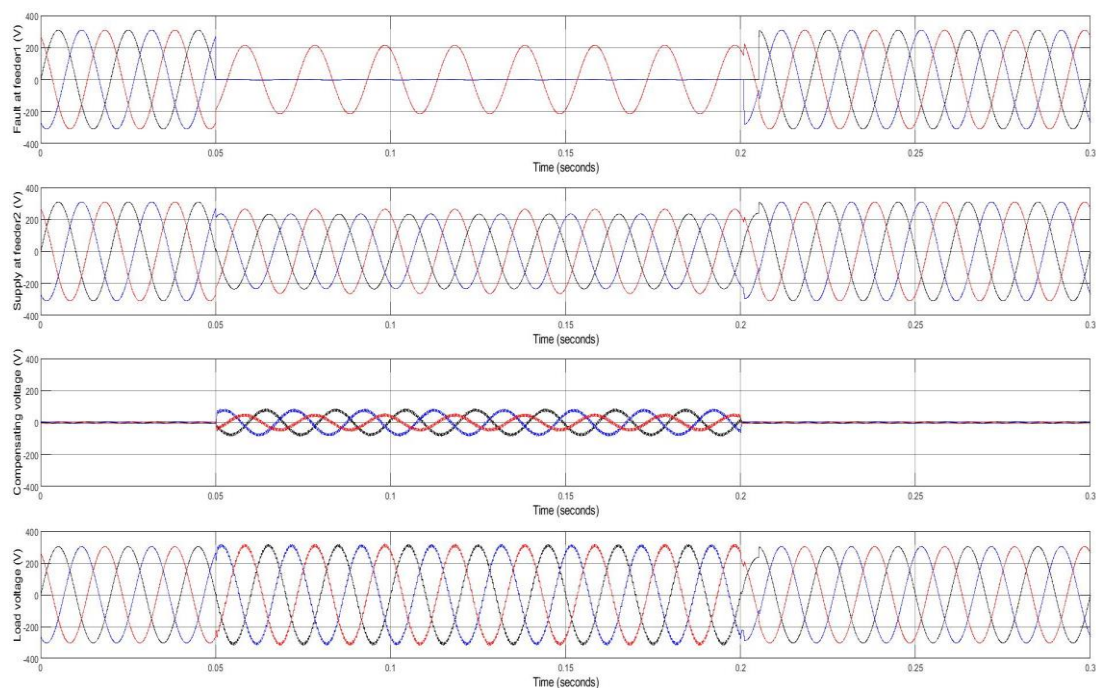


ภาพประกอบ 205 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

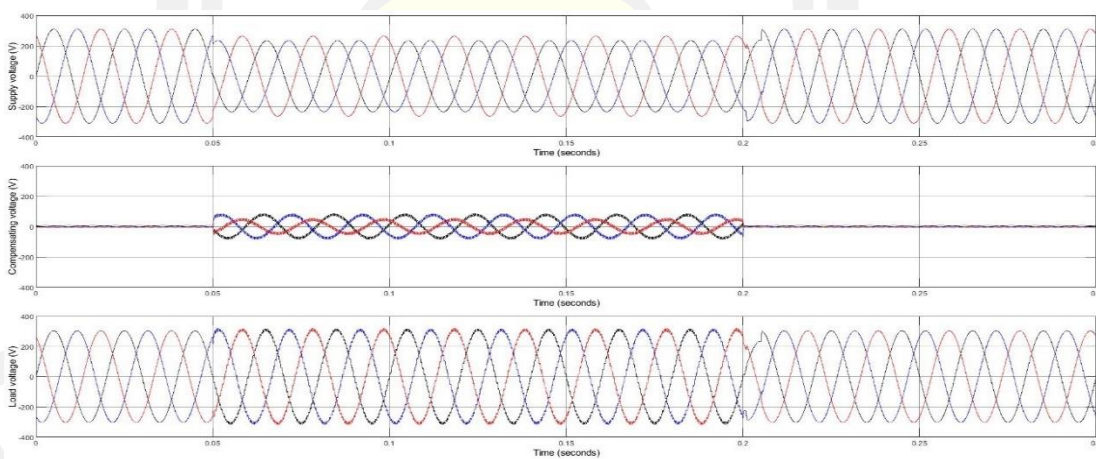
d) ตัวควบคุม FOPID



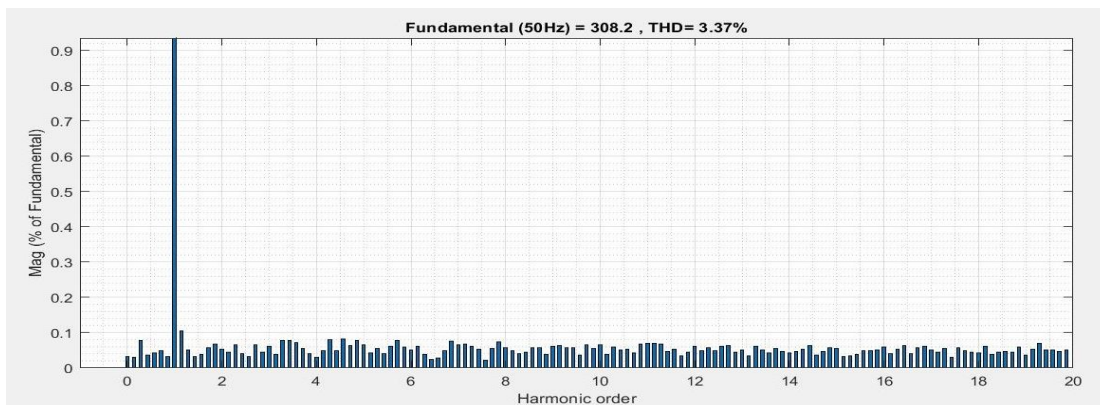
ภาพประกอบ 206 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



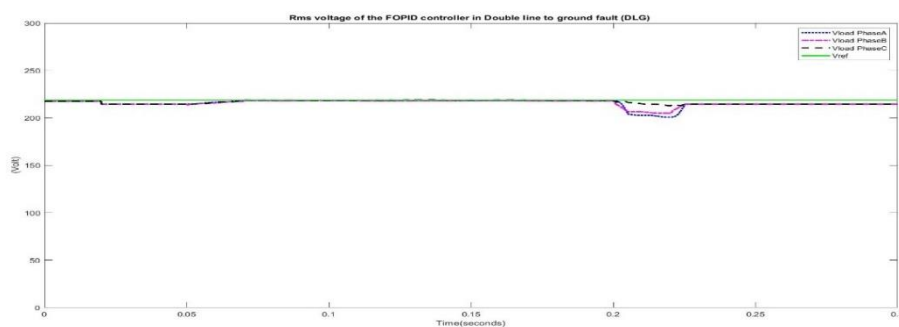
ภาพประกอบ 207 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 208 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 209 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA



ภาพประกอบ 210 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค WCA

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน หรือ Double line to ground fault (DLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลองพบว่าทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โวลต์ได้เป็นอย่างดีและทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 0.61 – 1.04 Cycle (12.25 - 20.84 ms) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 13 ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุม ที่ได้จากเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี พบว่า ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย ITAE ต่ำที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0060

ตัวควบคุม FOPI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0112

ตาราง 15 แสดงค่าการเปรียบเทียบ response time และ %steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 15 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.06	~ 0	16.81	~ 0	17.21	~ 0	16.94	~ 0
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	13.98	1.89	20.84	~ 0	12.25	1.39	19.89	~ 0
Average	15.52	0.95	18.82	0.00	14.73	0.70	18.41	0.00

จากตาราง 15 ในการวิเคราะห์ Response time และ วิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

1. ในกรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน พบว่า ทุกตัวควบคุมจะเกิด Response time ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงเวลา 16.81 ms - 17.21 ms และทุกตัวควบคุม มีค่า % Steady- state error น้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์
2. ในกรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน พบว่า ตัวควบคุม FOPI จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม PID และ FOPID มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ

- จากค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 1-2 ที่ได้จากตารางที่ 15 พบว่า ค่า Response time ตัวควบคุม FOPI จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14.73 ms และในส่วนของค่าเฉลี่ยของ % Steady - state error ของตัวควบคุม PID และ FOPID ใกล้เคียงศูนย์ จะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI และ FOPI (PI = 0.95 % และ FOPI = 0.70 %)

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 16 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมน่วมกับ Water Cycle Algorithm (WCA) ทั้ง 2 กรณีปัญหาของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

ตาราง 16 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.92	0.48	0.69	1.50
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.36	1.14	1.09	3.37
Average	1.14	0.81	0.89	2.44

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากตาราง 16 จะเห็นได้ว่า

- ในกรณีที่ 1 พอลต์ระหว่างไลน์กับดินตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 0.48$ % ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 0.92$ %, $THD_{FOPI} = 0.69$ %, $THD_{FOPID} = 1.50$ %)
- ในกรณีที่ 2 พอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินตัวควบคุม FOPI จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{FOPI} = 1.09$ % ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 1.36$ %, $THD_{PID} = 1.14$ %, $THD_{FOPID} = 3.37$ %)

ซึ่งจากตาราง 16 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม FOPID จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม PID จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 18.82 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error ใกล้เคียงศูนย์และค่าเฉลี่ย THD = 0.81% ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหา คือ ตัวควบคุม PI ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 15.52 ms ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 0.95 % และค่าเฉลี่ย THD = 1.14 % ตามลำดับ และเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 50 นาที

4.2.2 เทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

ตาราง 17 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี

ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

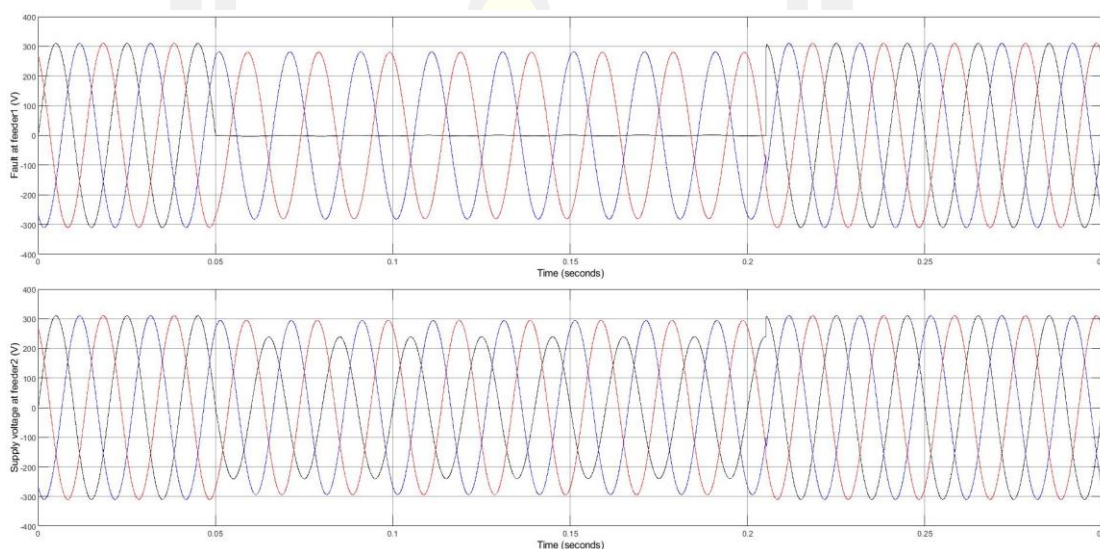
Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
PSO	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.1028	0.1963				0.0126	50.28
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5204	15.4466				0.0102	51.02
		Average						0.0114	50.65
	PID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	11.6929	0.01			0.0071	53.79
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	30	6.8415	1.3122			0.0050	52.51
		Average						0.0061	53.15
	FOPI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0549	2.9763		1.6896		0.0126	48.88
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.491	28.6463	0.01	1.2203	0.0225	0.0102	47.98
		Average						0.0114	48.43
	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.3057	1.1159	0.2682	0.1	0.1317	0.0125	51.94
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	28.9788	29.8963	0.8511	0.1	0.9937	0.0047	52.05

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			K_p	K_i	K_d	λ	μ		
		Average						0.0086	51.99

โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบ 211 ถึง 250

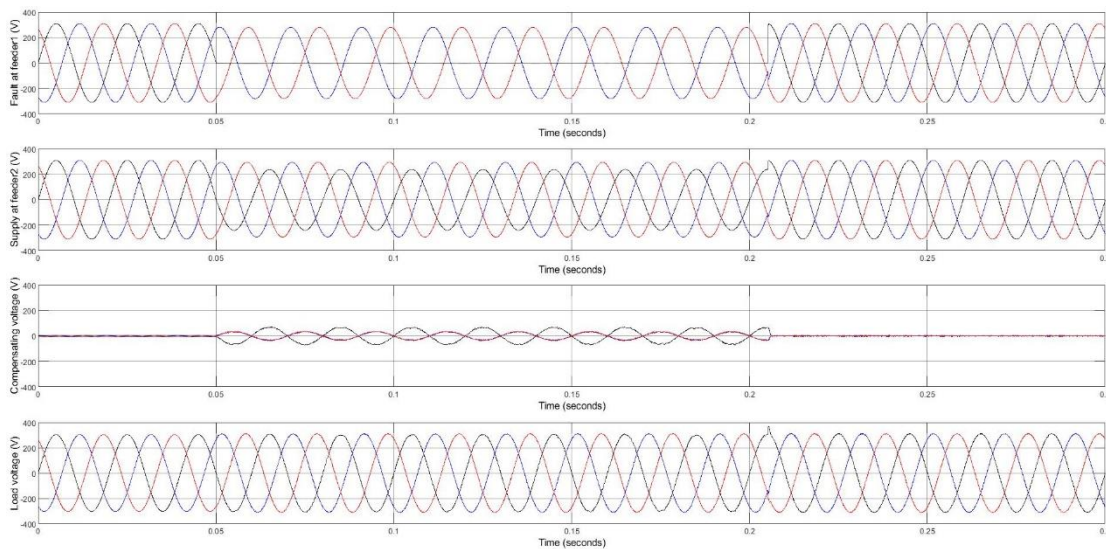
กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินหรือ Single line to ground fault (SLG)

a) ตัวควบคุม PI

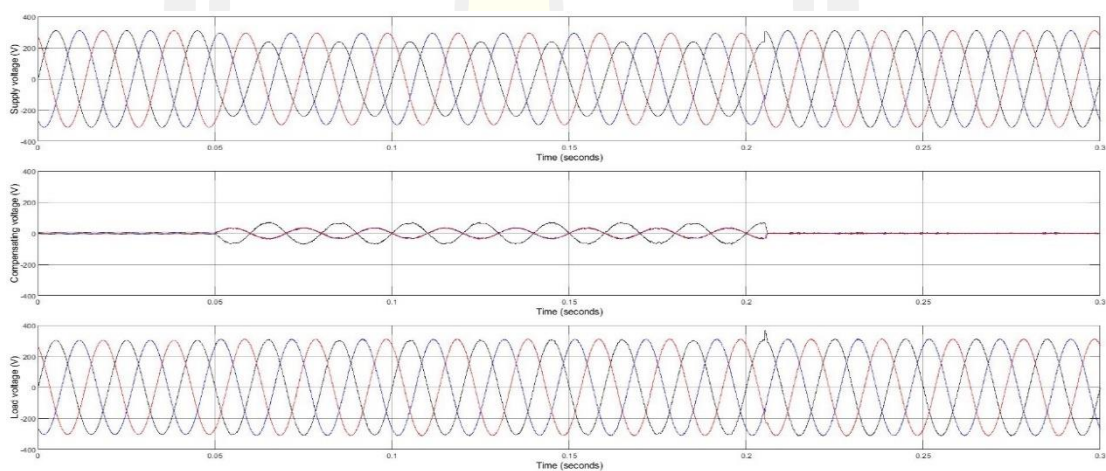


ภาพประกอบ 211 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

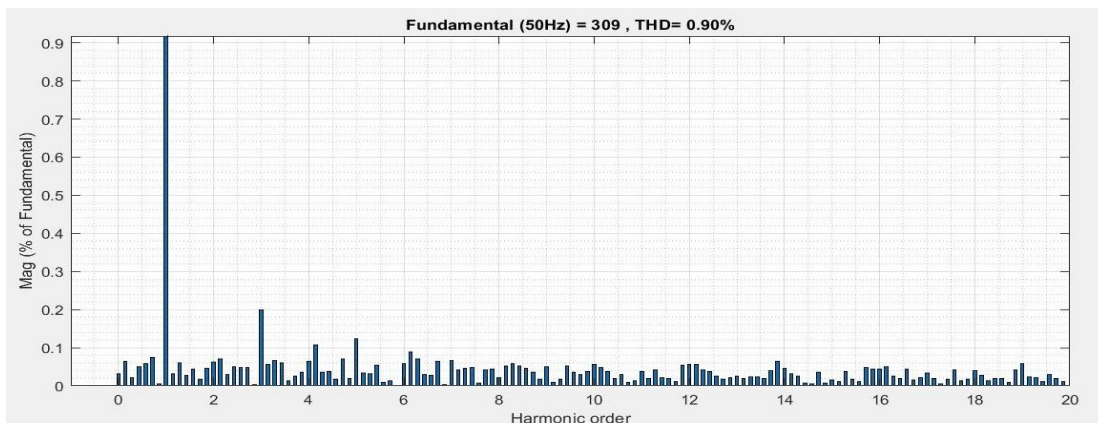
พหุบัณฑิต ชีวะ



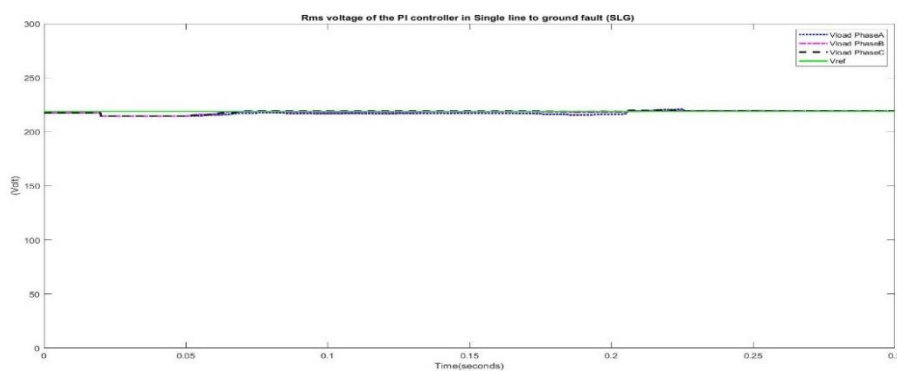
ภาพประกอบ 212 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



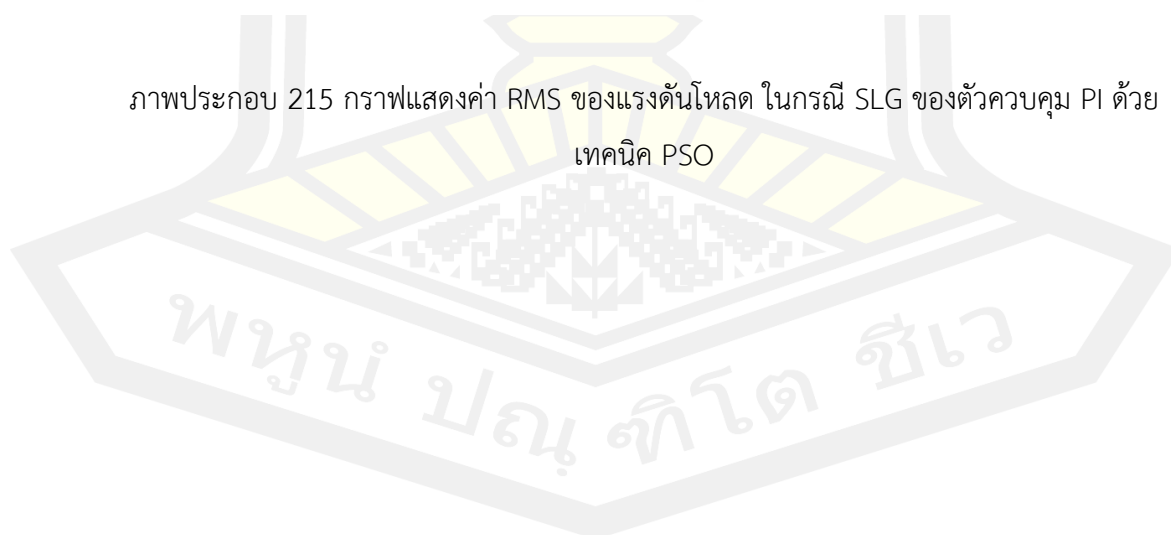
ภาพประกอบ 213 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



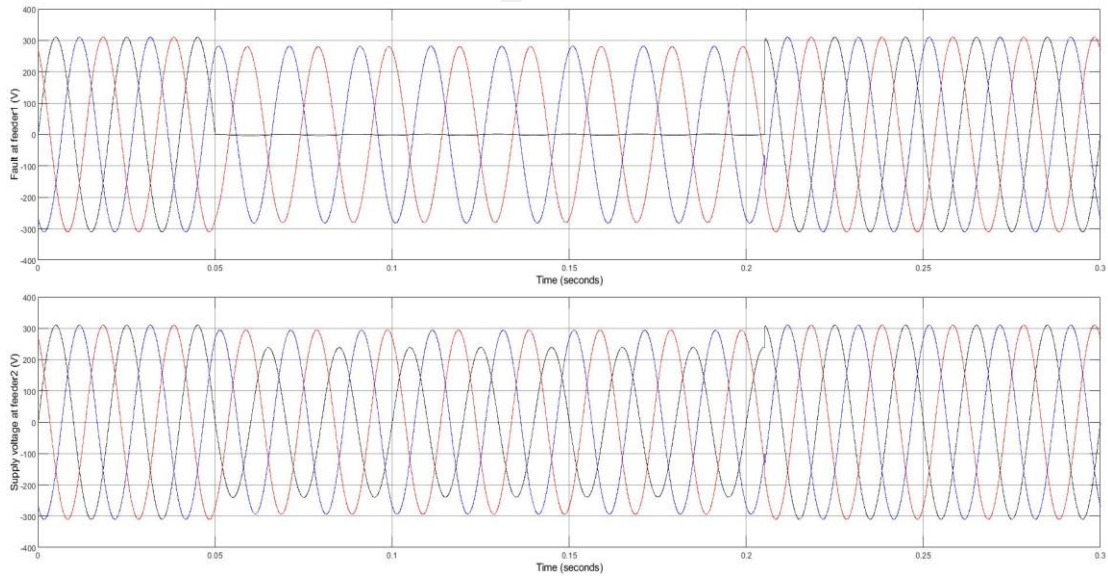
ภาพประกอบ 214 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่เกิดในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



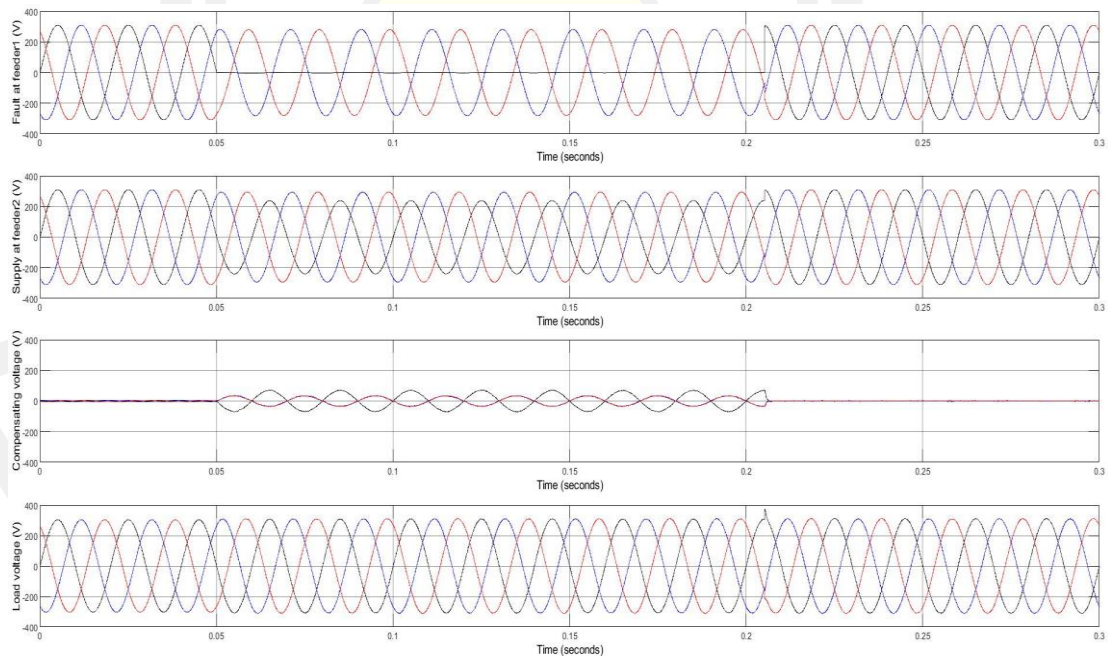
ภาพประกอบ 215 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



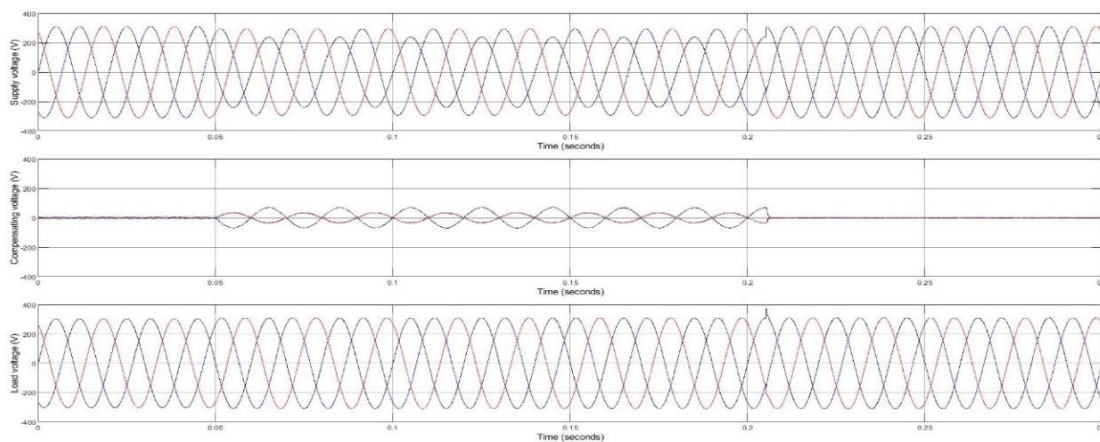
b) ตัวควบคุม PID



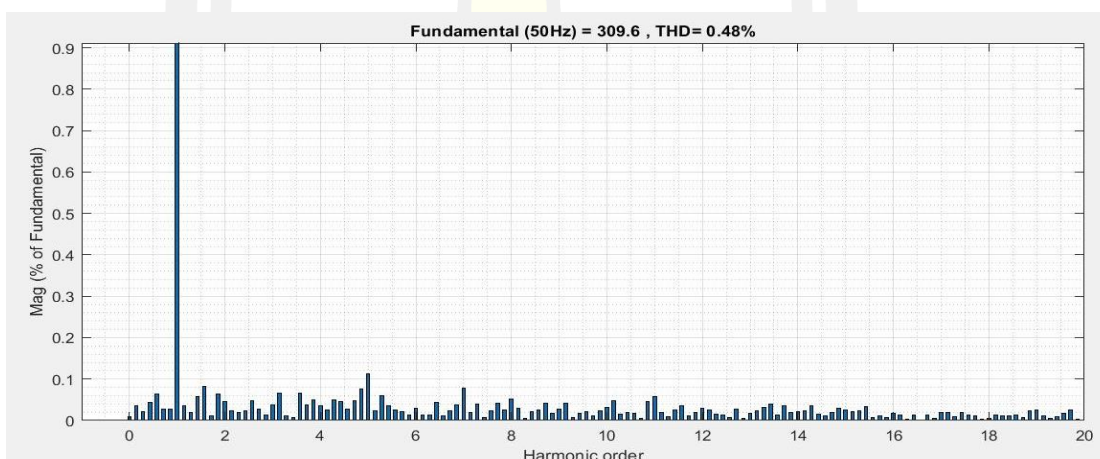
ภาพประกอบ 216 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 217 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

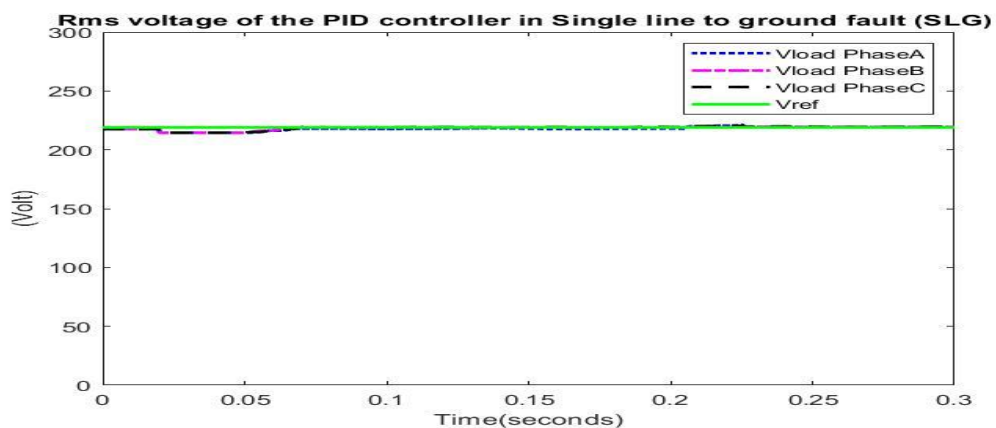


ภาพประกอบ 218 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



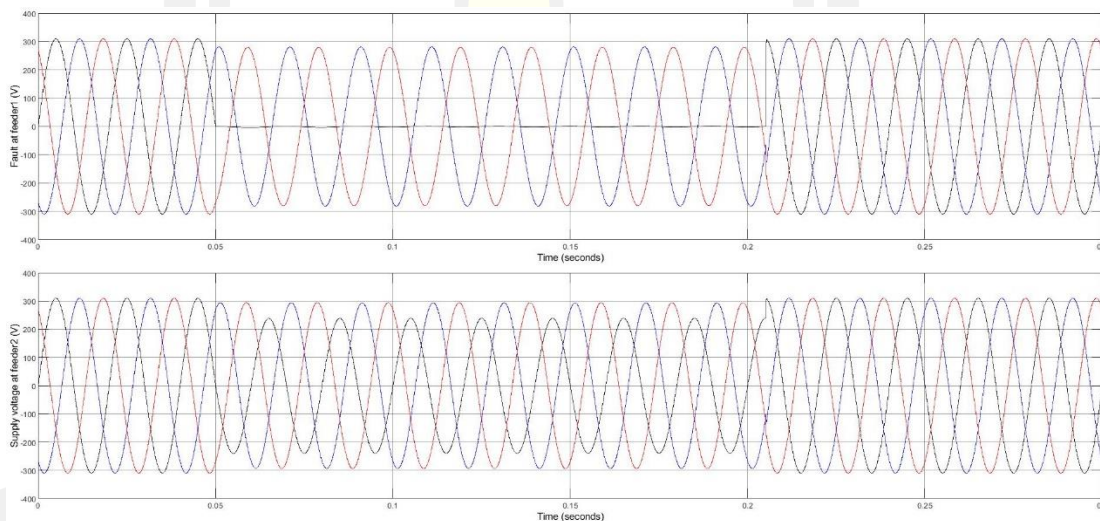
ภาพประกอบ 219 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

พหุ ประถม วิชา

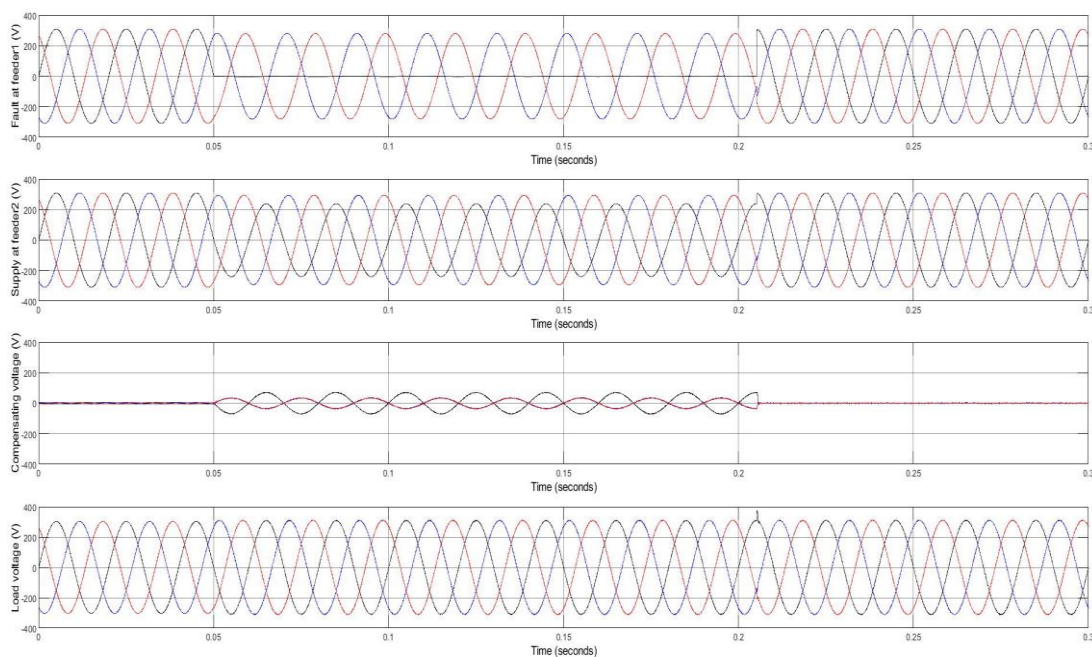


ภาพประกอบ 220 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

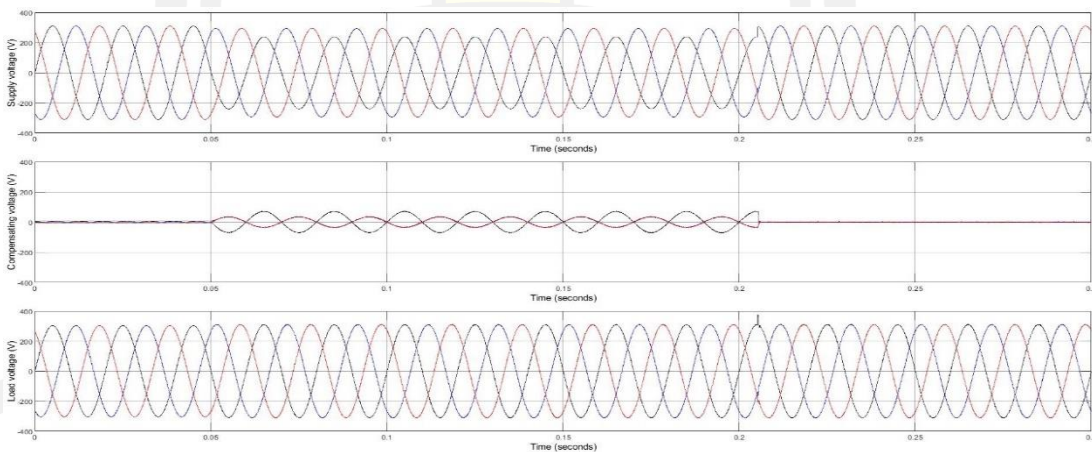
c) ตัวควบคุม FOPI



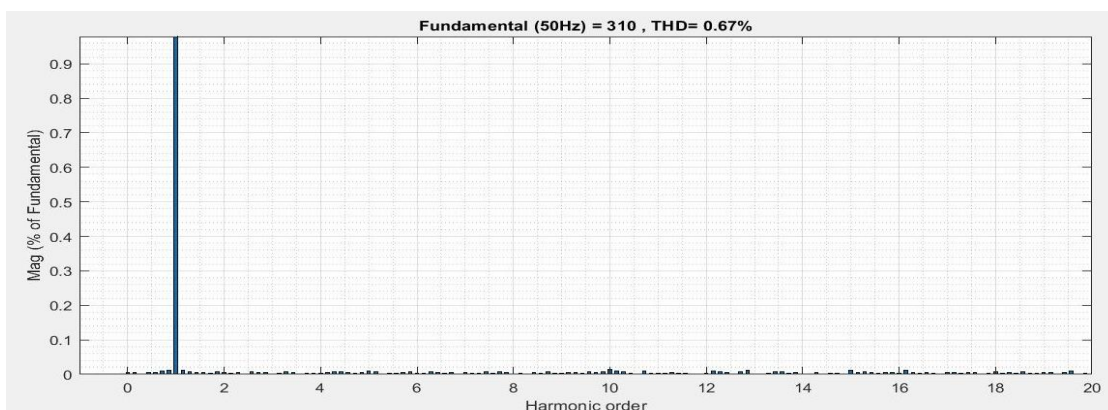
ภาพประกอบ 221 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



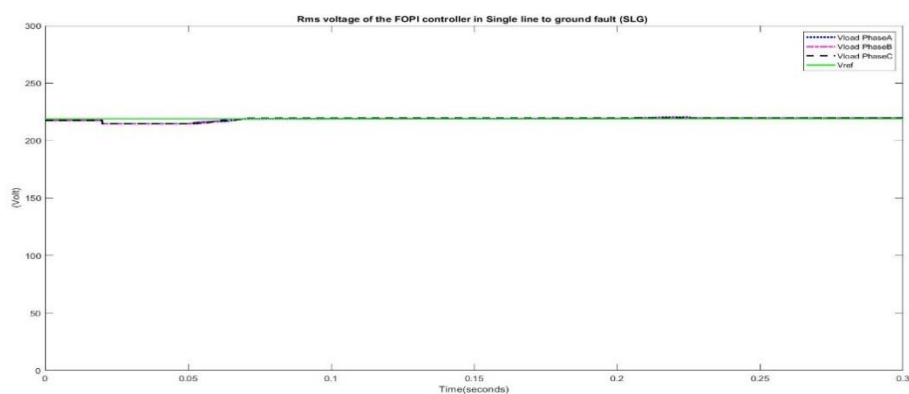
ภาพประกอบ 222 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



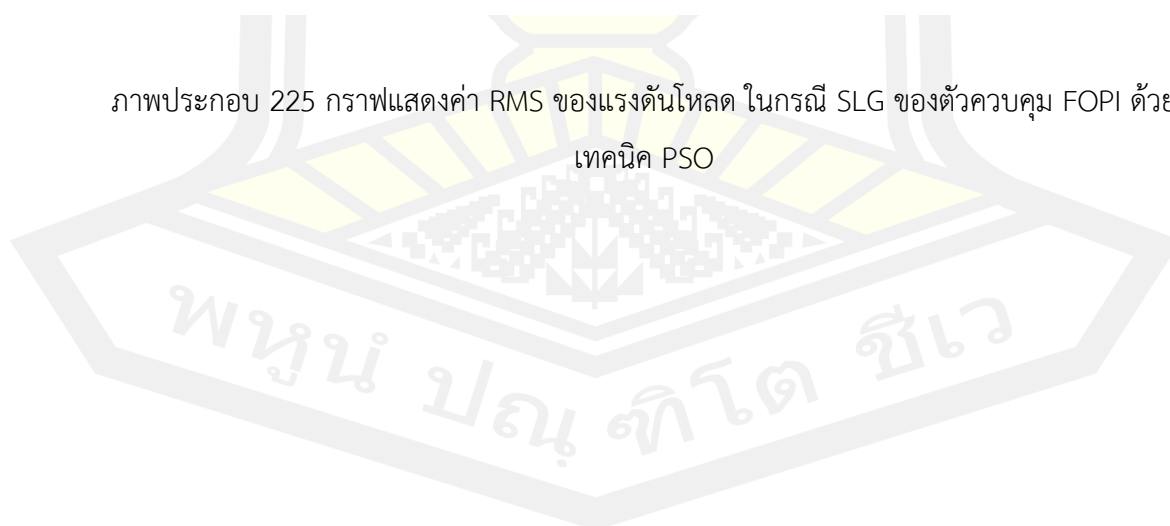
ภาพประกอบ 223 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



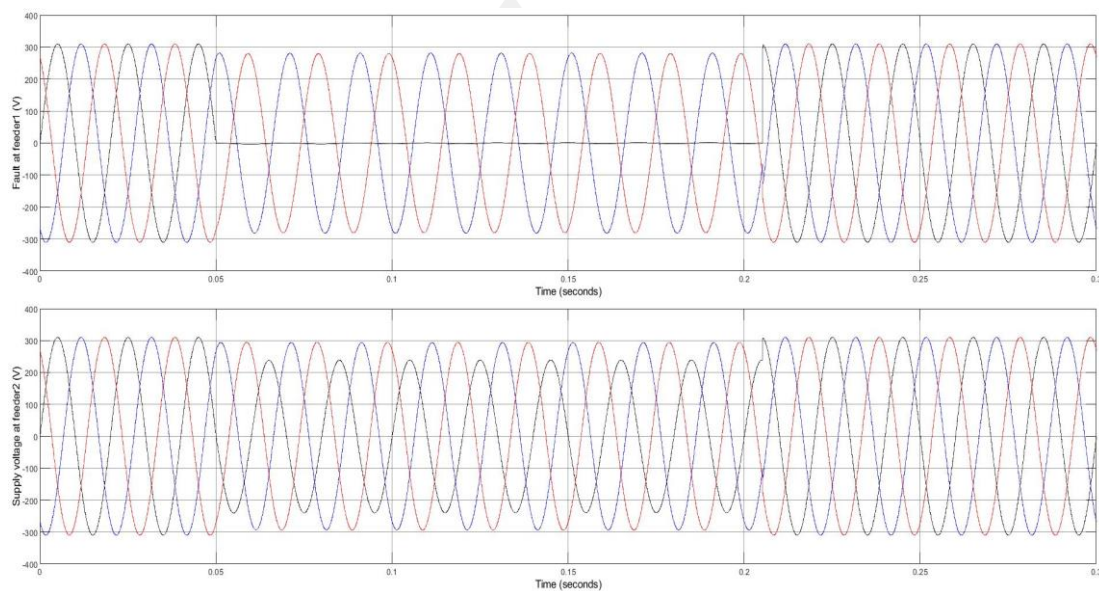
ภาพประกอบ 224 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



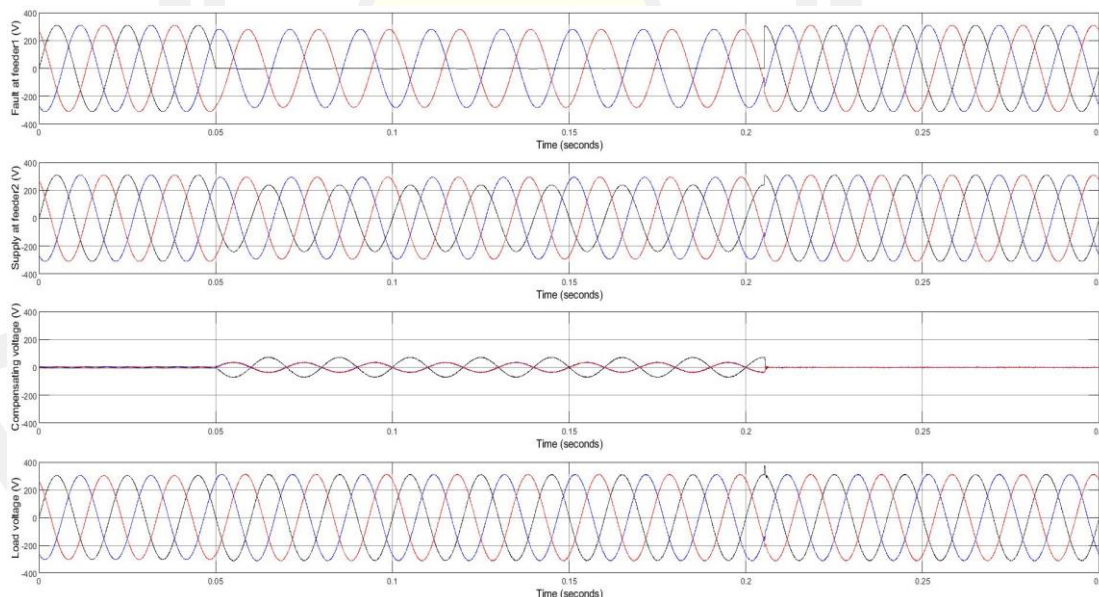
ภาพประกอบ 225 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



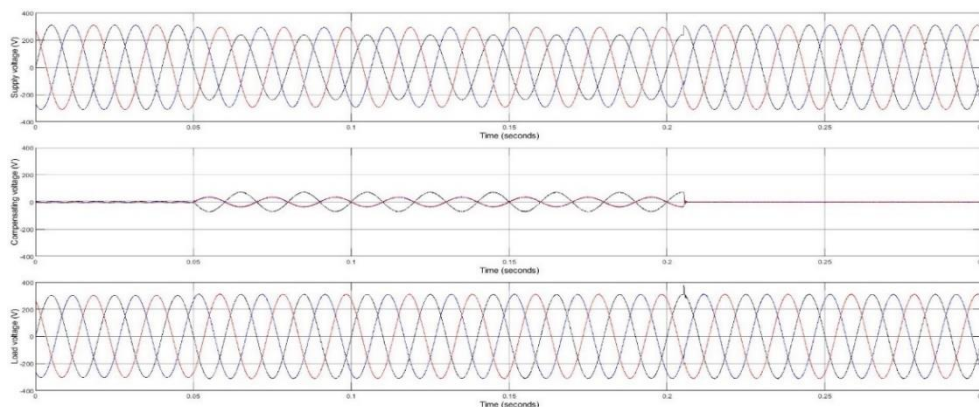
d) ตัวควบคุม FOPID



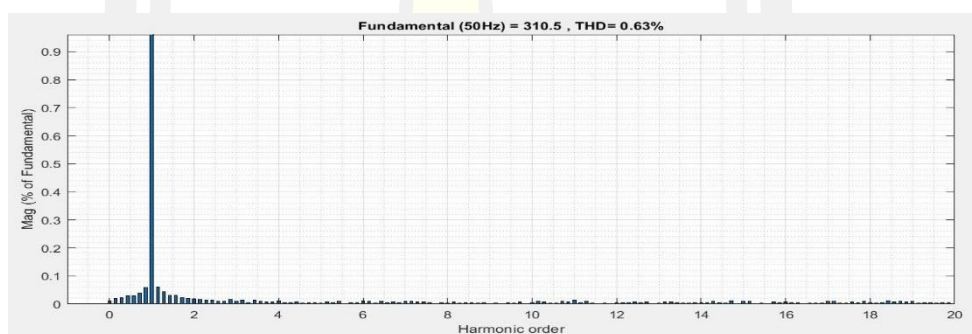
ภาพประกอบ 226 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



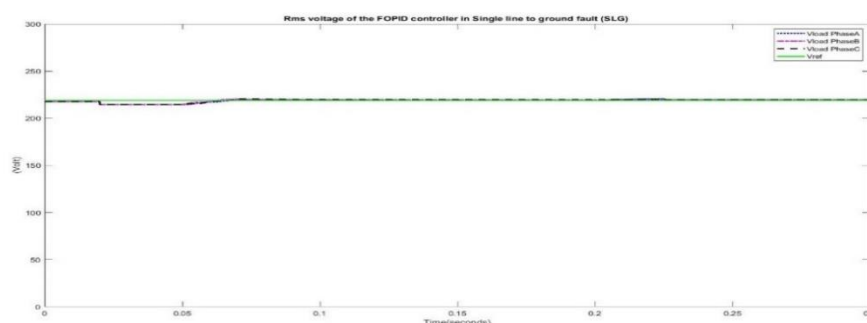
ภาพประกอบ 227 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 228 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 229 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

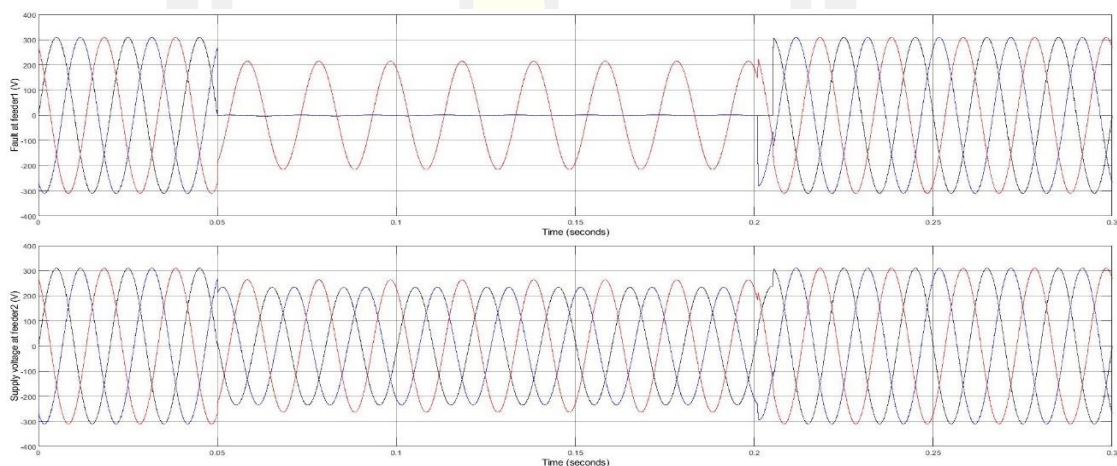


ภาพประกอบ 230 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน หรือ Single line to ground fault (SLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักคืนแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec จากผลการจำลองพบว่าทั้ง 4 ตัวควบคุม สามารถชดเชยแรงดันที่โหลดได้เป็นอย่างดีและทั้ง 4 ตัวควบคุมใช้เวลาในการชดเชยระหว่าง 0.67 – 0.89 Cycle (13.98 - 17.88 ms) อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48] และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

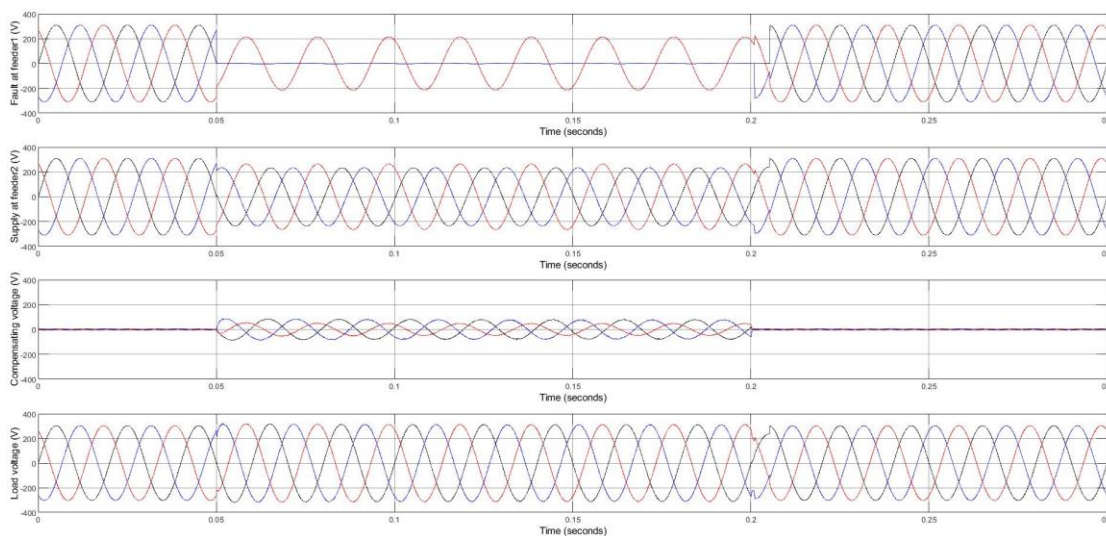
กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินหรือ Double line to ground fault (DLG)

a) ตัวควบคุม PI

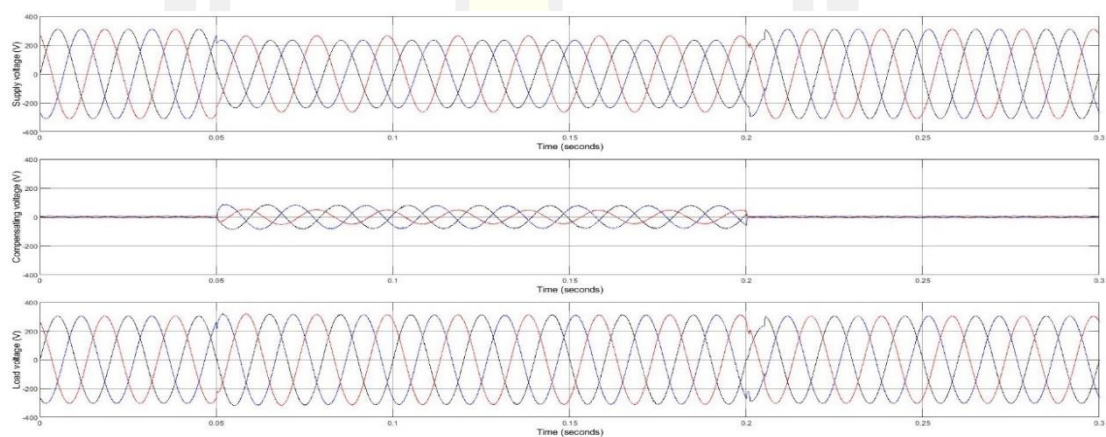


ภาพประกอบ 231 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

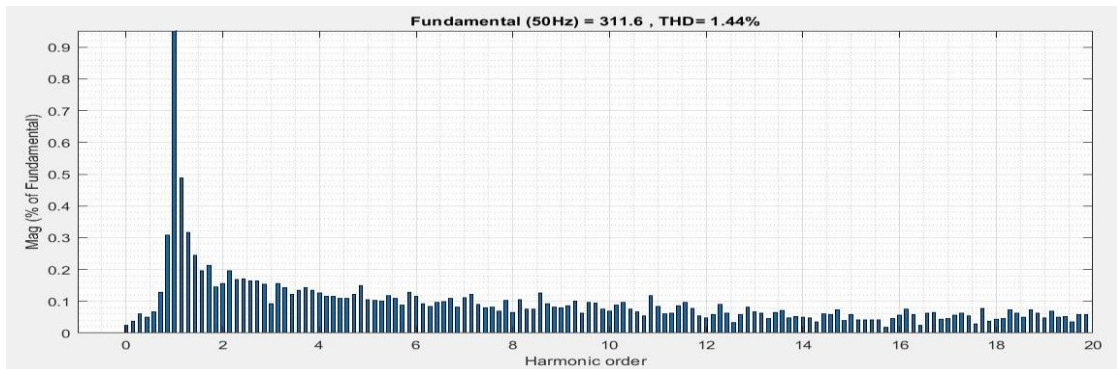


ภาพประกอบ 232 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

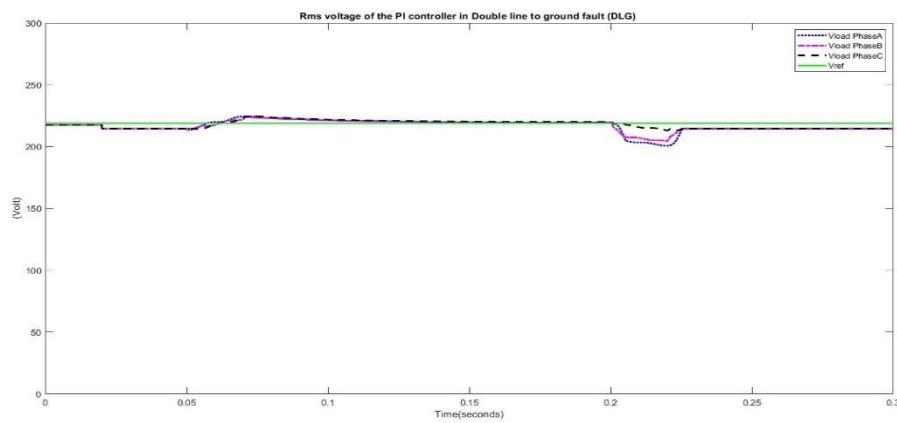


ภาพประกอบ 233 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO

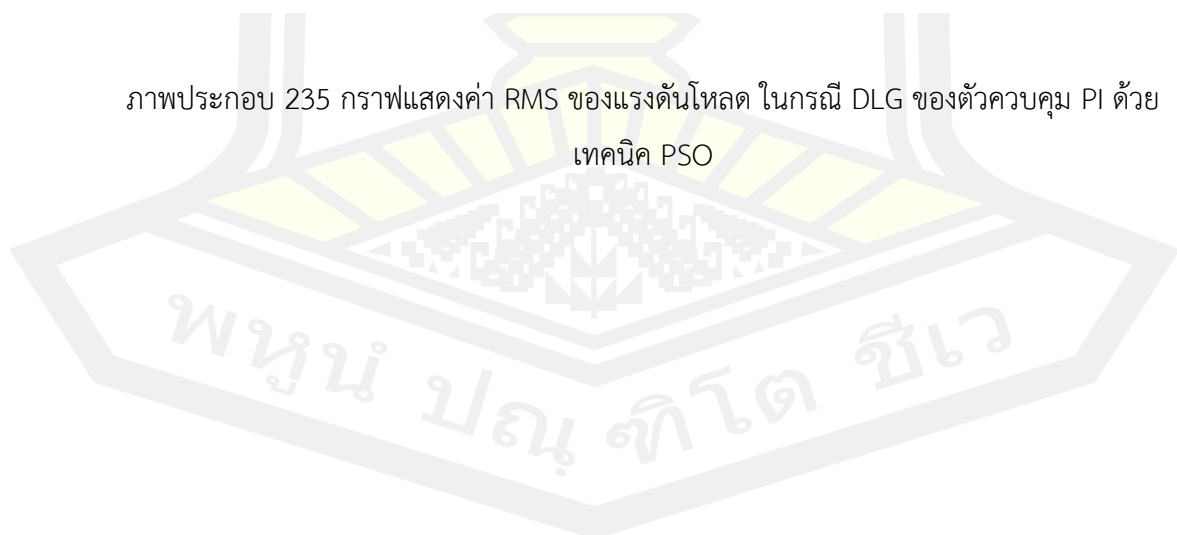
พหุบัณฑิต ชีวะ



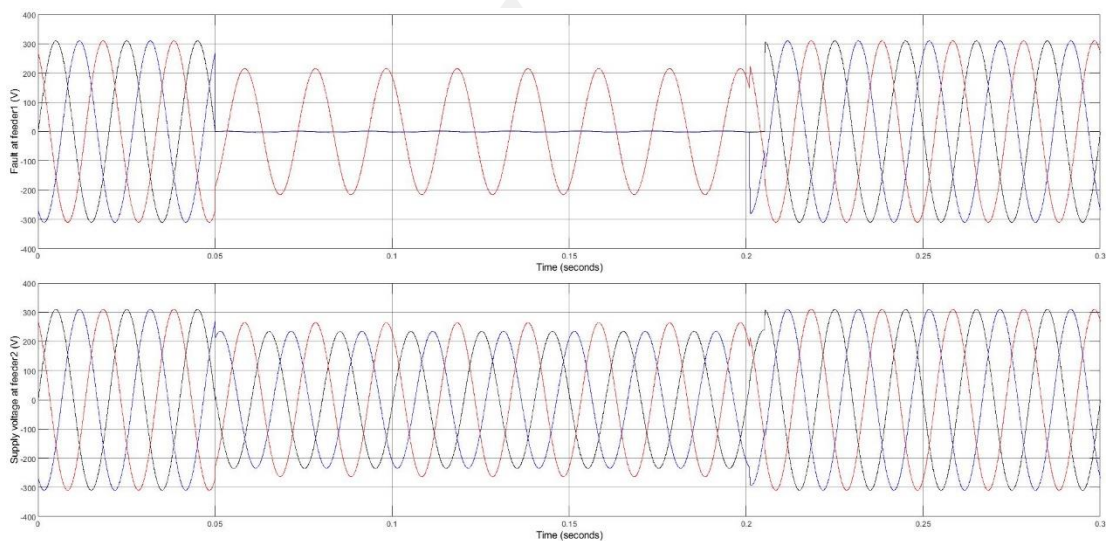
ภาพประกอบ 234 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่เกิดในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



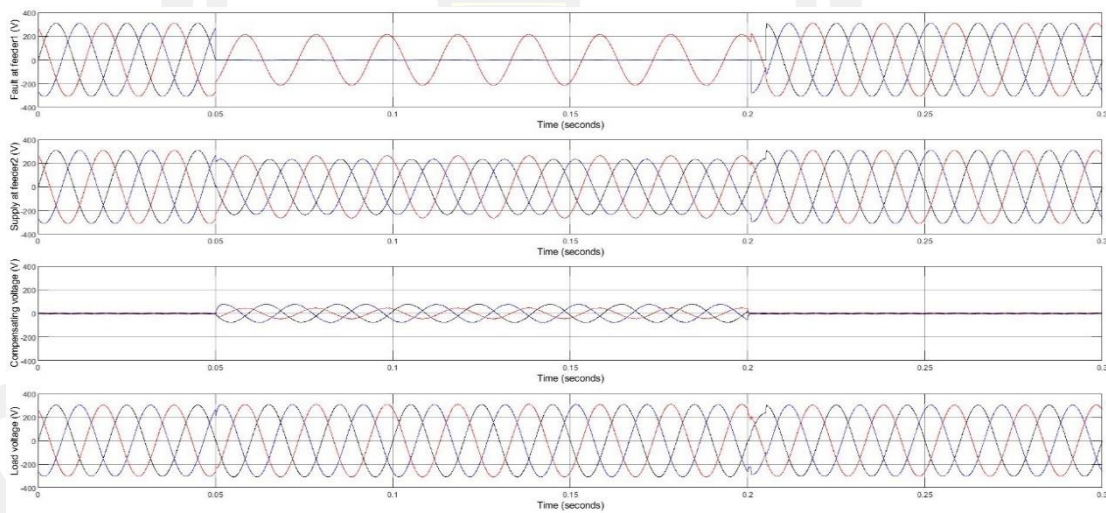
ภาพประกอบ 235 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค PSO



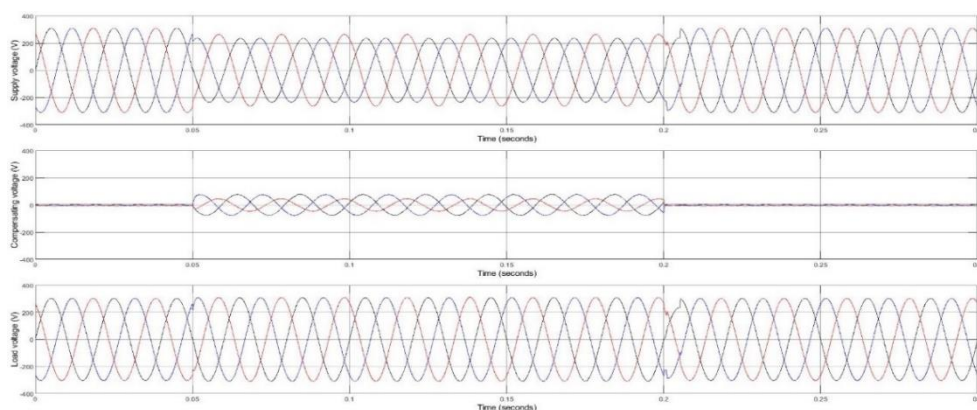
b) ตัวควบคุม PID



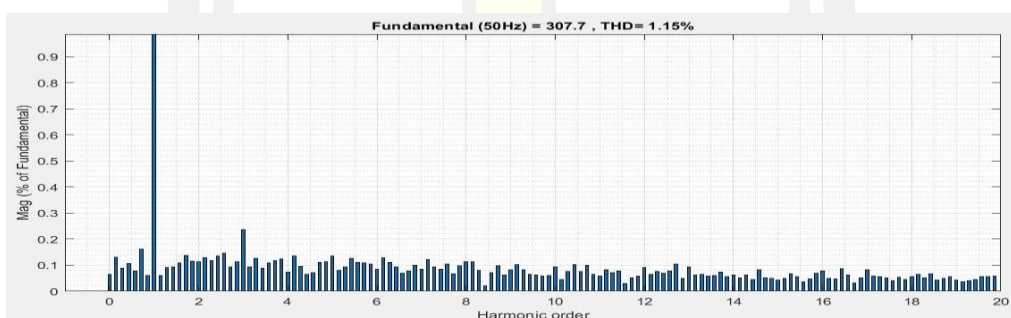
ภาพประกอบ 236 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



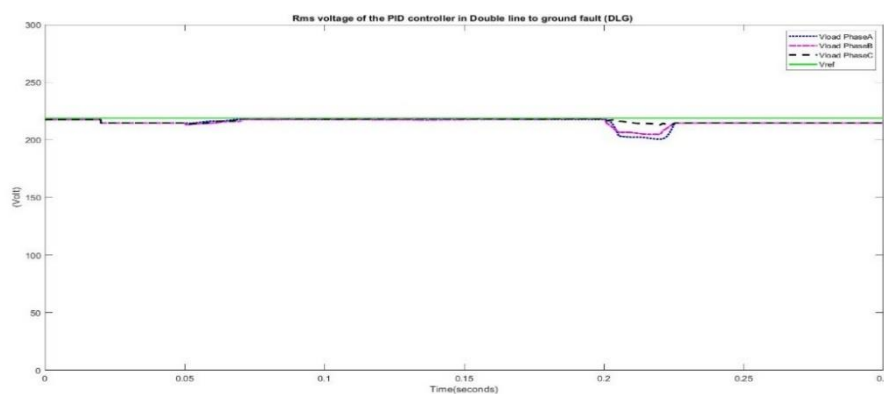
ภาพประกอบ 237 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 238 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

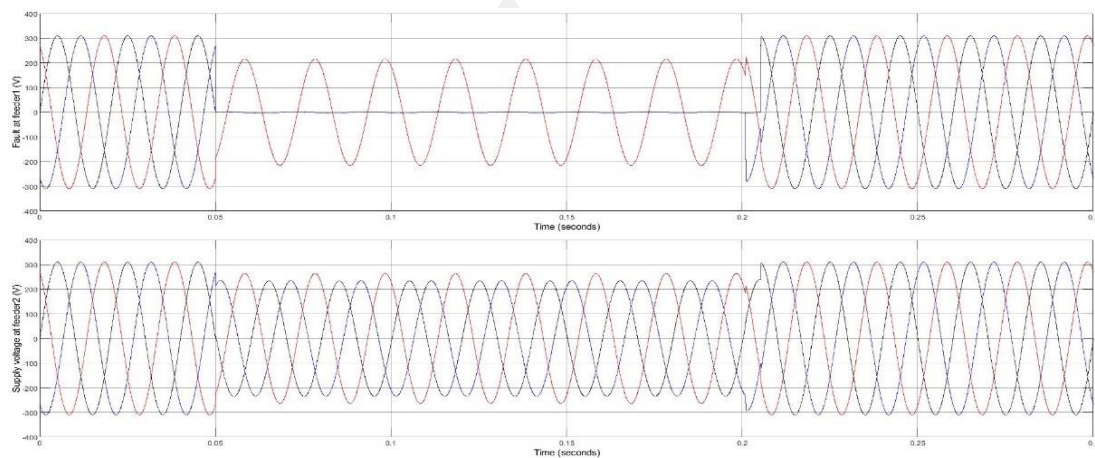


ภาพประกอบ 239 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

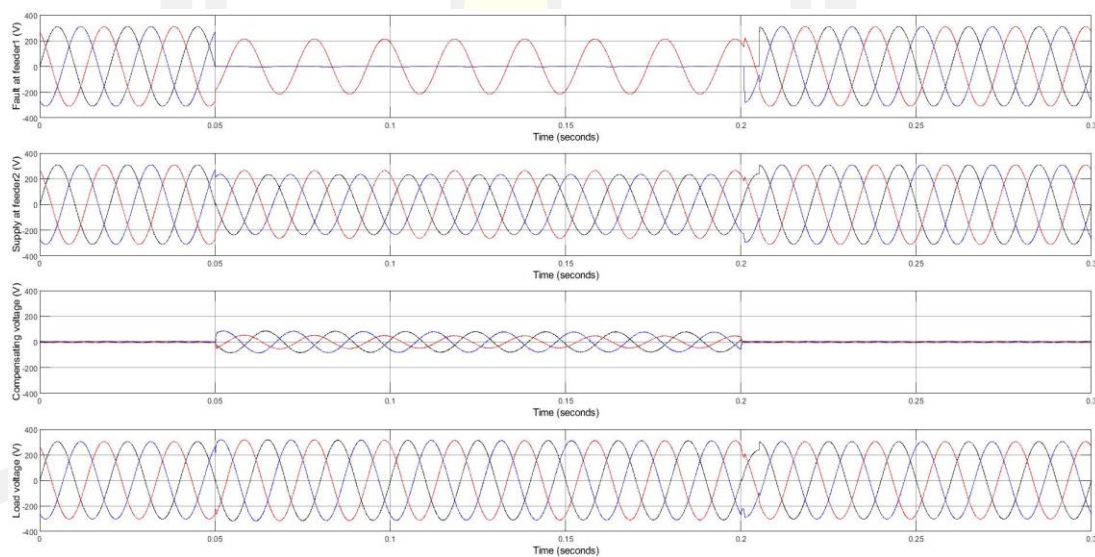


ภาพประกอบ 240 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค PSO

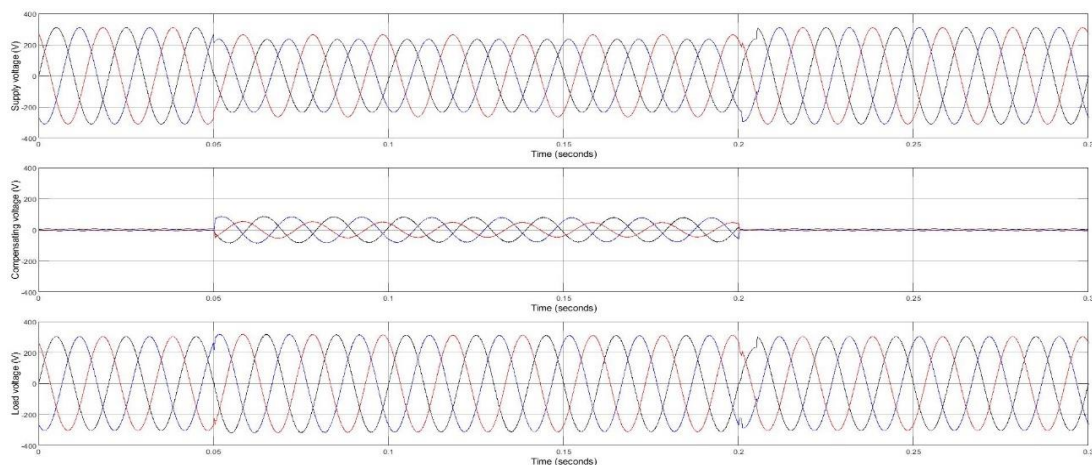
c) ตัวควบคุม FOPI



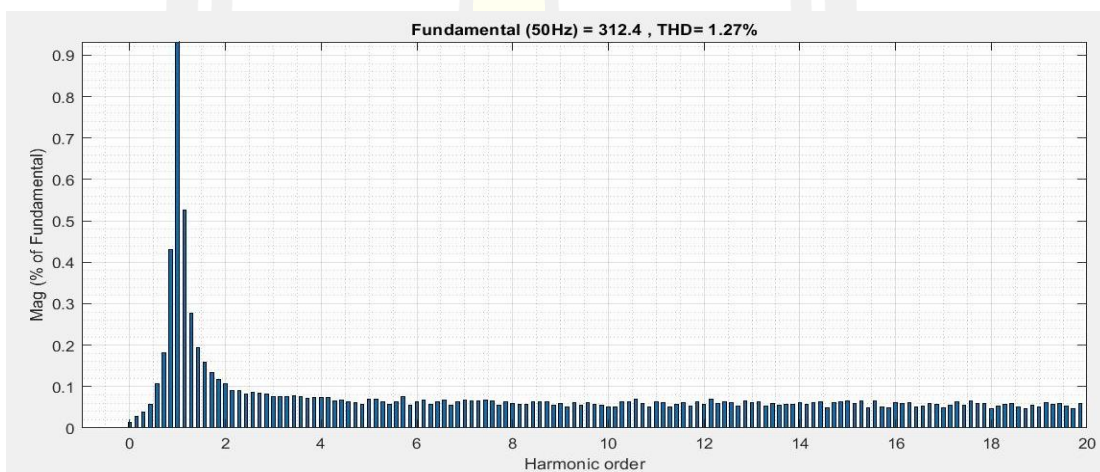
ภาพประกอบ 241 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 242 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

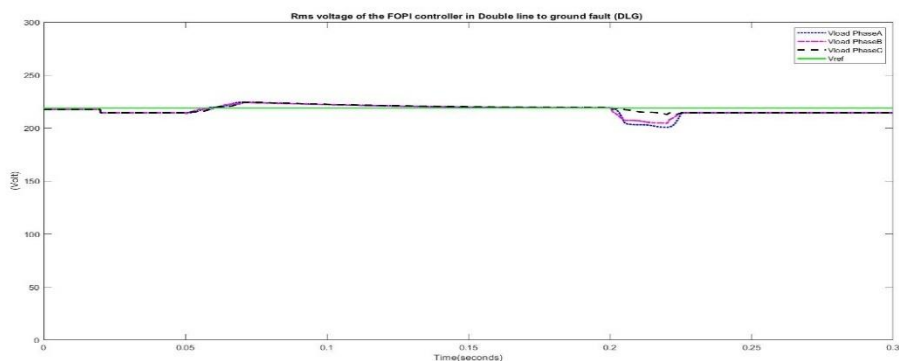


ภาพประกอบ 243 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO



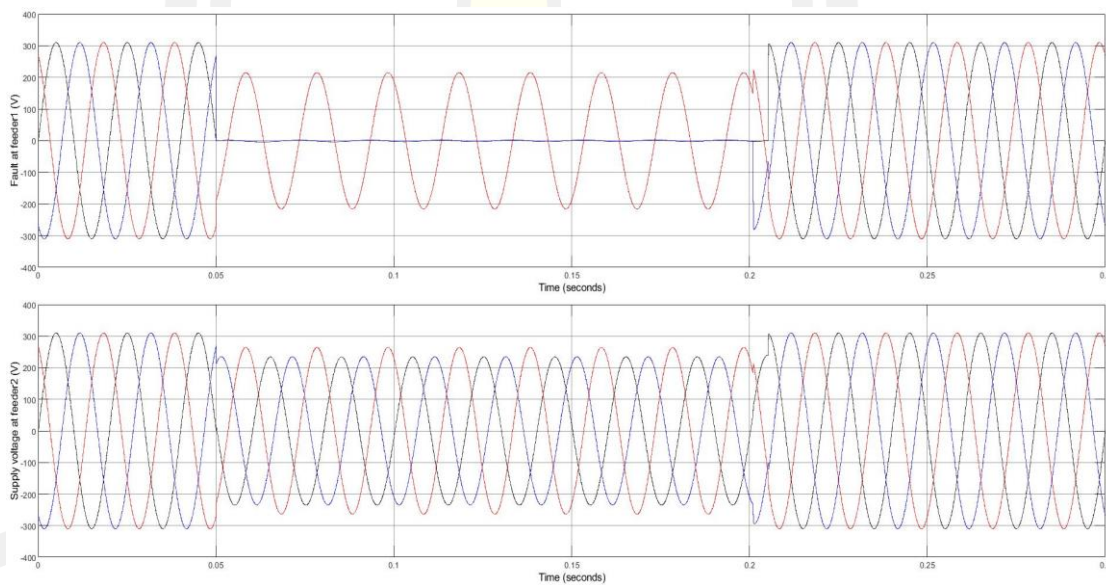
ภาพประกอบ 244 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค PSO

พหุบัณฑิต ชีวะ

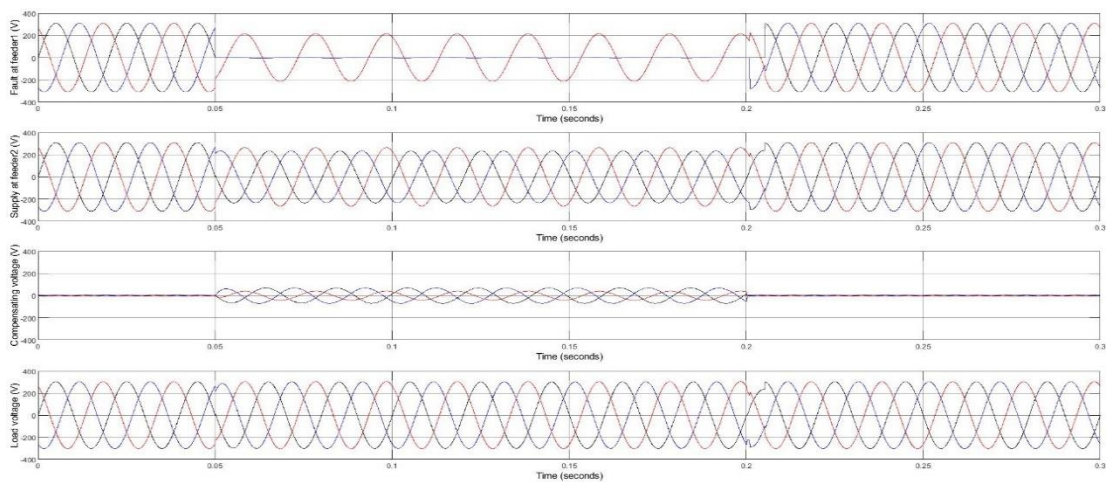


ภาพประกอบ 245 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

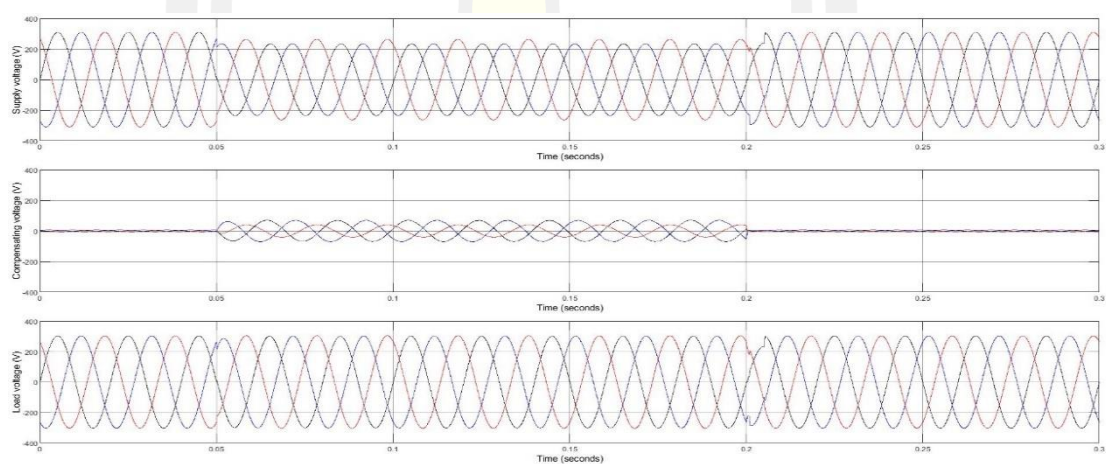
d) ตัวควบคุม FOPID



ภาพประกอบ 246 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

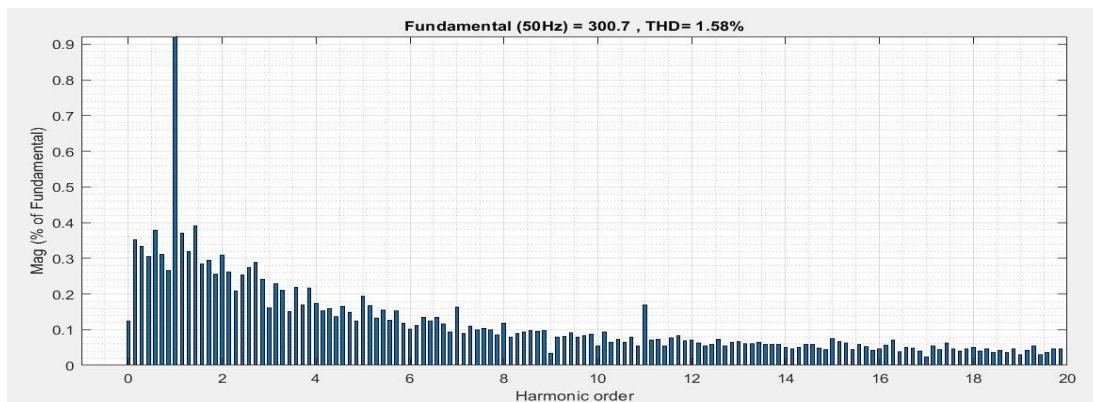


ภาพประกอบ 247 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

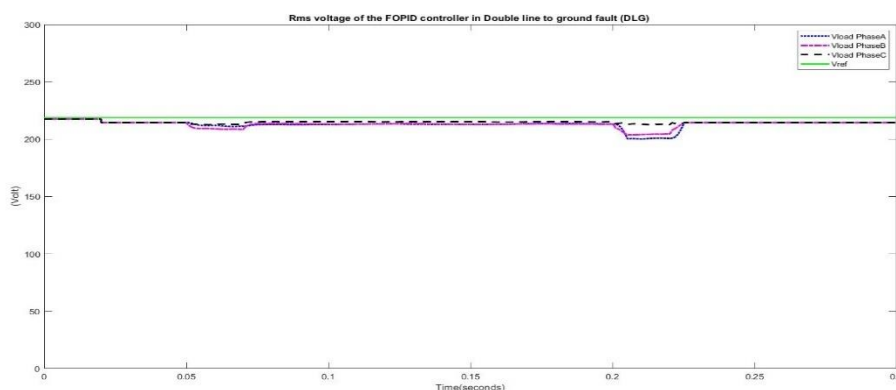


ภาพประกอบ 248 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 249 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO



ภาพประกอบ 250 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค PSO

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน หรือ Double line to ground fault (DLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่าทั้ง 4 ควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID สามารถชดเชยแรงดันที่โหลดให้กลับเข้าสู่ภาวะปกติได้เป็นอย่างดี อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48] และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 17 ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุม ที่ได้จากเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณีพบว่า ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย ITAE ต่ำที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0061

ตัวควบคุม FOPI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0086

ตารางที่ 18 แสดงค่าการเปรียบเทียบ response time และ %steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 18 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.88	0.80	16.80	~ 0	17.21	~ 0	13.98	~ 0
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	10.62	2.48	19.89	~ 0	10.62	2.45	Nearly promptly	2.44
Average	14.25	1.64	18.35	0.00	13.91	1.23	6.99	1.22

จากตาราง 18 ในการวิเคราะห์ Response time และ วิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

1. ในกรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน พบว่าตัวควบคุม FOPID จะเกิด Response time ต่ำสุดและทุกตัวควบคุมมีค่า % Steady- state error น้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์
2. ในกรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน พบว่าตัวควบคุม FOPID จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม PID มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ

3. จากค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 1-2 ที่ได้จากตารางที่ 18 พบว่าค่า Response time ตัวควบคุม FOPID จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.99 ms และในส่วนของค่าเฉลี่ยของ % Steady - state error ของตัวควบคุม PID ใกล้เคียงศูนย์ จะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI และ FOPI (PI = 1.64 %, FOPI = 1.23 % และ FOPID = 1.22 %)

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 19 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมร่วมกับด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ทั้ง 2 กรณีปัญหา ของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

ตาราง 19 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.90	0.48	0.67	0.63
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.44	1.15	1.27	1.58
Average	1.17	0.82	0.97	1.11

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากตาราง 19 จะเห็นได้ว่า

1. ในกรณีที่ 1 พอลต์ระหว่างไลน์กับดินตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 0.48$ % ส่วนตัวควบคุมอื่นๆจะมีค่า ($THD_{PI} = 0.90$ %, $THD_{FOPI} = 0.67$ %, $THD_{FOPID} = 0.63$ %)
2. ในกรณีที่ 2 พอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 1.15$ % ส่วนตัวควบคุมอื่นๆจะมีค่า ($THD_{PI} = 1.46$ %, $THD_{FOPI} = 1.27$ %, $THD_{FOPID} = 1.58$ %)

ซึ่งจากตารางที่ 19 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม PI จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม FOPID จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 6.99 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 1.22% และค่าเฉลี่ย THD = 1.11% ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหาคือ ตัวควบคุม PI ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 14.25 ms ค่าเฉลี่ย % Steady-state error = 1.64% และค่าเฉลี่ย THD = 1.17% ตามลำดับและเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 51 นาที

4.2.3 เทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

ตาราง 20 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ให้กับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี

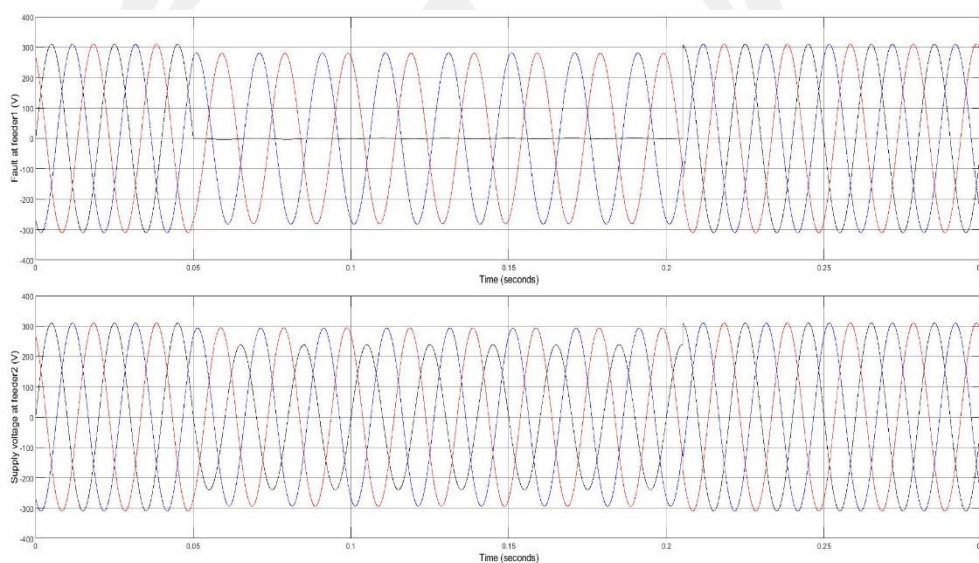
ตาราง 20 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
TLBO	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0303	1.3587				0.0126	105.5
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5296	15.0789				0.0102	96.46
		Average						0.0114	100.98
	PID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	29.9873	11.6631	0.9961			0.0071	99
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	30	6.8374	0.01			0.0050	102.23
		Average						0.0061	100.61
	FOPI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0549	2.9763		1.6896		0.0126	94.51
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5083	25.4464	1.3175			0.0102	95.37
		Average						0.0114	94.94
	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	0.7404	0.01	1.3587	0.9961	0.0170	98.19
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	24.163	0.01	0.01	0.1	0.9981	0.1249	95.71
		Average						0.0710	96.95

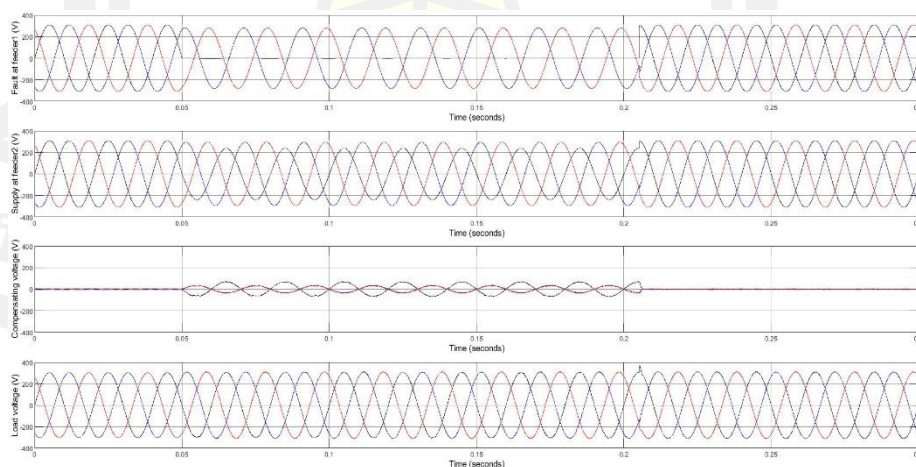
โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของทั้ง 4 ตัวควบคุม ได้แก่ ตัวควบคุม PI, PID, FOPI และ FOPID ดังภาพประกอบ 251 ถึง 290

กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินหรือ Single line to ground fault (SLG)

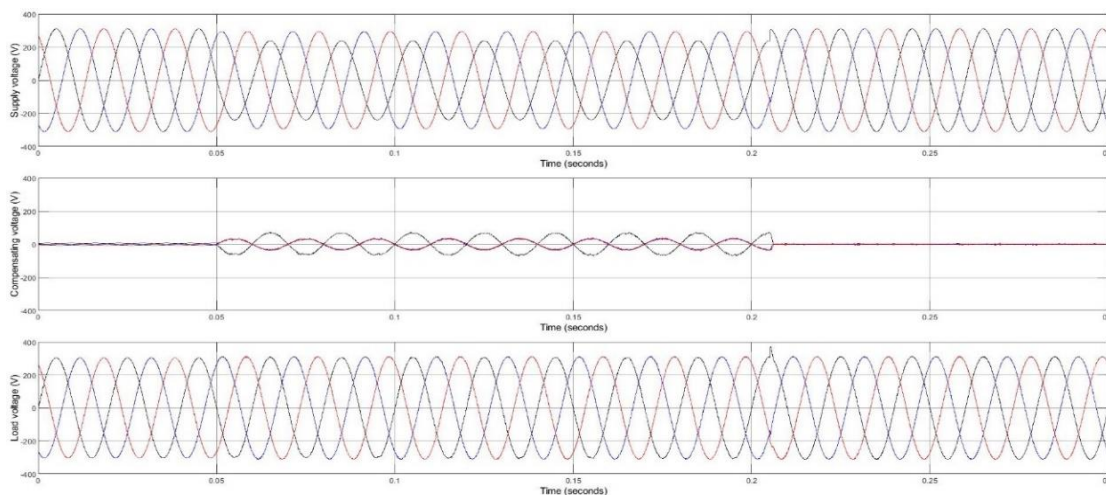
a) ตัวควบคุม PI



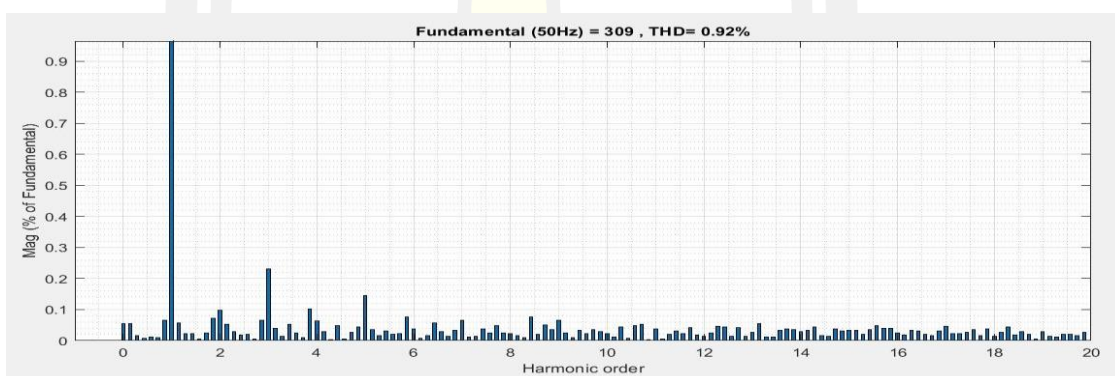
ภาพประกอบ 251 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 252 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

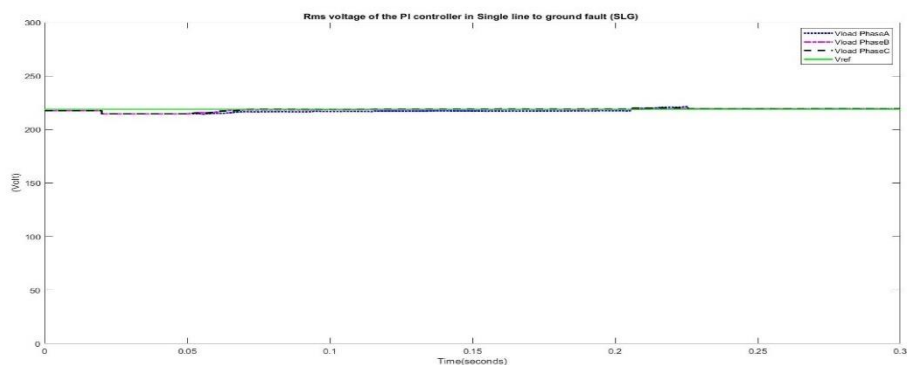


ภาพประกอบ 253 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



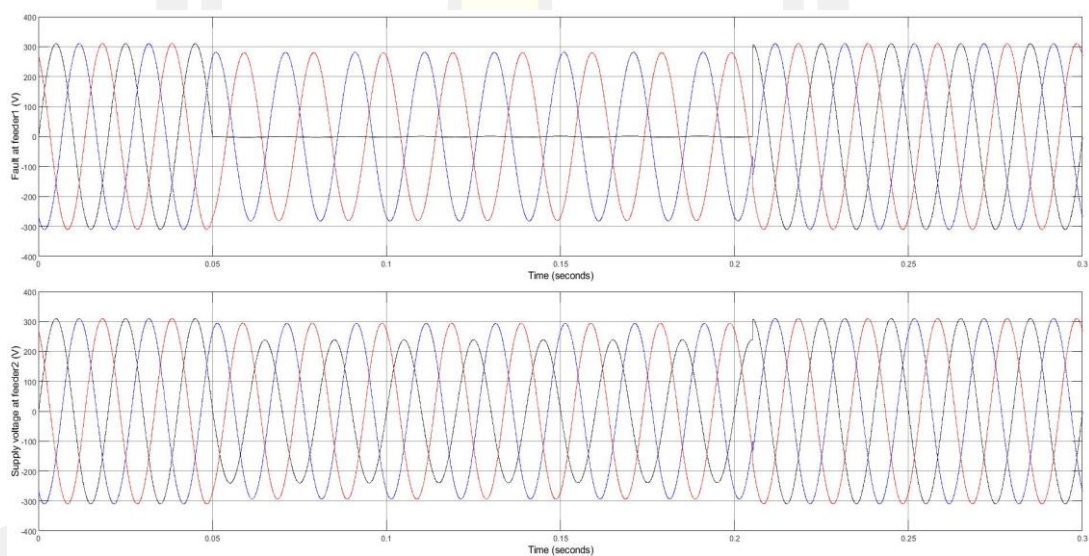
ภาพประกอบ 254 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุ ประถม วิชา

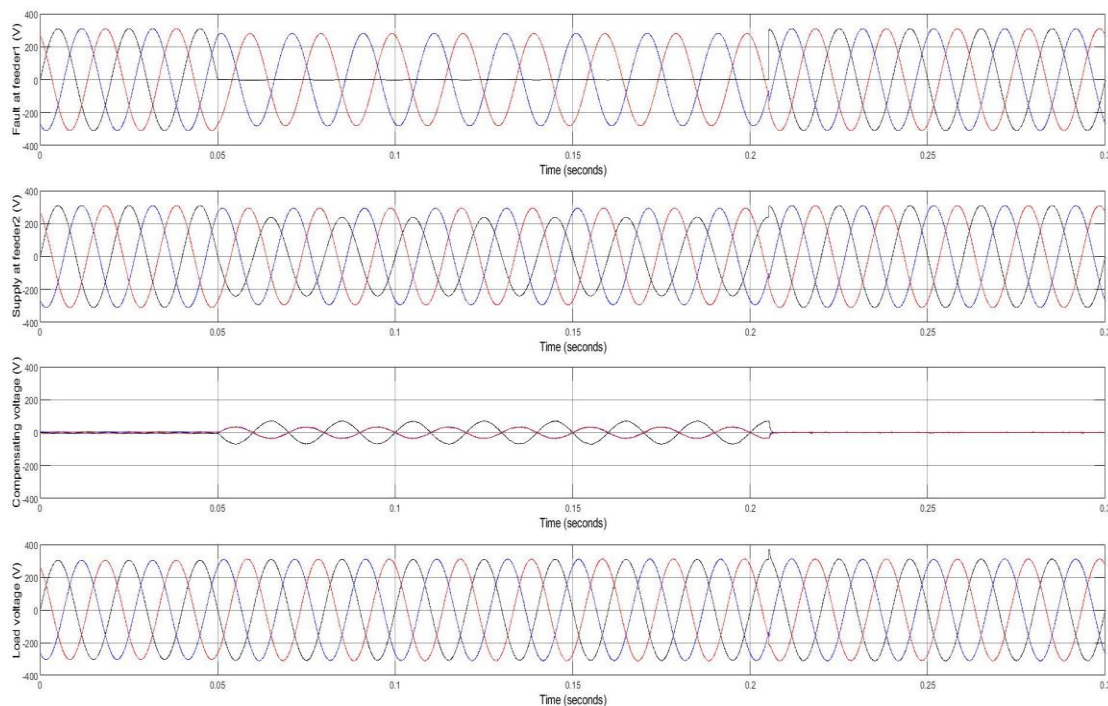


ภาพประกอบ 255 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

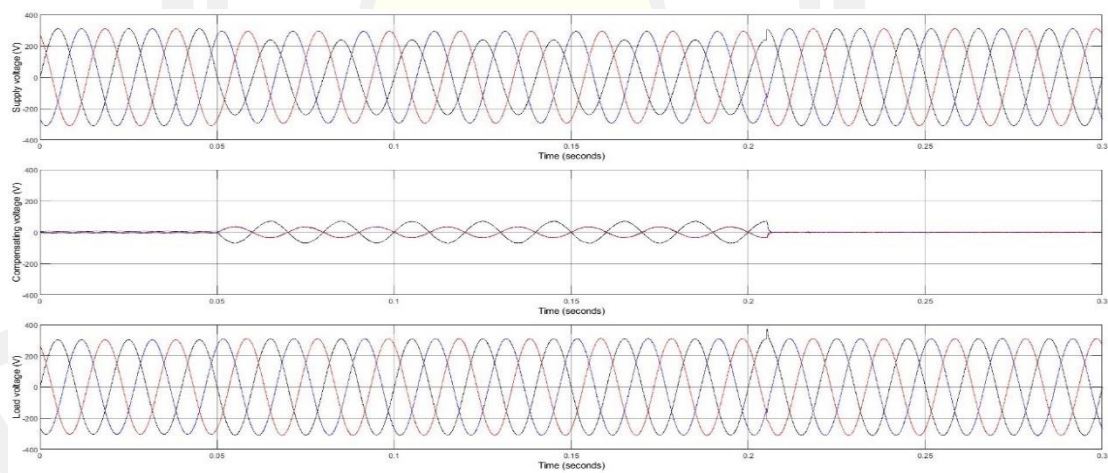
b) ตัวควบคุม PID



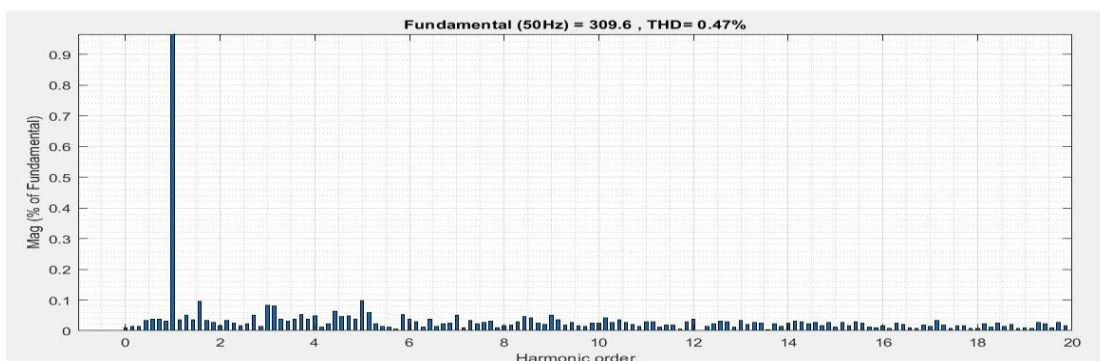
ภาพประกอบ 256 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



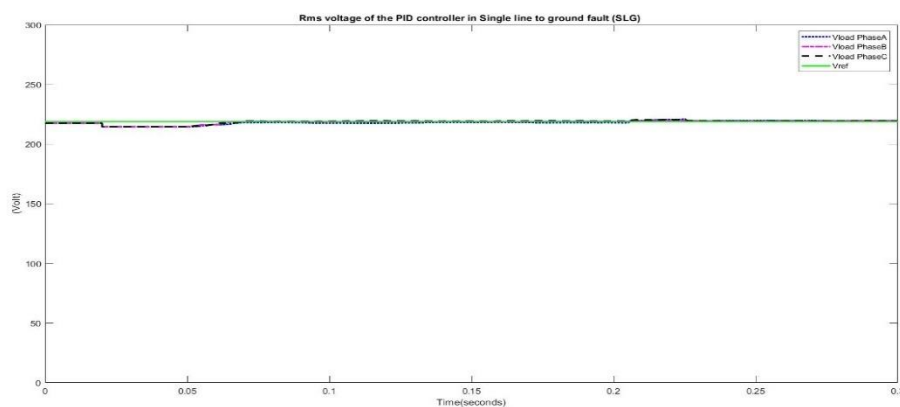
ภาพประกอบ 257 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



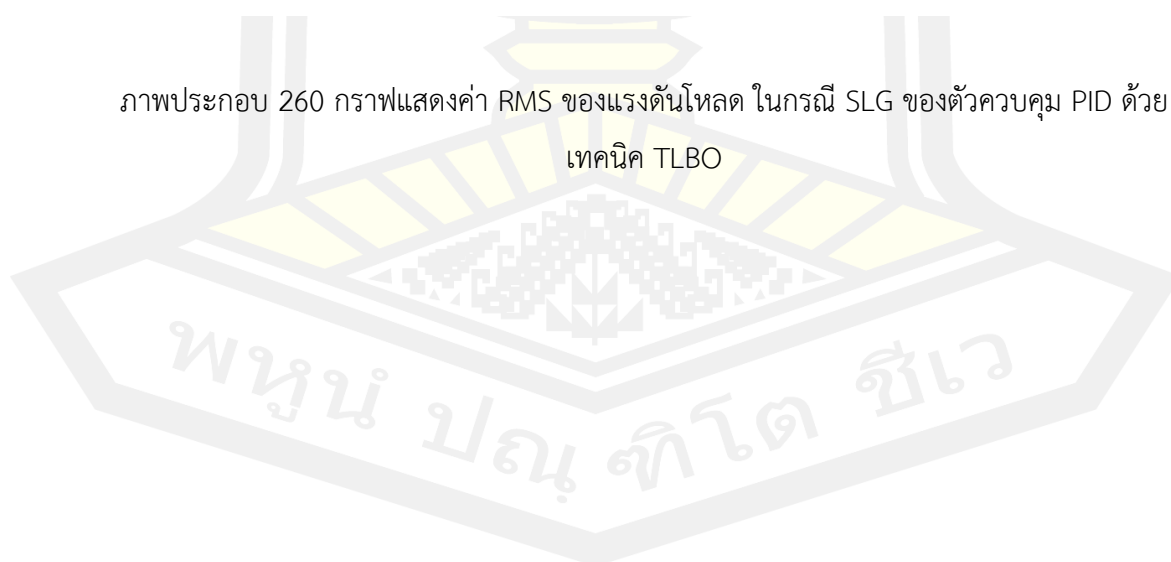
ภาพประกอบ 258 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



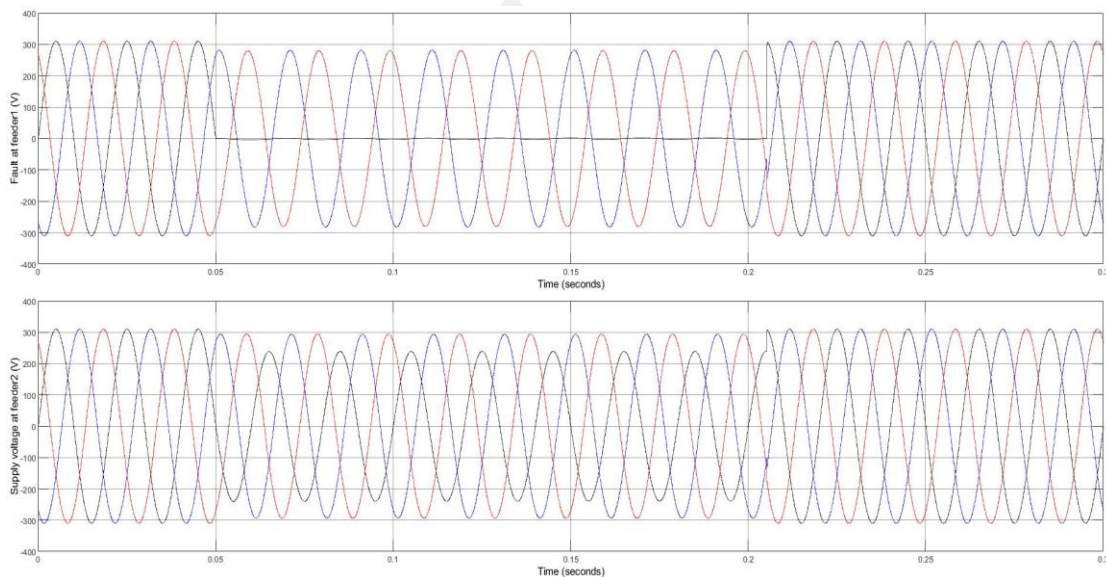
ภาพประกอบ 259 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหนดในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



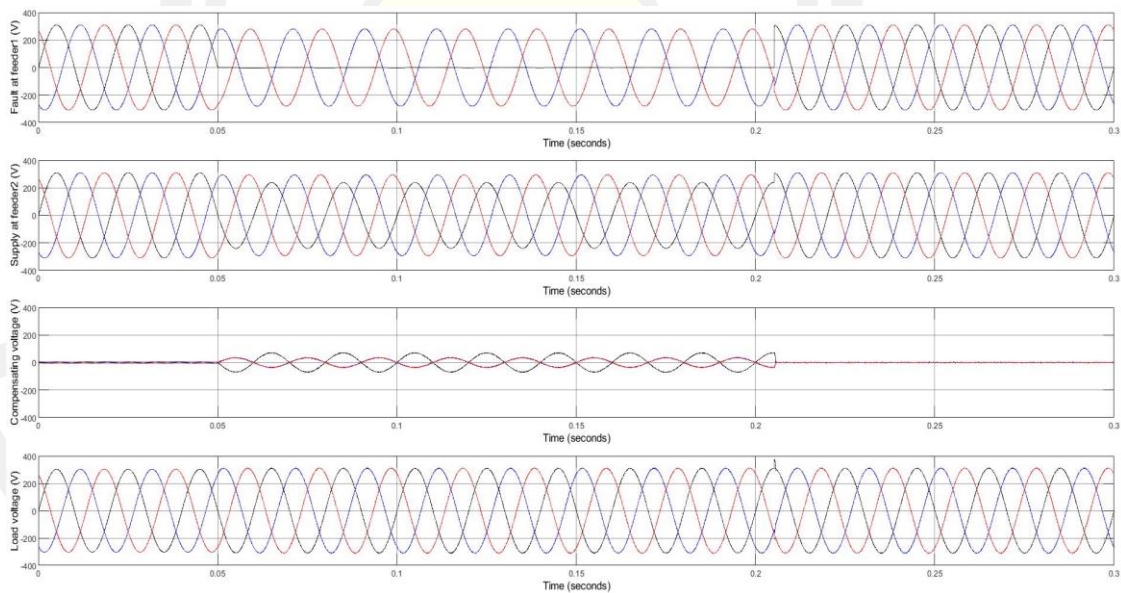
ภาพประกอบ 260 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหนด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



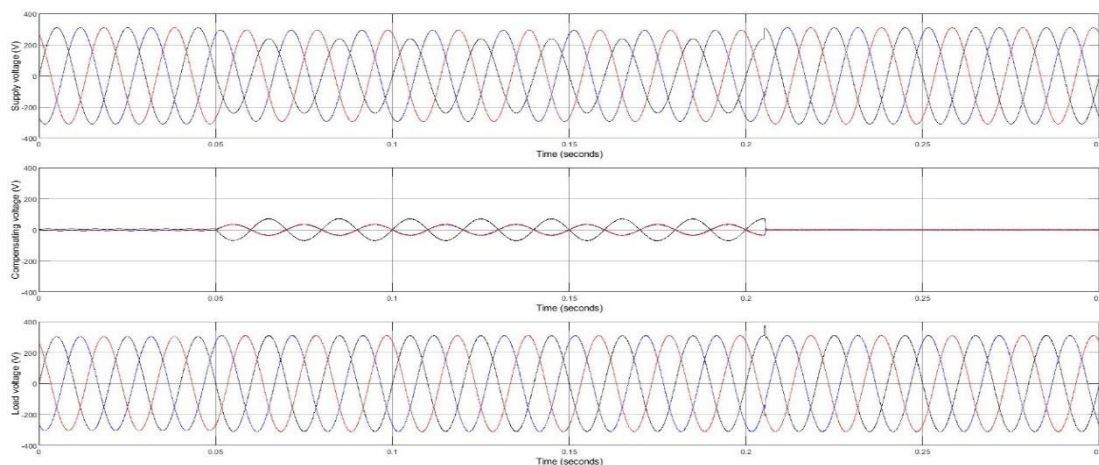
c) ตัวควบคุม FOPI



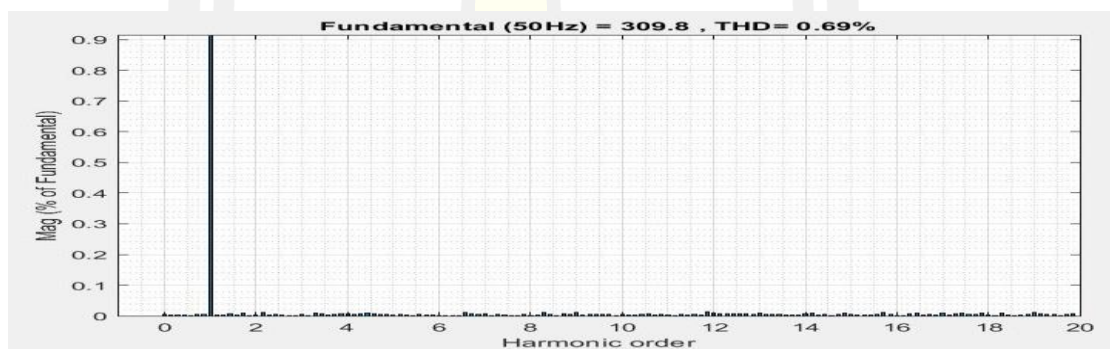
ภาพประกอบ 261 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 262 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

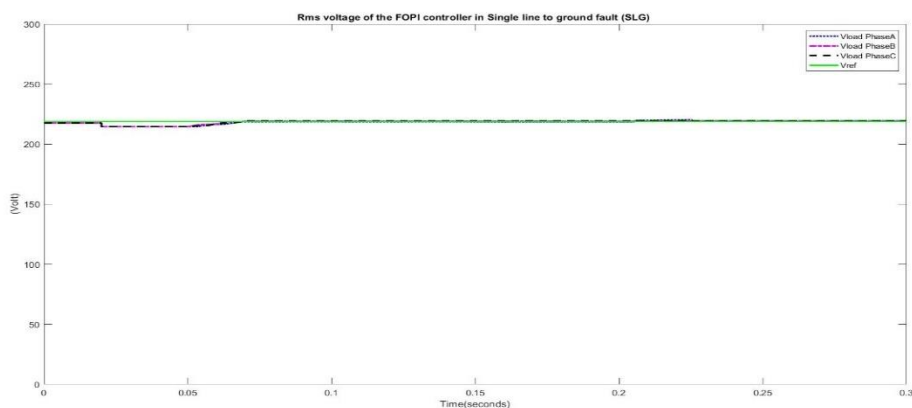


ภาพประกอบ 263 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



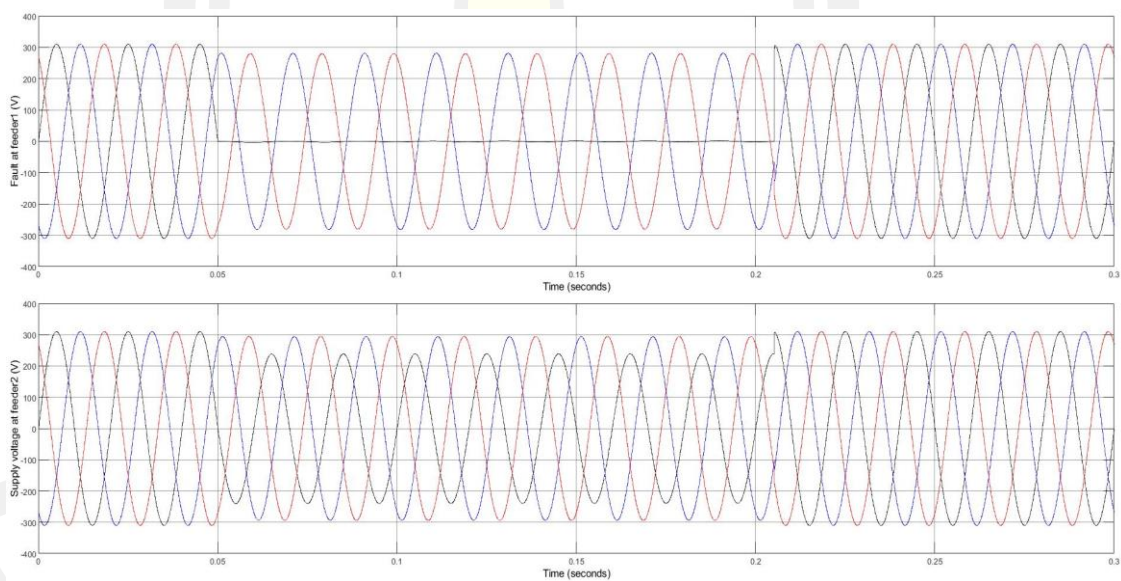
ภาพประกอบ 264 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ

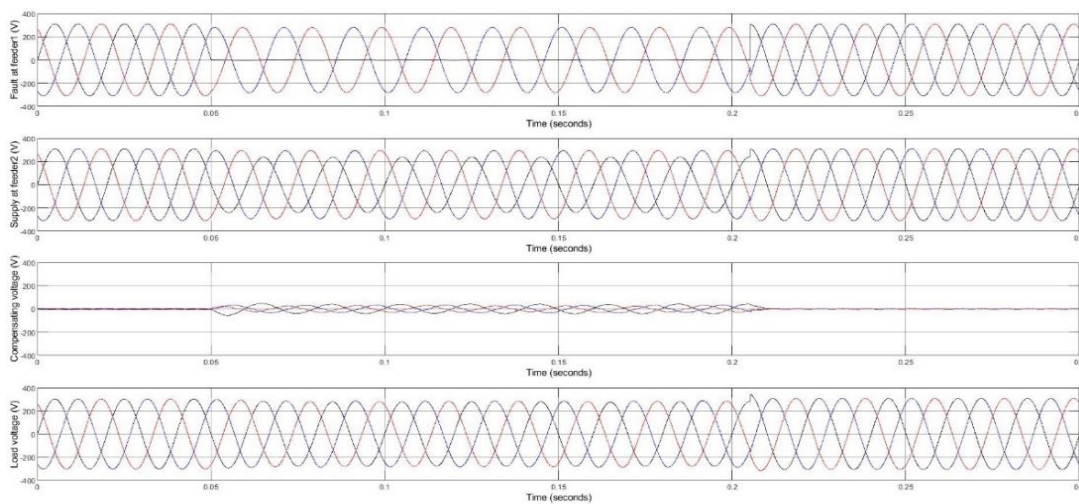


ภาพประกอบ 265 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

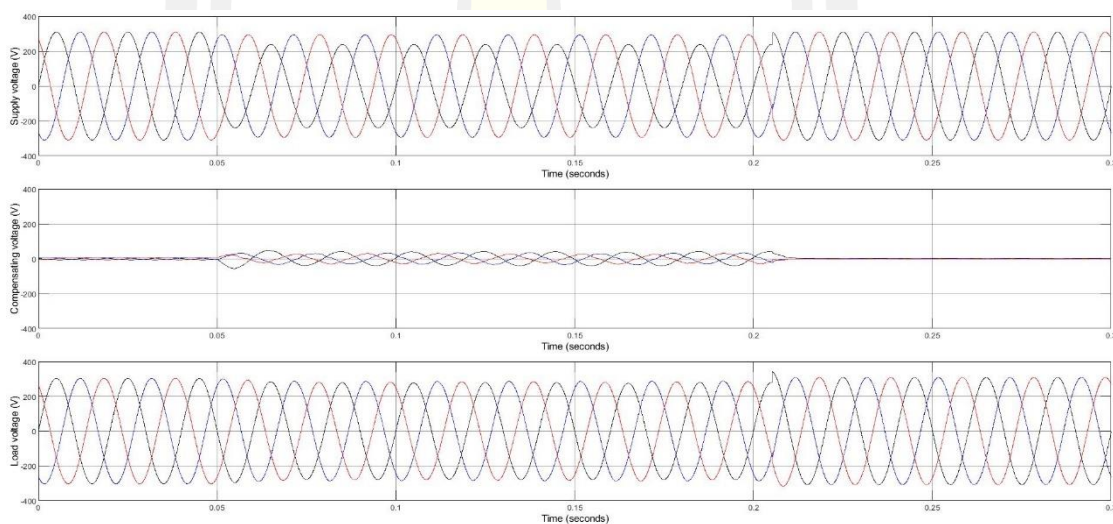
d) ตัวควบคุม FOPID



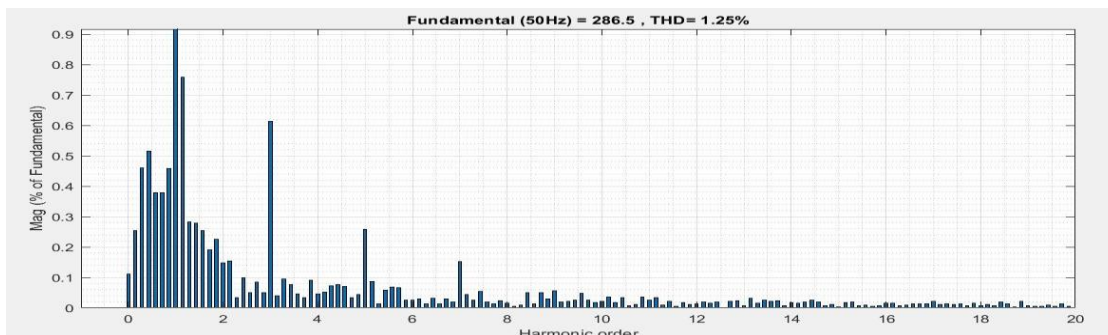
ภาพประกอบ 266 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



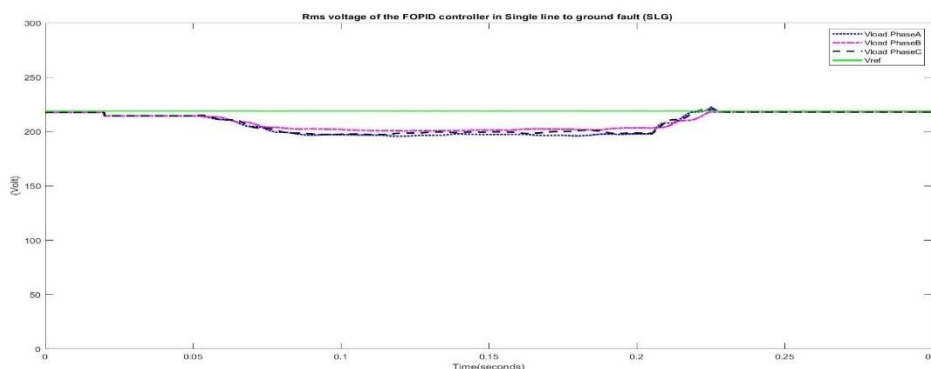
ภาพประกอบ 267 พล็อต ที่ Feeder 1 แล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 268 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 269 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที่เกิดในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

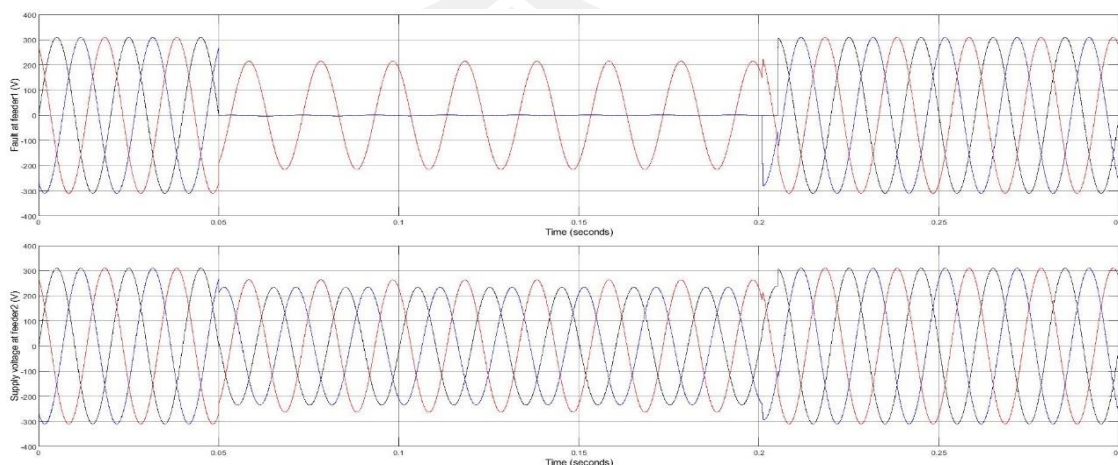


ภาพประกอบ 270 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี SLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

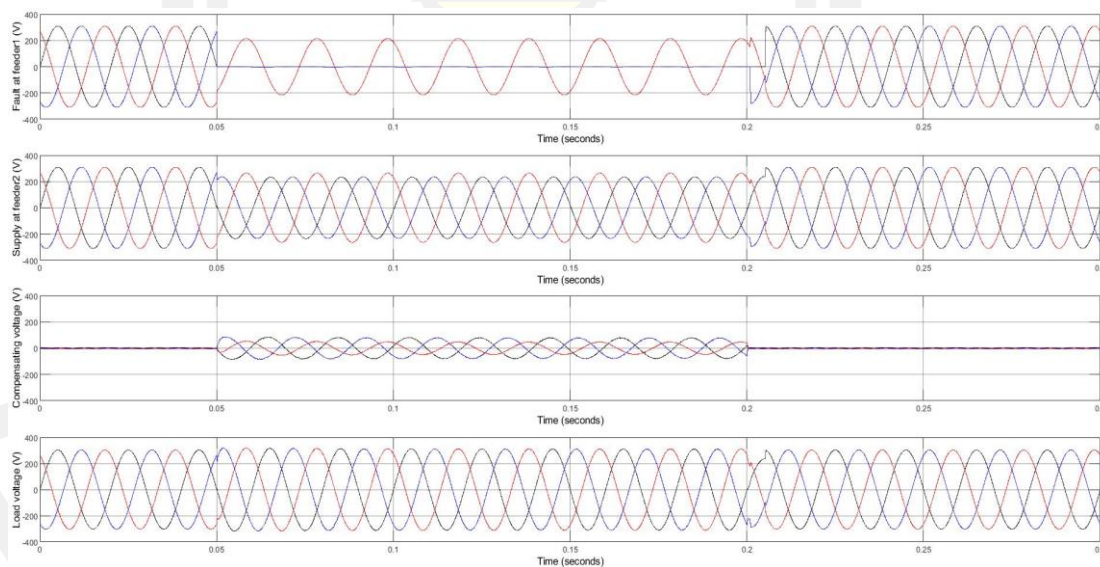
กรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน หรือ Single line to ground fault (SLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อน หรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลผลกระทบต่อสายป้อน หรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ตัวควบคุม FOPID ในภาพประกอบที่ 270 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันปกติอยู่ประมาณ 22.61 โวลต์หรือประมาณ 10.21 % อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48] และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6]

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินหรือ Double line to ground fault (DLG)

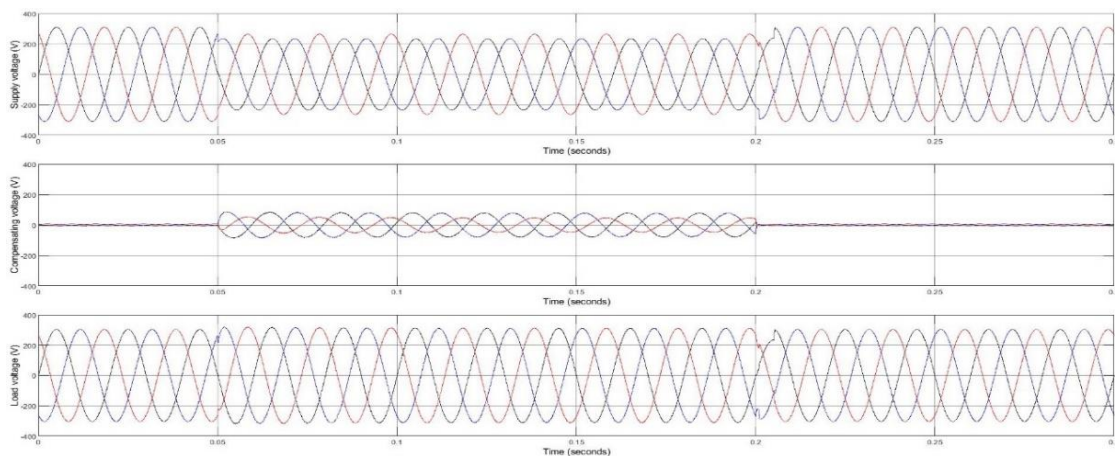
a) ตัวควบคุม PI



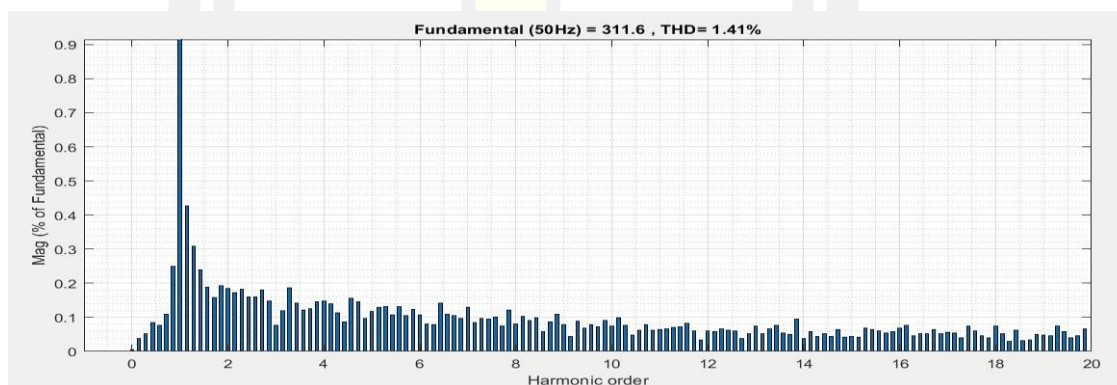
ภาพประกอบ 271 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



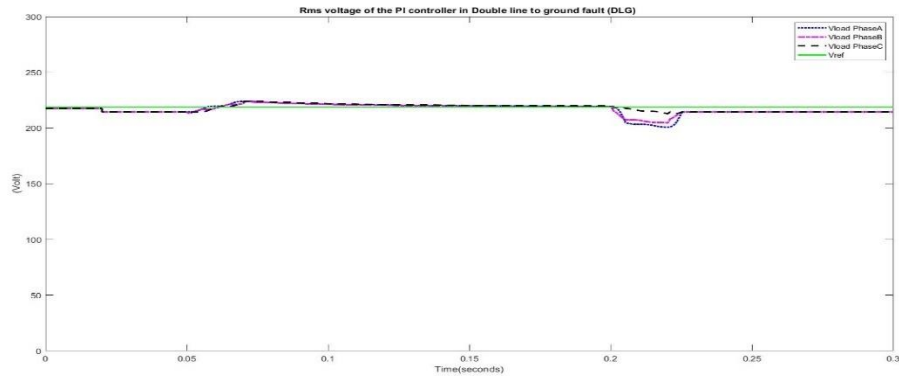
ภาพประกอบ 272 ฟอลต์ ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 273 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

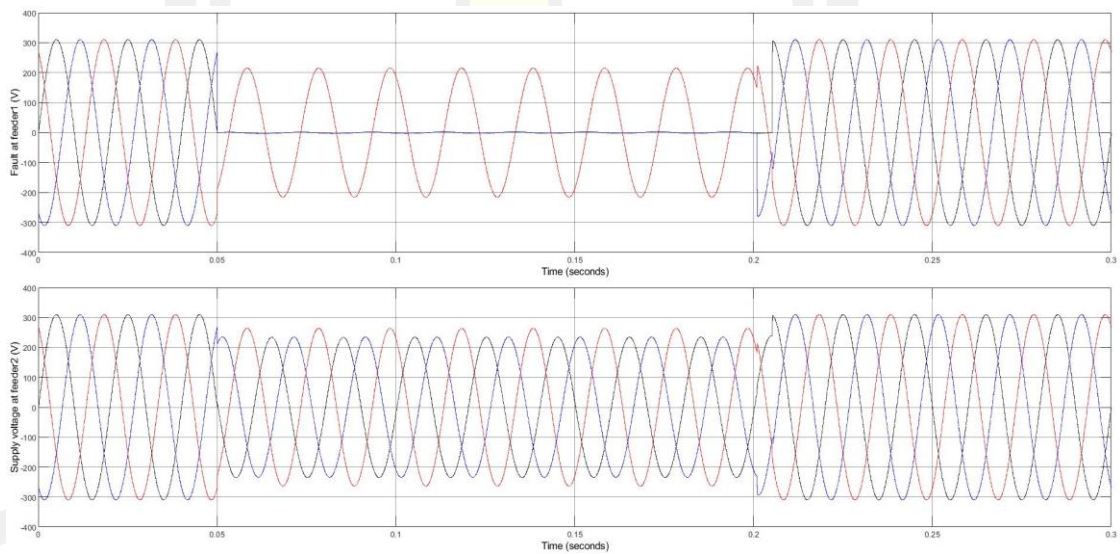


ภาพประกอบ 274 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

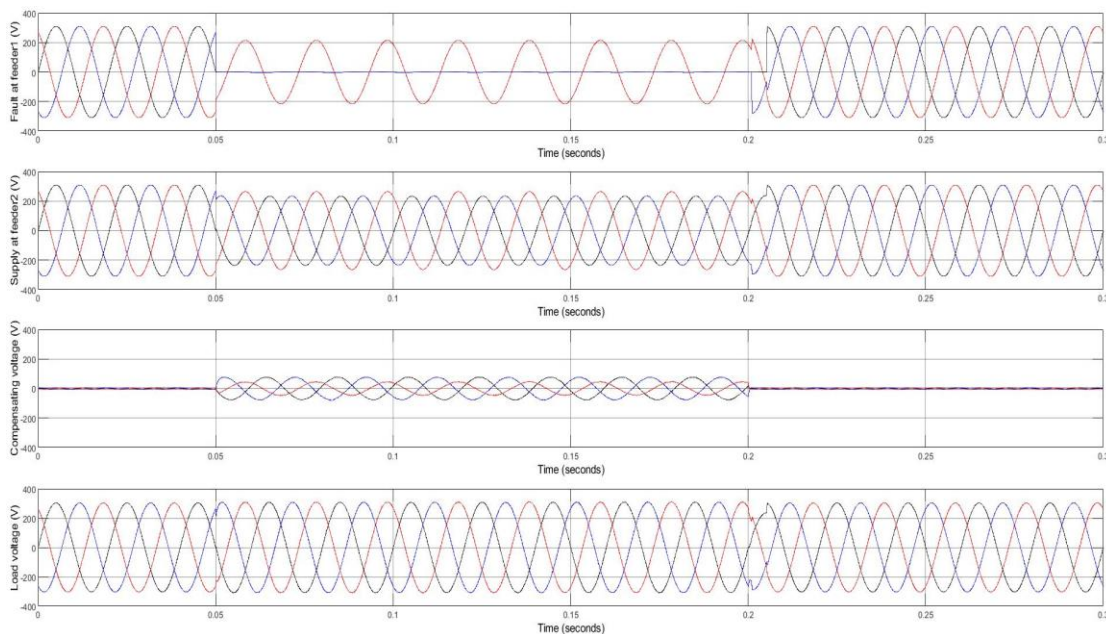


ภาพประกอบ 275 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโหลด ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PI ด้วยเทคนิค TLBO

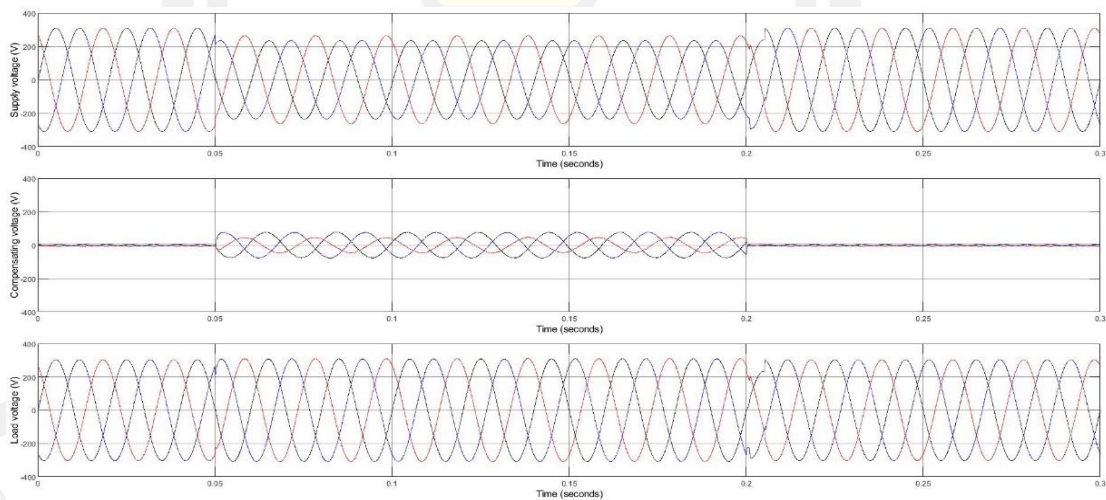
b) ตัวควบคุม PID



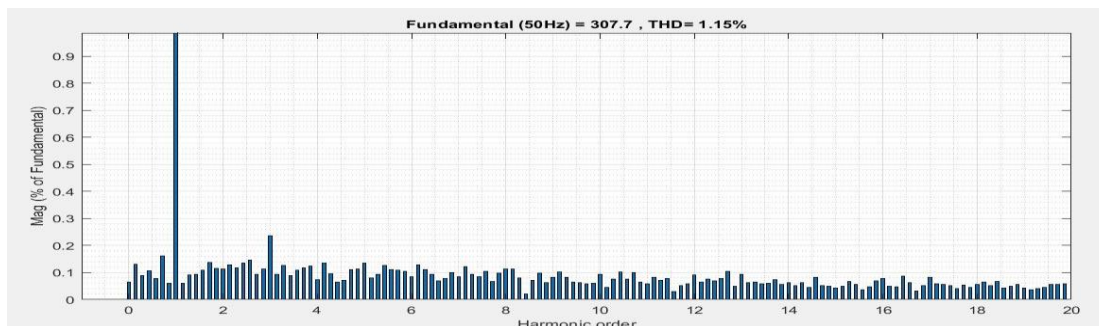
ภาพประกอบ 276 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



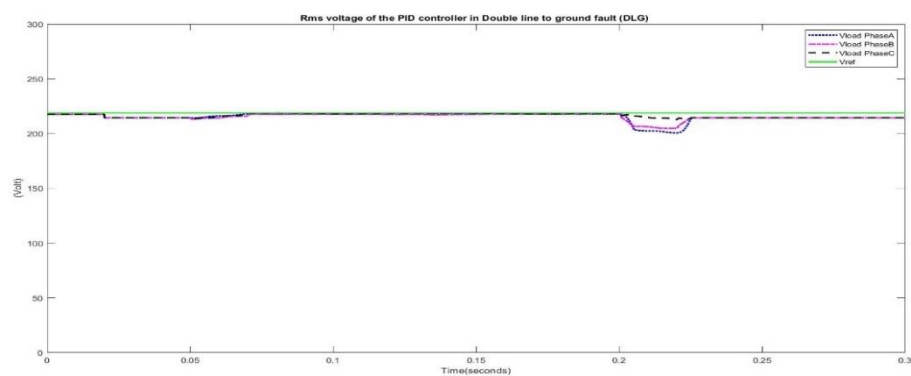
ภาพประกอบ 277 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



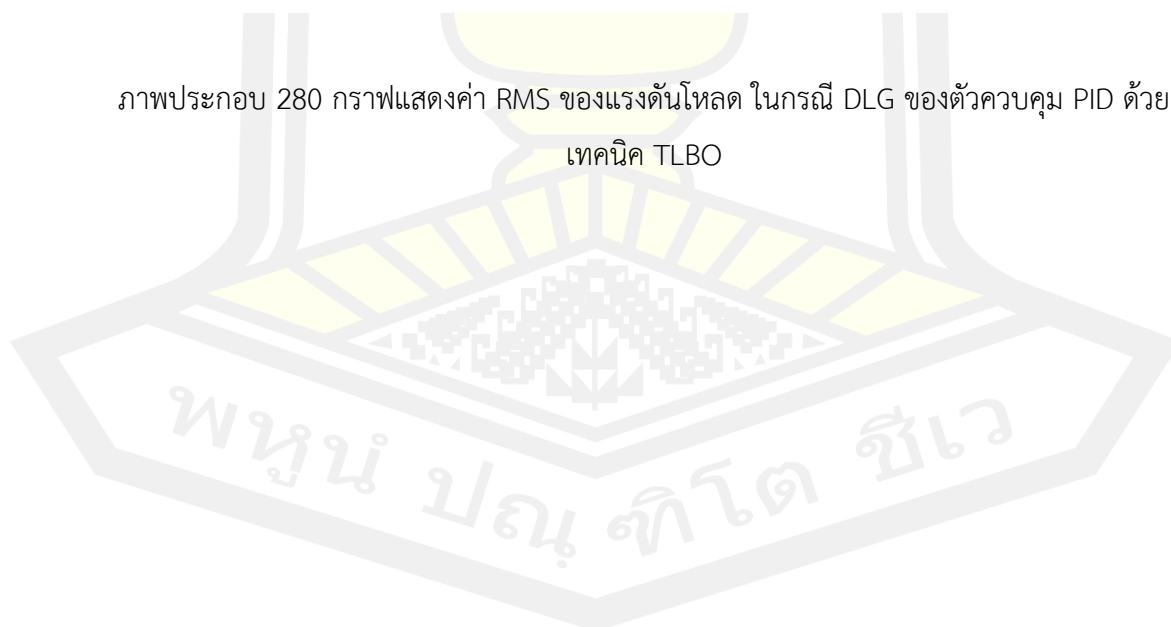
ภาพประกอบ 278 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



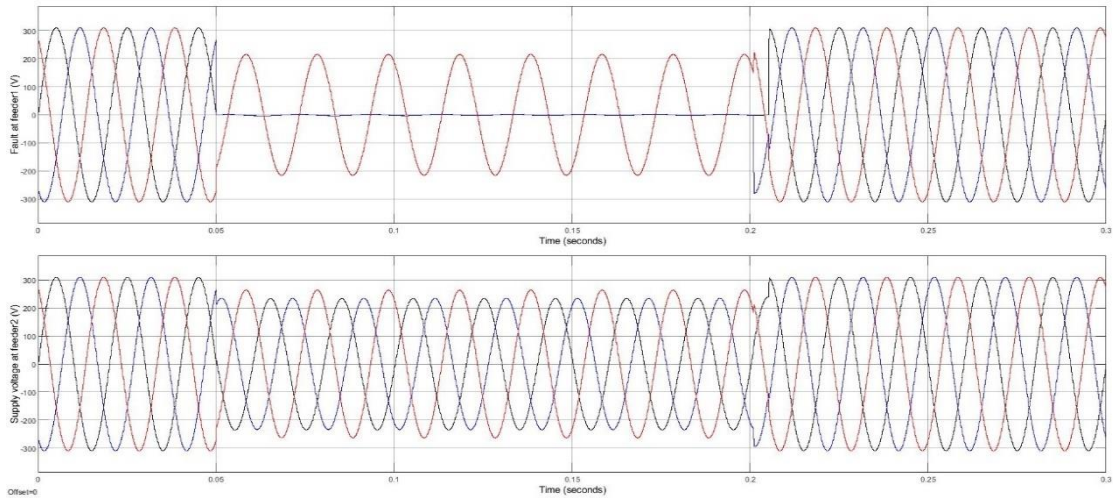
ภาพประกอบ 279 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีนี้ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



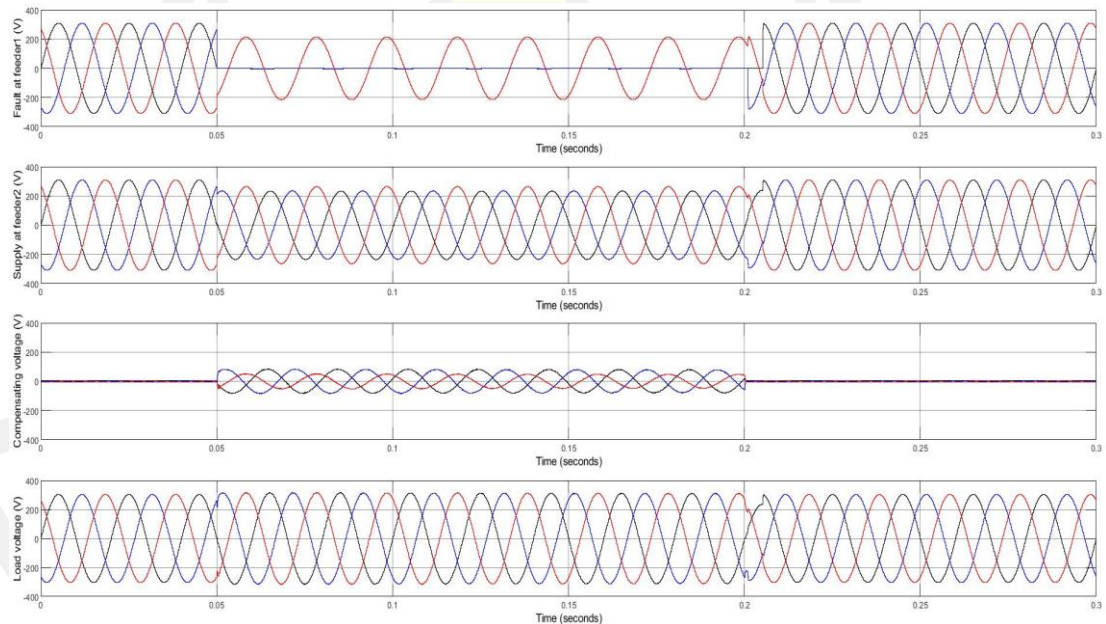
ภาพประกอบ 280 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม PID ด้วยเทคนิค TLBO



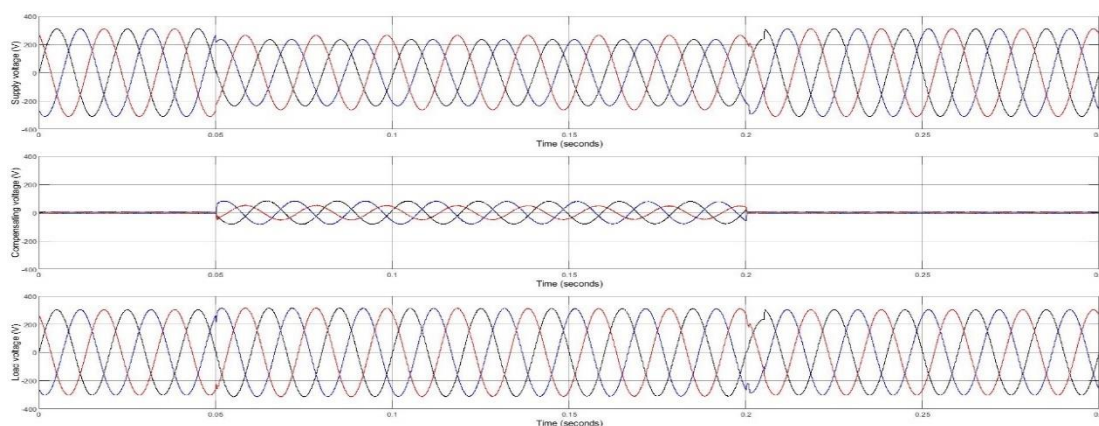
c) ตัวควบคุม FOPI



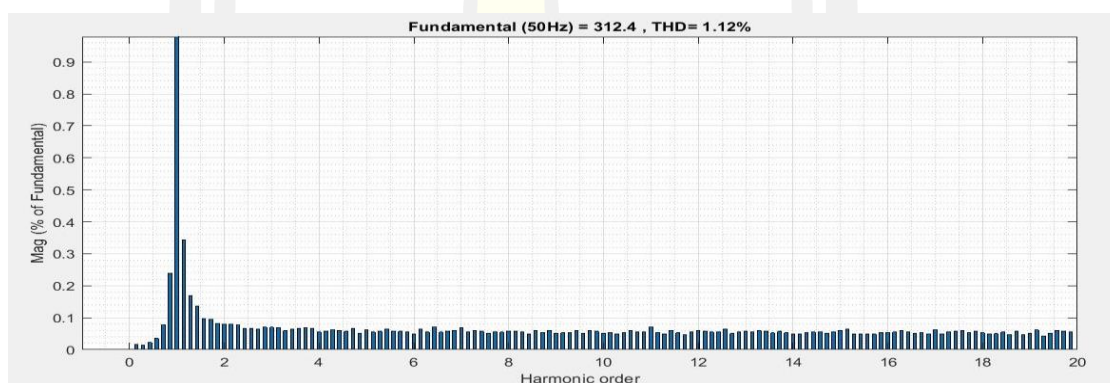
ภาพประกอบ 281 พล็อตที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 282 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

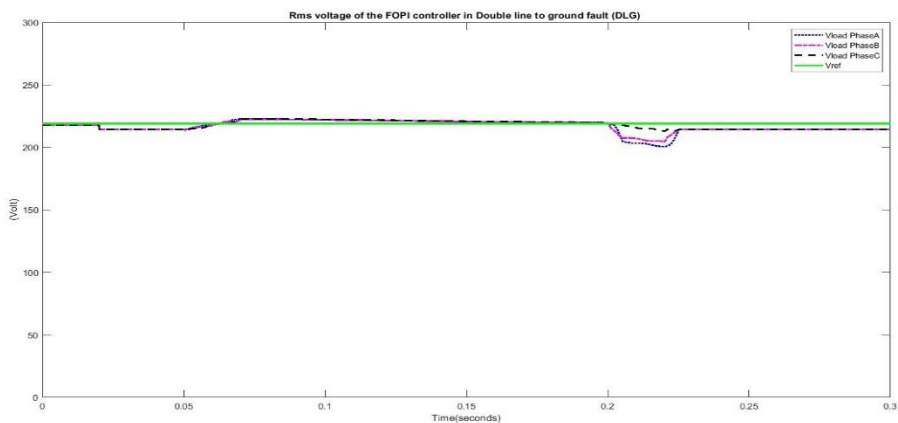


ภาพประกอบ 283 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO



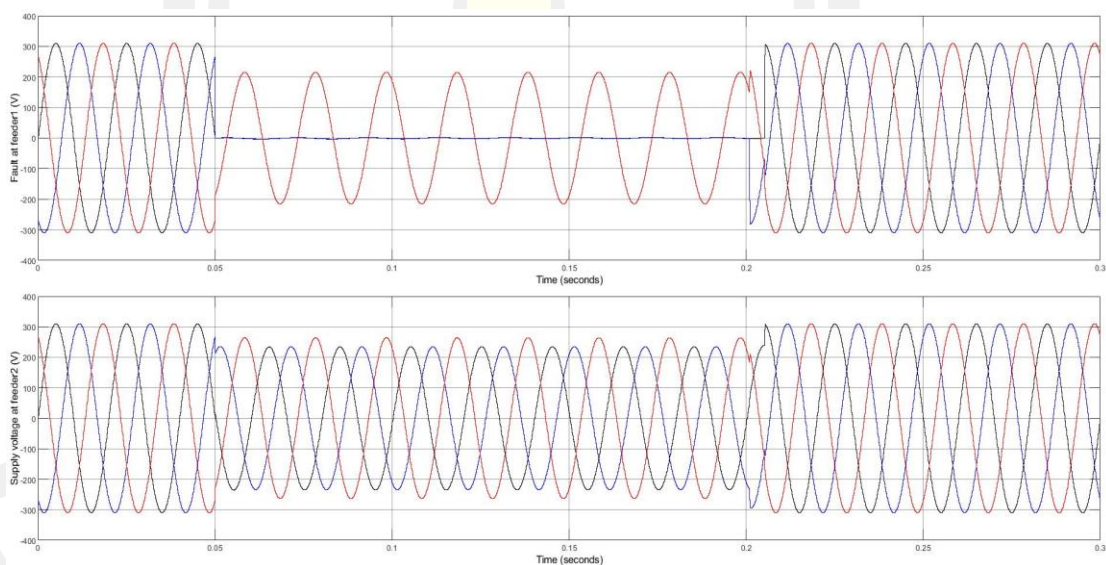
ภาพประกอบ 284 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโหลดในกรณีที่ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPI ด้วยเทคนิค TLBO

พหุบัณฑิต ชีวะ

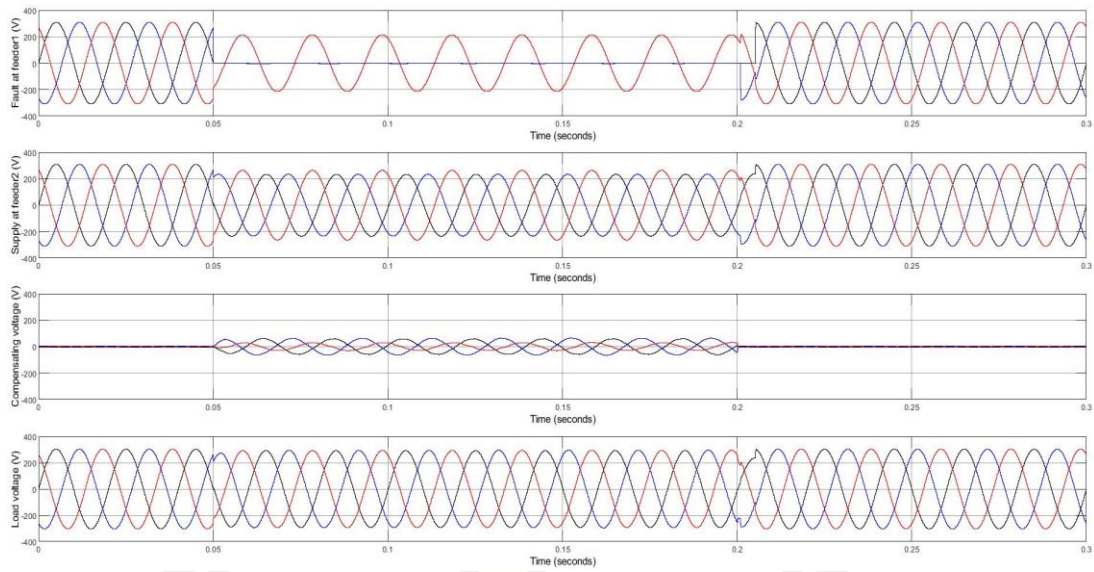


ภาพประกอบ 285 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

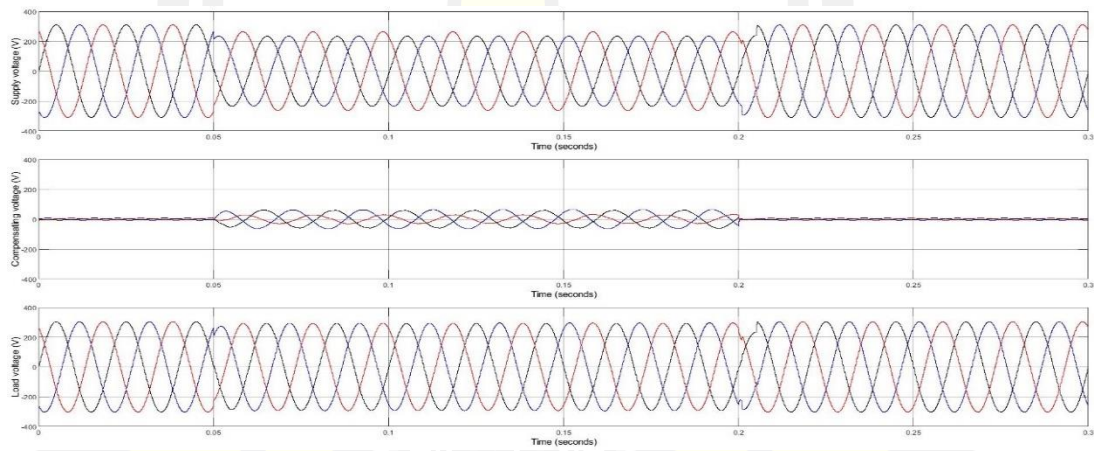
d) ตัวควบคุม FOPID



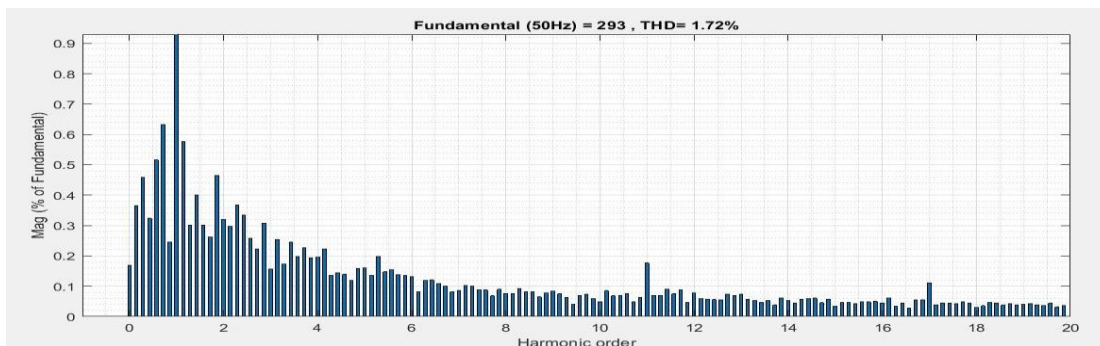
ภาพประกอบ 286 ฟอลต์ที่ Feeder 1 และแหล่งจ่ายแรงดันที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



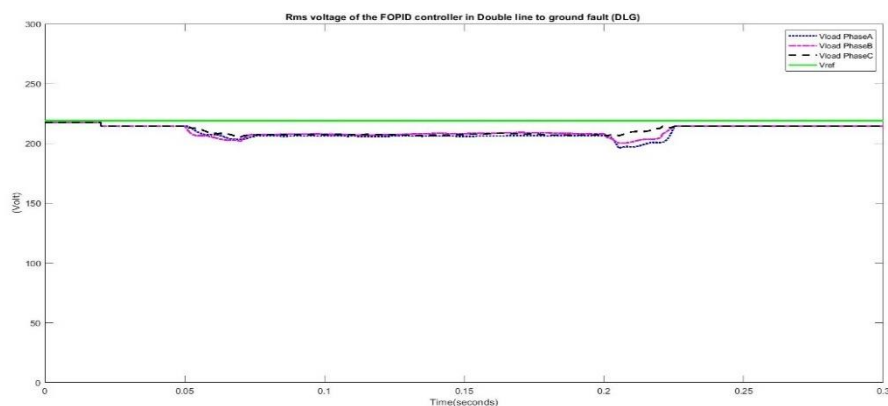
ภาพประกอบ 287 พล็อต ที่ Feeder 1 แหล่งจ่ายแรงดันที่ แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 288 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดที่ Feeder 2 ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 289 กราฟแสดงค่า THD ของแรงดันโวลต์ในกรณีที ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO



ภาพประกอบ 290 กราฟแสดงค่า RMS ของแรงดันโวลต์ ในกรณี DLG ของตัวควบคุม FOPID ด้วยเทคนิค TLBO

กรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน หรือ Double line to ground fault (DLG) คือ เกิดจากความผิดปกติหรือฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินเกิดขึ้นที่สายป้อนหรือ Feeder ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อนหรือ Feeder ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ความผิดปกติเกิดขึ้นเวลา 0.05-0.2 Sec พบว่า ตัวควบคุม FOPID ในภาพประกอบที่ 290 แรงดัน RMS หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 12.28 V หรือประมาณ 5.58% อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน CBMEMA curve [48] และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของทั้ง 4 ตัวควบคุมหลังการชดเชยยังต่ำกว่า 8 % ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-2014 [6].

วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 4 หลังการชดเชยแก้ปัญหา

จากตาราง 20 ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ของแต่ละตัวควบคุม ที่ได้จากเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี พบว่า ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย ITAE ต่ำที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

ตัวควบคุม PI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม PID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{PID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0061

ตัวควบคุม FOPI มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPI}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0114

ตัวควบคุม FOPID มีค่าเฉลี่ย $ITAE_{FOPID}$ ในการแก้ปัญหาทั้ง 2 กรณี เท่ากับ 0.0710

ตาราง 21 แสดงค่าการเปรียบเทียบ response time และ %steady- state error ของทั้ง 4 ตัวควบคุมในการแก้ปัญหาทั้ง 4 กรณี

ตาราง 21 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Voltage disturbances	Controller Performances							
	PI		PID		FOPI		FOPID	
	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.06	0.97	17.60	~ 0	16.94	~ 0	31.98	10.28
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	11.16	2.35	21.24	~ 0	12.23	1.70	23.28	5.58
Average	14.11	1.66	19.42	0.00	14.59	0.85	27.63	7.93

จากตาราง 21 ในการวิเคราะห์ Response time และ วิเคราะห์ % Steady- state error จะได้ว่า

1. ในกรณีที่ 1 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน พบว่า ตัวควบคุม PI, PID และ FOPI จะเกิด Response time ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงเวลา 16.94 ms - 17.60 ms และตัวควบคุม PID และ FOPI มีค่า % Steady- state error น้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์
2. ในกรณีที่ 2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดิน พบว่า ตัวควบคุม PI จะเกิด Response time ต่ำสุดและตัวควบคุม PID มีค่า % Steady- state error ต่ำสุดเท่ากันเมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ

3. จากค่าเฉลี่ยของกรณี 1-2 ที่ได้จากรายการที่ 21 พบว่า ค่า Response time ตัวควบคุม PI จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14.11 ms และในส่วนค่าเฉลี่ยของ % Steady - state error ของตัวควบคุม PID มีค่าน้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI, FOPI และ FOPID (PI = 1.66 %, FOPI = 0.85 % และ FOPID = 7.93 %)

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD

ตาราง 22 แสดงวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมร่วมกับด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ทั้ง 2 กรณีปัญหา ของแรงดันที่โหลดหลังจากการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบ

ตาราง 22 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ของแรงดันที่โหลดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
	PI	PID	FOPI	FOPID
Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.92	0.47	0.69	1.25
Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.41	1.15	1.12	1.72
Average	1.17	0.81	0.91	1.49

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (The total harmonics distortions) หรือ THD ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [6] ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากรายการ 22 จะเห็นได้ว่า

1. ในกรณีที่ 1 พอลต์ระหว่างไลน์กับดินตัวควบคุม PID จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{PID} = 0.47\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่นๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 0.92\%$, $THD_{FOPI} = 0.69\%$, $THD_{FOPID} = 1.25\%$)
2. ในกรณีที่ 2 พอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินตัวควบคุม FOPI จะมีค่า THD ต่ำสุดอยู่ที่ $THD_{FOPI} = 1.12\%$ ส่วนตัวควบคุมอื่น ๆ จะมีค่า ($THD_{PI} = 1.41\%$, $THD_{PID} = 1.15\%$, $THD_{FOPID} = 1.72\%$)

ซึ่งจากตาราง 22 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม FOPID จะมีค่าเฉลี่ย THD สูงที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID จะมีค่าเฉลี่ย THD ต่ำที่สุด

สรุปจากการเปรียบเทียบผลจากค่า Response time, % Steady-state error และ % THD ตัวควบคุม PID จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย Response time = 19.42 ms, ค่าเฉลี่ย % Steady-state error มีค่าน้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์ และ ค่าเฉลี่ย THD = 0.81% ส่วนตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำสุดในการแก้ปัญหา คือ ตัวควบคุม FOPID หลังการชดเชยจะมีความแตกต่างจากแรงดันพิกัดอยู่ประมาณ 22.44 V หรือประมาณ 10.28 % และเทคนิค Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเฉลี่ยประมาณ 98 นาที หรือ 1 ชั่วโมง 38 นาที



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเอพโอฟีไอดีที่ดีที่สุดสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตในระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในการหาค่าที่เหมาะสมให้กับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 4 ตัวควบคุม ได้แก่ PI, PID, FOPI และ FOPID ในการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink 2019b กับ 2 ระบบ ดังนี้

1. ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย 4 กรณี ได้แก่ แรงดันตกแบบสมดุล (Balance voltage sags), แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balance voltage swells), แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalance voltage sags) และแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalance voltage swells)
2. ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) 2 กรณี ได้แก่ ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินหรือ Single line to ground fault (SLG) และ ฟอลต์ระหว่างไลน์กับไลน์ลงดินที่หรือ Double line to ground fault (DLG)

โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการหาค่าเหมาะสมทั้ง 3 เทคนิคกับตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุม ในด้านของเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) , The total harmonics distortions (% THD) และเวลาในการใช้หาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหา

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย 4 กรณี จากการเปรียบเทียบผลการจำลองจากทั้ง 3 เทคนิค ได้แก่ Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในด้านของเกณฑ์ดรรชนีสมรรถนะ(Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE), The total harmonics distortions (% THD) และเวลาในการใช้หาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหา พบว่า ตัวควบคุม PID ของเทคนิค Water Cycle

Algorithm (WCA) จะมีค่าเกณฑ์บรรจบกัน (ITAE) ที่ต่ำสุดคือ 0.0117 สำหรับ The total harmonics distortions (% THD) เฉลี่ยหลังการชดเชยนั้น ตัวควบคุม FOPI ของเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) จะที่ค่าต่ำสุดที่ 1.02 % และเวลาเฉลี่ยน้อยที่สุดในสำหรับการแก้ปัญหาในครั้งนี้คือ 36.14 นาที ได้แก่ ตัวควบคุม PID ของเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ดังตาราง 23 ถึง 25

ตาราง 23 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่ทำได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
WCA	PI	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3907	0.1788				0.0153	51.24
	PID	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	30	20.708	0.01			0.0117	51.49
	FOPI	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3724	4.4513		1.6703		0.0153	46.62
	FOPID	Case1:Balanced sag, Case2:Balanced swell , Case3:Unbalanced sag and Case4:Unbalanced swell	0.3988	1.0762	0.01	1.6098	0.01	0.0153	46.68
PSO	PI	Case1:Balanced sag	20.7762	10.1138				0.0849	35.92
		Case2:Balanced swell	24.5325	15.4748				0.0767	35.61
		Case3:Unbalanced sag	0.4209	0.8605				0.0153	49.49
		Case4:Unbalanced swell	0.4079	0.01				0.0154	54.13
		Average						0.0481	43.79
	PID	Case1:Balanced sag	30	6.5484	11.2924			0.0849	31.62
		Case2:Balanced swell	1.5478	7.5424	5.6329			0.0766	35.83
		Case3:Unbalanced sag	29.7899	0.01	0.01			0.0117	38.68
		Case4:Unbalanced swell	30	8.9979	0.2732			0.0116	38.43
		Average						0.0462	36.14

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
	FOPI	Case1:Balanced sag	0.4225	2.3918		1.9393		0.0801	31.88
		Case2:Balanced swell	30	7.4315		0.551		0.0767	31.66
		Case3:Unbalanced sag	0.4334	4.1989		1.8411		0.0153	48.82
		Case4:Unbalanced swell	0.4272	5.4172		1.9761		0.0154	50.57
		Average						0.0469	40.73

ตาราง 23 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย (ต่อ)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
PSO	FOPID	Case1:Balanced sag	30	16.2337	0.01	0.7156	0.986	0.0791	31.52
		Case2:Balanced swell	25.14	17.7122	0.1	1.2277	0.25	0.0762	31.43
		Case3:Unbalanced sag	29.986	28.2438	1.3659	0.1	0.9953	0.0108	49.78
		Case4:Unbalanced swell	18.6788	24.5019	0.01	0.1001	0.9979	0.0107	50.93
		Average						0.0442	40.92
TLBO	PI	Case1:Balanced sag	0.0952	0.1209				0.0771	66.68
		Case2:Balanced swell	0.2166	0.1506				0.0693	71.83
		Case3:Unbalanced sag	0.3996	0.3928				0.0153	98.77
		Case4:Unbalanced swell	0.4144	0.0836				0.0154	100.21
	Average						0.0443	84.37	
	PID	Case1:Balanced sag	0.01	0.6517	0.4344			0.0829	67.72
		Case2:Balanced swell	0.3802	0.01	0.01			0.0762	70.82
		Case3:Unbalanced sag	30	13.3619	3.25			0.0115	99.64
Case4:Unbalanced swell		30	27.5657	0.01			0.0114	100.92	

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
		Average						0.0455	84.78
	FOPI	Case1:Balanced sag	0.1899	0.6886		1.6269		0.0781	62.00
		Case2:Balanced swell	0.2373	0.9308		1.6588		0.0715	52.00
		Case3:Unbalanced sag	0.4338	0.282		0.1215		0.0153	99.99
		Case4:Unbalanced swell	0.445	0.394		0.1		0.0154	92.73
		Average						0.0451	76.68

ตาราง 23 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย (ต่อ)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
TLBO	FOPID	Case1:Balanced sag	9.4388	3.3101	0.01	0.4364	0.8287	0.0821	61.30
		Case2:Balanced swell	30	27.8029	0.01	0.9052	0.9903	0.0707	59.21
		Case3:Unbalanced sag	0.2627	0.3723	0.0603	0.1349	0.1	0.0153	99.27
		Case4:Unbalanced swell	0.4162	0.2403	0.01	0.2471	0.146	0.0154	97.49
		Average						0.0459	79.32

พหุบัณฑิต ชีวะ

ตาราง 24 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัว ควบคุมที่หาได้ทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

Optimization techniques	Voltage disturbances	Controller Performances							
		PI		PID		FOPI		FOPID	
		Response time(ms)	Steady-state error (%)	Response time(ms)	Steady-state error (%)	Response time(ms)	Steady-state error (%)	Response time(ms)	Steady-state error (%)
WCA	Case 1: Balanced voltage sag	Nearly promptly	8.47	Nearly promptly	1.58	Nearly promptly	1.04	Nearly promptly	~ 0
	Case 2: Balanced voltage swell	32.32	4.47	32.49	1.06	27.02	~ 0	27.14	0.74
	Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	0.68	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0
	Case 4: Unbalanced voltage swell	26.4	~ 0	25.47	~ 0	32.8	~ 0	32.8	~ 0
	Average	14.68	3.4	14.49	0.66	14.96	0.26	14.99	0.18
PSO	Case 1: Balanced voltage sag	3.36	2.09	3.09	1.94	Nearly promptly	0.97	20.3	0.67
	Case 2: Balanced voltage swell	Nearly promptly	2.9	Nearly promptly	4.17	33.34	~ 0	33.6	~ 0
	Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	1.68	Nearly promptly	1.45	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	3.71
	Case 4: Unbalanced voltage swell	27.15	1.86	26.75	1.6	32.86	~ 0	32.39	3.97
	Average	7.63	2.13	7.46	2.29	16.55	0.24	21.57	2.09
TLBO	Case 1: Balanced voltage sag	Nearly promptly	1.86	3.36	2.3	Nearly promptly	1.16	Nearly promptly	0.84
	Case 2: Balanced voltage swell	33.87	1.3	Nearly promptly	4.75	33.6	1.22	33.47	0.72
	Case 3: Unbalanced voltage sag	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	1.16	Nearly promptly	~ 0	Nearly promptly	~ 0
	Case 4: Unbalanced voltage swell	28.5	1.51	26.48	1.55	33.2	~ 0	32.93	0.98
	Average	15.59	1.17	7.46	2.44	16.7	0.59	16.6	0.63

ตาราง 25 การเปรียบเทียบ The total harmonics distortions (% THD) ของแรงดันที่โหลดของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้ทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

Optimization techniques	Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
		PI	PID	FOPI	FOPID
WCA	Case 1 : Balanced voltage sag	1.61	0.71	1.6	1.2
	Case 2 : Balanced voltage swell	7.14	6.55	1.52	1.2
	Case 3 : Unbalanced voltage sag	0.51	0.47	0.48	1.25
	Case 4 : Unbalanced voltage swell	4.68	0.48	0.49	1.23
	Average	3.49	2.05	1.02	1.22
PSO	Case 1 : Balanced voltage sag	4.05	4.2	1.74	1.08
	Case 2 : Balanced voltage swell	3.22	3.2	11.49	11.49
	Case 3 : Unbalanced voltage sag	1.28	1.02	0.74	1.09
	Case 4 : Unbalanced voltage swell	6.39	4.91	6.97	5.71
	Average	3.74	3.33	5.24	4.84
TLBO	Case 1 : Balanced voltage sag	1.24	5.5	2.17	1.23
	Case 2 : Balanced voltage swell	11.12	4.07	11.35	11.34
	Case 3 : Unbalanced voltage sag	1.24	1.04	0.91	1.07
	Case 4 : Unbalanced voltage swell	6.47	4.9	7.11	6.86
	Average	5.02	3.88	5.39	5.13

2. ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) 2 กรณี จากการเปรียบเทียบผลจากการเปรียบเทียบผลการจำลองจากทั้ง 3 เทคนิค ได้แก่ Water Cycle Algorithm (WCA), Particle Swarm Optimization (PSO) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) ในด้านของเกณฑ์ดรชนีสมรรถนะ (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE), The total harmonics distortions (% THD) และเวลาในการใช้หาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหา พบว่า ตัวควบคุม PID ของเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) จะมีค่าเกณฑ์ดรชนีสมรรถนะ (ITAE) ที่ต่ำสุดคือ 0.0060 สำหรับ The total harmonics distortions (% THD) เฉลี่ยหลังการชดเชยนั้น ตัวควบคุม PID ของเทคนิค Water Cycle Algorithm (WCA) และ Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) จะมีค่าต่ำสุดเท่ากันที่ 0.81% และเวลาเฉลี่ยน้อยที่สุดในการแก้ปัญหาในครั้งนี้คือ 48.43 นาที ได้แก่ ตัวควบคุม FOPI ของเทคนิค Particle Swarm Optimization (PSO) ดังตาราง 26 ถึง 28

ตาราง 26 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)	
			Kp	Ki	Kd	λ	μ			
WCA	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0303	0.0225				0.0126	51.01	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.6071	12.9299				0.0102	47.47	
		Average						0.0114	49.24	
	PID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	9.9209	2.0225			0.0070	50.73	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	29.5666	0.3977	0.01			0.0050	51.6	
		Average						0.0060	51.16	
	FOPI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0679	0.01		1.8886		0.0126	49.87	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.4495	14.8467		1.2458		0.0102	50.09	
		Average						0.0114	49.98	
	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.01	2.0091	0.01	0.0111	0.0225	0.0123	48.58	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.01	1.4569	0.0342	0.01	0.01	0.0101	52.17	
		Average						0.0112	50.375	
	PSO	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.1028	0.1963				0.0126	50.28
			Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5204	15.4466				0.0102	51.02
			Average						0.0114	50.65
PID		Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	11.6929	0.01			0.0071	53.79	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	30	6.8415	1.3122			0.0050	52.51	
		Average						0.0061	53.15	
FOPI		Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0549	2.9763		1.6896		0.0126	48.88	
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.491	28.6463	0.01	1.2203	0.0225	0.0102	47.98	
		Average						0.0114	48.43	

ตาราง 26 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้จากทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) (ต่อ)

Optimization techniques	Control techniques	Voltage disturbances	Best Value of parameters					ITAE	Computation time (Min)
			Kp	Ki	Kd	λ	μ		
PSO	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.3057	1.1159	0.2682	0.1	0.1317	0.0125	51.94
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	28.9788	29.8963	0.8511	0.1	0.9937	0.0047	52.05
		Average						0.0086	51.995
TLBO	PI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0303	1.3587				0.0126	105.5
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5296	15.0789				0.0102	96.46
		Average						0.0114	100.98
	PID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	29.9873	11.6631	0.9961			0.0071	99
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	30	6.8374	0.01			0.0050	102.23
		Average						0.0061	100.61
	FOPI	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	1.0549	2.9763		1.6896		0.0126	94.51
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	0.5083	25.4464	1.3175			0.0102	95.37
		Average						0.0114	94.94
	FOPID	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	30	0.7404	0.01	1.3587	0.9961	0.0170	98.19
		Case 2: Double line to ground fault (DLG)	24.163	0.01	0.01	0.1	0.9981	0.1249	95.71
		Average						0.0710	96.95



ตาราง 27 เปรียบเทียบค่า Response time และ %Steady- state error ของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัว ควบคุมที่ทำได้ทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault)

Optimization techniques	Voltage disturbances	Controller Performances							
		PI		PID		FOPI		FOPID	
		Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)	Response time (ms)	Steady-state error (%)
WCA	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.06	~ 0	16.81	~ 0	17.21	~ 0	16.94	~ 0
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	13.98	1.89	20.84	~ 0	12.25	1.39	19.89	~ 0
	Average	15.52	0.95	18.82	0	14.73	0.7	18.41	0
PSO	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.88	0.8	16.8	~ 0	17.21	~ 0	13.98	~ 0
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	10.62	2.48	19.89	~ 0	10.62	2.45	Nearly promptly	2.44
	Average	14.25	1.64	18.35	0	13.91	1.23	6.99	1.22
TLBO	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	17.06	0.97	17.6	~ 0	16.94	~ 0	31.98	10.28
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	11.16	2.35	21.24	~ 0	12.23	1.7	23.28	5.58
	Average	14.11	1.66	19.42	0	14.59	0.85	27.63	7.93

ตาราง 28 การเปรียบเทียบค่า The total harmonics distortions (% THD) ของแรงดันที่โหลดของตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวควบคุมที่หาได้ทั้ง 3 เทคนิค ในการทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault)

Optimization techniques	Voltage Disturbances	THD values of the load voltage from and each controller (%)			
		PI	PID	FOPI	FOPID
WCA	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.92	0.48	0.69	1.5
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.36	1.14	1.09	3.37
	Average	1.14	0.81	0.89	2.44
PSO	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.9	0.48	0.67	0.63
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.44	1.15	1.27	1.58
	Average	1.17	0.82	0.97	1.11
TLBO	Case 1: Single line to ground fault (SLG)	0.92	0.47	0.69	1.25
	Case 2: Double line to ground fault (DLG)	1.41	1.15	1.12	1.72
	Average	1.17	0.81	0.91	1.49

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ในอนาคตสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทน (Renewable Energy) หรือในระบบสมาร์ตกริด (Smart Grid)

พหุบัณฑิต ชีวะ

บรรณานุกรม



- [1] R. S. Vedam and M. S. Sarma, *Power Quality: VAR Compensation in Power Systems*, CRC press, Florida, 2009.
- [2] J. Martinez and J. M. Jacinto, "Voltage Sag Studies in Distribution Networks—Part I: System Modeling," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1670-1678.
- [3] M. G. Simes and F. A. Farret, *Power Quality Analysis*, Wiley, New Jersey, 2017.
- [4] K. S. Arash and K. M. Smedley, "Fast and precise voltage sag detection method for dynamic voltage restorer (DVR) application," *Electric Power Systems Research*, Vol. 130, pp. 192-207.
- [5] E. A. Nagata, D. D. Ferreira, C. A. Duque, and A. S. Cequeira, "Voltage sag and swell detection and segmentation based on independent component analysis," *Electric Power Systems Research*, Vol. 155, pp. 274-280, 2018.
- [6] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Standard, pp. 1159-2009, 2014.
- [7] P. Kanjiya, B. Singh, A. Chandra, and L. Al-Haddad, "SRF theory revisited to control self-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and nonlinear loads," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 5, pp. 2330-2340, 2017.
- [8] D. Saeed, M. Shahparasti, M. Simab, and S. M. Mortazavi, "Employing interface compensators to enhance the power quality in hybrid AC/DC microgrids," *Ciência e Natura*, Vol. 37, pp. 357-363, 2015.
- [9] A. Benali, M. Khiat, T. Allaoui, and M. Denaï, "Power quality improvement and low voltage ride through capability in hybrid wind-PV farms grid-connected using dynamic voltage restorer," *IEEE Access*, Vol. 6, No. 1. pp. 68634-68648, 2018.
- [10] A. Omar, S. H. Aleem, E. E. El-Zahab, M. Algeblawy, and Z. M. Ali, "An improved approach for robust control of dynamic voltage restorer and power quality enhancement using grasshopper optimization algorithm," *ISA Transaction*, Vol. 95, pp. 110-129, 2019.
- [11] D. V. Tien, R. Gono, and L. Zbigniew, "A Multifunctional Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement," *Energies*, Vol. 11, Vol. 6, pp. 1351.

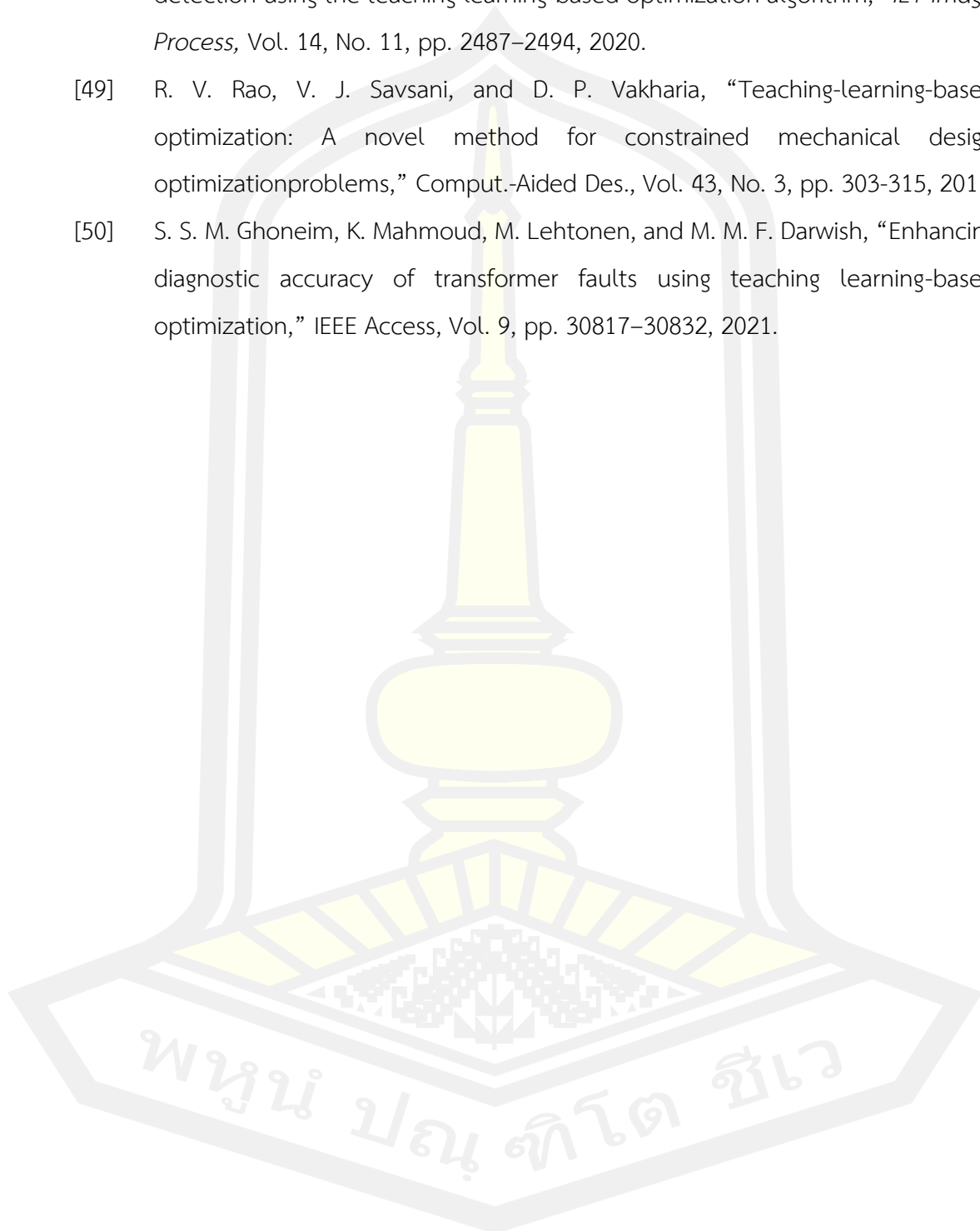
- [12] H. Nourmohamadi et.al., "A conventional dynamic voltage restorer with fault current limiting capability," *Procedia Computer Science*, Vol. 120, pp. 750–757, 2017.
- [13] A. M. Rauf and V. Khadkikar, "Integrated photovoltaic and dynamic voltage restorer system configuration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, pp. 400-410, 2015.
- [14] R. Sitharan, C. K. Sundarabalan, K. R. Devebalaji, S. K. Nataraj, M. Karthikeyan, "Improved fault ride through capability of DFIG-wind turbines using customized dynamic voltage restorer," *Sustainable Cities and Society*, Vol. 39, pp. 114–125, 2018.
- [15] V. Ansal, "ALO-optimized artificial neural network-controlled dynamic voltage restorer for compensation of voltage issues in distribution system," *Soft Computing*, Vol. 24, No. 1, pp. 1171-1184, 2019.
- [16] M. T. Hagh, A. Shaker, F. Sohrabi, and I. S. Günsel, "Fuzzy-based controller for DVR in the presence of DG," *Procedia Computer Science*, Vol. 120, pp. 684–690, 2017.
- [17] M. Pradhan, M. K. Mishra, "Dual P-Q theory-based energy-optimized dynamic voltage restorer for power quality improvement in a distribution system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, pp. 2946–2955, 2018.
- [18] P. Dash, L. C. Saikia, N. Sinha, "Comparison of performances of several FACTS devices using Cuckoo search algorithm optimized 2DOF controllers in multi-area AGC," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 65, 2015.
- [19] S. Sasitharan and M. K. Mishra, "Constant switching frequency band controller for dynamic voltage restorer", *IET Power Electronics*, Vol. 3, No. 5, pp. 657-667, 2010.
- [20] H. R. Hafezi and R. Faranda, "Dynamic voltage conditioner: A new concept for smart low-voltage distribution systems," *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol. 33, No. 9, pp. 7582-7590, 2018.

- [21] H. Nourmohamadi, S. I. Bektas, S. H. Hosseini, E. Babaei, and M. Sabahi, "A conventional dynamic voltage restorer with fault current limiting capability," *Procedia Computer Science*, Vol. 120, pp. 750-757, 2017.
- [22] A. Latif, D. C. Das, S. Ranjan, and A. K. Barik, "Comparative performance evaluation of WCA-optimised non-integer controller employed with WPG-DSPG-PHEV based isolated two-area interconnected microgrid system," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 13, No. 5, pp. 725-736, 2019.
- [23] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, and J. H. Kim, "Water cycle, mine blast and improved mine blast algorithms for discrete sizing optimization of truss structures," *Computers & Structures*, Vol. 149, pp. 1-16, 2015.
- [24] M. A. Elhameed and A. A. El-Fergany, "Water cycle algorithm-based load frequency controller for interconnected power systems comprising nonlinearity," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 15, pp. 3950-3961, 2016.
- [25] M. A. Elhameed and A. A. El-Fergany, "Water cycle algorithm-based economic dispatcher for sequential and simultaneous objectives including practical constraints," *Applied Soft Computing*, Vol. 58, pp. 145-154, 2017.
- [26] M. T. Hagh, A. Shaker, F. Sohrabi, I. S. Günsel, "Fuzzy-based controller for DVR in the presence of DG," *Procedia Computer Science*, Vol. 120, pp. 684-690, 2017.
- [27] T. A. Naidu, S. R. Arya, and R. Maurya, "Multi-objective dynamic voltage restorer with modified EPLL control and optimized PI controller gains," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 3, pp. 2181-2192, 2018.
- [28] T. A. Naidu, S. R. Arya, and R. Maurya, "Dynamic voltage restorer with quasi-Newton filter-based control algorithm and optimized values of PI regulator gains," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, No. 4, pp. 2476-2485, 2019.
- [29] F. Jiang, C. Tu, Q. Guo, Z. Shuai, X. He, and J. He, "Dual-functional dynamic voltage restorer to limit fault current," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 66, No. 7, pp. 5300-5309, 2019.

- [30] A. I. Omar, S. H. Aleem, E. E. Abdel, E. L. Zahab, X. Algablawy, and Z. M. Ali, "An improved approach for robust control of dynamic voltage restorer and power quality enhancement using grasshopper optimization algorithm," *ISA Transactions*, Vol. 95, pp. 110–129, 2019.
- [31] L. R. Merchan-Villalba, J. M. Lozano-Garcia, J. G. Avina-Cervantes, H. J. Estrada-Garcia, A. Pizano-Martinez, and C. A. Carreno-Meneses, "Linearly decoupled control of a dynamic voltage restorer without energy storage," *Mathematical Modeling in Industrial Engineering and Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 10, 2020.
- [32] E. Molla, C Kuo, "Voltage sag enhancement of grid connected hybrid PV-wind power system using battery and SMES based dynamic voltage restorer," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 130003–130013, 2020.
- [33] Z. Elkady, N. Abdel-Rahim, A. Mansour, F. Bendary, "Enhanced DVR Control System Based on the Harris Hawks Optimization Algorithm," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 177721 - 177733, 2020.
- [34] S. C. Yáñez-Campos, G. Cerda-Villafaña, J. M. Lozano-García, "A two-grid interline dynamic voltage restorer based on two three-phase input matrix converters," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 2, 2021.
- [35] T. A. Naidu, S. R. Arya, R. Maurya, and P. Sanjeevikumar, "Performance of DVR Using Optimized PI Controller Based Gradient Adaptive Variable Step LMS Control Algorithm," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 2, No. 2, pp. 155-163, 2021.
- [36] K. Chan and A. Kara, "Voltage sags mitigation with an integrated gate commutated thyristor based dynamic voltage restorer," *Proceeding of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 210-215, 1998.
- [37] S. S. Choi, B. H. Li, and D. D. Vilathgamuwa, "Dynamic voltage restoration with minimum energy injection," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, pp. 51-57, 2000.

- [38] H. Kim and S. K. Sul, "Compensation voltage control in dynamic voltage restorers by use of feed forward and state feedback scheme," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 5, pp. 1169–1177, 2005.
- [39] S. S. Choi, B. H. Li, and D. M. Vilathgamuwa, "Dynamic voltage restoration with minimum energy injection," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, pp. 51-57, 2000.
- [40] P. Shah and S. Agashe, "Review of fractional PID controller," *Mechatronics*. Vol. 38, pp. 29 – 41, 2016.
- [41] N. X. Liu and J. T. Fei, "Fractional-order PID and active disturbance rejection control for active power," *Proceeding of 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 2678-2683, 2017.
- [42] H. Eskandara, A. Sadollah, A. Bahreininejad, and M. Hamdib, "Water cycle algorithm—a novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems," *Computer & Structure*, Vol. 110, pp. 151–166, 2012.
- [43] A. Sadollah, H. Eskandar, H. Lee, D. G Yoo, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm: A detailed standard code," *SoftwareX*, Vol. 5, pp. 37-43, 2016.
- [44] A. A. A. El-Ela, R. A. El-Sehiemy, and A. S. Abbas, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Water Cycle Algorithm," *IEEE Systems Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 3629-3636, 2018.
- [45] J. Kyei, R. Ayyanar, G. Heydt, R. Thallam, and J. Blevins, "The design of power acceptability curves," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 3, pp. 828–833, 2002.
- [46] ภูมิยศ พยัคฆวรรณ "การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับตัวอัตโนมัติ" กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [47] A. Srivastava, D. K. Das and A. Kumar, "A PSO based Fractional Order PI (FOPI) controller design for a Shunt Active Power Filter for Harmonic Elimination", 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical Electronics and Computer Engineering (UPCON), pp. 1-6, 2018.

- [48] J. Kyei, R. Ayyanar, G. Heydt, R. Thallam, and J. Blevins, "Vanishing point detection using the teaching learning-based optimization algorithm," *IET Image Process*, Vol. 14, No. 11, pp. 2487–2494, 2020.
- [49] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 43, No. 3, pp. 303–315, 2011.
- [50] S. S. M. Ghoneim, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish, "Enhancing diagnostic accuracy of transformer faults using teaching learning-based optimization," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 30817–30832, 2021.





ภาคผนวก

โค้ดโปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ในการแก้ปัญหาด้วยด้วยเทคนิค

Water Cycle Algorithm (WCA)

```

1. %% Default Values for WCA
2. format long g
3. if (nargin <5 || isempty(Npop)), Npop=50; end
4. if (nargin <6 || isempty(Nsr)), Nsr=4; end
5. if (nargin <7 || isempty(dmax)), dmax=1e-16; end
6. if (nargin <8 || isempty(max_it)), max_it=1000; end
7. %% -----
8. % Create initial population and form sea, rivers, and streams
9. tic
10. N_stream=Npop-Nsr;
11. ind.position=[];
12. ind.cost=[];
13. pop= repmat(ind,Npop,1);
14. for i=1:Npop
15. pop(i).position=LB+(UB-LB).*rand(1,nvars);
16. pop(i).cost=objective_function(pop(i).position);
17. end
18. [~, index]=sort([pop.cost]);
19. %----- Forming Sea -----
20. sea=pop(index(1));
21. %-----Forming Rivers -----
22. river= repmat(ind,Nsr-1,1);
23. for i=1:Nsr-1
24. river(i)=pop(index(1+i));
25. end
26. %----- Forming Streams -----
27. stream= repmat(ind,N_stream,1);
28. for i=1:N_stream
29. stream(i)=pop(index(Nsr+i));
30. end

```

```

31. %----- Designate streams to rivers and sea -----
32. cs=[sea.cost;[river.cost]';stream(1).cost];
33. f=0;
34. if length(unique(cs))~=1
35. CN=cs-max(cs);
36. else
37. CN=cs;
38. f=1;
39. end
40. NS=round(abs(CN/sum(CN))*N_stream);
41. if f~=1
42. NS(end)=[];
43. end
44. NS=sort(NS,'descend');
45. % ----- Modification on NS -----
46. i=Nsr;
47. while sum(NS)>N_stream
48. if NS(i)>1
49. NS(i)=NS(i)-1;
50. else
51. i=i-1;
52. end
53. end
54. i=1;
55. while sum(NS)<N_stream
56. NS(i)=NS(i)+1;
57. end
58. if find(NS==0)
59. index=find(NS==0);
60. for i=1:size(index,1)
61. while NS(index(i))==0

```

```

a. NS(index(i))=NS(index(i))+round(NS(i)/6);
b. NS(i)=NS(i)-round(NS(i)/6);
62. end
63. end
64. end
65. NS=sort(NS,'descend');
66. NB=NS(2:end);
67. %%
68. %----- Main Loop for WCA -----
69. disp('***** Water Cycle Algorithm (WCA)*****');
70. disp('Iterations   Function Values *');
71. disp('*****');
72. FF=zeros(max_it,1);
73. for i=1:max_it
74. %----- Moving stream to sea-----
75. for j=1:NS(1)
76. stream(j).position=stream(j).position+2.*rand(1).*(sea.position-
    stream(j).position);
77. stream(j).position=min(stream(j).position,UB);
78. stream(j).position=max(stream(j).position,LB);
79. stream(j).cost=objective_function(stream(j).position);
80. if stream(j).cost<sea.cost
    a. new_sea=stream(j);
    b. stream(j)=sea;
    c. sea=new_sea;
81. end
82. end
83. %----- Moving Streams to rivers-----
84. for k=1:Nsr-1
85. for j=1:NB(k)

```



```

86. stream(j+sum(NS(1:k))).position=stream(j+sum(NS(1:k))).position+2.*rand(1,nvar
    s).*(river(k).position-stream(j+sum(NS(1:k))).position);
    a. stream(j+sum(NS(1:k))).position=min(stream(j+sum(NS(1:k))).position,UB);
    b. stream(j+sum(NS(1:k))).position=max(stream(j+sum(NS(1:k))).position,LB);
    c. stream(j+sum(NS(1:k))).cost=objective_function(stream(j+sum(NS(1:k))).posit
        ion);
    d. if stream(j+sum(NS(1:k))).cost<river(k).cost
        i. new_river=stream(j+sum(NS(1:k)));
        ii. stream(j+sum(NS(1:k)))=river(k);
        iii. river(k)=new_river;
        iv. if river(k).cost<sea.cost
            v. new_sea=river(k);
            vi. river(k)=sea;
            vii. sea=new_sea;
            viii. end
        e. end
87. end
88. end
89. %----- Moving rivers to Sea -----
90. for j=1:Nsr-1
91. river(j).position=river(j).position+2.*rand(1,nvars).*(sea.position-river(j).position);
92. river(j).position=min(river(j).position,UB);
93. river(j).position=max(river(j).position,LB);
94. river(j).cost=objective_function(river(j).position);
95. if river(j).cost<sea.cost
    a. new_sea=river(j);
    b. river(j)=sea;
    c. sea=new_sea;
96. end
97. end
98. %----- Evaporation condition and raining process-----

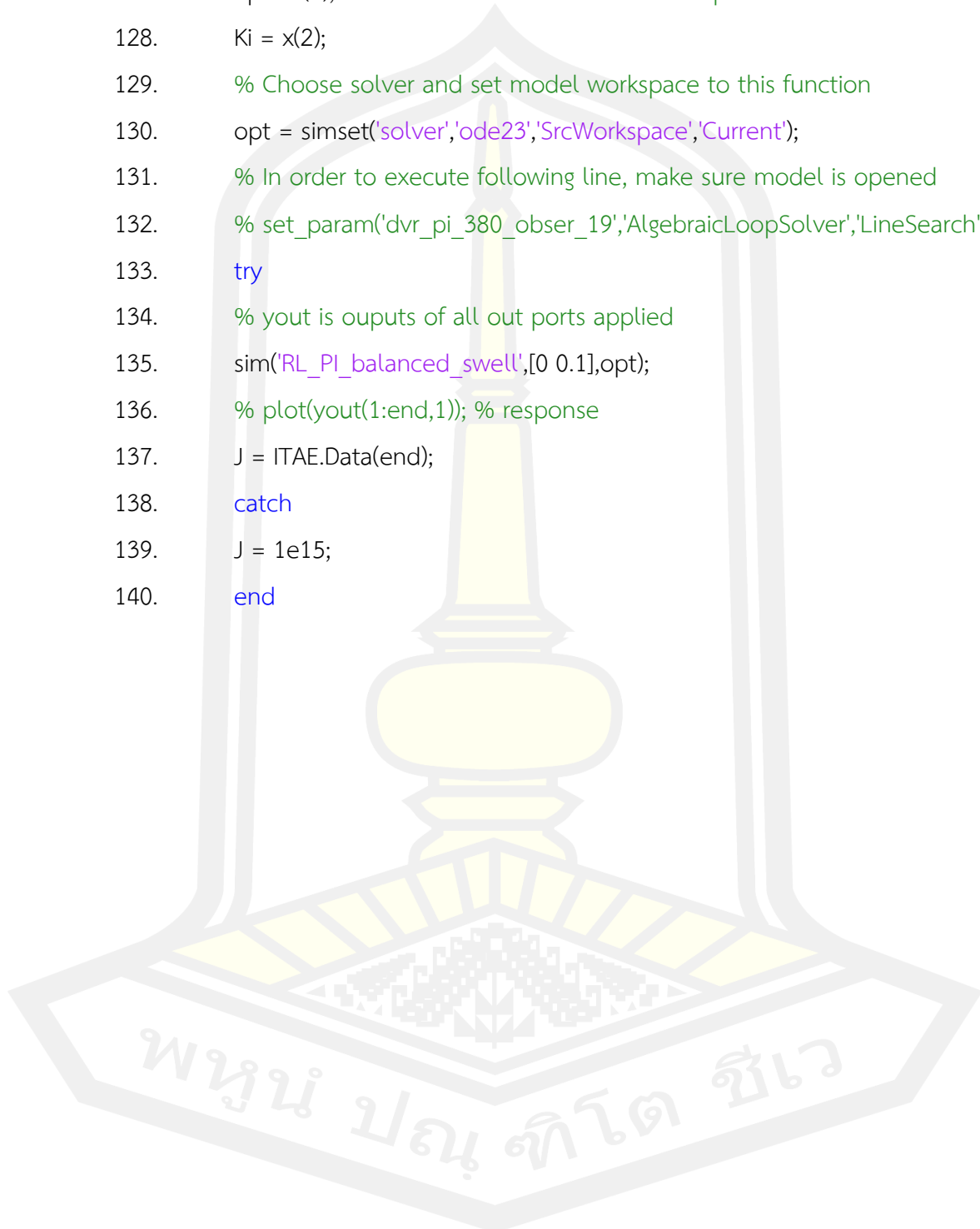
```

```

99. % Check the evaporation condition for rivers and sea
100.     for k=1:Nsr-1
101.         if ((norm(river(k).position-sea.position)<dmax) || rand<0.1)
    a. for j=1:NB(k)
        i. stream(j+sum(NS(1:k))).position=LB+rand(1,nvars).*(UB-LB);
    b. end
102.     end
103.     end
104.     % Check the evaporation condition for streams and sea
105.     for j=1:NS(1)
106.         if ((norm(stream(j).position-sea.position)<dmax))
    a. stream(j).position=LB+rand(1,nvars).*(UB-LB);
107.     end
108.     end
109.     %-----
110.     dmax=dmax-(dmax/max_it);
111.     disp(['Iteration: ',num2str(i),' Fmin= ',num2str(sea.cost)]);
112.     FF(i)=sea.cost;
113.     end
114.     %% Results and Plot
115.     toc;
116.     Elapsed_Time=toc;
117.     plot(FF,'LineWidth',2);
118.     xlabel('Number of Iterations');
119.     ylabel('Function Values');
120.     NFEs=Npop*max_it;
121.     Xmin=sea.position;
122.     Fmin=objective_function(Xmin);
123.     end
124.     % THis is cost function
125.     function J = itae_cost(x)

```

```
126. Lf = 2.5e-3; Clf = 55e-6;
127. Kp = x(1); % Move variables into model parameter names
128. Ki = x(2);
129. % Choose solver and set model workspace to this function
130. opt = simset('solver','ode23','SrcWorkspace','Current');
131. % In order to execute following line, make sure model is opened
132. % set_param('dvr_pi_380_obser_19','AlgebraicLoopSolver','LineSearch')
133. try
134. % yout is outputs of all out ports applied
135. sim('RL_PI_balanced_swell',[0 0.1],opt);
136. % plot(yout(1:end,1)); % response
137. J = ITAE.Data(end);
138. catch
139. J = 1e15;
140. end
```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ทวีศักดิ์ ทองแสน
วันเกิด	23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 172 หมู่ที่ 12 ตำบลเกิ้ง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต สกลนคร พ.ศ. 2558 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2564 ระดับปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน บุญจิตต์ ชีวะ