



การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่  
เหมาะสมที่สุด

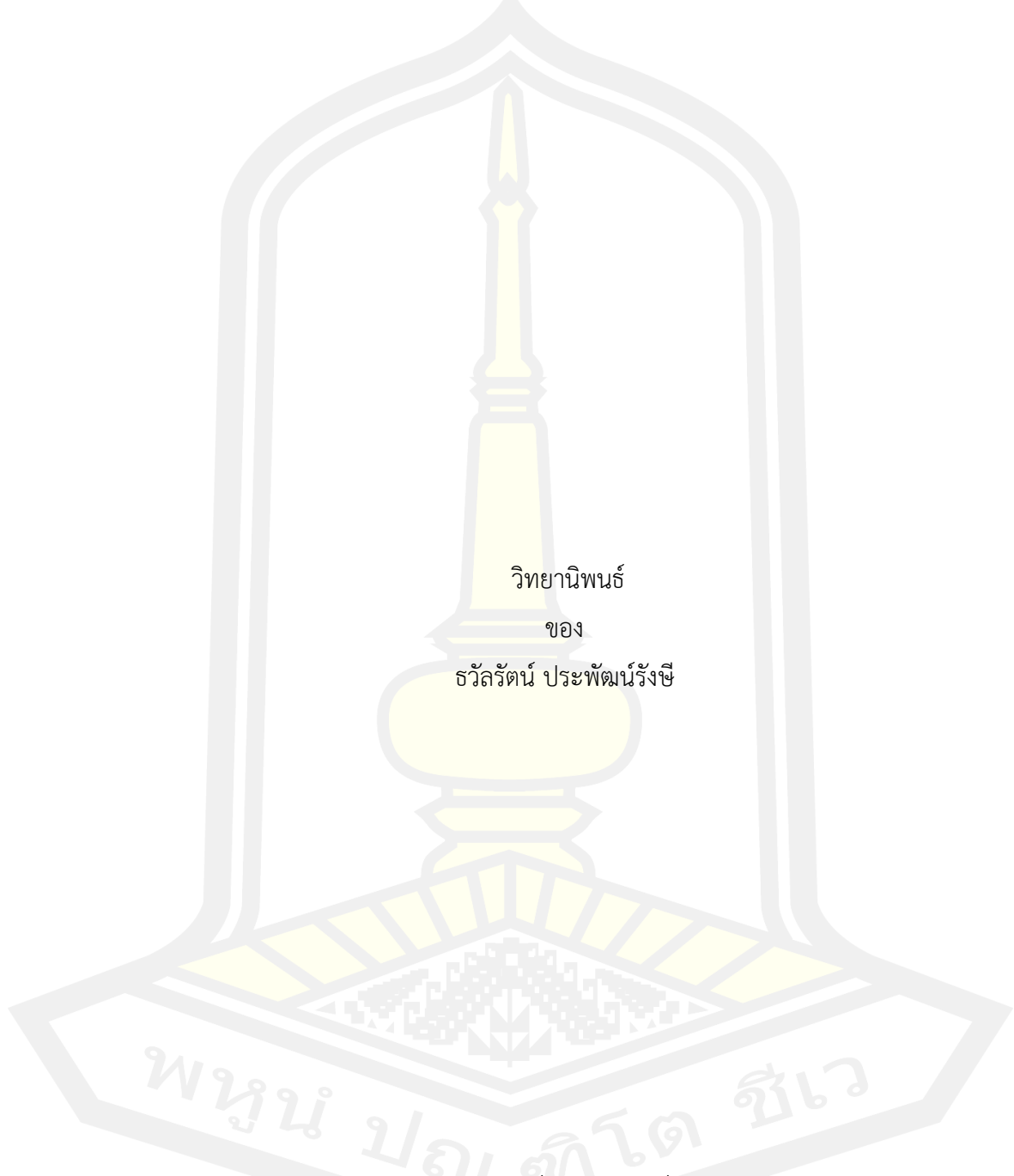
วิทยานิพนธ์  
ของ  
ธวัชรัตน์ ประพัฒน์รังษี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่  
เหมาะสมที่สุด

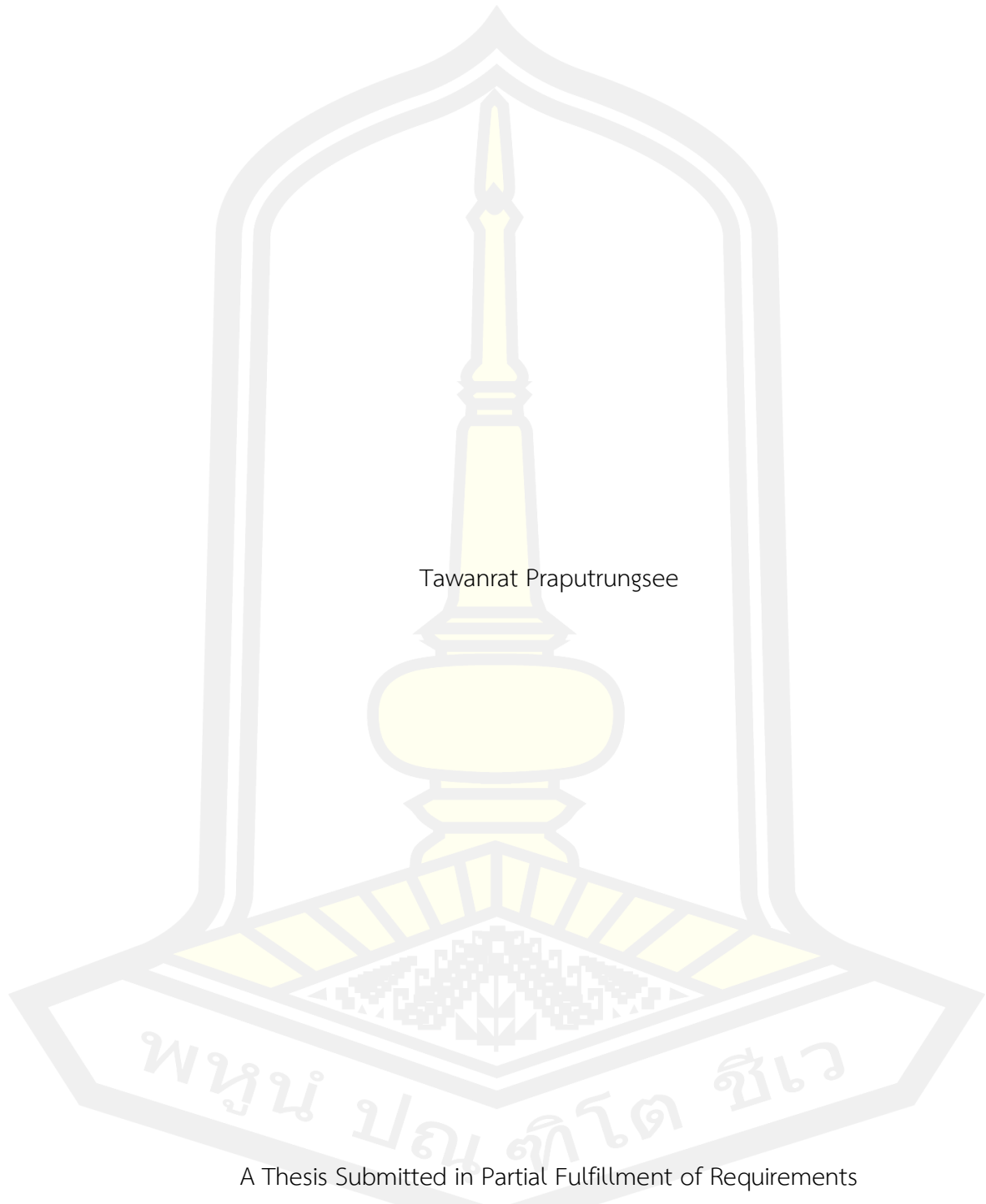


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

DVR Controller-Performance Improvement Using Parameters-Optimization Technique



Tawanrat Praputrungee

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

June 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาววัลรัตน์ ประพัฒน์  
รังษี แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนนะ )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....  
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



<b>ชื่อเรื่อง</b>	การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด		
<b>ผู้วิจัย</b>	ธวัชรรัตน์ ประพัฒน์รังษี		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรยุทธ ซาติชนะยืนยง		
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	<b>ปีที่พิมพ์</b>	2565

### บทคัดย่อ

ปฏิญานีพนธ์นี้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมพีไอในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE std. 1159-2019 กรณีศึกษาของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกินชั่วขณะ และแรงดันไม่สมดุล ที่เกิดจากความผิดปกติของแหล่งจ่าย ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส และความผิดพลาดสามเฟส งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 3 วิธี ได้แก่ เทคนิคในการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอด้วย วิธีการจำลองออบเหนียว วิธีการแบบกลุ่มอนุภาค และ วิธีการเชิงพันธุกรรม โดยมีดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลาเป็นเกณฑ์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ตัวกักเก็บแรงดันพลวัตที่ตัวควบคุมพีไอใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองออบเหนียว สามารถชดเชย ปรับปรุง และแก้ไขปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสได้มีประสิทธิภาพกว่า วิธีการแบบกลุ่มอนุภาค และ วิธีการเชิงพันธุกรรม เวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมน้อยกว่า วิธีการแบบกลุ่มอนุภาค และ วิธีการเชิงพันธุกรรม 22 และ 24 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการจำลองออบเหนียวสามารถลดเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมได้มากกว่าอีกสองวิธี

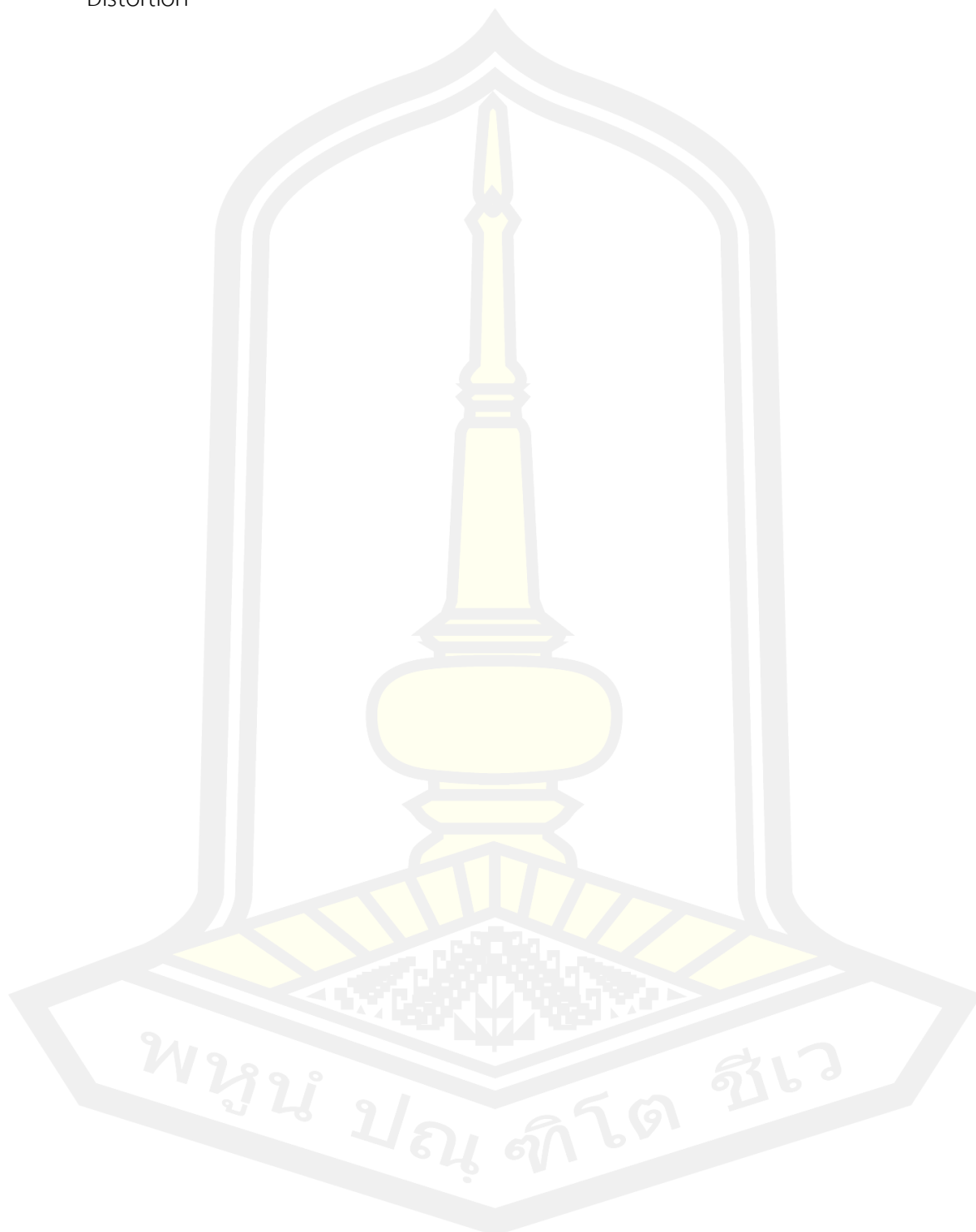
คำสำคัญ : ตัวกักเก็บแรงดันพลวัต, ตัวควบคุมพีไอ, คุณภาพกำลังไฟฟ้า, ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

<b>TITLE</b>	DVR Controller-Performance Improvement Using Parameters-Optimization Technique		
<b>AUTHOR</b>	Tawanrat Praputrunsee		
<b>ADVISORS</b>	Assistant Professor Theerayuth Chatchanayuenyong , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Engineering	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2022

### ABSTRACT

This thesis presents The DVR-controller performance improvement using parameters optimization technique to design the parameters for PI Controller in order to correct the voltage anomalies in three phase system according to IEEE std. 1159-2019. The case studies of power quality problem include voltage sags, voltage swells, and unbalanced voltage, which are caused by the abnormal source, single line-to-ground fault, double line-to-ground fault and three-phase fault. This research employed MATLAB/SIMULINK program to simulate and compare three parameters optimization techniques, which are Simulated Annealing (SA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA) techniques using Integral Time Absolute Error (ITAE) as a performance index criteria. The simulation results show that the DVR, whose PI controller using Simulated Annealing algorithm technique (SA) could compensate, improve and solve the voltage quality problems in three phase system more effectively than the Particle Swarm Optimization technique (PSO) and Genetic Algorithm technique (GA). It took 22 and 24 times less parameters searching time than the PSO and GA respectively. In addition, SA technique could reduce the percentage of total harmonic distortion (THD) of load much more than the other two techniques.

Keyword : Dynamic Voltage Restorer, PI Controller, Power Quality, Total Harmonic Distortion



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ ชาติชนะยีนยง ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และผู้มีพระคุณทั้งหลายที่คอยสนับสนุนคอยให้กำลังใจและเอาใจใส่ โดยเฉพาะการสนับสนุนโอกาสทางการศึกษาทุนทรัพย์ และการช่วยเหลือทางด้านอื่นๆ ตลอดมา หากเนื้อหาหรือข้อมูลต่าง ๆ ในปริญญานิพนธ์นี้ เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและผู้ทำการวิจัยท่านอื่นๆ ผู้วิจัยขอยกคุณความดีทั้งหลายให้แก่บุคคลทุกท่านที่กล่าวมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ธวัชรรัตน์ ประพัฒน์รังษี



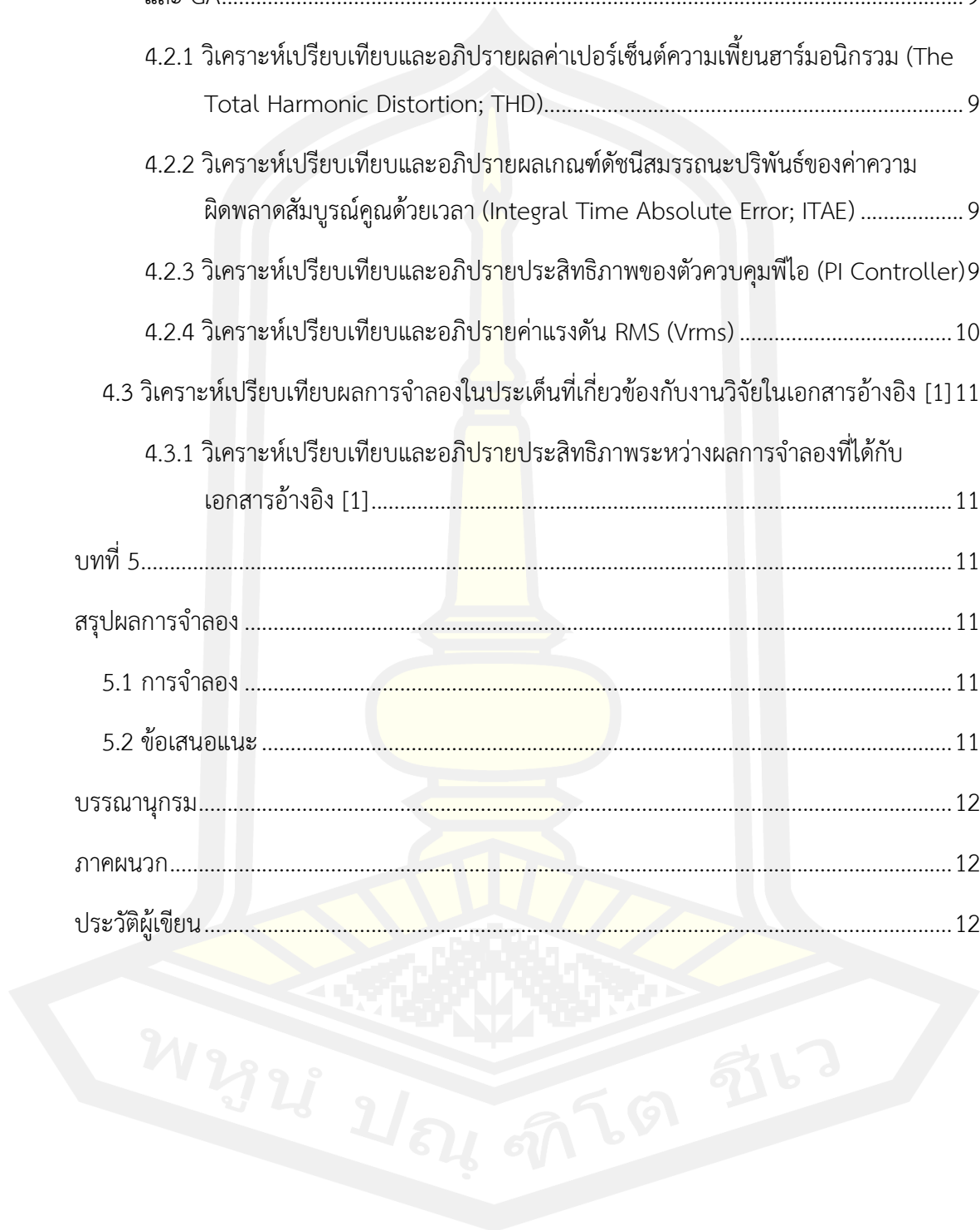
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ .....	ค
บทที่ 1.....	1
บทนำ .....	1
1.1 หลักการและเหตุผล .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.2.1 เพื่อศึกษาและปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวกักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) .....	2
1.2.2 เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink .....	2
1.2.3 เปรียบเทียบผลทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคในการปรับจูนพารามิเตอร์ของพีไอ ...	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.3.1 ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบ สามเฟส .....	3
1.3.2 ศึกษาเทคนิคในการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของพีไอเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมา ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB Sumulink.....	3
1.3.3 จำลองประสิทธิภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต ด้วยโปรแกรม MATLAB Sumulink .....	3

1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับจูนพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ ITAE (Integral Time Absolute Error).....	3
1.4 ความสำคัญของการวิจัย .....	3
1.4.1 พัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	3
1.4.2 ประยุกต์ใช้การควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม .....	3
1.5 คำนิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2.....	6
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.2 ทฤษฎี.....	9
2.2.1 โครงสร้างอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer; DVR) .....	9
2.2.2 รูปแบบของตัวกู้คืนแรงดันพลวัต (DVR Topology).....	10
2.1.2 หลักการทำงานของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต.....	14
2.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	16
2.3.1 ความผิดปกติที่เกิดในช่วงชั่วครู่ (Transient).....	16
2.3.2 ความผิดปกติที่เกิดในช่วงเวลาสั้นๆ (Short-Duration Voltage Variations).....	18
2.3.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงเวลานาน (Long-Duration Voltage Variations).....	21
2.3.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า (Waveform Distortion) .....	22
2.3.6 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation หรือ Voltage Flicker).....	26
2.3.7 การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลัง (Power Frequency Variation).....	26
2.4 การสร้างแรงดันอ้างอิงบนหลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor diagram) .....	27
2.5 ทฤษฎีการควบคุมพีไอดี (PID Control Theory).....	29
2.6 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด.....	34

2.6.1	ทฤษฎีการค้นหาพารามิเตอร์แบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO).....	34
2.6.2	ทฤษฎีการค้นหาพารามิเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมหรือจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) .....	36
2.6.3	ทฤษฎีการค้นหาพารามิเตอร์แบบวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA).....	37
2.7	เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index Criteria).....	40
บทที่ 3	.....	41
	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1	การจำลอง .....	41
3.1.1	โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง.....	41
3.1.2	ไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลอง.....	41
3.2	ขั้นตอนการค้นหาค่าพารามิเตอร์.....	47
3.2.1	การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) .	47
3.2.2	การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) .....	50
3.2.3	การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO).....	52
บทที่ 4	.....	55
	ผลการวิจัยและอภิปราย.....	55
4.1	การจำลองและผลการจำลอง (Simulation and Simulation Results).....	55
4.1.1	แผนภาพการจำลอง .....	55
4.1.2	ทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย .....	59
4.1.3	ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือความผิดปกติ (Fault) ...	76

4.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลประสิทธิภาพของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม SA PSO และ GA.....	90
4.2.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion; THD).....	90
4.2.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) .....	92
4.2.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller).....	94
4.2.4 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายค่าแรงดัน RMS (Vrms) .....	103
4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [1].....	114
4.3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1].....	114
บทที่ 5.....	117
สรุปผลการจำลอง .....	117
5.1 การจำลอง .....	117
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	119
บรรณานุกรม.....	120
ภาคผนวก.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	126

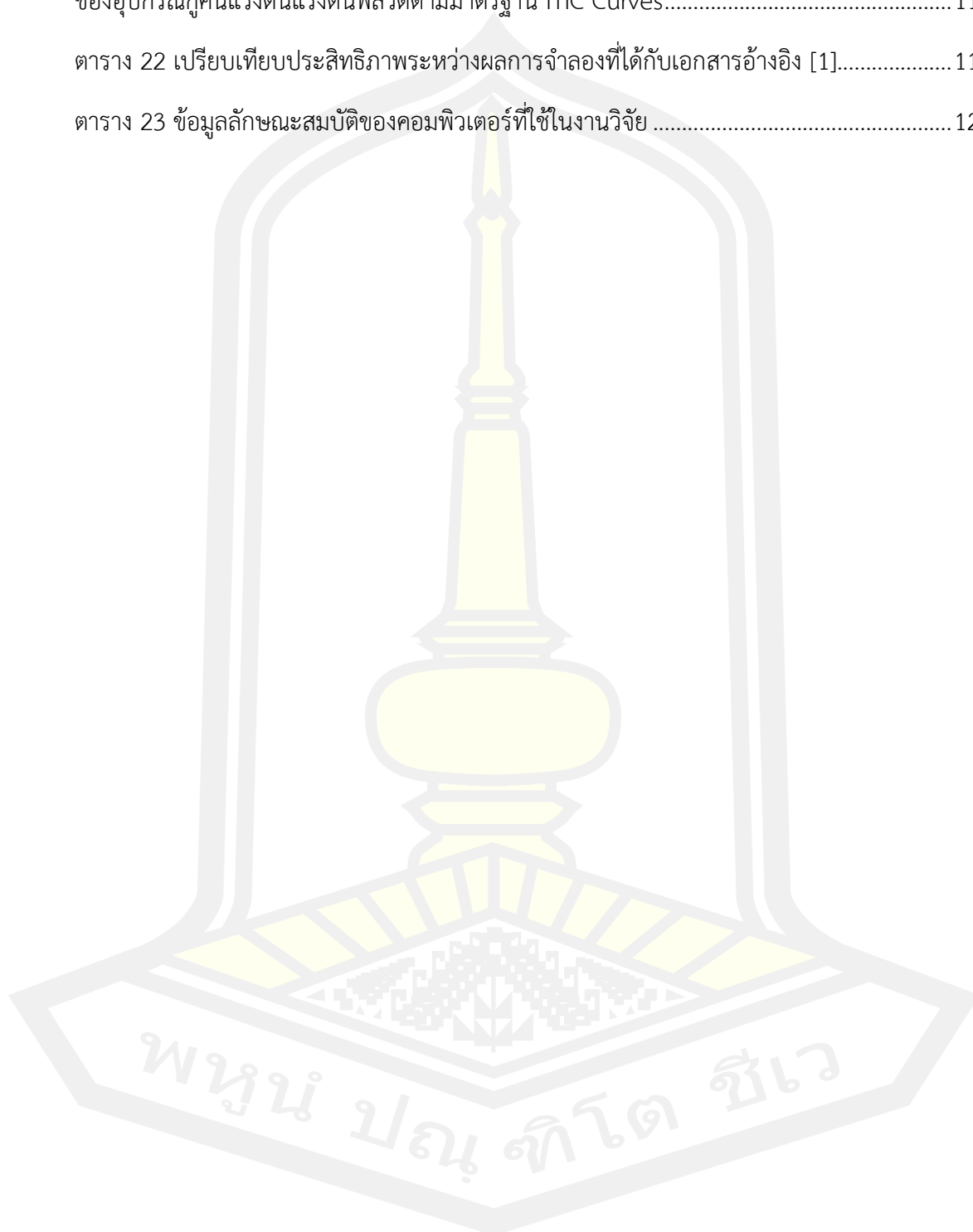




## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 คำนิยามศัพท์เฉพาะ .....	4
ตาราง 2 สรุปและเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
ตาราง 3 เปรียบเทียบ ข้อดี-ข้อเสีย ของรูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตแบบต่าง ๆ [10].....	13
ตาราง 4 กำหนดค่าขอบเขต .....	49
ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต .....	56
ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้า.....	56
ตาราง 7 พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอโดยใช้เทคนิค SA PSO และ GA .....	58
ตาราง 8 แสดงรายละเอียดการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย .....	59
ตาราง 9 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion) .....	90
ตาราง 10 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-201 [7] .....	91
ตาราง 11 เปรียบเทียบค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คุณด้วยเวลา. 93	93
ตาราง 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันเกินแบบสมดุล .....	95
ตาราง 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล.....	96
ตาราง 14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันตกแบบสมดุล.....	97
ตาราง 15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล.....	98
ตาราง 16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ..	99
ตาราง 17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีความผิดพลาดลงดินสองเฟส.....	100
ตาราง 18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีความผิดพลาดลงดินสามเฟส .....	101
ตาราง 19 เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสม.....	102
ตาราง 20 ค่าแรงดัน RMS (Vrms) .....	110

ตาราง 21 ข้อมูลการพล็อตกราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตตามมาตรฐาน ITIC Curves.....	112
ตาราง 22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1].....	115
ตาราง 23 ข้อมูลลักษณะสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	125



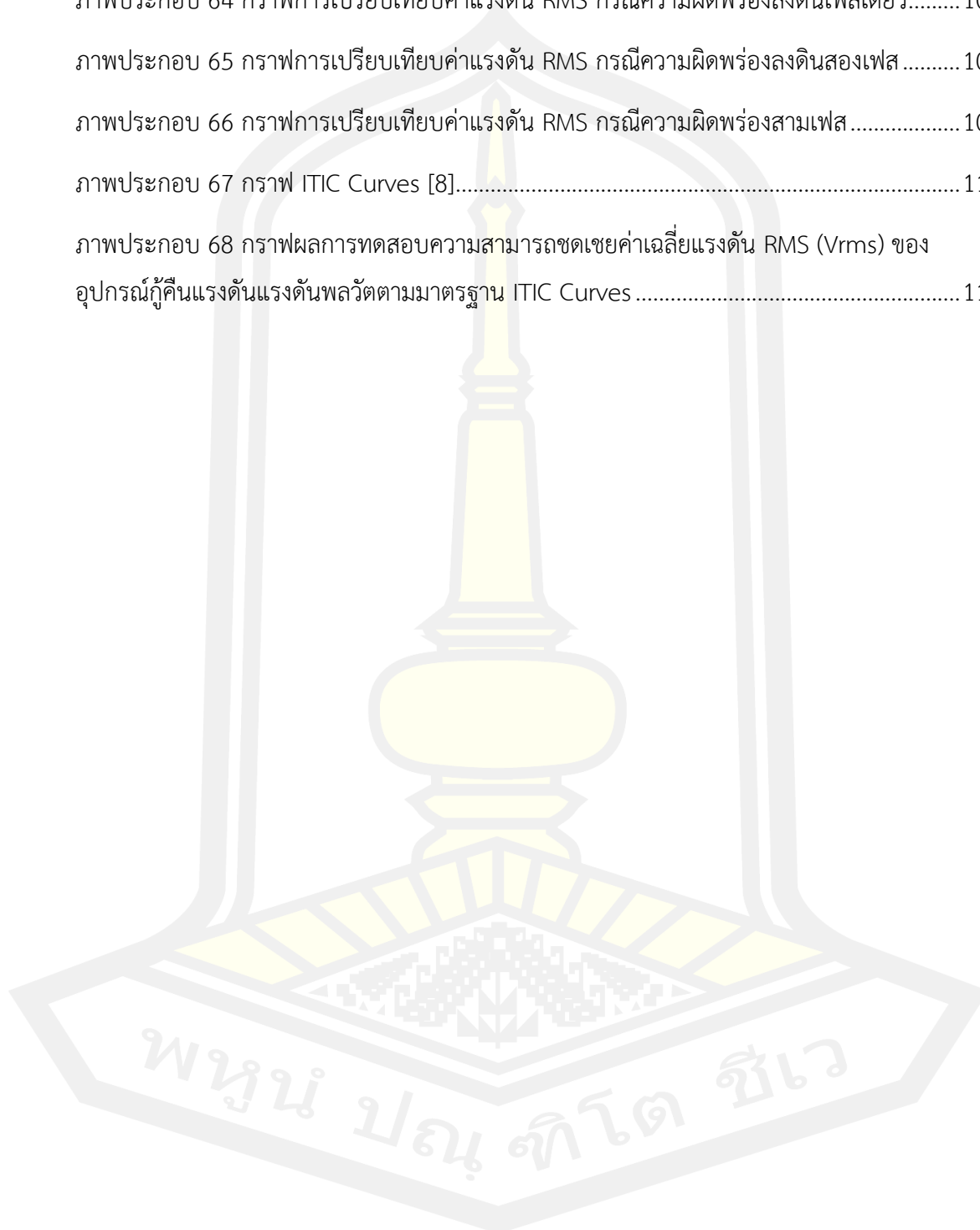
## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างและการทำงานตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต [17] .....	9
ภาพประกอบ 2 รูปแบบโครงของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต [17].....	10
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของรูปแบบวงจรตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต [10].....	11
ภาพประกอบ 4 โครงสร้างระบบป้องกันตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต (DVR) [23] .....	15
ภาพประกอบ 5 กระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า [13].....	16
ภาพประกอบ 6 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสั้นแบบชั่วครู่จากการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุ [13] .....	17
ภาพประกอบ 7 การสั้นแบบชั่วครู่ความถี่ต่ำที่เกิดจากจ่ายพลังงานของตัวเก็บประจุ [13].....	18
ภาพประกอบ 8 แรงดันไฟฟ้าดับชั่วขณะเนื่องจากความผิดพลาด [13].....	19
ภาพประกอบ 9 แรงดันตกชั่วขณะสาเหตุจากการเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์ [13].....	20
ภาพประกอบ 10 แรงดันตกชั่วขณะแบบทันทีทันใดสาเหตุจากข้อผิดพลาดของระบบ [26].....	20
ภาพประกอบ 11 แรงดันเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใดสาเหตุจากความผิดพลาดเฟสเดียว [13].....	21
ภาพประกอบ 12 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของ ASD [13].....	23
ภาพประกอบ 13 รูปคลื่นรอยบากจากการทำงานของวงจรแปลงผัน [13].....	24
ภาพประกอบ 14 สัญญาณรบกวน และสัญญาณรบกวนบนรูปคลื่นพลังงานแบบกระแสสลับ [26].	25
ภาพประกอบ 15 แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมจากการทำงานของเตาหลอมแบบอาร์ค [26] .....	26
ภาพประกอบ 16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสาย .....	27
ภาพประกอบ 17 ตัวควบคุมพีไอดีที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม .....	29
ภาพประกอบ 18 แผนภาพแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอ .....	32
ภาพประกอบ 19 การติดตั้งของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง .....	41
ภาพประกอบ 20 แผนภาพไดอะแกรมตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต .....	42

ภาพประกอบ 21	บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส .....	42
ภาพประกอบ 22	บล็อกไดอะแกรมของการเลื่อนมุมเฟส 90 องศา.....	43
ภาพประกอบ 23	บล็อกคำนวณแรงดันอ้างอิง.....	44
ภาพประกอบ 24	บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณเกต .....	44
ภาพประกอบ 25	บล็อกสวิตช์อินเวอร์เตอร์.....	45
ภาพประกอบ 26	สวิตช์บายพาส .....	46
ภาพประกอบ 27	บล็อกไดอะแกรมของโหลด.....	46
ภาพประกอบ 28	ภาพการจำลองบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) .....	47
ภาพประกอบ 29	โปรแกรมกำหนด Cost Function .....	48
ภาพประกอบ 30	แสดงถึงวิธีการเข้า Apps [28].....	48
ภาพประกอบ 31	ภาพการเลือกวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm).....	50
ภาพประกอบ 32	ภาพการเลือกและหน้าต่างการตั้งค่าวิธีการจำลองอบเหนียว (SA) .....	51
ภาพประกอบ 33	โค้ด PSO ในโปรแกรม Matlab M File .....	53
ภาพประกอบ 34	โค้ด PSO ในโปรแกรม Matlab M File.....	54
ภาพประกอบ 35	แผนภาพการจำลองโดยรวมของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต.....	55
ภาพประกอบ 36	ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบสมดุล .....	60
ภาพประกอบ 37	กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell).....	62
ภาพประกอบ 38	ผล THD กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล .....	63
ภาพประกอบ 39	ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล.....	64
ภาพประกอบ 40	กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell).....	66
ภาพประกอบ 41	ผล THD กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล .....	67
ภาพประกอบ 42	ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบสมดุล.....	68

ภาพประกอบ 43 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag) .....	70
ภาพประกอบ 44 ผล THD กรณีผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบสมดุล .....	71
ภาพประกอบ 45 ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล .....	72
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag).....	74
ภาพประกอบ 47 ผล THD กรณีผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล .....	75
ภาพประกอบ 48 ไดอะแกรมการเกิดความผิดปกติของไลน์เส้นเดียวในระบบสายส่ง .....	76
ภาพประกอบ 49 ไดอะแกรมการเกิดความผิดปกติสองเฟสในระบบสายส่ง.....	77
ภาพประกอบ 50 ไดอะแกรมการเกิดความผิดปกติสามเฟสในระบบสายส่ง.....	77
ภาพประกอบ 51 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติของเฟสเดียว .....	78
ภาพประกอบ 52 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติของเฟสเดียว.....	80
ภาพประกอบ 53 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดปกติของเฟสเดียว .....	81
ภาพประกอบ 54 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติสองเฟส .....	82
ภาพประกอบ 55 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติสองเฟส .....	84
ภาพประกอบ 56 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดปกติสองเฟส.....	85
ภาพประกอบ 57 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติสามเฟส .....	86
ภาพประกอบ 58 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติสามเฟส .....	88
ภาพประกอบ 59 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดปกติสามเฟส .....	89
ภาพประกอบ 60 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล .....	103
ภาพประกอบ 61 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล .....	104
ภาพประกอบ 62 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันตกแบบสมดุล.....	105

ภาพประกอบ 63 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล.....	106
ภาพประกอบ 64 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดพร่องลงดินเฟสเดียว.....	107
ภาพประกอบ 65 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดพร่องลงดินสองเฟส .....	108
ภาพประกอบ 66 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดพร่องสามเฟส .....	109
ภาพประกอบ 67 กราฟ ITIC Curves [8].....	111
ภาพประกอบ 68 กราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของ อุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตตามมาตรฐาน ITIC Curves .....	113



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Sensitive Load) อุปกรณ์โหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในโรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล ตึก อาคาร และบ้านเรือน เนื่องจากการใช้โหลดที่เพิ่มมากขึ้นอย่างแพร่หลายในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไฟฟ้ามูลฐาน ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้การทำงานของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลกระทบต่อมากมายตามมาหากเกิดขึ้นในสถานที่ที่ต้องใช้โหลดขนาดใหญ่หรือมีโหลดจำนวนมาก เช่น โรงงานอุตสาหกรรม หรือโรงพยาบาล โดยรูปแบบความผิดปกติของคุณภาพกำลังไฟฟ้าสามารถ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-2019 [13] อันได้แก่ แรงดันไม่สมดุล (Unbalanced Voltage) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sags) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swells) และฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)

จากผลกระทบของแรงดันทางไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Sensitive Load) อุปกรณ์โหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) มีวิธีการมากมายที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ หนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหามีประสิทธิภาพสูงและมีความยืดหยุ่น คือ ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง อันได้แก่ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบขนาน แบบอนุกรม และแบบอนุกรม-ขนาน ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบอนุกรม ยกตัวอย่างเช่น ตัวชดเชยแบบคงที่ (Static Series Compensator; SCC) ตัวชดเชยแรงดันแบบไดนามิก (Dynamic Voltage Compensator; DVC) และตัวกู้คืนแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorers; DVR) ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้เป็นวิธีการแก้ไขปัญหาคู่ค้าด้านเศรษฐศาสตร์ที่สุดในการชดเชยแรงดันไฟฟ้า

ตัวกู้คืนแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorers; DVR) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้ากำลัง ที่ออกแบบมาเพื่อปกป้องโหลดวิกฤต (Critical load) จากแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนด้านแหล่งจ่าย เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับแรงดันไฟฟ้า ลดฮาร์มอนิก และปรับปรุงรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะปกติ โดยทำการปรับปรุงผ่านหม้อแปลงที่ต่ออนุกรมกับสายไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดเกิดสภาวะผิดปกติ ตัวกู้คืนแรงดันพลวัต (DVR) จะ

ฉีด (Injects) แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมให้แก่สายส่ง เพื่อป้องกันโหลดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitive load) และรักษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าจากการรบกวน [1-3, 5-6, 9-11, 14-19, 22-25]

ในงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนออุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตด้วยตัวควบคุม PI โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing; SA) เปรียบเทียบ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) และวิธีการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) โดยใช้ค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) เป็นเกณฑ์การตัดสิน และเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะ และแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติของแหล่งจ่าย ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส และความผิดพลาดสามเฟส โหลดที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตของงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยโหลดเชิงเส้นอาร์-แอล (R-L Linear load) และโหลดมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวกักเก็บแรงดันพลวัต (DVR)
- 1.2.2 เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink
- 1.2.3 เปรียบเทียบผลทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคในการปรับจูนพารามิเตอร์ของพีไอ



### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส

1.3.2 ศึกษาเทคนิคในการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของพีไอเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink

1.3.3 จำลองประสิทธิภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับจูนพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ ITAE (Integral Time Absolute Error)

### 1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 พัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1.4.2 ประยุกต์ใช้การควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม

พหุบัณฑิต ชีวะ

## 1.5 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

ตาราง 1 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

รายการศัพท์	คำนิยาม
ANN : An artificial neural network	โครงข่ายประสาทเทียม
CSA : Cuckoo search algorithm	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบนกกาเหว่า
DVR : Dynamic Voltage Restorer	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น แรงดันตก แรงดันเกิน และแรงดันไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า เป็นต้น
FBA : Flower pollination algorithm	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบการถ่ายละอองเรณูดอกไม้
FOPID : Fractional order proportional–integral–derivative	การเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคลำดับเศษส่วน
GA : Genetic algorithm	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบเชิงพันธุกรรม
GOA : Grasshopper optimization algorithm	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบตั๊กแตน
GWO : Grey wolf optimization	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหมาป่าสีเทา
HHO : Harris Hawks Optimization	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบเหยี่ยวแฮริสฮอว์ค
IGBT : Insulated gate bipolar transistor	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหมาป่าสีเทา
ITAE : Integral time absolute error	ค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา
MVO : Multi verse optimization	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหลายๆข้อดี
PID : Proportional–integral–derivative	เป็นกระบวนการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

ตาราง 1 คำนิยามศัพท์เฉพาะ (ต่อ)

รายการศัพท์	คำนิยาม
PLL : Phase-locked loop	เป็นระบบควบคุมความถี่ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบเฟสของความถี่ด้านเอาต์พุต กับเฟสความถี่อ้างอิง ซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านอินพุตของระบบ
PQ : Power Quality	คุณภาพกำลังไฟฟ้า หมายถึง ลักษณะของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า มีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย
PSO : Particle swarm optimization	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยเทคนิควิธีการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค
PWM : Pulse width modulation	สัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าความถี่คงที่ แต่ความกว้างสามารถเปลี่ยนแปลงได้
SA : Simulated Annealing	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบจำลองการอบเหนียว
SMC : Sliding Mode Control	การควบคุมแบบสไลด์ิงโหมด
THD : Total harmonic distortion	ความเพี้ยนโดยรวมของสัญญาณฮาร์มอนิก ที่เกิดขึ้นเทียบกับสัญญาณความถี่หลัก
WOA : Whale Optimization Algorithm	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบวาฬ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการปริทัศน์เอกสารข้อมูลพบว่าการควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต (Dynamic Voltage Restorer; DVR) สามารถแก้ไขปัญหาแรงดันตก แรงดันเกิน แรงดันไม่สมดุลได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต ประกอบไปด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Converter) หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) DC-Link วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit) แหล่งจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage) สวิตช์บายพาส (Bypass Switch) และมีรูปแบบของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต (DVR Topology) 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ รูปแบบโครงสร้างของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัตที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน และรูปแบบโครงสร้างของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัตที่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน [10] ส่วนเทคนิคในการออกแบบปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยตัวกู้คืนแรงดันพลวัตโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีหลากหลายเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ได้แก่ เทคนิคการสุ่มเดา เทคนิคฟัซซี (Fuzzy) [6] เทคนิควิธีการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) [17] วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) [22] เทคนิคการหาค่าแบบตั๊กแตน (Grasshopper Optimization Algorithm; GOA) [1] เทคนิคการหาค่าแบบเหยี่ยวแฮริสฮอว์ค (Harris Hawks Optimization; HHO) [23] เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปผลของแต่ละเทคนิควิธีการออกแบบปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยตัวกู้คืนแรงดันพลวัตโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ตามตารางที่ 2 ในการสรุปผลและข้อแตกต่างของแต่ละงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกู้คืนแรงดันพลวัต มี 2 เกณฑ์ ได้แก่  $\checkmark$  มีการทดลองศึกษา และ  $\times$  คือ ไม่มีการทดลองศึกษา จากตารางที่ 2 ศึกษาพบว่าตัวกู้คืนแรงดันพลวัตที่มีการทำงานร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) มีประสิทธิภาพสูง สามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพทางกำลังไฟฟ้าได้หลากหลาย มีขอบเขตการขั้นตอนในการทำงานที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน สามารถนำมาปรับประยุกต์ใช้กับเทคนิคการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้หลากหลายวิธี

เทคนิคการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing; SA) เป็นวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับหา Global

Optimization มีความรวดเร็วในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสูง และยังสามารถที่จะหลีกเลี่ยง Local Minima ได้เป็นอย่างดี ซึ่งในการออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตควรที่จะออกแบบให้มีค่าความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด สำหรับการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะทำให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด [4, 27]

ในงานวิจัยนี้นำเสนอ การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวกักเก็บแรงดันพลวัตที่มีรูปแบบเชื่อมต่อกับด้านโหลด ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน และมีตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) โดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing; SA) นำมาเปรียบเทียบกับเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) และวิธีการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) เปรียบเทียบผลโดยใช้ค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) เป็นเกณฑ์ดัชนีตัดสิน เพื่อเปรียบเทียบหาเทคนิคในการออกแบบปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยตัวกักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) และเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะ และแรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติของแหล่งจ่าย ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส และความผิดพลาดสามเฟส



ตาราง 2 สรุปและเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ref.	Year	Controller		Optimal design		Power quality issues						
		Type	Number	Techniques	Comparative analysis	1	2	3	4	5	6	7
[11]	2015	PI	2	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓
[19]	2015	PI	2	x	x	✓	x	✓	x	✓	x	x
[3]	2016	SMC	1	Not clarified	x	✓	✓	x	x	x	x	x
[5]	2017	PI	3	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x
[18]	2017	PI	1	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x
[6]	2017	PI	2	Fuzzy	x	x	x	x	x	x	x	✓
[14]	2017	PI	2	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	x
[17]	2018	PI	2	PSO	AGPSO	✓	✓	✓	✓	x	x	x
[22]	2018	ANN-based	2	GA	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x
[2]	2019	ANN-based	1	ALO	PSO	✓	✓	✓	✓	x	x	x
[9]	2019	PI	1	x	x	✓	x	x	x	✓	x	x
[16]	2019	QN-PI	1	MVO	x	✓	x	x	x	x	x	✓
[1]	2019	PID	1	GOA	GWO CSA และ FBA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[23]	2020	PI	2	HHO	PSO และ WOA	✓	✓	✓	✓	x	x	x
Proposed		PI	1	SA	GA และ PSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Remarks:

Power Quality Issues:

1. Denotes Balanced Sag, 2. Denotes Balanced Swell, 3. Denotes Unbalanced Sag,
4. Denotes Unbalanced Swell, 5. Denotes Three Phase Short Circuit,
6. Denotes Double Line to Ground Fault and 7. Denotes Single Line to Ground Fault

Optimal Design Techniques:

PSO = Particle Swarm Optimization, QN=Quasi Newton, MVO =Multi Verse Optimization

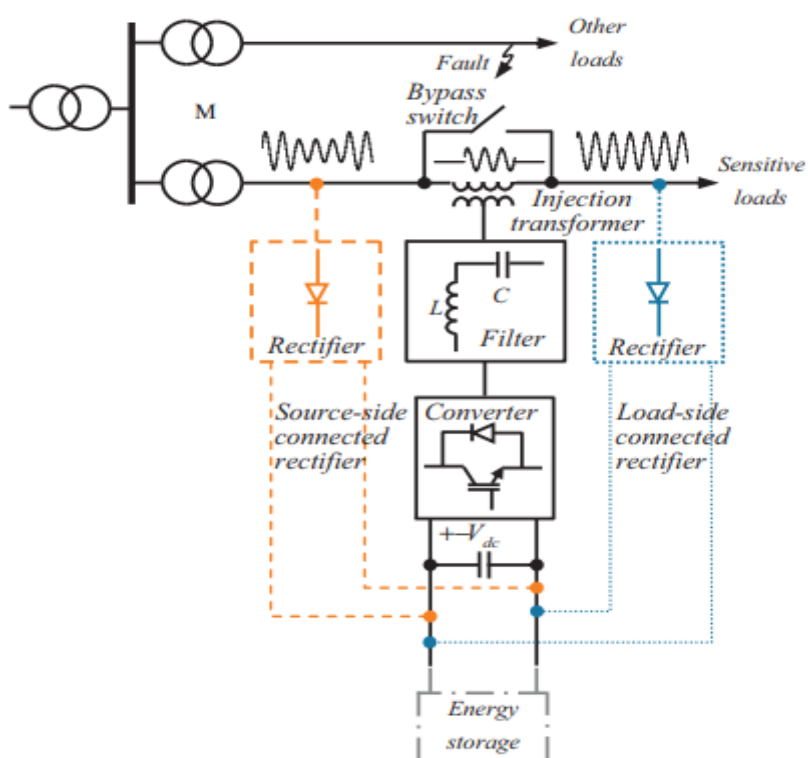
ALO =Ant-lion Optimizer, GA =Genetic Algorithm, GWO = Grey Wolf Optimization,

GOA =Grasshopper Optimization Algorithm, and HHO= Harris Hawks Optimization

## 2.2 ทฤษฎี

### 2.2.1 โครงสร้างอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer; DVR)

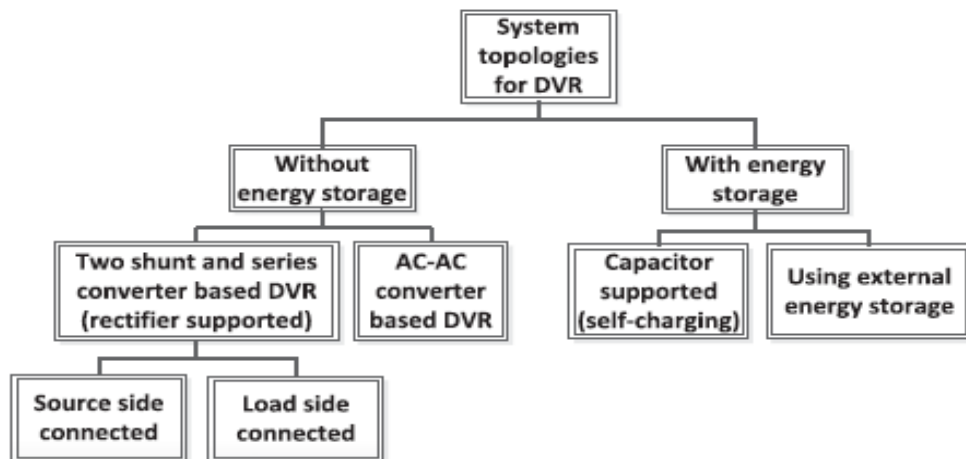
โครงสร้างอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต นำเสนอในภาพประกอบที่ 1 โดยประกอบไปด้วยคอนเวอร์เตอร์ (Converter) DC-Link วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LC (Low Pass LC Filter) และหม้อแปลงหัวฉีด (Injection Transformer) โดยรูปแบบโครงสร้างของตัวกู้คืนแรงดันพลวัตมี 2 รูปแบบหลักๆซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดถัดไป



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างและการทำงานของตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต [17]

### 2.2.2 รูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันพลวัต (DVR Topology)

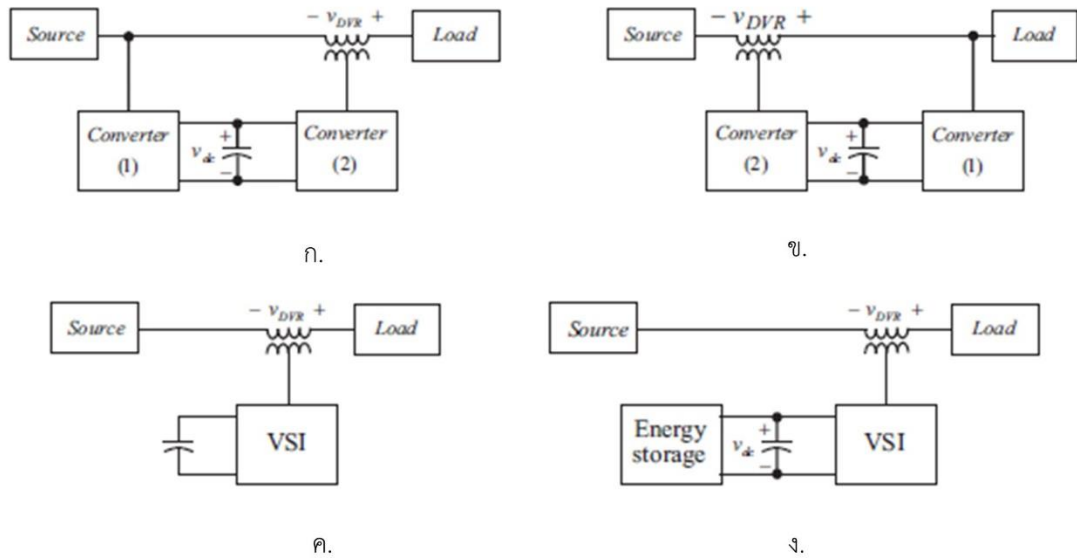
รูปแบบโครงสร้างระบบโดยรวมของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน และ รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2 รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต [17]







ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของรูปแบบวงจรตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต [10]

- (ก) รูปแบบตัวกักเก็บแรงดันพลวัตแบบเชื่อมต่อกับด้านแหล่งจ่ายที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน (Supply Side Connected DVR without Energy Storage)
- (ข) รูปแบบตัวกักเก็บแรงดันพลวัตแบบเชื่อมต่อกับด้านโหลดที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน (Load Side Connected DVR without Energy Storage)
- (ค) รูปแบบตัวกักเก็บแรงดันพลวัตแบบมีแหล่งจัดเก็บพลังงานที่ชาร์จประจุด้วยตนเอง (Self-charging DVR)
- (ง) รูปแบบตัวกักเก็บแรงดันพลวัตแบบมีแหล่งจัดเก็บพลังงานถูกต่อไว้กับ DC-Link โดยตรง (DVR with External Energy Storage)

พหุ ประถม วิชา

(1) รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงานในรูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

(1.1) Two Shunt and Series Converter Based DVR

รูปแบบนี้พลังงานที่ต้องการนำมาใช้ในระบบจะถูกนำมาจากแหล่งจ่ายไฟที่เข้ามาผ่านวงจรแปลงผกผันโดยมีการใช้วงจรเรียงกระแสในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแล้วจ่ายแรงดันไปให้กับ DC-link ที่ต่ออยู่ในระบบ โดยในรูปแบบนี้สามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่เชื่อมต่อกับด้านแหล่งจ่าย (Supply Side Connected DVR without Energy Storage) ดังแสดงในภาพประกอบ 3 (ก) และ รูปแบบที่เชื่อมต่อกับด้านโหลด (Load Side Connected DVR without Energy Storage) ดังแสดงในภาพประกอบ 3 (ข)

(1.2) AC-AC Converter Based DVR

รูปแบบนี้จะใช้ตัวแปลงผกผันกำลังไฟฟ้าแบบขนาน (Shunt Converter) แทนการใช้วงจรเรียงกระแส รูปแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่สูง

(2) รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน

รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน เป็นการที่นำแหล่งจ่ายจากระบบภายนอกมาจ่ายพลังงานให้แก่ระบบของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบย่อย คือ

(2.1) พลังงานที่นำมาใช้นั้นจะมาจากแหล่งจ่ายจากภายนอกที่ถูกต้องกับ DC-Link ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า การชาร์จประจุด้วยตนเอง (Self-charging DVR) มีวิธีการโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงาน ให้แรงดันไฟฟ้า DC-Link ที่แปรผันแสดงในภาพประกอบ 3 (ค)

(2.2) พลังงานที่นำมาจากแหล่งจัดเก็บพลังงานภายนอกที่ถูกต้องไว้กับ DC-Link โดยตรง (DVR with External Energy Storage) โดยการต่อรูปแบบนี้จะสามารถควบคุม DC-Link และสามารถให้แรงดันไฟฟ้าที่คงที่ได้แสดงในภาพประกอบ 3 (ง)

## (3) การเปรียบเทียบรูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต (DVR Topology Comparison)

ในการเปรียบเทียบรูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต มีทั้งหมด 4 เกณฑ์ ได้แก่ ++ คือ ดีมาก, + คือ ดี, - คือ แย่, และ -- คือ แย่มาก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3

ตาราง 3 เปรียบเทียบ ข้อดี-ข้อเสีย ของรูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตแบบต่าง ๆ [10]

	รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน		รูปแบบโครงสร้างของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตที่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน	
	รูปแบบที่เชื่อมต่อกับด้านแหล่งจ่าย (Supply Side Connected Converter)	รูปแบบที่เชื่อมต่อกับด้านโหลด (Load Side Connected Converter)	รูปแบบที่ให้แรงดันไฟฟ้า DC-Link ที่แปรผัน (Variable DC-Link Voltage)	รูปแบบที่สามารถควบคุม DC-Link (Constant DC-Link Voltage)
System	ภาพประกอบ 2.3 (ก)	ภาพประกอบ 2.3 (ข)	ภาพประกอบ 2.3 (ค)	ภาพประกอบ 2.3 (ง)
Long Voltage Sag Duration	++	++	--	-
Deep Voltage Sags	--	+	-	++
Non-symmetrical Voltage Sags	--	+	++	++
DC-link Voltage Control	--	+	-	++
Size of Energy	ไม่มี	ไม่มี	+	++
Grid Effects	--	-	+	+
Rating of Charging/Shunt Converter	--	-	+	--

### 2.1.2 หลักการทำงานของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต

การทำงานของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต มี 3 รูปแบบ คือ โหมดสแตนด์บาย (Standby Mode) โหมดการฉีด (Injection Mode) และโหมดการป้องกัน (Protection Mode)

#### (1) โหมดสแตนด์บาย (Standby Mode)

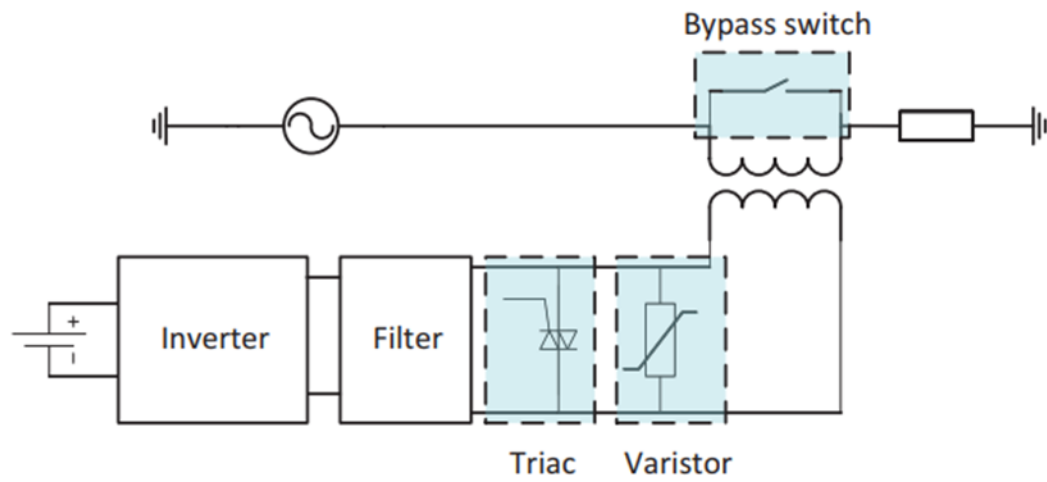
ในโหมดสแตนด์บาย จะไม่มีการรบกวนของแรงดันไฟฟ้าในฝั่งแหล่งจ่าย (Grid voltage) ดังนั้นตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตจึงยังไม่ทำงานในโหมดนี้ ในโหมดการทำงานนี้ตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต จะใช้สวิตช์บายพาส (Bypass Switch) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสายส่ง ในระหว่างการทำงานปกติของระบบการกระจายแรงดัน โดยส่วนใหญ่ตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต จะอยู่ในโหมดสแตนด์บาย ดังนั้นการมีสวิตช์บายพาสจะป้องกันไม่ให้สูญเสียพลังงานในวงจรของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต

#### (2) โหมดการฉีด (Injection Mode)

เมื่อมีการรบกวนแรงดันไฟฟ้าตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตจะทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่เกิดขึ้น จากนั้นสวิตช์บายพาสจะเปิดขึ้นและตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตจะเข้าสู่โหมดการฉีดแรงดัน ซึ่งโหมดนี้ตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตจะฉีดแรงดันที่เหมาะสมเพื่อไปชดเชยแรงดันที่ผิดปกติ โหมดการทำงานนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโหมดการชดเชย (Compensation Mode) โดยเริ่มต้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าตรวจพบการรบกวนและสิ้นสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกกักเก็บตามเงื่อนไขที่ระบุ

#### (3) โหมดการป้องกัน (Protection Mode)

เมื่อเกิดความผิดปกติของการลัดวงจร (Short Circuit Fault) ขึ้นในวงจรของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตทำให้เกิดกระแสลัดวงจร (Fault Current) ที่สูง ถ้าหากไม่มีการป้องกันกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านหม้อแปลงอัดฉีด (Injection Transformer) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกตินี้สามารถทำลายอุปกรณ์ต่าง ๆ ของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต รวมไปถึงตัวคอนเวอร์เตอร์ (Converter) องค์ประกอบของวงจรเชื่อมโยงทางกระแสตรง (DC-link) และตัวกรองสัญญาณกระแสสลับ (AC Filter) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจจับความผิดปกติขึ้นต้นและป้องกันตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตจากการลัดวงจรนี้ เมื่อออกแบบรูปแบบการป้องกันแล้วก็ต้องมั่นใจว่าเส้นทางปัจจุบันสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้ มิฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) ที่รุนแรงจะไปเกิดที่หม้อแปลงอัดฉีด (Injection Transformer) ของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันระบบตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต ควรมีการเตรียมเส้นทางสำรองให้กับกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันมักจะใช้เบรกเกอร์ (Breaker) วาริสเตอร์ (Varistor) หรือไทรสเตอร์ (Thyristor) ในการป้องกันการเกิดของผิดปกติ (Fault) โดยโครงสร้างระบบป้องกันตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต นี้แสดงดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 โครงสร้างระบบป้องกันตัวกักันแรงดันแบบพลวัต (DVR) [23]



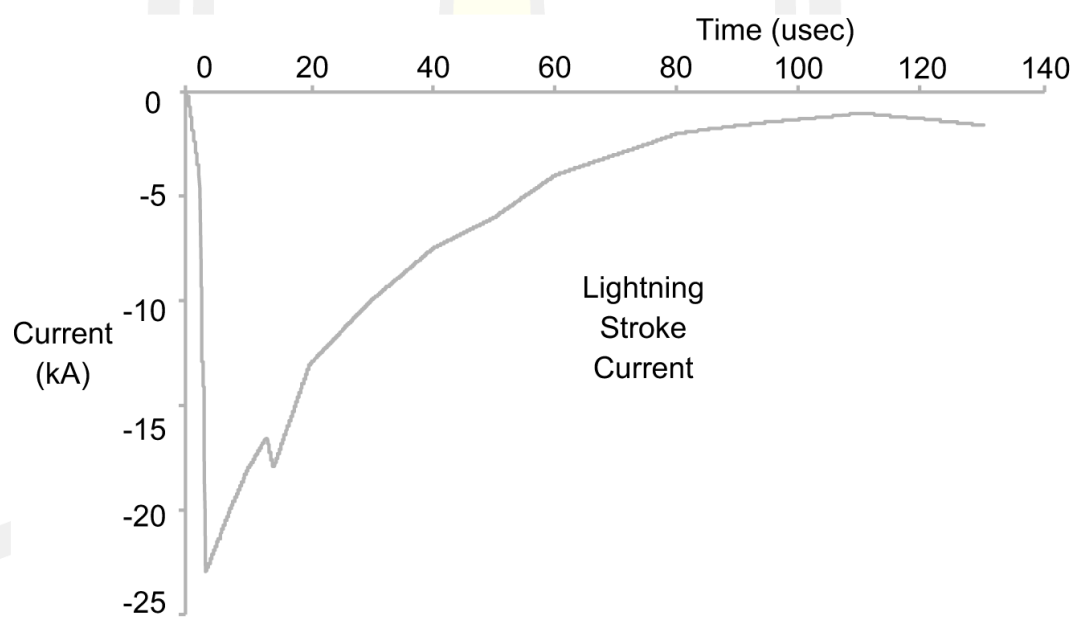
## 2.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) คือ การรักษาคุณลักษณะของระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และกระแสของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ให้อยู่ในสภาวะปกติของค่ามาตรฐานสากลที่กำหนดไว้ ซึ่งในมาตรฐานสากล IEEE 1159-2019 [13] ได้แบ่งรูปแบบลักษณะของระบบกำลังไฟฟ้า ดังนี้

### 2.3.1 ความผิดปกติที่เกิดในชั่วครู่ (Transient)

สามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ อิมพัลส์ (Impulsive) และการสั่น (Oscillatory)

(1) อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive Transient) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่กำลังในสภาวะคงที่ของแรงดัน กระแส หรือทั้งแรงดันและกระแส ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แสดงดังภาพประกอบที่ 5 (เป็นขั้วบวก หรือขั้วลบ) เช่น เสิร์จ (Surge)



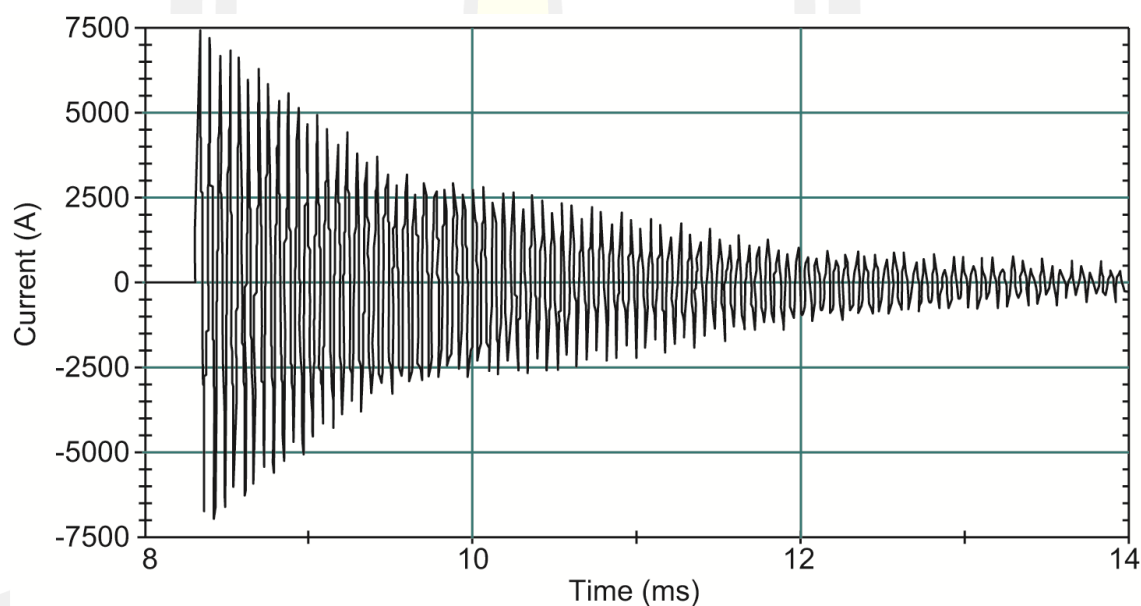
ภาพประกอบ 5 กระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่า [13]

(2) การสั่นแบบชั่วคราว (Oscillatory Transient) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่กำลังในสภาวะคงที่ของแรงดัน กระแส หรือทั้งแรงดันและกระแส ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงไปในทั้งสองทิศทาง (เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ) แสดงดังภาพประกอบที่ 6 และ 7 สามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบ

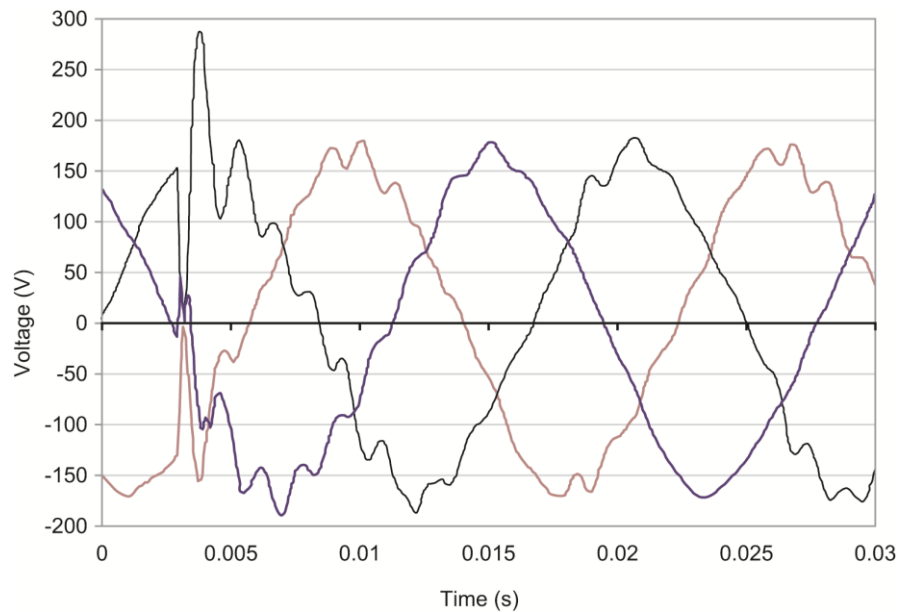
(2.1) การสั่นแบบชั่วคราวความถี่สูง (High-Frequency Oscillatory Transient) มีส่วนประกอบความถี่ปฐมภูมิ มากกว่า 500 kHz มีช่วงเวลาเป็นไมโครวินาที

(2.2) การสั่นแบบชั่วคราวความถี่ปานกลาง (Medium-Frequency Oscillatory Transient) มีส่วนประกอบความถี่ปฐมภูมิ 5 - 500 kHz มีช่วงเวลาเป็นสิบล้านไมโครวินาที

(2.3) การสั่นแบบชั่วคราวความถี่ต่ำ (Low-Frequency Oscillatory Transient) มีส่วนประกอบความถี่ปฐมภูมิ น้อยกว่า 5 kHz มีช่วงเวลาตั้งแต่ 0.3 ถึง 50 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 6 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นแบบชั่วคราวจากการสวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุ [13]



ภาพประกอบ 7 การสั่นแบบชั่วคราวความถี่ต่ำที่เกิดจากจ่ายพลังงานของตัวเก็บประจุ [13]

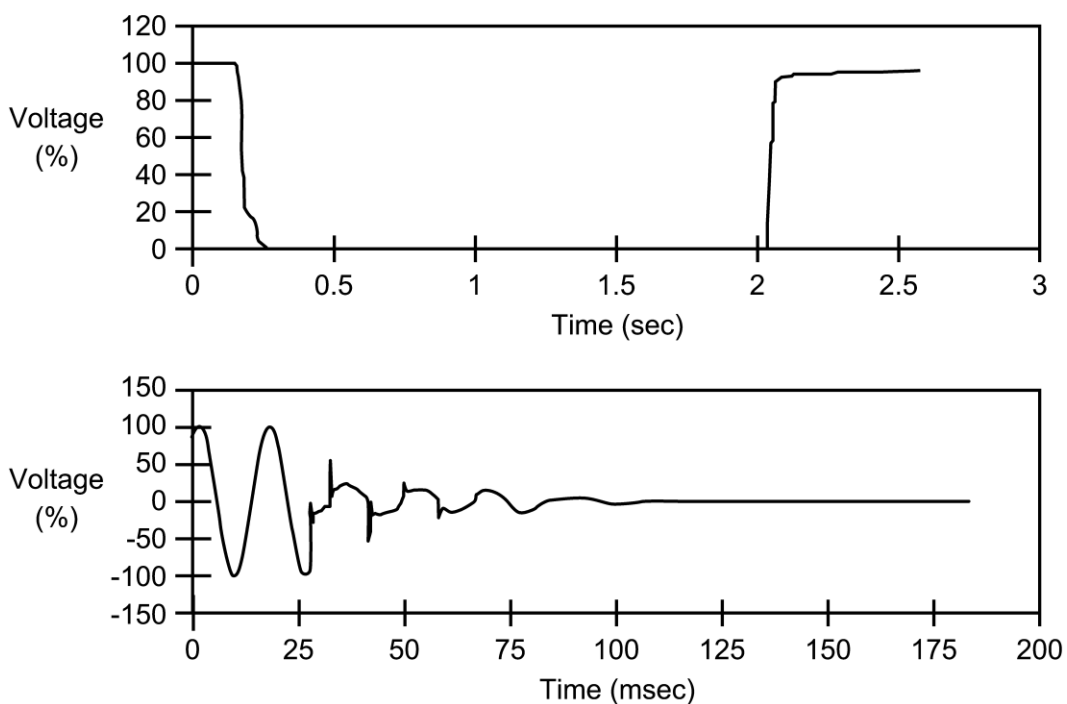
### 2.3.2 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ (Short-Duration Voltage Variations)

หมายถึง การเปลี่ยนแปลงแรงดัน RMS ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เป็นช่วงเวลาน้อยกว่า 1 นาที สามารถจำแนกเป็น 3 ลักษณะ คือ

(1) การเกิดไฟฟ้าดับ (Interruption) คือ ระดับแรงดันที่แหล่งจ่าย RMS หรือกระแสที่ไหลลดลงน้อยกว่า 0.1 pu เป็นระยะเวลาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที สาเหตุเกิดจากความผิดปกติ (Faults) ของระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ขัดข้อง และระบบควบคุมทำงานผิดปกติ แสดงดังภาพประกอบที่ 8



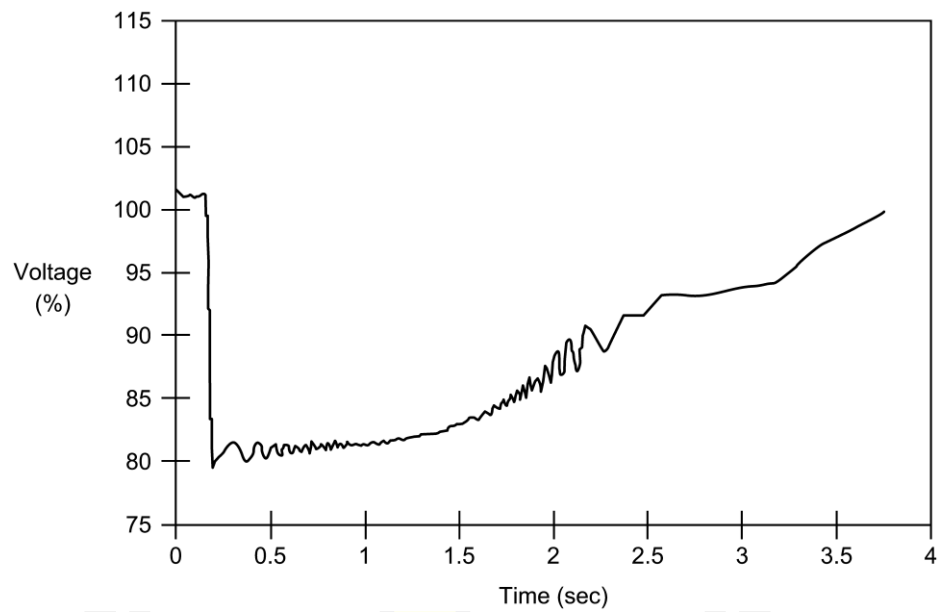
### RMS Variation



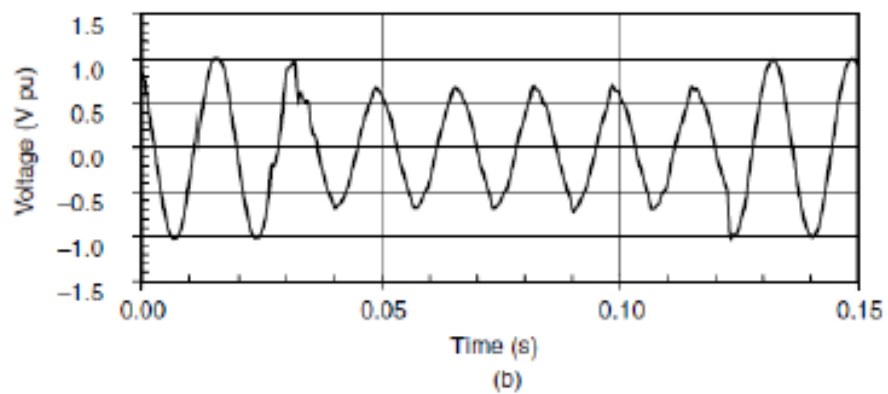
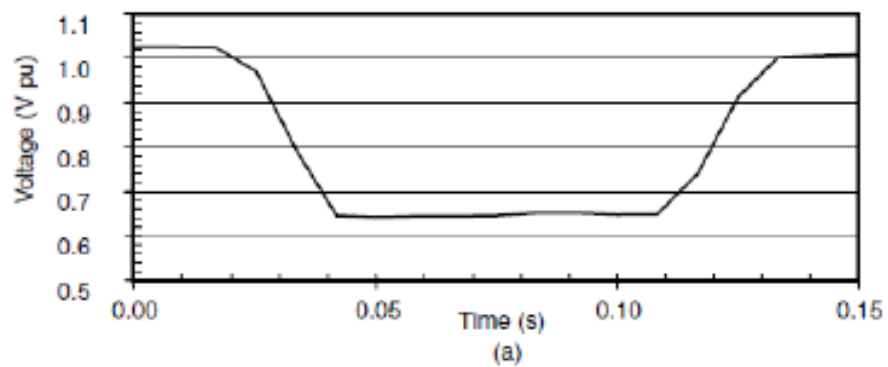
ภาพประกอบ 8 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะเนื่องจากความผิดปกติ [13]

(2) แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Sags หรือ Dips) คือ การที่ระดับแรงดัน RMS ลดลงระหว่าง 0.1 - 0.9 pu สาเหตุเกิดจากความผิดปกติ (Faults) ของระบบไฟฟ้า เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดขนาดใหญ่หรือการเริ่มเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่ และอาจเกิดจากการเกิดความผิดปกติลงดินเฟสเดียว (Single Line-To-Ground Fault; SLG) บนฟีดเดอร์ (Feeder) จากสถานีย่อยเดียวกัน แสดงดังภาพประกอบที่ 9 และ 10

พหุบัณฑิต ชีวะ

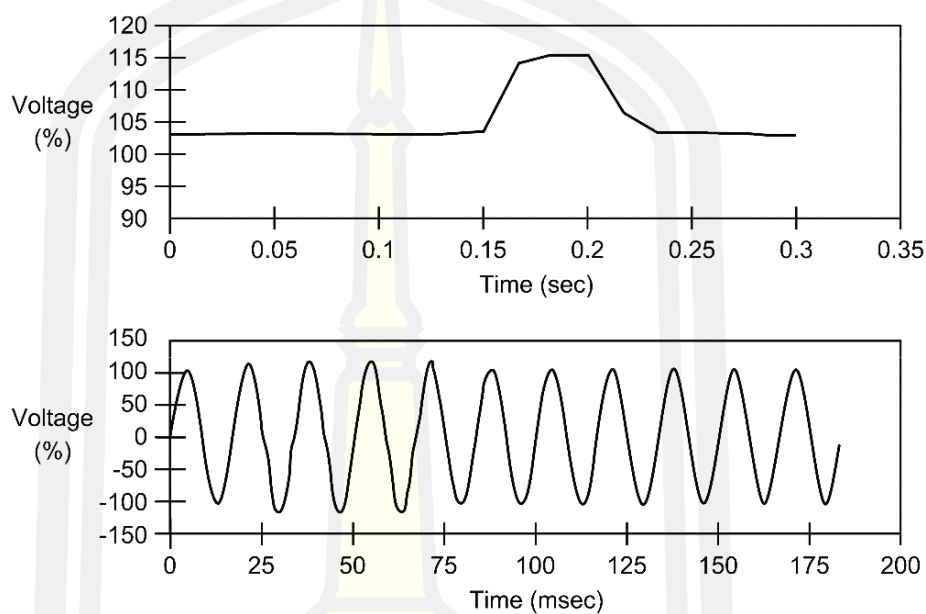


ภาพประกอบ 9 แรงดันตกชั่วขณะสาเหตุจากการเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์ [13]



ภาพประกอบ 10 แรงดันตกชั่วขณะแบบทันทีทันใดสาเหตุจากข้อผิดพลาดของระบบ [26]

(3) แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Swells หรือ Momentary Over Voltage) คือ การที่ระดับแรงดัน RMS เพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 – 1.8 pu สาเหตุเกิดจากการหยุดเดินของมอเตอร์ขนาดใหญ่ หรือการต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้ากับระบบไฟฟ้า แสดงดังภาพประกอบที่ 11



ภาพประกอบ 11 แรงดันเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใดสาเหตุจากความผิดพลาดเฟสเดียว [13]

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงเวลานาน (Long-Duration Voltage Variations) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน RMS ที่ความถี่กำลังมากกว่า 1 นาที สามารถเป็นได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) แรงดันไฟฟ้าต่ำ (Under Voltage) และการเกิดไฟฟ้ายืดอย่างต่อเนื่อง (Sustained Interruptions) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบและการสับสวิทซ์ชิงในระบบ สามารถจำแนกออกเป็น

(1) แรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) คือการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดัน RMS มีค่ามากกว่า 1.1 pu เป็นระยะเวลาสั้นเกินกว่า 1 นาที โดยปกติแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดจากการสวิตซ์ชิงของโหลด ได้แก่ การปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือการจ่ายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ เป็นต้น

(2) แรงดันไฟฟ้าต่ำ (Under Voltage) คือการลดลงของระดับแรงดัน RMS มีค่าน้อยกว่า 0.9 pu เป็นระยะเวลาสั้นเกินกว่า 1 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าต่ำเกิดจากเหตุการณ์ตรงข้ามแรงดันไฟฟ้าเกิน ได้แก่ การเชื่อมต่อกับโหลดขนาดใหญ่ หรือการปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้า

(3) การเกิดไฟฟ้าดับอย่างต่อเนื่อง (Sustained Interruptions) คือระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ เป็นระยะเวลาสั้นเกินกว่า 1 นาที

2.3.4 แรงดันไม่สมดุล (Voltage Imbalance หรือ Voltage Unbalance) สาเหตุเกิดการใช้โหลดในแต่ละเฟสต่างกันมากเกินไป หรือเกิดจากการที่ตัวเก็บประจุมีพิวส์ขาดไปบางเฟส สามารถใช้ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) ในการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบลำดับลบ (Negative-Sequence Component) หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Component) ต่่องค์ประกอบลำดับบวก (Positive-Sequence Component) เพื่อใช้ระบุเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไม่สมดุล ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Unbalance Factor} = \frac{V_0 + V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_0$  คือ องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Component)

$V_1$  คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive-Sequence Component)

$V_2$  คือ ระหว่างองค์ประกอบลำดับลบ (Negative-Sequence Component)

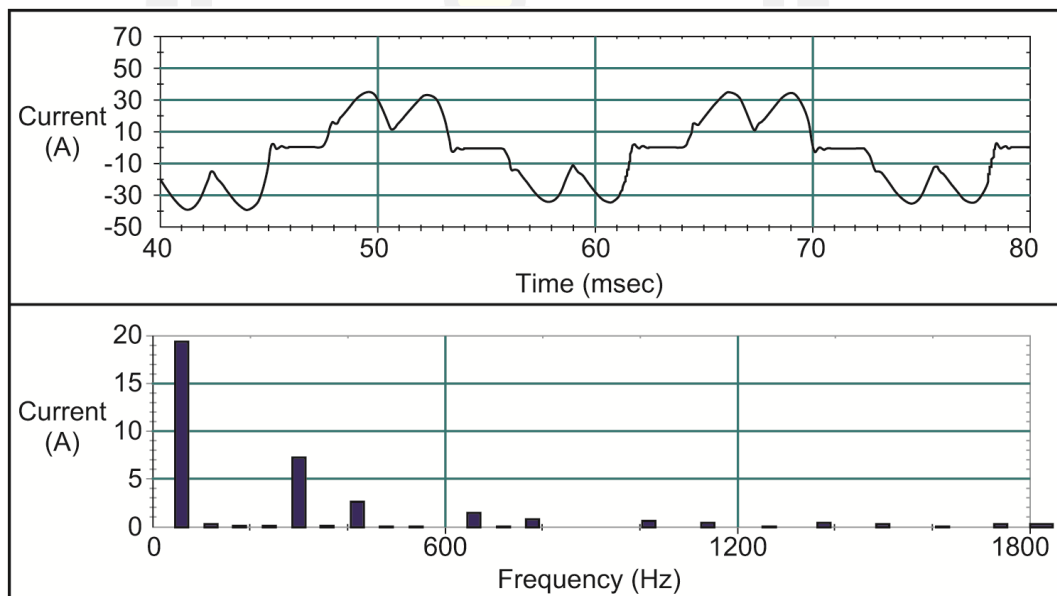
2.3.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า (Waveform Distortion) คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติที่ความถี่กำลัง โดยสามารถจำแนกออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่

(1) องค์ประกอบไฟตรง (DC Offset) คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) มีกระแสหรือแรงดันกระแสตรง (DC) เข้ามาปะปน สาเหตุอาจเกิดจากการโดนสนามแม่เหล็กโลกรบกวน ความไม่สมดุลของตัวแปลงพลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

(2) ฮาร์โมนิก (Harmonics) คือ แรงดันไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ หรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าที่เป็นจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน แสดงดังภาพประกอบที่ 12 และสามารถวัดค่าประสิทธิภาพของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.2

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}}{V_{fund,rms}} \quad (2.2)$$

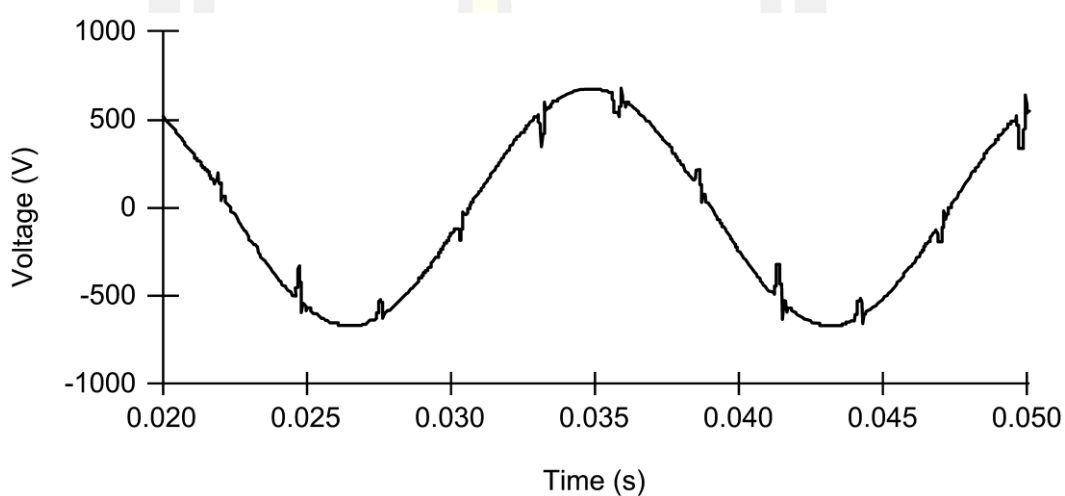
เมื่อ  $V_{n,rms}$  คือ แรงดัน RMS ของลำดับฮาร์โมนิก  
 $V_{fund,rms}$  คือ แรงดัน RMS ของความถี่มูลฐาน



ภาพประกอบ 12 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและฮาร์โมนิกสเปกตรัมของ ASD [13]

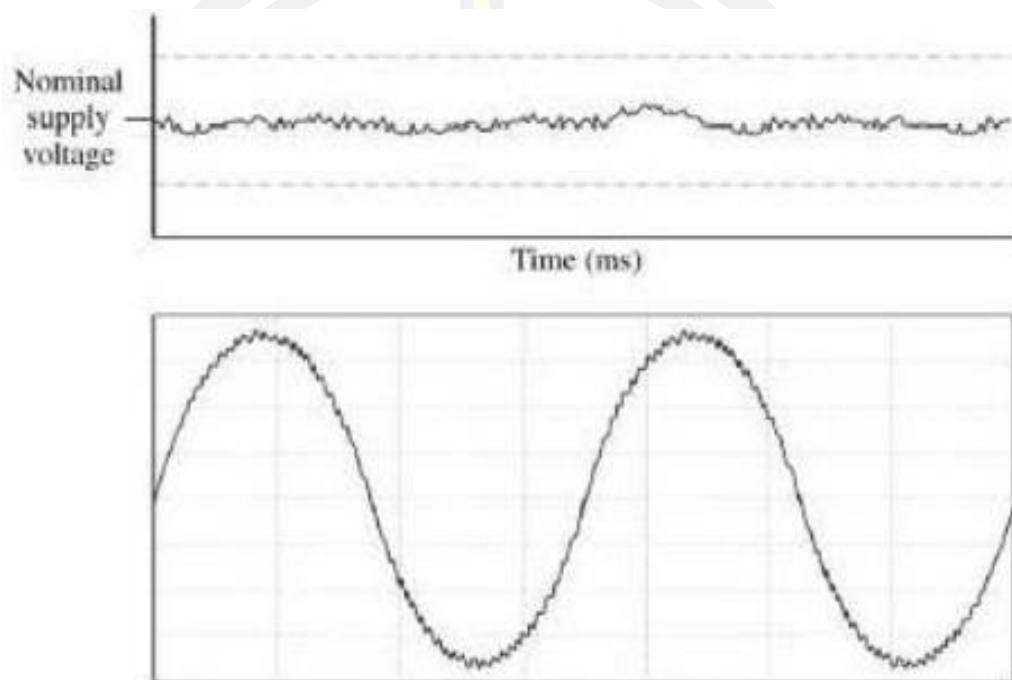
(3) อินเทอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonics) คือ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าที่ไม่เป็นจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน สาเหตุเกิดจากตัวแปลงสัญญาณความถี่แบบคงที่ (Static Frequency Converters) ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter) เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnaces) และอุปกรณ์อาร์ค (Arcing Devices)

(4) รอยบาก (Notching) คือ การรบกวนแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงๆ หรือเป็นคาบ สาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อกระแสสลับ (AC) ถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปอีกเฟสหนึ่ง แสดงดังภาพประกอบที่ 13



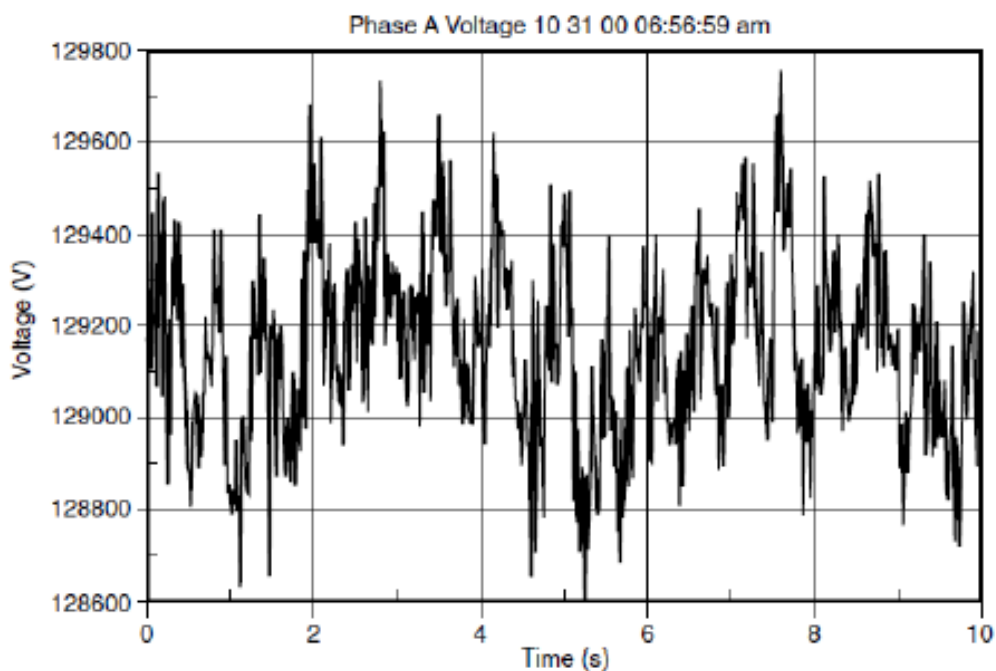
ภาพประกอบ 13 รูปคลื่นรอยบากจากการทำงานของวงจรแปลงผัน [13]

(5) สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำกว่า 200 kHz ปะปนอยู่บนคลื่นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสของระบบไฟฟ้า สาเหตุเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรควบคุม อุปกรณ์อาร์ค โหลดชนิดเรียงกระแสไฟฟ้า การต่อสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟ และการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้อง แสดงดังภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบ 14 สัญญาณรบกวน และสัญญาณรบกวนบนรูปคลื่นพลังงานแบบกระแสสลับ [26]

2.3.6 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation หรือ Voltage Flicker) คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า RMS อย่างเป็นระบบ หรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสุ่มอย่างต่อเนื่อง ขนาดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.9 – 1.1 pu ตามมาตรฐาน ANSI C84.1 แสดงดังภาพประกอบที่ 15



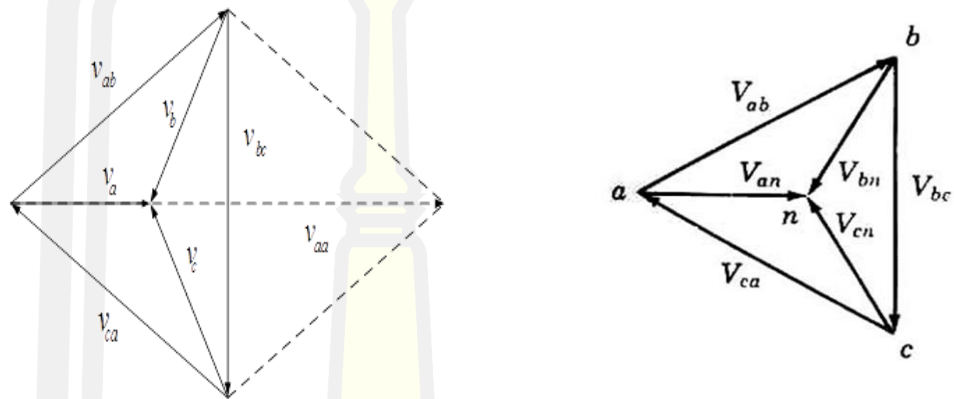
ภาพประกอบ 15 แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมจากการทำงานของเตาหลอมแบบอาร์ค [26]

2.3.7 การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลัง (Power Frequency Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้ากำลังจากค่าที่กำหนดไว้ สาเหตุโดยตรงเกิดจากความเร็วการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายไฟให้กับระบบ โดยขนาดของการเปลี่ยนแปลงความถี่และระยะเวลาที่เกิดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของโหลดและผลการตอบสนองของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด



## 2.4 การสร้างแรงดันอ้างอิงบนหลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor diagram)

ระบบวงจรไฟฟ้าแบบสามเฟสที่มีระบบไม่สมดุลนั้น มีการวิเคราะห์โดยส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical components) สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสายได้ดังภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบ 16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสาย จากภาพประกอบที่ 16 ให้  $V_{aa}(t)$  คือแรงดันที่มีทิศทางเดียวกับ  $V_a$  ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ  $V_{aa}$  ดังนั้น

$$v_{aa}(t) = V_{aa} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

โดยแรงดันที่มีทิศทางเดียวกับ  $V_a$  หาได้จากสมการที่ (2.4)

$$V_{aa}(t) = V_{ab}(t) - V_{ca}(t) \quad (2.4)$$

โดย  $V_{ab}$ ,  $V_{ca}$  คือแรงดันระหว่างสายชั่วขณะเวลาหนึ่งแสดงดังภาพประกอบ 16

แอมพลิจูด  $V_{aa}$  สามารถคำนวณได้โดยอาศัยข้อมูลหน้าต่างช่วงสั้น (Short Time Window) โดยสุ่มตัวอย่างข้อมูลสัญญาณ  $V_{aa}(t)$  มาใช้ 2 ตัวอย่างตามสมการที่ (2.5)

$$V_{aa} = \frac{[v_{aa(k+1)}^2 + v_{aa(k)}^2 - 2v_{aa(k+1)}v_{aa(k)} \cos(\omega T_s)]^{0.5}}{\sin(\omega T_s)} \quad (2.5)$$

โดยที่  $V_{aa(k+1)}$  และ  $V_{aa(k)}$  คือแรงดันของ  $V_{aa}$  ที่เวลา  $t_{(k+1)}$  และ  $t_{(k)}$  ตามลำดับ  
 $T_s$  คือ ช่วงเวลาของการสุ่มตัวอย่างซึ่งเท่ากับ  $t_{(k+1)} - t_{(k)}$

ดังนั้นแรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟสสำหรับตัวกักเก็บแรงดันพลวัตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6) กับ (2.7)

$$v_{ref}(t) = \frac{V_{rated}}{V_{aa}} \times v_{aa}(t) \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} v_{refA} \\ v_{refB} \\ v_{refC} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{ref} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

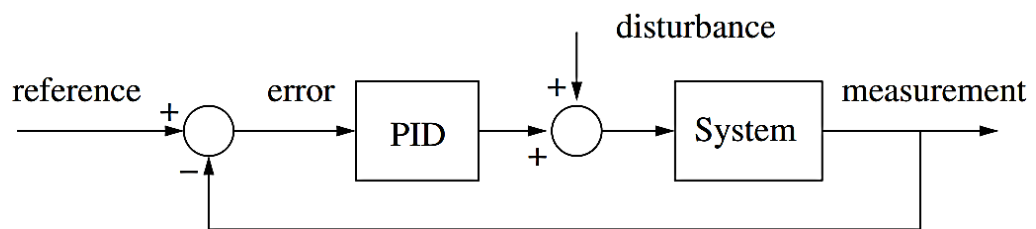
เมื่อ  $V_{rated}$  คือ แอมพลิจูดของแรงดันพิกัดของโหลด  
 $\alpha = e^{j2\pi/3}$  คือ ตัวปฏิบัติการเลื่อนเฟสไป  $120^\circ$  ( $120^\circ$  Phase-shift Operator)

จากสมการที่ (2.6) กับ (2.7) จะเห็นได้ว่าการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงเฉพาะเฟส A เท่านั้น ส่วนเฟส B และ C นั้นหาได้จากเฟส A โดยการเลื่อนเฟสไป  $120^\circ$  และ  $240^\circ$  ตามลำดับ

พหุ ประถมศึกษา

## 2.5 ทฤษฎีการควบคุมพีไอดี (PID Control Theory)

ในระบบควบคุมแบบพีไอดี มีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เป็นแบบพีไอดี โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17



ภาพประกอบ 17 ตัวควบคุมพีไอดีที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม

สัญญาณออกจากตัวควบคุม PID สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.8)$$

โดย  $u(t)$  คือสัญญาณควบคุม  $e(t)$  คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ( $K_p$ ) ค่า integral time ( $T_i$ ) และ Derivative time ( $T_d$ ) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

## (1) Proportional Action

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม ( $u(t)$ ) จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการมีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปสมการที่ 2.9

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.9)$$

โดยที่  $K_p$  คืออัตราขยายและ

$$e(t) \triangleq \text{ความคลาดเคลื่อน} = \text{ค่าตัวกำหนด} - \text{ค่าวัด} \quad (2.10)$$

การควบคุมแบบสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้พอสมควร เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว และยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากในกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น มีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (Steady-state Error) หรือที่เรียกว่าออฟเซต (Offset) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนไม่สามารถแก้ไขให้หมดได้ แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกคือ เพิ่มอัตราขยาย (Gain) ของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนที่มีต่อระบบ ถึงแม้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลงแต่ก็จะทำให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการขณะนั้นได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนมากเกินไป ก็อาจทำให้ระบบแกว่งได้เนื่องจากระบบมีความไว วิธีที่สอง คือ ปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมใหม่ด้วยมือ ซึ่งทำให้ตัวควบคุมเลื่อนจุดทำงานไปยังจุดที่ให้สัญญาณออกที่เหมาะสมกับกระบวนการในขณะนั้นได้ ปัญหาของวิธีหลังอยู่ตรงที่ต้องปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ

## (2) Integral Action

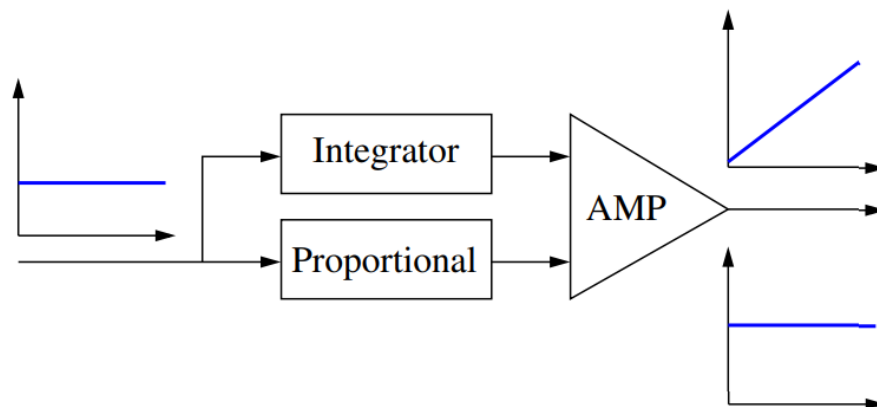
ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการที่ 2.11

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $K_p$  คืออัตราขยาย  $e(t)$  คือความคลาดเคลื่อน และ  $T_i$  คือ Integral time (วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัลมีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบสนองเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยมากเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้ มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual-reset Function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function) คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับอย่างไรก็ตามตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity-like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้น โดยทั่วไประบบแบบสัดส่วนรวมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วน อย่างเดียว 50% หรือ  $T_{pi} = 1.5T_p$  สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาว ปัญหานี้อาจมีผลมากจนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้ การควบคุมแบบอินทิกรัลมีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral time ( $T_i = 1/K_i$  sec โดยที่  $K_i = \text{repeats/sec}$ ) เป็นตัวแสดงว่า อัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุมค่า  $T_i$  ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม  $\int_0^t e(t)dt$  หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่า

ลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุมควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า  $T_i$  มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดาแต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน แสดงดังภาพประกอบที่ 18



ภาพประกอบ 18 แผนภาพแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอ

### (3) Derivative Action

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัลต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อน หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทํางาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนยังมีค่าเล็กอยู่ สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อน แต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.12

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.12)$$

โดย Derivative Time ( $T_d$ ) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม  $T_d$  จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้นเนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนดเพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์ และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการสำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล

ตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลาการแกว่งที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้นแม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็กแต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงควบคุมอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุมพีไอเท่านั้น



## 2.6 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

### 2.6.1 ทฤษฎีการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

Particle Swarm Optimization หรือ PSO เกิดมาจากการศึกษาการบินของฝูงนก การว่ายน้ำของปลา และ การบินของฝูงผึ้ง โดยวิวัฒนาการของกลุ่มประชากรหรือกลุ่มที่ทำการศึกษากฎเรียกว่า อนุภาค หรือ Particle ซึ่งอนุภาคทำงานภายใต้พฤติกรรมทางสังคมเป็นกลุ่ม หรือ Swarm การทำงานของ PSO จะหาค่าที่ดีที่สุดแบบ Global โดยจะทำการปรับค่าเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคให้เข้าสู่ Personal Best หรือ Local Best และ Global Best

ขั้นตอนการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบกลุ่มอนุภาค

- (1) ทุกอนุภาคจะทำการสุ่มเข้ามาเพื่อหาค่า Fitness Function, Local Best และ Global Best
- (2) หลังจากนั้นจะทำการวนลูปเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด
- (3) โดยในแต่ละลูปจะอัปเดตค่าความเร็ว หรือ Velocity ของ Local Best และ Global Best และหลังจากนั้นจะอัปเดตตำแหน่งของอนุภาคของค่าความเร็ว หรือ Velocity ปัจจุบัน
- (4) และจะจบการทำงานวนลูปก็ต่อเมื่อบรรลุตามค่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ตั้งต้นแล้ว

การหาค่าตำแหน่งของ Personal Best หรือ Local Best ( $P_{best}$ ) และ Global Best ( $G_{best}$ ) ใน PSO แสดงตามสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^t & \text{if } f(x_i^{t+1}) \geq P_{best,i}^t \\ X_i^{t+1} & \text{if } f(x_i^{t+1}) < P_{best,i}^t \end{cases} \quad (2.13)$$

$$G_{best} = \min \{P_{best,i}^t\} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $i$  มีสมาชิก  $[1, \dots, n]$  โดยที่  $n > 1$



การหาค่าเวกเตอร์ความเร็วของ Personal Best หรือ Local Best ( $P_{best}$ ) และ Global Best ( $G_{best}$ ) ใน PSO แสดงตามสมการที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [L_{best,i} - x_{ij}^t] \quad (2.15)$$

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [G_{best} - x_{ij}^t] \quad (2.16)$$

โดยที่  $v_{ij}^t$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค  $i$  ในมิติ  $j$  ที่เวลา  $t$   
 $x_{ij}^t$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค  $i$  ในมิติ  $j$  ที่เวลา  $t$   
 $P_{best,i}^t$  คือ ตำแหน่ง Personal Best หรือ Local Best ของอนุภาค  $i$  ในมิติ  
 ที่เวลา  $t$   
 $L_{best,i}$  คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่สุดในบริเวณรอบข้างของอนุภาค  $i$   
 $G_{best}$  คือ ตำแหน่ง Global Best ของอนุภาค  $i$  ในมิติ  $j$   
 $c_1$  และ  $c_2$  คือ ตัวเร่งอัตรา โดย  $c_1$  ทำหน้าที่จดจำข้อมูล และ  $c_2$  ทำหน้าที่  
 แบ่งปันข้อมูลภายในกลุ่ม  
 $r_{1j}^t$  และ  $r_{2j}^t$  คือ ตัวแปรตัวหนึ่งที่ใช้ในการสุ่ม

## 2.6.2 ทฤษฎีการค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมหรือจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA)

การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมหรือจีเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบ โดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Natural Selection) และ กระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics Selection) โดยการคัดเลือก สตริง (String) ที่มีความเหมาะสมของกลุ่มสตริงทั้งหมดด้วยวิธีการสุ่ม จากการนำสตริงเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการคัดเลือกสตริงที่มีความเหมาะสม ซึ่งสตริงที่มีความเหมาะสมนี้ คือ คำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมไม่ใช้การสุ่มแบบง่าย ๆ แต่มันเป็นการใช้ข้อมูลเป็นรูปแบบอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อพิจารณาจุดที่จะต้องค้นหาใหม่โดยการคาดหวังว่าสมรรถนะของการค้นพบจะดีขึ้น การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมถูกพัฒนาขึ้นโดย Hcolland (1975) และคณะ โดยมีเป้าหมายในการวิจัย 2 อย่าง คือ เพื่อสรุปและดัดแปลงการใช้กระบวนการทางธรรมชาติให้ถูกต้องมากที่สุด และเพื่อออกแบบและสร้างซอฟต์แวร์ที่รักษากลไกที่สำคัญของธรรมชาติซึ่งการค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมแตกต่างกับวิธีการค้นหาและการทำ Optimization แบบอื่นๆ คือ

- (1) การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมทำงานโดยเข้ารหัสสตริงเป็นชุดพารามิเตอร์
- (2) การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมเป็นการค้นหาจากประชากรไม่ใช้การค้นหาจากตำแหน่งเดียว ๆ
- (3) การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมใช้ข่าวสารที่เป็นผลลัพธ์ (ฟังก์ชันเป้าหมาย) โดยไม่ใช้การอนุพันธ์หรือความรู้อื่นๆ
- (4) การค้นหามิติเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมจะเป็นวิธี Probabilistic ไม่ใช่ Deterministic

การทำงานของการค้นหาพารามิเตอร์แบบเชิงพันธุกรรมหรือจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA)

- (1) สร้างประชากรต้นกำเนิด (Initial Population) จากการสุ่มสร้างค่าแต่ละบิตของแต่ละโครโมโซม
- (2) ทำการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมแต่ละโครโมโซม โดยถอดรหัสค่าตัวแปร พารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละบิตในโครโมโซมและคำนวณค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันความเหมาะสมที่กำหนดไว้
- (3) ทำการสร้างชุดโครโมโซมต้นแบบ (Mating Pool) หรือชุดโครโมโซมพ่อแม่ต้นแบบโดยใช้วิธีการคัดเลือกทางธรรมชาติที่พิจารณาจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ถ้าโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสถูกคัดเลือกเป็นต้นแบบมาก
- (4) ดำเนินการทางพันธุศาสตร์โดยการสุ่มจับคู่โครโมโซมต้นแบบเพื่อสร้างประชากรรุ่นใหม่

### 2.6.3 ทฤษฎีการค้นหาพารามิเตอร์แบบวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA)

Simulated Annealing Algorithm หรือ SA เป็นเทคนิคการสุ่มหาค่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ Global Optimization โดยวิธีการนี้ได้ทำการเลียนแบบกระบวนการอบเหนียวในวัสดุโลหะ โดยการให้ความร้อนแก่โลหะเหนือจุดหลอมเหลวแล้วให้คงอุณหภูมิความร้อนไว้ จากนั้นให้โลหะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งโลหะแข็งตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ ซึ่งคิดค้นโดย Kirkpatrick, Gelatt และ Vecchi ในปี ค.ศ. 1983

ไอดีพื้นฐานของวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ใช้หลักการของ Markov Chain ในการค้นหาพารามิเตอร์แบบสุ่ม ซึ่งหลักการนี้หลักการนี้ไม่เพียงแต่จะสามารถยอมรับค่าที่ Objective Function ที่ด้อยกว่าเท่านั้น แต่ยังสามารถยอมรับค่า Objective Function ที่ไม่ดีได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งทั้งนี้ทั้งนั้นการยอมรับค่า Objective Function ได้ดีขึ้นขึ้นอยู่กับโอกาสความน่าจะเป็น (p) สามารถอธิบายได้ในสมการที่ 2.17

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{KBT}} \quad (2.17)$$

โดยที่  $K$  และ  $B$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

$\Delta E$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงในระดับพลังงาน

$T$  คือ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงในระดับพลังงานกับค่าการเปลี่ยนแปลงของ Objective Function สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.18

$$\Delta E = \gamma \Delta f \quad (2.18)$$

โดยที่  $\gamma$  เป็นค่าคงที่จริง

สำหรับวิธีการอย่างง่าย เราสามารถกำหนดค่า  $KB = 1$  และ  $\gamma = 1$  ดังนั้นโอกาสความน่าจะเป็น (p) อย่างง่าย สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.19

$$p(\Delta f, T) = e^{-\frac{\Delta f}{T}} \quad (2.19)$$

ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ตัวเลขสุ่ม (r) เป็นค่าเปรียบเทียบ ดังนั้น ถ้า  $p > r$  สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.20

$$p = e^{-\frac{\Delta f}{T}} > r \quad (2.20)$$

สำหรับการเลือกค่าอุณหภูมิ (T) เริ่มต้นที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจาก

- ถ้าหาก  $T$  มีค่ามาก ( $T \rightarrow \alpha$ ) เมื่อแทนค่า  $T$  ในสมการที่ 2.20 จะได้ค่า  $p \rightarrow 1$  ซึ่งหมายความว่าทุกการเปลี่ยนแปลง ( $\Delta f$ ) ยอมรับทั้งหมด อีกทั้งระบบจะอยู่ในสถานะพลังงานสูงและการค้นหาค่า Minima เป็นไปได้ยาก
- ถ้าหาก  $T$  มีค่าน้อย ( $T \rightarrow 0$ ) เมื่อแทนค่า  $T$  ในสมการที่ 2.20 จะได้ค่า  $p \rightarrow 0$  ซึ่งหมายความว่าผลของการเปลี่ยนแปลง ( $\Delta f$ ) ไม่กระจายผลอาจทำให้ผลที่ได้อยู่ใน Local Minimum เนื่องจากมีพลังงานในระบบไม่เพียงพอในการออกมาจาก Local Minimum เพื่อที่จะไปค้นหา Minima อื่น รวมถึงค้นหา Global Minimum

หลักการที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการการลดอุณหภูมิการอบเหนียว จากอุณหภูมิสูงไปยังจุดเยือกแข็งเพื่อที่จะหาค่า Global Minimum State มี 2 วิธีการ

(1) กำหนดการระบายความร้อนเชิงเส้น (Linear Cooling Schedule)

$$T = T_0 - \beta t \quad (2.21)$$

โดย  $T_0$  คืออุณหภูมิตั้งต้น

$t$  คือจำนวนรอบ

$\beta$  คืออัตราการระบายความร้อน

กำหนดค่าให้  $T$  ลู่เข้าสู่ศูนย์ เมื่อถึงจำนวนรอบสุดท้าย โดยค่าอัตราการระบายความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.22

$$\beta = (T_0 - T_f)/t_f \quad (2.22)$$

(2) กำหนดการระบายความร้อนทางเรขาคณิต (Geometric Cooling Schedule)

วิธีการนี้เป็นฟังก์ชันการลดลงของอุณหภูมิ โดยที่ Cooling factor มีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < \alpha < 1$  แสดงดังสมการที่ 2.23

$$T(t) = T_0 \alpha^t, \quad t = 1, 2, \dots, t_f \quad (2.23)$$

วิธีการนี้มีข้อดีที่สำคัญ คือ  $T$  จะลู่เข้าสู่ 0 โดยอัตโนมัติ เมื่อ  $t$  อยู่ระหว่าง 0 กับ 1 วิธีการนี้จึงไม่จำเป็นที่จะต้องกำหนดจำนวนรอบในการคำนวณ

พหุ ประสิทธิภาพ

## 2.7 เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index Criteria)

เพื่อที่จะตรวจสอบการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์พีไอ ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวกู้คืนแรงดันแบบพลวัต (Dynamic Voltage Restorer; DVR) จึงมีเกณฑ์ที่ตั้งไว้เพื่อให้ระบบควบคุมมีค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด เกณฑ์เหล่านั้นเรียกว่า เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index Criteria) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดว่า ระบบตัวควบคุมที่ต้องการควบคุมทำงานได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ ในบทความนี้จะใช้เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.24)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (2.24)$$

ถ้าสัญญาณค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ไม่เป็นศูนย์ เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  ค่าดัชนีสมรรถนะจะมีค่าสูงหรือเป็นค่านันต์ทำให้เป้าหมายไม่เป็นจริง เป้าหมายของการออกแบบ คือต้องการให้ค่าดัชนีมีค่าน้อยที่สุดหรือค่าความผิดพลาด  $e(t)$  เข้าใกล้ศูนย์



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

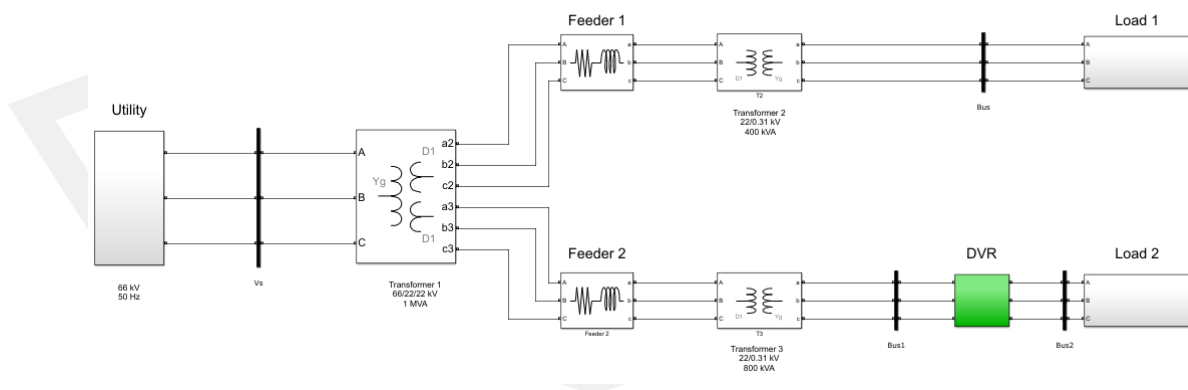
#### 3.1 การจำลอง

##### 3.1.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง

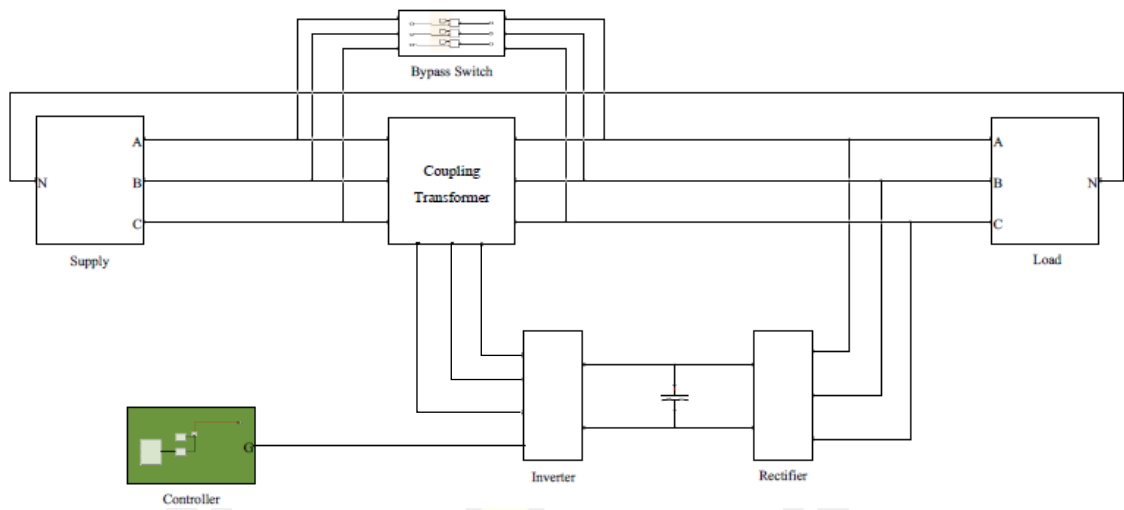
ในการจำลองอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตจะใช้โปรแกรมแมทแล็บ-ซิมูลิงค์ (Matlab-Simulink Release 2018) โดยใช้ซอฟต์แวร์ในส่วนซิมูลิงค์ของแมทแล็บสำหรับสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบและซอฟต์แวร์ซิมูลิงค์นี้สามารถจำลองได้ทั้งระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น รวมทั้งระบบเวลาแบบต่อเนื่องและระบบเวลาที่เป็นแบบสุ่มตัวอย่างหรือทำงานพร้อมกันทั้งสองระบบเวลาก็ได้ โดยจะติดต่อกับผู้ใช้ผ่านทางรูปภาพ (Graphic User Interface; GUI) ในการสร้างไดอะแกรมของแบบจำลอง

##### 3.1.2 ไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลอง

ภาพประกอบที่ 19 แสดงการติดตั้งของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบสายส่งและแผนภาพไดอะแกรมตัวกักเก็บแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer; DVR) แสดงถึงภาพประกอบที่ 20 แสดงถึงการจำลองการทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) โดยตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ซึ่งแบ่งออกเป็น 8 ส่วนสำคัญคือ แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส บล็อกการคำนวณแรงดันอ้างอิง บล็อกกำเนิดสัญญาณเกิด บล็อกอินเวอร์เตอร์สามเฟส หม้อแปลงเชื่อมต่อ วงจรกรองแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage Filter) สวิตช์บายพาส โหลดอาร์-แอล และโหลดมอเตอร์ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



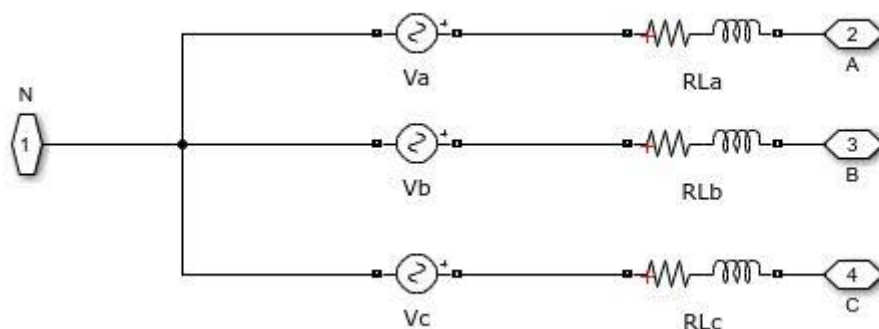
ภาพประกอบ 19 การติดตั้งของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในระบบสายส่ง



ภาพประกอบ 20 แผนภาพไดอะแกรมตัวกึ่งอินแรงดันแบบพลวัต

(1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

บล็อกไดอะแกรมรายละเอียดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวสามชุดที่มีนิวทรัลต่อร่วมกัน ซึ่งสามารถกำเนิดแรงดันไม่สมดุล แรงดันตก แรงดันเกินหรือการขาดหายไปของแรงดันไฟฟ้าตามต้องการได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบ 21 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส



## (2) บล็อกคำนวณแรงดันอ้างอิง

บล็อกคำนวณแรงดันอ้างอิงถือเป็นบล็อกที่สำคัญเป็นอย่างมากของ DVR เนื่องจากเป็นขั้นตอนการดำเนินการชดเชยแรงดันและสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับอินเวอร์เตอร์ โดยแรงดันลำดับบวก เฟส A ในสมการที่ 2.4 สมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 แรงดันอ้างอิงเฟส A, B และ C สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการด้านล่างนี้

$$V_{ref} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{ref} \quad (3.1)$$

$$V_{ref} = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha^2 V_{ref} \quad (3.2)$$

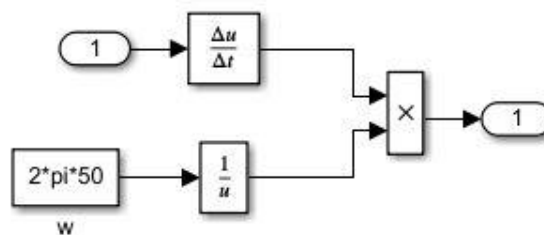
$$V_{ref} = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha V_{ref} \quad (3.3)$$

แทนตัวปฏิบัติการเลื่อนเฟส  $\alpha$  ลงในสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะได้แรงดันอ้างอิงเฟส B และ C ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{ref} = -\frac{1}{2\sqrt{3}} V_{ref} - \frac{1}{2} j V_{ref} \quad (3.4)$$

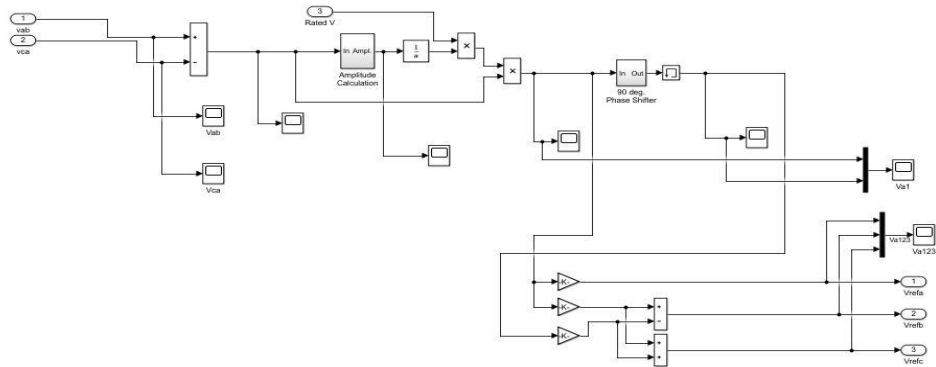
$$V_{ref} = -\frac{1}{\sqrt{3}} V_{ref} + \frac{1}{2} j V_{ref} \quad (3.5)$$

โดย  $jV_{ref}$  เป็นสัญญาณเลื่อนมุมเฟส  $V_{ref}$  เป็นมุม 90 องศา บล็อกไดอะแกรมสัญญาณเลื่อนมุมเฟส แสดงในภาพประกอบที่ 22 การเลื่อนมุมเฟส  $jV_{ref}$



ภาพประกอบ 22 บล็อกไดอะแกรมของการเลื่อนมุมเฟส 90 องศา

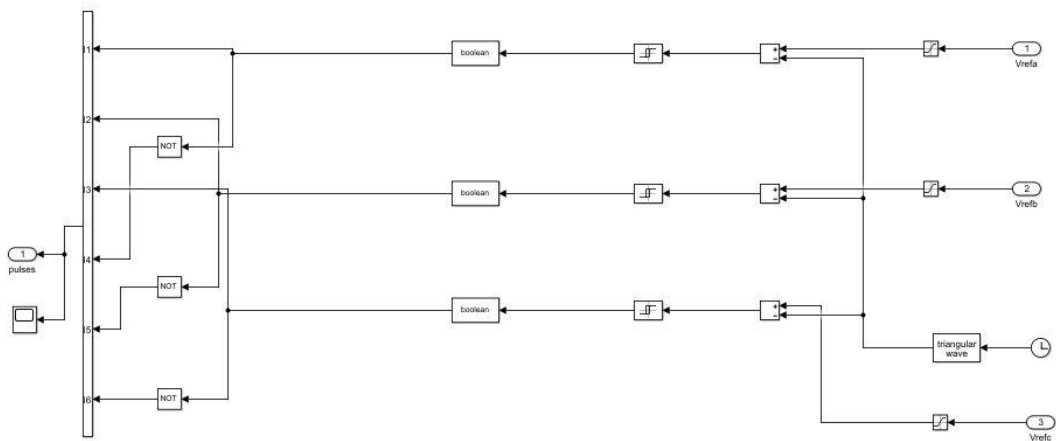
สรุป แรงดันที่ได้จากสมการที่ 2.4 ถูกนำไปใช้การคำนวณในสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 เพื่อที่จะนำไปสร้างแรงดันอ้างอิงของเฟส A, B และ C ดังสมการ 3.1, สมการ 3.4 และสมการ 3.5 ตามลำดับ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการควบคุมขนาดของพิกัดแรงดันต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบที่ 23



ภาพประกอบ 23 บล็อกคำนวณแรงดันอ้างอิง

(3) บล็อกกำเนิดสัญญาณเกต

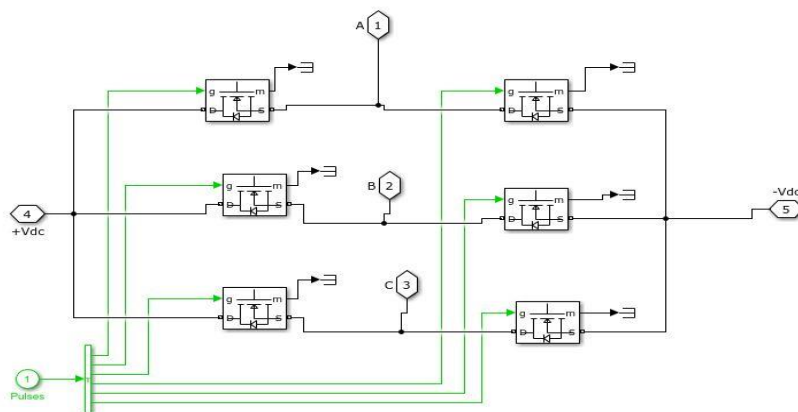
สัญญาณที่ออกจากบล็อกตัวควบคุม ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 6 KHz ทำให้เกิดเป็นสัญญาณเกตและถูกส่งไปใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบที่ 24



ภาพประกอบ 24 บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณเกต

## (4) บล็อกสวิตช์อินเวอร์เตอร์

สวิตช์อินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย MOSFETS 6 ตัวเชื่อมต่อเป็นแบบบริดจ์ ในบล็อกอินเวอร์เตอร์นี้จะสร้างแรงดันไฟฟ้าสามเฟสชดเชยตามที่ได้รับจากสัญญาณเกต ดังแสดงในภาพประกอบที่ 25



ภาพประกอบ 25 บล็อกสวิตช์อินเวอร์เตอร์

## (5) วงจรกรองแรงดันกระแสเพื่อม

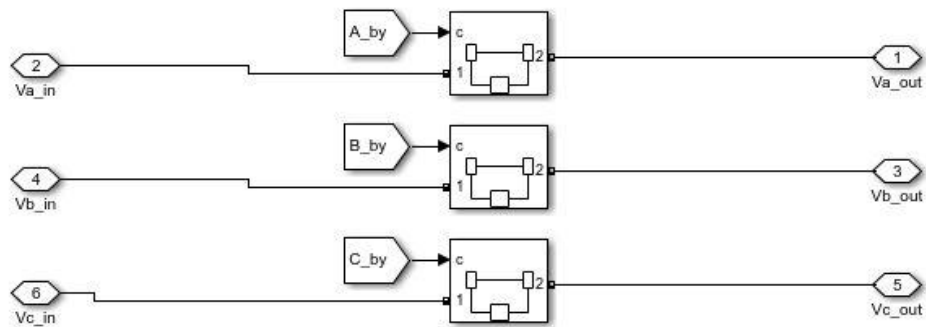
วงจรกรองแรงดันกระแสเพื่อมประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ 1 mH และตัวเก็บประจุ 55  $\mu\text{F}$  สามชุด ทำหน้าที่กรองแรงดันกระแสเพื่อมที่เกิดจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

## (6) หม้อแปลงเชื่อมต่อ (Coupling Transformers)

หม้อแปลงเฟสเดียวแบบเชิงเส้น 3 ตัว ถูกใช้ในการชดเชยแรงดันเข้าสู่ระบบโดยต่อแรงดันชดเชยจากอินเวอร์เตอร์ที่ด้านปฐมภูมิ ในขณะที่ด้านทุติยภูมิเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

## (7) สวิตช์บายพาส (Bypass Switch)

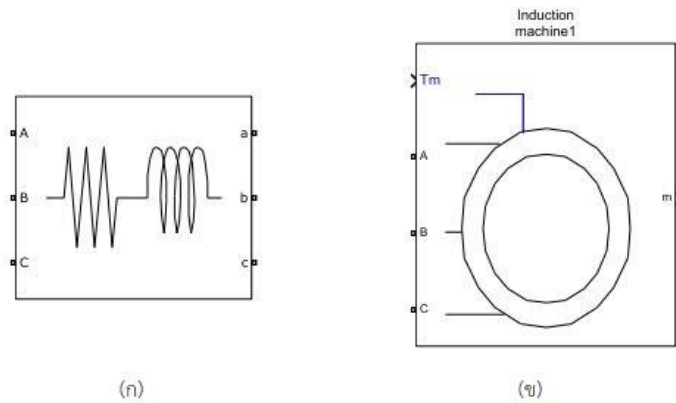
เนื่องจากความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าไม่ได้เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การทำงานของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตในการปรับปรุงและแก้ไขความผิดปกติของแรงดันจึงไม่จำเป็นต้องอยู่ในโหมดชดเชยอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่ไม่จำเป็น สวิตช์บายพาสจึงถูกนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์นี้ โดยที่สวิตช์บายพาสจะปิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าของกริด (Grid Voltage) อยู่ในสภาวะปกติ ด้วยวิธีที่สวิตช์บายพาสปิดนี้จะทำให้อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตไม่ได้อยู่ในวงจร อีกกรณีหนึ่งที่สวิตช์บายพาสปิดคือเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) และสวิตช์บายพาสจะเปิดเมื่อตรวจพบความผิดปกติของสัญญาณแรงดัน ด้วยวิธีที่สวิตช์บายพาสเปิดนี้จะทำให้อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตปรับปรุงและแก้ไขความผิดปกติของแรงดัน ภาพประกอบที่ 26 แสดงถึงสวิตช์บายพาส



ภาพประกอบ 26 สวิตช์บายพาส

(8) โหลดสามเฟส

โหลดสามเฟสประกอบด้วยตัวต้านทาน  $100 \Omega$  ตัวเหนี่ยวนำ  $1 \text{ H}$  อนุกรมกันสามชุด มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำขนาด  $4 \text{ KW}$  จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 27 การเลือกโหลดลักษณะดังกล่าวเพื่อเพิ่มไดนามิกให้กับระบบในการทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต



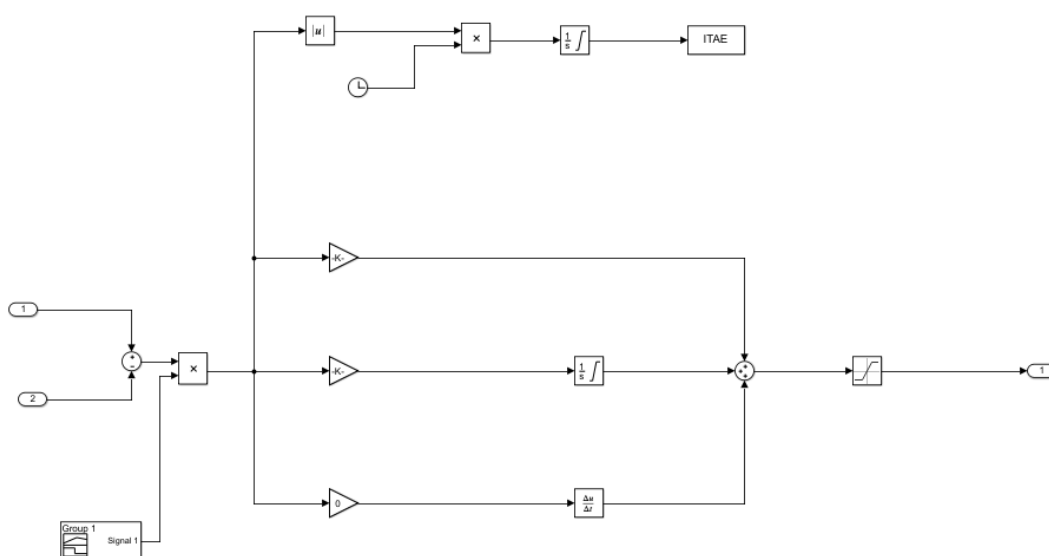
ภาพประกอบ 27 บล็อกไดอะแกรมของโหลด

(ก) โหลด RL สามเฟส

(ข) โหลดมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

### 3.2 ขั้นตอนการค้นหาค่าพารามิเตอร์

จากภาพประกอบที่ 28 แสดงถึงแผนภาพจำลองภายในของตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ในตัวกึ่งคืนแรงดันแบบพลวัตโดยไดอะแกรมตัวควบคุมนี้ใช้ในเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) วิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) และกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)



ภาพประกอบ 28 ภาพการจำลองบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller)

#### 3.2.1 การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA)

- (1) เขียนโปรแกรมกำหนด Cost Function เพื่อนำข้อมูลจาก Simulink ออกมาวิเคราะห์ผล Optimization ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) โดยใช้เกณฑ์ดัชนีปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา ITAE (Integral Time Absolute Error; ITAE) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 29

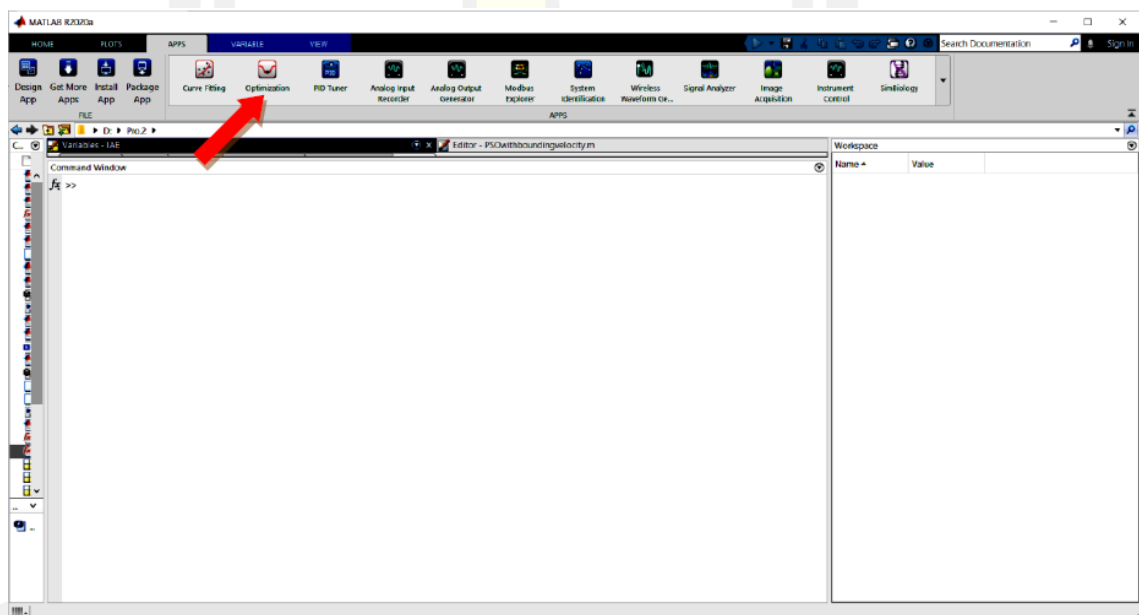
```

Optimization.m  x  +
1  function cost = Optimization(currentX)
2  -      assignin('base','currentX',currentX);
3  -      sim('Op_PI_caseBalanceswell.slx');
4  -      cost = ITAE(length(ITAE));
5
6  -      end

```

ภาพประกอบ 29 โปรแกรมกำหนด Cost Function

- (2) เข้าไปที่ Apps แล้วคลิก Optimization Tool เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบ 30 แสดงถึงวิธีการเข้า Apps [28]

- (3) ในส่วนของ Problem Setup and Results การตั้งค่าเลือกเทคนิควิธีการในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ คลิกที่ Solver แล้วทำการเลือก “ga - Genetic Algorithm” ดังภาพประกอบที่ 31
- (4) ช่องของ Fitness Function เรียก Code Cost Function โดยพิมพ์ @Optimization ดังภาพประกอบที่ 31

(5) กำหนดค่าขอบเขตดังตารางที่ 4

ตาราง 4 กำหนดค่าขอบเขต

Number of Variables	2
Lower Bounds	[0 0]
Upper Bounds	[10 10]

(6) กำหนดการตั้งค่าส่วนของ Option จะทำการกำหนดค่าดังนี้

Population Size = 30

เลือก Creation Function ของ Population เป็น Uniform

เลือก Selection Function เป็น Tournament

เลือก Mutation Function เป็น Adaptive Feasible

เลือก Crossovers Function เป็น Arithmetic

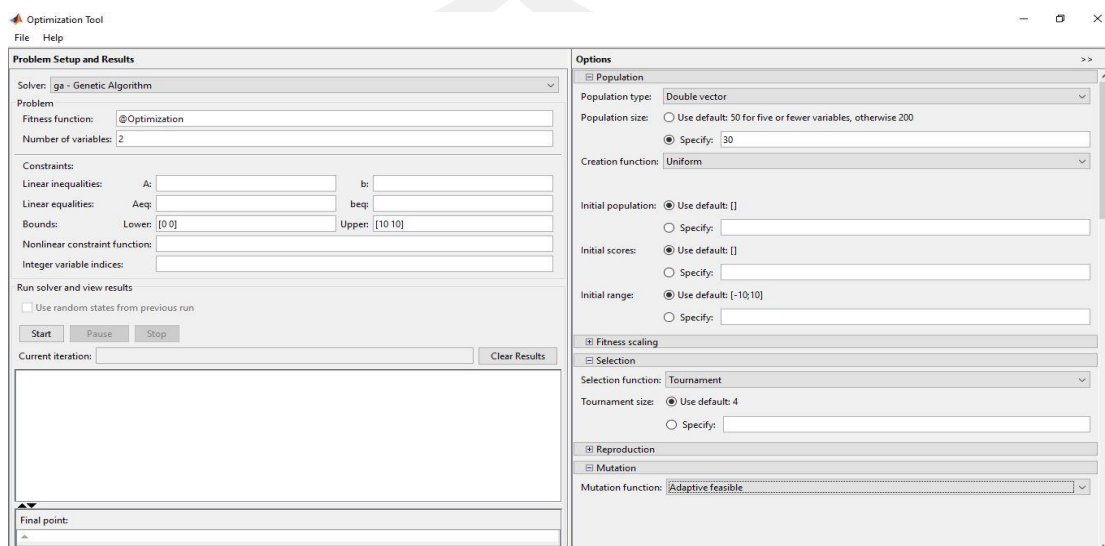
กำหนด Generations ของ Stopping Criteria = 50

เลือก Plot Function เป็น Best Fitness

ที่ Level of display เลือกเป็น iterative

พหุบัณฑิต ชีวะ

- (7) คลิก Start เพื่อให้โปรแกรมรันเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  เมื่อเสร็จสิ้นค่า Final Point จะแสดงผลในหน้าต่าง Results



ภาพประกอบ 31 ภาพการเลือกวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

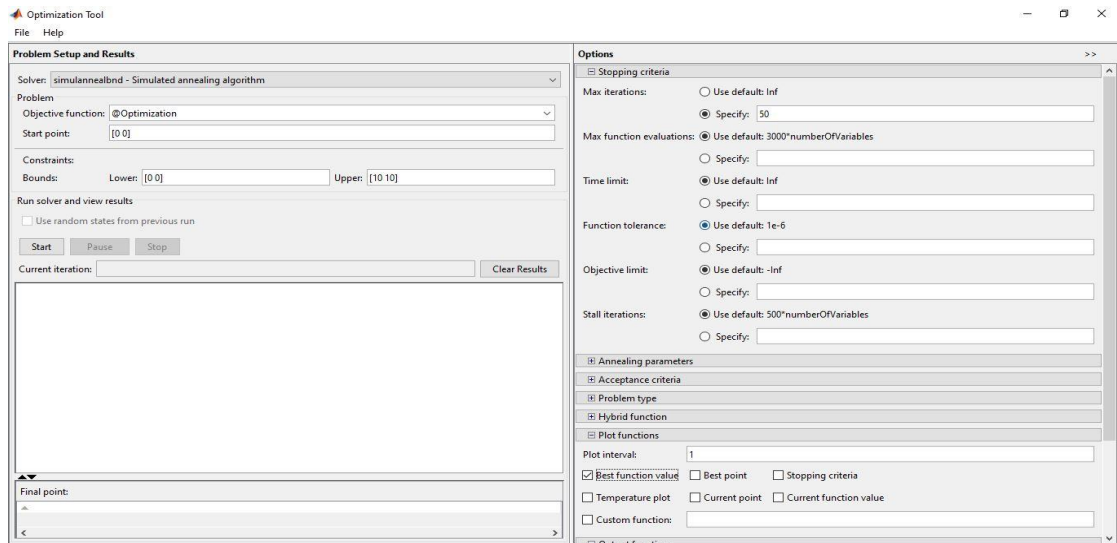
### 3.2.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA)

(1) การตั้งค่าโปรแกรมเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเทคนิควิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) โดยเริ่มจากการไปที่ Apps แล้วคลิก Optimization Tool ดังภาพประกอบที่ 30

(2) ในส่วนของ Problem Setup and Results การตั้งค่าทำการเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ โดยคลิกที่ Solver แล้วทำการเลือก “Simulannealwnd – Simulated annealing algorithm” ดังภาพประกอบที่ 32

พหุ ประถมศึกษา





ภาพประกอบ 32 ภาพการเลือกและหน้าต่างการตั้งค่าวิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

(3) ช่องของ Fitness Function เรียก Code Cost Functions โดยพิมพ์ @Optimize  
ตั้งภาพประกอบที่ 32

(4) กำหนดค่า

Start Point = [0 0]

Lower Bounds = [0 0]

Upper Bounds = [10 10]

(5) ในส่วนของ Option จะทำการกำหนดค่าดังนี้

Max Iterations = 50

เลือก Plot Function เป็น Base function value

ที่ Display to Command Windows เป็น Iterative

(6) คลิก Start เพื่อให้โปรแกรมรันค้นหาค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  แล้วค่าจะแสดงผลใน  
Final Point

### 3.2.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

เขียนโค้ด PSO ในโปรแกรม Matlab M File แล้วรันโปรแกรมเพื่อ Search ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ดังภาพประกอบที่ 33 และ 34 แล้วเขียนโปรแกรมกำหนด Cost Function เพื่อสั่ง Simulink ให้เชื่อมกับโค้ด PSO ใน M File ดังภาพประกอบที่ 29 โดยเราจะใช้เกณฑ์ดัชนีตัดสินคือ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) ซึ่งแสดงในบล็อก Simulink



```

S_PSOwithboundingvelocity.m x +
1   % clear all
2   % close all
3   % clc
4   % Define the details of the table design problem
5   nVar = 2;
6   ub = [10 10];
7   lb = [0 0];
8
9   fobj = @Optimization;
10
11  % Define the PSO's paramters
12  noP =30;
13  maxIter = 50;
14  wMax = 0.9;
15
16  wMin = 0.2;
17  c1 = 2;
18  c2 = 2;
19  vMax = (ub - lb) .* 0.2;
20  vMin = -vMax;
21
22  % The PSO algorithm
23
24  % Initialize the particles
25  for k = 1 : noP
26      Swarm.Particles(k).X = (ub-lb) .* rand(1,nVar) + lb;
27      Swarm.Particles(k).V = zeros(1, nVar);
28      Swarm.Particles(k).PBEST.X = zeros(1,nVar);
29      Swarm.Particles(k).PBEST.O = inf;
30
31      Swarm.GBEST.X = zeros(1,nVar);
32      Swarm.GBEST.O = inf;
33  end
34
35  % Main loop
36
37
38
39  for t = 1 : maxIter
40
41      % Calcualte the objective value
42      for k = 1 : noP
43          currentX = Swarm.Particles(k).X;
44          Swarm.Particles(k).O = fobj(currentX);
45
46          % Update the PBEST
47          if Swarm.Particles(k).O < Swarm.Particles(k).PBEST.O
48              Swarm.Particles(k).PBEST.X = currentX;

```

ภาพประกอบ 33 โค้ด PSO ในโปรแกรม Matlab M File

```

S_PSOwithboundingvelocity.m x +
46     % Update the pBest
47     if Swarm.Particles(k).O < Swarm.Particles(k).pBest.O
48         Swarm.Particles(k).pBest.X = currentX;
49         Swarm.Particles(k).pBest.O = Swarm.Particles(k).O;
50     end
51
52     % Update the gBest
53     if Swarm.Particles(k).O < Swarm.gBest.O
54         Swarm.gBest.X = currentX;
55         Swarm.gBest.O = Swarm.Particles(k).O;
56     end
57 end
58
59 % Update the X and V vectors
60 w = wMax - t .* (wMax - wMin) / maxIter;
61
62 for k = 1 : noP
63     Swarm.Particles(k).V = w .* Swarm.Particles(k).V + c1 .* rand(1,nVar) .* (Swarm.Particles(k).pBest.X - Swarm.Particles(k).X)
64     + c2 .* rand(1,nVar) .* (Swarm.gBest.X - Swarm.Particles(k).X);
65
66
67     % Check velocities
68     index1 = find(Swarm.Particles(k).V > vMax);
69     index2 = find(Swarm.Particles(k).V < vMin);
70
71     Swarm.Particles(k).V(index1) = vMax(index1);
72     Swarm.Particles(k).V(index2) = vMin(index2);
73
74     Swarm.Particles(k).X = Swarm.Particles(k).X + Swarm.Particles(k).V;
75
76     % Check positions
77     index1 = find(Swarm.Particles(k).X > ub);
78     index2 = find(Swarm.Particles(k).X < lb);
79
80     Swarm.Particles(k).X(index1) = ub(index1);
81     Swarm.Particles(k).X(index2) = lb(index2);
82
83 end
84
85 outmsg = ['Iteration# ', num2str(t) , ' Swarm.gBest.O = ', num2str(Swarm.gBest.O)];
86 disp(outmsg);
87
88 BaseCost(t) = Swarm.gBest.O;
89
90
91
92 milogy(cgCurve);
93 (BaseCost,'.b');
94 el('Iteration')
95 el('Base Cost')
96
97

```

ภาพประกอบ 34 โค้ด PSO ในโปรแกรม Matlab M File

## บทที่ 4

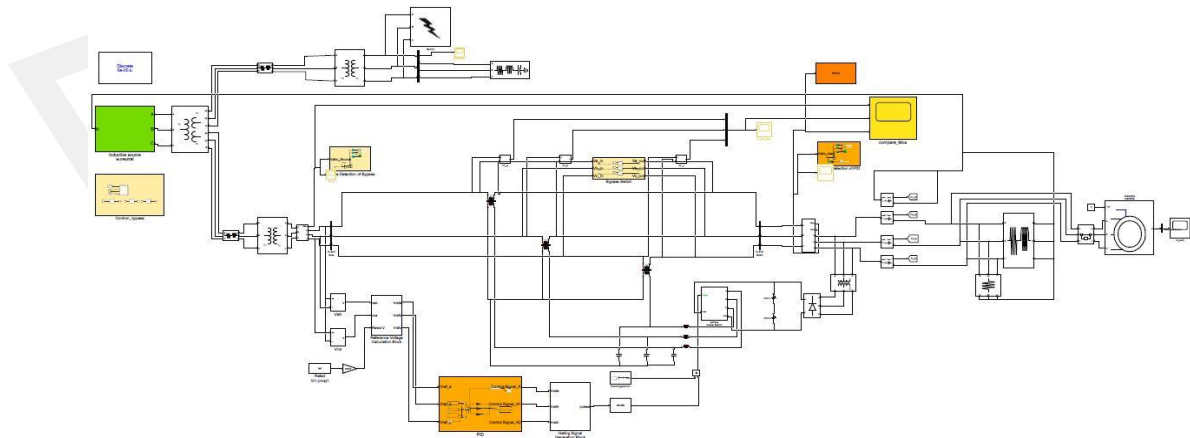
### ผลการวิจัยและอภิปราย

เพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพการชดเชยแรงดันของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอเพื่อปรับปรุงและแก้ไขปัญหาคูณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส เนื้อหาบทนี้ผู้วิจัยนำเสนอผลการจำลองและเปรียบเทียบผลการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink 2018b ซึ่งผลการจำลองสามารถนำไปพัฒนาและนำไปใช้ได้จริงตามสถานที่ที่ต้องการความเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า โดยการจำลองดังกล่าวได้จำลองลักษณะโหลด 2 รูปแบบ คือ โหลดแบบสแตติก คือ โหลด RL และโหลดแบบไดนามิก คือ โหลดมอเตอร์ ในช่วงพิกัดแรงดันเฟสที่ 220 โวลต์ (Rms)

#### 4.1 การจำลองและผลการจำลอง (Simulation and Simulation Results)

##### 4.1.1 แผนภาพการจำลอง

แผนภาพการจำลองโดยรวมของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตแสดงในภาพประกอบที่ 35 และตารางที่ 5 และ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตและระบบสายส่งไฟฟ้า ในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาคูณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส



ภาพประกอบ 35 แผนภาพการจำลองโดยรวมของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอรืของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต

Supply frequency	50 Hz	
Load rated phase voltage	220 V (Rms)	
R-L linear load	100 $\Omega$	
	1 H	
Induction motor	4 Kw	
Coupling transformer turn ratio	1 : 1	
DC link voltage	$\frac{380\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	
Inverter switching frequency	6 kHz	
Filter	Inductance	1 mH
	Capacitance	55 $\mu$ F

ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอรืสำหรับระบบสายส่งไฟฟ้า

Utility (AC grid)	66 kV, 50 Hz
Transformers1	10 MVA, 66/22/22 kV
Transformers2	500 kVA, 22/0.31 kV
Transformers3	1 MVA, 22/0.31 kV
Feeder resistance	1 ohm
Feeder inductance	5 mH

พหุบัณฑิต ชีวะ

การจำลองทดสอบการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตจำลองสภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า ทดสอบสภาวะผิดปกติ 2 ระบบ ได้แก่

1. ทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย 4 กรณี ได้แก่ แรงดันเกินแบบสมดุลทั้งสามเฟส (Balanced Voltage Swell) แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell) แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag) และแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag) โดยตารางที่ 8 แสดงรายละเอียดการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่ายของแต่ละกรณี
2. ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือความผิดปกติ (Fault) 3 กรณี ได้แก่ ความผิดปกติลงดินเฟสเดียวของเฟส A (Single Line to Ground Fault (SLG)) ความผิดปกติลงดินสองเฟสของเฟส A และ B (Double Line to Ground Fault (DLG)) และ ความผิดปกติสามเฟส (Three Phase Fault)

ตารางที่ 7 แสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (PI controller) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยเทคนิควิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยการกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ค้นหาที่มีจำนวนมากจะทำให้ครอบคลุมต่อการค้นหาและลดจำนวนรอบ (Iterations) เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ในทางตรงกันข้ามกันจำนวนประชากรจำนวนมากจะเพิ่มความซับซ้อนและระยะเวลาของจำนวนรอบในการค้นหา (Iterations) ให้นานขึ้น จากการศึกษาพบว่า จำนวนประชากรที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 20 ถึง 60 ส่วนจำนวนรอบในการค้นหา (Number of Iterations) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา จำนวนรอบในการค้นหาที่น้อยเกินไปอาจหยุดเวลาในการค้นหาก่อนเวลาอันควรหรือ จำนวนรอบในการค้นหาที่มากเกินไปอาจทำให้การค้นหาค่าที่เหมาะสมมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นและต้องใช้เวลาในการค้นหาที่เหมาะสมเพิ่มมากขึ้นโดยไม่จำเป็น ดังนั้นในงานวิจัยจึงกำหนดค่าตัวแปร จำนวนประชากร เท่ากับ 30 และ จำนวนรอบในการค้นหา เท่ากับ 50 รอบ [12]

ตาราง 7 พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอโดยใช้เทคนิค SA PSO และ GA

Case	Optimization Techniques	Controller Gains			Total Searching Time (sec)	ITAE
		kp	ki	kd		
Balanced Voltage Swell	SA	9.48	9.965	0	1762	2.1934
	PSO	10	5.6412	0	27448	2.1738
	GA	9.227	9.618	0	33075	2.1740
Unbalanced Voltage Swell	SA	9.931	9.83	0	534	2.2189
	PSO	10	6.125	0	12978	2.1973
	GA	9.478	2.976	0	14061	2.2037
Balanced Voltage Sag	SA	9.646	9.488	0	531	2.4093
	PSO	9.0754	8.7513	0	12993	2.4017
	GA	9.108	0.887	0	13885	2.4198
Unbalanced Voltage Sag	SA	9.759	9.947	0	519	2.2998
	PSO	9.4274	4.6069	0	12690	2.2568
	GA	9.427	5.845	0	13923	2.2713
Single Line to Ground Fault	SA	6.480	2.673	0	571	2.8161
	PSO	3.4763	0.1195	0	14189	2.9239
	GA	1.764	2.872	0	16486	2.9321
Double Line to Ground Fault	SA	0.46	0.501	0	479	2.2325
	PSO	0.58839	0.913531	0	13735	2.1876
	GA	0.568	1.342	0	12805	2.1816
Three Phase Fault	SA	4.44	6.393	0	314	2.2929
	PSO	4.6531	2.6083	0	10552	2.2997
	GA	5.03	2.77	0	9251	2.3038

\* Number of Iterations = 50

Number of Population = 30



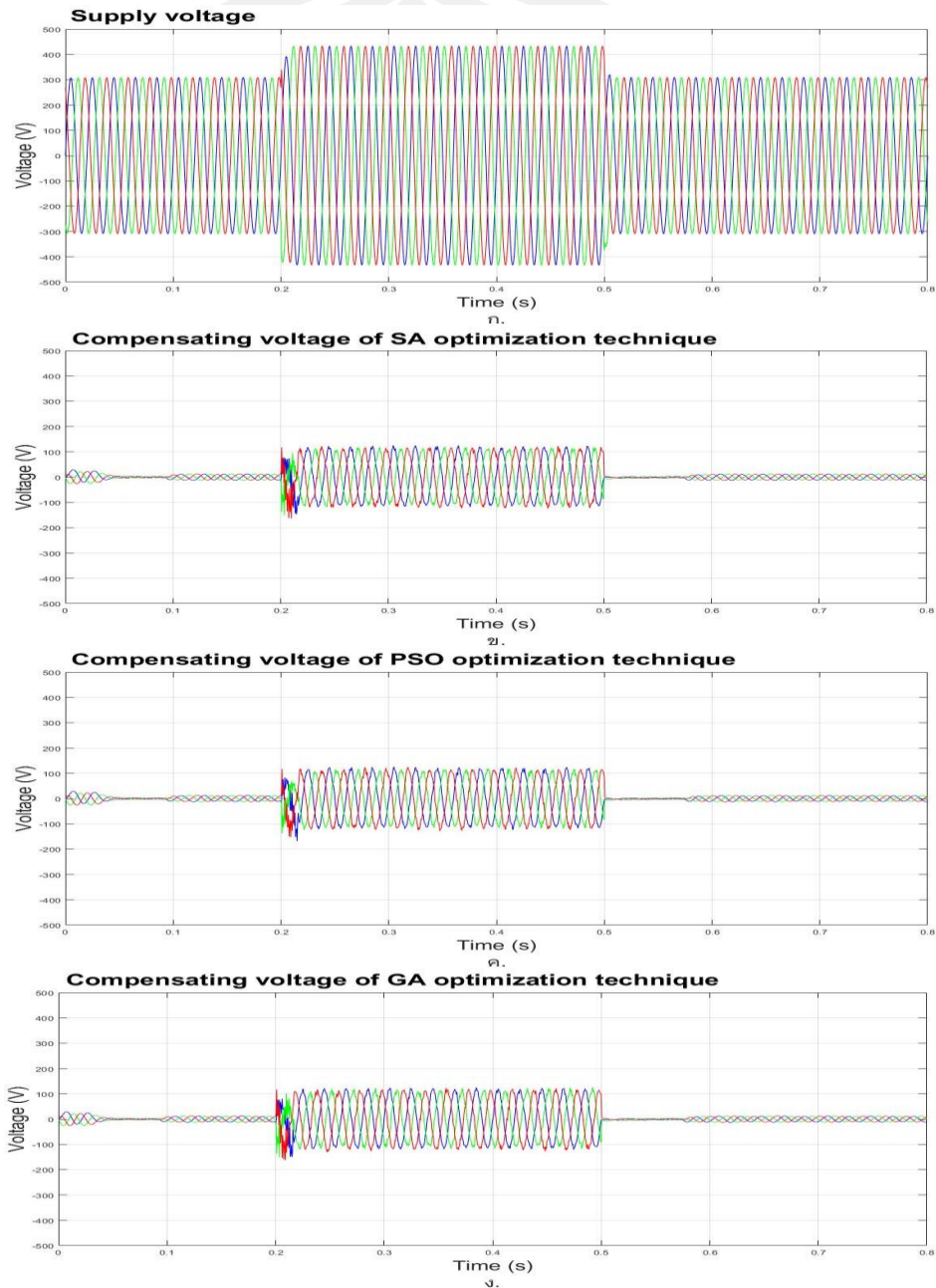
## 4.1.2 ทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

ตาราง 8 แสดงรายละเอียดการทดสอบกับความผิดปกติเกิดขึ้นที่แหล่งจ่าย

กรณี ที่	กรณีที่เกิด	ช่วงเวลาที่เกิด	หมายเหตุ
1	เกิด Balanced Voltage Swell	วินาทีที่ 0.2-0.5	เกิด Balanced Voltage Swell 140% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง
2	เกิด Unbalanced Voltage Swell	วินาทีที่ 0.2-0.5	เกิด Unbalanced Voltage Swell ที่เฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 เพิ่มขึ้น 140% 130% และ 120% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด
3	เกิด Balanced Voltage Sag	วินาทีที่ 0.2-0.5	เกิด Balanced Voltage Sags 60 % ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง
4	เกิด Unbalanced Voltage Sag	วินาทีที่ 0.2-0.5	เกิด Unbalanced Voltage Sags ที่เฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 ลดลง 60% 70% และ 80% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด

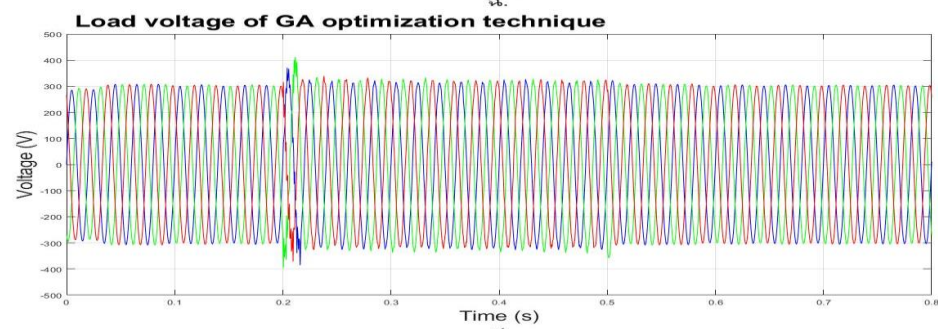
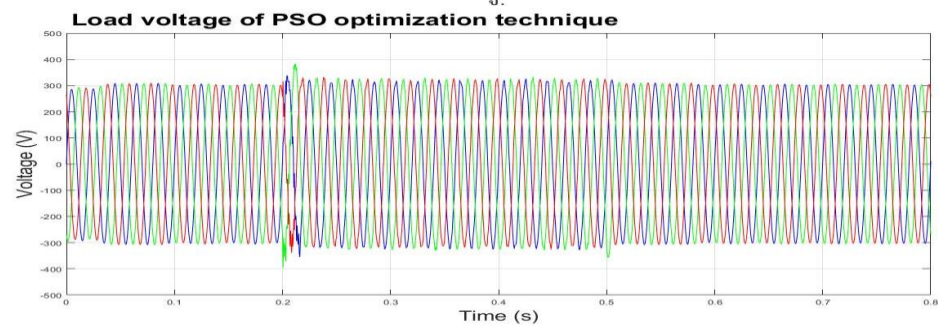
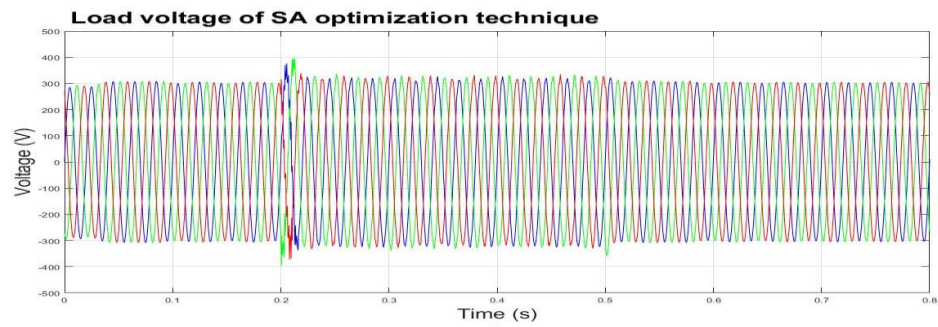
1) กรณีที่ 1 แรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell)

ภาพประกอบที่ 36 แสดงถึงผลการจำลองกรณีที่ 1 เกิดแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 36 ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบสมดุล

ก.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ข.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA) ค.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



ภาพประกอบ 36 ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบสมมูล (ต่อ)

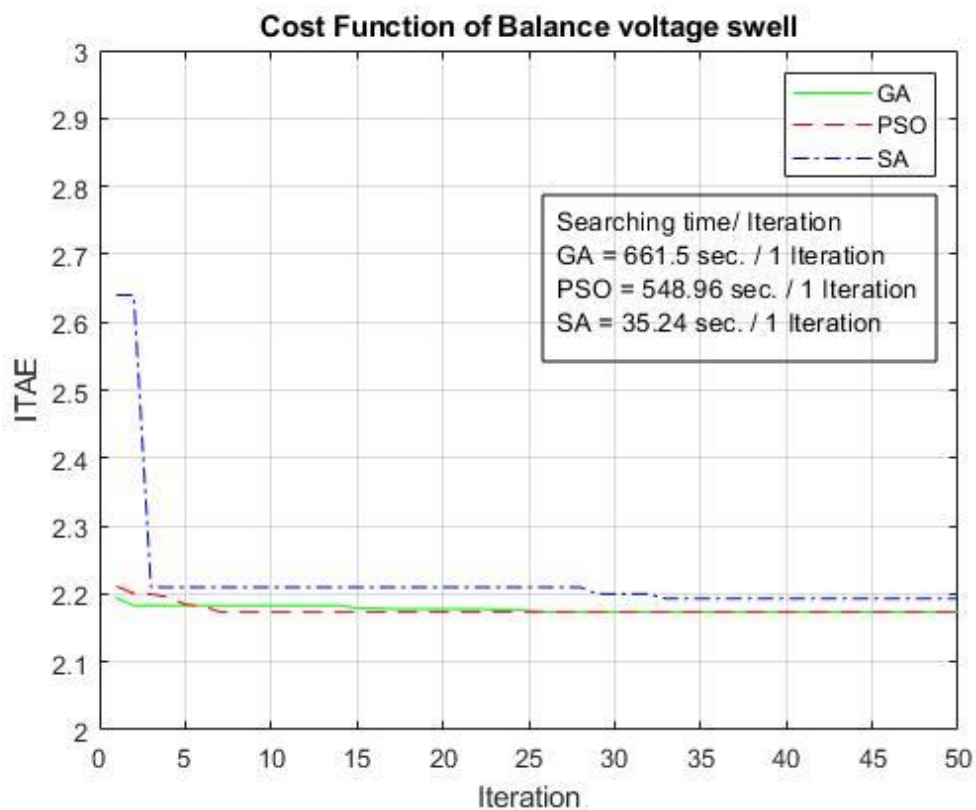
จ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

ฉ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

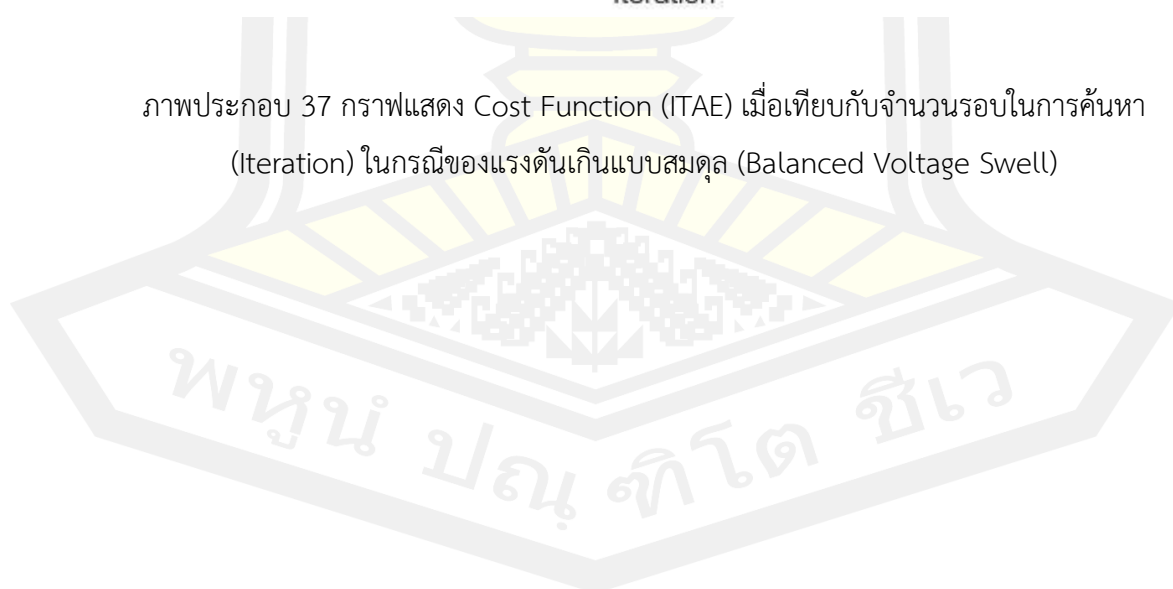
และ ช.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

พหุบัณฑิต ชีวะ

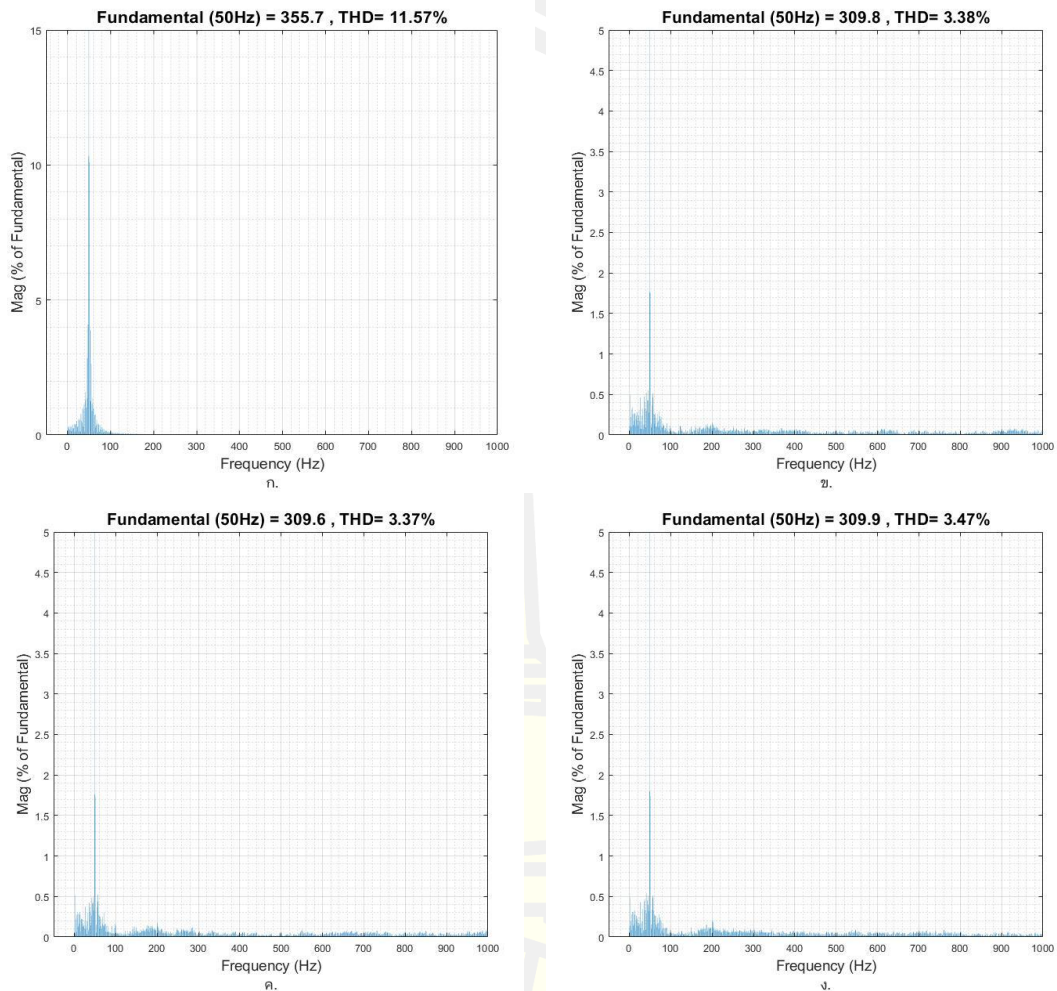
ภาพประกอบที่ 37 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 1 เกิดแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 37 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell)



ภาพประกอบที่ 38 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 1 เกิดแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



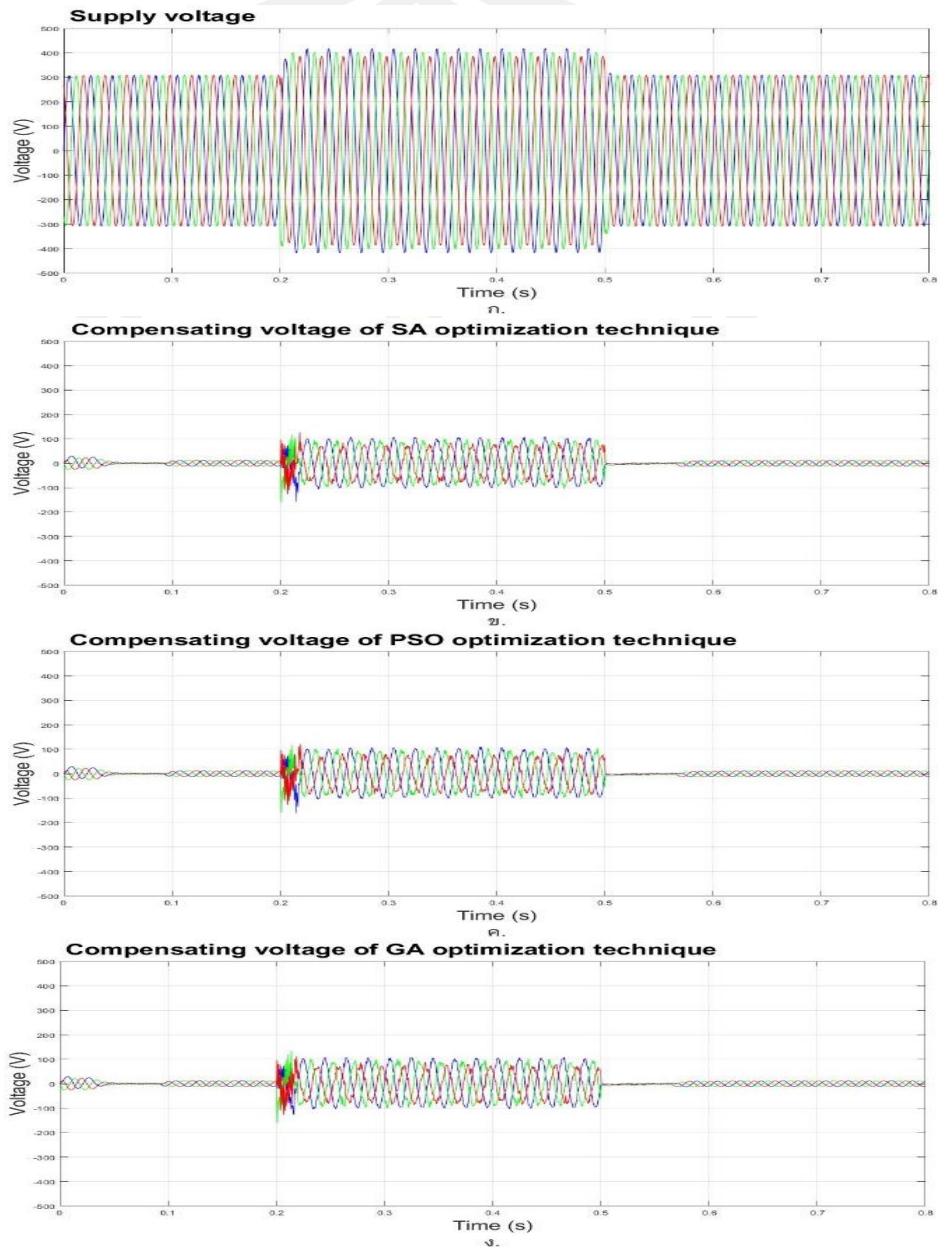
ภาพประกอบ 38 ผล THD กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ข.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเนกนิย (SA) ค.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



2) กรณีที่ 2 แรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell)

ภาพประกอบที่ 39 แสดงถึงผลการจำลองกรณีที่ 2 เกิดแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



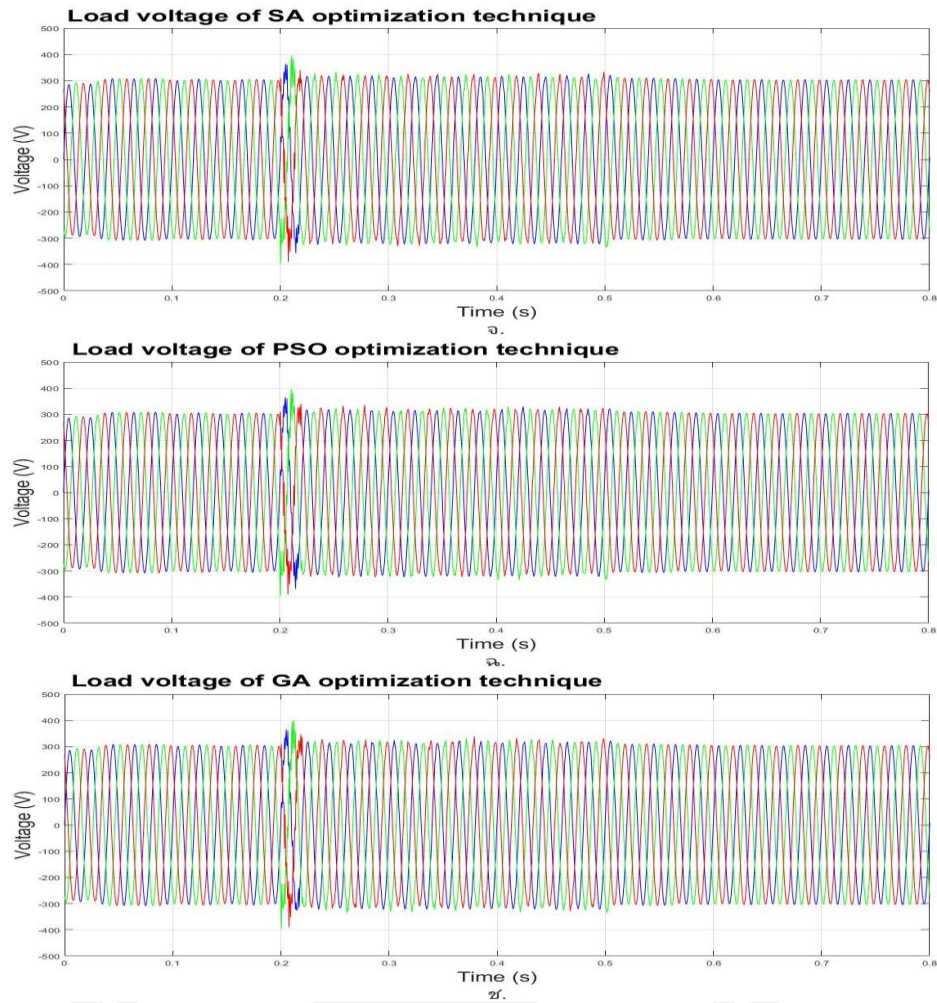
ภาพประกอบ 39 ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล

ก.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อน ที่ 2

ข.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม วิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

ค.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ

ง.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



ภาพประกอบ 39 ผลการจำลองกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (ต่อ)

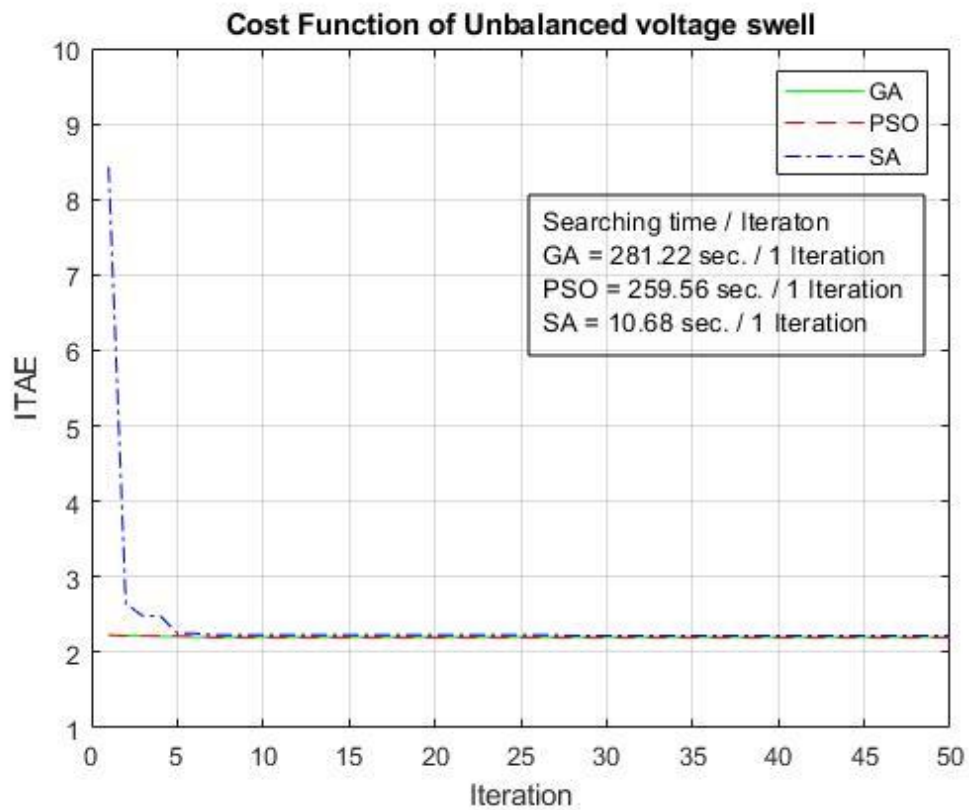
จ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีจำลองอบเหนียว (SA)

ฉ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

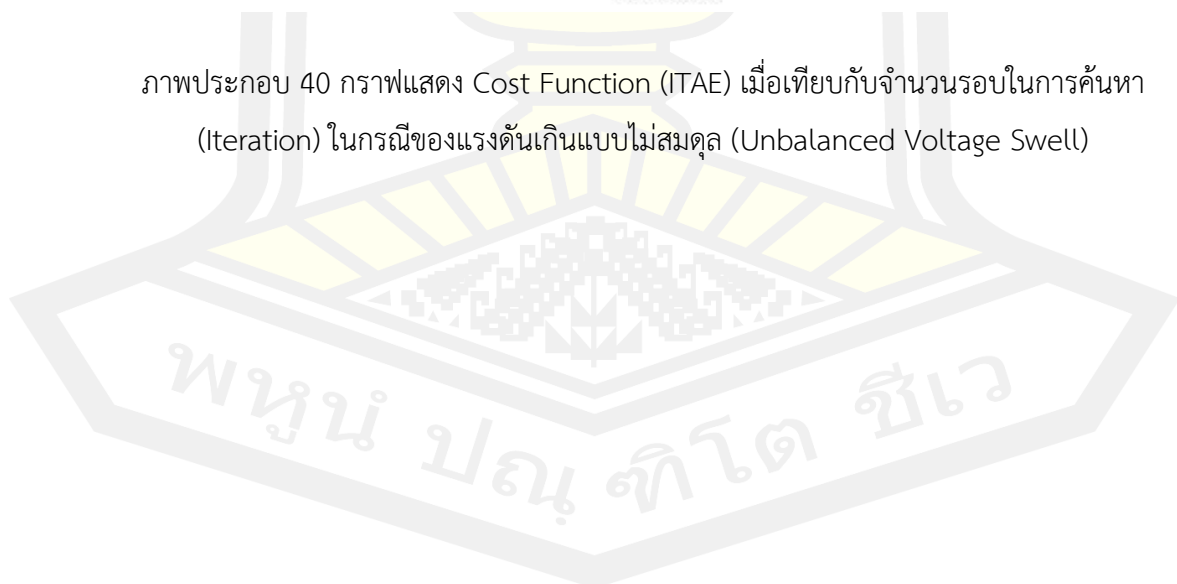
และ ช.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

พหุบัณฑิต ชีวะ

ภาพประกอบที่ 40 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 2 เกิดแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell) โดยตัวควบคุมพีไอ

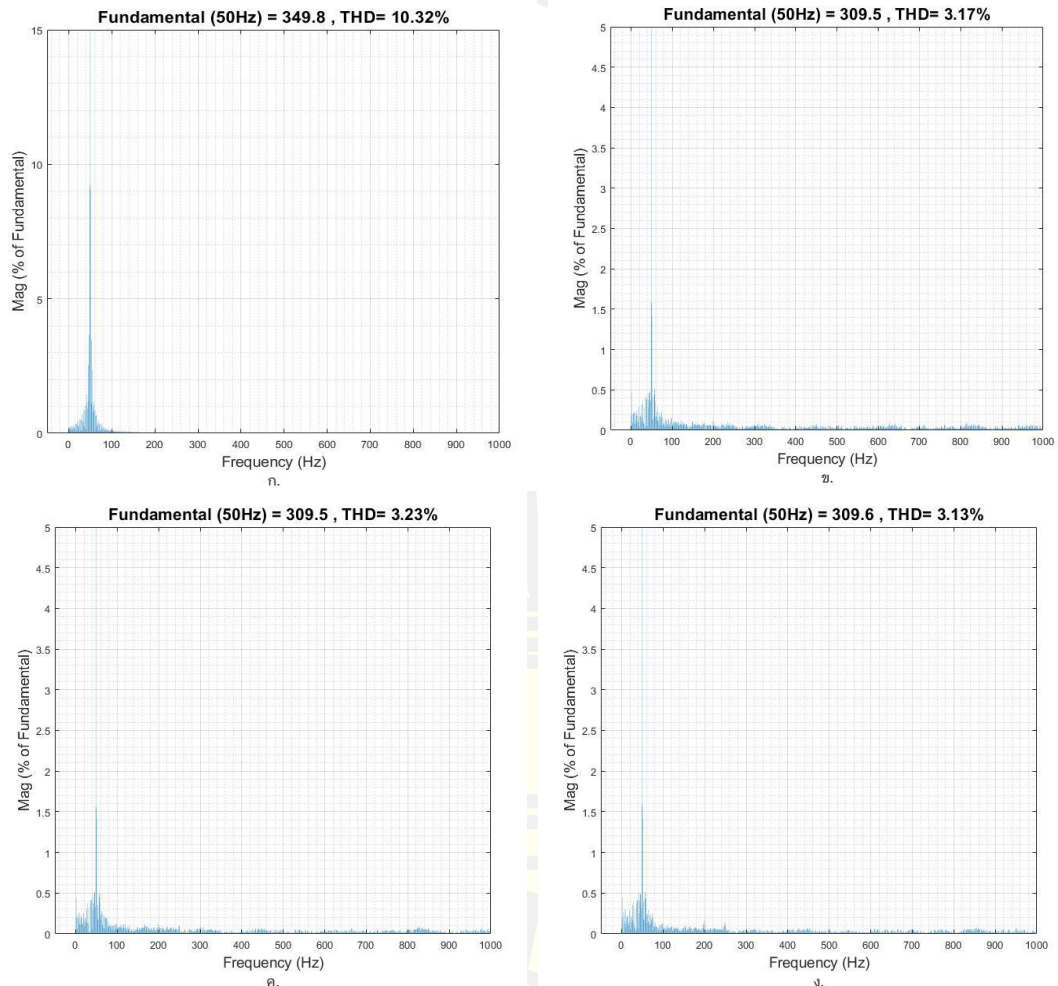


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell)





ภาพประกอบที่ 41 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 2 เกิดแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ

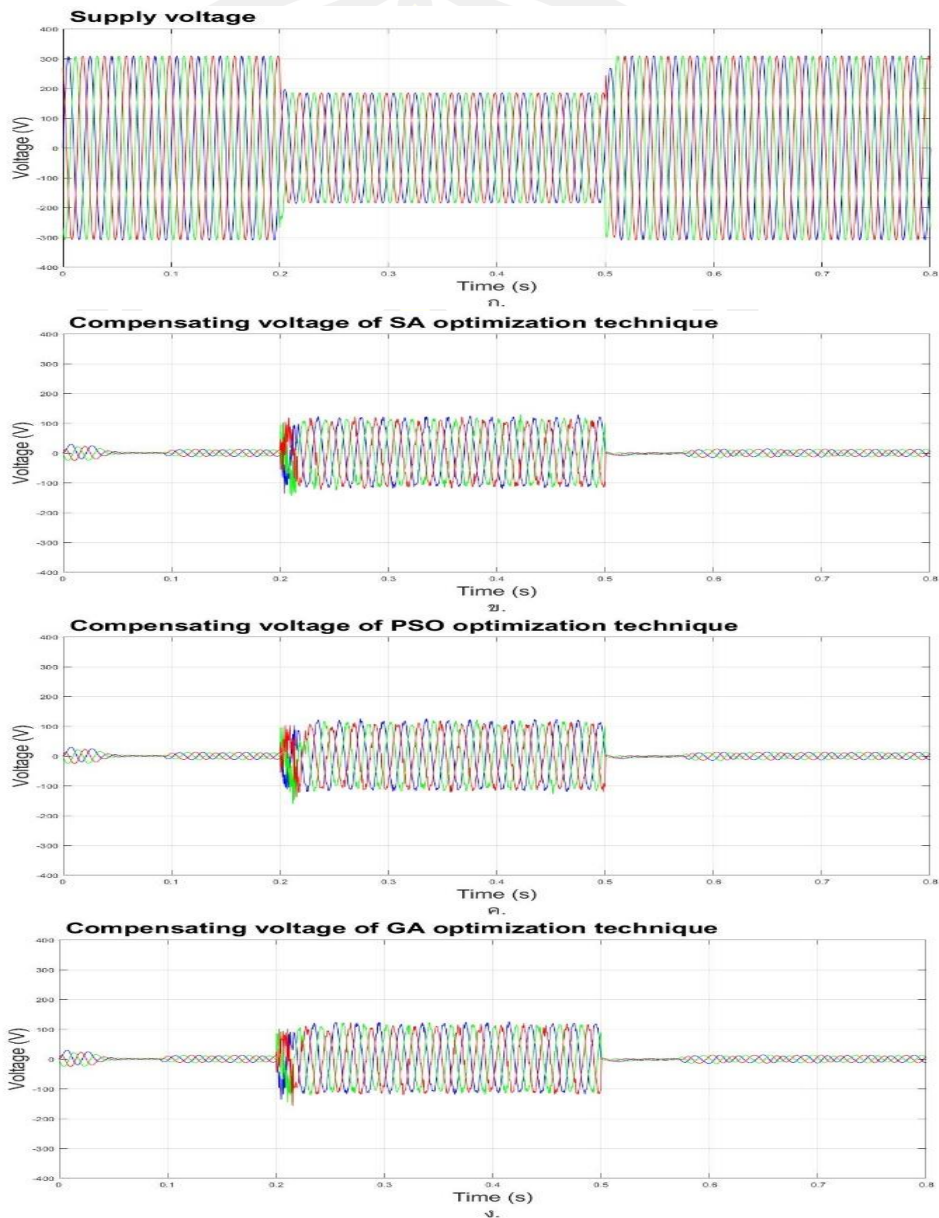


ภาพประกอบ 41 ผล THD กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ข.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเบเหนียว (SA) ค.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

3) กรณีที่ 3 แรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag)

ภาพประกอบที่ 42 แสดงถึงผลการจำลองกรณีที่ 3 เกิดแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag) วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



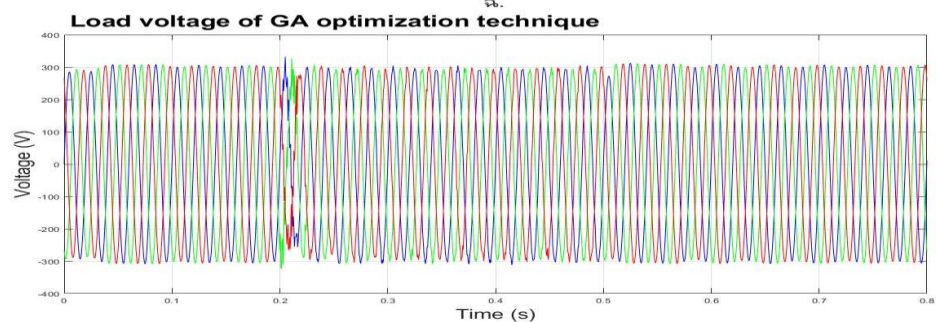
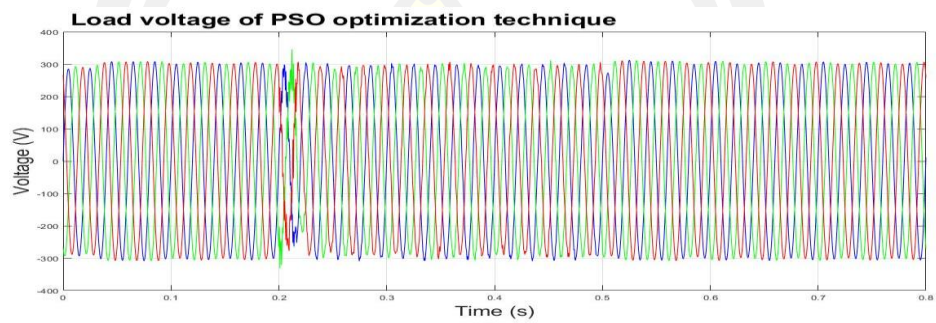
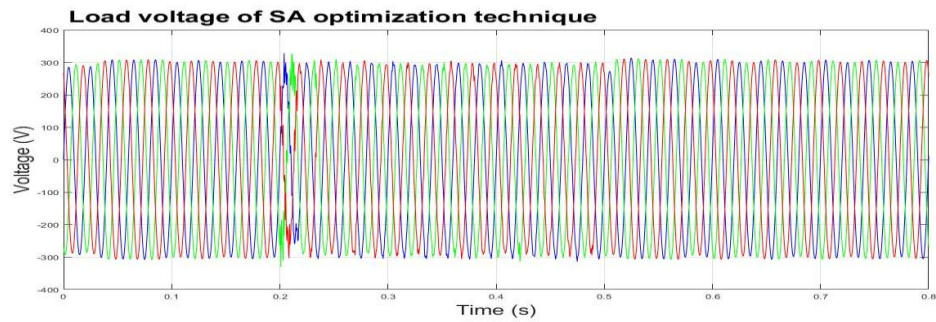
ภาพประกอบ 42 ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบสมดุล

ก.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2

ข.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

ค.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ

ง.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



ภาพประกอบ 42 ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบสมดุล (ต่อ)

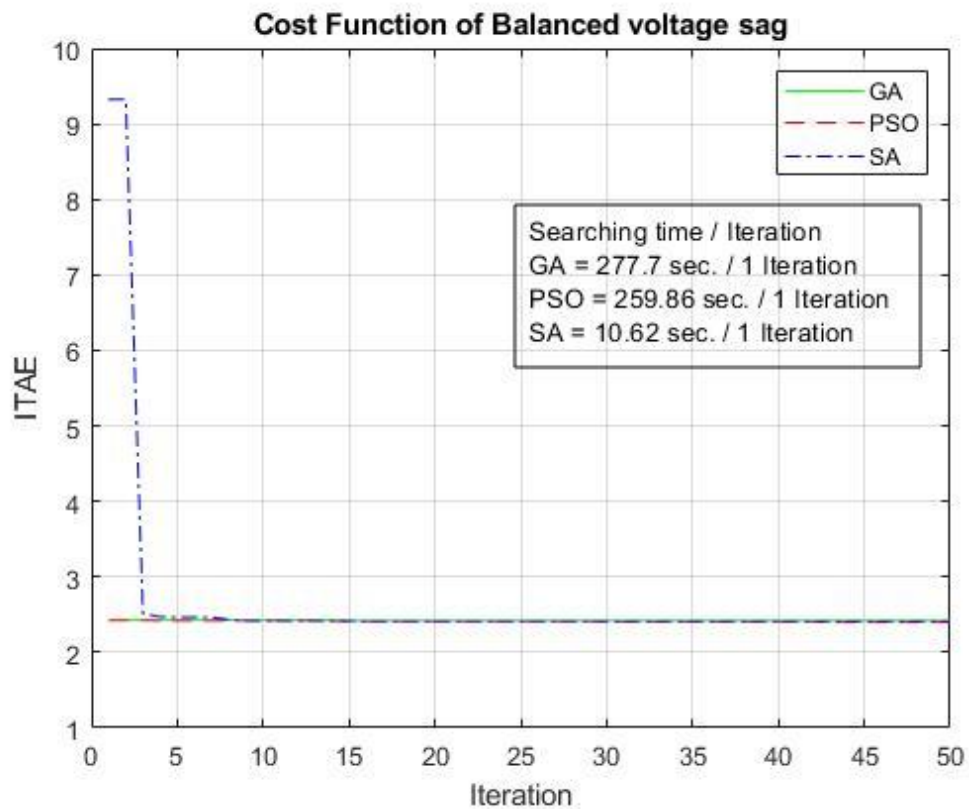
จ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

ฉ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

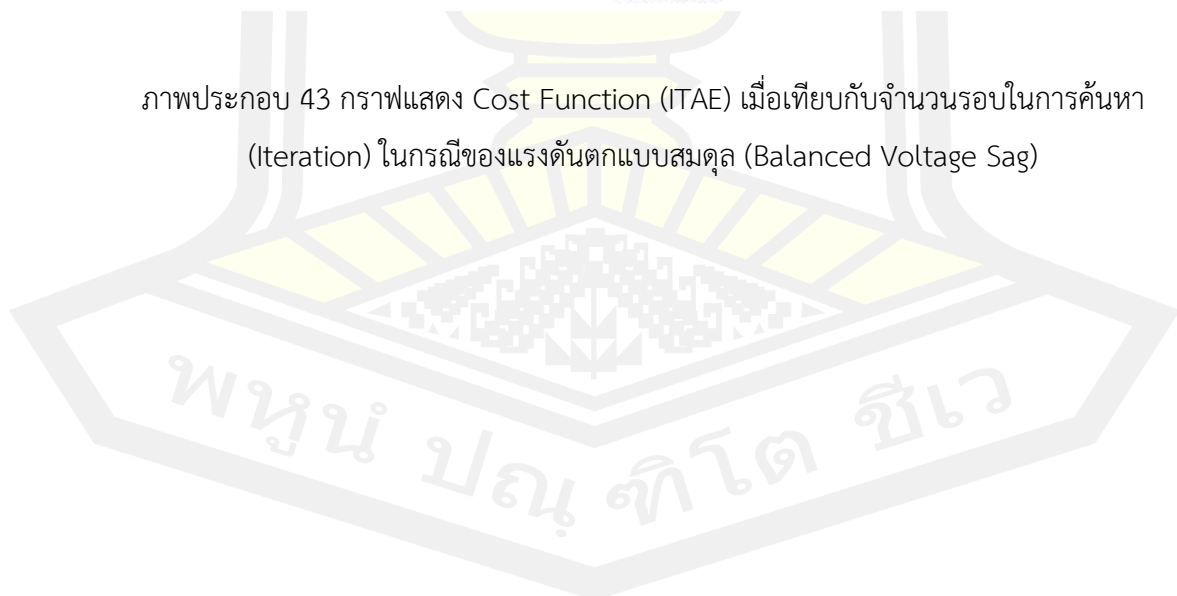
และ ช.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

พหุบัณฑิต ชีวะ

ภาพประกอบที่ 43 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 3 เกิดแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag) โดยตัวควบคุมพีไอ

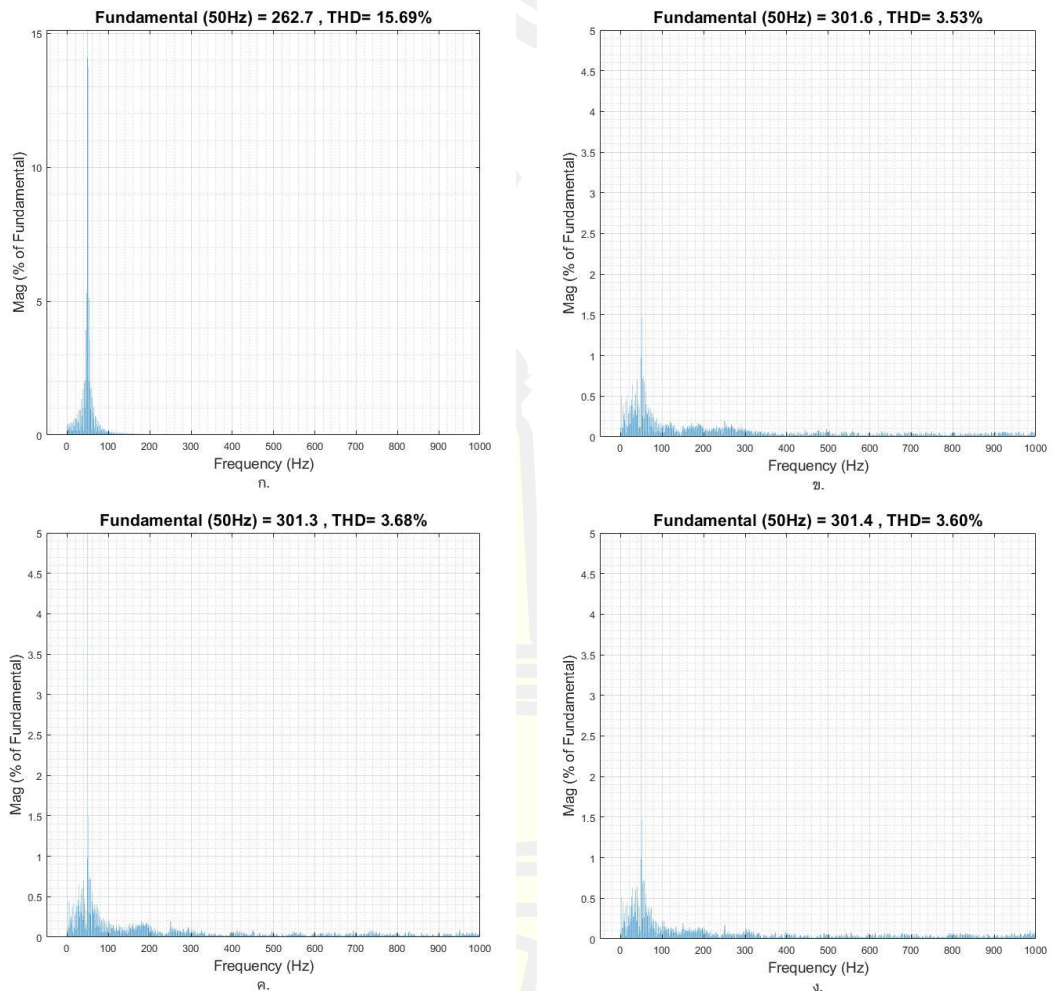


ภาพประกอบ 43 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag)





ภาพประกอบที่ 44 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 3 เกิดแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ

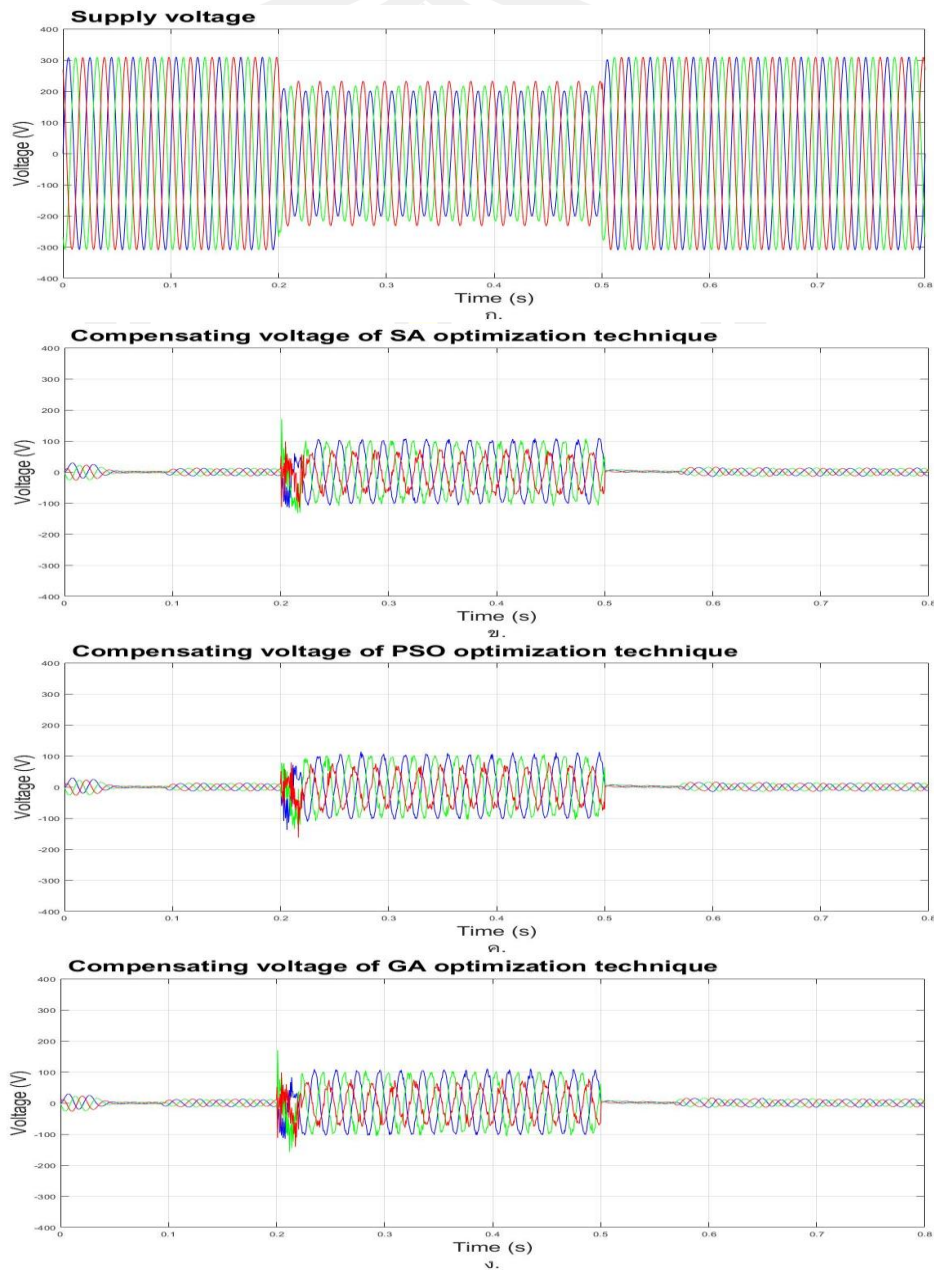


ภาพประกอบ 44 ผล THD กรณีผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบสมดุล

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ข.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเบเนียว (SA) ค.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

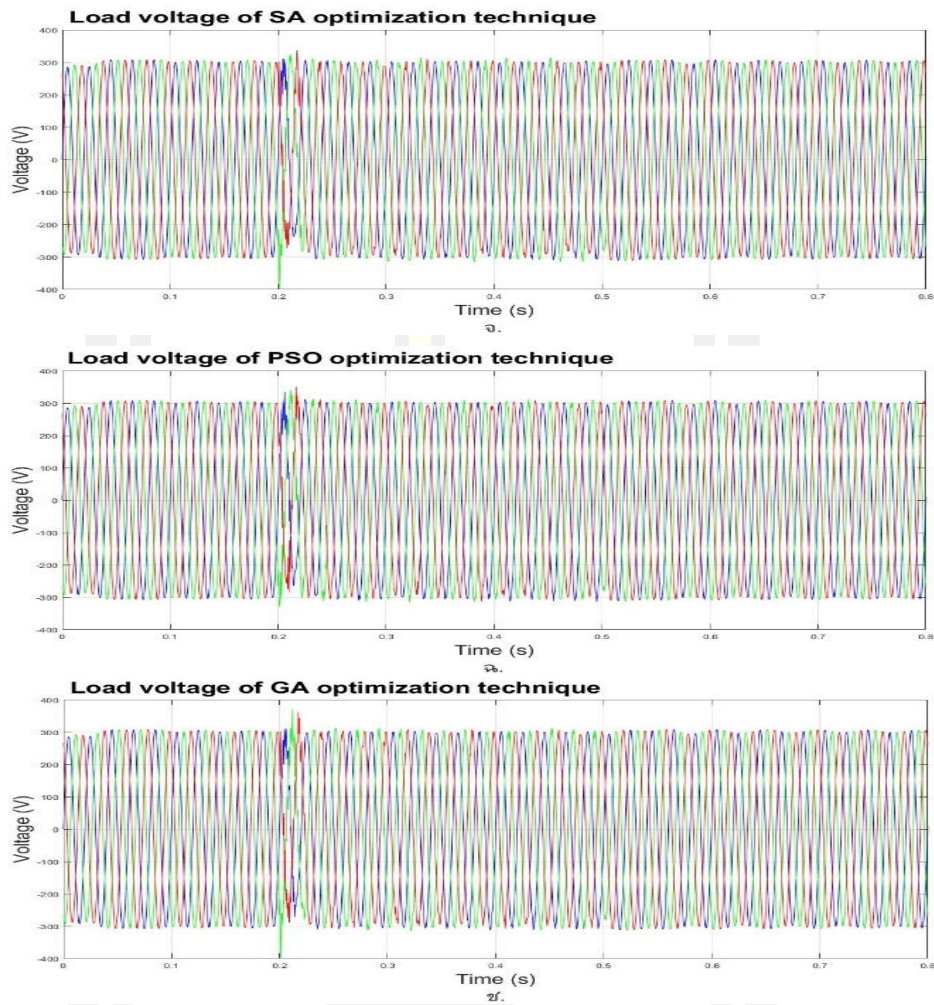
#### 4) กรณีที่ 4 แรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag)

ภาพประกอบที่ 45 แสดงถึงผลการจำลองกรณีที่ 4 เกิดแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 45 ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล

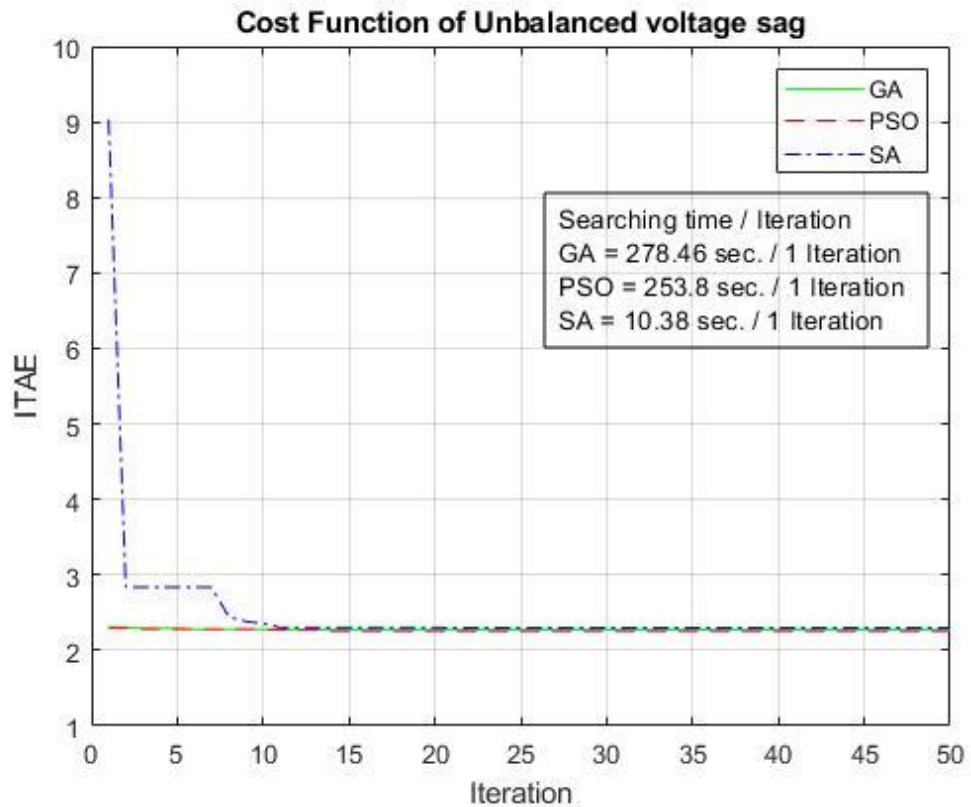
- ก.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อน 2 ข.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธี  
การจำลองอเนกยิว (SA) ค.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่  
กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



ภาพประกอบ 45 ผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล (ต่อ) จ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA) ฉ.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ช.แรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

พหุ ประถม โท ชีวะ

ภาพประกอบที่ 46 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 4 เกิดแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag) โดยตัวควบคุมพีไอ

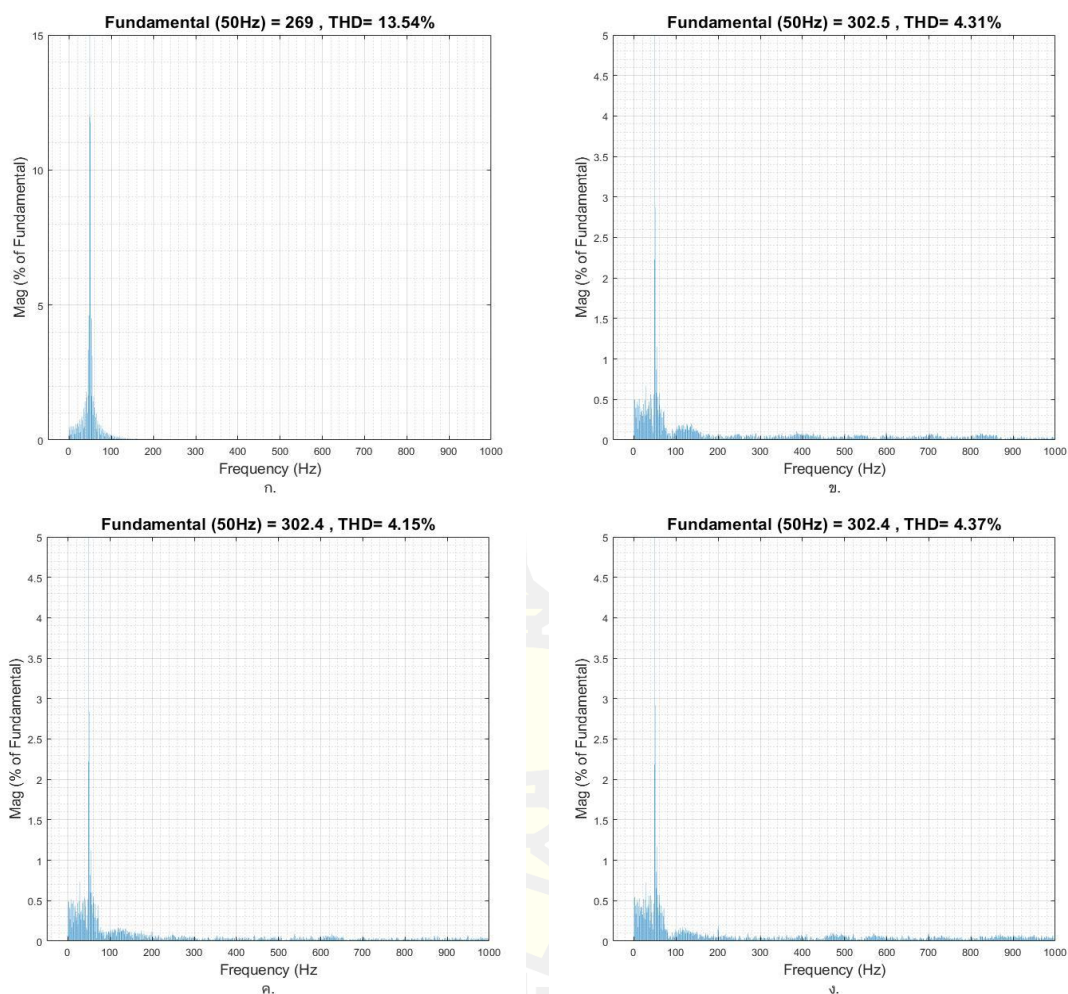


ภาพประกอบ 46 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag)





ภาพประกอบ 47 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 4 เกิดแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag) ที่วินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



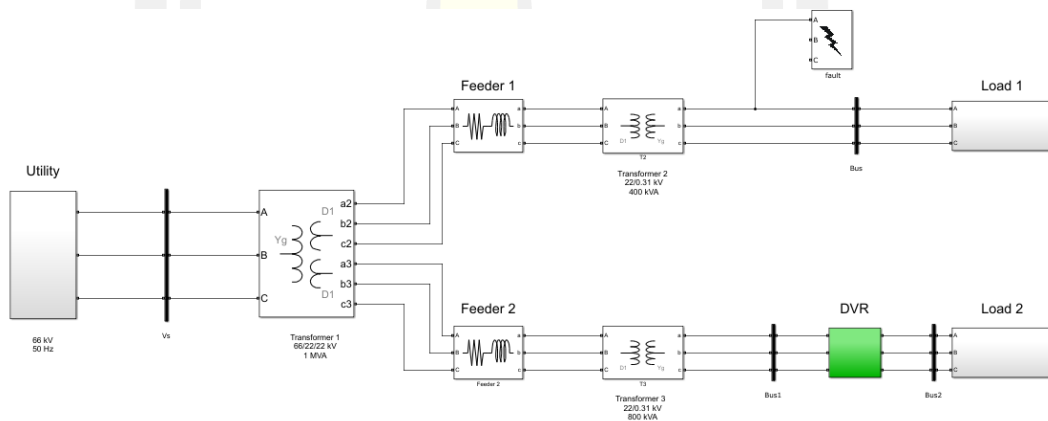
ภาพประกอบ 47 ผล THD กรณีผลการจำลองกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ข.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองแบบเหนียว (SA) ค.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ง.ผล THD แรงดันด้านโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

#### 4.1.3 ทดสอบกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือความผิดปกติ (Fault)

ทดสอบประสิทธิภาพการแก้ปัญหาของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) เมื่อเกิดความผิดปกติหรือความผิดปกติ (Fault) เกิดขึ้นที่สายป้อน (Feeder) ที่ 1 ส่งผลกระทบต่อสายป้อน (Feeder) ที่ 2 ที่มีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต (DVR) ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ ซึ่งทำงานร่วมกับเทคนิควิธีการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 3 เทคนิคได้แก่ เทคนิควิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จำนวน 3 กรณี ได้แก่

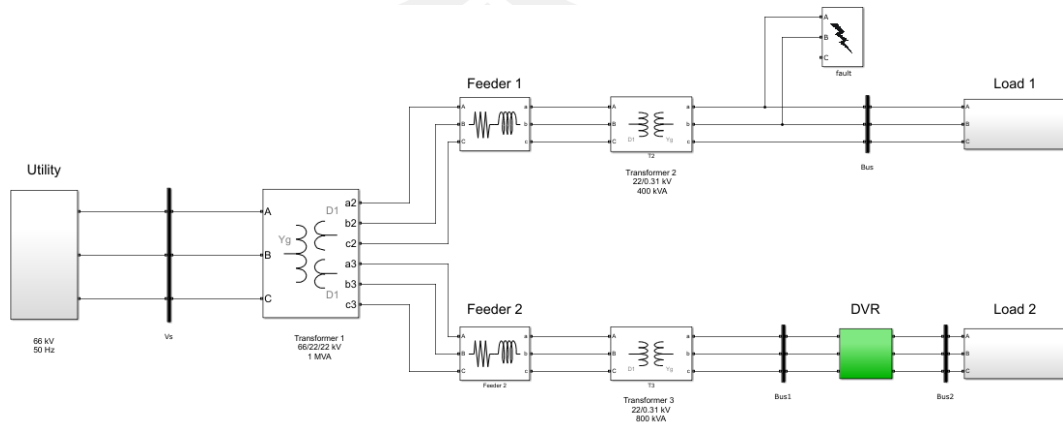
**กรณีที่ 1** ฟอลต์ลงดินของไลน์เส้นเดียว (Single Line to Ground Fault (SLG)) โดยเกิดความผิดปกติลงดินของเฟส A โดยภาพประกอบที่ 48 แสดงแผนภาพไดอะแกรมการเกิดความผิดปกติลงดินของไลน์เส้นเดียวในระบบสายส่งของเฟส A



ภาพประกอบ 48 ไดอะแกรมการเกิดความผิดปกติลงดินของไลน์เส้นเดียวในระบบสายส่ง

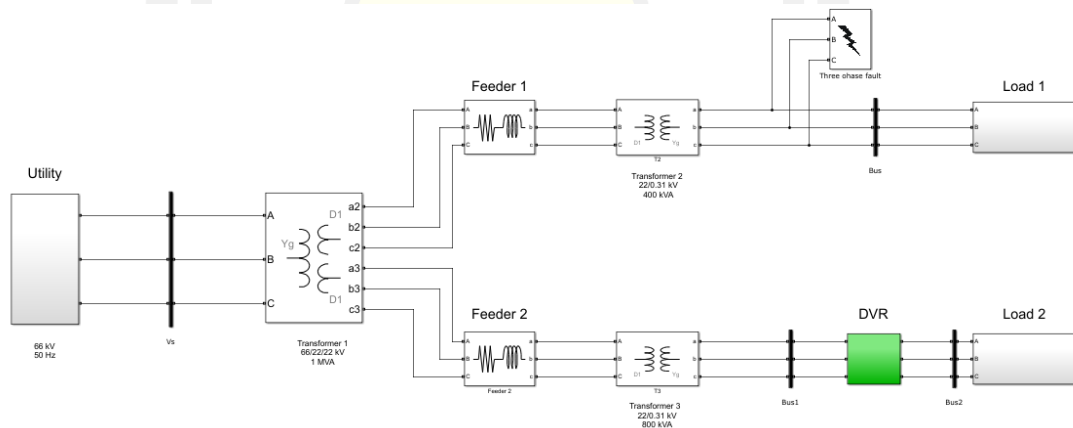
พหุบัณฑิต ชีวะ

กรณีที่ 2 ความผิดพลาดลงดินสองเฟส (Double Line to Ground Fault (DLG)) โดยเกิดความผิดพลาดลงดินของเฟส A และเฟส B แสดงดังภาพประกอบที่ 49



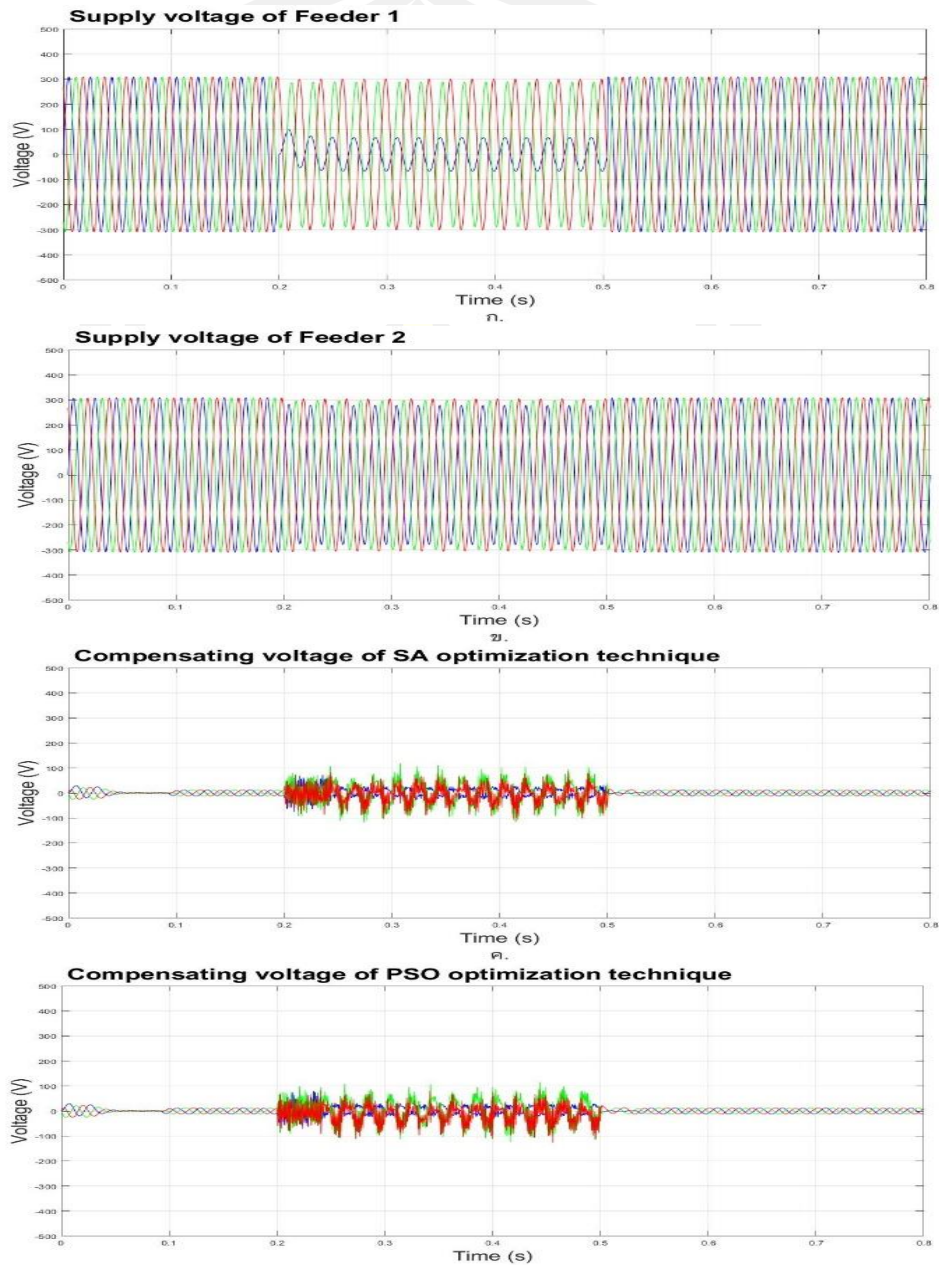
ภาพประกอบ 49 ไดอะแกรมการเกิดความผิดพลาดลงดินสองเฟสในระบบสายส่ง

กรณีที่ 3 ความผิดพลาดสามเฟส (Three Phase Fault) โดยภาพประกอบที่ 50 แสดงแผนภาพไดอะแกรมการเกิดความผิดพลาดสามเฟสในระบบสายส่ง



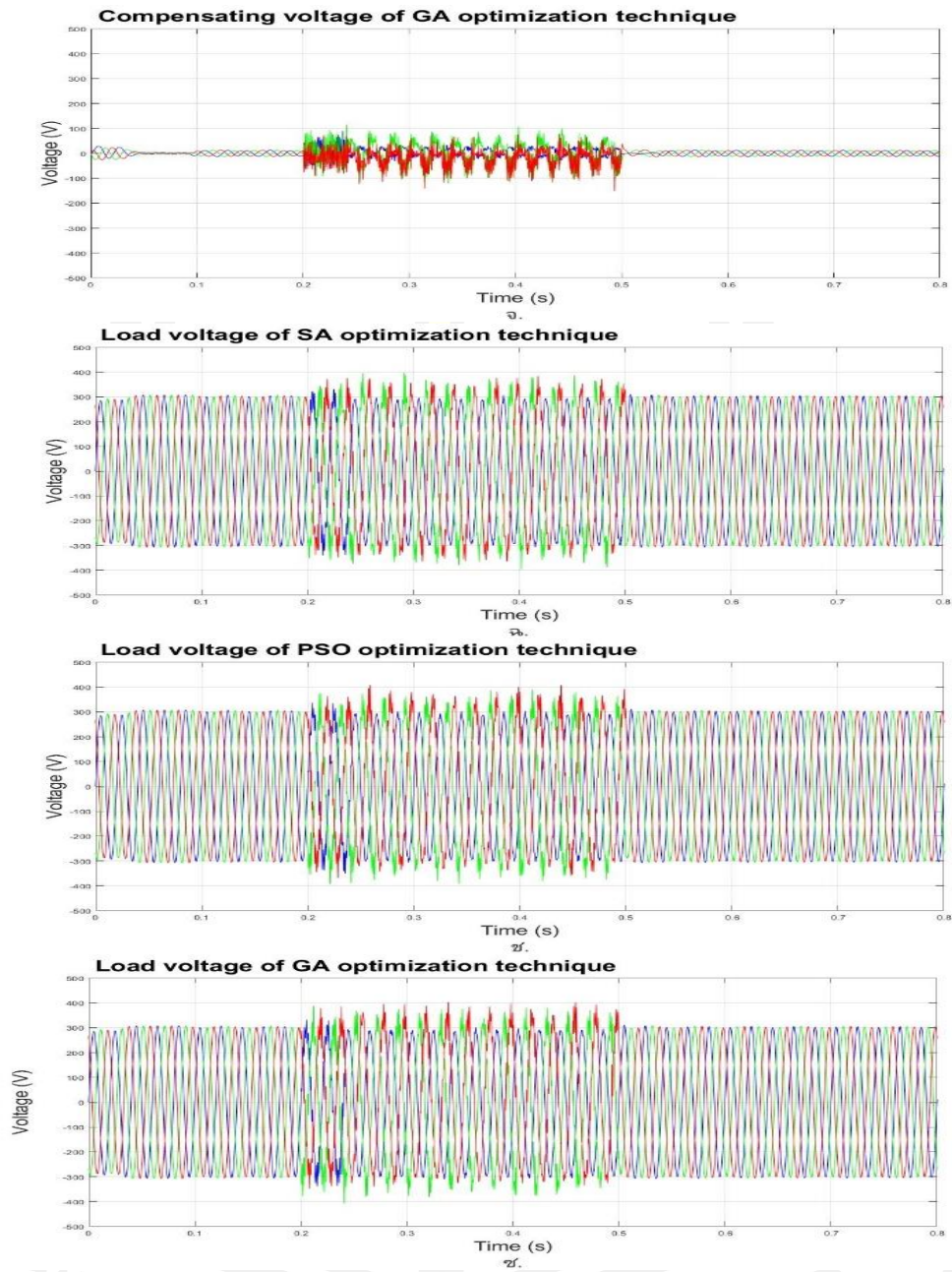
ภาพประกอบ 50 ไดอะแกรมการเกิดความผิดพลาดสามเฟสในระบบสายส่ง

1) กรณีที่ 1 ความผิดปกติของลงดินเฟสเดียว (Single Line to Ground Fault (SLG))  
 ภาพประกอบที่ 51 แสดงถึงผลการจำลองกรณีนี้ 1 เกิดความผิดปกติของลงดินเฟส A บน  
 สายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



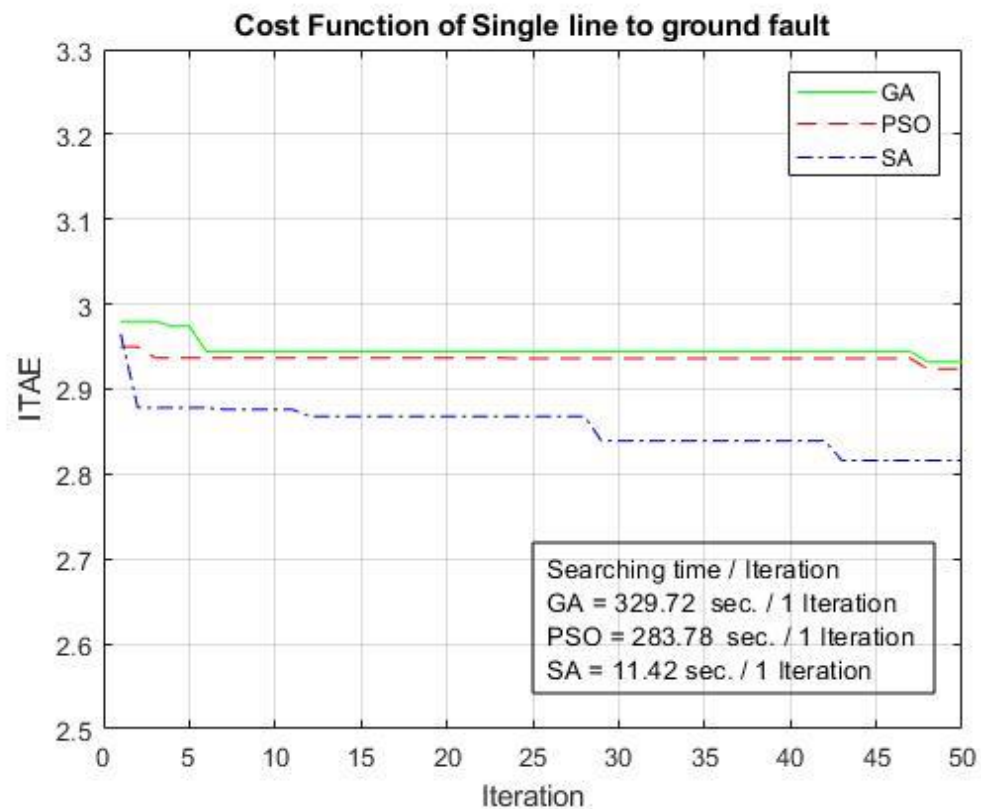
ภาพประกอบ 51 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติของลงดินเฟสเดียว

ก.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1 ข.แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2  
 ค.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเนกนิย (SA) และ  
 ง.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)



ภาพประกอบ 51 ผลการจำลองกรณีความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว (ต่อ) จ.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ฉ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA) ช.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ซ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

ภาพประกอบที่ 52 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 1 เกิดความผิดปกติของเฟสเดียวของเฟส A บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ

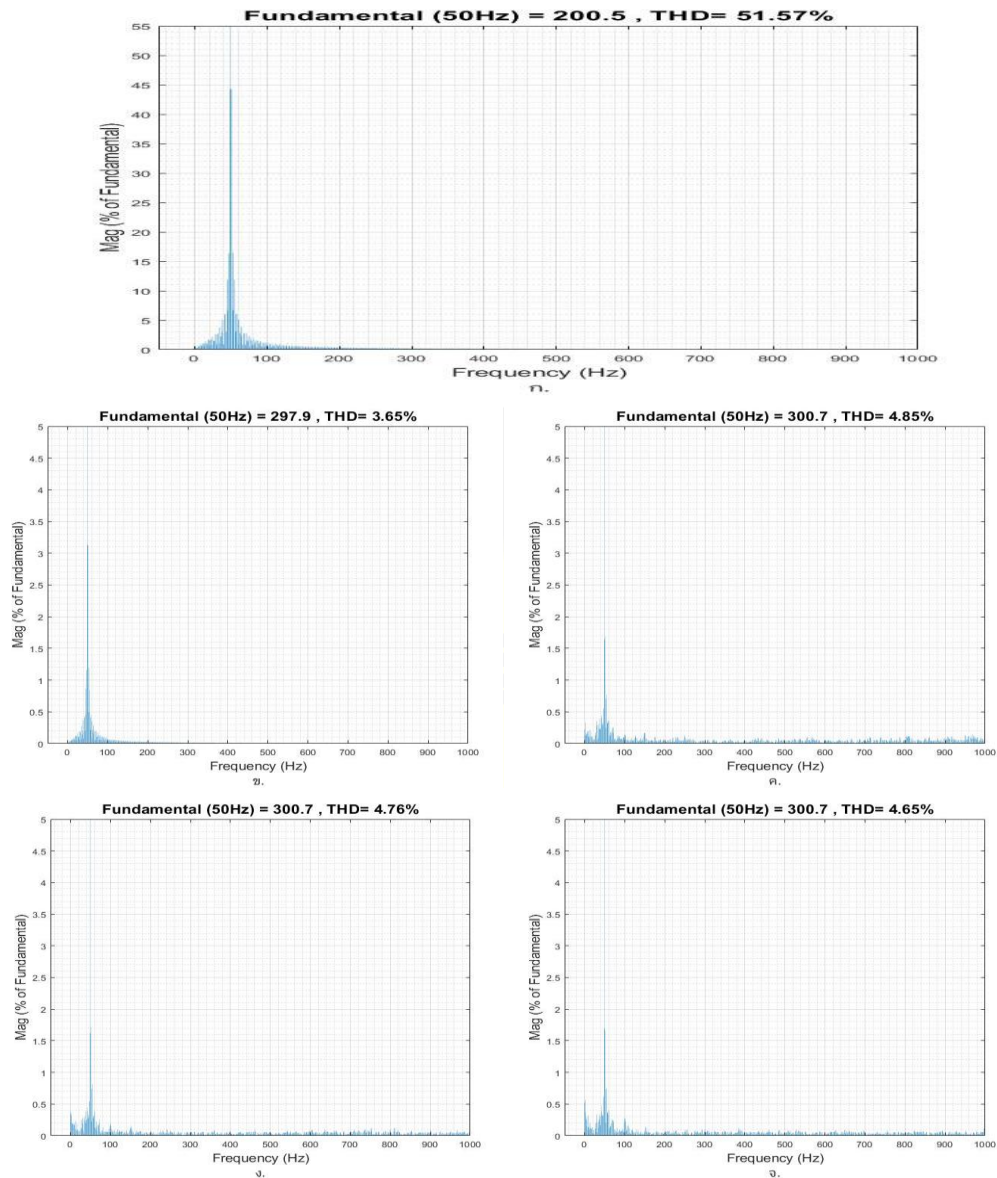


ภาพประกอบ 52 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติของเฟสเดียว

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบที่ 53 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 1 เกิดความผิดพร่องลงดินเฟสเดียวของเฟส A บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 53 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดพร่องลงดินเฟสเดียว

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1

ข.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2

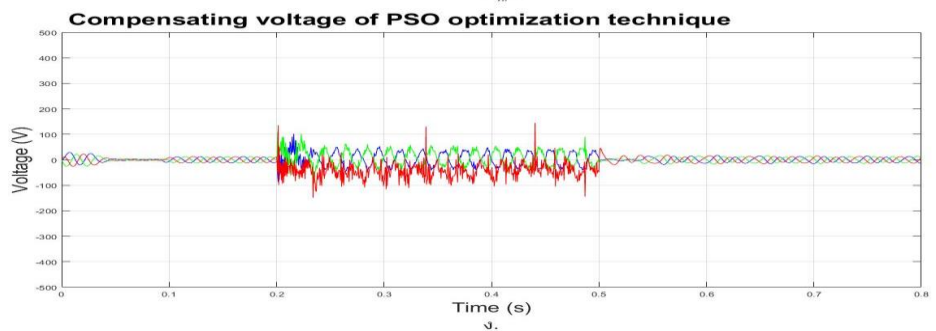
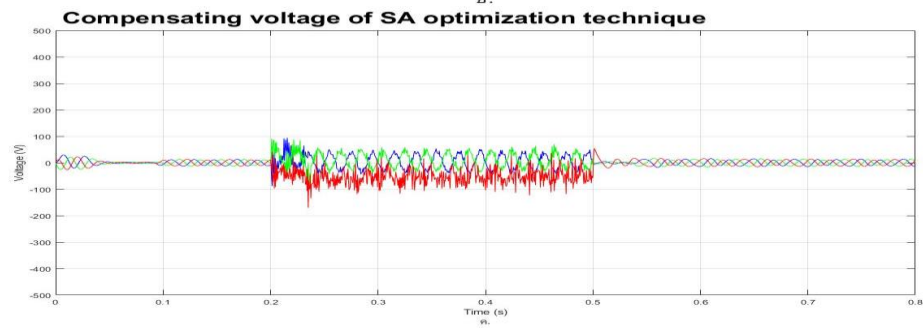
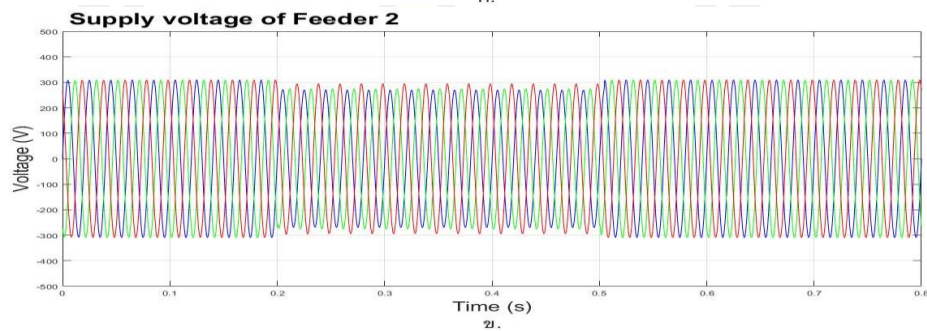
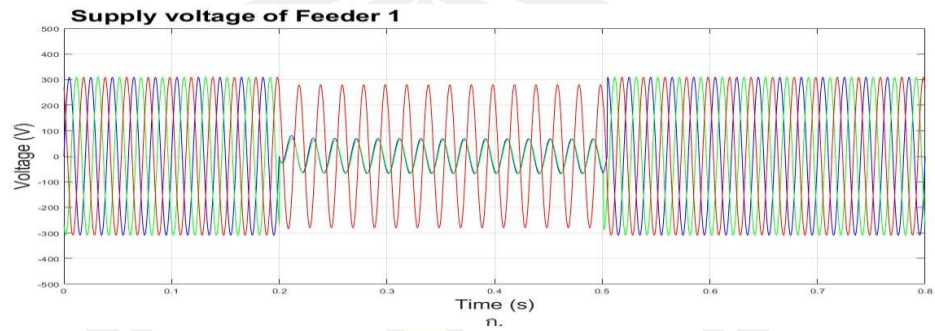
ค.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเบเนียนว (SA)

ง.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

และ จ.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

2) กรณีที่ 2 ความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส (Double Line to Ground Fault (DLG))

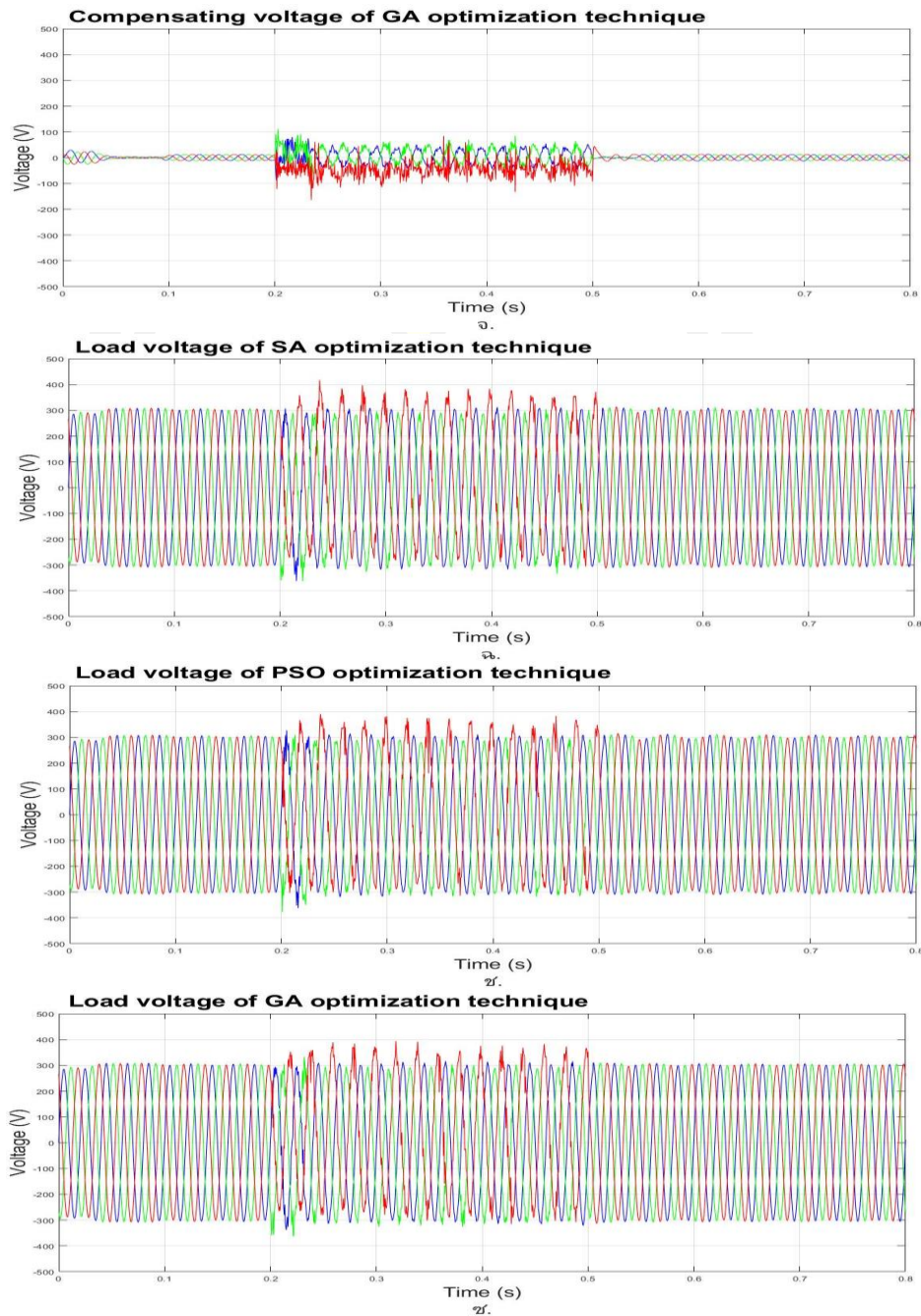
ภาพประกอบที่ 54 แสดงถึงผลการจำลองกรณีนี้ 2 เกิดความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟสของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 54 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส

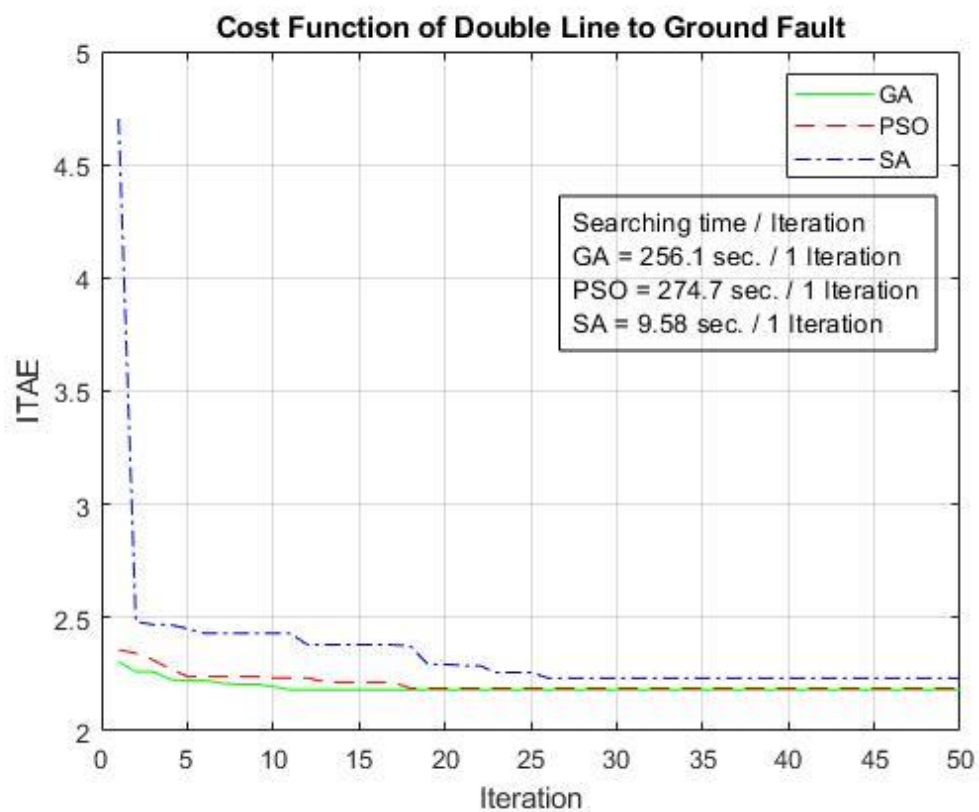
- ก. แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1 ข. แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2
- ค. แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม วิธีการจำลองอเบเหนียว (SA) และ
- ง. แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธี เคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)





ภาพประกอบ 54 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติของลงดินสองเฟส (ต่อ) จ.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ฉ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA) ช.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO) และ ซ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

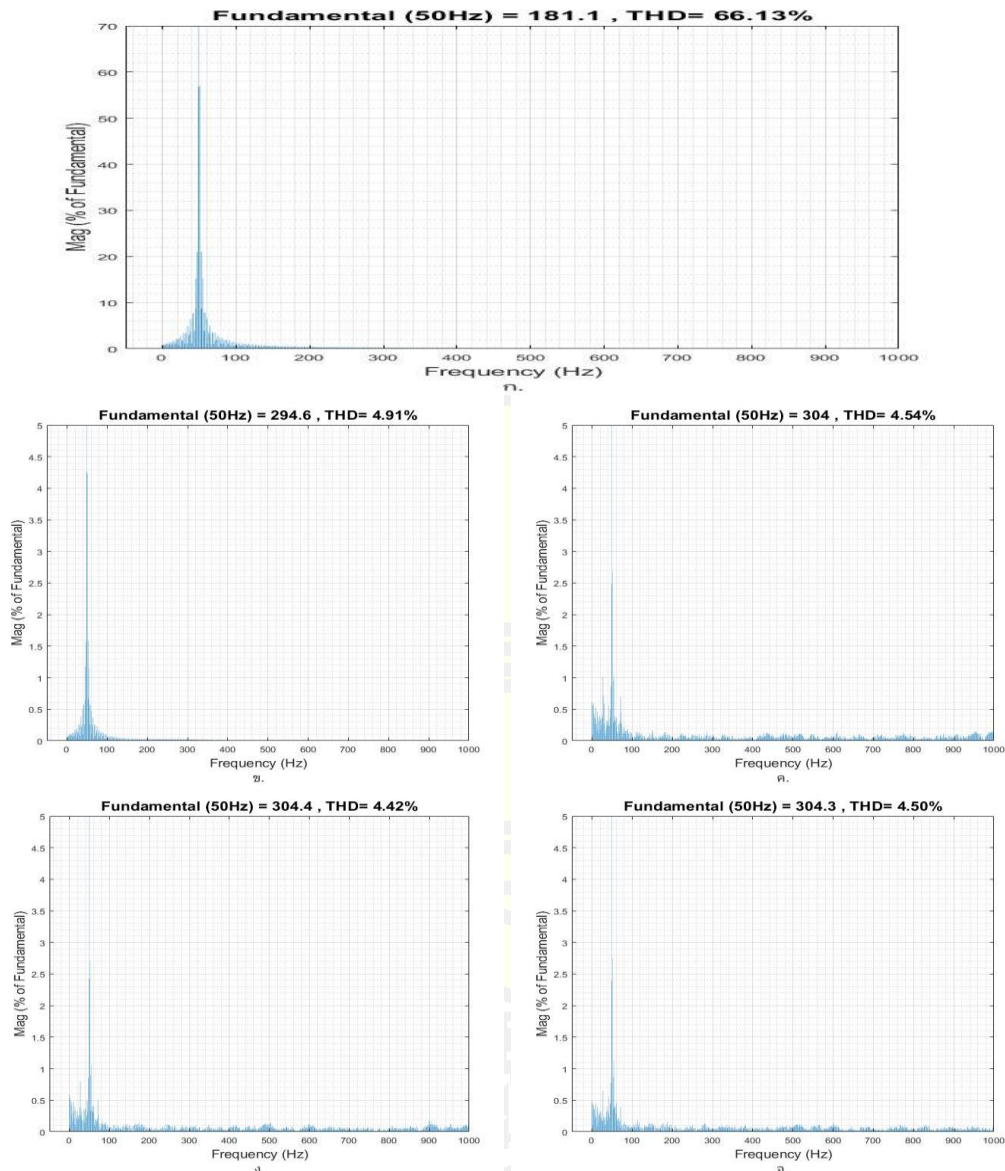
ภาพประกอบที่ 55 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 2 เกิดความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟสของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 55 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส

พหุบัณฑิต ชีวะ

ภาพประกอบที่ 56 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 2 เกิดความผิดพร่องลงดินสองเฟสของ เฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 56 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดพร่องลงดินสองเฟส

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1

ข.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2

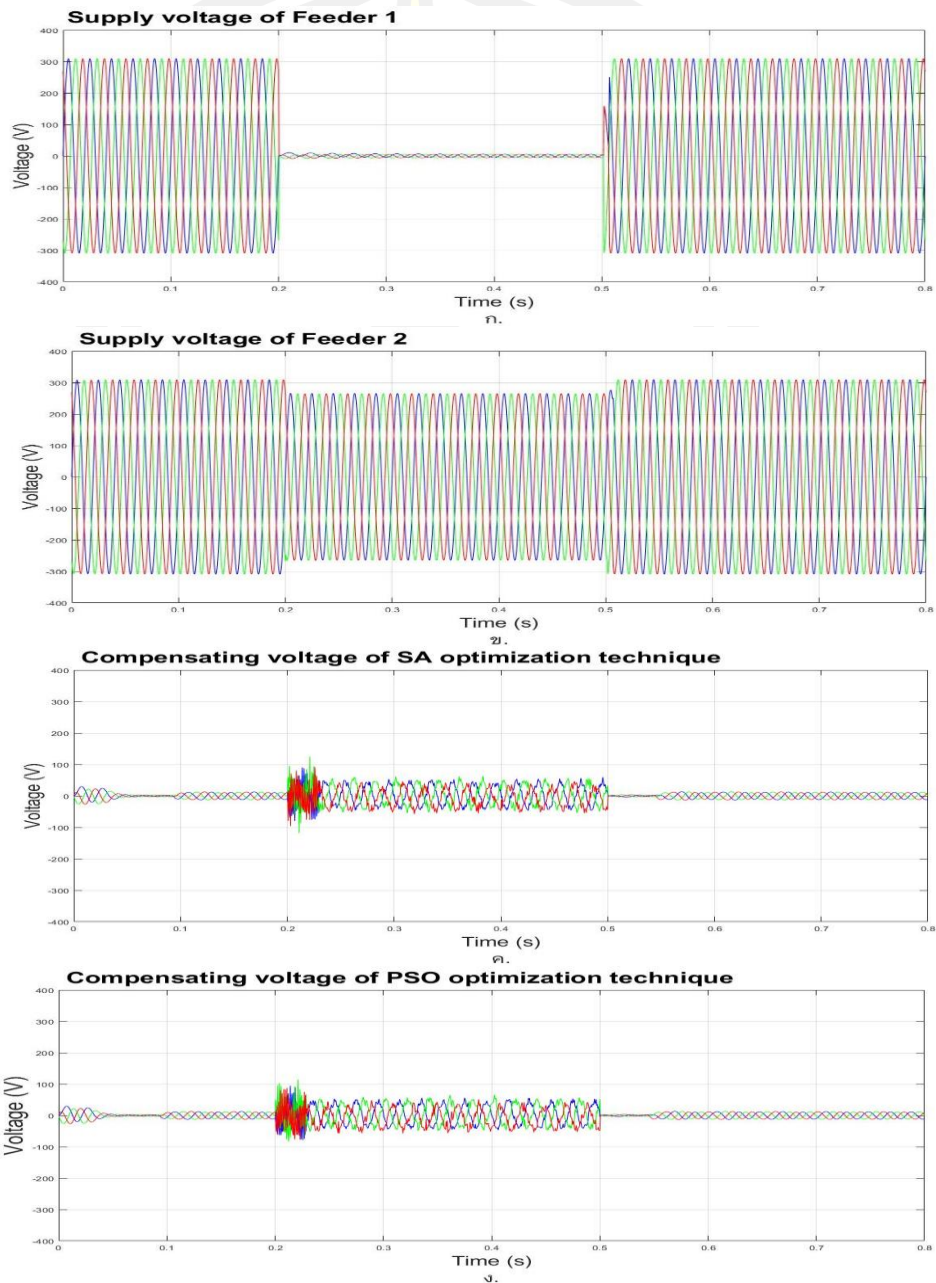
ค.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเบเนียนิว (SA)

ง.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

และ จ.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

### 3) กรณีที่ 3 ความผิดปกติพร้อมสามเฟส (Three Phase Fault)

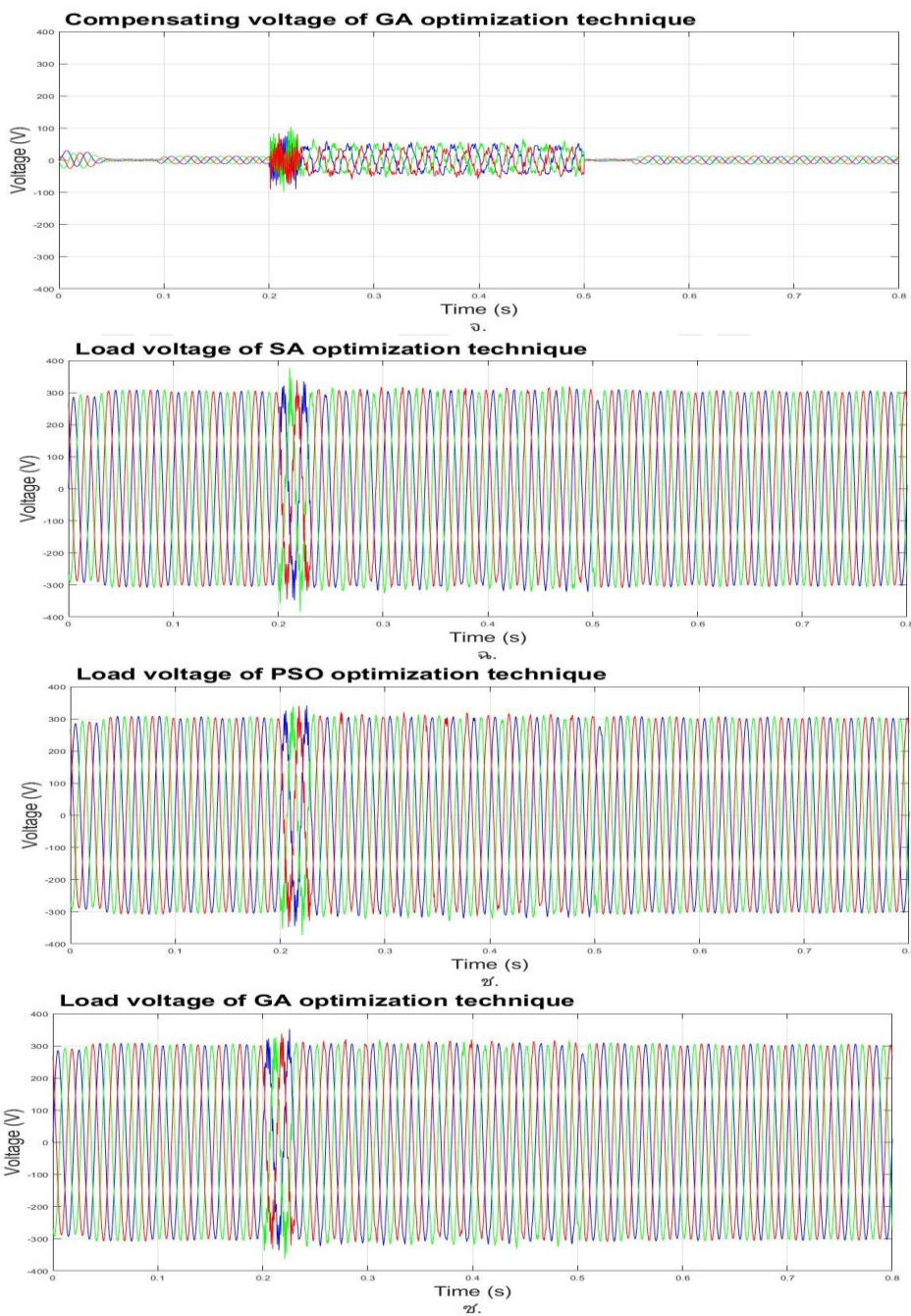
ภาพประกอบที่ 57 แสดงถึงผลการจำลองกรณีที่ 3 เกิดความผิดปกติพร้อมสามเฟสของเฟส A เฟส B และเฟส C บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 57 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส

- ก. แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1 ข. แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2
- ค. แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองออบเหนียว (SA) และ
- ง. แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)





ภาพประกอบ 57 ผลการจำลองกรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส (ต่อ)

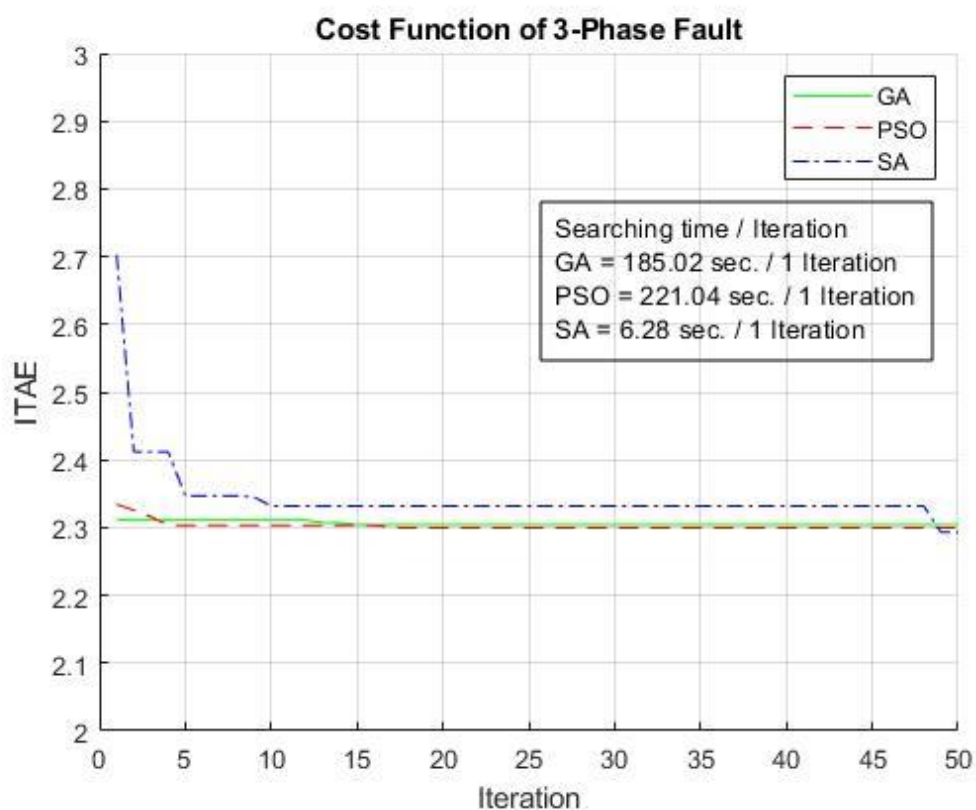
จ.แรงดันชดเชยของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

ฉ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอบเหนียว (SA)

ช.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

และ ซ.แรงดันโหลดของสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

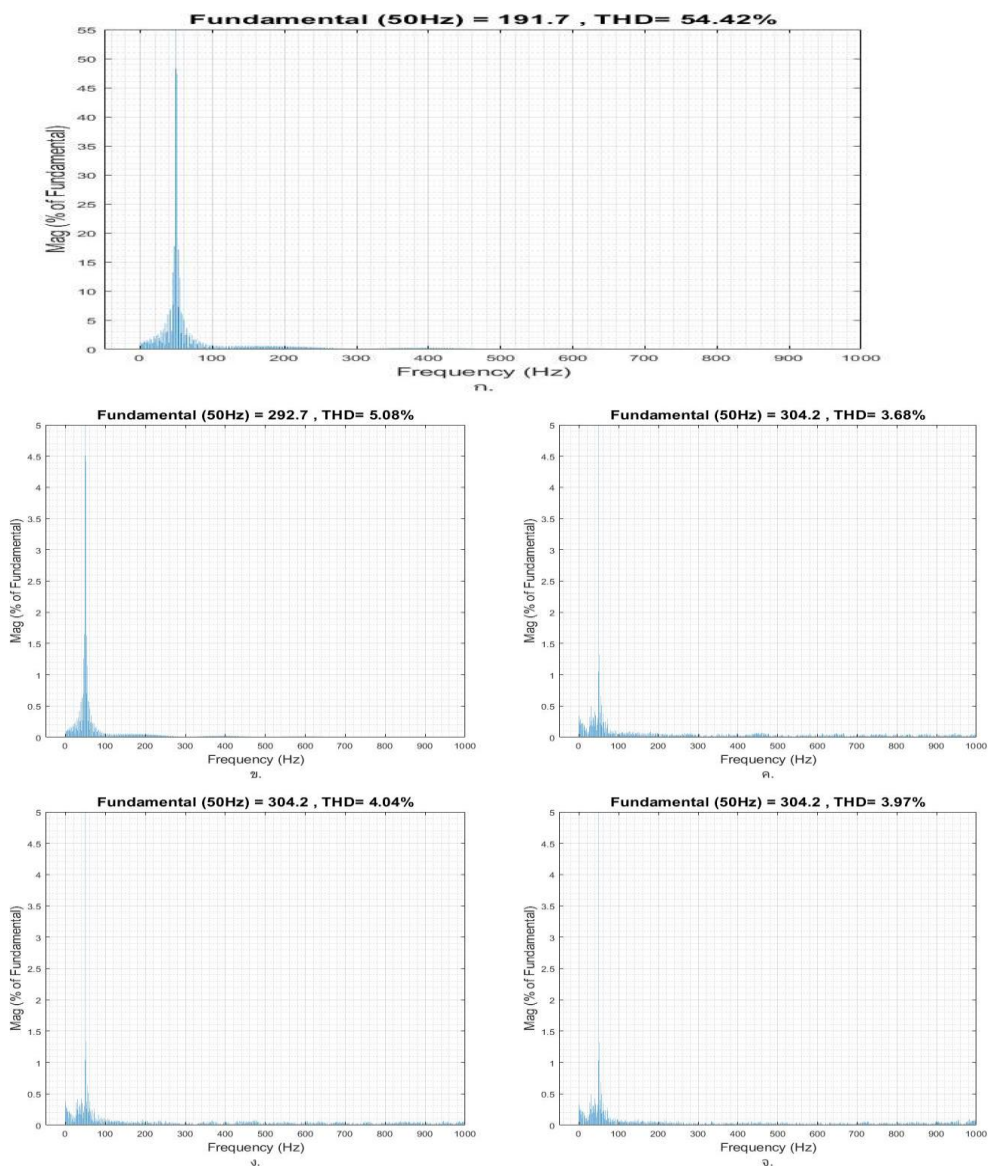
ภาพประกอบที่ 58 แสดงถึงการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ITAE กับ Iteration ของการจำลองกรณีที่ 3 เกิดความผิดปกติพร้อมเฟสของเฟส A เฟส B และเฟส C บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 58 กราฟแสดง Cost Function (ITAE) เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) ในกรณีของความผิดปกติพร้อมเฟส

พหุบัณฑิต ชีวะ

ภาพประกอบที่ 59 แสดงถึงผล THD ของการจำลองกรณีที่ 3 เกิดความผิดพร่องสามเฟสของเฟส A เฟส B และเฟส C บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2-0.5 (โหลด RL + มอเตอร์ที่สภาวะมีโหลด) โดยตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ 59 ผล THD ของการจำลองกรณีความผิดพร่องสามเฟส

ก.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 1

ข.ผล THD แรงดันด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2

ค.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการจำลองอเบเนียนิว (SA)

ง.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (PSO)

และ จ.ผล THD แรงดันด้านโหลด 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

#### 4.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลประสิทธิภาพของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม SA PSO และ GA

4.2.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion; THD)

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion; THD) ของแรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า และแรงดันโหลด 2 อยู่ในสภาวะปกติ หลังจากผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้าของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) จากตารางค่า %THD ของแรงดันโหลดแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมีค่า %THD ที่ลดลงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า %THD ของแรงดันแหล่งจ่าย

ตาราง 9 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion)

Case	THD values of Supply voltage of feeder 1 (%)	THD values of Supply voltage of feeder 2 (%)	THD values of load 2 voltage from each optimization (%)		
			SA	PSO	GA
Balanced Voltage Swell	-	11.57	3.38	3.37	3.47
Unbalanced Voltage Swell	-	10.32	3.17	3.23	3.13
Balanced Voltage Sag	-	15.69	3.53	3.68	3.60
Unbalanced Voltage Sag	-	13.54	4.31	4.15	4.37
Single Line to Ground Fault	51.57	3.65	4.85	4.76	4.65
Double Line to Ground Fault	66.13	4.91	4.52	4.42	4.50
Three Phase Fault	54.42	5.08	3.68	3.04	3.97
Average		9.25	3.92	3.94	3.96



ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion; THD) ควรมีค่า THD ไม่เกิน 8% เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ตารางที่ 10 แสดงขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [7]

ตาราง 10 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน ตามมาตรฐาน IEEE standard 519-201 [7]

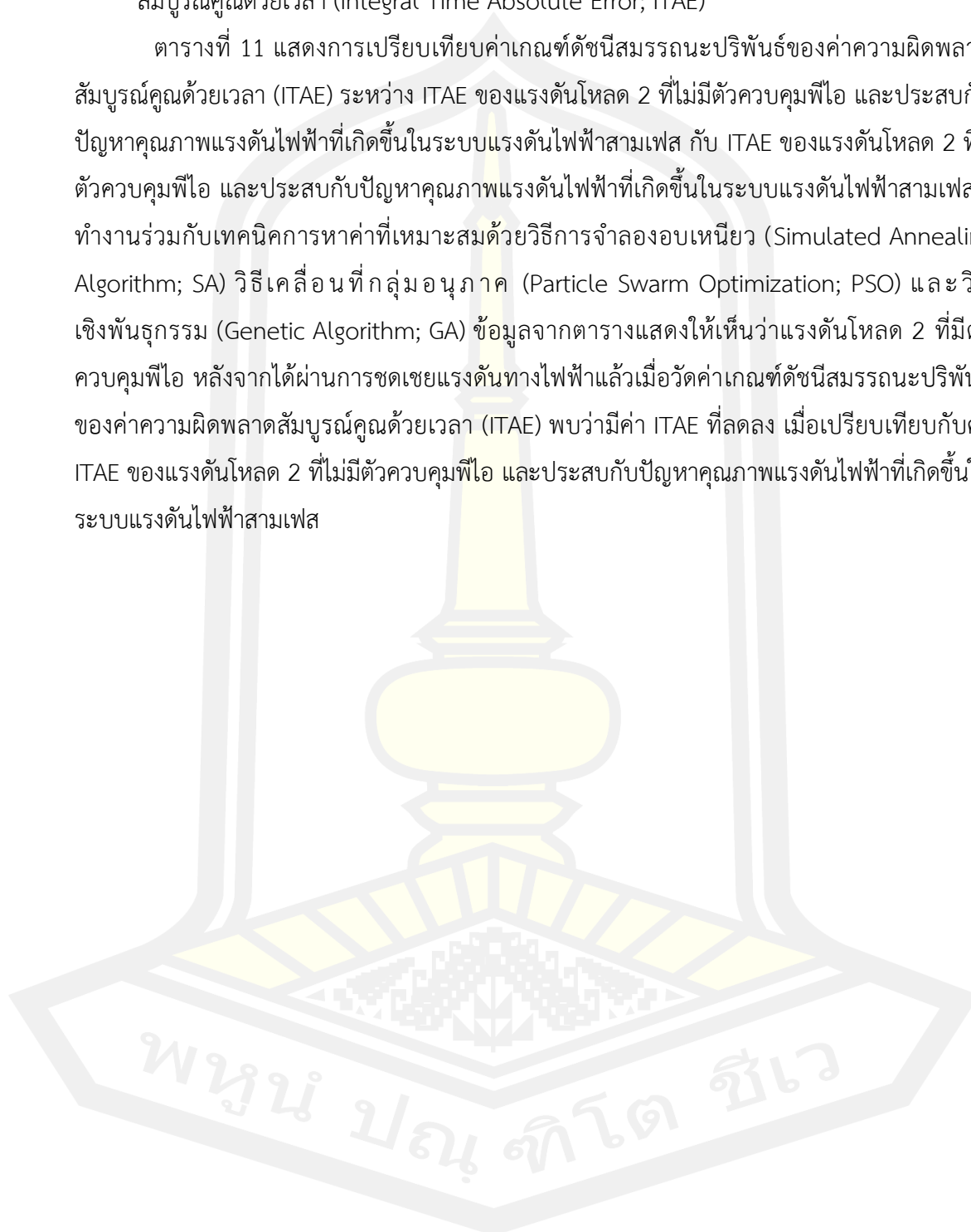
Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total Harmonic Distortion (THD) (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>High-Voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effect will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

จากผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (The Total Harmonic Distortion; THD) แสดงผลข้อมูลการจำลองดัง ตารางที่ 9 ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) สามารถลดค่าเฉลี่ย %THD ของแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อน 2 จาก 9.25% เหลือ %THD ของแรงดันโหลด 2 เท่ากับ 3.92% ลดลงมาคิดเป็น 57.62% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA สามารถลดค่า %THD ให้อยู่ในสถานะปกติไม่เกินมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [7] อีกทั้งยังสามารถลดค่า %THD ได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA ที่สามารถลดค่าเฉลี่ย %THD ของแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อน 2 จาก 9.25% เหลือ %THD ของแรงดันโหลด 2 เท่ากับ 3.94% และ 3.96% ลดลงมาคิดเป็น 57.41% และ 57.19% ตามลำดับ

#### 4.2.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE)

ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) ระหว่าง ITAE ของแรงดันโหลด 2 ที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอ และประสบกับปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส กับ ITAE ของแรงดันโหลด 2 ที่มีตัวควบคุมพีไอ และประสบกับปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ข้อมูลจากตารางแสดงให้เห็นว่าแรงดันโหลด 2 ที่มีตัวควบคุมพีไอ หลังจากได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้าแล้วเมื่อวัดค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) พบว่ามีค่า ITAE ที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ITAE ของแรงดันโหลด 2 ที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอ และประสบกับปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส



ตาราง 11 เปรียบเทียบค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา

Case	ITAE values of load 2 voltage without PI controller	ITAE values of load 2 voltage from each optimization technique		
		SA	PSO	GA
Balanced Voltage Swell	10.06	2.19	2.17	2.17
Unbalanced Voltage Swell	8.78	2.22	2.20	2.20
Balanced Voltage Sag	10.09	2.41	2.40	2.42
Unbalanced Voltage Sag	9.03	2.30	2.26	2.27
Single Line to Ground Fault	3.76	2.82	2.92	2.93
Double Line to Ground Fault	4.31	2.23	2.19	2.18
Three Phase Fault	4.58	2.29	2.30	2.30
Average	7.23	2.35	2.35	2.36

หมายเหตุ : จำนวนรอบการค้นหาค่าที่เหมาะสมของทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เท่ากับ 50 รอบ

จากผลการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) แสดงผลข้อมูลการจำลองดัง ตารางที่ 11 ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) สามารถลดค่าเฉลี่ย ITAE ของแรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 เฉลี่ยเท่ากับ 2.35 เมื่อเปรียบเทียบกับ ค่า ITAE ของแรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอ ที่มีค่าเฉลี่ย ITAE เท่ากับ 7.23 ลดลงมาคิดเป็น 67.5% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA สามารถลดค่า ITAE ได้ในจำนวนรอบการค้นหาค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 50 รอบ โดยทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมีค่า ITAE เฉลี่ยเท่ากับ 2.35

#### 4.2.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller)

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรควบคุม คือ จำนวนประชากร เท่ากับ 30 และจำนวนรอบในการค้นหา เท่ากับ 50 และใช้ค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) และเวลาในการค้นหาเป็นเกณฑ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ กรณีการจำลองแบ่งออกเป็น 7 กรณี ดังนี้

##### 1) กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell)

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีแรงดันเกินแบบสมดุล จากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ PSO GA และ SA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA

ตาราง 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันเกินแบบสมดุล

Controller Type	PI		
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.1934	2.1738	2.1740
Total Searching Time (sec)	1762	27448	33075
Searching Time / 1 Iteration (sec)	35.24	548.96	661.5
Kp	9.48	10	9.227
Ki	9.965	5.6412	9.618
Kd	0	0	0



## 2) กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell)

ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุลจากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสะสมบูรณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ PSO GA และ SA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA

ตาราง 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล

Controller Type	PI		
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.2189	2.1973	2.2037
Total Searching Time (sec)	534	12978	14061
Searching Time / 1 Iteration (sec)	10.68	259.56	281.22
Kp	9.931	10	9.478
Ki	9.83	6.125	2.976
Kd	0	0	0

### 3) กรณีแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag)

ตารางที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีแรงดันตกแบบสมดุลจากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ PSO SA และ GA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA

ตาราง 14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันตกแบบสมดุล

Controller Type	PI		
	SA	PSO	GA
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.4093	2.4017	2.4198
Total Searching time (sec)	531	12993	13885
Searching Time / 1 Iteration (sec)	10.62	259.86	277.7
Kp	9.646	9.0754	9.108
Ki	9.488	8.7513	0.887
Kd	0	0	0

#### 4) กรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag)

ตารางที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล จากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสะสมคูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ PSO GA และ SA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA

ตาราง 15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล

Controller Type	PI		
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.2998	2.2568	2.2713
Total Searching Time (sec)	519	12690	13923
Searching Time / 1 Iteration (sec)	10.38	253.8	278.46
Kp	9.759	9.4274	9.427
Ki	9.947	4.6069	5.845
Kd	0	0	0



### 5) กรณีความผิดปกติของลงดินเฟสเดียว (Single Line to Ground Fault (SLG))

ตารางที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีเกิดความผิดปกติของลงดินเฟสเดียว (Single Line to Ground Fault (SLG)) ของเฟส A บนสายป้อนที่ 1 จากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA

ตาราง 16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีเกิดความผิดปกติของลงดินเฟสเดียว

Controller Type	PI		
	SA	PSO	GA
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.8161	2.9239	2.9321
Total Searching Time (sec)	571	14189	16486
Searching Time / 1 Iteration (sec)	11.42	283.78	329.72
Kp	6.48	3.4763	1.764
Ki	2.673	0.1195	2.872
Kd	0	0	0

## 6) กรณีความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส (Double Line to Ground Fault (DLG))

ตารางที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีเกิดความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟสของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 จากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสะสมคูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ GA PSO และ SA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA GA และ PSO

ตาราง 17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส

Controller Type	PI		
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	Wmax = 0.9 Wmin = 0.2 C1 = 2 C2 = 2	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.2325	2.1876	2.1816
Total Searching Time (sec)	479	13735	12805
Searching Time / 1 Iteration (sec)	9.58	274.7	256.1
Kp	0.46	0.58839	0.568
Ki	0.501	0.913531	1.342
Kd	0	0	0

## 7) กรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส (Three Phase Fault)

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในกรณีเกิดความผิดปกติพร้อมสามเฟสของเฟส A เฟส B และเฟส C บนสายป้อนที่ 1 จากข้อมูลดังตารางสามารถเรียงค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) ของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA PSO และ GA และสามารถเรียงค่าเวลาในการค้นหาของแต่ละเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมจากน้อยไปมากตามลำดับ คือ SA GA และ PSO

ตาราง 18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอในกรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส

Controller Type	PI		
Optimization Techniques	SA	PSO	GA
No. of Iterations	50	50	50
No. of Population	30	30	30
Control Parameters	- Annealing function เป็น Fast annealing - Temperature update function เป็น Exponential temperature update	$W_{max} = 0.9$ $W_{min} = 0.2$ $C1 = 2$ $C2 = 2$	- Creation Function ของ Population เป็น Uniform - Selection Function เป็น Tournament - Mutation Function เป็น Adaptive Feasible - Crossovers Function เป็น Arithmetic
ITAE	2.2929	2.2997	2.3038
Total Searching Time (sec)	314	10552	9251
Searching Time / 1 Iteration (sec)	6.28	211.04	185.02
Kp	4.44	4.6531	5.03
Ki	6.393	2.6083	2.77
Kd	0	0	0

การเปรียบเทียบและอภิปรายประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) แสดงดังตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 18 ในกรณีการเกิดแรงดันเกินแบบสมดุล แรงดันเกินแบบไม่สมดุล แรงดันตกแบบสมดุล แรงดันตกแบบไม่สมดุล ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส ความผิดพลาดสามเฟส จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 19 แสดงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสม และสามารถกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ใช้เวลา Total Searching Time เฉลี่ยเท่ากับ 672.86 วินาที มีความรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA ที่มี Total Searching Time เฉลี่ยเท่ากับ 14940.71 วินาที และ 16212.29 วินาที ซึ่งรวดเร็วกว่า 22 เท่า และ 24 เท่า ตามลำดับ ที่จำนวนรอบการค้นหาของทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เท่ากับ 50 รอบ และค่า ITAE เฉลี่ยทั้ง 7 กรณี ประมาณ 2.35

ตาราง 19 เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสม

Case	The total searching time to reach the average ITAE is approximately 2.35 at 50 iterations (sec)		
	SA	PSO	GA
Balanced Voltage Swell	1762	27448	33075
Unbalanced Voltage Swell	534	12978	14061
Balanced Voltage Sag	531	12993	13885
Unbalanced Voltage Sag	519	12690	13923
Single Line to Ground Fault	571	14189	16486
Double Line to Ground Fault	479	13735	12805
Three Phase Fault	314	10552	9251
Average	672.86	14940.71	16212.29

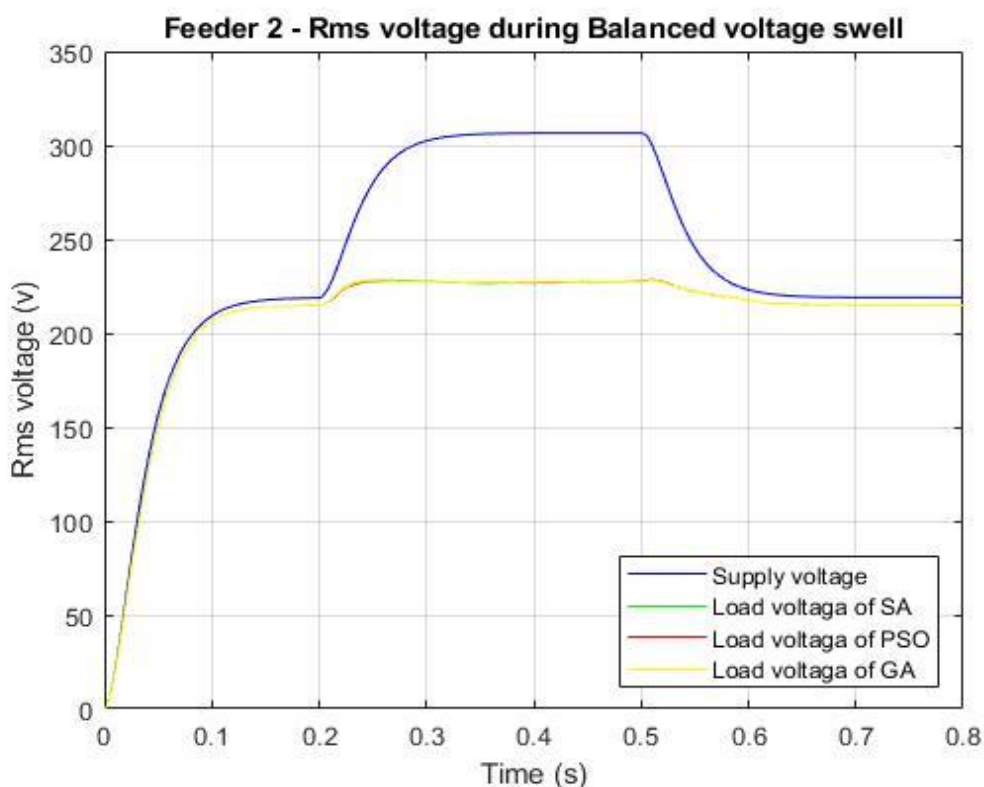
หมายเหตุ : จำนวนรอบการค้นหาของทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เท่ากับ 50 รอบ

#### 4.2.4 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายค่าแรงดัน RMS (Vrms)

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS จะทำการเปรียบเทียบระหว่าง Vrms ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า กรณีการจำลองแบ่งออกเป็น 7 กรณี ดังนี้

##### 1) กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล (Balanced Voltage Swell)

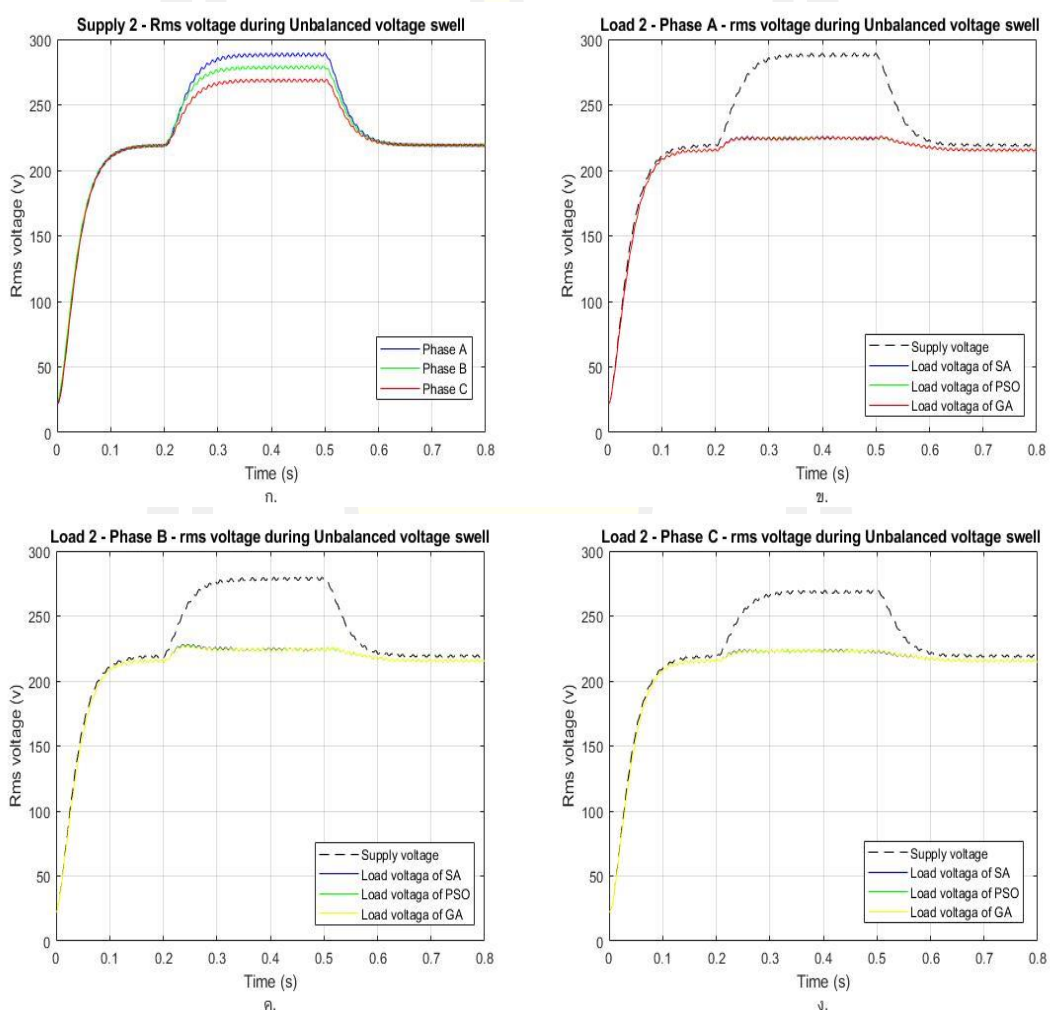
ภาพประกอบที่ 60 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 60 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันเกินแบบสมดุล

## 2) กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Swell)

ภาพประกอบที่ 61 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 61 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันเกินแบบไม่สมดุล

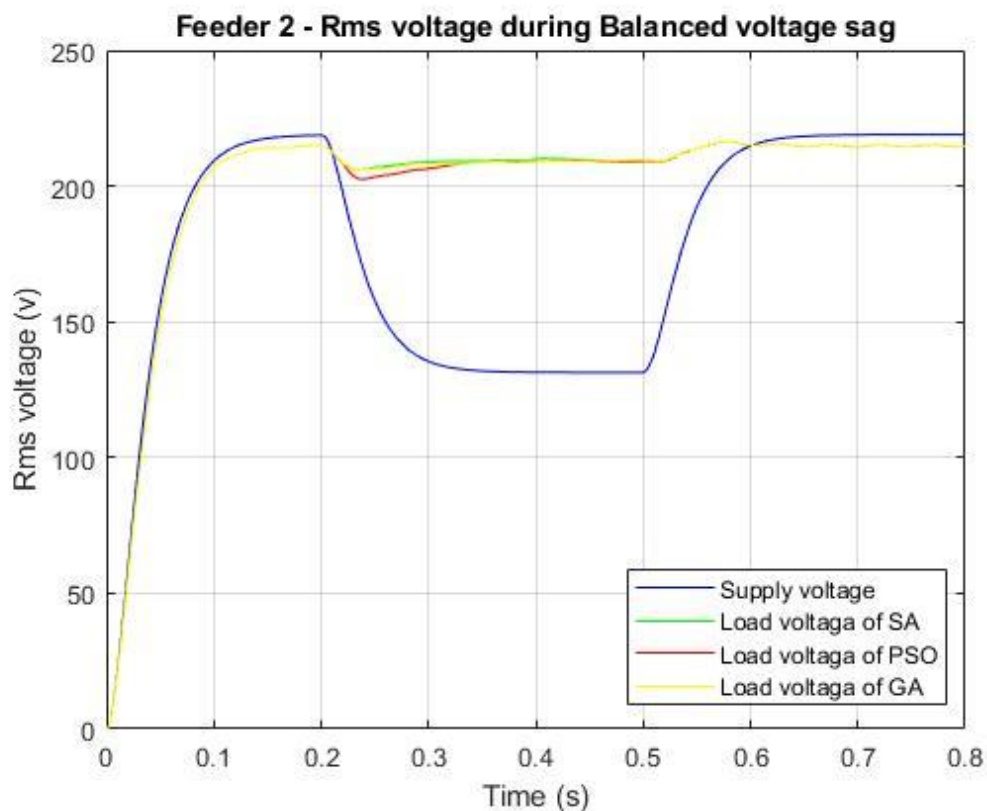
ก.แรงดัน RMS ด้านแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2

ข.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส A ค.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส B

และ ง.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส C

### 3) กรณีแรงดันตกแบบสมดุล (Balanced Voltage Sag)

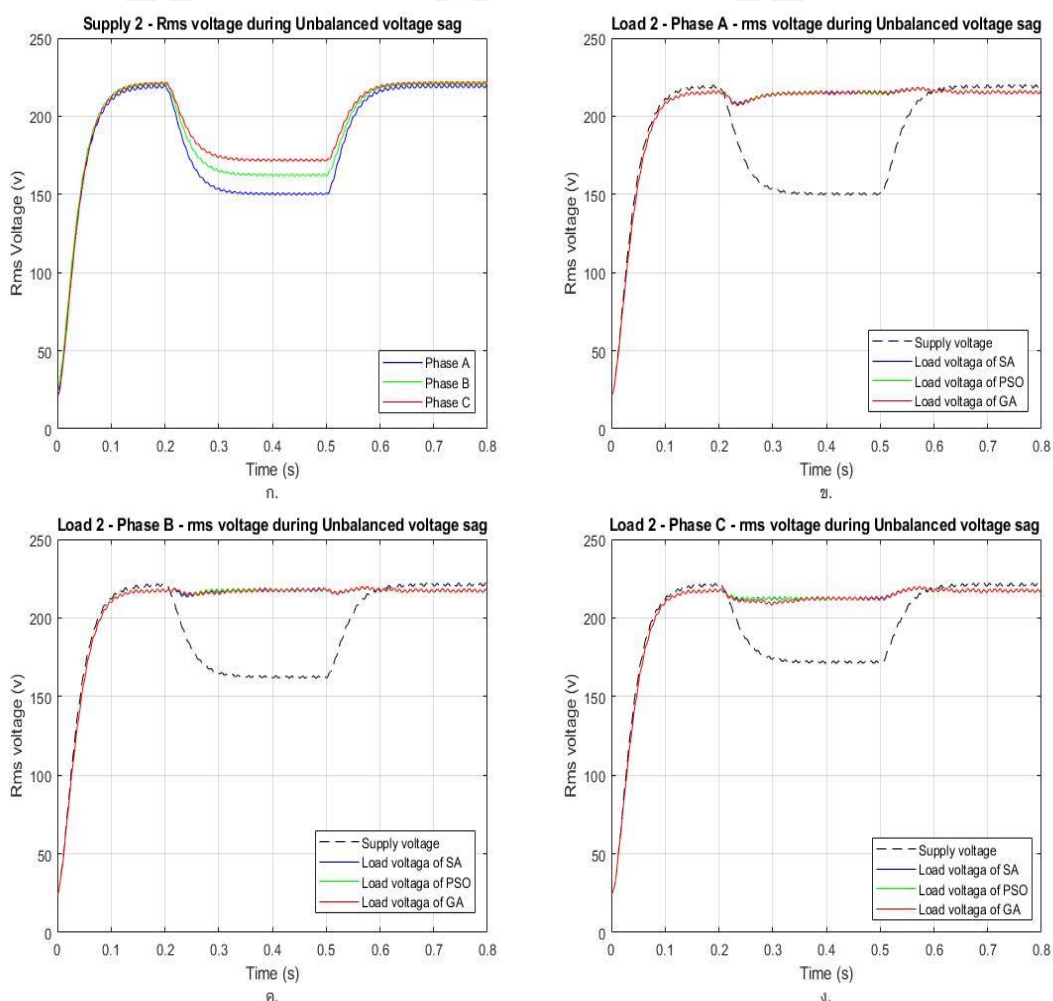
ภาพประกอบที่ 62 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีแรงดันตกแบบสมดุล ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 62 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันตกแบบสมดุล

#### 4) กรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล (Unbalanced Voltage Sag)

ภาพประกอบที่ 63 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 63 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีแรงดันตกแบบไม่สมดุล

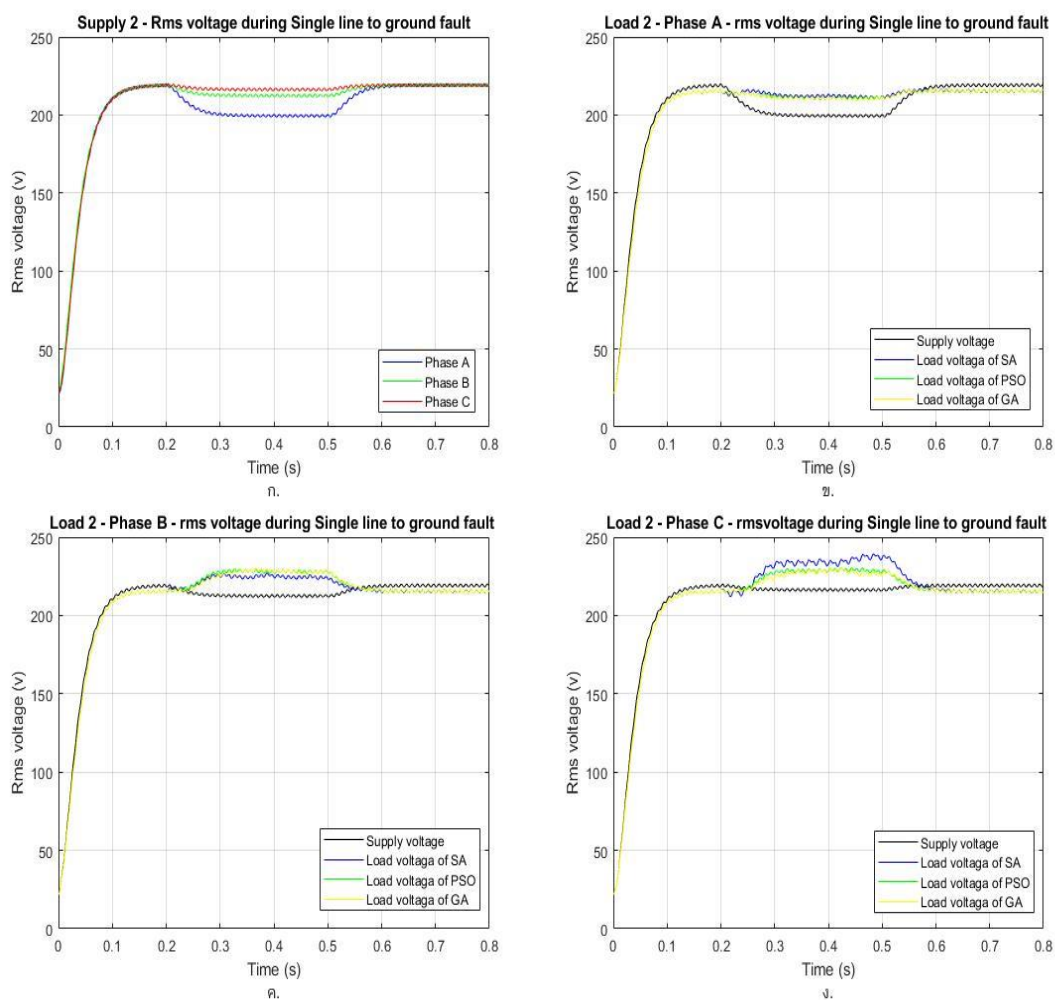
ก.แรงดัน RMS ด้านแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ข.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส A

ค.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส B และ ง.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส C



5) กรณีความผิดปกติพร้อมลงดินเฟสเดียวของเฟส A (Single Line to Ground Fault (SLG) of Phase A)

ภาพประกอบที่ 64 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมลงดินเฟสเดียว (Single line to ground fault (SLG)) ที่เฟส A บนสายป้อนที่ 1 ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



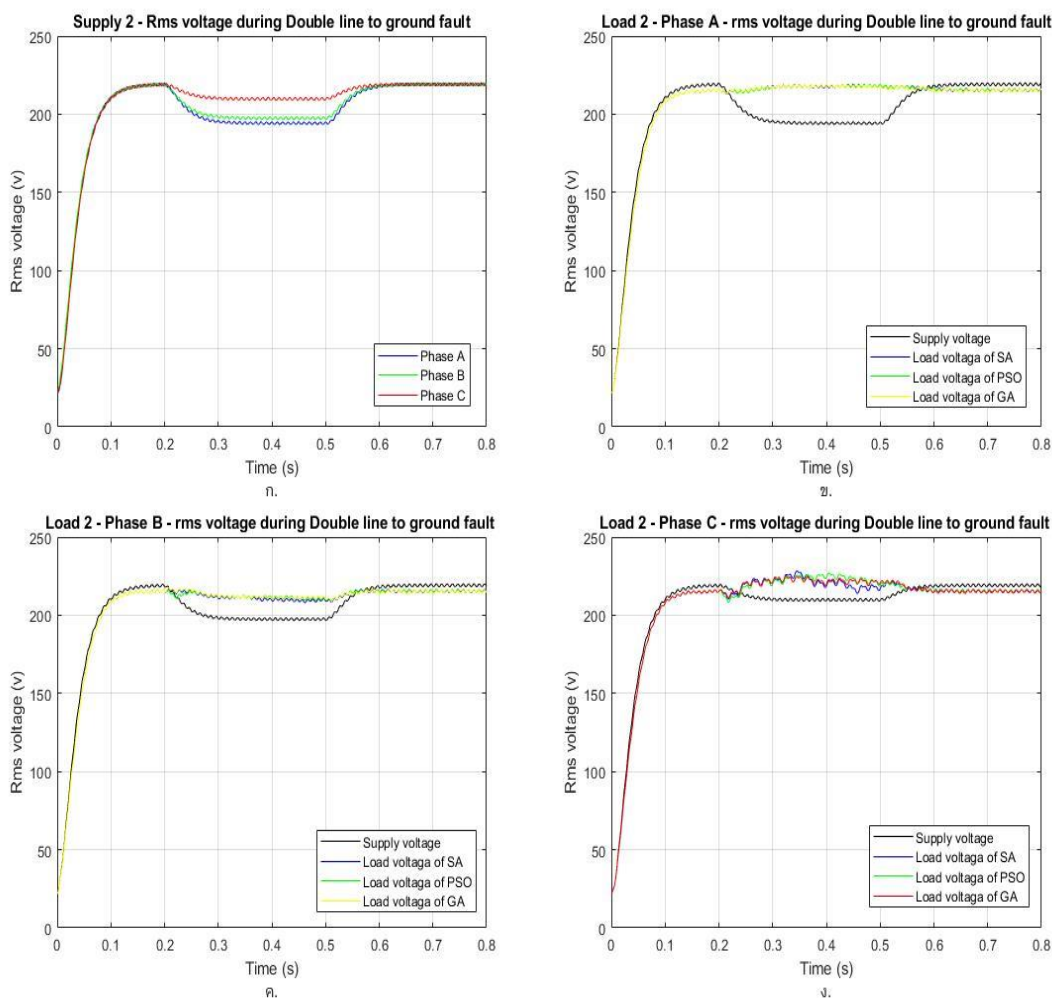
ภาพประกอบ 64 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดปกติพร้อมลงดินเฟสเดียว

ก.แรงดัน RMS ด้านแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ข.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส A

ค.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส B และ ง.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส C

6) กรณีความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟสของเฟส A และ B (Double Line to Ground Fault (DLG) of Phase A and B)

ภาพประกอบที่ 65 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟสของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



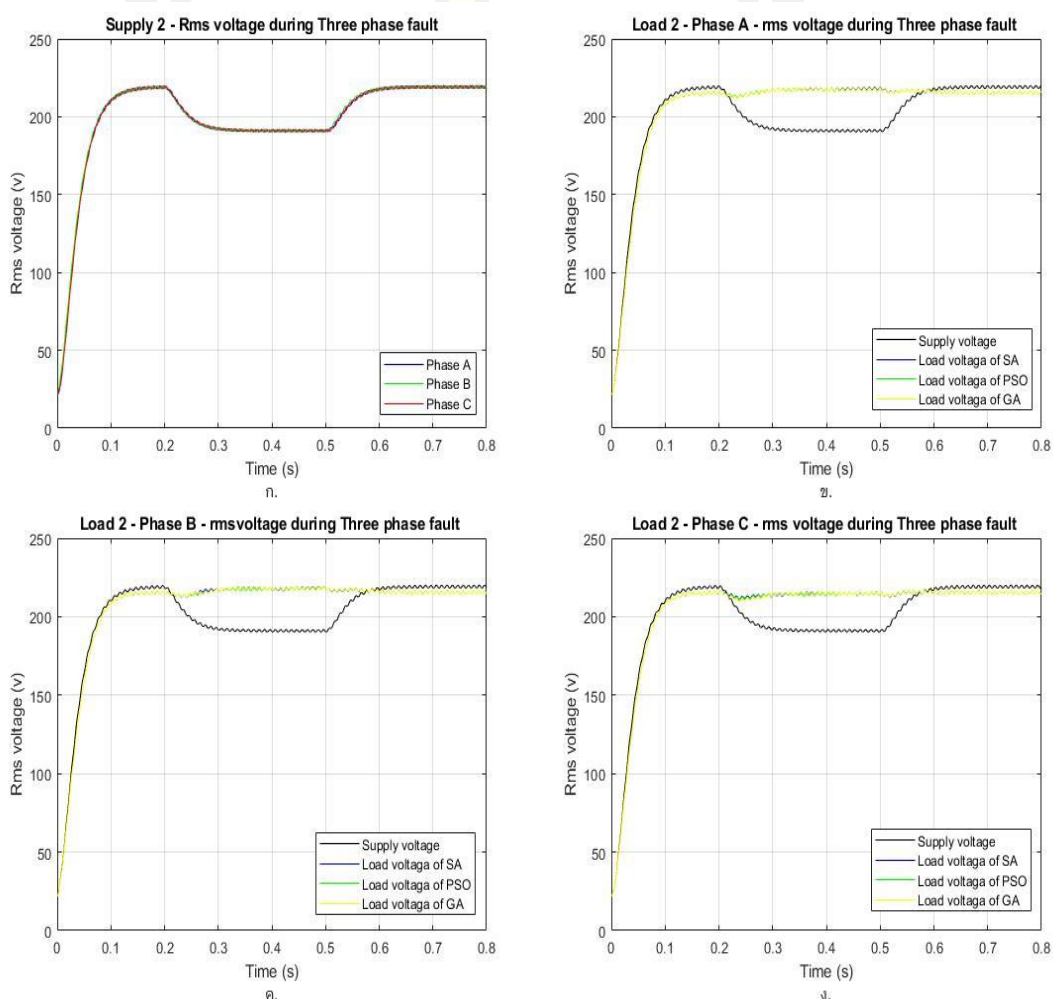
ภาพประกอบ 65 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดปกติพร้อมลงดินสองเฟส

ก.แรงดัน RMS ด้านแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ข.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส A

ค.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส B และ ง.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส C

### 7) กรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส (Three Phase Fault)

ภาพประกอบที่ 66 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมสามเฟสของเฟส A เฟส B และเฟส C บนสายป้อนที่ 1 ของแรงดันโหลดสายป้อนที่ 2 ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 66 กราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS กรณีความผิดปกติพร้อมสามเฟส

ก.แรงดัน RMS ด้านแหล่งจ่ายสายป้อนที่ 2 ข.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส A

ค.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส B และ ง.แรงดัน RMS ของโหลดสายป้อนที่ 2 เฟส C

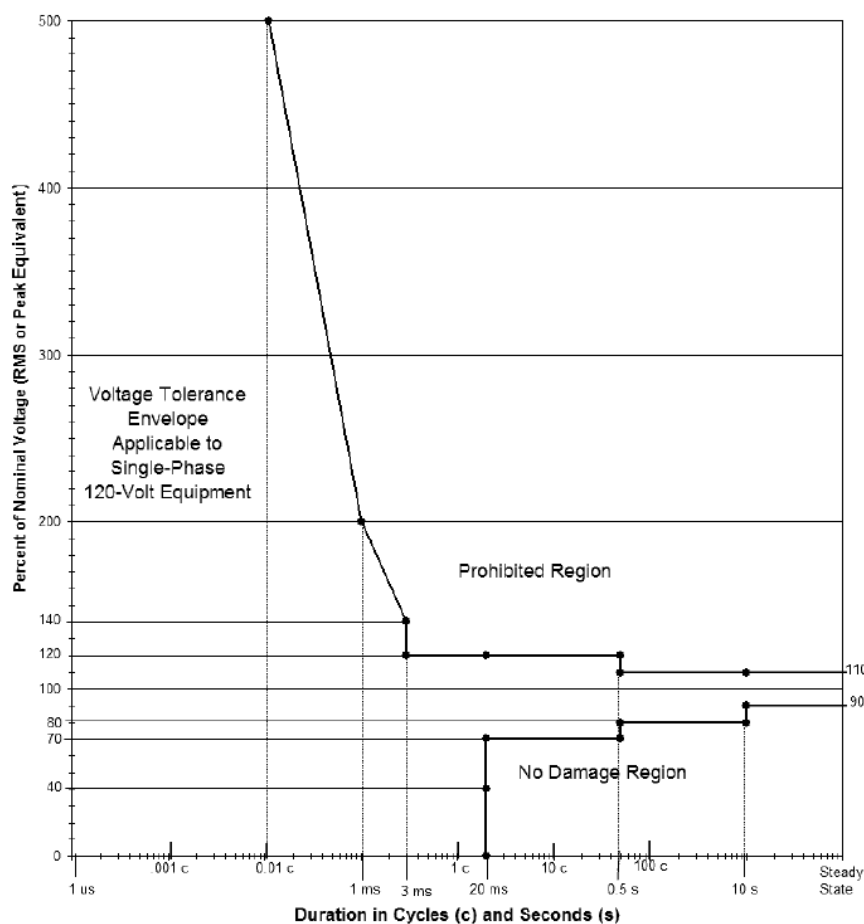
ภาพประกอบที่ 60 ถึง ภาพประกอบที่ 66 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าแรงดัน RMS (Vrms) ของแรงดันโหนดของสายป้อนที่ 2 ในกรณีการเกิดแรงดันเกินแบบสมดุล แรงดันเกินแบบไม่สมดุล แรงดันตกแบบสมดุล แรงดันตกแบบไม่สมดุล ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส และความผิดพลาดสามเฟส เปรียบเทียบกับแรงดันแหล่งจ่ายของสายป้อนที่ 2 ที่มีปัญหา คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ยังไม่ได้ผ่านการชดเชยแรงดันทางไฟฟ้า สามารถแสดงผลข้อมูลค่าแรงดัน RMS (Vrms) ดังตารางที่ 20

ตาราง 20 ค่าแรงดัน RMS (Vrms)

Case	Vrms values of supply 2 (Volt)		Vrms values of load 2 from each optimization technique (Volt)		
			SA	PSO	GA
Balanced Voltage Swell	306.5		226.70	227.10	227.20
Unbalanced Voltage Swell	Phase A	130.68	225.30	225.50	224.90
	Phase B	126.95	223.30	225.00	225.10
	Phase C	122.32	224.00	224.00	224.00
Balanced Voltage Sag	131.4		209.30	208.90	208.70
Unbalanced Voltage Sag	Phase A	150.2	215.80	214.20	213.70
	Phase B	163.3	218.20	218.60	216.90
	Phase C	172.5	212.80	212.20	211.90
Single Line to Ground Fault	Phase A	200	213.00	211.60	210.00
	Phase B	212.2	224.40	227.20	226.80
	Phase C	217.2	232.80	229.70	227.20
Double Line to Ground Fault	Phase A	194.5	218.50	217.90	218.60
	Phase B	196.8	211.10	211.20	211.40
	Phase C	210.6	222.80	226.00	222.00
Three Phase Fault	Phase A	190.5	218.70	217.00	218.10
	Phase B	190.5	218.8	217.5	217.5
	Phase C	190.5	214.3	215.4	215.4
Average			219.13	219.10	218.63

หมายเหตุ : พิกัดแรงดัน Vrms เท่ากับ 220 โวลต์

ภาพประกอบที่ 67 กราฟ ITIC Curves (Information Technology Industry Council; ITIC) เป็นกราฟมาตรฐานจากองค์กรทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เพื่อกำหนดค่าขีดจำกัดความทนได้ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งกราฟ ITIC Curves พัฒนามาจากกราฟ CBEMA (Computer & Business Equipment Manufacturer's Association) เพื่อให้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์เทคโนโลยีทางไฟฟ้าสมัยใหม่มากขึ้น รวมทั้งสามารถประเมินขีดจำกัดของอุปกรณ์ได้ทั้งกรณีแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) และแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หรือแม้กระทั่งแรงดันเกินในสภาวะชั่วคราว (Transient) อุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ITIC Curves จะต้องสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในย่าน Voltage-Tolerance Envelope ได้โดยไม่เกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดหรือต้องปลดตัวเองออกจากวงจร [8]



ภาพประกอบ 67 กราฟ ITIC Curves [8]

ดังนั้นจากผลข้อมูลค่าแรงดัน RMS (Vrms) สามารถกล่าวได้ว่า อุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) สามารถชดเชย ปรับปรุง และแก้ไขปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า ให้ค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) เท่ากับ 219.13 โวลต์ คิดเป็น 99.61% จากค่าพิกัดแรงดัน Vrms เท่ากับ 220 โวลต์ อีกทั้งยังสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ได้ดีกว่าอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA ที่มีค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) เท่ากับ 219.10 โวลต์ และ 218.63 โวลต์ คิดเป็น 99.59% และ 99.38% ตามลำดับ

ซึ่งอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA PSO และ GA สามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ผ่านมาตรฐาน ITIC Curves และสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในย่าน Voltage-Tolerance Envelop ได้โดยไม่เกิดการ ทำงานที่ผิดพลาดหรือต้องปลดตัวเองออกจากวงจร

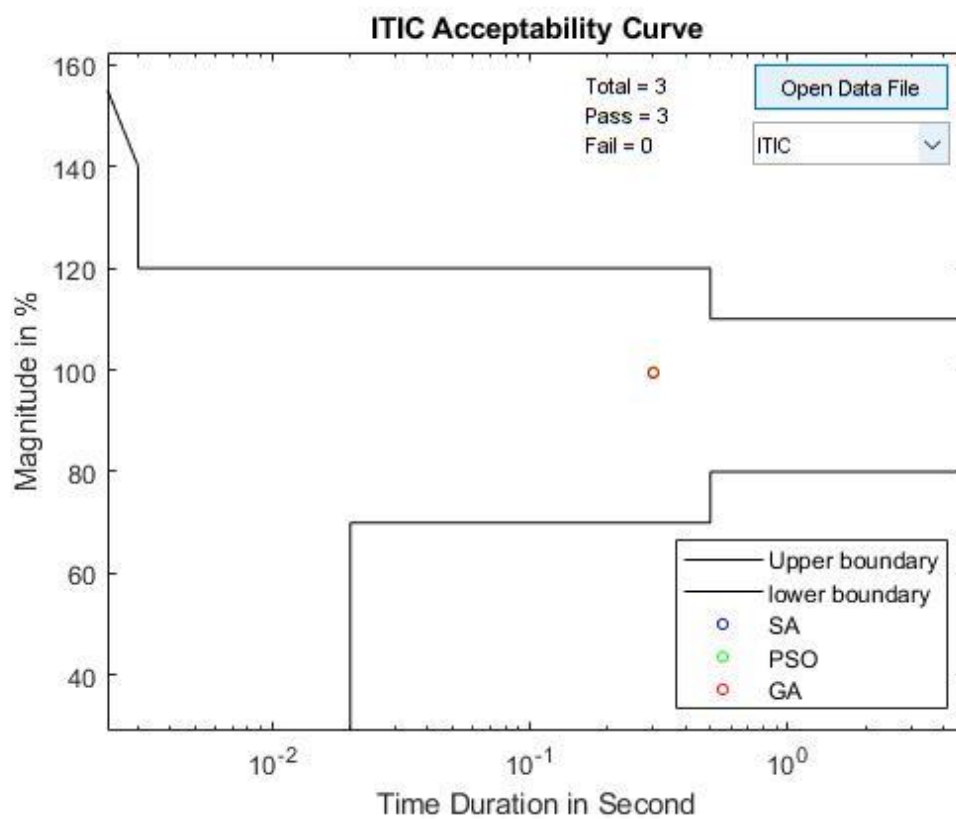
ภาพประกอบที่ 68 แสดงกราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA PSO และ GA ตามมาตรฐาน ITIC Curves และตารางที่ 21 แสดงข้อมูลการพล็อตกราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตตามมาตรฐาน ITIC Curves

ตาราง 21 ข้อมูลการพล็อตกราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตตามมาตรฐาน ITIC Curves

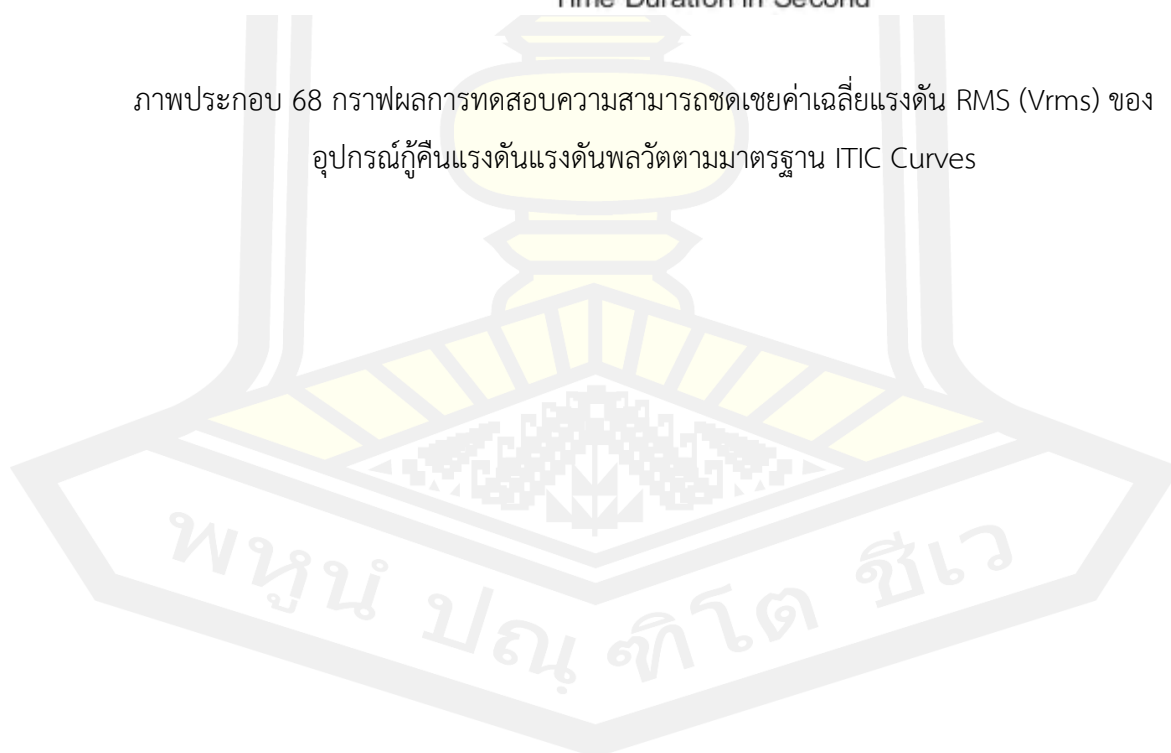
Optimization techniques	Magnitude (%)	Duration (sec)	ITIC Acceptability Curves
SA	99.61	0.3	Pass
PSO	99.59	0.3	Pass
GA	99.38	0.3	Pass

หมายเหตุ

1. อุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA PSO และ GA สามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) เท่ากับ 219.13 โวลต์ 219.10 โวลต์ และ 218.63 โวลต์ จากค่าพิกัดแรงดัน Vrms เท่ากับ 220 โวลต์ คิดเป็น 99.61% 99.59% และ 99.38% ตามลำดับ
2. การจำลองทั้ง 7 กรณี ได้แก่ แรงดันเกินแบบสมดุล แรงดันเกินแบบไม่สมดุล แรงดันตกแบบสมดุล แรงดันตกแบบไม่สมดุล ความผิดปกติของดินเฟสเดียว ความผิดปกติของดินสองเฟส และความผิดปกติของสามเฟส เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า ในช่วงวินาทีที่ 0.2-0.5 โดยมีระยะเวลาการเกิด 0.3 วินาที ทุกกรณี



ภาพประกอบ 68 กราฟผลการทดสอบความสามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) ของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตตามมาตรฐาน ITIC Curves





#### 4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [1]

##### 4.3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1]

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1] ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ในกรณีประสบกับปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส กับผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมตึกแตน (Grasshopper Optimization Algorithm; GOA) ในกรณีประสบกับปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส [1]

ตารางที่ 22 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1] และข้อมูลจากตารางสามารถกล่าวได้ว่า ผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ใช้เวลา Total Searching Time เฉลี่ยเท่ากับ 672.86 วินาที เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมตึกแตน (Grasshopper Optimization Algorithm; GOA) ใช้เวลา Total Searching Time เฉลี่ยเท่ากับ 110.48 วินาที ซึ่งมีความรวดเร็วมากกว่า 6 เท่า และ ผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ที่มีค่าเฉลี่ย ITAE เท่ากับ 2.35 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมตึกแตน (Grasshopper Optimization Algorithm; GOA) ที่มีค่าเฉลี่ย ITAE เท่ากับ 1.52 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย ITAE น้อยกว่า 1.5 เท่า



ตาราง 22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลการจำลองที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [1]

Optimal controller parameters of the PID using GOA technique [1]					
Case	PID controller			Computational time (sec)	ITAE
	Kp	Ki	Kd		
Balanced Voltage Swell	2.1433	1.8362	1.1854	81.011	1.67
Unbalanced Voltage Swell	4.261	0.3357	1.1401	86.282	1.69
Balanced Voltage Sag	3.2394	1.9280	0.1662	83.474	1.62
Unbalanced Voltage Sag	3.4344	0.2640	1.9765	80.846	1.49
Single Line to Ground Fault	3.9573	1.1788	0.5753	83.120	1.52
Double Line to Ground Fault	4.9931	0.4528	0.0704	205.134	1.34
Three Phase Fault	1.3909	1.6157	1.3959	153.505	1.31
Average				110.48	1.52

Optimal controller parameters of the PI using SA technique [Proposed]					
Case	PI controller			Computational time (sec)	ITAE
	Kp	Ki	Kd		
Balanced Voltage Swell	9.48	9.965	0	1762	2.1934
Unbalanced Voltage Swell	9.931	9.83	0	534	2.2189
Balanced Voltage Sag	9.646	9.488	0	531	2.4093
Unbalanced Voltage Sag	9.759	9.947	0	519	2.2998
Single Line to Ground Fault	6.480	2.673	0	571	2.8161
Double Line to Ground Fault	0.46	0.501	0	479	2.2325
Three Phase Fault	4.44	6.393	0	314	2.2929
Average				672.86	2.35

\*หมายเหตุ

Ref. [1]

No. of Iterations = 300 and No. of Population = 50

Grasshopper Optimization Algorithm = GOA

ไม่มีข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับสเปคของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย

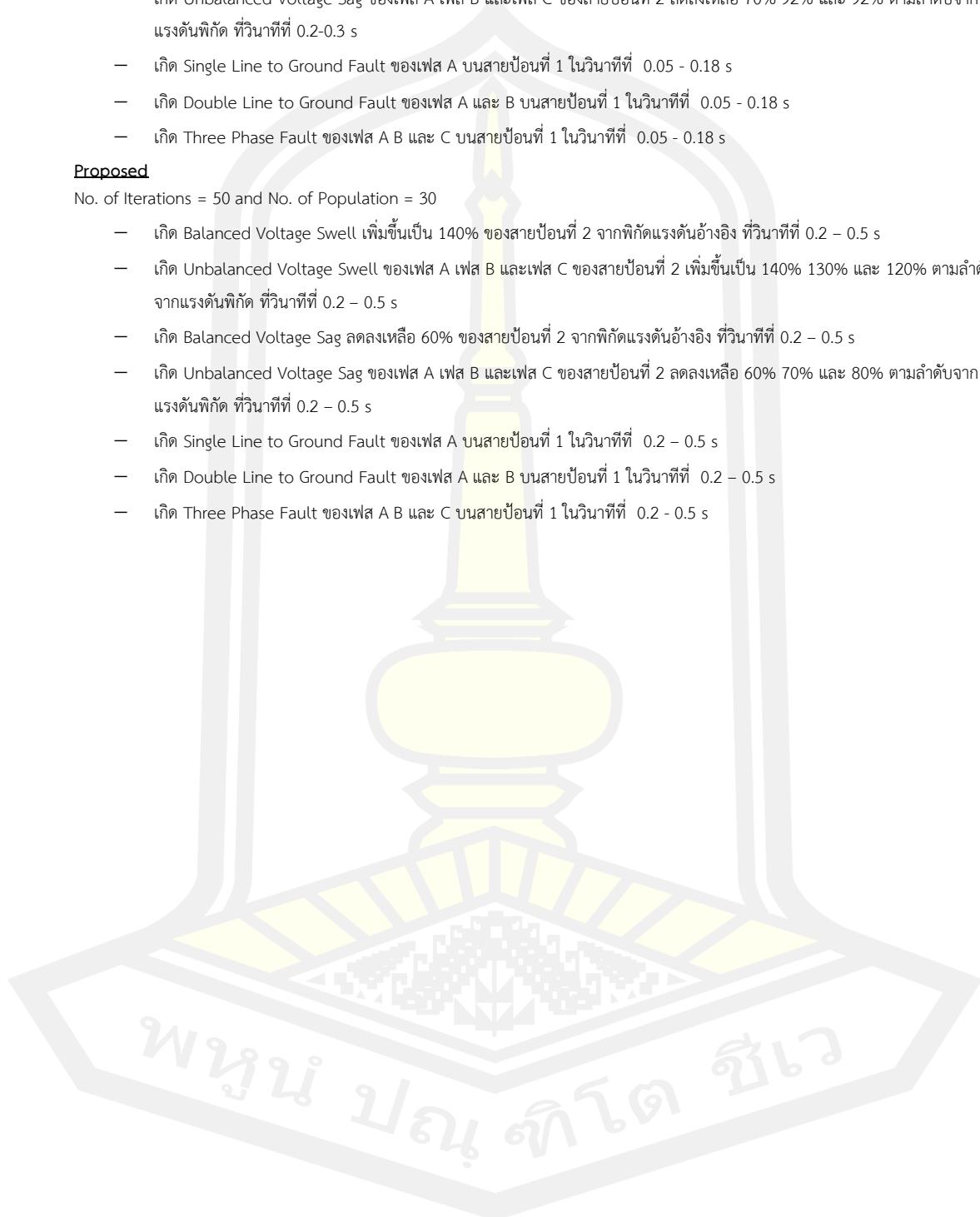
- เกิด Balanced Voltage Swell เพิ่มขึ้นเป็น 140% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ที่วินาทีที่ 0.1-0.2
- เกิด Unbalanced Voltage Swell ของเฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 140% 115% และ 110% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด ที่วินาทีที่ 0.2-0.3 s

- เกิด Balanced Voltage Sag ลดลงเหลือ 70% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ที่วินาทีที่ 0.1 - 0.15 s และ เกิด Balanced Voltage Sag ลดลงเหลือ 50% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ที่วินาทีที่ 0.185 - 0.2 s
- เกิด Unbalanced Voltage Sag ของเฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 ลดลงเหลือ 70% 92% และ 92% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด ที่วินาทีที่ 0.2-0.3 s
- เกิด Single Line to Ground Fault ของเฟส A บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.05 - 0.18 s
- เกิด Double Line to Ground Fault ของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.05 - 0.18 s
- เกิด Three Phase Fault ของเฟส A B และ C บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.05 - 0.18 s

**Proposed**

No. of Iterations = 50 and No. of Population = 30

- เกิด Balanced Voltage Swell เพิ่มขึ้นเป็น 140% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ที่วินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Unbalanced Voltage Swell ของเฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 140% 130% และ 120% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด ที่วินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Balanced Voltage Sag ลดลงเหลือ 60% ของสายป้อนที่ 2 จากพิกัดแรงดันอ้างอิง ที่วินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Unbalanced Voltage Sag ของเฟส A เฟส B และเฟส C ของสายป้อนที่ 2 ลดลงเหลือ 60% 70% และ 80% ตามลำดับจากแรงดันพิกัด ที่วินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Single Line to Ground Fault ของเฟส A บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Double Line to Ground Fault ของเฟส A และ B บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2 - 0.5 s
- เกิด Three Phase Fault ของเฟส A B และ C บนสายป้อนที่ 1 ในวินาทีที่ 0.2 - 0.5 s



## บทที่ 5

### สรุปผลการจำลอง

#### 5.1 การจำลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและจำลอง การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับแรงดันในระบบสายส่งตามบ้านเรือนและระบบอุตสาหกรรม ทำการทดลองกับโหลด 2 รูปแบบคือโหลดแบบสแตติกคือโหลด RL และโหลดแบบไดนามิกคือโหลดมอเตอร์ ในช่วงพิกัดแรงดันเฟสที่ 220 โวลต์ (Rms) หรือ 310 โวลต์ (Peak) ด้วยตัวกักเก็บแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorers; DVR) โดยมีรูปแบบของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตที่เชื่อมต่อกับด้านโหลด ไม่มีแหล่งจัดเก็บพลังงาน มีตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) และใช้หลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสามเฟสในการจับความผิดปกติของแรงดัน และการกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบเร็ว อีกทั้งยังประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมระหว่าง วิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) วิธีเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) โดยที่มีเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) เพื่อที่จะตรวจสอบและเป็นเกณฑ์การตัดสินใจหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอ ในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงและแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามเฟส พร้อมทั้งวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (The Total Harmonic Distortion) ในแรงดันโวลต์หลังการชดเชยจากตัวกักเก็บแรงดันไฟฟ้าแบบพลวัต (DVR) แล้วนั้น %THD ที่แรงดันโวลต์มีค่าลดลงซึ่งอยู่ในค่าตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 [7] ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัตดังพิสูจน์ให้เห็นได้จากผลการจำลองทั้ง 7 กรณี อันได้แก่ กรณีการเกิดแรงดันเกินแบบสมดุล แรงดันเกินแบบไม่สมดุล แรงดันตกแบบสมดุล แรงดันตกแบบไม่สมดุล ความผิดพลาดลงดินเฟสเดียว ความผิดพลาดลงดินสองเฟส และความผิดพลาดสามเฟส โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตด้วยการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink 2018b สามารถสรุปผลจากการจำลองประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการจำลองอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm; SA) ได้ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA สามารถชดเชย ปรับปรุง และแก้ไขปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่า เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA โดยที่ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA สามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) เท่ากับ 219.13 โวลต์ จากค่าพิกัดแรงดัน Vrms เท่ากับ 220 โวลต์ คิดเป็น 99.61% ในขณะที่อุปกรณ์กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA ที่สามารถชดเชยค่าเฉลี่ยแรงดัน RMS (Vrms) เท่ากับ 219.10 โวลต์ และ 218.63 โวลต์ คิดเป็น 99.59% และ 99.38% ตามลำดับ
2. อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA สามารถลดค่าเฉลี่ย %THD ของแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อน 2 จาก 9.25% เหลือ %THD ของแรงดันโหลดสายป้อน 2 เท่ากับ 3.92% ลดลงมาคิดเป็น 57.62% ในขณะที่กักเก็บแรงดันแรงดันพลวัตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA สามารถลดค่าเฉลี่ย %THD ของแรงดันแหล่งจ่ายสายป้อน 2 จาก 9.25% เหลือ %THD ของแรงดันโหลด 2 เท่ากับ 3.94% และ 3.96% ลดลงมาคิดเป็น 57.41% และ 57.19% ตามลำดับ
3. อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA มีค่าดัชนีสมรรถนะปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error; ITAE) ที่ดี โดยทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม มีค่า ITAE เฉลี่ยเท่ากับ 2.35 ในจำนวนรอบการค้นหาของทุกเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เท่ากับ 50 รอบ
4. อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตที่มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA ใช้ระยะเวลาทั้งหมดในการค้นหาค่าที่เหมาะสมเฉลี่ย เท่ากับ 672.86 วินาที เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ระยะเวลาทั้งหมดในการค้นหาค่าที่เหมาะสมของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO ใช้เวลาทั้งหมดในการค้นหาค่าที่เหมาะสมเฉลี่ย เท่ากับ 14940.71 วินาที และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ GA ใช้เวลาทั้งหมดในการค้นหาค่าที่เหมาะสมเฉลี่ย เท่ากับ 16212.29 วินาที สามารถกล่าวได้ว่า เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ SA รวดเร็วกว่าเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ PSO และ GA 22 เท่า และ 24 เท่า ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการตอบสนองการชดเชยของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัต ที่นำเสนอควรมีการทดลองกับอุปกรณ์จริง (Proof of Concept)

5.2.2 ในอนาคตสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทน (Renewable Energy) หรือในระบบสมาร์ตกริด (Smart Grid)



บรรณานุกรม



### บรรณานุกรม

- [1] Ahmed I. Omar, Shady H.E. Abdel Aleem, Essam E.A. El-Zahab, Mostafa Algablawy and Ziad M. Ali. "An improved approach for robust control of dynamic voltage restorer and power quality enhancement using grasshopper optimization algorithm". ISA Transactions 95. 2019. p.110–129.
- [2] Ansal V. "ALO-optimized artificial neural network-controlled dynamic voltage restorer for compensation of voltage issues in distribution system". Soft Computing. 2019.
- [3] Biricik S and Komurcugil H. "Optimized sliding mode control to maximize existence region for single-phase dynamic voltage restorers". IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016.
- [4] Du, Ke-Lin, and M. N. S. Swamy. "Search and optimization by metaheuristics." Techniques and Algorithms Inspired by Nature. (2016).
- [5] Hafezi H and Faranda R. "Dynamic voltage conditioner: A new concept for smart low-voltage distribution systems". IEEE Trans Power Electron. 2018. p.7582-7590.
- [6] Hagh MT, Shaker A, Sohrabi F and Gungel IS. "Fuzzy-based controller for DVR in the presence of DG". Procedia Computer Science. 2017.
- [7] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" in IEEE Std 519™-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), 27 March. 2014.
- [8] "ITIC Curve". Voltage Disturbance, Power Engineering Study Resource. [online] Available from: <https://voltage-disturbance.com/voltage-quality/itic-curve/> , 1<sup>st</sup> June 2022.
- [9] Jiang F, Tu C, Guo Q, Shuai Z, He X and He J. "Dual-functional dynamic voltage restorer to limit fault current". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019.
- [10] John Godsk Nielsen and Frede Blaabjerg. "A Detailed Comparison of System Topologies for dynamic voltage restorers". IEEE Transactions on Industry Application 2005.
- [11] Saeed AM, Abdel Aleem SHE, Ibrahim AM, Balci ME and El-Zahab EEA. "Power conditioning using dynamic voltage restorers under different voltage sag types". Journal of Advanced Research. 2016. p.95-103.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Talukder, Satyobroto. "Mathematicle modelling and applications of particle swarm optimization." 2011.
- [13] Transmission and Distribution Committee. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". IEEE standard 1159-2019. 2019
- [14] Tien VD, Gono R and Leonowicz Z. "A multifunctional dynamic voltage restorer for power quality improvement". Energies. 2018.
- [15] Mohammad Farhadi-Kangarlu, Ebrahim Babaei and Frede Blaabjerg. "A comprehensive review of dynamic voltage restorers". Electrical Power and Energy Systems. ELSEVIER. (2017).
- [16] Naidu TA, Arya SR and Maurya R. "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. 2019.
- [17] Naidu TA, Arya SR and Maurya R. "Multi-objective dynamic voltage restorer with modified EPLL control and optimized PI controller gains". IEEE Trans Power Electron. 2018.
- [18] Nourmohamadi H, Bektas SI, Hosseini SH, Babaei E and Sabahi M. "A conventional dynamic voltage restorer with fault current limiting capability". Procedia Comput Sci. 2017. p.750-757.
- [19] Rauf AM and Khadkikar V. "Integrated photovoltaic and dynamic voltage restorer system configuration". IEEE Trans Sustain Energy. 2015.
- [20] Rodney Tan. (2022). "Voltage Sag Acceptability Assessment Tool". [online] Available from: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62486-voltage-sag-acceptability-assessment-tool> , MATLAB Central File Exchange. 1<sup>st</sup> June 2022.
- [21] Santoso, Surya, Mark F. McGranaghan, Roger C. Dugan, and H. Wayne Beaty. 2012. Electrical Power Systems Quality. 2<sup>nd</sup> ed.



### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Sitharan R, Sundarabalan CK, Develalaji KR, Nataraj SK and Karthikeyan M. "Improved fault ride through capability of DFIG-wind turbines using customized dynamic voltage restorer". Sustainable Cities and Society. 2018.
- [23] Zeinab Elkady, N Abdel Abdel-Rahim, Ahmed A. Mansour and Fahmy M. Bemdary. "Enhanced DVR Control System Based on the Harris Hawks Optimization Algorithm". IEEE Access. 2020.
- [24] กฤติยากร เตียนพลกรัง และ ธวัชรัตน์ ประพัฒน์รังษี. "การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวกักเก็บแรงดันแบบพลวัต". [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2562.
- [25] ทวีศักดิ์ ทองแสน. "การควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดสำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว". [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2558.
- [26] ธีรยุทธ ซาดิซนะฮ์นิง. "เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 0307858 คุณภาพกำลังในระบบไฟฟ้า". สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2564.
- [27] ธีรยุทธ ซาดิซนะฮ์นิง. "เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 307502 การหาค่าเหมาะที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง". สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2564.
- [28] พรชนันท์ มงคลมะไฟ และ เพ็ญนภา นาส่งเสริม. "การควบคุมพีไอดีแบบดีที่สุดสำหรับหุ่นยนต์อัตโนมัติได้นำ". [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2563.



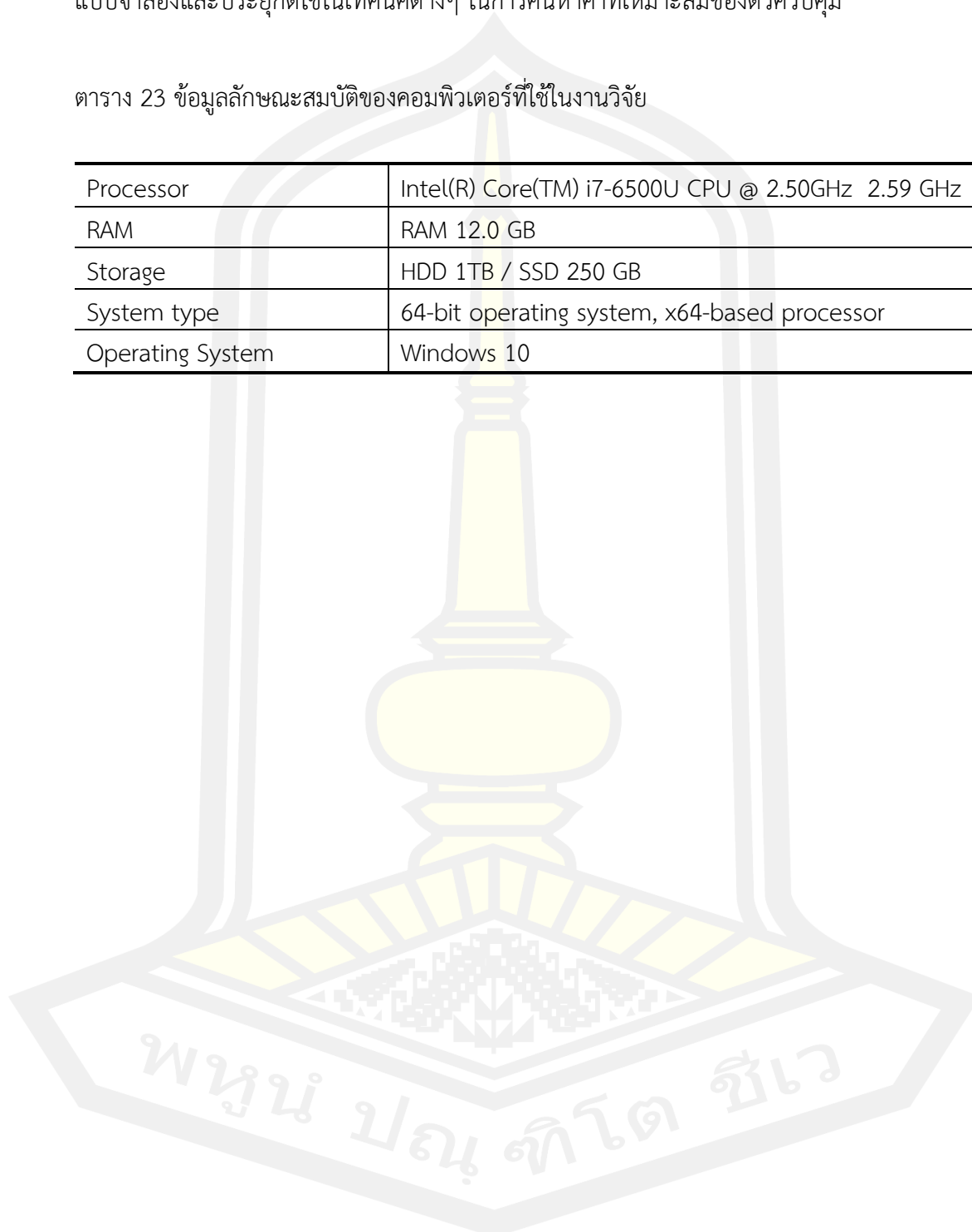
### ภาคผนวก

ข้อมูลลักษณะสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยในการเขียนโปรแกรมแบบจำลองและประยุกต์ใช้  
ในเทคนิคต่างๆ ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลลักษณะสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยในการเขียนโปรแกรมแบบจำลองและประยุกต์ใช้ในเทคนิคต่างๆ ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม

ตาราง 23 ข้อมูลลักษณะสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

Processor	Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz 2.59 GHz
RAM	RAM 12.0 GB
Storage	HDD 1TB / SSD 250 GB
System type	64-bit operating system, x64-based processor
Operating System	Windows 10



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ธวัชรรัตน์ ประพัฒน์รังษี
วันเกิด	16 กุมภาพันธ์ 2541
สถานที่เกิด	เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	225/23 หมู่บ้านพูนผล หมู่ที่ 2 ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกัลยาณวัตร จังหวัดขอนแก่น พ.ศ. 2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม

พูน ปณ ทัโต ชีเว