



รายงานการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมของ D-STATCOM ภายใต้สภาวะการทำงานผิดปกติใน ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ (Study of D-STATCOM behaviors under abnormal operations in a 22-kV electric power distribution system)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ และขอขอบคุณ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ภายใต้สภาวะการเกิดความผิดปกติ ดี-สแตคคอมเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าติดตั้งขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะการทำงาน การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตรใช้หลักการสถานะป้อนกลับ ส่วนการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตรใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต้องรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้ามียากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เสนอการตรวจจับ 3 วิธี คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไดค การแปลงปาร์กและการแปลงฟิควาร์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ใช้จินเนติกอัลกอริทึม การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับงานวิจัยนี้ ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบทดสอบ 3 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส จากผลการดำเนินงานพบว่า ดี-สแตคคอมสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ภายใต้การทำงานในสภาวะผิดปกติได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้งานวิจัยได้ประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตคคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรมผลการทดสอบได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เพื่อเป็นกรณีศึกษา

ABSTRACT

This research presents power compensation with D-STATCOM for three-phase power distribution systems under faulted conditions. D-STATCOM is one of shut-type power compensators. Its main function is to regulate voltage level of a given bus at a specified value in all operating conditions. Design of power compensation with D-STATCOM for balanced three-phase power distribution systems is based on a principle of state feedback while, for unbalanced three-phase systems, techniques of fast detection of abnormal voltage and current waveforms are employed. In this research, three different detection methods (sliding root-mean-squared method, park transformation and pqr transformation) are used for benchmarking. Together with a proportional controller in order to accelerate voltage and current responses, genetic algorithm (GA) is selected as the optimization tool for obtaining their optimally proportional gains. 2-bus, 4-bus systems and the 10th feeder circuit of PEA's Nakhon Ratchasima 2 (NM2) distribution network, having 131 buses, are used for evaluation. The tests were conducted by using programming codes for the MATLAB environment developed by the author of this research. From which satisfactory results, a well designed D-STATCOM is able to compensate voltage profiles of a given feeding portion under a faulted condition to resume their pre-fault voltage level within a very short response time. In addition, this research provides methodology framework of finding an appropriate rating of D-STATCOM for industrial applications. In this research, design of D-STATCOM to regulate the voltage profile of the 6.6-kV electric power distribution system of Padaeng Industry Public Company at Rayong plant was illustrated as a case study.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความนำ.....	4
2.2 การชดเชยกำลังไฟฟ้า.....	4
2.3 ความผิดพ้องในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.4 ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	7
2.5 สรุป.....	9
บทที่ 3 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร	
3.1 ความนำ.....	10
3.2 แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร.....	10
3.3 การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม.....	13
3.4 ผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม.....	15
3.5 การวิเคราะห์ความสามารถควบคุมได้และความสามารถสังเกตได้ของตัวชดเชย สถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตตคอม.....	20
3.6 สรุป.....	21
บทที่ 4 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร	
4.1 ความนำ.....	23
4.2 แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	24
4.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร.....	29
4.5 ผลการทดสอบ.....	34
4.6 สรุป.....	52
บทที่ 5 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์	
5.1 ความนำ.....	53
5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	53
5.3 เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง.....	55
5.4 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร.....	56
5.5 สรุป.....	64
บทที่ 6 กรณีศึกษา - การออกแบบตัวชดเชยดี-สแตคคอม สำหรับงานอุตสาหกรรม	
6.1 ความนำ.....	65
6.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสตรี จำกัด (มหาชน).....	65
6.3 การแก้ปัญหาด้วยตัวชดเชยดี-สแตคคอม.....	67
6.4 สรุป.....	71
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุป.....	72
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ.....	ก-1
ภาคผนวก ข ผลผลิตจากงานวิจัย.....	ข-1
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย.....	ค-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	6
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	8
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติ เมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม.....	20
ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติ เมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม.....	20
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4.....	38
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4.....	38
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a.....	47
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a.....	47
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติ เมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม.....	62
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติ เมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม.....	62
ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของโหลดต่าง ๆ ในแผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย.....	69
ตารางที่ 6.2 โหลดรวมของดี-สแตคคอม.....	70

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของดี-สแตคคอม.....	5
รูปที่ 3.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร.....	10
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของแบบจำลองดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร.....	11
รูปที่ 3.3 การออกแบบระบบควบคุม.....	13
รูปที่ 3.4 โครงสร้างสถานะป้อนกลับ.....	14
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม.....	15
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	16
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	16
รูปที่ 3.8 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	17
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	18
รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	18
รูปที่ 3.11 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	19
รูปที่ 4.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	24
รูปที่ 4.2 การเก็บสะสมข้อมูลในหนึ่งคาบแบบหน้าต่างเลื่อน.....	25
รูปที่ 4.3 แผนภาพเวกเตอร์ขององค์ประกอบการแปลงพิกิวอาร์.....	29
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี.....	30
รูปที่ 4.5 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	31
รูปที่ 4.6 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพิกิวอาร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	31
รูปที่ 4.7 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	32
รูปที่ 4.8 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงฟีดวอร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน	33
รูปที่ 4.10 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน	33
รูปที่ 4.11 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	35
รูปที่ 4.12 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	35
รูปที่ 4.13 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	36
รูปที่ 4.14 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	36
รูปที่ 4.15 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	37
รูปที่ 4.16 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	38
รูปที่ 4.17 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	39
รูปที่ 4.18 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	39
รูปที่ 4.19 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	40
รูปที่ 4.20 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟีดวอร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	40
รูปที่ 4.21 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟีดวอร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	41
รูปที่ 4.22 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.23 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	42
รูปที่ 4.24 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	42
รูปที่ 4.25 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	44
รูปที่ 4.26 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	44
รูปที่ 4.27 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	45
รูปที่ 4.28 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	45
รูปที่ 4.29 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	46
รูปที่ 4.30 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	47
รูปที่ 4.31 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	48
รูปที่ 4.32 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	48
รูปที่ 4.33 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	49
รูปที่ 4.34 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	49
รูปที่ 4.35 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	50
รูปที่ 4.36 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	50
รูปที่ 4.37 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร.....	51
รูปที่ 5.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2.....	54
รูปที่ 5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	55
รูปที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใด ๆ และวงจรสมมูลของเทวินิน.....	56
รูปที่ 5.4 การรวมโหลดที่บัส 54.....	57
รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร.....	57
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	58
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	58
รูปที่ 5.8 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	59
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	60
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	60
รูปที่ 5.11 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	61
รูปที่ 6.1 แผนภาพหลักเส้นเดียว โรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน).....	66
รูปที่ 6.2 แผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย.....	69
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 2 บัส.....	ก-1
รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 4 บัส.....	ก-1
รูปที่ ก.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส.....	ก-2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาที่สูงขึ้นจากอดีต ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาของประเทศทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ให้มีความรุดหน้าทั้งในแง่การสร้างความสะดวกสบายใช้เป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ จึงไม่อาจปฏิเสธได้ว่าพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสิ่งจำเป็นของประเทศ ซึ่งส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าและจะต้องพยายามรักษาเสถียรภาพของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เนื่องจากปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ คือ แรงดันตกที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายป้อน 22 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟและต่อการใช้ไฟเอง นอกจากนี้การเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดจากการลัดวงจร เกิดการต่อโหลดไฟฟ้าที่มากเกินไปกีดขวางของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะรับไหว ซึ่งสามารถสรุปปัญหาโดยรวมได้ดังนี้

1. ปัญหาทางด้านขนาดของแรงดัน เมื่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากับโหลดอยู่ห่างไกลกัน จึงทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในสายส่ง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีขนาดลดลงมากจากต้นทาง และจะทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อที่ปลายทางมีการชำรุดเสียหายได้
2. ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ เมื่อมีการใช้โหลดที่มีขนาดมากขึ้นส่งผลให้แรงดันในระบบลดลง ถ้าลดลงจนถึงจุดพั้งทลายจะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ ทำให้เกิดไฟฟ้าดับตามมาได้
3. ปัญหาทางด้านความผิดปกติในระบบกำลังไฟฟ้า ในสภาพปกติจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระบบกำลังไฟฟ้าทุกส่วนเพื่อจ่ายไปยังโหลด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง เช่น เกิดการลัดวงจร จะทำให้กระแสลัดวงจรที่ไหลไปยังจุดที่เกิดความผิดปกติมีค่าสูงกว่าในสภาวะปกติ ในขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่าง ๆ จะมีค่าลดลง ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟและต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

4. ปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการส่งพลังงานไฟฟ้าไปในระยะทางไกล ๆ จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยขนาดแรงดันที่สูง งบประมาณและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงมีราคาแพงมาก

จากปัญหาดังกล่าว ปัจจุบันได้มีการแสวงหาแนวทางแก้ไขปัญหาเพื่อรักษาระดับแรงดันโวลต์ให้มีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะโวลต์ โดยการติดตั้งตัวชดเชยเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้า ตัวชดเชยในระบบไฟฟ้ากำลังมีมากมาย ซึ่งอุปกรณ์ที่ถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้เรียกกลุ่มของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เรียกว่า คัสตอมเพาเวอร์ (Custom Power Devices: CPD) อุปกรณ์ในตระกูล CPD นี้มีหลายตัว เช่น ยูพีทีควซี (Unified Power Quality Compensator: UPQC) ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer: DVR) และดี-สแตตคอม (Distribution Static Compensator: D-STATCOM) เป็นต้น [19],[25] ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์ จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าภายใต้การทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ โดยเน้นไปที่ดี-สแตตคอมเป็นหลัก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ต่อแบบขนาน ติดตั้งได้ง่ายกว่าอุปกรณ์ในรูปแบบอนุกรมดังเช่น DVR

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดี-สแตตคอม ภายใต้การทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวของดี-สแตตคอมที่ใช้งานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ในสภาวะเกิดความผิดปกติ
3. เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โวลต์ให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งดี-สแตตคอม
4. เพื่อแสวงหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการนำดี-สแตตคอมมาใช้งานในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภายใต้การทำงานในสภาวะผิดปกติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตตคอม ที่ใช้งานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ในขณะที่เกิดความผิดปกติ
2. รักษาระดับแรงดันที่โวลต์ให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
3. ทดสอบผลด้วยการจำลองระบบจ่าย 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้การทำงานในสภาวะผิดปกติ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอมที่ใช้งานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
2. พัฒนาโปรแกรมจำลองผล และทดสอบความถูกต้องกับโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม ATP/EMTP
3. ศึกษาความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
4. ศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและเทคนิคการควบคุมแรงดันในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การทำงานของดี-สแตคคอมในสถานะชั่วคราว
5. ศึกษาการออกแบบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม
6. ทดสอบอัลกอริทึมที่ศึกษามากับกรณีศึกษาของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 22 กิโลโวลต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองของดี-สแตคคอมที่สามารถใช้ได้กับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
2. ได้รู้ถึงพฤติกรรมของดี-สแตคคอม ภายใต้สถานะการทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
3. สามารถรักษาระดับแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ในขณะที่มีการติดตั้งดี-สแตคคอม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังและปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 การชดเชยกำลังไฟฟ้า

การชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ เป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง และรักษาระดับแรงดันที่โหลด ซึ่งตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังงานไฟฟารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟส่งผลกระทบต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบส่งจ่ายช่วยให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ชดเชยในตระกูลคัสทอมเพาเวอร์

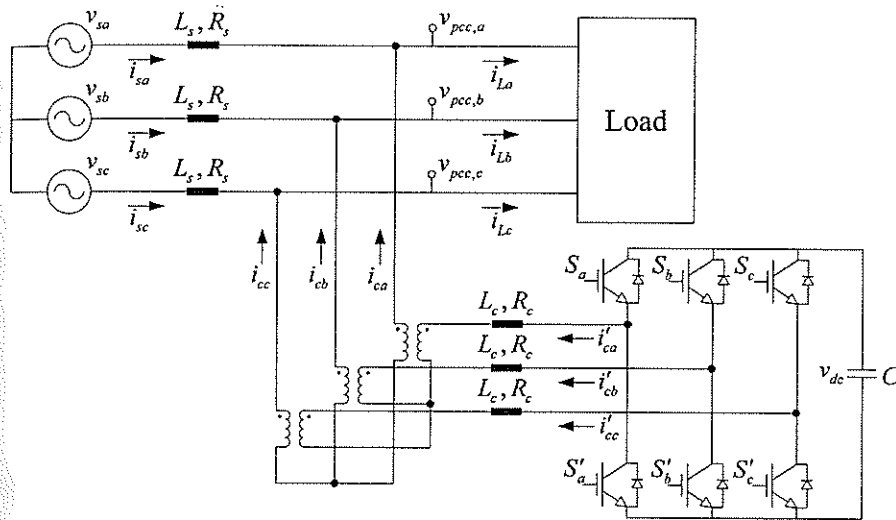
2.2.1 อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์

อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์หรือ CPD เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้เรียกกลุ่มของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจ่าย อุปกรณ์ในตระกูล CPD นี้มีหลายตัว เช่น เอเอสวีซี (Advanced Static Var Compensator: ASVC) ยูพีทีวีซี ตัวจำกัดกระแสผิดปกติ (Solid-state Fault Current Limiter: SSFCL) ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและดี-สแตคคอม เป็นต้น โดยคุณลักษณะเด่นของอุปกรณ์ในตระกูล CPD นั่นคือ ช่วยในการชดเชยกำลังไฟฟ้าและการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างในระบบ และลดจำนวนครั้งในการเกิดไฟฟ้าดับ [4] ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะดี-สแตคคอมเท่านั้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.2 โครงสร้างและการทำงานของดี-สแตคคอม

Distribution Static Compensator (D-STATCOM) หรือดี-สแตคคอม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นอุปกรณ์สวิตช์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC converter) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์ (Voltage Source Inverter: VSI) 3 เฟส แบบบริดจ์ ตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อม โยงคัสซี [12] อุปกรณ์ตัวนี้จะป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าใน

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในตระกูล CPD ชนิดหนึ่งทำงานต่อขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเชื่อมต่อ (coupling transformer) ที่ถอดแบบมาจากสแตตคอม (Static Compensator: STATCOM) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ [10] การควบคุมสวิตช์ร่วมกับการออกแบบวงจรที่เหมาะสมจะทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากดี-สแตตคอมเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ จุดต่อเชื่อม เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สถานะโหลด



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของดี-สแตตคอม

การทำงานหลักของอุปกรณ์นี้ ได้แก่ รักษาแรงดันในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้คงที่ในรูปของการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยการฉีดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่นำมาชดเชยสร้างได้จากตัวเก็บประจุกระแสตรงในตัวของดี-สแตตคอมเอง ที่สถานะปกติ ดี-สแตตคอมจะไม่ทำงานแต่ตัวเก็บประจุกระแสตรงจะเก็บสะสมพลังงาน เมื่อเกิดสถานะการทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดลดลง แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม ตัวควบคุมจะทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้านำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ

2.3 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ทุกขณะและทุกพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะส่วนของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีโหลดจากอุตสาหกรรมซึ่งมีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะในระหว่างเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงและสร้างความเสียหาย

ค่อนข้างสูงต่อผู้ประกอบการ รวมทั้งสร้างความสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจำแนกได้หลายประเภท เช่น เกิดการลัดวงจรของสายส่ง การต่อโหลดเข้าในระบบไฟฟ้ามากเกินไป เป็นต้น ซึ่งการเกิดความผิดปกติส่วนใหญ่จะเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ฝนตก ต้นไม้ การจับแตะของสัตว์และความผิดพลาดของคน เป็นต้น ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ความผิดปกติแบบเปิดวงจร (open-circuit faults) ได้แก่ การหลุดของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรืออุปกรณ์อื่น ๆ และความผิดปกติแบบลัดวงจร (short-circuit faults) ได้แก่ การลัดวงจรของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ทั้งที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างคู่เฟส หรือระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งลงดิน [4]

สำหรับความผิดปกติในงานวิจัยนี้จะหมายถึงความผิดปกติแบบลัดวงจรเท่านั้น ซึ่งความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบบลัดวงจรนั้นยังสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การลัดวงจรสามเฟสสมมาตร (Symmetrical Three-Phase Fault: $3\phi F$)
2. การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line-to-Ground Fault: SLGF)
3. การลัดวงจรสองเฟส (Double Line Fault หรือ Line-to-Line Fault: LLF)
4. การลัดวงจรสองเฟสลงดิน (Double Line-to-Ground Fault: DLGF)

โดยจะมีสถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า [4]

ชนิดของความผิดปกติ	เปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติ
SLGF	85%
LLF	8%
DLGF	5%
$3\phi F$	2%

จากสถิติการเกิดความผิดปกติในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติมากที่สุด รองลงมาก็คือ การลัดวงจรสองเฟส การลัดวงจรสองเฟสลงดินและการลัดวงจรสามเฟสสมมาตร ตามลำดับ แต่ถ้าเราจะพิจารณาในเรื่องความรุนแรงของการเกิดความผิดปกตินั้น การลัดวงจรสามเฟสสมมาตรนั้นจะมีความรุนแรงมากที่สุด ส่วนการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินนั้นจะมีความรุนแรงน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียง 2 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ การลัดวงจรสามเฟสสมมาตร ซึ่งเป็นความผิดปกติที่ส่งผลกระทบต่อระบบรุนแรงที่สุด และการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน ซึ่งเป็นความผิดปกติที่พบมากที่สุด

2.4 ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า เป็นเรื่องของความแน่นอนในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายหลัก คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นิยามของคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE จะมีความหมายถึง ลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย [15] ในปัจจุบันเรื่องของคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นที่สนใจและนำมาพิจารณากันมาก [22] เนื่องจากสาเหตุใหญ่ ๆ คือ กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงซึ่งมีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ พีแอลซี (Programmable Logic Controller: PLC) และตัวขับเคลื่อนความเร็วรอบของมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive: ASD) เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้า [18] เช่น การใช้อุปกรณ์ ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก ก็จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยังทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรุนแรงมากยิ่งขึ้น ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น เช่น ปัญหาจากแรงดันตกชั่วขณะ ทำให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยต้องหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น เป็นต้น

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังงานไฟฟ้าเสียไปนั้นเราอาจจะแบ่งแยกสาเหตุออกได้หลายรูปแบบ เช่น ปรากฏการณ์ธรรมชาติ การเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง (switching) การทำงานของอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม การต่อกราวด์ (grounding) ในระบบไม่ถูกต้อง เป็นต้น เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของกำลังงานไฟฟ้าขึ้นย่อมจะทำให้ลักษณะของรูปคลื่น แรงดัน กระแส ตลอดจนความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.2 [15] ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (short duration voltage variation) เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ประเภท	ช่วงการเกิด	ช่วงระยะเวลาการเกิด	ช่วงขนาดของแรงดัน
1. กวาระชั่วคราว			
1.1 อิมพัลส์ชั่วคราว			
1.1.1 ns	5 ns	< 50 ms	
1.1.2 μ s	1 μ s	50 μ s - 1 ms	
1.1.3 ms	0.1 ms	> 50 ns	
1.2 ออสซิลเลทชั่วคราว			
1.2.1 ความถี่ต่ำ	< 5 kHz	0.3-50 ms	0 - 4 pu.
1.2.2 ความถี่ปานกลาง	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu.
1.2.3 ความถี่สูง	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu.
2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น			
2.1 ล้มพลง			
2.1.1 แรงดันหย่อน		0.5 - 30 cycle	0.1 - 0.9 pu.
2.1.2 แรงดันบวม		0.5 - 30 cycle	1.1 - 1.8 pu.
2.2 ขั้วขณะ			
2.2.1 ไฟดับ		0.5 cycle - 3 s	< 0.1 pu.
2.2.2 แรงดันตก		30 cycle - 3 s	0.1 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		30 cycle - 3 s	1.1 - 1.4 pu.
2.3 ขั้วคราว			
2.2.1 ไฟดับ		3 s - 1 min	< 0.1 pu.
2.2.2 แรงดันหย่อน		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu.
3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว			
2.2.1 ไฟดับ		> 1 min	0 pu.
2.2.2 แรงดันหย่อน		> 1 min	0.8 - 0.9 pu.
2.2.3 แรงดันบวม		> 1 min	1.1 - 1.2 pu.
4. แรงดันไม่สมดุล		สถานะคงตัว	0.5 - 2 %
5. ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น			
5.1 องค์ประกอบไฟตรง		สถานะคงตัว	0 - 0.1 %
5.2 ฮาร์โมนิก	0 - 100 th H	สถานะคงตัว	0 - 20 %
5.3 อินเตอร์ฮาร์โมนิก	0 - 6 kHz	สถานะคงตัว	0 - 2 %
5.4 คลื่นรบกวน		สถานะคงตัว	
5.5 สัญญาณรบกวน	ช่วงกว้าง	สถานะคงตัว	0 - 1 %
6. แรงดันกระเพื่อม	< 25 Hz	ไม่สม่ำเสมอ	0.1 - 7 %
7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า		< 10 s	

2.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึง การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

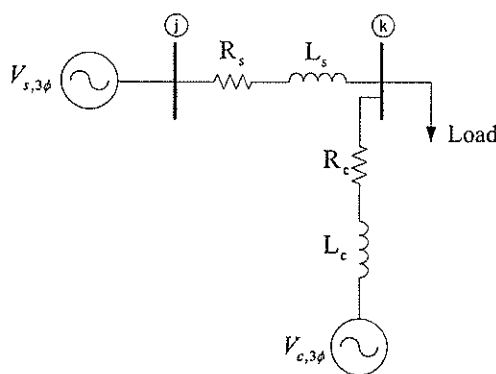
แบบสมมาตร

3.1 ความนำ

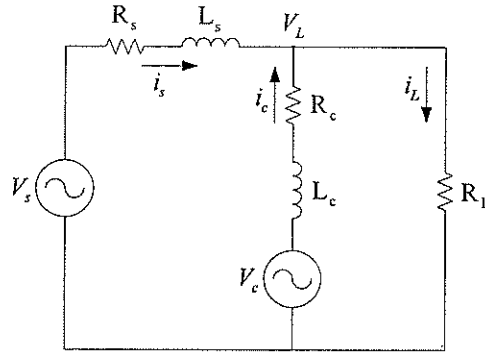
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร เพื่อนำไปใช้กับการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม พร้อมทั้งกล่าวถึงผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดพลาดด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัส โหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ และยังกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม

3.2 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

ดี-สแตคคอมที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว ซึ่งจะไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงคิซี สามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 3.1 กำหนดให้ โหลดที่พิจารณาเป็น โหลดชนิดความต้านทาน (R_L) และกำหนดให้ R_c และ L_c คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในตัวขงดี-สแตคคอม ตามลำดับ จากรูปที่ 3.1 สามารถหาวงจรสมมูลของแบบจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของแบบจำลองดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์มีการออกแบบตัวกรอง (filter) ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่จะกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ ได้ และหลังจากการกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ แล้วจะเหลือแต่ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) เท่านั้น ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งผลจาก ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการสับสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ออกไปได้ ซึ่งเพียงพอที่จะนำเสนอในสภาวะชั่วคราว แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ สามารถหาได้ดังนี้

$$V_c = V_c \sin(\omega t + \delta_c) \quad (3-1)$$

โดยที่ V_c คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ

V_c คือ ขนาดของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ

δ_c คือ มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตคคอม (control angle)

จากรูปที่ 3.2 ใช้หลักการกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law: KVL) โดยพิจารณาที่แหล่งจ่ายจะได้ว่า

$$L_s \frac{di_s}{dt} = -R_s i_s - V_L + V_s \quad (3-2)$$

และพิจารณาที่ดี-สแตคคอม จะได้ว่า

$$L_c \frac{di_c}{dt} = -R_c i_c - V_L + V_c \quad (3-3)$$

จากรูปที่ 3.2 ใช้หลักการกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current law: KCL) จะได้ว่า

$$i_c = i_L - i_s \quad (3-4)$$

แทนสมการที่ (3-4) ในสมการที่ (3-3) โดยที่ $i_L = V_L / R_L$ จะได้

$$L_c \frac{d\left(\frac{V_L}{R_L} - i_s\right)}{dt} = -R_c i_L + R_c i_s - V_L + V_c \quad (3-5)$$

$$\left(\frac{L_c}{R_L}\right) \frac{dV_L}{dt} - L_c \frac{di_s}{dt} = \left(\frac{-R_c}{R_L} - 1\right) V_L + R_c i_s + V_c \quad (3-6)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$-\frac{di_s}{dt} + \left(\frac{1}{R_L}\right) \frac{dV_L}{dt} = \left(\frac{-R_c - R_L}{R_L L_c}\right) V_L + \left(\frac{R_c}{L_c}\right) i_s + \left(\frac{1}{L_c}\right) V_c \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-7) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะ (state-space equation) ได้ดังสมการที่ (3-8)

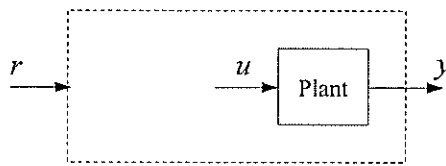
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{dV_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{R_c}{L_c} & \frac{-R_c - R_L}{R_L L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ V_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร แสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{dV_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{R_L R_s}{L_s} + \frac{R_L R_c}{L_c} & -\frac{R_L}{L_s} - \frac{R_c}{L_c} - \frac{R_L}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ V_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ \frac{R_L}{L_s} & \frac{R_L}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

3.3 การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม

ระบบควบคุมส่วนมากจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.3 ซึ่งพลานต์และสัญญาณอ้างอิง $r(t)$ จะต้องรู้มาก่อนแล้ว อินพุต $u(t)$ ของพลานต์ เรียกว่า สัญญาณขับเร้า (actuating signal) หรือ สัญญาณควบคุม (control signal) เอาต์พุต $y(t)$ ของพลานต์ เรียกว่า พลานต์เอาต์พุต (plant output) หรือ controlled signal ปัญหาก็คือการออกแบบระบบรวมทั้งหมดเพื่อให้ได้มาซึ่งพลานต์เอาต์พุตตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างใกล้เคียงเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะมีวิธีการควบคุมอยู่ 2 วิธี ถ้าสัญญาณเร้าขึ้นอยู่กับสัญญาณอ้างอิงเท่านั้น และไม่เกี่ยวข้องกับพลานต์เอาต์พุต การควบคุมนี้ เรียกว่า การควบคุมแบบวงเปิด (open-loop control) และถ้าสัญญาณเร้าขึ้นอยู่กับสัญญาณอ้างอิงและพลานต์เอาต์พุต การควบคุมนี้ เรียกว่า การควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control) หรือการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) [11]



รูปที่ 3.3 การออกแบบระบบควบคุม

โดยทั่วไปการควบคุมระบบวงเปิดยังให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ ซึ่งนั่นหมายถึงสัญญาณหรือพลังงานอื่น ๆ จากภายนอกเข้าไปกระทำกับระบบ สัญญาณที่แทรกเข้ามาจากภายนอกเหล่านี้ เรียกว่า การรบกวน (disturbances) ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับสามารถช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของ พลานต์ และกำจัดสัญญาณรบกวนหรือการรบกวนอื่น ๆ ได้ [11] ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนกลับจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับโดยใช้สมการปริภูมิสถานะ (state-space equation) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

พิจารณาสมการสถานะตัวแปรเดี่ยวขนาด n จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu \\ y &= cx + du \end{aligned} \quad (3-10)$$

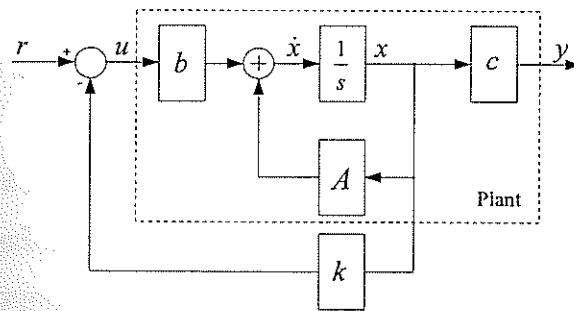
โดยกำหนดให้ $d=0$ เพื่อจะได้พิจารณาอย่างง่าย ในสถานะป้อนกลับ (state feedback) อินพุต u จะหาได้โดย

$$u = r - kx = r - [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n]x = r - \sum_{i=1}^n k_i x_i \quad (3-11)$$

นำสมการที่ (3-11) แทนในสมการที่ (3-10) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - bk)x + br \\ y &= cx \end{aligned} \quad (3-12)$$

แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 แต่ละอัตราขยายป้อนกลับ k_i (feedback gain) จะเป็นค่าคงที่จำนวนจริง ซึ่งเรียกว่า อัตราขยายคงที่ของสถานะป้อนกลับแบบลบ (constant gain negative state feedback) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า สถานะป้อนกลับ การหาค่าอัตราขยายป้อนกลับนั้นสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชัน *place* ในโปรแกรม MATLAB โดยเงื่อนไขในการเลือก closed loop pole คือ สัญญาณอินพุตต้องมีค่าการพุ่งเกิน (overshoot) $P.O. \leq 10\%$ และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) $T_s = 3$ มิลลิวินาที



รูปที่ 3.4 โครงสร้างสถานะป้อนกลับ

ซึ่งจากสมการที่ (3-12) จะได้เมทริกซ์ $A - bk$ หรือ A' ดังนี้

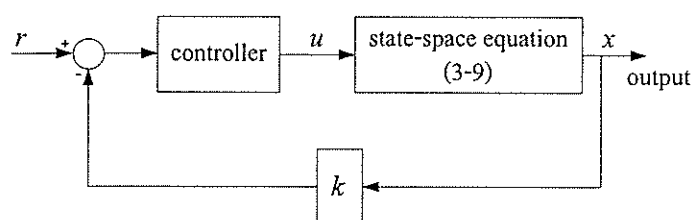
$$A' = A - bk = \begin{bmatrix} \frac{-R_s - k_{11}}{L_s} & \frac{1}{L_s} \frac{k_{12}}{L_s} \\ \frac{R_f R_s}{L_s} + \frac{R_L R_c}{L_c} - \frac{R_L k_{11}}{L_s} - \frac{R_L R_c k_{21}}{L_c} & -\frac{R_L}{L_s} + \frac{(-R_c - R_L)}{L_c} - \frac{R_L k_{12}}{L_s} - \frac{R_L R_c k_{22}}{L_c} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

เมื่อพิจารณาถึงการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแควดคอม จากแบบจำลองของดี-สแควดคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตรในสมการที่ (3-9) จะได้ว่า ตัวแปรสถานะ (state variables) คือ กระแสจากแหล่งจ่าย i_s (current source) และแรงดันโหลด V_L (load voltage)

ส่วนตัวแปรอินพุต (input variables) คือ แรงดันจากแหล่งจ่าย V_s (voltage source) และแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอม ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบ V_c (voltage compensation) ดังนั้นจากสมการที่ (3-11) สามารถหาอินพุต u ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_s^{ref} \\ V_L^{ref} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ V_L \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

จากสมการที่ (3-14) จะได้โครงสร้างของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม ดังรูปที่ (3.5)



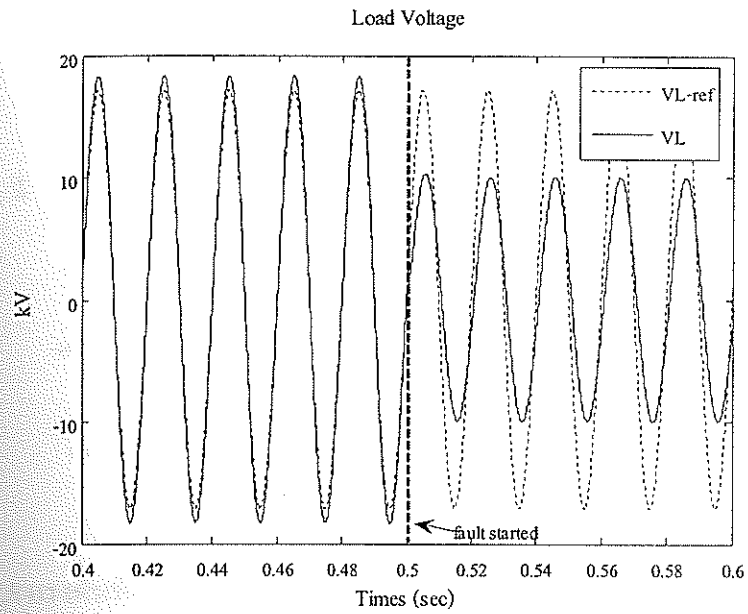
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional controller) เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยเป็นการควบคุมเอาต์พุตของตัวควบคุม โดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุม หรือค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบสัดส่วน (k_p) เพื่อให้เอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ไวตามความต้องการและทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย

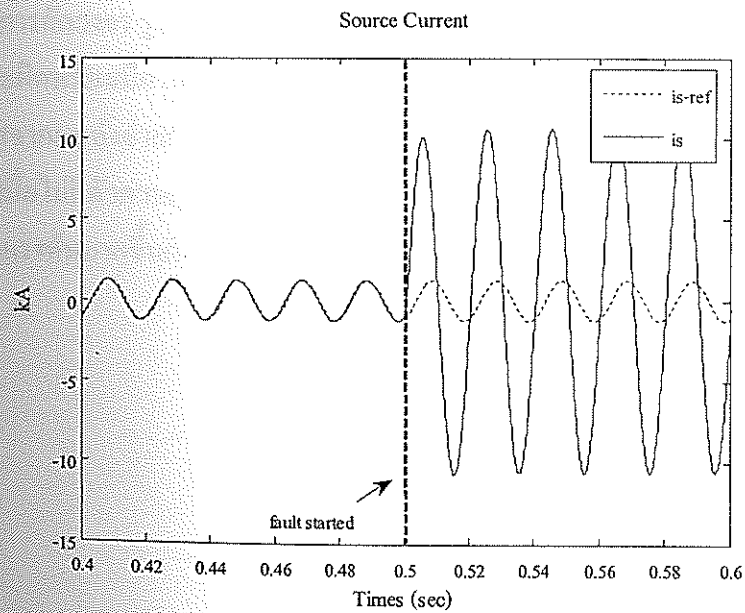
3.4 ผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม

ในการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม จะทดสอบกับระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัส ซึ่งเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 การทดสอบจะจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมมาตรที่บัสโหนด เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่บัสโหนดลดลง และติดตั้งดี-สแตคคอมที่บัสโหนด เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหนด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม ได้ดังนี้

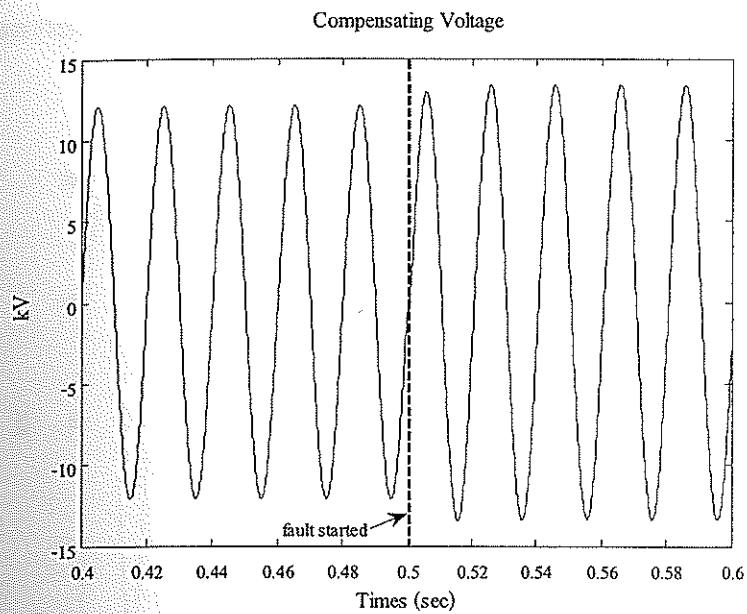
3.4.1 สถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



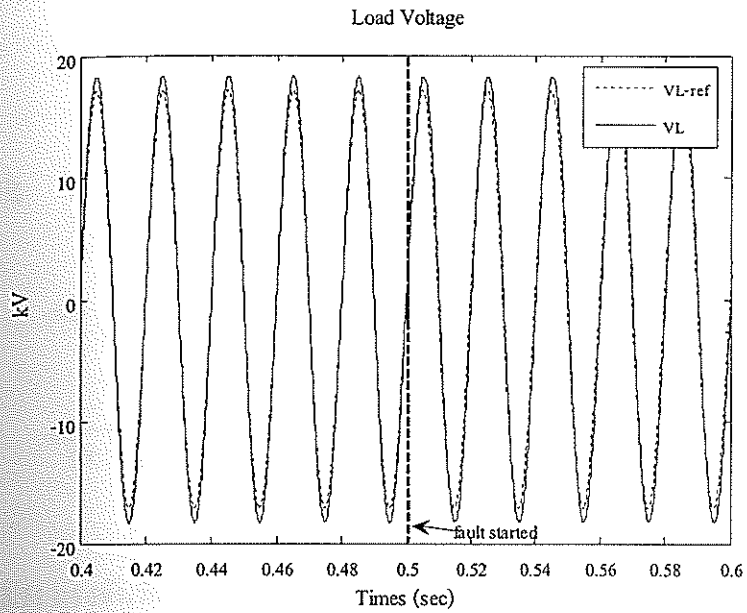
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



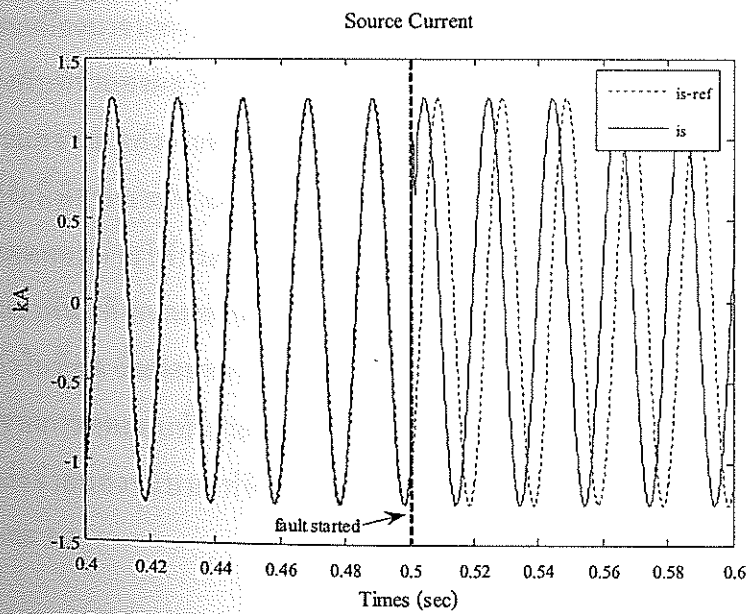
รูปที่ 3.8 แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)

รูปที่ 3.6 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันโวลต์อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ทำให้เกิดแรงดันตก เนื่องจากเกิดการลัดวงจร รูปที่ 3.7 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง และรูปที่ 3.8 แสดงแรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบจะมีขนาดแรงดันมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ไม่มาก เพราะเนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด

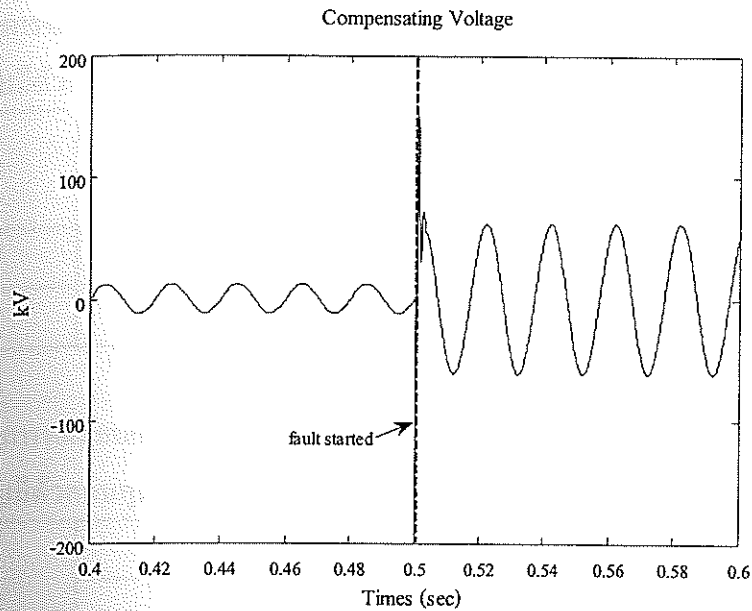
3.4.2 สถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.11 แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)

รูปที่ 3.9 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ตัวควบคุมสามารถช่วยลดเซชแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจรได้เป็นอย่างดี รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง แต่มุมเฟสไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงมุมเฟสแต่อย่างใด รูปที่ 3.11 แสดงแรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบมีการกระเพื่อมของแรงดันมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของตี-สแตคคอม

จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัส โหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	แรงดันที่บัสโหลด RMS (kV)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	13.024	13.024
ผิดปกติ	7.128	13.018

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	กระแสจากแหล่งจ่าย RMS (kA)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	0.892	0.892
ผิดปกติ	7.545	0.894

ผลการทดสอบนี้จะมีค่าอัตราขยายป้อนกลับ $k_{11} = 0.7700$, $k_{12} = 1.1830$, $k_{13} = -770$, $k_{14} = 45$ และอัตราขยายของตัวควบคุม $k_p = 5.92$

3.5 การวิเคราะห์ความสามารถควบคุมได้และความสามารถสังเกตได้ของตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ สำหรับดี-สแตตคอม

3.5.1 ตรวจสอบความสามารถควบคุมได้ (controllable)

ให้เมทริกซ์ A และ b คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times n$ และ $n \times p$ ตามลำดับ จะได้ว่า

$$C = [b \quad Ab \quad \dots \quad A^{n-p}b]$$

ระบบจะสามารถควบคุมได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความควบคุมได้ (controllability matrix) C มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน `ctrb` ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความควบคุมได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน `rank` ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{controllability matrix} = \begin{bmatrix} 2500 & 0 & -5.4634 \times 10^9 & -2.2899 \times 10^8 \\ 1e6 & 41958 & -4.0067 \times 10^{12} & -1.7141 \times 10^{11} \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความควบคุมได้ก็เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถควบคุมได้”

3.5.2 ตรวจสอบความสามารถสังเกตได้ (observable)

ให้เมทริกซ์ A และ c คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times n$ และ $q \times n$ ตามลำดับ จะได้ว่า

$$O = [c \quad cA \quad \dots \quad cA^{n-q}]^T$$

ระบบจะสามารถสังเกตได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความสังเกตได้ (observability matrix) O มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้ โดยใช้ฟังก์ชัน *obsv* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความสังเกตได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน *rank* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{observability matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -2375 & -5457.5 \\ 3.14 \times 10^7 & -4.0852 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถสังเกตได้”

3.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึง แบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม พร้อมทั้งกล่าวถึงผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม โดยคำนึงการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถ

กลับมาทำงานได้ตามปกติ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมสามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และยังกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสามารถควบคุมได้และความสามารถสังเกตได้ของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม มีความสามารถควบคุมได้ และสามารถสังเกตได้ โดยเนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรจะนำไปเปรียบเทียบกับ การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร

4.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร เพื่อนำไปใช้กับเทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบด้วยวิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไดค การแปลงพาร์กและการแปลงพิกิวอาร์ ลำดับต่อมา กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน รวมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

4.2 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

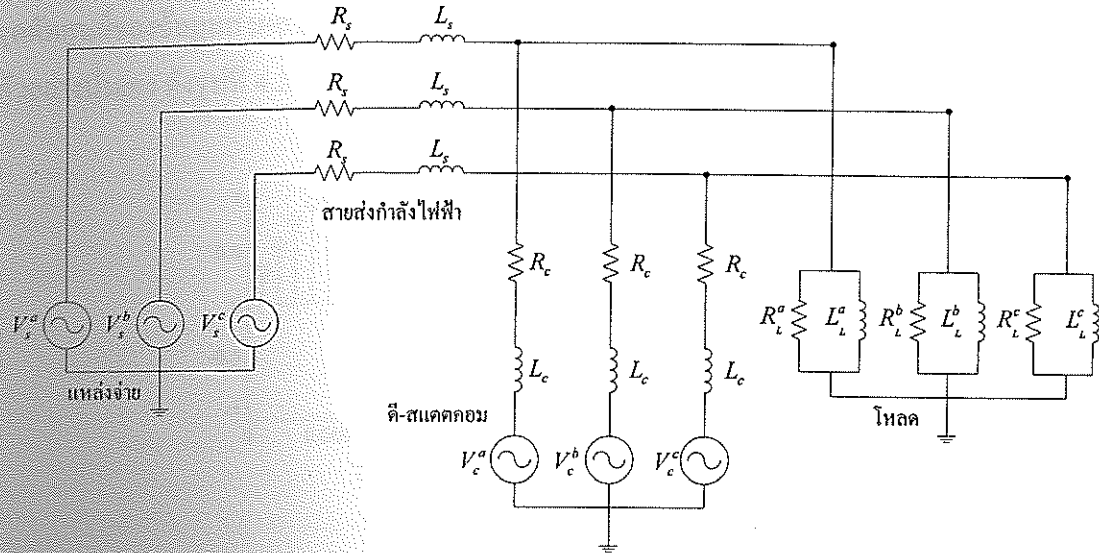
แบบจำลองของดี-สแตคคอมที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว ซึ่งจะไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงดีซี สามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 4.1 เมื่อ I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ I_s คือ กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย กำหนดให้โหลดที่พิจารณาเป็นโหลดชนิดความต้านทานขนานกับความเหนี่ยวนำ R_c และ L_c คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในตัวของดี-สแตคคอม ส่วน R_s และ L_s คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า

กำหนดให้อินเวอร์เตอร์มีการออกแบบตัวกรองที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่จะกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ ได้ และหลังจากการกรองฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ แล้วจะเหลือแต่ความถี่มูลฐานเท่านั้น ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งผลจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ออกไปได้ ซึ่งเพียงพอที่จะนำเสนอในสถานะคงตัว ดังนั้นแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ นิยามได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_c^a \\ V_c^b \\ V_c^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_c^a \sin(\omega t + \delta_c) \\ V_c^b \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta_c) \\ V_c^c \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta_c) \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

โดยที่ V_c^a, V_c^b และ V_c^c
 V_c^a, V_c^b และ V_c^c
 δ_c

คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 คือ ขนาดของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 คือ มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตคคอม



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

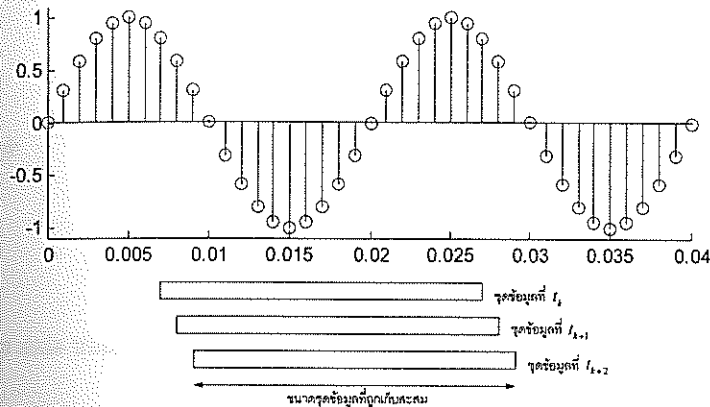
4.3 เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะต้องมีความรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะในระหว่างเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จะต้องการการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รวดเร็วและแม่นยำมากกว่าโหลดชนิดอื่น ๆ ซึ่งถ้าไม่ใช้วิธีที่รวดเร็วและแม่นยำแล้ว อาจเกิดผลกระทบอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมนั้น ๆ วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้านั้นมีมากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน [8] งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล (sliding root mean square: rms) วิธีการแปลงพาร์ก (park transformation) และ วิธีการแปลงพิกิวอาร์ (pqr transformation)

4.3.1 วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล

ปัญหาหลักประการหนึ่งในการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ การคำนวณเฟสเซอร์แรงดันซึ่งถูกนิยามให้มีค่าขนาดแรงดัน (ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย) และมุมเฟส ต้องใช้การเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงดันในหนึ่งคาบเวลา ทำให้การชดเชยแรงดันหย่อนพลวัตเป็นไปไม่ได้โดยหลักการ อย่างไรก็ตาม โดยการใช้เทคนิคการสะสมข้อมูลแบบหน้าต่างเลื่อน (sliding-window

storage technique) ที่ดำเนินการเก็บข้อมูลจากการชักตัวอย่างในหนึ่งคาบด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่แน่นอน เมื่อมีข้อมูลการชักตัวอย่างในลำดับถัดไป ข้อมูลที่ถูกเก็บสะสมไว้ตัวที่มีลำดับเก่าที่สุดจะถูกทิ้งไป และเลื่อนดัชนีข้อมูลที่ถูกสะสมดังกล่าวให้มีค่าลดลงหนึ่งลำดับ จะได้ที่ว่างในตำแหน่งล่าสุด ซึ่งจะถูแทนที่ด้วยข้อมูลการชักตัวอย่างล่าสุดนั่นเอง ด้วยหลักการนี้ร่วมกับเทคนิคการหาจุดตัดศูนย์ของข้อมูลส่งผลให้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและค่ามมเฟสสามารถคำนวณได้ทุก ๆ จุดการชักตัวอย่างนั่นเอง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเก็บสะสมข้อมูลในหนึ่งคาบแบบหน้าต่างเลื่อน

ในกรณีของการ sampling n จุดต่อคาบเวลา T สูตรการคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ยคำนวณได้ดังนี้ [5]

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n V^2(k)} \quad (4-2)$$

4.3.2 วิธีการแปลงพาร์ก

การแปลงพาร์ก (park transformation) หรือที่ส่วนใหญ่เรียกกันว่าการแปลงซีโรดีคิว (0dq transformation) ซึ่งประกอบด้วยแกนดี (direct axis) และแกนคิว (quadrature axis) ส่วนใหญ่จะใช้ในเครื่องจักรกลเชิงโรตารีและเครื่องจักรกล 3 เฟสอื่น ๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สำหรับ decouple control ของอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบ decouple control สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถสร้างได้โดยการควบคุมปริมาณของแต่ละแกน

กำหนดให้ V_{abc} เป็นแรงดันแต่ละเฟสของพิกัด $a-b-c$ และ V_{0dq} เป็นแรงดันในพิกัด $0-d-q$ จะได้

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad V_{0dq} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

ดังนั้น แรงดันในพิกัด $a-b-c$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-d-q$ ได้ดังสมการที่ (4-3)

$$V_{0dq} = R(\theta)P(0)V_{abc} \quad (4-3)$$

โดยที่ $\theta = \omega t = 2\pi ft$

$$\text{Coordinate axis transformation } P(0) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad abc \Rightarrow 0dq \quad (4-4)$$

เมื่อนำมาพิจารณาที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) จึงต้องมีการย้ายตัวแปรที่อยู่บนสเตเตอร์ให้ไปอยู่บนโรเตอร์โดยอาศัยหลักการทฤษฎีกรอบอ้างอิง (reference frame theory) ซึ่งการย้ายแกนจะหมุนห่างกันเท่ากับ θ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (4-3) (4-4) และ (4-5) สามารถแปลงแรงดันในพิกัด $a-b-c$ ให้อยู่ในพิกัด $0-d-q$ ได้ดังสมการที่ (4-6) [21]

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

4.3.3 วิธีการแปลงพิกัด

วิธีการแปลงพิกัดนั้นมาจากทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (instantaneous power theory) โดยที่มันมาจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous active power) ส่วนคิวกับอาร์

นั้นจะมาจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ซึ่งจะใช้พิจารณาในระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยทั้ง 3 องค์ประกอบนี้จะอิสระเชิงเส้นต่อกัน [17] ซึ่งในการใช้วิธีการแปลงพีคิวอาร์ แรงดันอ้างอิงทั้ง 3 ในพิกัด $p-q-r$ จะกลายเป็นรูปแบบที่ง่ายโดยจะกลายเป็นค่าดีซี ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมในพิกัด $p-q-r$ ก็จะง่ายตามไปด้วย โดยอัลกอริทึมในการควบคุมการชดเชยนั้นสามารถใช้ได้ครอบคลุมความผิดปกติของแรงดันชนิดต่าง ๆ ได้ และสามารถอธิบายวิธีการแปลงพีคิวอาร์ได้ดังนี้

แรงดันเฟสของพิกัด $a-b-c$ ของระบบ 3 เฟส สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ได้ดังสมการที่ (4-7)

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

ถ้าแรงดันสมดุล V_{aREF}, V_{bREF} และ V_{cREF} จะเป็นแรงดันอ้างอิงในพิกัด $a-b-c$ ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ได้ดังสมการที่ (4-8)

$$V_{REF} = \begin{bmatrix} V_{aREF} \\ V_{bREF} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aREF} \\ V_{bREF} \\ V_{cREF} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

เมื่อแรงดันอ้างอิงเป็นแรงดันสมดุล จะไม่มีองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ (V_{0REF}) จะมีเพียงแรงดันอ้างอิง V_{aREF}, V_{bREF} ที่ตั้งจากบนระนาบ $\alpha-\beta$ ดังนั้นเราจะใช้แรงดันอ้างอิง V_{aREF}, V_{bREF} ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ในการเชื่อมโยงเมทริกซ์ ซึ่งแรงดันในพิกัด $0-\alpha-\beta$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $p-q-r$ โดยสมการที่ (4-9)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_{aREF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{bREF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 0 & -\frac{V_{bREF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{aREF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

โดยที่

$$V_{\alpha\beta REF} = \sqrt{V_{aREF}^2 + V_{bREF}^2}$$

จากสมการที่ (4-7) และ (4-9) แรงดันในพิกัด $a-b-c$ สามารถแปลงให้อยู่ในพิกัด $p-q-r$ ได้ดังสมการที่ (4-10)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

โดยที่

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 0 & -\frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

และสามารถแปลงกลับจากพิกัด $p-q-r$ ให้อยู่ในพิกัด $a-b-c$ ได้ดังสมการที่ (4-12)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

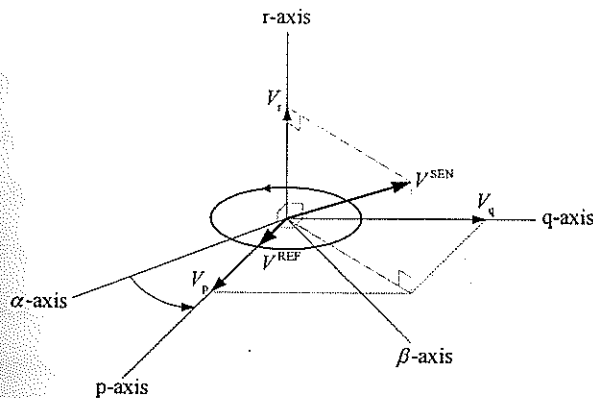
โดยที่

$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & -\frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & 0 \\ \frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

ความหมายทางกายภาพของการแปลงพิกัด (pqr transformation) แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 รูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} จะหมุนบนระนาบ $\alpha-\beta$ โดยทำมุมขณะหนึ่ง $\theta(t) = \tan^{-1}(V_{\beta REF}(t)/V_{\alpha REF}(t))$ จากแกน α โดยแกน p จะอยู่แนวเดียวกับรูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} แกน q จะตั้งฉากกับแกน p บนระนาบ $\alpha-\beta$ และแกน r จะเท่ากับแกน 0 ในพิกัด $0-\alpha-\beta$ ดังนั้นแกน p และแกน q จะหมุนบนระนาบ $\alpha-\beta$ โดยทำมุมขณะหนึ่ง $\theta(t)$ จากแกน α และแกน β ตามลำดับ โดยแกน r จะกลายเป็นหมอนอยู่ในพิกัด $p-q-r$

นอกจากนั้นปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} สามารถแยกเป็นองค์ประกอบพี (p-component) V_p องค์ประกอบคว (q-component) V_q และองค์ประกอบอาร์ (r-component) V_r โดยวิธีการแปลงพีคิวอาร์ในสมการที่ (4-10) โดยปกติ V_p และ V_q จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซี (dc-component) และองค์ประกอบเอซี (ac-component) ในขณะที่ V_r จะมีแต่องค์ประกอบเอซีเท่านั้น องค์ประกอบดีซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากองค์ประกอบลำดับบวกของแรงดันที่ส่งเข้ามาทั้ง 3 เฟส องค์ประกอบเอซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากสภาพแรงดันที่ผิดปกติ เช่น ความไม่สมดุล หรือฮาร์โมนิกส์ ส่วนองค์ประกอบเอซีของ V_r จะมาจากองค์ประกอบลำดับศูนย์ของแรงดันที่ส่งเข้ามาทั้ง 3 เฟส

เมื่อแรงดันทั้ง 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์และสมดุล ตำแหน่งของปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} จะอยู่ในพื้นที่วงกลมบนระนาบ $\alpha-\beta$ ถ้าแรงดันทั้ง 3 เฟสอินเฟสกับรูปคลื่นอ้างอิงทั้ง 3 เฟส ปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} จะอยู่ในแนวเดียวกันกับรูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} ในกรณีนี้ V_q และ V_r จะไม่มีค่า ในขณะที่ V_p จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซีเท่านั้นและจะมีค่าเท่ากับ $|V^{SEN}|$ [16] ซึ่งสภาพของแรงดันนี้จะเป็นจุดมุ่งหมายสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยดี-สแตตคอม



รูปที่ 4.3 แผนภาพเวกเตอร์ขององค์ประกอบการแปลงพีคิวอาร์

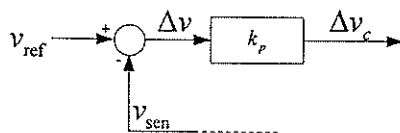
4.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอมนั้นขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมระดับแรงดัน โหลด โดยการรักษาระดับแรงดัน โหลดนั้นจะใช้ข้อมูลจากการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่โหลดแต่ละเฟส ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่ได้กล่าวมาแล้วมีทั้งสิ้น 3 วิธี คือ วิธีการากำลังสองเฉลี่ยแบบโกล วิธีการแปลงพาร์กและวิธีการแปลงพีคิวอาร์ ซึ่งแต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดสภาวะการทำงานผิดปกติหรือเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดตกชั่วขณะ แรงดัน ไฟฟ้านี้จะถูกแปลง

แรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม เพื่อปรับสภาพสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปให้ดี-สแตคคอมสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ นอกจากนั้นตัวควบคุมจะต้องมีความไวในการตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง และสามารถสั่งให้ดี-สแตคคอมทำงานได้อย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมจะต้องมีความแม่นยำในการปรับระดับแรงดันที่ไปชดเชยให้พอเหมาะกับสภาวะผิดปกติ นั้น ซึ่งเทคนิคการควบคุมแรงดันนั้นใช้หลักการควบคุมแบบพี รายละเอียดมีดังนี้

4.4.1 ตัวควบคุมแบบพี (P-controller)

ตัวควบคุมแบบพี จะเป็นการควบคุมเอาต์พุตของตัวควบคุมโดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมหรือค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพี (k_p) เพื่อให้เอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ไวตามความต้องการและทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ข้อเสียซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวควบคุมแบบพี คือไม่สามารถกำจัดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว (steady-state error) ที่เกิดขึ้นหลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ซึ่งจะเกิดขึ้นกับตัวควบคุมแบบพีในทุก ๆ ค่า k_p ในทางทฤษฎีค่าผิดพลาดสถานะคงตัวสามารถกำจัดได้โดยการปรับค่าสัญญาณควบคุมอีกครั้ง หลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม วิธีกรนี้ไม่ได้เป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากต้องอาศัยผู้มีความชำนาญในการปรับแต่ง การแก้ไขปัญหานี้ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวควบคุมแบบไอ (I-controller) เข้ามาช่วยซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น เนื่องจากการควบคุมแบบไอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าการควบคุมเพื่อลดค่าผิดพลาดสถานะคงตัวจนกระทั่งค่าความผิดพลาดนั้นเป็นศูนย์ ในการควบคุมระบบบางระบบที่ไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว ตัวควบคุมแบบพีก็มีความเหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตามตัวควบคุมพีจะสามารถทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อได้รับการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม [9] ในงานวิจัยนี้เราจะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคหาจุดฉลาด (intelligent optimization technique) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms: GA)



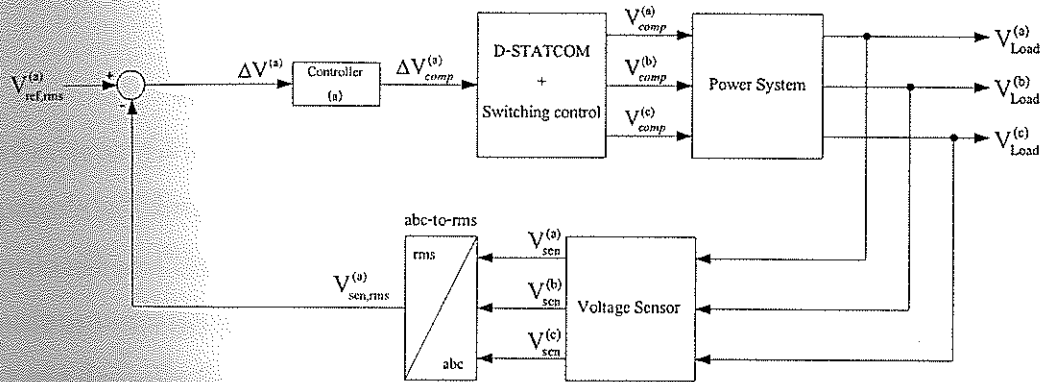
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี

จากรูปที่ 4.4 สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ได้ดังนี้

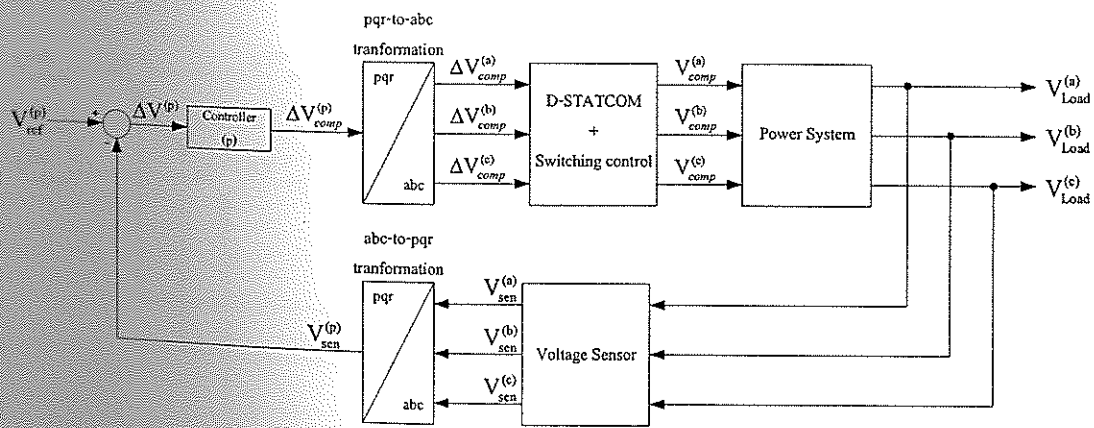
$$\Delta v_c = k_p \Delta v \quad (4-14)$$

เทคนิคการควบคุมระดับแรงดันที่นำเสนอนี้ใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) ซึ่งเป็นหลักการควบคุมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยจะใช้หลักการนี้หาขนาดและมุมเฟสของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติในขณะเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบที่ (k_p) นั้น ใช้เทคนิคขบวนการวิชันเนติกอัลกอริทึมโดยจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งจะมีความรุนแรงมากที่สุด และชนิดเฟสเดียวลงดิน ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติมากที่สุด โดยแต่ละชนิดจะมีเทคนิคการควบคุมแรงดันดังนี้ [1],[2]

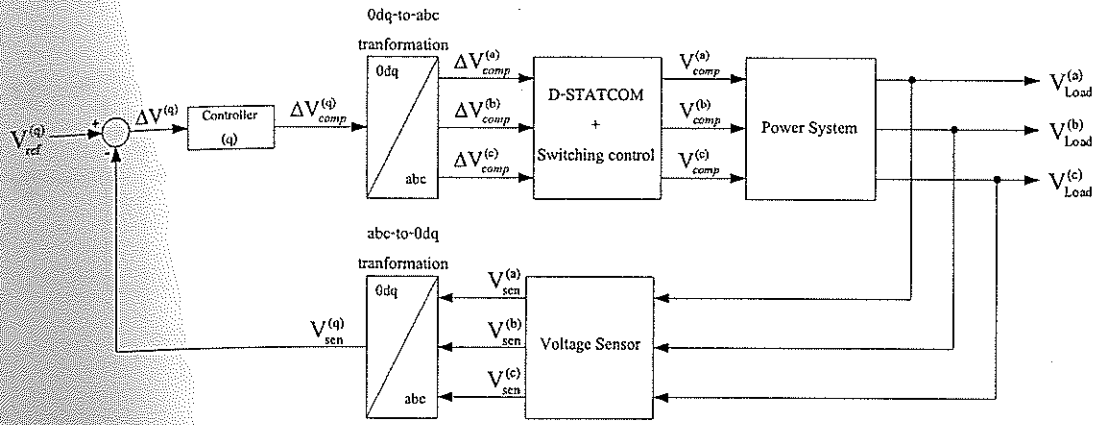
1. ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.5 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไกลด เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



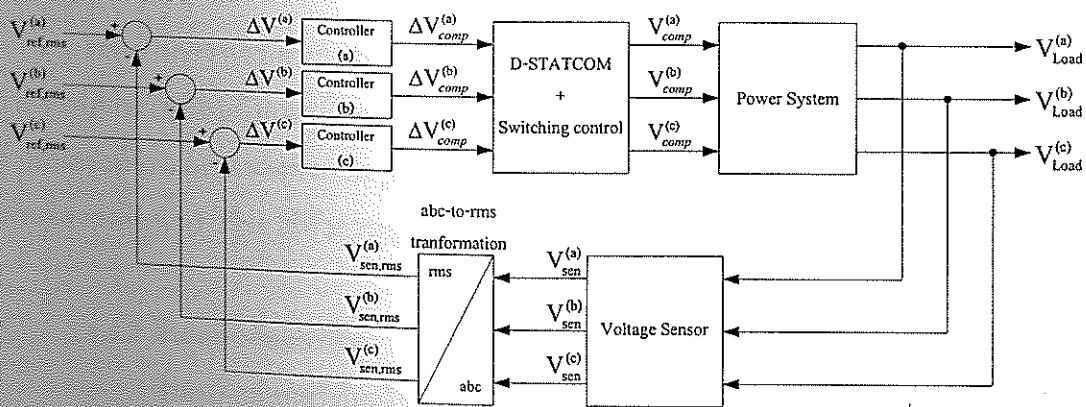
รูปที่ 4.6 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงพิกิวอาร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



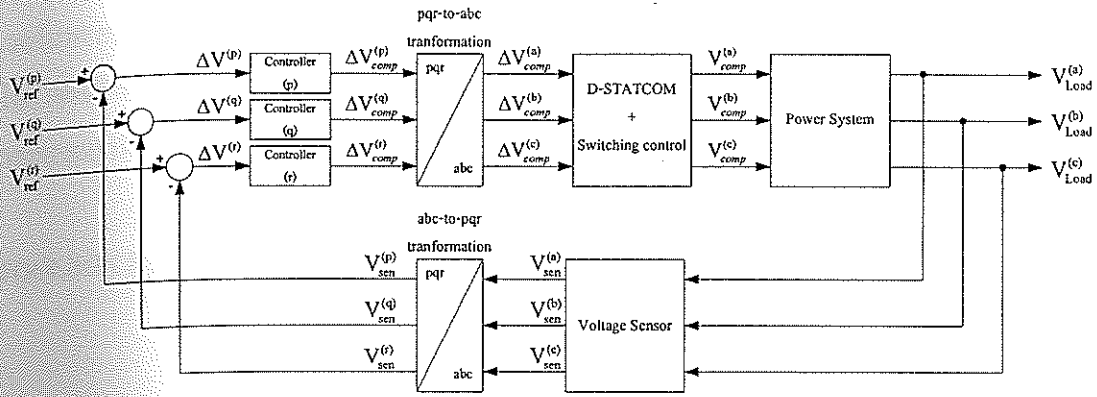
รูปที่ 4.7 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพาร์ก
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

จากวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีจะพบว่า การควบคุมด้วยเทคนิคทั้งสามใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวเท่านั้น คือ เทคนิคการกำกับสองเฉลี่ยแบบโกลใช้ตัวควบคุมเฟสใดก็ได้เฟสหนึ่ง เทคนิคการแปลงพาร์กใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบคว ส่วนเทคนิคการแปลงพิลิวอาร์ใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบพี เพราะว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นเป็นชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งเราทำการปรับค่าตัวควบคุมเพียงตัวเดียวจะทำให้เกิดผลการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 เฟส ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวก็เพียงพอที่จะชดเชยระบบให้เป็นปกติได้

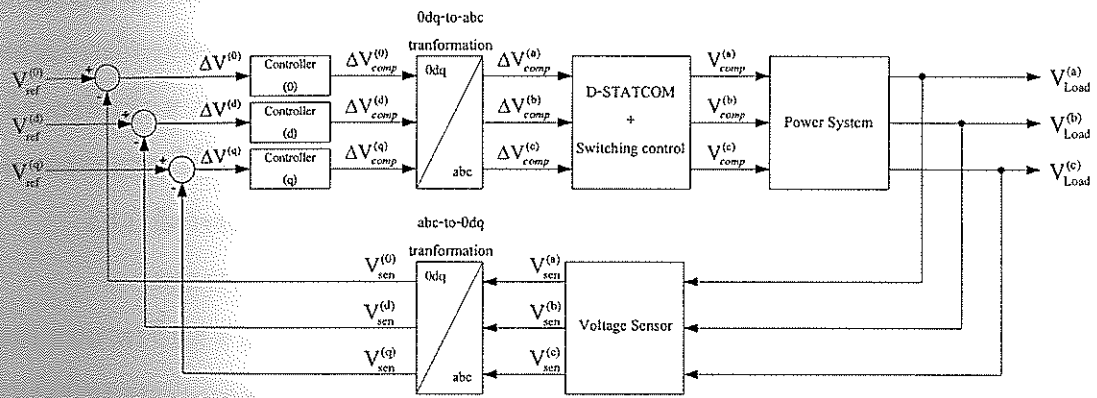
2. ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.8 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีกำกับสองเฉลี่ยแบบโกล
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.9 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงพิกัดอาร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.10 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงพาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

เทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเหมือนกับเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร จะต่างกันตรงที่จำนวนชุดของตัวควบคุมเท่านั้น โดยเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินทั้ง 3 วิธีจะใช้ตัวควบคุมทั้ง 3 ชุดควบคุมทั้ง 3 เฟส

4.4.2 จีนเนติกอัลกอริทึม

จีนเนติกอัลกอริทึมเป็นการจำลองกระบวนการวิวัฒนาการในระดับยีน [13],[20] โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย จากนั้น ประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โครโมโซมที่ถูกเลือกในแต่ละรุ่นการถ่ายทอด (generation) เท่านั้นที่มีสิทธิ์สร้างลูกหลานหรือทายาทในรุ่นถัดไป การสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธุ์ ซึ่งประกอบด้วย ครอสโอ

เวอร์และการผ่าเหล่า ลูกหลานหรือทายาทที่ถูกสร้างขึ้นจะแทนที่โครโมโซมต้นแบบโดยสมบูรณ์ โดยใช้หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Darwin's natural selection) สามารถสร้างผลเฉลยที่ดีได้จากกระบวนการนี้

งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดต่อไปนี้โดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX [23]

$$\text{Minimize } f(x) = \sum (V_{ref}^{abc} - V_{sen}^{abc})^2$$

4.5 ผลการทดสอบ

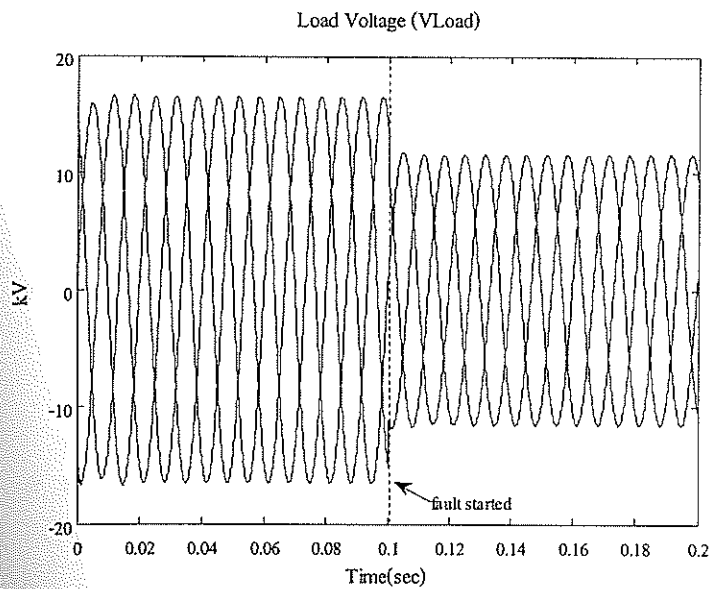
ในการจำลองผลดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร จะใช้ระบบทดสอบ 4 บัส มาทำการทดสอบ ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 โดยจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 และชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ที่เวลา 0.1 วินาที และใช้เวลาในการจำลองผลทั้งสิ้น 0.2 วินาที ซึ่งผลทดสอบแสดงได้ดังนี้

4.5.1 ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

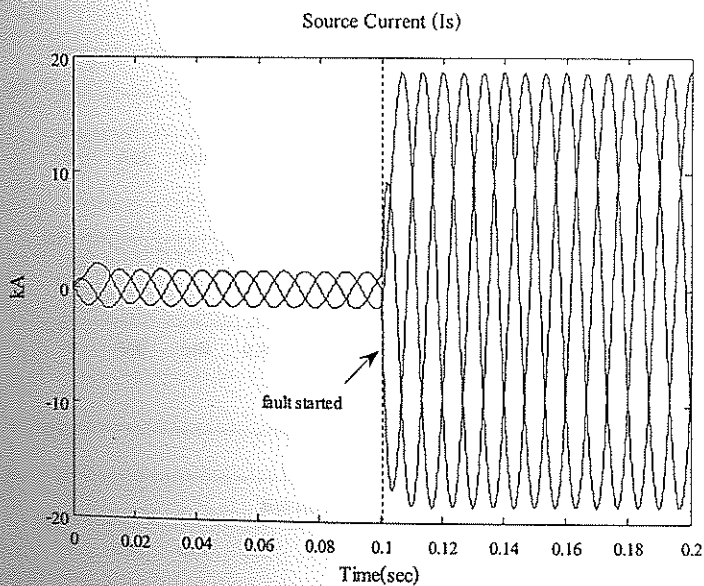
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

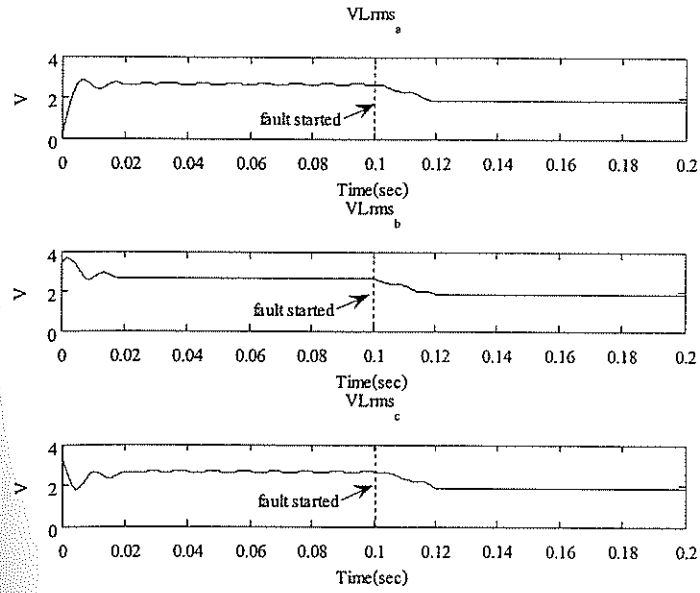
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 ทั้ง 3 เฟส ลดลงจากสถานะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสถานะผิดปกติสามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15



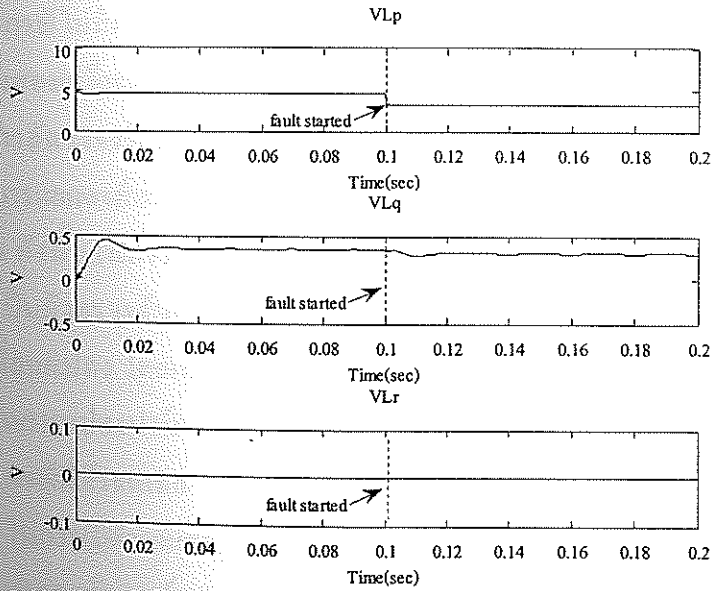
รูปที่ 4.11 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



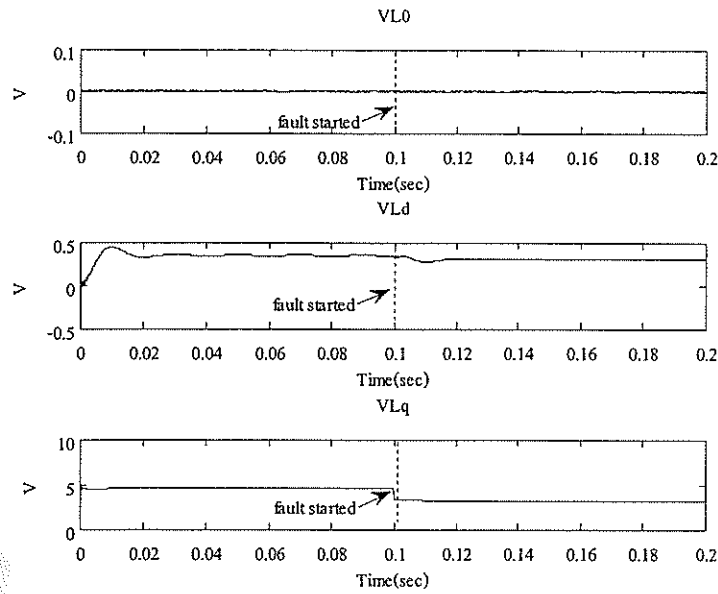
รูปที่ 4.12 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.13 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.14 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.15 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 แสดงแรงดัน โหลดที่ได้จากการใช้วิธีการกำจัดสองเหลี่ยมแบบไกล วิธีการแปลงพิกิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะเกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.13 แรงดันทั้ง 3 เฟสมีค่าลดลง รูปที่ 4.14 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ p จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงพิกิวอาร์ จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ p เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ ในรูปที่ 4.15 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ q จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงปาร์ก จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ q เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีดีที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปร้อง ได้ดังนี้

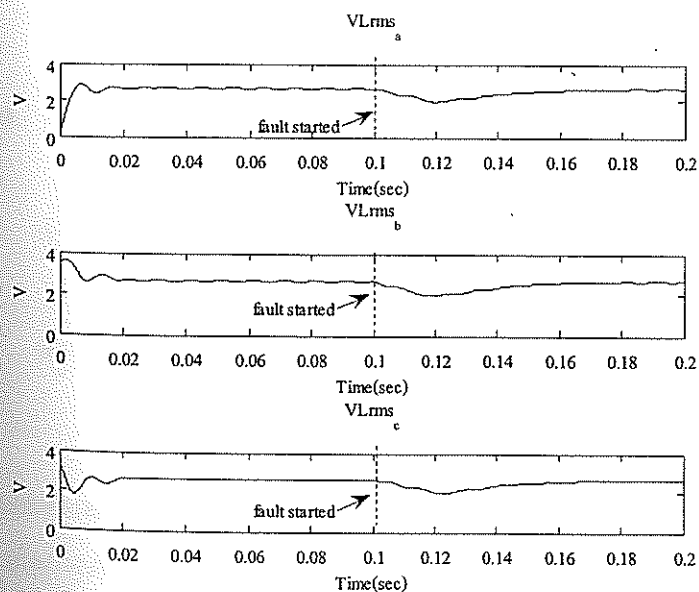
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^{abc} \in [0, 0.1]$, $k_p^{pqr} \in [5, 15]$, $k_p^{0dq} \in [5, 15]$

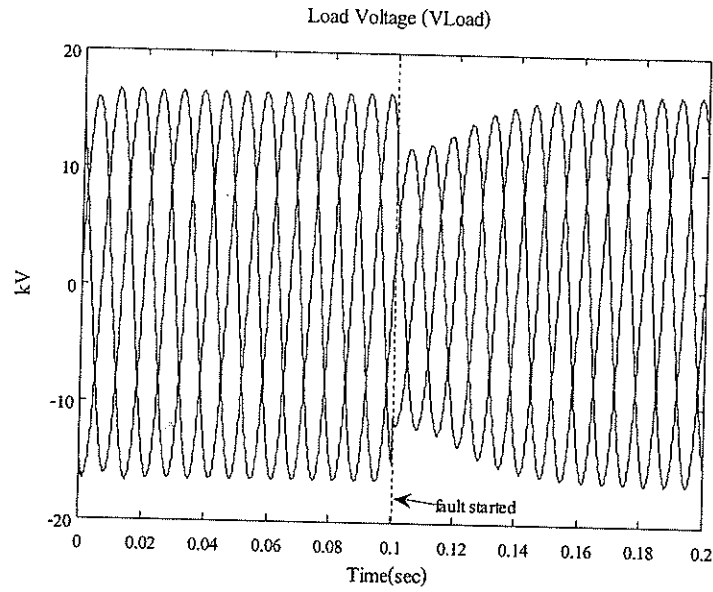
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่ารากล้างสองเฉลี่ยแบบ ไกล	$k_p^{abc} = 0.056$
- การแปลงพีคิวอาร์	$k_p^{pqr} = 11.7770$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^{0dq} = 11.7643$

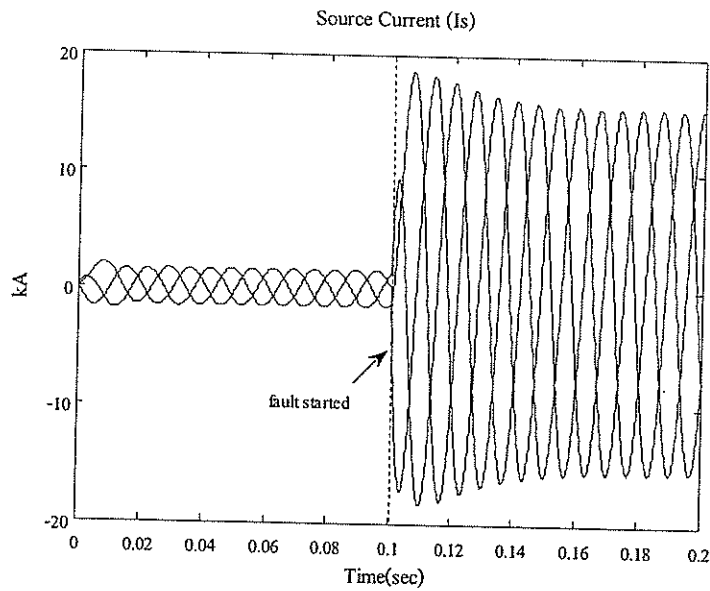
- วิธีค่ารากล้างสองเฉลี่ยแบบ ไกล



รูปที่ 4.16 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

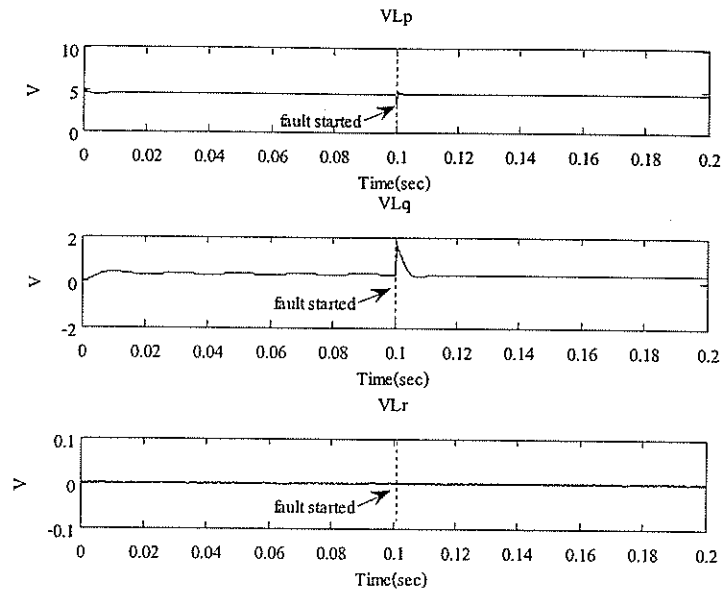


รูปที่ 4.17 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

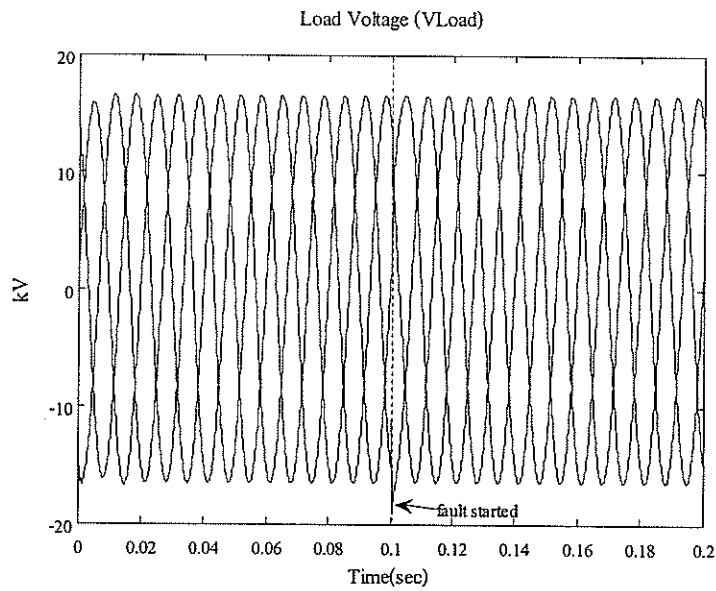


รูปที่ 4.18 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

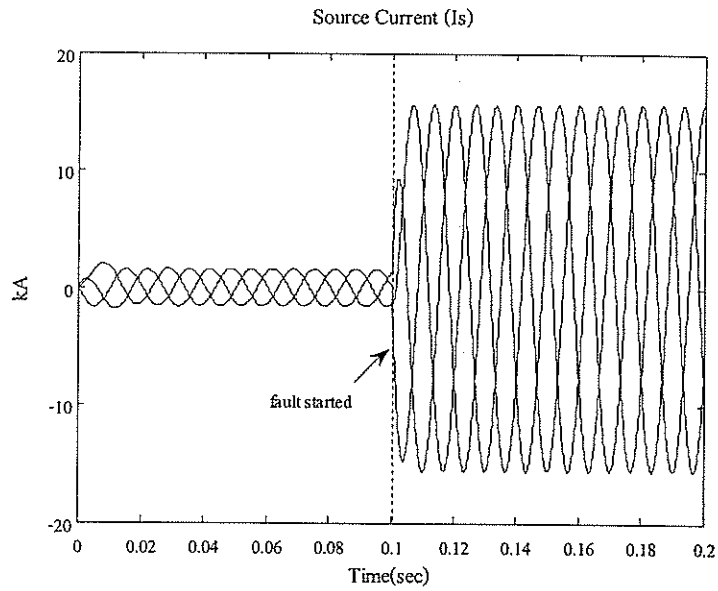
- วิธีการแปลงฟิวอาร์



รูปที่ 4.19 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
 ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

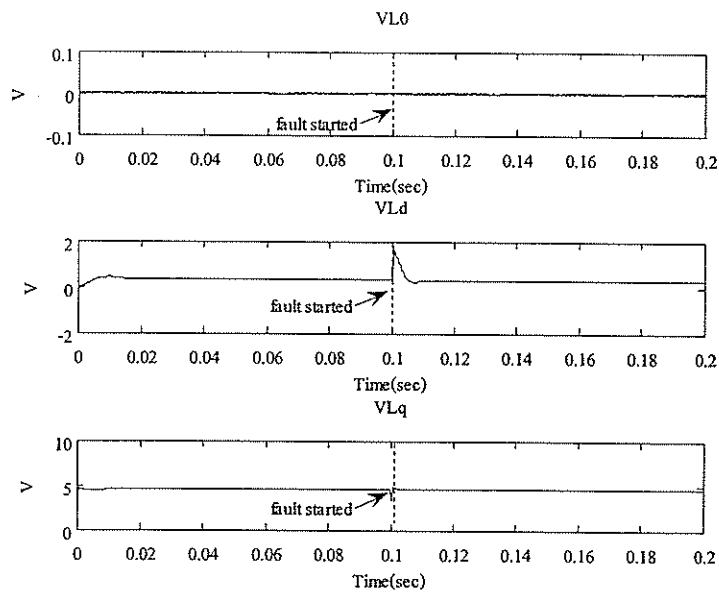


รูปที่ 4.20 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
 ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

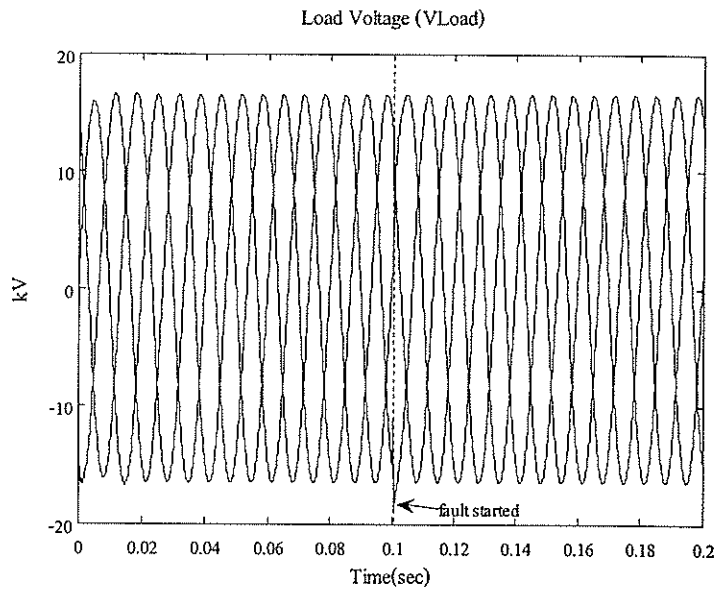


รูปที่ 4.21 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

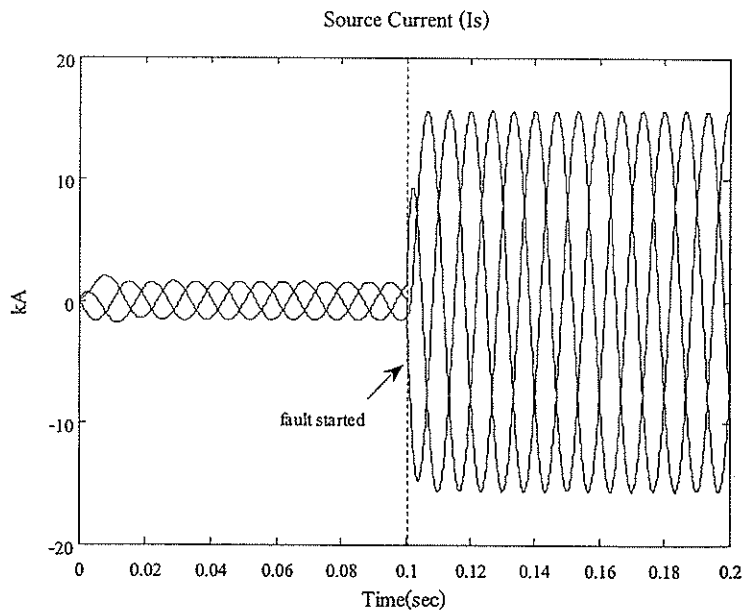
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 4.22 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.23 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.24 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

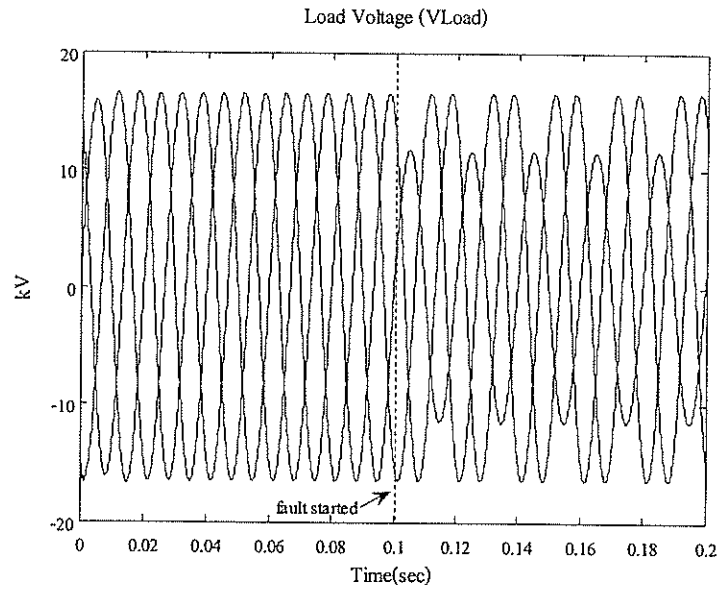
ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่คกร้อมโหลด แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 4.19 และ 4.22 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรที่บัส 4 ทำให้แรงดัน rms ที่โหลดตก แรงดัน โหลดขององค์ประกอบ p-q ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ดี-สแตตคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไกลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 64.3 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ใช้เวลาในการชดเชยแรงดันเท่ากับ คือ 1.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น รูปที่ 4.17 4.20 และ 4.23 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม ส่วนรูปที่ 4.18 4.21 และ 4.24 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไกลจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด

4.5.2 ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

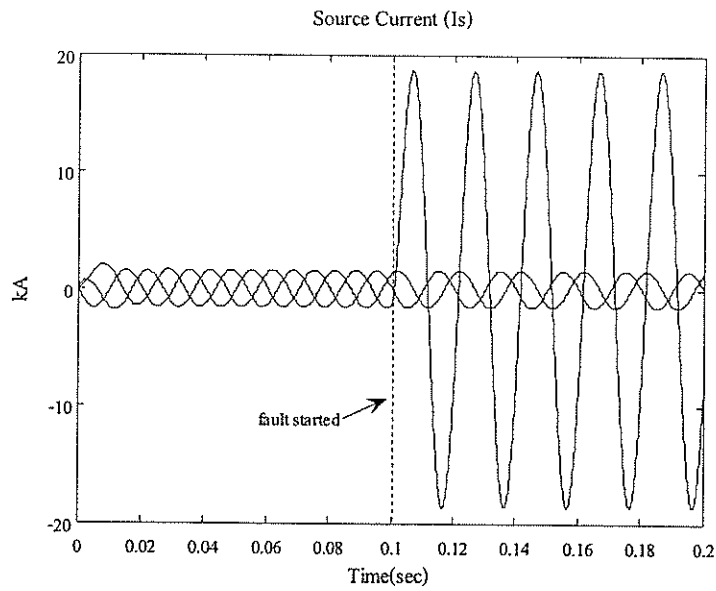
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัส โหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

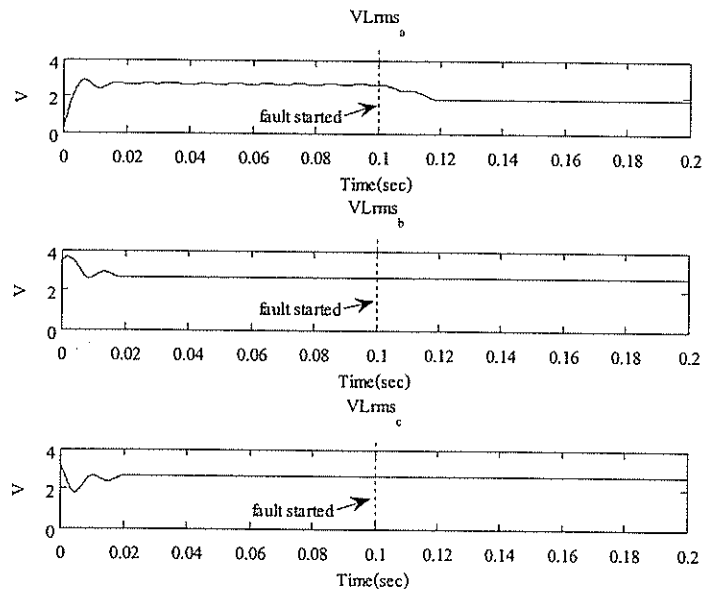
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 เฟส a ลดลงจากสภาวะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเฟส a มีค่าเพิ่มขึ้นมา เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติ สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29



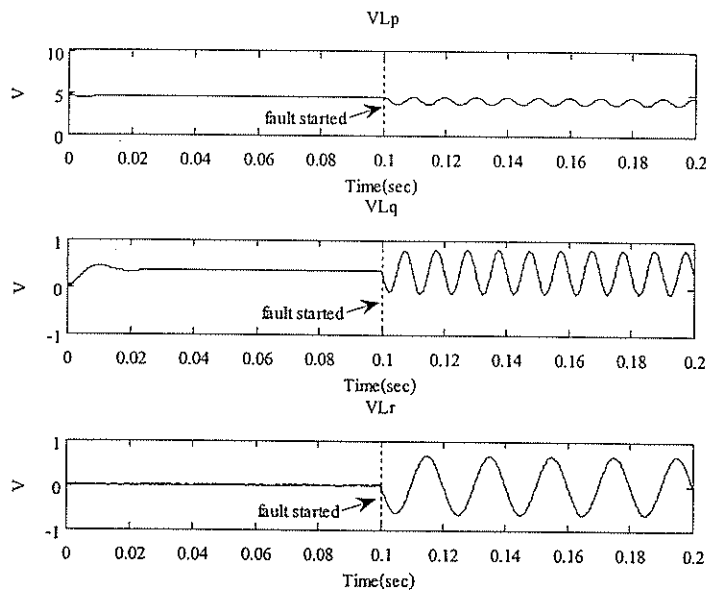
รูปที่ 4.25 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



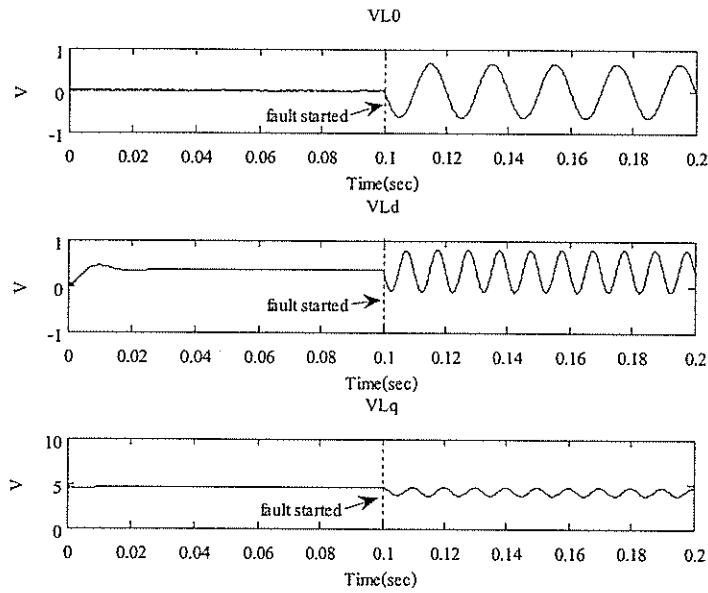
รูปที่ 4.26 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.27 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.28 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.29 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29 แสดงแรงดัน โหลดที่ได้จากการใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล วิธีการแปลงพีคิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะที่เกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.27 แรงดันที่เฟส a มีค่าลดลง รูปที่ 4.28 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้ รูปที่ 4.29 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q จะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังเช่นวิธีการแปลงพีคิวอาร์ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้เช่นกัน

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจีนเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีคิที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

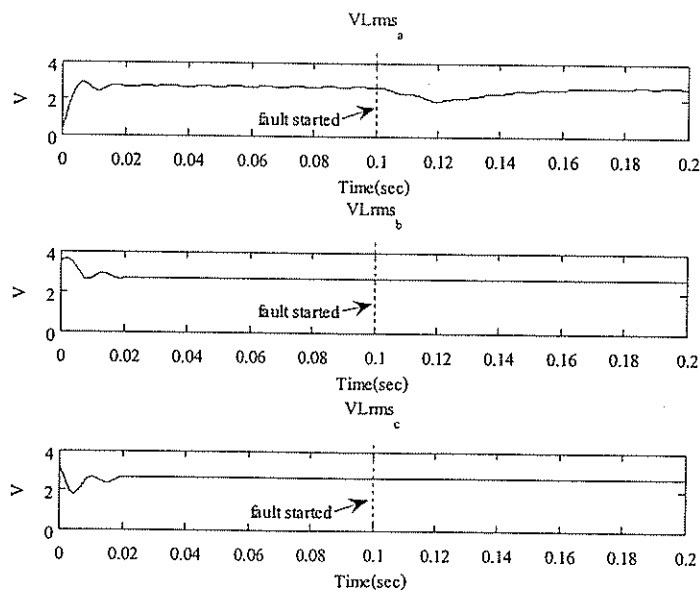
Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^a \in [0,0.1]$, $k_p^{pq^r} \in [0,0.5]$, $k_p^{dq} \in [0,0.5]$

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

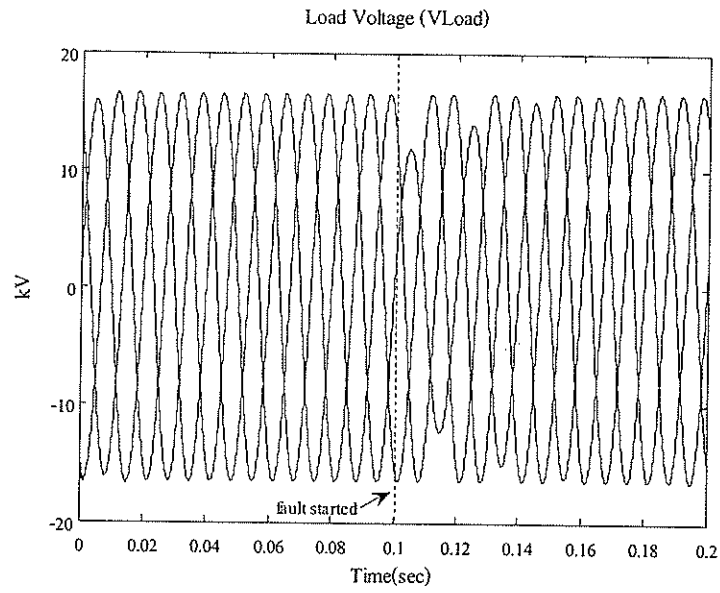
ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่าราคาล้างสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^a = 0.056$
- การแปลงพีคิวอาร์	$k_p^p = 0.15796$, $k_p^q = 0.28130$, $k_p^r = 0.22188$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^0 = 0.22378$, $k_p^d = 0.25697$, $k_p^s = 0.18165$

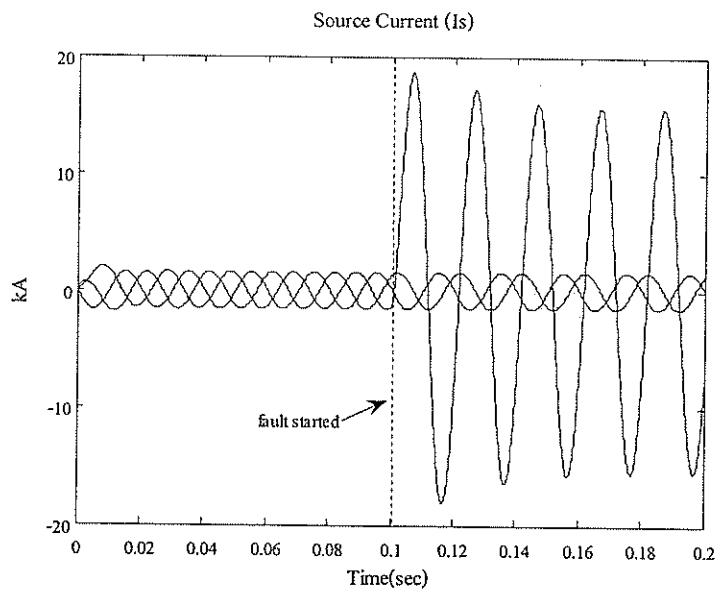
- วิธีค่าราคาล้างสองเฉลี่ยแบบไถล



รูปที่ 4.30 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

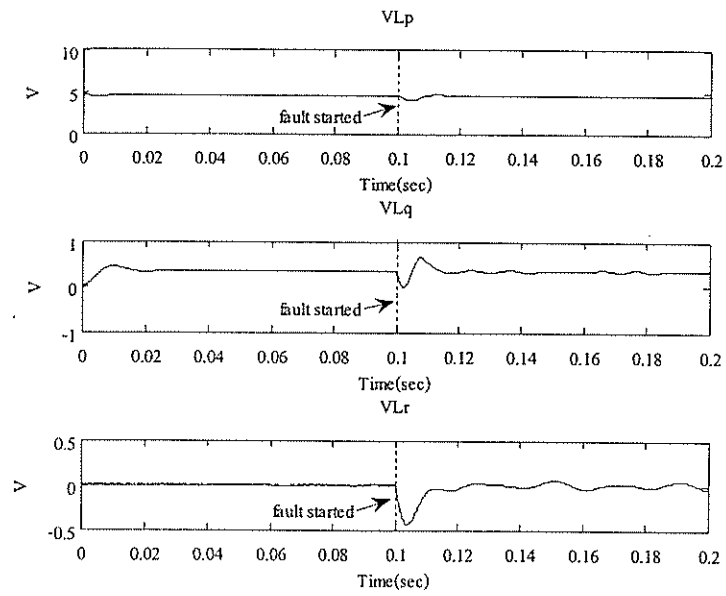


รูปที่ 4.31 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

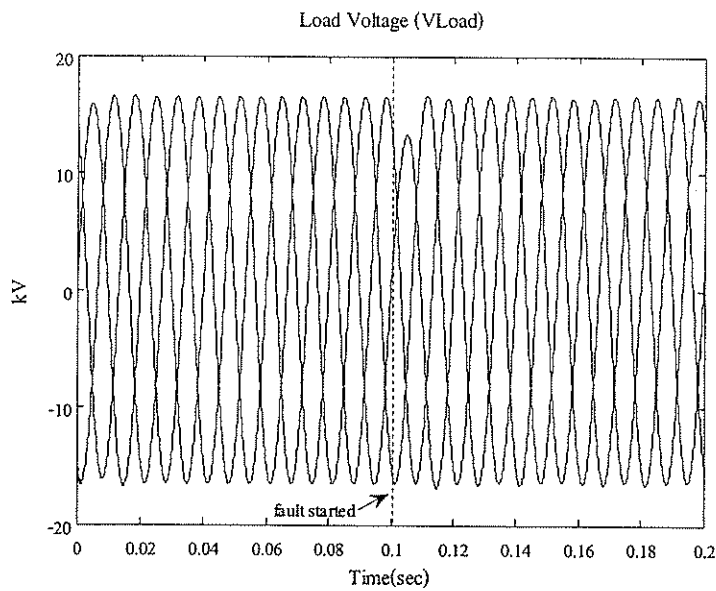


รูปที่ 4.32 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

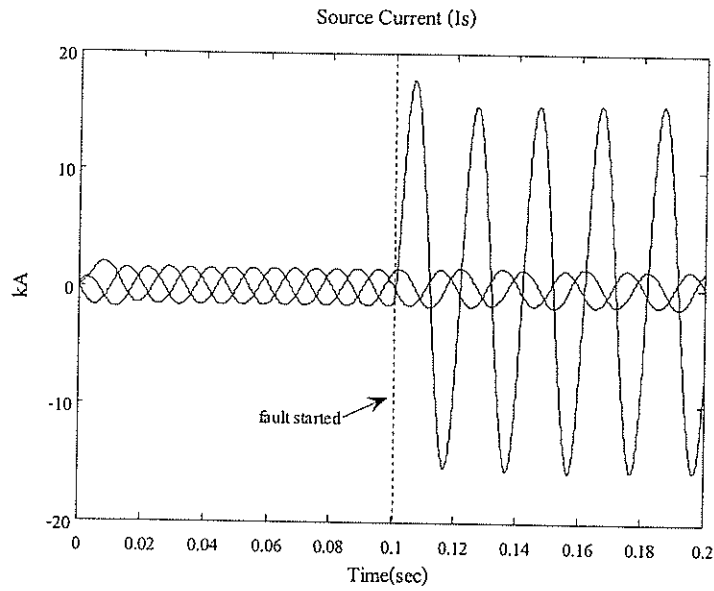
- วิธีการแปลงฟิวอาร์



รูปที่ 4.33 แรงดันโวลต์ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

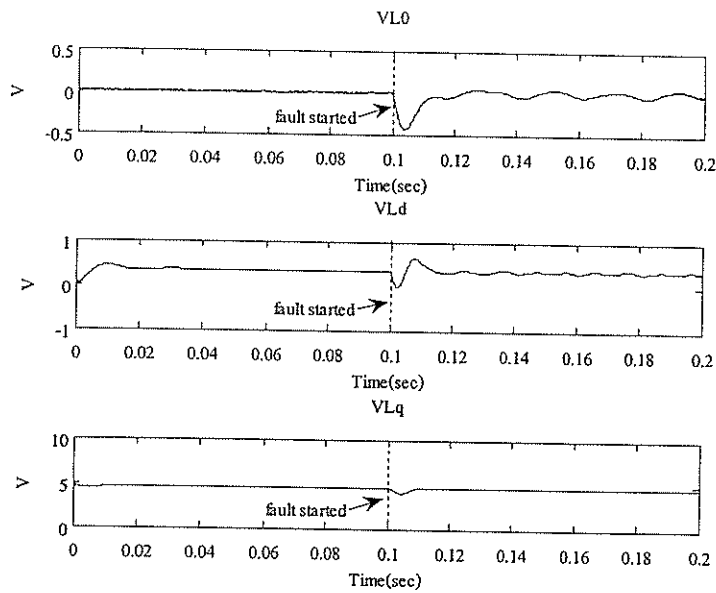


รูปที่ 4.34 แรงดันเฟสที่โวลต์เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

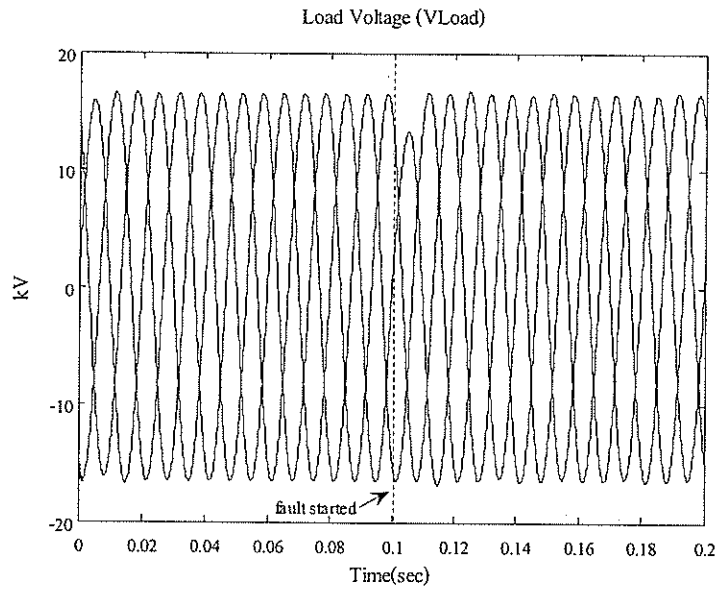


รูปที่ 4.35 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

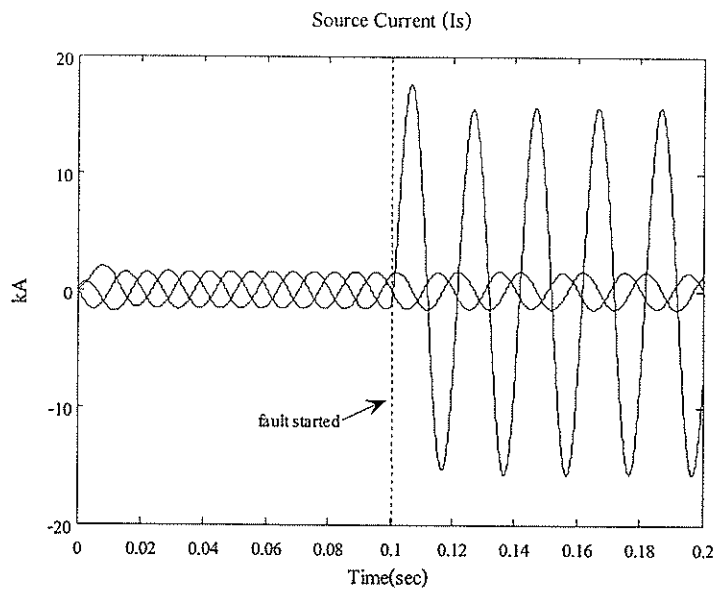
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 4.36 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.37 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.38 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติแรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ตกคร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที

กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ทำให้แรงดัน rms เฟส a ที่โหลดตกแรงดัน โหลดขององค์ประกอบ p-q-r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0-d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q ลดลง ทำให้ดี-สแตคคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจรซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถล ใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 70 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิวอาร์และเทคนิคการแปลงปาร์กใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 8.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น แต่องค์ประกอบ r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0 ในกรอบอ้างอิง 0-d-q มีการแกว่งของแรงดันเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.31 4.34 และ 4.37 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถล เทคนิคการแปลงฟิวอาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจร จากรูปกราฟทั้งสามจะเห็นว่าแรงดันที่เฟส a ตกลง และเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม ส่วนรูปที่ 4.32 4.35 และ 4.38 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถล เทคนิคการแปลงฟิวอาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามจะเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม โดยสังเกตได้ว่าเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถลเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด เหมือนกับในกรณีการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร

4.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถล วิธีการแปลงฟิวอาร์ และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินในระบบทดสอบ 4 บัส ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ จากการดำเนินงานพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดินดี-สแตคคอมสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร คือ วิธีการแปลงฟิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก สำหรับวิธีกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถลให้ผลตอบสนองที่ช้า เมื่อเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าว และเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน วิธีที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุด คือ วิธีการแปลงฟิวอาร์ วิธีการแปลงปาร์ก และวิธีกำจัดสองเฉลี่ยแบบ ไถลตามลำดับ

บทที่ 5

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์

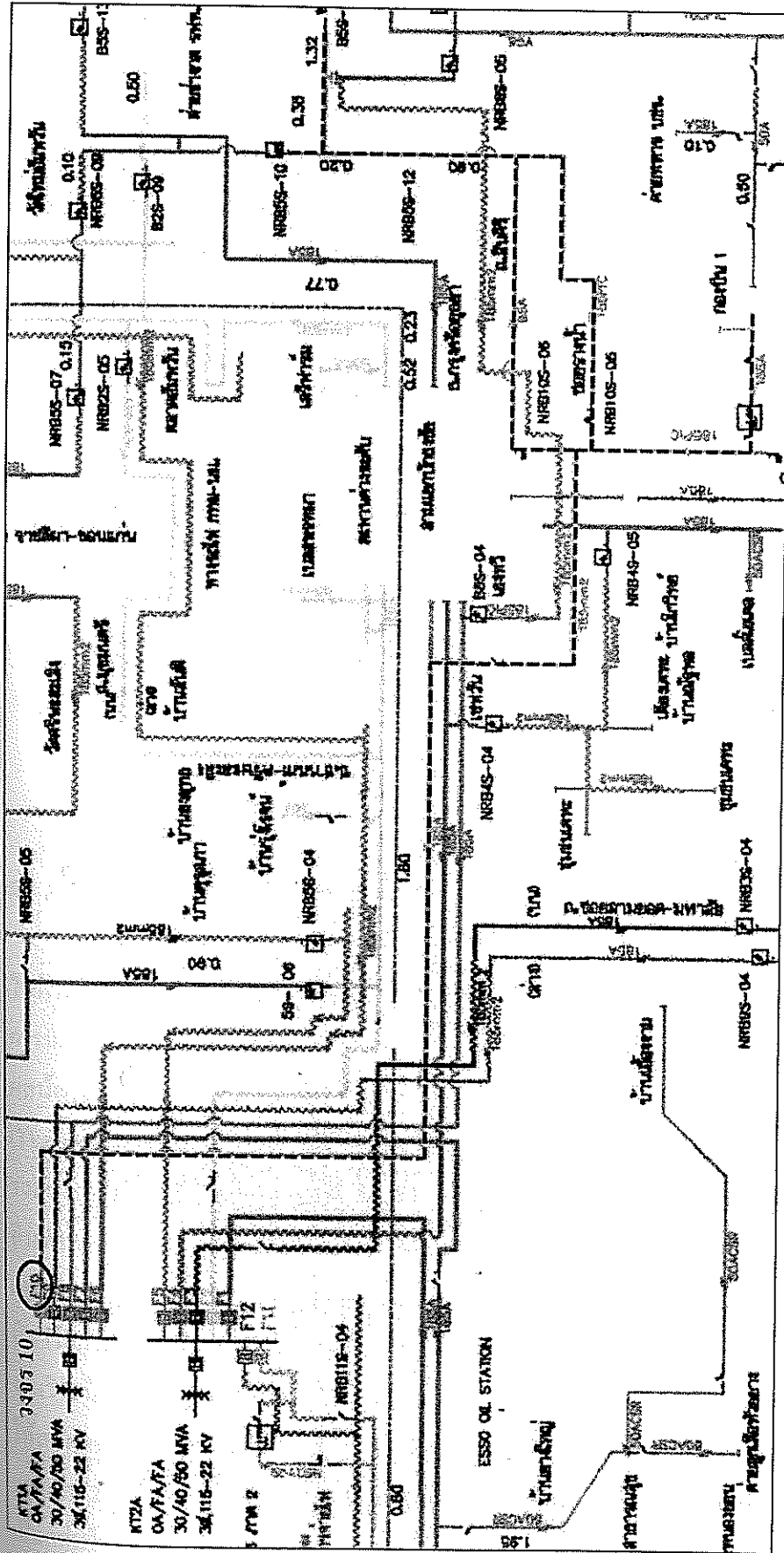
5.1 ความนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรในสถานะชั่วคราว โดยใช้ระบบทดสอบตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ซึ่งจากการดำเนินการที่ผ่านมาทั้ง 2 วิธีนี้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ในสถานะผิดปรong

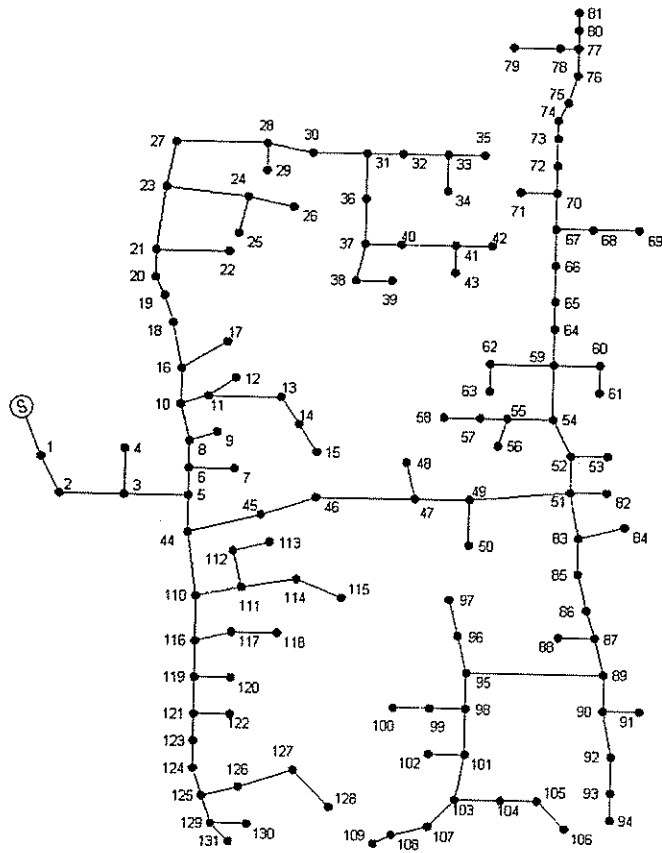
ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) จำนวน 131 บัส ที่นำมาทำการทดสอบนี้เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร ดังนั้นเทคนิคการออกแบบตัวชดเชยของการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร เบื้องต้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 พร้อมทั้งกล่าวถึงเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบชุดควบคุมดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปรongด้วยการสังวจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10)

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 นั้นมีทั้งสิ้น 12 วงจร วงจรที่ 6-10 จ่ายผ่านหม้อแปลง KT1A ในขณะที่วงจรที่ 1-5 และ 11-12 จ่ายผ่านหม้อแปลง KT2A งานวิจัยนี้พิจารณาเพียงวงจรเดียวเท่านั้น คือ วงจร 10 จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 เดินสายไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านถนนมิตรภาพประมาณ 5 กิโลเมตร ลากสายไฟทางทิศใต้สู่การเคหะ จากนั้นสายจ่ายแยกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งไปทางทิศใต้สิ้นสุดที่กองบิน 1 อีกทางหนึ่งลากไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ตามถนนสีปรีและซอยรางน้ำ จนกระทั่งสิ้นสุดที่ถนนพิบูลสงคราม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 วงจรนี้มีบัสทั้งหมด 131 บัส มีโหลดทั้งสิ้น 57 โหลด รวมทั้งสิ้น 3339.593 กิโลวัตต์ 1847.735 กิโลวาร์ ข้อมูลของระบบแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

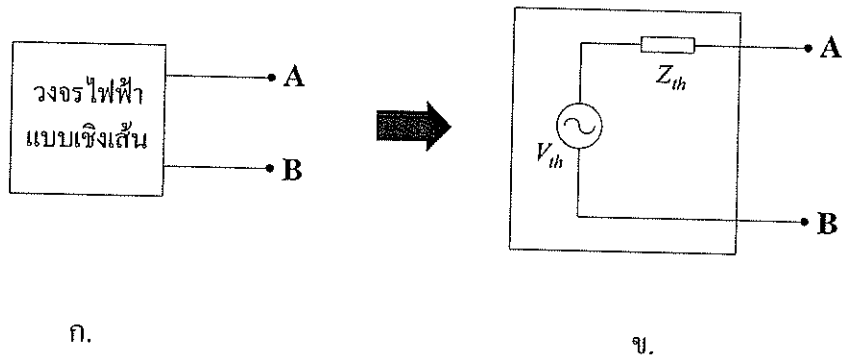


รูปที่ 5.2 ระบบจ่ายกำลัง ไฟฟ้า 22 กิโล โวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10)

5.3 เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ การจำลองผลทั้งระบบ โดยสมบูรณ์ใช้เวลานาน ดังนั้นการนำเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังเข้ามาช่วยในการจำลองผลเพื่อทำให้ใช้เวลาในการจำลองผลน้อยลง เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการทฤษฎีของเทวินิน (Thevenin's theorem) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ในวงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้น (linear network) ใด ๆ สามารถยุบรวมวงจรไฟฟ้าใหม่ได้ ให้กลายเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตัวหนึ่งต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์ตัวหนึ่ง” แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าของเทวินิน (Thevenin's voltage) แทนด้วย V_{th} และค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกับแรงดันไฟฟ้าของเทวินิน เรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของเทวินิน (Thevenin's impedance) แทนด้วย Z_{th} [14] ดังรูปที่ 5.3 ในงานวิจัยนี้การหาค่า V_{th} และ Z_{th} ใช้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน [6] ส่งผลให้ลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังจากทั้งหมด 131 บัส เหลือเพียง 2 บัส เท่านั้น โดยระบบไฟฟ้าถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ โหนด k ที่ตำแหน่งติดตั้งดี-สแตคคอม โหนดที่อยู่หลังตำแหน่งติดตั้งพิจารณาเป็นกลุ่มโหนดที่ถูกป้องกัน

การศึกษาแรงดันสมมูลและอิมพีแดนซ์ของเทวินินทำได้โดยการปลดโหลดที่อยู่หลังตำแหน่งติดตั้งดี-สแตคคอมออก จากนั้นคำนวณผลเฉลยจากโปรแกรมการไหลกำลังไฟฟ้า แรงดันที่บัสติดตั้งดี-สแตคคอม V_k จะมีค่าเท่ากับ V_{th} และอิมพีแดนซ์ $Z_{k,k}$ ที่พิจารณาที่บัสติดตั้งดี-สแตคคอมจะมีค่าเท่ากับ Z_{th}

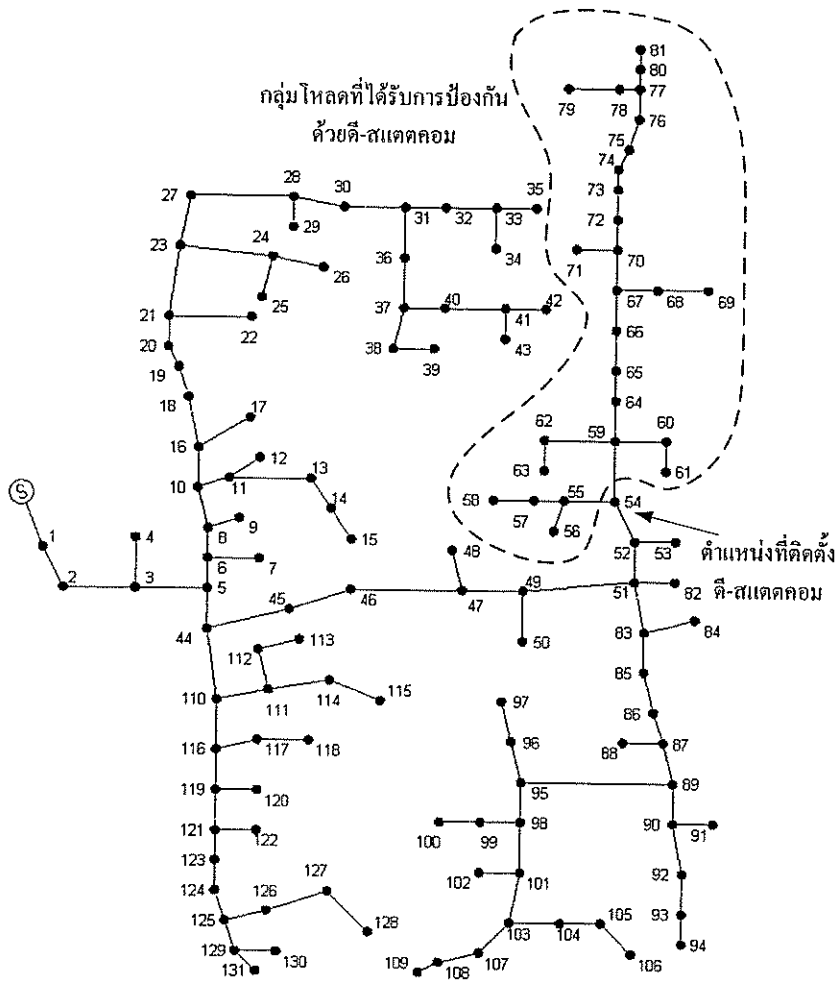


รูปที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใด ๆ และวงจรสมมูลของเทวินิน

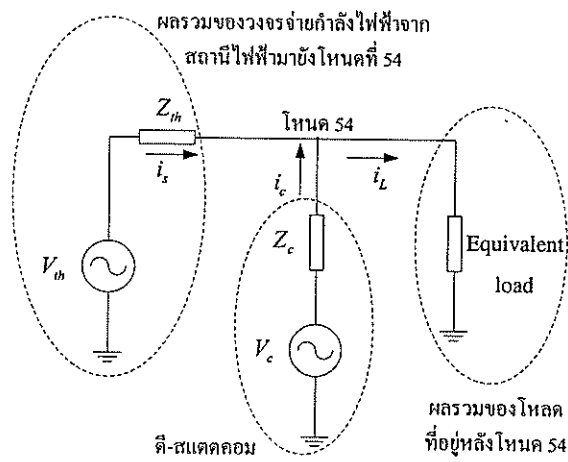
5.4 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร

การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ใช้หลักการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) เป็นระบบทดสอบ และกำหนดให้ติดตั้งดี-สแตคคอมไว้ที่บัส 54 ดังรูปที่ 5.4 โดยใช้เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.3 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลที่ถูกลดทอนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โหลดที่พิจารณาเป็นการรวมโหลดตั้งแต่บัสที่ 54 เป็นต้นไป จนถึงบัสที่ 81 ดังรูปที่ 5.5 เมื่อรวมโหลดแล้วจะได้โหลดรวมที่บัส 54 มีค่าเท่ากับ 286.806 กิโลวัตต์ 158.685 กิโลวาร์

V_{th} และ Z_{th} ของวงจรสมมูลเทวินินของระบบที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร แสดงดังรูปที่ 5.5 สามารถหาค่าได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ค่า V_{th} เท่ากับ $1.0159 \angle -0.1206^\circ$ pu. และค่า Z_{th} เท่ากับ $0.0165 + j0.0310$ โอห์ม การทดสอบจำลองความคิดพ่วงของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมมาตรที่โหลด คือ บัสที่ 54 เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่บัสโหลดลดลง การติดตั้งดี-สแตคคอมที่บัสโหลด เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสถานะลัดวงจรเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังนี้

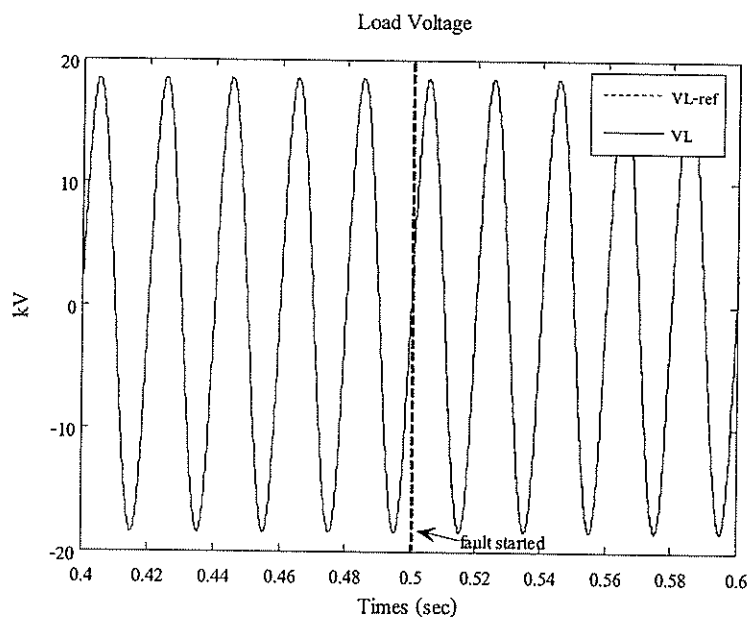


รูปที่ 5.4 การรวมโหลดที่บัส 54

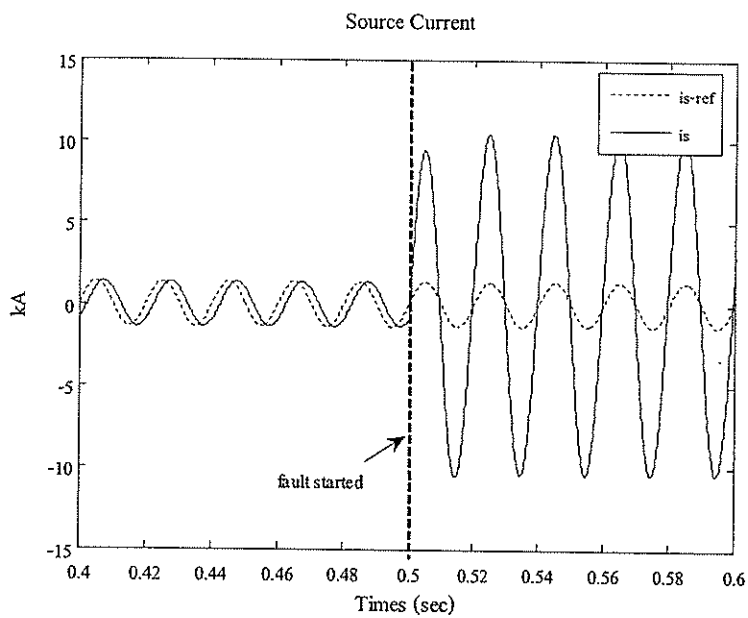


รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

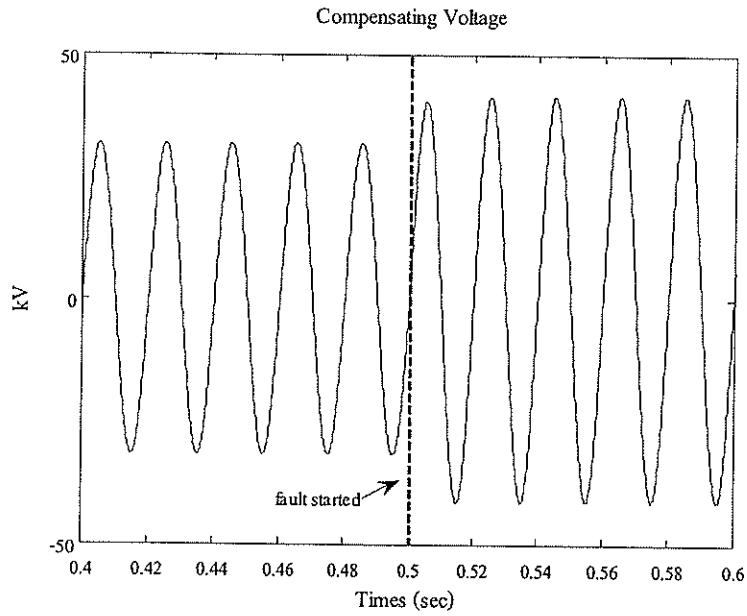
5.4.1 สถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



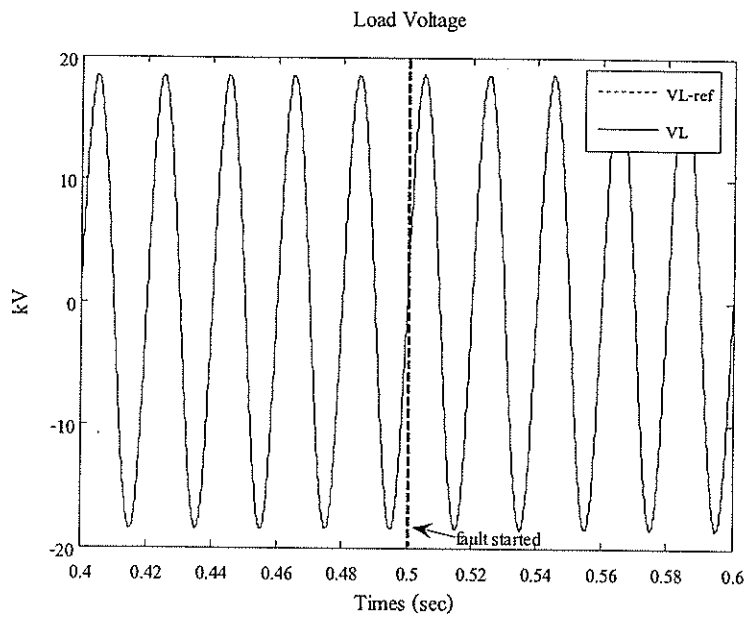
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



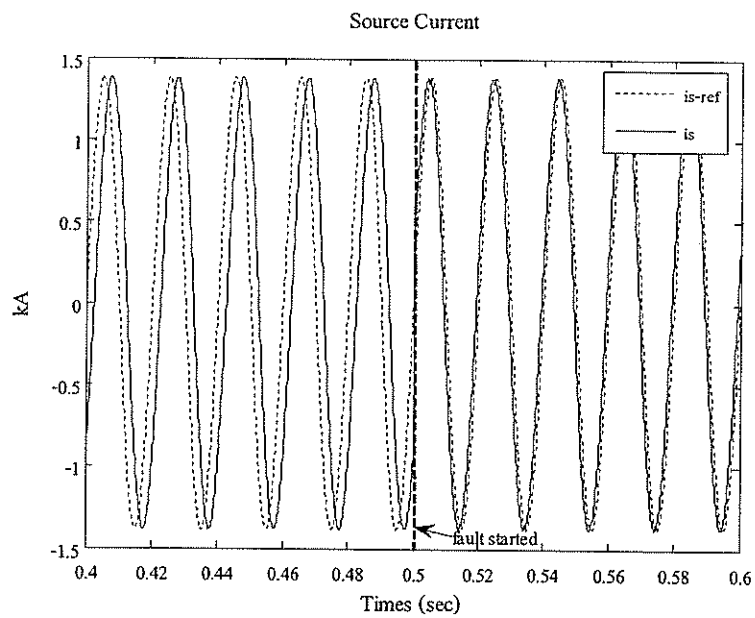
รูปที่ 5.8 แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ เมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ทำให้เกิดแรงดันตกเพียงเล็กน้อยเนื่องมาจากเกิดการลัดวงจร รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง และรูปที่ 5.8 แสดงแรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมสังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบจะมีขนาดแรงดันมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ไม่มาก เพราะเนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด

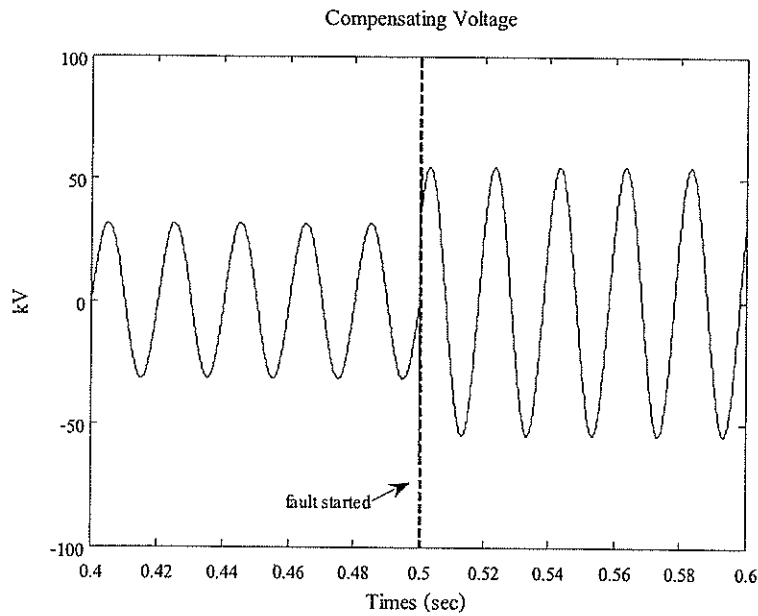
5.4.2 สภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.11 แรงดันที่ตี-สแตกคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.9 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันโวลต์อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ตัวควบคุมสามารถช่วยลดแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจรได้เป็นอย่างดี รูปที่ 5.10 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง แต่มุมเฟสไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงมุมเฟสแต่อย่างใด รูปที่ 5.11 แสดงแรงดันที่ตี-สแตกคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตี-สแตกคอมจ่ายให้กับระบบมีการกระเพื่อมของแรงดันมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สถานะคงตัวในที่สุด ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของตี-สแตกคอม

จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโวลต์และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	แรงดันที่บัสโหลด RMS (kV)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	13.183	13.183
ผิดปกติ	13.114	13.208

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

สถานะ	กระแสจากแหล่งจ่าย RMS (kA)	
	ไม่มีตัวควบคุม	มีตัวควบคุม
ปกติ	0.985	0.985
ผิดปกติ	7.423	0.984

ผลการทดสอบนี้มีค่าอัตราขยายป้อนกลับ $k_{11} = 0.1150$, $k_{12} = -0.8206$, $k_{13} = -730$, $k_{14} = 34$ และอัตราขยายของตัวควบคุม $k_p = 0.4$

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น พิจารณาจากความสามารถควบคุมได้ และความสามารถสังเกตได้หรือพิจารณาจากค่าเงาของเมทริกซ์ A' ของระบบในสมการปริภูมิสถานะ ดังสมการที่ (3-13) โดยรายละเอียดของแต่ละวิธีได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นแสดงได้ดังนี้

- ตรวจสอบความสามารถควบคุมได้

ระบบจะสามารถควบคุมได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความควบคุมได้ (controllability matrix) C มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน $ctrb$ ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความควบคุมได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน $rank$ ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{controllability matrix} = \begin{bmatrix} 10142 & 0 & -3.1154 \times 10^{10} & -3.2208 \times 10^8 \\ 1.7115 \times 10^7 & 1.7702 \times 10^5 & -1.5227 \times 10^{14} & -1.588 \times 10^{12} \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความควบคุมได้เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถควบคุมได้”

- ตรวจสอบความสามารถสังเกตได้

ระบบจะสามารถสังเกตได้นั้นก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ความสังเกตได้ (observability matrix) O มีอันดับ (rank) เท่ากับ n ในการตรวจสอบความสามารถควบคุมได้นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน *obsv* ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเมทริกซ์ความสังเกตได้และสามารถหาอันดับได้โดยใช้ฟังก์ชัน *rank* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{observability matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1333.2 & -1819.5 \\ 1.2591 \times 10^8 & -8.9711 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมทริกซ์ A' มี n เท่ากับ 2 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความสังเกตได้ก็เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถสังเกตได้”

- ตรวจสอบค่าเจาะจง

วิธีการตรวจสอบนี้เป็นวิธีการตรวจสอบจากค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' ของระบบในสมการปริภูมิสถานะ ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงที่ได้นั้นเป็นจำนวนจริงลบทุกสมาชิกสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ฟังก์ชัน *eig* ในโปรแกรม MATLAB

ผลการตรวจสอบ

$$\text{eigenvalues} = \begin{bmatrix} -26947 \\ -8.9455 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อหาค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' จะได้เป็นจำนวนจริงลบทุกสมาชิกแสดงว่า “ระบบมีเสถียรภาพ”

5.5 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังเข้ามาช่วยในออกแบบชุดควบคุม การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรได้แสดงแบบจำลองในสถานะชั่วครู่ของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยใช้ออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตคคอม พร้อมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติพร้อมด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสโหลด ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตคคอมซึ่งจากตรวจสอบเสถียรภาพของระบบทั้ง 3 วิธี จะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตคคอมมีความสามารถควบคุมได้ สามารถสังเกตได้และมีสมาชิกทุกตัวจากการหาค่าเงาจะเป็นลบทุกตัว แสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ

บทที่ 6

กรณีศึกษา - การออกแบบตัวชดเชยดี-สแตตคอม สำหรับงานอุตสาหกรรม

6.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยดี-สแตตคอม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตตคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรม ผลการทดสอบได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เพื่อเป็นกรณีศึกษา

6.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ผลิต โลหะสังกะสีแห่งเดียวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท คือ โลหะสังกะสีแท่งบริสุทธิ์และ โลหะสังกะสีผสมซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ปัจจุบันทางโรงงานประสบปัญหาเรื่อง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ที่ขาดเสถียรภาพ ทำให้โรงงานต้องหยุดกระบวนการผลิต 5-6 ครั้งต่อปี แต่ทุกครั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเริ่มเดินเครื่องประมาณ 1-1.5 ล้านบาท รายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานมีดังนี้

6.2.1 รายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้า

โรงงานนี้ใช้แหล่งพลังงาน 3 แหล่ง คือ

- ระบบสายจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

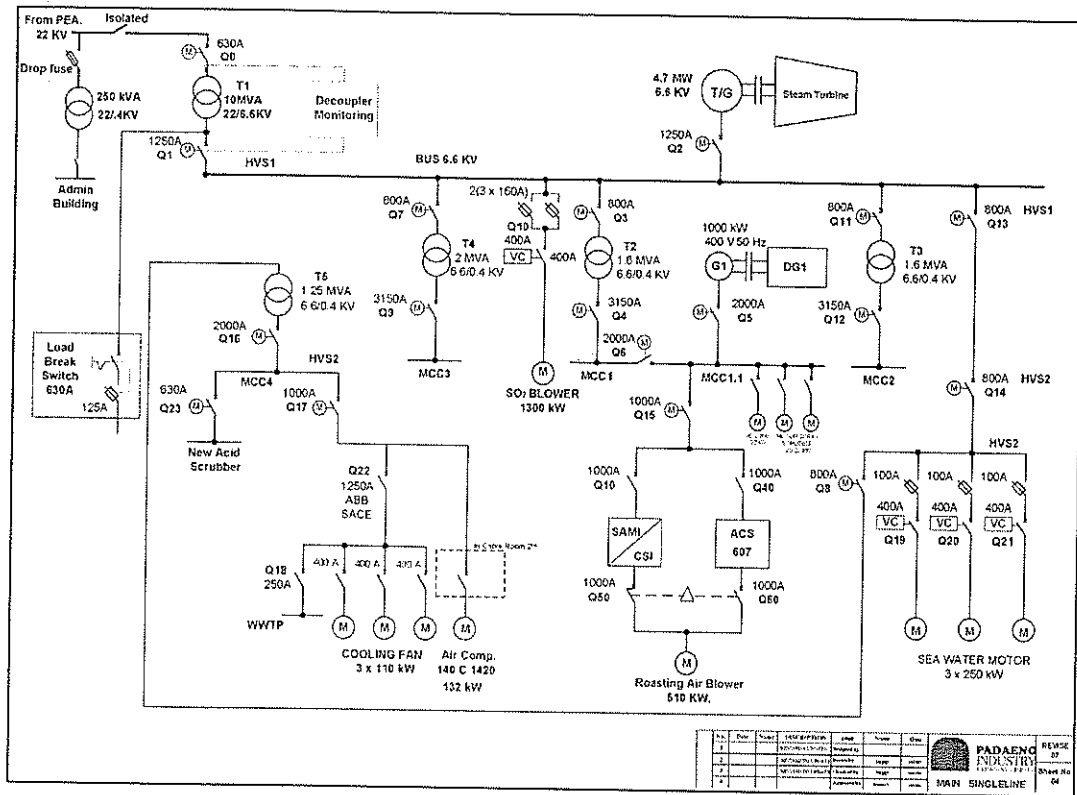
โรงงานนี้รับไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในปริมาณ 200 กิโลวัตต์ หรือไม่เกิน 5% ของความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด อย่างไรก็ตาม จะนำเข้าพลังงานไฟฟ้ามากในช่วงเริ่มเดินเครื่องในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่จ่ายโหลด

- โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam Turbine Power Plant)

ความสามารถของเตาข้างแร่ของโรงงาน สร้างความร้อนได้ประมาณ 900 องศาเซลเซียส ทำให้โรงงานสามารถผลิตไอน้ำเพื่อไปผลิตกำลังงานไฟฟ้า ใช้ในโรงงานได้ประมาณ 3.0 เมกกะวัตต์ ซึ่งการผลิตนี้เกือบจะเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในโรงงาน

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel Generator)

โรงงานนี้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน ในกรณีที่สายจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สามารถจ่ายไฟให้โรงงานได้ ทำให้สวิทช์ Q1 ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ตัดกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคออกจากระบบของโรงงาน กำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลนี้ช่วยจ่ายโหลดในส่วนที่รับไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อย่างเพียงพอ



รูปที่ 6.1 แผนภาพหลักเส้นเดียวโรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

6.2.2 ตัวอย่างปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

โรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ใช้ไฟจากโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำกำลังการผลิตกำลังงานไฟฟ้า 3.0 เมกกะวัตต์ โดยนำเข้ากำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่เกิน 200 กิโลวัตต์เท่านั้น และในวงจรของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่จ่ายให้โรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) มีโรงงานอื่น ๆ ใช้ไฟฟ้าร่วมสายจ่ายเดียวกัน เมื่อโรงงานอื่น ๆ เริ่มเดินเครื่องจักรขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้กระแสและแรงดันของวงจรสายจ่ายไฟฟ้าดังกล่าวเกิดการกระเพื่อมขึ้น สวิตช์ Q1 ตรวจพบความผิดปกติ และได้ตัดระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคออกและใช้กระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำที่ผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ 3.0 เมกกะวัตต์ทดแทน ซึ่งไม่เพียงพอต่อปริมาณการใช้งาน ส่งผลให้ต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเพื่อช่วยจ่ายโหลด แต่กระบวนการดังกล่าวใช้เวลานานเกินไป ส่งผลให้เกิดโหลดเกินและทำให้เกิดไฟฟ้าดับฉุกเฉิน (emergency shutdown) ทั้งระบบขึ้น

6.3 การแก้ปัญหาด้วยตัวชดเชยดี-สแตคคอม

เนื่องจากทางโรงงานประสบปัญหาเรื่องระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ขาดเสถียรภาพ ทำให้โรงงานต้องหยุดกระบวนการผลิต 5-6 ครั้งต่อปี โดยแต่ละครั้งค่าใช้จ่ายในการเริ่มเดินเครื่องประมาณ 1-1.5 ล้านบาท แนวทางแก้ไขปัญหาแนวทางหนึ่งที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ คือ การติดตั้งดี-สแตคคอมเข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยผลกระทบจากสภาวะชั่วคราวที่เกิดจากโรงงานอื่น ๆ เช่น การเริ่มเดินเครื่องจักรขนาดใหญ่หรือการเกิดลัดวงจรในสายจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หลักการออกแบบเพื่อหาพิคกิตติดตั้งดี-สแตคคอมนั้น ใช้หลักการเดียวกับการหาขนาดพิคกิตกิโลวัตต์ (kVA) ขั้นต่ำที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของแรงดันวูบ (voltage dip) เครื่องจักรของโรงงานนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นหลัก ซึ่งการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ด้วยวิธีต่างกัน จะให้กระแสเริ่มเดินเครื่องไม่เท่ากัน การเริ่มเดินเครื่องแบบต่อตรง (direct on line: DOL) ให้กระแสเริ่มเดินเครื่องสูงสุดทำให้เกิดแรงดันวูบมากที่สุด ในขณะที่วิธีเริ่มเดินเครื่องแบบลดแรงดัน (reduced voltage start) หรือแบบวาย-เคลด้า จะช่วยให้กระแสเริ่มเดินเครื่องน้อยลง [7] โดยการหา kVA ขณะเริ่มเดินเครื่องของการต่อมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ หาได้ดังนี้

- การเริ่มเดินเครื่องแบบ DOL

$$kVA_{(s)} = 6 \text{ kVA}(I/P) \quad (6-1)$$

- การเริ่มเดินเครื่องแบบ Y-Δ

$$kVA_{(s)} = 2 \text{ kVA}(I/P) \quad (6-2)$$

โดยที่ $kVA_{(s)}$ คือ ขนาดพิคกิตกิโลวัตต์เริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์
 $kVA(I/P)$ คือ ขนาดพิคกิตกิโลวัตต์อินพุตของมอเตอร์

แรงดันวูบอันเนื่องจากการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์จะต้องควบคุมได้ตามชนิดโหลด เช่น โหลดคอมพิวเตอรส์หรืออุปกรณ์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แรงดันวูบไม่เกิน 10% โหลดโรงงานอุตสาหกรรม แรงดันวูบไม่เกิน 15-25% เป็นต้น ถ้าต้องการจำกัดแรงดันวูบที่ค่าหนึ่ง ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ของ $kVA_{(s)}$ ของมอเตอร์กับขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า $kVA_{(C)}$ ได้ดังนี้

$$\text{แรงดันวูบ } 26 \% \quad kVA_{(s)} = 1.8 \text{ kVA}_{(C)}$$

$$\text{แรงดันวูบ } 20 \% \quad kVA_{(s)} = 1.25 \text{ kVA}_{(C)}$$

$$\text{แรงดันวูบ } 16 \% \quad kVA_{(s)} = \text{kVA}_{(C)}$$

$$\text{แรงดันวูบ } 10 \% \quad kVA_{(s)} = 0.55 \text{ kVA}_{(C)}$$

6.3.1 การหาขนาด kVA ขั้นต่ำของดี-สแตคคอม

การขนาดพิกัด kVA ของดี-สแตคคอมสำหรับงานหนึ่ง ๆ นั้น ต้องทำการวิเคราะห์ โหลด โดยแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ โหลดในสภาวะคงตัว (steady-state loading) และ โหลดในสภาวะชั่วคราว (transient loading) รายละเอียดแสดงได้ดังนี้

- โหลดในสภาวะคงตัว

โหลดในสภาวะคงตัว คือ โหลดทั้งหมดที่ดี-สแตคคอมจะต้องจ่ายให้ โหลดทั้งหมดนี้ได้มาจากการรวมโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จะใช้กับดี-สแตคคอม โดยคิดขนาดของโหลดเป็นกิโลวัตต์ (kW) หรือกิโลโวลต์เอม (kVA) การหาโหลดจำเป็นต้องรู้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น เพื่อใช้ข้อมูลคำนวณหากำลังงานเอาต์พุต ซึ่งคือโหลดที่ดี-สแตคคอมต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชย และถ้าต้องการคำนวณ kVA ต้องใช้ข้อมูลตัวประกอบกำลัง (power factor) ด้วยตามสมการต่อไปนี้

$$kW_{(C)} = kW(O/P)/\eta \quad (6-3)$$

$$kVA_{(C)} = kW_{(C)}/P.F. \quad (6-4)$$

โดยที่	$kW_{(C)}$	คือ	โหลดของดี-สแตคคอม
	$kW(O/P)$	คือ	กำลังพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้า
	η	คือ	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า
	P.F.	คือ	ตัวประกอบกำลัง

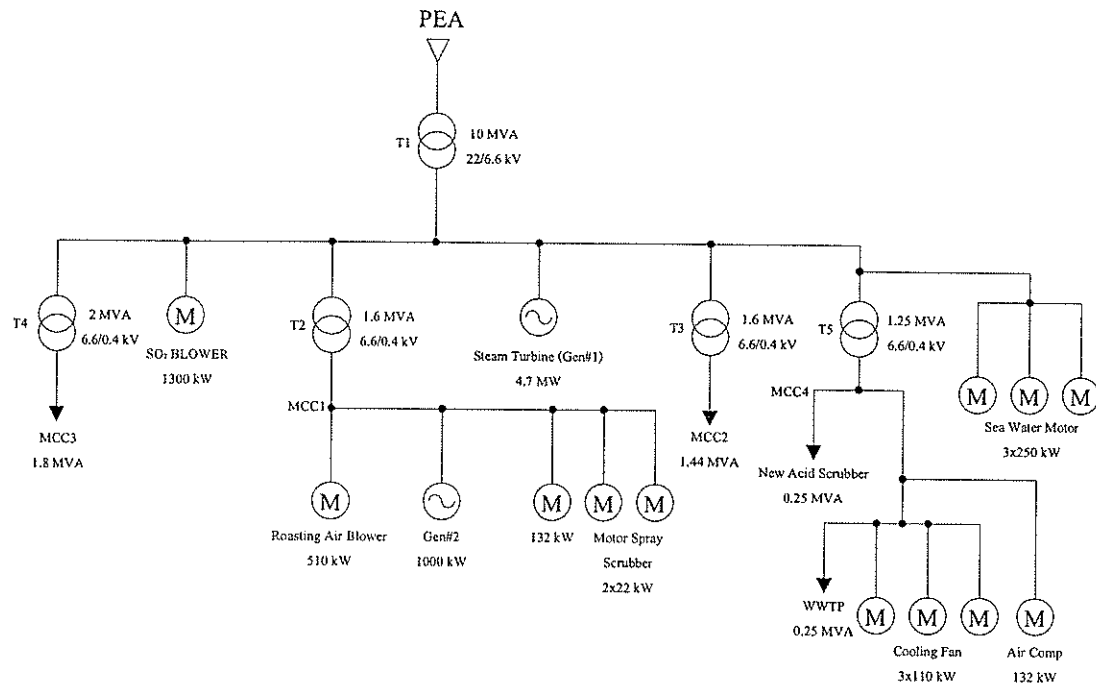
- โหลดในสภาวะชั่วคราว

โหลดสภาวะชั่วคราวเกิดจากการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดันวูบ โหลดในสภาวะชั่วคราวประเมินได้จาก $kVA_{(C)}$ ของมอเตอร์ร่วมกับ kVA ของโหลดอื่น ๆ ที่ต่อร่วมอยู่

แผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานมีวงจรที่ยู่ยกซับซ้อน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงแผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงาน รายละเอียดของโหลดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 6.1

เนื่องจากการหาขนาดของดี-สแตคคอมจำเป็นต้องรู้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ และตัวประกอบกำลังด้วย [24] ได้กล่าวถึงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยขนาดมอเตอร์ที่ใหญ่ที่สุด คือ 30 แรงม้าหรือประมาณ 22 กิโลวัตต์ มีค่าประสิทธิภาพมาตรฐานเท่ากับ 90.4% และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามขนาดของมอเตอร์ ซึ่งขนาดมอเตอร์ในโรงงานนี้มีขนาดใหญ่สุดถึง 1300 กิโลวัตต์ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพมาตรฐานของมอเตอร์ตั้งแต่ขนาด 22 กิโลวัตต์

ขึ้นไปมีค่าเท่ากับ 95% และ [24] ยังได้กล่าวอีกว่า มอเตอร์ที่ใช้งานในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรม จะมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85 ล้าหลัง



รูปที่ 6.2 แผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของโหลดต่าง ๆ ในแผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ขนาด	จำนวน (ตัว)	P.F.	η (%)
1. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	22 กิโลวัตต์	2	0.85	90.4
2. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	110 กิโลวัตต์	3	0.85	95
3. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	132 กิโลวัตต์	2	0.85	95
4. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	250 กิโลวัตต์	3	0.85	95
5. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	510 กิโลวัตต์	1	0.85	95
6. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ)	1300 กิโลวัตต์	1	0.85	95
7. โหลดรวมอื่นๆ	3740 กิโลวัตต์	-	0.85	-

โหลดโรงงานอุตสาหกรรม แรงดันขุมต้องไม่เกิน 15-25% [7] ดังนั้นในการหาขนาด ดี-สแตคคอมกำหนดให้แรงดันขุมไม่เกิน 20% จะได้

- ตัวอย่างการคำนวณหาโหลดรวมของดี-สแตคคอม

มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ) ขนาด 22 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 90.4%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{22}{0.904} = 24.34$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{22}{0.904 \times 0.85} = 28.63$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 57.26$$

สามารถสรุปรวมโหลดของดี-สแตคคอม ได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 โหลดรวมของดี-สแตคคอม

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ขนาด	จำนวน (ตัว)	kW(I/P)	kVA(I/P)	kVA _(s)
1. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	22 กิโลวัตต์	2	48.68	57.26	114.52
2. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	110 กิโลวัตต์	3	347.37	408.66	817.35
3. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	132 กิโลวัตต์	2	277.9	326.94	653.86
4. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	250 กิโลวัตต์	3	789.48	928.80	1857.60
5. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	510 กิโลวัตต์	1	536.84	631.58	1263.16
6. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	1300 กิโลวัตต์	1	1368.42	1609.91	3219.81
7. โหลดรวมอื่น ๆ	3740 กิโลวัตต์	-	3179	3740	3740

- การหาพิกัดดี-สแตคคอม กรณีไม่พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
สำหรับแรงดันขุมไม่เกิน 20% ขอมให้

$$\text{kVA}_{(s)} = 1.25 \text{ kVA}_{(C)}$$

ถ้าเริ่มเดินเครื่องพร้อมกันหมด จะได้

$$\text{kVA}_{(C)} = \frac{11666.30}{1.25} = 9333.04$$

$$\text{kW}_{(C)} = 9333.04 \times 0.85 = 7933.08$$

ดังนั้นพิกัดดี-สแตตคอม กรณีไม่พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีพิกัดกิโลวัตต์ ไม่น้อยกว่า 7933.08 กิโลวัตต์ หรือ 9333.04 กิโลวัตต์ สำหรับแรงดันขุมไม่เกิน 20%

- การหาพิกัดดี-สแตตคอม กรณีพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากในระบบไฟฟ้าของโรงงานมีแหล่งกำเนิดพลังงานที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ 2 ชนิด คือ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ซึ่งทั้ง 2 ชนิดช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าแทนดี-สแตตคอม เท่ากับ 5700 กิโลวัตต์ หรือ 6705.88 กิโลวัตต์ การหาพิกัดดี-สแตตคอมกรณีพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หาได้จากการนำเอาพิกัดดี-สแตตคอมที่ไม่พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาลบออกจากกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าแทนดี-สแตตคอม ดังนั้นพิกัดดี-สแตตคอม กรณีพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีพิกัดกิโลวัตต์ไม่น้อยกว่า 2233 กิโลวัตต์ หรือ 2627.16 กิโลวัตต์ สำหรับแรงดันขุมไม่เกิน 20%

ช่วงพิกัดดี-สแตตคอมที่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าของโรงงานนี้ได้ อยู่ในช่วง 2233-7933.08 กิโลวัตต์ หรือ 2627.16-9333.04 กิโลวัตต์ ในขณะที่เดียวกันถ้าระบบไฟฟ้าของโรงงานนี้ไม่มีโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ดี-สแตตคอมก็สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้ แต่ถ้าพิจารณาทั้ง 3 อย่าง คือ เมื่อเกิดแรงดันขุม โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและดี-สแตตคอมจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีความเป็นไปได้น้อย เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องนานเมื่อไม่ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นระบบอาจจะล้มก่อนที่เริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลได้สำเร็จ

6.4 สรุป

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยดี-สแตตคอม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตตคอม กับตัวอย่างงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าของ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) จากการดำเนินการพบว่าพิกัดติดตั้งของดี-สแตตคอม ที่ได้ออกแบบสามารถแก้ปัญหาระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลวัตต์ที่ขาดเสถียรภาพของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ได้ ผลการออกแบบพบว่าต้องใช้ดี-สแตตคอมพิกัดในช่วง 2233-7933.08 กิโลวัตต์ หรือ 2627.16-9333.04 กิโลวัตต์

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ภายใต้สภาวะการเกิดความผิดปกติพร้อมดี-สแตคคอมเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าติดตั้งขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะการทำงาน การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ใช้หลักการสถานะป้อนกลับ ส่วนการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต้องรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อ โหลด วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้ามียุคมากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เสนอการตรวจจับ 3 วิธี คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไคล การแปลงปาร์กและการแปลงพีคิวอาร์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดใช้จินเนติกอัลกอริทึม การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับงานวิจัยนี้ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบทดสอบ 4 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส จากผลการดำเนินงานพบว่า ดี-สแตคคอม สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ภายใต้การทำงานในสภาวะ ผิดพร้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้งานวิจัยได้ประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตคคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรมผลการทดสอบได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เพื่อเป็นกรณีศึกษา จากผลการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรได้แสดงแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยใช้ออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม พร้อมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสโหลดทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้นเพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ นำมาทดสอบกับระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัสและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติได้เป็นอย่างดี

2) การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ได้แสดงแบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบโกล วิธีการแปลงฟิควาร์และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียว ลงดินในระบบทดสอบ ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัส โหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ระบบทดสอบ 4 บัส ถูกนำมาใช้ในการทดสอบ จากการดำเนินงานพบว่า วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร คือ วิธีการแปลงฟิควาร์และวิธีการแปลงปาร์ก สำหรับวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบโกลให้ผลตอบสนองที่ช้า เมื่อเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าว และเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน วิธีที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุด คือ วิธีการแปลงฟิควาร์วิธีการแปลงปาร์ก และวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบโกลตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดิน แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ที่ได้พัฒนาขึ้นมา สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี แม้ว่าเทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี จะใช้เวลาช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติต่างกัน

3) ในกรณีศึกษาได้ประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตคคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) จากการดำเนินการพบว่าพิกัดติดตั้งของดี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบสามารถแก้ปัญหาาระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ที่ขาดเสถียรภาพของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ได้เป็นอย่างดี

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข สำหรับการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขจะใช้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแบบโหนด ซึ่งการสร้างอัลกอริทึมสำหรับคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลขต้องใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาการคำนวณออกเป็น ส่วน ๆ ที่มีขนาดเล็กและนำมาต่อเชื่อมกัน ซึ่งถ้าระบบทดสอบมีขนาดใหญ่จะทำให้ใช้เวลาในการจำลองผลช้า ดังนั้นควรใช้เทคนิคเมทริกซ์เบาบาง (sparse matrix) มาช่วยในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลข เพื่อจะได้ทำให้การจำลองผลนั้นเร็วยิ่งขึ้น

2) การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ ค่าเริ่มต้นที่กำหนดได้จากกา

สุมค่าระหว่างขอบเขตที่กำหนด ถ้าค่าเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม จะทำให้การจำลองผลหรือหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลานาน หรือค่าพารามิเตอร์ที่ได้ อาจจะไม่สามารถทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้น ควรกำหนดขอบเขตของคำตอบให้มีขนาดเล็กมากพอ และครอบคลุมคำตอบ เพื่อให้การหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลาไม่มากนัก

3) การใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ยังเกิดค่าผิดพลาดสภาวะคงตัวอยู่ จึงควรใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือตัวควบคุมแบบพีไอดี จะทำให้การตอบสนองชั่วคราวของระบบดีขึ้น ค่าผิดพลาดสภาวะคงตัว ค่าพุ่งเกิน และการแกว่งลดลง

4) เนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาเพียงแค่ให้ดี-สแตคคอมสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาถึงเรื่องขนาดพิกัดของดี-สแตคคอมที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ ดังนั้นควรพิจารณาเพิ่มเติมในเรื่องของขนาดพิกัดของดี-สแตคคอมที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

บรรณานุกรม

- [1] ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2550). เทคนิคการแปลงฟิวอาร์สำหรับการรักษาระดับแรงดันโหลดโดยใช้ D-STATCOM. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์รีเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 25-26 ตุลาคม: 77-78.
- [2] ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2550). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบเทคนิคการรักษาระดับแรงดันของโหลดโดยใช้ ดี-สแตตคอม เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 1-2 พฤษภาคม.
- [3] ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [5] ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). เทคนิคการจำลองผลสำหรับวิศวกรไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [6] นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย (2548). การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุล. โครงการงานปริญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 5-24.
- [7] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. (2548). การออกแบบระบบไฟฟ้า. 5000. 2. กรุงเทพฯ: ทีซีจี พรินติ้ง.
- [8] วารุณี ศรีสงคราม วันชัย ทรัพย์สิงห์ และ ไพศาล บุญเจียม. (2549). การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ไม่สมมาตรเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON29) ณ โรงแรมเฟลิกซ์รีเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 9-10 พฤษภาคม: 77-78.
- [9] สรวาณี สุกิจจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
- [10] Adya, A., Singh, B., Gupta, J.R.P., and Mittal, A.P. (2004). Application of D-STATCOM for isolated system. **IEEE Conf. Region 10 (TENCON 2004)**. 3: 351-354.
- [11] Chen, C.T. (1999). **Linear System Theory and Design**. 3. USA: Oxford University Press.
- [12] Chiang, H.K., Lin, B.R., Yang, K.T., and Yang, C.C. (2005). Analysis and Implementation of a NPC-Based DSTATCOM under the Abnormal Voltage Condition. **IEEE Int. Conf. Industrial Technology**. 665-670.

- [13] Goldberg, D.E., and Edward, D. (1989). **Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning**. Wiley.
- [14] Grainger, J.J., and Stevenson, W.D. (1994). **Power System Analysis**. Singapore: McGraw-Hill.
- [15] IEEE std 1159-1995. (1995). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. **IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality**.
- [16] Kim, H., Lee, S.J., and Sul, S.K. (2004). A Calculation for the Compensation Voltages in Dynamic Voltage Restorers by use of PQR Power Theory. **IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC'04)**. 1: 573-579.
- [17] Kim, H., and Akagi, H. (2004). The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames. **IEEE Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems**. 1: 422-427.
- [18] MacGregor, S.D. (1998). An Overview of Power Quality Issues and Solutions. **IEEE Cement Industry Conference**.
- [19] Park, S.Y., and Park, J.K. (2001) The Modeling and Analysis of Shunt type Custom Power Device. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**. 1: 186-191.
- [20] Rashidi, M., Rashidi, F., and Monavar, H. (2003). Tuning of power system stabilizers via genetic algorithm for stabilization of power system. **IEEE Int. Conf. Systems Man and Cybernetics**. 5: 4649-4654.
- [21] Saadat, H. (2004). **Power system analysis**. 2. Singapore: McGraw-Hill.
- [22] Stones, J., and Collinson, A. (2001). Power Quality. **Jour. Power Engineering**. 15: 58-64.
- [23] Sumpavakup, C., and Kulworawanichpong, T. (2008). Distribution Voltage Regulation Under Single-Line-To-Ground Fault By Using D-STATCOM. **Proc. Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI 2008)**.
- [24] Tagare, D.M. (2004). **Reactive Power Management**. New Delhi:Tata McGraw-Hill.
- [25] Woo, S.M., Kang, D.W., Lee, W.C., and Hyum, D.S. (2001). The Distribution STATCOM for Reducing the Effect of Voltage Sag and Swell. **IEEE Proc. Industrial Electronics Society**. 2: 1132-1137.

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 3 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

1. ระบบทดสอบ 2 บัส

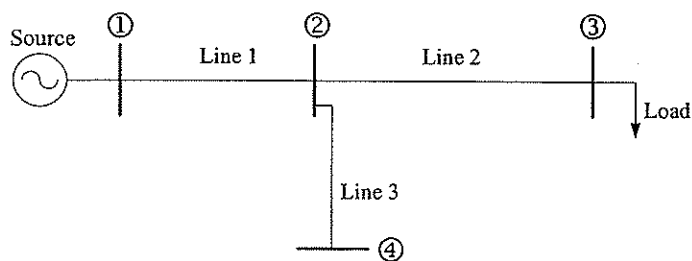


รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 2 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 2 บัส

System quantities	Values
Input Voltage	22 kV, 50 Hz
Line Impedance	0.83Ω , 1.2 mH
Interface Impedance	3Ω , 28.6 mH
Load	400 kW, 180 kVar

2. ระบบทดสอบ 4 บัส

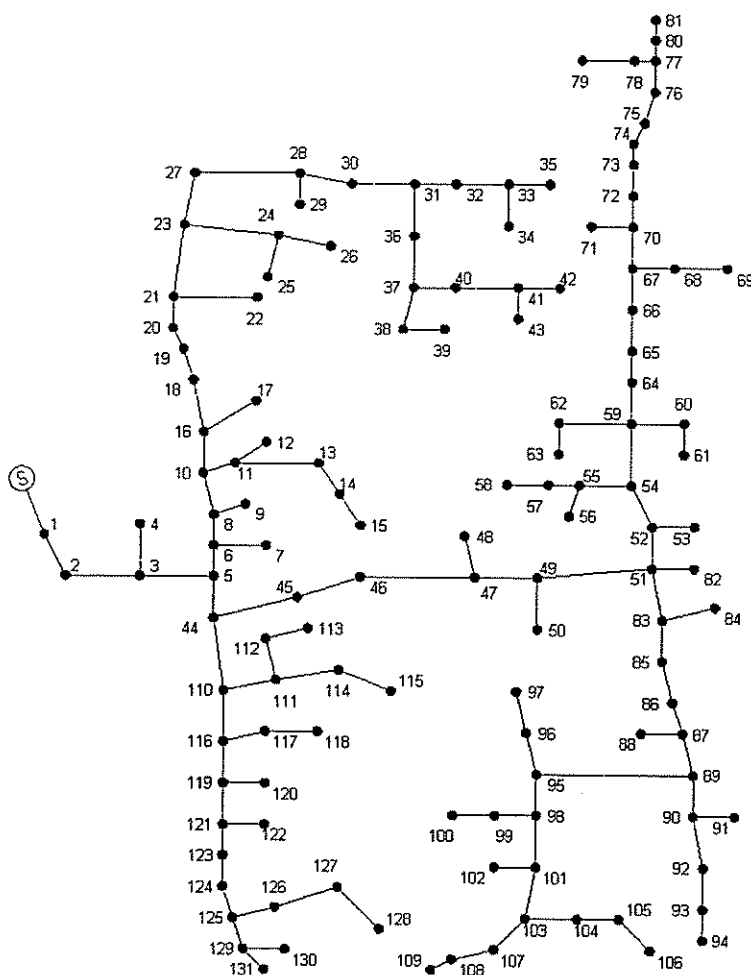


รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 4 บัส

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 4 บัส

System quantities	Values
Input Voltage	22 kV, 50 Hz
Line Impedance1	0.18 Ω , 0.4 mH
Line Impedance2	0.83 Ω , 1.2 mH
Line Impedance3	0.50 Ω , 1.08 mH
Interface Impedance	3 Ω , 28.6 mH
Load	400 kW, 180 kVar

3. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
1	1.020	1.020	1.020	-	-120	120	-	-	Slack bus
2-all bus	1.000	1.000	1.000	-	-120	120	-	-	PQ bus

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลโหลดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

(วงจร 10)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
7	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
9	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
12	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
14	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
17	4.861	2.690	4.861	2.690	4.861	2.690
22	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
25	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
26	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
27	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
29	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
30	0	0	0	0	8.750	4.841
32	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
34	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
36	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
38	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
40	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
42	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
43	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
46	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลโหลดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2
(วงจร 10) (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
48	4.861	2.690	4.861	2.690	4.861	2.690
50	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
53	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
57	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
60	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
62	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
64	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
66	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
68	64.167	35.502	64.167	35.502	64.167	35.502
72	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
73	4.861	2.690	4.861	2.690	4.861	2.690
75	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
78	48.611	26.896	48.611	26.896	48.611	26.896
79	48.611	26.896	48.611	26.896	48.611	26.896
80	0	0	0	0	8.750	4.841
82	4.861	2.690	4.861	2.690	4.861	2.690
84	0	0	14.583	8.069	0	0
85	0	0	0	0	8.750	4.841
86	2.917	1.614	2.917	1.614	2.917	1.614
88	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
91	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
92	0	0	0	0	14.583	8.069
93	0	0	0	0	14.583	8.069
97	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
99	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
102	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลโหลดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

(วงจร 10) (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
104	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
105	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
106	4.861	2.690	4.861	2.690	4.861	2.690
107	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
109	15.556	8.607	15.556	8.607	15.556	8.607
112	48.611	26.896	48.611	26.896	48.611	26.896
114	24.306	13.448	24.306	13.448	24.306	13.448
117	48.611	26.896	48.611	26.896	48.611	26.896
120	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
122	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379
127	194.444	107.583	194.444	107.583	194.444	107.583
130	9.722	5.379	9.722	5.379	9.722	5.379

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

(วงจร 10)

From bus	To bus	Impedances (Ω /km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
81	80	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.08334
80	77	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.14916
77	78	0.6636	0.2682	0.8116	1.835	ABC	0.05219
78	79	0.6636	0.2682	0.8116	1.835	ABC	0.01388
77	76	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.09884
76	75	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.1128
75	74	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.1104

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2
(วงจร 10) (ต่อ)

From bus	To bus	Impedances (Ω /km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
74	73	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.02838
73	72	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.07811
27	23	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.02715
23	21	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.12024
21	20	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.05834
28	27	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.16404
21	22	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01504
30	28	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.19536
31	30	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.07483
32	31	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.14145
33	32	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.09634
28	29	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.03809
3	4	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.23593
35	33	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.34849
33	34	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02458
72	70	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.14216
70	71	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.03596
67	70	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.00388
67	68	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.30729
68	69	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02419
20	19	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.11853
66	67	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.09425
19	18	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.05429
23	24	0.34059	0.35642	0.48859	1.58324	ABC	0.3338
24	25	0.26643	0.36147	0.44987	1.5378	ABC	0.05113

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2
(วงจร 10) (ต่อ)

From bus	To bus	Impedances (Ω/km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
31	36	0.64015	0.37985	0.78815	1.60667	ABC	0.33675
24	26	0.34059	0.35642	0.48859	1.58324	ABC	0.04412
41	42	0.64015	0.37985	0.78815	1.60667	ABC	0.19186
40	41	0.64015	0.37985	0.78815	1.60667	ABC	0.14987
36	37	0.64015	0.37985	0.78815	1.60667	ABC	0.17699
41	43	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01342
37	40	0.64015	0.37985	0.78815	1.60667	ABC	0.14729
65	66	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.37765
38	39	0.26643	0.36147	0.44987	1.5378	ABC	0.02013
37	38	0.26643	0.36147	0.44987	1.5378	ABC	0.16652
16	17	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.04122
18	16	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.46519
65	64	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.47344
11	13	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.17895
11	12	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.00959
10	11	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.12958
16	10	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.0709
13	14	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.10815
14	15	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02405
8	9	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02555
10	8	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.11567
64	59	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.20514
6	7	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.0263
8	6	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.05815
57	58	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.00163

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2
(วงจร 10) (ต่อ)

From bus	To bus	Impedances (Ω /km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
55	57	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.03837
59	54	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.07026
54	55	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02631
60	59	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.47101
61	60	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.00913
55	56	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.04038
52	53	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.058
54	52	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.09279
59	62	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.40221
62	63	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02338
2	3	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	3.45362
1	2	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.17624
51	82	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.04302
52	51	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.24253
51	49	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.1599
49	50	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01613
49	47	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.28781
47	48	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.04957
47	46	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.22873
6	5	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.45756
3	5	0.34059	0.35642	0.48859	1.58324	ABC	1.7298
83	84	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.12124
51	83	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.08854
46	45	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.19556
45	44	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.0215

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2

(วงจร 10) (ต่อ)

From bus	To bus	Impedances (Ω /km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
5	44	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.02253
83	85	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.18915
85	86	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.04978
86	87	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.03443
87	88	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02245
112	113	0.26643	0.36147	0.44987	1.5378	ABC	0.02031
87	89	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.023
89	95	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.12398
95	96	0.6636	0.2682	0.8116	1.835	ABC	0.11555
96	97	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.10244
114	115	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.0283
111	114	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.11661
111	112	0.26643	0.36147	0.44987	1.5378	ABC	0.08935
110	111	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.10871
44	110	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.37043
89	90	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.11888
90	91	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.39863
117	118	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.0147
116	117	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.12055
110	116	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.07757
95	98	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.18384
98	99	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.13116
99	100	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01769
90	92	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	CA	0.10417
92	93	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	CA	0.01521

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2
(วงจร 10) (ต่อ)

From bus	To bus	Impedances (Ω/km)				Phasing	Length (km)
		Positive-Negative		Zero			
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance		
93	94	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	CA	0.00905
98	101	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.16649
101	102	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.16414
103	104	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.06768
101	103	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.0238
104	105	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.17473
105	106	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.15516
103	107	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.08894
107	108	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.02931
108	109	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.20413
119	120	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.00808
116	119	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.37349
127	128	0.34308	0.3475	0.49108	1.57431	ABC	0.04632
121	122	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01194
119	121	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.97947
121	123	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.343
126	127	0.34308	0.3475	0.49108	1.57431	ABC	2.80079
123	124	0.1805	0.2264	0.3285	1.7932	ABC	1.26502
125	126	0.34308	0.3475	0.49108	1.57431	ABC	0.04221
124	125	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.24582
129	130	0.66668	0.39134	0.96268	2.73072	ABC	0.01132
125	129	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.20851
129	131	0.17571	0.33444	0.32371	1.56125	ABC	0.146

ภาคผนวก ข
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีผลิตผล ดังต่อไปนี้

1. บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

1.1 ประชุมวิชาการระดับชาติ

- ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชฎ กุลวรวานิชพงษ์ (2550). “เทคนิคการแปลงพิกิวอาร์ สำหรับการรักษาระดับแรงดันโหลดโดยใช้ D-STATCOM” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 25-26 ตุลาคม 2550: หน้า 77-80.

1.2 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- C. Sumpavakup, T. Kulworawanichpong (2008), “Graphical Compensation Design of D-STATCOM Using a SCICOS Simulator”, The IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2008), Innsbruck, Austria, 11-13 February 2008: pp.7-12.
- C. Sumpavakup, T. Kulworawanichpong (2008), “Distribution Voltage Regulation Under Single-Line-To-Ground Fault by Using D-STATCOM”, The Fifth International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI 2008), Krabi, Thailand, 14-17 May 2008: pp. 1021-1024.
- C. Sumpavakup, T. Kulworawanichpong (2008), “Distribution Voltage Regulation Under Three-Phase Fault by Using D-STATCOM”, The International Conference on Electric Power and Energy Systems (EPES 2008), Paris, France, 4-6 July 2008.

ภาคผนวก ก ประวัตินักวิจัย

ธนัชชัย กุลวรรณิษพงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2540 ด้วยทุนส่งเสริมผู้มีศักยภาพเป็นอาจารย์มหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย ต่อมาได้รับทุนพัฒนาอาจารย์จากทบวงมหาวิทยาลัยเพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโท และในปี พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้น ได้รับทุนจากสำนักงานแผนและนโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาเอก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางด้านไฟฟ้ากำลังและระบบควบคุมสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงระยะไกล จากมหาวิทยาลัยแห่งเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2546 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้ทำการสอนและดำเนินงานวิจัยทางการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุม การหาค่าเหมาะที่สุด และปัญญาประดิษฐ์ อย่างต่อเนื่อง