

การวิเคราะห์ จำลองผลและควบคุม ดี-สแตตคอม สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
22 กิโลวัตต์ ภายใต้การทำงานในสถานะผิดปกติ

นายชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**ANALYSIS, SIMULATION AND CONTROL OF
D-STATCOM FOR A 22-KV ELECTRIC POWER
DISTRIBUTION SYSTEM UNDER FAULTED OPERATION**

Chaiyut Sumpavakup

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2007

การวิเคราะห์ จำลองผลและควบคุม ดี-สแตตคอม สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
22 กิโลโวลต์ ภายใต้การทำงานในสถานะผิดปกติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ : การวิเคราะห์ จำลองผลและควบคุม ดี-สแตตคอม สำหรับระบบจ่าย
กำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ภายใต้การทำงานในสถานะความผิดปกติ

(ANALYSIS, SIMULATION AND CONTROL OF D-STATCOM FOR A 22-KV
ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM UNDER FAULTED OPERATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 175 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบจ่าย
กำลังไฟฟ้า 3 เฟส ภายใต้สถานะการเกิดความผิดปกติ ดี-สแตตคอมเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าติดตั้ง
ขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ
สถานะการทำงาน การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส
แบบสมมาตรใช้หลักการสถานะย้อนกลับ ส่วนการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม
สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตรใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าใน
ระบบไฟฟ้า 3 เฟส การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต้องรวดเร็วและแม่นยำ
เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีมากมาย
แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจจับ 3 วิธี คือ ค่า
รากกำลังสองเฉลี่ยแบบไหล การแปลงปาร์กและการแปลงฟีลิวอาร์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบ
สัดส่วน การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนเหมาะสมที่สุดใช้จินเนติกอัลกอริทึม การ
จำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบ
ทดสอบ 4 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส 10 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส จากผลการดำเนินงานพบว่า ดี-สแตตคอมสามารถชดเชย
กำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ภายใต้การทำงานในสถานะผิด
ปรongได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้งานวิจัยได้ประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-
สแตตคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรมผลการทดสอบได้นำเสนอการออกแบบการชดเชย
กำลังไฟฟ้าสำหรับ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เพื่อเป็นกรณีศึกษา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHAIYUT SUMPAAKUP : ANALYSIS, SIMULATION AND CONTROL
OF D-STATCOM FOR A 22-KV ELECTRIC POWER DISTRIBUTION
SYSTEM UNDER FAULTED OPERATION. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D. 175 PP.

D-STATCOM/POWER COMPENSATION/STATE FEEDBACK/PROPORTIONAL CONTROLLER

This thesis 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 thesis, 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, 10-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 thesis. 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 thesis provides methodology framework of finding an appropriate rating of D-STATCOM for industrial applications. In this thesis, 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.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบทดสอบ

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรม.....	5
2.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	6
2.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้า	8
2.5 ความผิดพ้องในระบบไฟฟ้ากำลัง	10
2.6 ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	13
2.7 การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว	19
2.8 การจำลองผลระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง SCICOS	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9	สรุป	37
3	การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร	38
3.1	บทนำ.....	38
3.2	แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร	38
3.3	การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม	41
3.4	ผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม	44
3.5	การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตตคอม	49
3.6	ผลเฉลยการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตตคอม โดยใช้ SCICOS	51
3.7	สรุป	67
4	การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร.....	69
4.1	บทนำ.....	69
4.2	แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร	69
4.3	เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส	70
4.3.1	ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล	71
4.3.2	การแปลงปาร์ก	72
4.3.3	การแปลงพีคิวอาร์.....	73
4.4	การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร.....	77
4.5	ผลการทดสอบ	87
4.6	สรุป	107
5	การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์.....	108
5.1	บทนำ.....	108
5.2	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	108
5.3	เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง	110
5.4	การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร	111

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร.....	119
5.6 สรุป	139
6 กรณีศึกษา - การออกแบบตัวชดเชยดี-สแตตคอม สำหรับงานอุตสาหกรรม	141
6.1 บทนำ.....	141
6.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)	141
6.3 การแก้ปัญหาด้วยตัวชดเชยดี-สแตตคอม	143
6.4 สรุป	150
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	151
7.1 สรุป	151
7.2 ข้อเสนอแนะ	153
รายการอ้างอิง	154
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ	158
ภาคผนวก ข. ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	171
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	173
ประวัติผู้เขียน	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า13
2.2	คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....15
2.3	ระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ช่วงระยะสั้น ๆ.....16
3.1	ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม49
3.2	ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม49
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 492
4.2	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 492
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสลงดินที่บัส 4 เฟส a 101
4.4	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a 101
5.1	ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม 117
5.2	ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม 117
5.3	ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิด 3 ϕ F ที่บัส 54..... 124
5.4	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 54..... 125
5.5	ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิด SLGF ที่บัส 54 เฟส a 134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a.....	134
6.1 รายละเอียดของโหลดต่าง ๆ ในแผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย.....	146
6.2 โหลดรวมของดี-สแตคคอม.....	148

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล	7
2.2 โครงสร้างของดี-สแตคคอม	9
2.3 วงจรสมมูลของดี-สแตคคอม	10
2.4 แบบจำลองการลัดวงจรสามเฟสสมมาตรลงดิน	11
2.5 แบบจำลองการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน	12
2.6 แบบจำลองการลัดวงจรสองเฟส	12
2.7 แบบจำลองการลัดวงจรสองเฟสลงดิน	13
2.8 ลักษณะของไฟดับ	17
2.9 ลักษณะของแรงดันหย่อน	18
2.10 ลักษณะของแรงดันบวม	18
2.11 แบบจำลองของตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ	19
2.12 การหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลขด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู	22
2.13 แบบจำลองของขดลวดเหนี่ยวนำ	22
2.14 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ	25
2.15 ระบบทดสอบ 10 บัส ที่ใช้ในการจำลองผล	26
2.16 แผนภาพการจำลองผลโดยโปรแกรม EMTP	27
2.17 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเฟสที่โหนดบัส 4	28
2.18 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเฟสที่โหนดบัส 7	28
2.19 ผลการเปรียบเทียบกระแสเฟสที่โหนดจากบัส 2 ไปยังบัส 4	29
2.20 ผลการเปรียบเทียบกระแสเฟสที่โหนดจากบัส 4 ไปยังบัส 7	29
2.21 การเรียกใช้กล่องเครื่องมือ SCICOS	30
2.22 การเรียกใช้คำสั่ง palettes	31
2.23 หน้าต่างคำสั่ง Source	31
2.24 หน้าต่างคำสั่ง Sink	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 หน้าต่างคำสั่ง Linear	33
2.26 หน้าต่างคำสั่ง Non_linear library	34
2.27 หน้าต่างคำสั่ง Event library	35
2.28 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ตัวอย่างด้วย SCICOS	36
2.29 ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ตัวอย่าง.....	36
3.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร.....	39
3.2 วงจรสมมูลของแบบจำลองดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร	39
3.3 การออกแบบระบบควบคุม.....	41
3.4 โครงสร้างสถานะป้อนกลับ.....	43
3.5 โครงสร้างของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม	44
3.6 ระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัส.....	44
3.7 เปรียบเทียบแรงดันโวลต์อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)	45
3.8 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)	45
3.9 แรงดันที่ ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	46
3.10 เปรียบเทียบแรงดันโวลต์อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	47
3.11 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)	47
3.12 แรงดันที่ ดี-สแตคคอม จ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	48
3.13 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 2 บัส ที่ติดตั้งดี-สแตคคอม	52
3.14 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของดี-สแตคคอม.....	55
3.15 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-26).....	56
3.16 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-27).....	57
3.17 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-20).....	58
3.18 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-21).....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 ขนาดของแรงดันโพลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	60
3.20 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	61
3.21 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	61
3.22 ขนาดของแรงดันโพลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	62
3.23 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	62
3.24 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	63
3.25 ขนาดของแรงดันโพลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	64
3.26 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	64
3.27 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 400 Ω	65
3.28 ขนาดของแรงดันโพลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	66
3.29 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	66
3.30 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโพลดเท่ากับ 1 Ω	67
4.1 แบบจำลองของ ดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร	70
4.2 การเก็บสะสมข้อมูลในหนึ่งคาบแบบหน้าต่างเลื่อน	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	แผนภาพเวกเตอร์ขององค์ประกอบการแปลงฟิควาร์ 76
4.4	โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี 78
4.5	โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอ..... 79
4.6	การหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลขด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู..... 79
4.7	โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี 80
4.8	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารอกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร 82
4.9	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงฟิควาร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร 82
4.10	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร 83
4.11	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน 84
4.12	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงฟิควาร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน 84
4.13	แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงปาร์ก เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน 85
4.14	แผนผังลำดับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนจิกอัลกอริทึม 87
4.15	ระบบทดสอบ 4 บัส..... 88
4.16	ระบบโดยรวมในการจำลองผลและควบคุมดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร..... 88
4.17	แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร 89
4.18	กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร 90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	90
4.20 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	91
4.21 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	91
4.22 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	93
4.23 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	93
4.24 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	94
4.25 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	94
4.26 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงพิกิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	95
4.27 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงพิกิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	95
4.28 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	96
4.29 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	96
4.30 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	97
4.31 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียว ลงดิน	99
4.33 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน	99
4.34 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	100
4.35 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	100
4.36 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	102
4.37 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	102
4.38 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	103
4.39 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	103
4.40 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	104
4.41 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	104
4.42 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	105
4.43 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	105
4.44 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	106
5.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2.....	109
5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10).....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใด ๆ และวงจรสมมูลของเทวินิน	111
5.4 การรวมโหลดที่บัส 54	112
5.5 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร	112
5.6 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)	113
5.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	114
5.8 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม).....	114
5.9 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	115
5.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม).....	116
5.11 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)	116
5.12 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร	120
5.13 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	121
5.14 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	122
5.15 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	122
5.16 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	123
5.17 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	123
5.18 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	125

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	126
5.20 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	126
5.21 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	127
5.22 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	127
5.23 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	128
5.24 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	128
5.25 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	129
5.26 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร	129
5.27 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	131
5.28 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียว ลงดิน	131
5.29 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน	132
5.30 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	132
5.31 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	133
5.32 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	135
5.34 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบ ไถล กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	135
5.35 แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	136
5.36 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควอาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	136
5.37 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควอาร์ กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	137
5.38 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	137
5.39 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	138
5.40 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน.....	138
6.1 แผนภาพหลักเส้นเดียวโรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน).....	142
6.2 แผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานอย่างง่าย.....	145

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$ \mathbf{I}_s $	=	ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย
$ \mathbf{V}_c $	=	ขนาดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
$ \mathbf{V}_L $	=	ขนาดของแรงดันโหลด
$ \mathbf{Z}_s $	=	อิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$ \mathbf{Z}_c $	=	อิมพีแดนซ์ในตัวขงดี-สแตตคอม
$g_{k,j}^{(new)}$	=	สัมประสิทธิ์ของ G_{node} ในตำแหน่งแถวที่ k และหลักที่ j ใหม่
$g_{k,j}^{(old)}$	=	สัมประสิทธิ์ของ G_{node} ในตำแหน่งแถวที่ k และหลักที่ j เก่า
G_{node}	=	สัมประสิทธิ์ G แต่ละโหนด
i_c	=	กระแสที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ
$i_k^{(new)}$	=	กระแสที่บัส k ใหม่
$i_k^{(old)}$	=	กระแสที่บัส k เก่า
i_s	=	กระแสจากแหล่งจ่าย
i_s^{ref}	=	กระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง
I_{node}	=	กระแสแต่ละโหนด
k_i	=	อัตราขยายป้อนกลับ
k_p	=	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
$kVA_{(s)}$	=	พิกัดกิโลวัตต์เริ่มเดินเครื่อง
$kVA_{(c)}$	=	พิกัดกิโลวัตต์ของดี-สแตตคอม
$kW_{(c)}$	=	พิกัดกิโลวัตต์ของดี-สแตตคอม
L_c	=	ความเหนี่ยวนำในตัวขงดี-สแตตคอม
L_L	=	ความเหนี่ยวนำโหลด
L_s	=	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$r(t)$	=	สัญญาณอ้างอิง
R_c	=	ความต้านทานในตัวขงดี-สแตตคอม
R_d	=	ความต้านทานเชื่อมต่อ
R_L	=	ความต้านทานโหลด
R_s	=	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$u(t)$	=	สัญญาณอินพุต
V_{0dq}	=	แรงดันในพิกัด $0-d-q$
V_{abc}	=	แรงดันในพิกัด $a-b-c$
V_c	=	แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ
V_L	=	แรงดันโหลด
V_L^{ref}	=	แรงดันโหลดอ้างอิง
V_{node}	=	แรงดันแต่ละโหนด
V_{pqr}	=	แรงดันในพิกัด $p-q-r$
V_{rms}	=	แรงดัน rms
V_s	=	แรงดันจากแหล่งจ่าย
V_{th}	=	แรงดันไฟฟ้าของเทวินิน
$y(t)$	=	สัญญาณเอาต์พุต
Y- Δ	=	วาย-เดลต้า
Z_{th}	=	อิมพีแดนซ์ของเทวินิน
δ_c	=	มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตตคอม
δ_L	=	มุมเฟสของแรงดันโหลด
Γ	=	ค่า $ V_c $ และ δ_c ที่มีค่าเท่ากับ $ I_s $ ที่เรากำหนดไว้
ϕ_s	=	มุมเฟสของกระแสจากแหล่งจ่าย
γ	=	จุดทำงานของดี-สแตตคอม
Λ	=	ค่า $ V_c $ และ δ_c ที่มีค่าเท่ากับ $ V_L $ ที่เรากำหนดไว้
η	=	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า
3 ϕ F	=	Symmetrical Three-Phase Fault
ASD	=	Adjustable Speed Drive
ASVC	=	Advanced Static Var Compensator
CPD	=	Custom Power Device
DLGF	=	Double Line-to-Ground Fault
DOL	=	Direct On Line
DVR	=	Dynamic Voltage Restorer

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

D-STATCOM	=	Distribution Static Compensator
EMTP	=	Electromagnetic Transient Program
FACTS	=	Flexible AC Transmission System
GA	=	Genetic Algorithms
LLF	=	Line-to-Line Fault
P.F.	=	Power Factor
PLC	=	Programmable Logic Controller
RMS	=	Root Mean Square
SLGF	=	Single Line-to-Ground Fault
SSFCL	=	Solid-state Fault Current Limiter
STATCOM	=	Static Compensator
SVC	=	Static Var Compensator
VSI	=	Voltage Source Inverter

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีอัตราการพัฒนาที่สูงขึ้นจากอดีต ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าได้เข้าไปมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาของประเทศทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ให้มีความรุดหน้าทั้งในแง่การสร้างความสะดวกสบายใช้เป็นพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ จึงมีอาชญากรรมได้ว่าพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสิ่งจำเป็นของประเทศ ซึ่งส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และจะต้องพยายามรักษาเสถียรภาพของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและมีมาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เนื่องจากปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ คือ แรงดันตกที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากแรงดันตกในสายป้อน 22 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟและต่อการใช้ไฟเอง นอกจากนี้การเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดจากการลัดวงจร เกิดการต่อโหลดไฟฟ้าที่มากเกินไปเกินพิกัดของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะรับไหว ซึ่งสามารถสรุปปัญหาโดยรวมได้ดังนี้

1. ปัญหาทางด้านขนาดของแรงดัน เมื่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากับโหลดอยู่ห่างไกลกัน จึงทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในสายส่ง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางมีขนาดลดลงมากจากต้นทาง และจะทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อที่ปลายทางมีการชำรุดเสียหายได้
2. ปัญหาทางด้านเสถียรภาพ เมื่อมีการใช้โหลดที่มีขนาดมากขึ้นส่งผลให้แรงดันในระบบลดลง ถ้าลดลงจนถึงจุดพังทลายจะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ ทำให้เกิดไฟฟ้าดับตามมาได้
3. ปัญหาทางด้านความผิดปกติในระบบกำลังไฟฟ้า ในสภาพปกติจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระบบกำลังไฟฟ้าทุกส่วนเพื่อจ่ายไปยังโหลด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง เช่น เกิดการลัดวงจร จะทำให้กระแสลัดวงจรที่

ไหลไปยังจุดที่เกิดความผิดปกติมีค่าสูงกว่าในสภาวะปกติ ในขณะที่เดียวกัน แรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่าง ๆ จะมีค่าลดต่ำลง ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟและต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

4. ปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการส่งพลังงานไฟฟ้าไปในระยะทางไกล ๆ จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยขนาดแรงดันที่สูง งบประมาณและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงมีราคาแพงมาก

จากปัญหาดังกล่าว ปัจจุบันได้มีการแสวงหาแนวทางแก้ไขปัญหาเพื่อรักษาระดับแรงดัน โหลดให้มีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะโหลด โดยการติดตั้งตัวชดเชยเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้า ตัวชดเชยในระบบไฟฟ้ากำลังมีมากมาย ซึ่งอุปกรณ์ที่ถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้เรียกกลุ่มของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่าย เรียกว่า คัสตอมเพาเวอร์ (Custom Power Devices: CPD) อุปกรณ์ในตระกูล CPD นี้มีหลายตัว เช่น ยูพีคิวซี (Unified Power Quality Compensator: UPQC) ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer: DVR) และดี-สแตตคอม (Distribution Static Compensator: D-STATCOM) เป็นต้น (Woo, Kang, Lee and Hyum, 2001 and Park and Park, 2001) ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าภายใต้การทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ โดยเน้นไปที่ดี-สแตตคอมเป็นหลัก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ต่อแบบขนาน ติดตั้งได้ง่ายกว่าอุปกรณ์ในรูปแบบอนุกรมดังเช่น DVR

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดี-สแตตคอม ภายใต้การทำงานในสภาวะเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
- เพื่อพัฒนาแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวของดี-สแตตคอมที่ใช้งานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ในสภาวะเกิดความผิดปกติ
- เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งดี-สแตตคอม
- เพื่อแสวงหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการนำดี-สแตตคอมมาใช้งานในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคภายใต้การทำงานในสภาวะผิดปกติ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พิจารณาระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในระดับแรงดันปานกลาง (medium voltage)
- ไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงคิซี
- พิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันในอุดมคติ และไม่คิดเวลาประวิง
- ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังและการรบกวนทางไฟฟ้าอื่นๆ
- ไม่พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง
- เมื่อเกิดความผิดปกติ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจะต้องอยู่ในช่วงที่ดี-สแตตคอมสามารถชดเชยได้
- พิจารณาความผิดปกติของชนิดสามเฟสแบบสมมาตร และชนิดเฟสเดียวลงดินเท่านั้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาแบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตตคอม ที่ใช้งานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ในขณะที่เกิดความผิดปกติ
- รักษาแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ทดสอบผลด้วยการจำลองระบบจ่าย 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้การทำงานในสถานะผิดปกติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้แบบจำลองของดี-สแตตคอมที่สามารถใช้ได้กับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
- ได้รู้ถึงพฤติกรรมของดี-สแตตคอม ภายใต้สถานะการทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
- สามารถรักษาแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของค่าพิกัด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ในขณะที่มีการติดตั้งดี-สแตตคอม
- ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ
- ได้มอบบัณฑิตทางด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง 1 คน เพื่อพัฒนาประเทศ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 2 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว รวมทั้งการจำลองผลระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง SCICOS

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตรในสถานะชั่วคราว แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว การออกแบบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม ผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะย้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม รวมทั้งผลเฉลยการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอม โดยใช้ SCICOS

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรในสถานะชั่วคราว แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร รวมทั้งผลการทดสอบแบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรในสถานะชั่วคราว

บทที่ 5 กล่าวถึงระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตรพร้อมผลการทดสอบ รวมทั้งการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรพร้อมผลการทดสอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) รวมทั้งการแก้ปัญหาด้วยตัวชดเชยดี-สแตคคอม

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของระบบทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ข. ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยปรัทัศน์วรรณกรรม จะสรุปโดยย่อเกี่ยวกับงานวิจัยของนักวิจัยต่าง ๆ ที่ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับดี-สแตตคอมที่ผ่านมา และจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด ได้แก่ ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าและการจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ โดยย่อได้ดังนี้

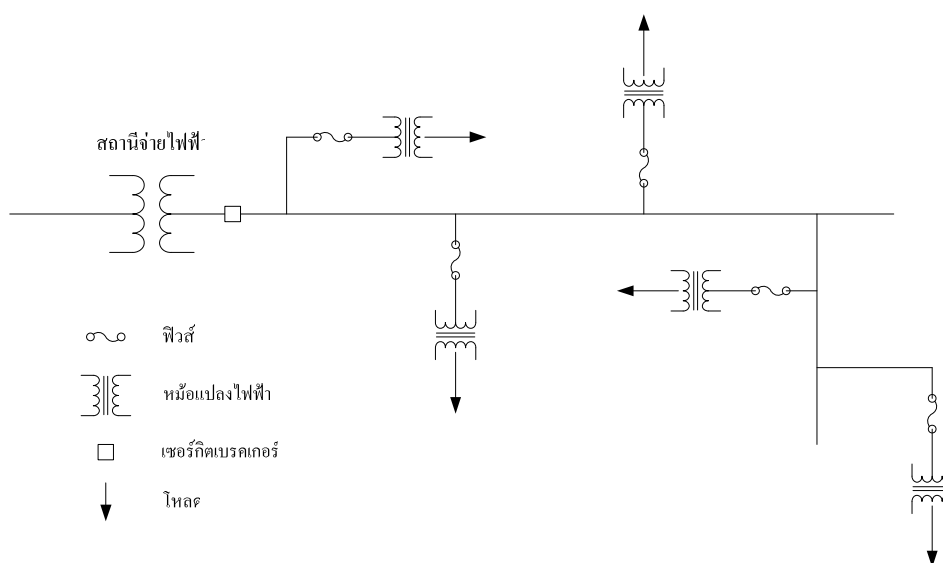
Chang and Yeh (2001) ได้ทำการออกแบบดี-สแตตคอมสำหรับชดเชยโหลดที่มีการตอบสนองไวของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล โดยได้อธิบายว่าการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า กลายมาเป็นปัญหาสำคัญในไม่กี่ปีมานี้ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยเดิม คือ เอสวีซี (Static Var Compensator: SVC) ดี-สแตตคอมต้องการพื้นที่น้อยกว่าเวลาในการตอบสนองเร็วกว่าและสัญญาณรบกวนน้อยกว่า โดยแบบจำลองและการควบคุมของดี-สแตตคอมจะคล้ายกับ SVC มาก ซึ่งดี-สแตตคอมนั้นจะเข้ามาแทนที่ SVC ในอนาคตอันใกล้นี้ เพราะว่าดี-สแตตคอมนั้นมีข้อดีหลายอย่าง เช่น มีผลการตอบสนองทางเวลาและความสามารถในการชดเชยระบบที่เร็วมาก งานวิจัยของ Haque (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการชดเชยแรงดันตกของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดย DVR และดี-สแตตคอมซึ่ง DVR จะทำการชดเชยโดยการฉีดแรงดันเข้าไปในระบบ ส่วนดี-สแตตคอมนั้นจะทำการฉีดกระแสเข้าไปในระบบเพื่อแก้ไขแรงดันตก ในสถานะคงตัว DVR และดี-สแตตคอมจะทำการกำหนดและเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันตก ระดับการลัดวงจรในระบบและระดับของโหลด ซึ่งกำลังไฟฟ้าปรากฏน้อยที่สุดที่ฉีดเข้าไปในระบบจะต้องสามารถแก้ไขแรงดันตกได้ โดยสามารถสรุปข้อดีของดี-สแตตคอมในสถานะคงตัวได้ดังนี้ ดี-สแตตคอมสามารถแก้ไขแรงดันตกสูง ๆ โดย

ปราศจากการฉีดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้าไปในระบบได้ดีเมื่อเทียบกับ DVR ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏน้อยที่สุดที่ฉีดเข้าไปในระบบของดี-สแตตคอมนั้นจะมีผลตอบสนองช้ามากในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงระดับของโหลดแต่จะมีผลตอบสนองที่ไวมากในเรื่องการเปลี่ยนแปลงระดับการลัดวงจรในระบบ ในทางกลับกัน DVR จะมีผลตอบสนองที่ไวมากในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงระดับของโหลด แต่จะมีผลตอบสนองช้ามากในเรื่องการเปลี่ยนแปลงระดับการลัดวงจรในระบบ ส่วนงานวิจัยของ Woo, Kang, Lee and Hyum (2001) ได้อธิบายถึงการนำดี-สแตตคอมมาใช้ในการลดผลกระทบจากแรงดันตกและแรงดันเกิน โดยสรุปได้ว่าผลจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานที่เรียกว่า ดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า และด้วยการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมและการตอบสนองพลวัตที่รวดเร็วของดี-สแตตคอม จะช่วยให้สามารถชดเชยแรงดันตกและแรงดันเกินได้แม้แต่การลัดวงจรในระยะยาว และผลการตอบสนองในสถานะชั่วคราวจะมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพดี ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Boonchiam and Mithulanathan (2006) ที่ได้อธิบายแบบจำลองและการวิเคราะห์ดี-สแตตคอม พบว่าด้วยผลการตอบสนองที่รวดเร็วของดี-สแตตคอม จึงทำให้ดี-สแตตคอมมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง การรักษาระดับแรงดัน และการรักษาระดับสมดุลของโหลด งานวิจัยของ Mariun, Hizam, Izzri and Aizam (2005) ได้อธิบายการออกแบบตัวควบคุมตำแหน่ง โพลสำหรับดี-สแตตคอม ในการระงับการลัดวงจรชนิดสามเฟส ซึ่งแบบจำลองของตัวควบคุมตำแหน่ง โพลนี้จะมีค่า settling time เร็วกว่าการใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ จากการวิเคราะห์ตัวควบคุมตำแหน่ง โพลจะพบว่าตัวควบคุมตำแหน่ง โพลนั้นสามารถควบคุมกระแสที่ฉีดจากดี-สแตตคอมไปยังระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อแก้ไขการลัดวงจรชนิดสามเฟสได้ ดังนั้นแบบจำลองของตัวควบคุมตำแหน่ง โพลนี้จึงน่าจะนำไปใช้กับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในตระกูล CPD ในการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ และนอกจากนี้เป็นการวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic) ในตัวของดี-สแตตคอมและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของดี-สแตตคอม เช่น Chiang, Lin, Yang and Yang (2005) เป็นต้น ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีคณะนักวิจัยใดได้เคยพิจารณางานวิจัยที่คล้ายหรือซ้ำซ้อนกับงานวิจัยที่จะดำเนินการในครั้งนี้นมาก่อน

2.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นระบบที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (electric power generation system) ผ่านระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (electric power transmission system) เพื่อจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟที่กระจายอยู่ในบริเวณต่าง ๆ สำหรับลักษณะรูปแบบของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล (radial

network) ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบวงแหวน (ring network) และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบร่างแห (mesh network) ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือชนบท เป็นประเภทที่ลงทุนต่ำ และลักษณะการวางสายแบบนี้ สามารถเข้าใจได้ง่ายกว่าแบบอื่น โดยทั่วไปแรงดันของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง มีหลายระดับ เช่น 11 กิโลโวลต์ 12 กิโลโวลต์ 22 กิโลโวลต์ 24 กิโลโวลต์ และ 33 กิโลโวลต์ เมื่อเดินสายจำหน่ายมาถึงบริเวณที่มีผู้ใช้ไฟ จะลดระดับแรงดันของระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง ให้ต่ำลงอยู่ในระดับที่ใช้งานกัน คือ 380/220 โวลต์



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล

ปัจจุบันระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า มักเกิดเหตุการณ์ความผิดปกติของระบบบ่อยครั้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบเกิดผิดเพี้ยนจากปกติ ในสภาพความเป็นจริงแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่จะเกิดขึ้นบ่อยมาก สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วครู่คือการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งการเกิดความผิดปกติส่วนใหญ่จะเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ฝนตก ต้นไม้ การจับตะขงของสัตว์และความผิดพลาดของคน ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสร้างความเสียหายค่อนข้างสูงต่อผู้ประกอบการ นอกจากนี้การต่อโหลตไฟฟ้าที่มากเกินไปของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะรับไหว ส่งผลให้แรงดันในระบบลดลง ถ้าวัดจนถึงจุดพังทลาย (collapsing point) จะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ ทำให้เกิดไฟดับตามมาได้ วิธีการแก้จึงต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้า

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง และรักษาระดับแรงดันที่โหลด ซึ่งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่งผลกระทบต่อกำลังงานสูญเสียและแรงดันตกในระบบ ดังนั้น การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยความต้องการของโหลดและชดเชยค่าความเหนี่ยวนำของระบบส่งจ่ายช่วยให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำและระดับแรงดันตกมีค่าลดลง สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ชดเชยในตระกูลคัสทอมเพาเวอร์

2.4.1 อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์

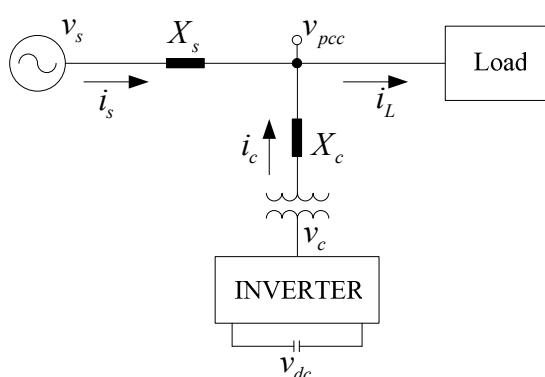
ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีความแตกต่างจากอดีตอย่างมากมา ด้วยพัฒนาการของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ทำให้การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงระดับหลายร้อยเมกะวัตต์ สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์สวิตช์จำพวกไทรสเตอร์ (thyristors) หรือ จีทีโอ (GTO) อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เรียกว่า อุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ยืดหยุ่นได้ (flexible AC transmission system devices: FACTS) อย่างไรก็ตาม สวิตช์ดังกล่าวไม่สามารถตอบสนองต่อการนำไปใช้ที่ความถี่สวิตช์ค่าสูงในหลักหลายพันเฮิรตซ์ได้ ข้อจำกัดในด้านความถี่การสวิตช์ถูกกำจัดไปด้วยเทคโนโลยีสวิตช์ทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) มอสเฟสกำลัง (power MOSFET) หรือไอจีบีทีกำลัง (power IGBT) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงที่มีกำลังไฟฟ้าไหลในระดับหลายร้อยหรืออาจจะเกินหลักพันเมกะวัตต์ ยังไม่สามารถทำได้ในระดับการส่งกำลังงานที่น้อยกว่านั้น เช่น ระบบจ่ายที่ระดับแรงดันปานกลาง อุปกรณ์ที่มีความถี่สวิตช์สูงสามารถนำมาใช้งานได้ อุปกรณ์เหล่านี้จะมีหน้าที่การทำงานที่เหมือนกับอุปกรณ์ FACTS ทุกประการ ต่างกันที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันทำงานที่น้อยกว่าเท่านั้น จะเรียกอุปกรณ์ในกลุ่มดังกล่าวว่า อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์ (Custom Power Devices: CPD) โดยชื่อคัสทอมเพาเวอร์นี้ได้ถูกกำหนดอย่างเป็นทางการในปี 2003 (Sabin and Sannino, 2003)

อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์หรือ CPD เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้เรียกกลุ่มของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจ่าย อุปกรณ์ในตระกูล CPD นี้มีหลายตัว เช่น เอเอสวีซี (Advanced Static Var Compensator: ASVC) ยูพีคิวซี ตัวจำกัดกระแสผิดพลาดพร้อม (Solid-state Fault Current Limiter: SSFCL) ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและดี-สแตคคอม เป็นต้น โดยคุณลักษณะเด่นของอุปกรณ์ในตระกูล CPD นั่นคือ ช่วยในการชดเชยกำลังไฟฟ้าและการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างในระบบ และลดจำนวนครั้งในการเกิดไฟฟ้าดับ (ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 2550) ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและ

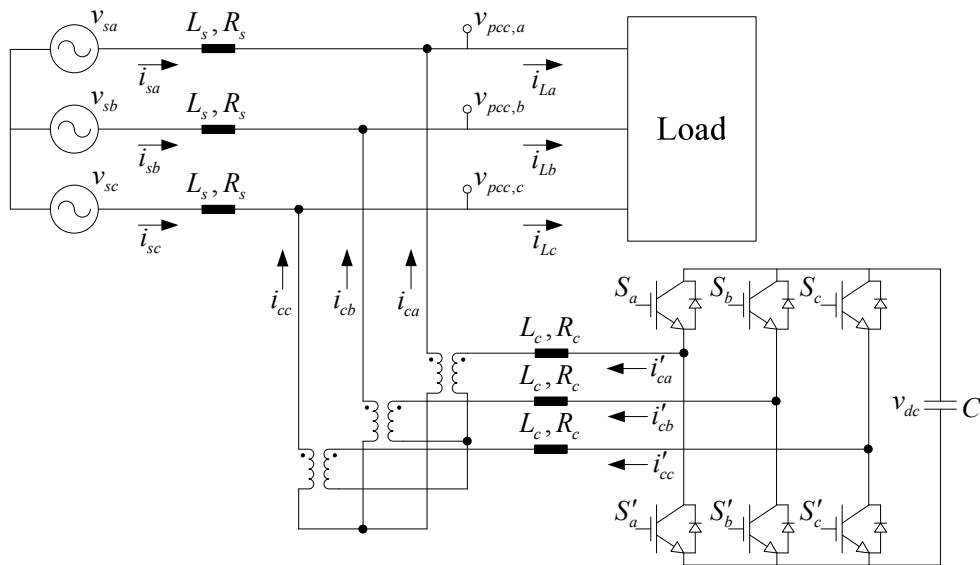
ข้อเสียในการใช้งานต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และสถานการณ์จำเป็นที่ต้องการใช้ตัวชดเชย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะดี-สแตตคอมเท่านั้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.4.2 โครงสร้างและการทำงานของดี-สแตตคอม

Distribution Static Compensator (D-STATCOM) หรือดี-สแตตคอม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 เป็นอุปกรณ์สวิตช์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC converter) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์ (Voltage Source Inverter: VSI) 3 เฟสแบบบริดจ์ ตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อม โยงดีซี (Chiang, Lin, Yang and Yang, 2005) อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในตระกูล CPD ชนิดหนึ่ง ที่ทำงานต่อขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเชื่อมต่อ (coupling transformer) ที่ถอดแบบมาจากสแตตคอม (Static Compensator: STATCOM) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ (Adya, Singh, Gupta and Mittal, 2004) การควบคุมสวิตช์ร่วมกับการออกแบบวงจรที่เหมาะสมจะทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากดี-สแตตคอมเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ จุดต่อเชื่อม เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สถานะ โหลดข้อแตกต่างระหว่างสแตตคอมกับดี-สแตตคอม คือ พิกัดของแรงดันและประโยชน์ที่จะนำอุปกรณ์ทั้งสองอย่างนี้ไปใช้ ซึ่งสแตตคอมจะใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันสูง ๆ และช่วยแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ส่วนดี-สแตตคอมใช้กับพิกัดแรงดันที่ต่ำกว่า และจะช่วย แก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Woo, Kang, Lee and Hyum, 2001)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของดี-สแตตคอม



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของดี-สแตคคอม

การทำงานของอุปกรณ์นี้ ได้แก่ รักษาระดับแรงดันในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้คงที่ในรูปของการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยการฉีดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่นำมาชดเชยสร้างได้จากตัวเก็บประจุกระแสตรงในตัวขงดี-สแตคคอมเอง ที่สภาวะปกติดี-สแตคคอมจะไม่ทำงานแต่ตัวเก็บประจุกระแสตรงจะเก็บสะสมพลังงาน เมื่อเกิดสภาวะการทำงานผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่ไหลลดลง แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม ตัวควบคุมจะทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ

2.5 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

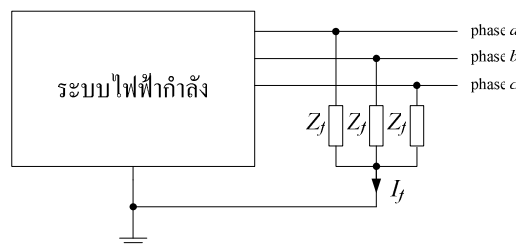
ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ทุกขณะและทุกพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะส่วนของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีโหลดจากอุตสาหกรรมซึ่งมีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะในระหว่างเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงและสร้างความเสียหายค่อนข้างสูงต่อผู้ประกอบการ รวมทั้งสร้างความสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจำแนกได้หลายประเภท เช่น เกิดการลัดวงจรของสายส่ง การต่อโหลดเข้าในระบบไฟฟ้ามากเกินไป เป็นต้น ซึ่งการเกิดความผิดปกติส่วนใหญ่จะเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ไฟฟ้า ฝนตก ต้นไม้ การจับตะขะของสัตว์และความผิดพลาดของคน เป็นต้น ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถ

จำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ความผิดปกติแบบเปิดวงจร (open-circuit faults) ได้แก่ การหลุดของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรืออุปกรณ์อื่น ๆ และความผิดปกติแบบลัดวงจร (short-circuit faults) ได้แก่ การลัดวงจรของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ทั้งที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างคู่เฟส หรือระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งลงดิน (ชนิดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2550)

สำหรับความผิดปกติในงานวิจัยนี้จะหมายถึงความผิดปกติแบบลัดวงจรเท่านั้น ซึ่งความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบบลัดวงจรนั้นยังสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.5.1 การลัดวงจรสามเฟสสมมาตรลงดิน (Symmetrical Three-Phase-to-Ground Fault: $3\phi F$)

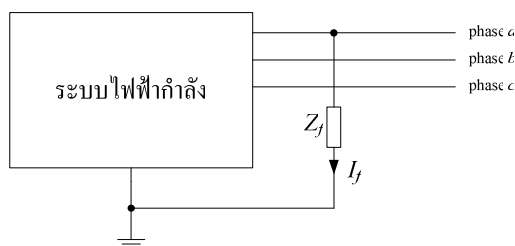
โดยปกติเป็นการลัดวงจรที่ให้ผลรุนแรงที่สุดแต่เกิดยาก ส่วนใหญ่มีสาเหตุจากความประมาทของมนุษย์ โดยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ การลัดวงจรสามเฟสสมมาตร และการลัดวงจรสามเฟสสมมาตรลงดิน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการลัดวงจรสามเฟสสมมาตรลงดิน

2.5.2 การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line-to-Ground Fault: SLGF)

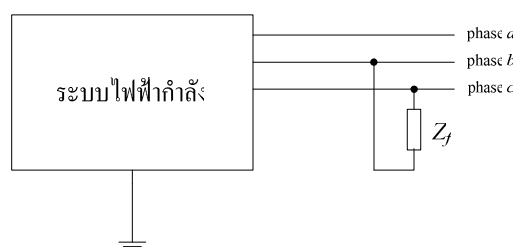
โดยปกติเป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุด แต่ส่วนใหญ่เป็นความผิดปกติชั่วคราว เช่น เกิดลมกรรโชกแรงทำให้กิ่งไม้แตะโดนสายพาดอากาศ หรืออุบัติเหตุต่าง ๆ เป็นต้น โดยการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ การลัดวงจรเฟส a ลงดิน (a-to-ground fault), การลัดวงจรเฟส b ลงดิน (b-to-ground fault) และการลัดวงจรเฟส c ลงดิน (c-to-ground fault)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน

2.5.3 การลัดวงจรสองเฟส (Double Line Fault หรือ Line-to-Line Fault: LLF)

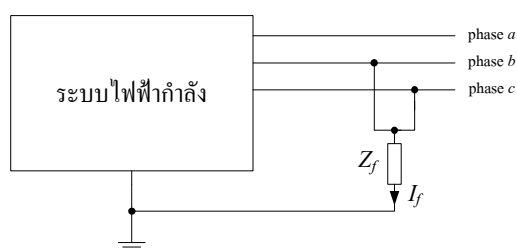
โดยปกติเป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นไม่บ่อยมากนัก โดยทั่วไปมีสาเหตุมาจากการเสียหายของฉนวนอย่างฉับพลัน (insulation breakdown) ของฉนวนระหว่างคู่เฟสใด ๆ หรือการเกิดแฟลชโอเวอร์ (flashover) โดยทั่วไป มักเกิดกับสายส่งและอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ในสถานีไฟฟ้า โดยการลัดวงจรสองเฟสนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ การลัดวงจรระหว่างเฟส a กับ เฟส b (a-to-b fault), การลัดวงจรระหว่างเฟส b กับ เฟส c (b-to-c fault) และการลัดวงจรระหว่างเฟส c กับ เฟส a (c-to-a fault)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการลัดวงจรสองเฟส

2.5.4 การลัดวงจรสองเฟสลงดิน (Double Line-to-Ground Fault: DLGF)

มีคุณสมบัติคล้ายกับ LLF การลัดวงจรประเภทนี้เกิดขึ้นได้ไม่บ่อยมากนัก โดยส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากการเสียหายของฉนวนอย่างฉับพลัน ของฉนวนระหว่างคู่เฟสใด ๆ ลงดิน โดยทั่วไป มักเกิดกับสายส่งและอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ในสถานีไฟฟ้า โดยการลัดวงจรสองเฟสลงดิน นั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ การลัดวงจรระหว่างเฟส a กับ เฟส b ลงดิน (ab-to-ground fault) การลัดวงจรระหว่างเฟส b กับ เฟส c ลงดิน (bc-to-ground fault) และการลัดวงจรระหว่างเฟส c กับ เฟส a ลงดิน (ca-to-ground fault)



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการลัดวงจรสองเฟสลงดิน

โดยจะมีสถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

ชนิดของความผิดปกติ	% การเกิดความผิดปกติ
SLGF	85%
LLF	8%
DLGF	5%
3 ϕ F	2%

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

2.6 ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า เป็นเรื่องของความแน่นอนในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายหลัก คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นิยามของคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE จะมีความหมายถึง ลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย (IEEE std 1159-1995, 1995) ในปัจจุบันเรื่องของ

คุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นที่สนใจและนำมาพิจารณากันมาก (Stones and Collinson, 2001) เนื่องจากสาเหตุใหญ่ ๆ คือ กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงซึ่งมีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ พีแอลซี (Programmable Logic Controller: PLC) และตัวขับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive: ASD) เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้า (MacGregor, 1998) เช่น การใช้อุปกรณ์ ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก ก็จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยิ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรุนแรงมากยิ่งขึ้น ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น เช่น ปัญหาจากแรงดันตกชั่วขณะ ทำให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยต้องหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น เป็นต้น

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังงานไฟฟ้าเสียไปนั้นเราอาจจะแบ่งแยกสาเหตุออกได้หลายรูปแบบ เช่น ปรากฏการณ์ธรรมชาติ การเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง (switching) การทำงานของอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม การต่อกราวด์ (grounding) ในระบบไม่ถูกต้อง เป็นต้น เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของกำลังงานไฟฟ้าขึ้นย่อมจะทำให้ลักษณะของรูปคลื่น แรงดัน กระแส ตลอดจนความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.2 (IEEE std 1159-1995, 1995) ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (short duration voltage variation) เท่านั้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ประเภท	ช่วงการเกิด	ช่วงระยะเวลาการเกิด	ช่วงขนาดของแรงดัน
1. ภาวะชั่วคราว			
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 ออสซิลเลชันชั่วคราว			
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 ฉับพลัน			
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 ชั่วขณะ			
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 ชั่วคราว			
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. ความผิดปกติของรูปคลื่น			
5.1 องค์กรประกอบไฟตรง		สถานะคงตัว	0 - 0.1 %
5.2 ฮาร์มอนิก	0 - 100 th H	สถานะคงตัว	0 - 20 %
5.3 อินเตอร์ฮาร์มอนิก	0 - 6 kHz	สถานะคงตัว	0 - 2 %
5.4 คลื่นรอยบาก		สถานะคงตัว	
5.5 สัญญาณรบกวน	ช่วงกว้าง	สถานะคงตัว	0 - 1 %
6. แรงดันกระเพื่อม	< 25 Hz	ไม่สม่ำเสมอ	0.1 - 7 %
7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า		< 10 s	

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น

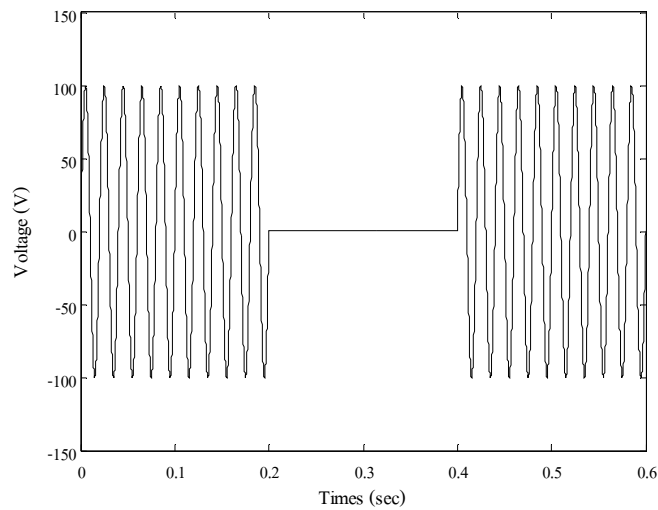
การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติในระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนโหลดขนาดใหญ่หรือการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งต้องการกระแสในการเริ่มเดินเครื่องสูง ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันหย่อน (voltage sag) แรงดันบวม (voltage swell) และไฟดับ (interruption) (Dugan, McGranaghan, Santoso and Beaty, 2002) มาตรฐาน IEEE Std 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิด คือ นับพลัน (instantaneous) ชั่วขณะ (momentary) และชั่วคราว (temporary) คุณลักษณะแต่ละประเภทของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการเกิดแรงดันหย่อน แรงดันบวม และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น

แรงดันหย่อนและแรงดันบวม		
นับพลัน	ชั่วขณะ	ชั่วคราว
10 ms – 1 s	1 s – 3 s	3 s – 1 min
ไฟดับ		
ชั่วขณะ	ชั่วคราว	
10 ms – 3 s	3 s – 1 min	

- ไฟดับ

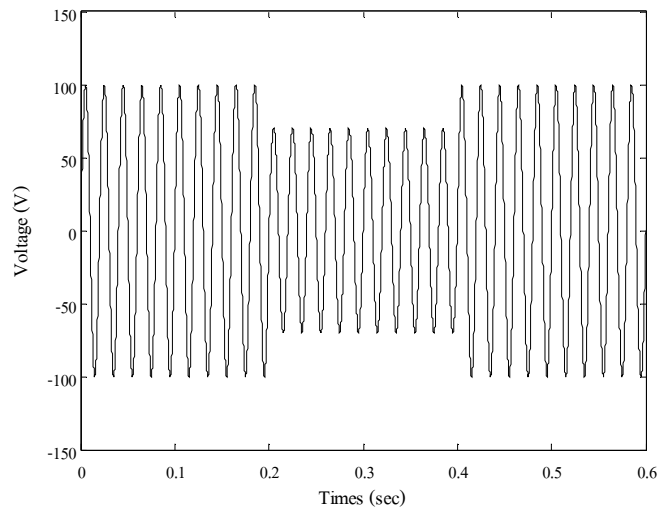
ไฟดับ หมายถึง ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าในหน่วยวัดค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 pu. สาเหตุที่ทำให้เกิดไฟดับ ได้แก่ การเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก อุปกรณ์เสียหายหรือทำงานผิดพลาด เป็นต้น (Dugan, McGranaghan, Santoso and Beaty, 2002) ลักษณะของไฟดับแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของไฟดับ

- แรงดันหย่อน

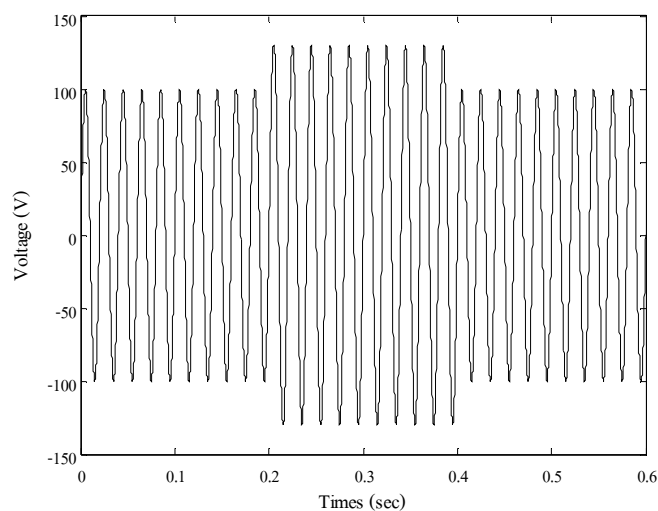
แรงดันหย่อน หมายถึง ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าในหน่วยวัตต์อาร์เอ็มเอส มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 pu. สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันหย่อน ได้แก่ การเปลี่ยนโหลดขนาดใหญ่หรือการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ขนาดใหญ่ (Dugan, McGranaghan, Santoso and Beaty, 2002) ในช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มต้นทำงาน ตัวมอเตอร์จะมีความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าปกติ เพื่อต้องการขับเคลื่อนให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนดไว้ได้ไวที่สุด จึงส่งผลให้ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกลงในช่วงการเริ่มต้นทำงานของมอเตอร์ ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดแรงดันหย่อนที่สามารถพบเจอได้มากที่สุด นั่นคือ การเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบไฟฟ้า เช่น การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (single line-to-ground fault) เป็นต้น ผลกระทบจากแรงดันหย่อนชั่วขณะ จะส่งผลโดยตรงต่อส่วนงานหรืออุปกรณ์ที่มีความไวสูงในการทำงาน เช่น ASD ตัว ASD จะทริปเมื่อเกิดแรงดันหย่อนขึ้นมาหรือบางครั้งก็ทริปไม่ทัน สร้างความเสียหายให้กับตัว ASD รวมไปถึงระบบคอมพิวเตอร์หรือ PLC ต้องสูญเสียข้อมูลในช่วงเวลาการเกิดแรงดันหย่อน ลักษณะของแรงดันหย่อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแรงดันหย่อน

- แรงดันบวม

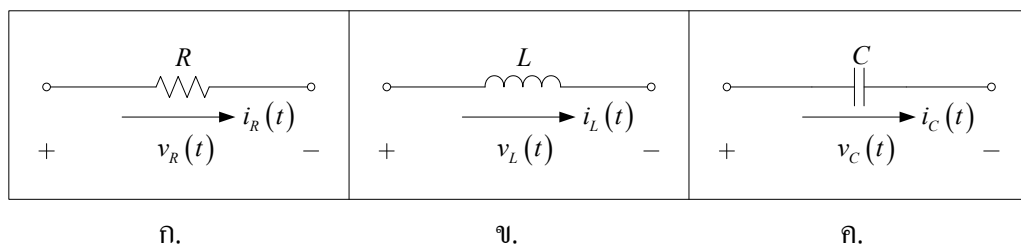
แรงดันบวม หมายถึง ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าในหน่วยวัตต์อาร์เอ็มเอส มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 pu. สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันบวม ได้แก่ การปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้าระบบ (Dugan, McGranaghan, Santoso and Beaty, 2002) ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงาน ลักษณะของแรงดันบวมแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของแรงดันบวม

2.7 การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว

การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว (simulation of electrical system transient) ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้พื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การได้มาซึ่งผลเฉลยเชิงตัวเลขมีประโยชน์อย่างยิ่ง โดยเฉพาะระบบไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว จะเป็นการศึกษาปริมาณทางไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยการแบ่งช่วงการคำนวณออกเป็นช่วงก้าวเล็ก ๆ ที่เหมาะสม สำหรับการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขจะใช้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแบบโหนด แบบจำลองของส่วนประกอบในระบบไฟฟ้ากำลังสร้างขึ้นจากการต่อเชื่อมของอุปกรณ์พาสซีฟ ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.11 การสร้างอัลกอริทึมสำหรับคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลขต้องใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาการคำนวณออกเป็น ส่วน ๆ ที่มีขนาดเล็กและนำมาต่อเชื่อมกัน ก็จะสามารถสร้างเมทริกซ์ความล้มพันธ์ของการเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้ โดยอ้างอิงจากสมการโหนด (ชนิดชย กุลวรวานิชพงษ์, 2550) ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

2.7.1 แบบจำลองเชิงตัวเลขของตัวต้านทาน

จากการวิเคราะห์แบบโหนดจะพบว่า สมการโหนดของโครงข่ายความต้านทานสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ในรูปของ $[G_{node}][V_{node}] = [I_{node}]$ อย่างไรก็ตาม การเขียนชุดคำสั่งให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างเมทริกซ์ $[G_{node}]$ ขึ้นมานั้นกลับไม่่ง่ายนัก ซึ่งการสั่งงานทำได้เพียงอ่านข้อมูลการเชื่อมต่อเท่านั้น ส่งผลให้อัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างเมทริกซ์ดังกล่าวเริ่มต้นจากการเพิ่มตัวต้านทานเข้าไปในระบบทีละตัว จากนั้นดำเนินการปรับปรุงเมทริกซ์ทีละรอบ ๆ จนกระทั่งตัวต้านทานทุกตัวถูกใส่เข้าไปในโครงข่ายจนเป็นโครงข่ายที่สมบูรณ์ อัลกอริทึมนี้จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับสั่งงานให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างสมการโหนด

เริ่มต้นจากระบบไฟฟ้าที่อธิบายได้ด้วยสมการโหนด $[G_{node}][V_{node}] = [I_{node}]$ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} g_{1,1}v_1 + g_{1,2}v_2 + \dots + g_{1,n}v_n &= i_1 \\ g_{2,1}v_1 + g_{2,2}v_2 + \dots + g_{2,n}v_n &= i_2 \\ \vdots & \\ g_{n,1}v_1 + g_{n,2}v_2 + \dots + g_{n,n}v_n &= i_n \end{aligned}$$

1. ดำเนินการเชื่อมต่อตัวต้านทาน R_d ระหว่างโหนด k ใด ๆ เข้ากับโหนดอ้างอิง (โหนด 0) ย่อมส่งผลให้สมการโหนดแถวที่ k เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะสัมประสิทธิ์ในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมเท่านั้น ดังนี้

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_d} \quad (2-1)$$

2. ดำเนินการเชื่อมต่อตัวต้านทาน R_d ระหว่างโหนด k และโหนด j ย่อมส่งผลให้สมการโหนดแถวที่ k และ j เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะสัมประสิทธิ์ในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมและนอกแนวทแยงมุมบางตำแหน่งเท่านั้น ดังนี้

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_d} \quad (2-2)$$

$$g_{j,j}^{(new)} = g_{j,j}^{(old)} + \frac{1}{R_d} \quad (2-3)$$

$$g_{k,j}^{(new)} = g_{k,j}^{(old)} - \frac{1}{R_d} \quad (2-4)$$

$$g_{j,k}^{(new)} = g_{j,k}^{(old)} - \frac{1}{R_d} \quad (2-5)$$

3. ดำเนินการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟในรูปของแหล่งจ่ายกระแส i_s ระหว่างโหนด k กับโหนดอ้างอิง (โหนด 0) ย่อมส่งผลให้สมการโหนดแถวที่ k เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ $[I_{node}]$ เท่านั้น ดังนี้

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} + i_s \quad (2-6)$$

4. ดำเนินการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟในรูปแบบของแหล่งจ่ายกระแส i_s ระหว่าง โหนด k และ โหนด j โดยกำหนดให้ทิศทางของแหล่งจ่ายกระแสมีทิศทางเข้าโหนด k หรือพุ่งออก จากโหนด j ย่อมส่งผลให้สมการโหนดแถวที่ k และ j เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่การเปลี่ยนแปลง ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ $[J_{node}]$ เท่านั้น ดังนี้

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} + i_s \quad (2-7)$$

$$i_j^{(new)} = i_j^{(old)} - i_s \quad (2-8)$$

2.7.2 แบบจำลองเชิงตัวเลขของขดลวดเหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านและแรงดันตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ อธิบาย ได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ เมื่อใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาในการคำนวณออกเป็นช่วงเล็ก ๆ ส่งผลให้ สามารถจัดรูปสมการเป็นสมการพีชคณิตได้ พิจารณาจากรูปที่ 2.11-ข. จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2-9)$$

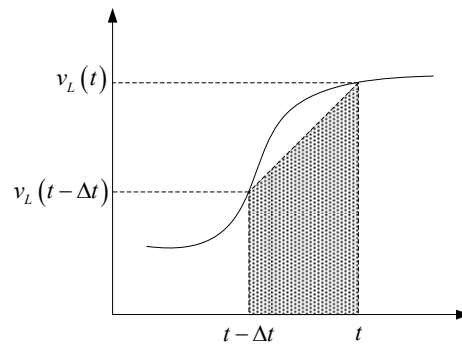
เขียนในรูปของสมการกระแส จะได้

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v_L(t) dt \quad (2-10)$$

ประมาณค่าปริพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule of integration) ดังรูปที่ 2.12

จะได้ว่า

$$i_L(t) - i_L(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_L(t) + v_L(t - \Delta t)] \quad (2-11)$$



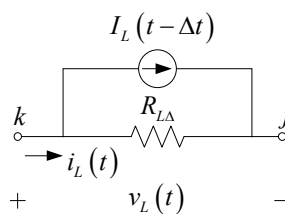
รูปที่ 2.12 การหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลขด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$i_L(t) = \frac{v_L(t)}{2L/\Delta t} + \frac{v_L(t-\Delta t)}{2L/\Delta t} + i_L(t-\Delta t) = \frac{v_L(t)}{R_{L\Delta}} + I_L(t-\Delta t) \quad (2-12)$$

โดยที่ $R_{L\Delta} = \frac{2L}{\Delta t}$ และ $I_L(t-\Delta t) = i_L(t-\Delta t) + \frac{v_L(t-\Delta t)}{2L/\Delta t}$

จะเห็นว่าเมื่อดำเนินการด้วยเทคนิคเวลาดีสครีต (discrete time technique) ขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปความต้านทานเสมือนต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแสเสมือน ทำให้การต่อเชื่อมขดลวดเหนี่ยวนำเข้ากับโครงข่ายใช้หลักการของการต่อความต้านทานและแหล่งจ่ายกระแสรวมกัน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองของขดลวดเหนี่ยวนำ

การต่อขดลวดเหนี่ยวนำใช้หลักการเพิ่มความต้านทานและเพิ่มแหล่งจ่ายกระแส สูตรการต่อเชื่อมจะคล้ายกับกรณีการต่อความต้านทาน สามารถแบ่งเป็นกรณีย่อยได้ดังนี้

1. ดำเนินการเชื่อมต่อขดลวดเหนี่ยวนำระหว่างโหนด k ใดๆ เข้ากับโหนดอ้างอิง (โหนด $j = 0$)

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-13)$$

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} - I_L(t - \Delta t) \quad (2-14)$$

2. ดำเนินการเชื่อมต่อขดลวดเหนี่ยวนำระหว่างโหนด j ใดๆ เข้ากับโหนดอ้างอิง (โหนด $k = 0$)

$$g_{j,j}^{(new)} = g_{j,j}^{(old)} + \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-15)$$

$$i_j^{(new)} = i_j^{(old)} + I_L(t - \Delta t) \quad (2-16)$$

3. ดำเนินการเชื่อมต่อขดลวดเหนี่ยวนำระหว่างโหนด k และโหนด j

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-17)$$

$$g_{j,j}^{(new)} = g_{j,j}^{(old)} + \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-18)$$

$$g_{k,j}^{(new)} = g_{k,j}^{(old)} - \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-19)$$

$$g_{j,k}^{(new)} = g_{j,k}^{(old)} - \frac{1}{R_{L\Delta}} \quad (2-20)$$

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} - I_L(t - \Delta t) \quad (2-21)$$

$$i_j^{(new)} = i_j^{(old)} + I_L(t - \Delta t) \quad (2-22)$$

2.7.3 แบบจำลองเชิงตัวเลขของตัวเก็บประจุ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ อธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ เมื่อใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาในการคำนวณออกเป็นช่วงเล็ก ๆ ส่งผลให้สามารถจัดรูปสมการเป็นสมการพีชคณิตได้ พิจารณาจากรูปที่ 2.11-ค. จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (2-23)$$

ใช้หลักการผลต่างอันดับย้อนหลัง (backward finite difference) จะได้

$$i_C(t) = C \left[\frac{v_C(t) - v_C(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \quad (2-24)$$

นั่นคือ

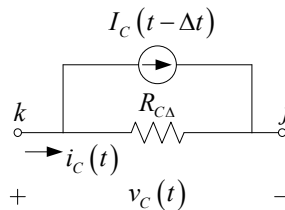
$$i_C(t) = \frac{v_C(t)}{\Delta t / C} - \frac{v_C(t - \Delta t)}{\Delta t / C} \quad (2-25)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$i_C(t) = \frac{v_C(t)}{R_{C\Delta}} + I_C(t - \Delta t) \quad (2-26)$$

โดยที่ $R_{C\Delta} = \frac{\Delta t}{C}$ และ $I_C(t - \Delta t) = -\frac{v_C(t - \Delta t)}{\Delta t / C}$

จะเห็นว่าเมื่อดำเนินการด้วยเทคนิคเวลาดีสครีต (discrete time technique) ตัวเก็บประจุจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปความต้านทานเสมือนต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแสเสมือน ทำให้การต่อเชื่อมตัวเก็บประจุเข้ากับโครงข่ายใช้หลักการของการต่อความต้านทานและแหล่งจ่ายกระแสรวมกัน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ

การต่อตัวเก็บประจุใช้หลักการเพิ่มความต้านทานและเพิ่มแหล่งจ่ายกระแส สูตรการต่อเชื่อมจะคล้ายกับกรณีการต่อความต้านทาน สามารถแบ่งเป็นกรณีย่อยได้ดังนี้

1. ดำเนินการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุระหว่างโหนด k ใด ๆ เข้ากับโหนดอ้างอิง (โหนด $j = 0$)

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-27)$$

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} - I_C(t - \Delta t) \quad (2-28)$$

2. ดำเนินการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุระหว่างโหนด j ใด ๆ เข้ากับโหนดอ้างอิง (โหนด $k = 0$)

$$g_{j,j}^{(new)} = g_{j,j}^{(old)} + \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-29)$$

$$i_j^{(new)} = i_j^{(old)} + I_C(t - \Delta t) \quad (2-30)$$

3. ดำเนินการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุระหว่างโหนด k และโหนด j

$$g_{k,k}^{(new)} = g_{k,k}^{(old)} + \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-31)$$

$$g_{j,j}^{(new)} = g_{j,j}^{(old)} + \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-32)$$

$$g_{k,j}^{(new)} = g_{k,j}^{(old)} - \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-33)$$

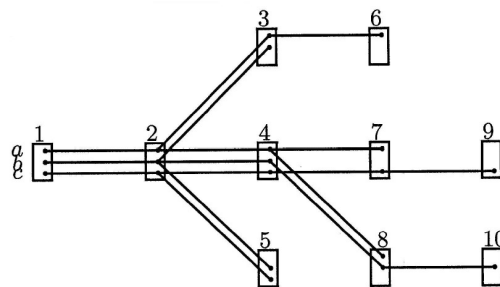
$$g_{j,k}^{(new)} = g_{j,k}^{(old)} - \frac{1}{R_{C\Delta}} \quad (2-34)$$

$$i_k^{(new)} = i_k^{(old)} - I_C(t - \Delta t) \quad (2-35)$$

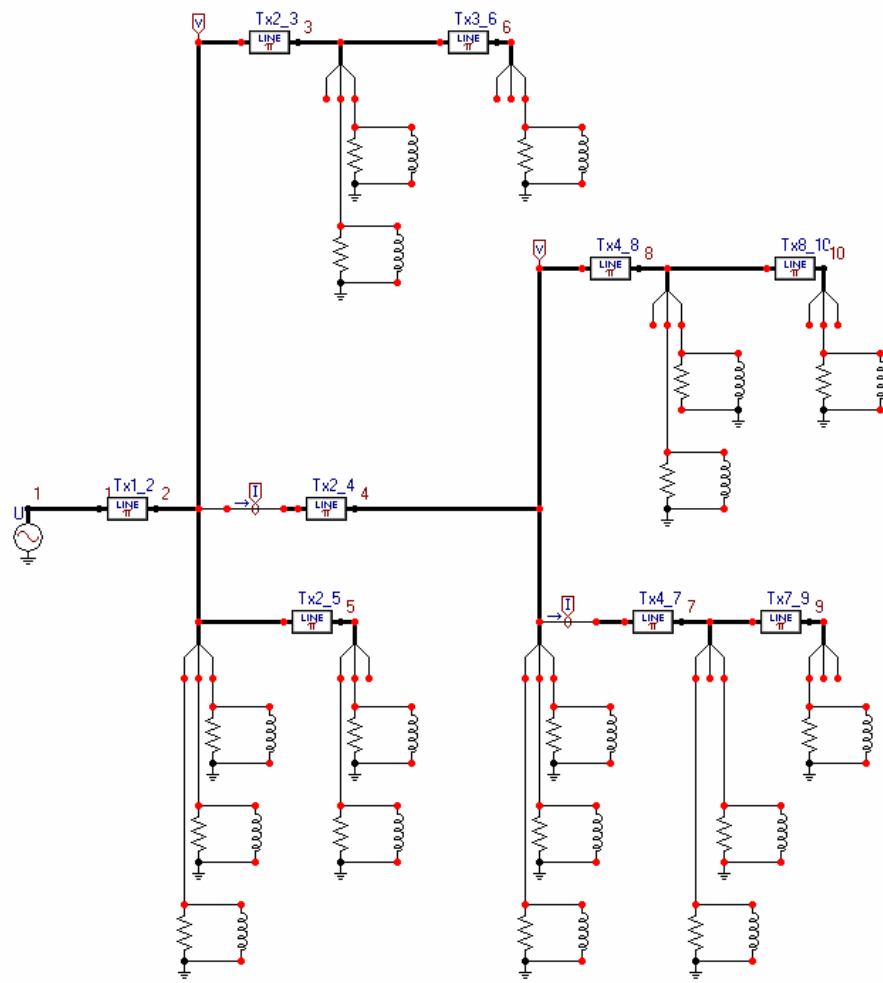
$$i_j^{(new)} = i_j^{(old)} + I_C(t - \Delta t) \quad (2-36)$$

2.7.4 ตัวอย่างการจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบการจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว โดยใช้ระบบทดสอบอย่างง่าย 10 บัส ดังรูปที่ 2.15 มาทำการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองผลจากการใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาเองกับโปรแกรม EMTP (electromagnetic transient program) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว โดยข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้

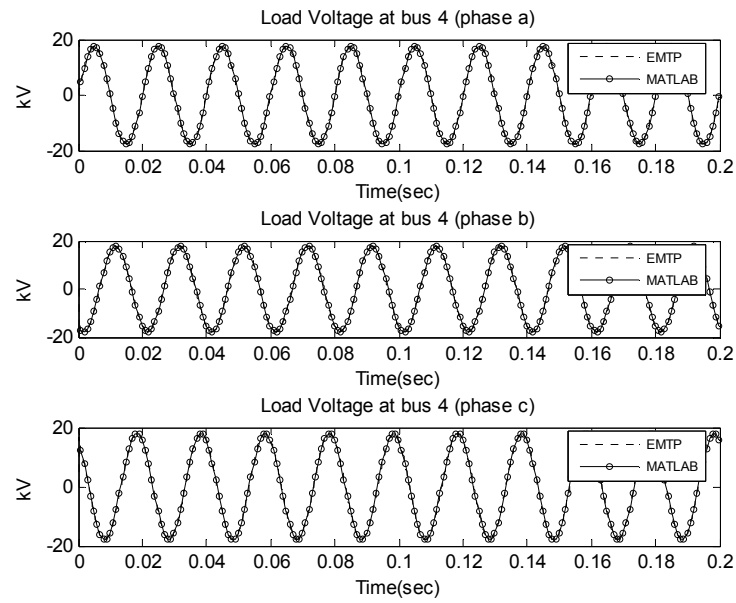


รูปที่ 2.15 ระบบทดสอบ 10 บัส ที่ใช้ในการจำลองผล

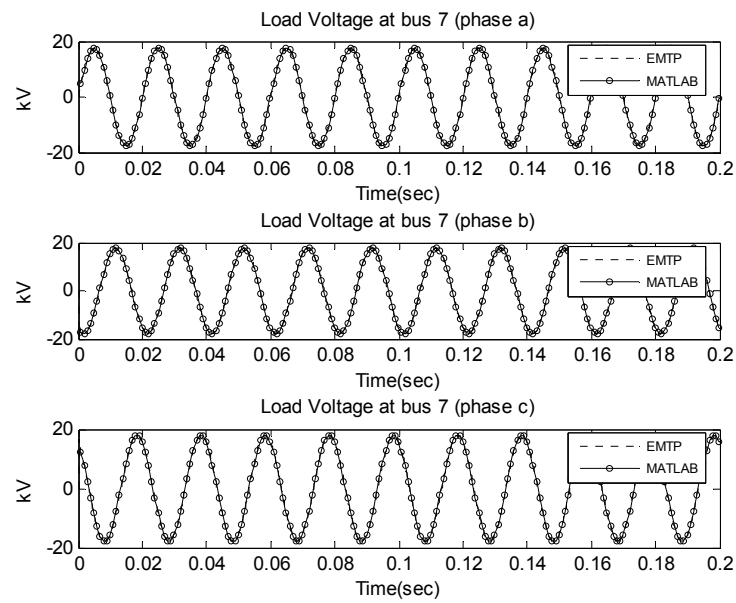


รูปที่ 2.16 แผนภาพการจำลองผลโดยโปรแกรม EMTP

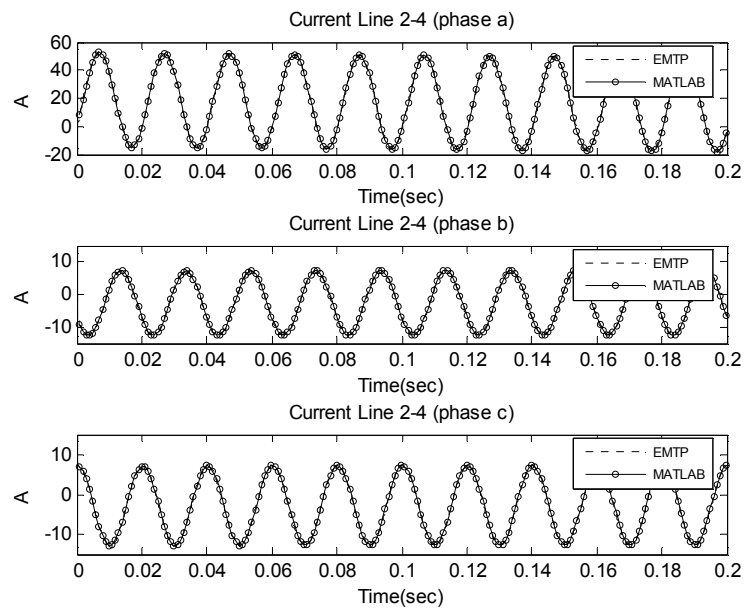
ในการจำลองผลระบบทดสอบนั้นเราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันโหนดและกระแสที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นมาเองกับ โปรแกรม EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป แผนภาพการจำลองผลโดยโปรแกรม EMTP แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้



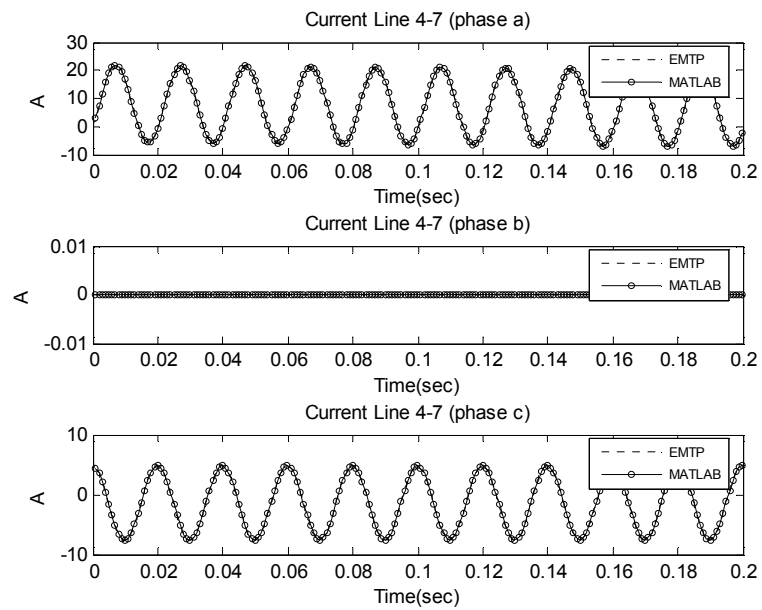
รูปที่ 2.17 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเฟสที่โหลดบัส 4



รูปที่ 2.18 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเฟสที่โหลดบัส 7



รูปที่ 2.19 ผลการเปรียบเทียบกระแสเฟสที่ไหลจากบัส 2 ไปยังบัส 4



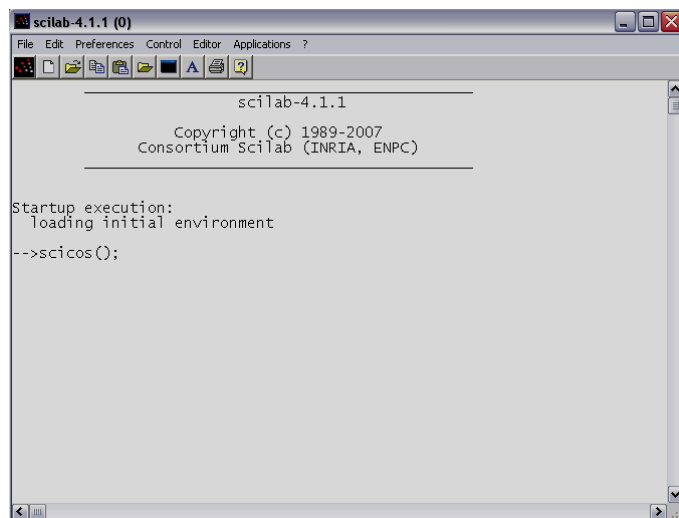
รูปที่ 2.20 ผลการเปรียบเทียบกระแสเฟสที่ไหลจากบัส 4 ไปยังบัส 7

จากตัวอย่างผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันโพลดและกระแสที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB กับ โปรแกรม EMTP แสดงดังรูปที่ 2.17 2.18 2.19 และ 2.20 จะพบว่าค่าแรงดันโพลดและกระแสที่ไหลในสายส่งที่ได้จากการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม EMTP นั้นมีค่าเท่ากัน นั่นหมายความว่าโปรแกรมที่เราพัฒนาขึ้นมาเองมีความสามารถในจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราวเท่ากับ โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างกว้างขวางอย่างโปรแกรม EMTP

2.8 การจำลองผลระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง SCICOS

SCICOS เป็นกล่องเครื่องมือในโปรแกรม SCILAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับโปรแกรม MATLAB และ ไม่ต้องเสียเงินค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ เหมาะสำหรับผู้ทำงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ โดย SCICOS นี้สามารถสร้างแบบจำลองในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมและจำลองผลระบบพลวัตได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับกล่องเครื่องมือ SCICOS แสดงได้ดังนี้

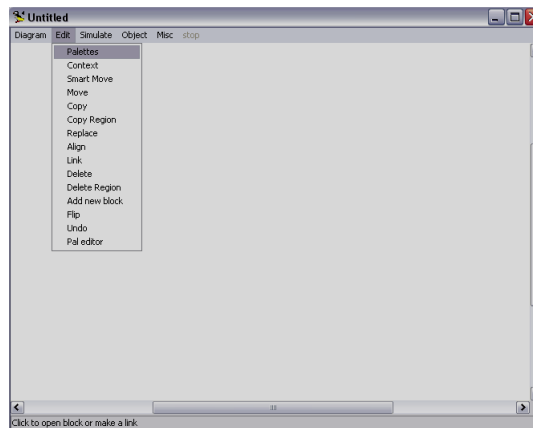
การเรียกใช้งานกล่องเครื่องมือ SCICOS สามารถเรียกใช้โดยพิมพ์ scicos(); ในหน้าต่างคำสั่ง (command window) ของโปรแกรม SCILAB แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเรียกใช้กล่องเครื่องมือ SCICOS

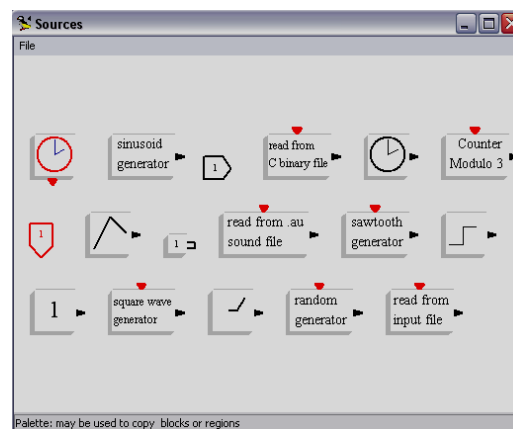
2.8.1 การสร้างแบบจำลองด้วย SCICOS

การสร้างแบบจำลองเราสามารถเข้าไปที่กล่องเครื่องมือ SCICOS ซึ่ง SCICOS ได้จัดเตรียมรวบรวมบล็อกต่าง ๆ ไว้ใน palettes และสามารถเรียกใช้คำสั่ง palettes ได้ในเมนู Edit ได้ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งในคำสั่ง palettes สามารถเปิดบล็อกไดอะล็อก (dialog box) รายการคำสั่งต่าง ๆ ซึ่งแต่ละรายการสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

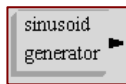


รูปที่ 2.22 การเรียกใช้คำสั่ง palettes

1. Source library ประกอบไปด้วยบล็อกเครื่องกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ เช่น สัญญาณรูปคลื่นไซน์ สัญญาณสี่เหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.23 โดยความหมายของแต่ละบล็อกยกตัวอย่างได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 หน้าต่างคำสั่ง Source



บล็อกเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์



บล็อกผลของเวลา ใช้กระตุ้นบล็อกสโคปเป็นช่วงเวลาตามความถี่

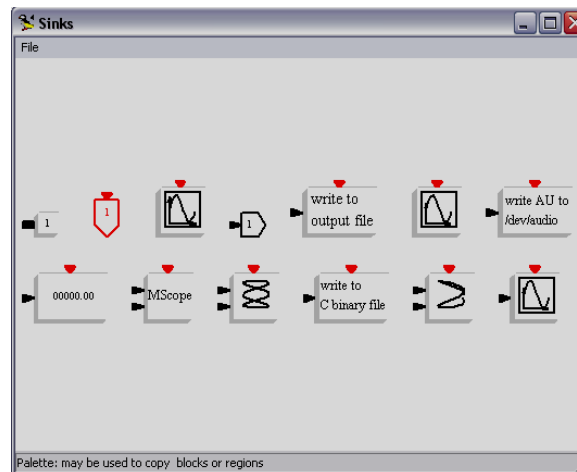


บล็อกค่าคงที่ ใช้ป้อนค่าคงที่ต่าง ๆ

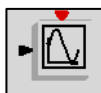


บล็อกช่องสัญญาณอินพุตของ super block

2. Sink library ประกอบด้วยบล็อกที่เก็บสัญญาณเอาต์พุตหรือประมวลผลสัญญาณและแสดงผลหน้าจอ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.24 โดยความหมายของแต่ละบล็อกยกตัวอย่างได้ดังนี้



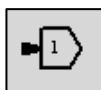
รูปที่ 2.24 หน้าต่างคำสั่ง Sink



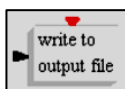
บล็อกสโคปจับสัญญาณเอาต์พุต



บล็อกช่องสัญญาณเวลาเอาต์พุต

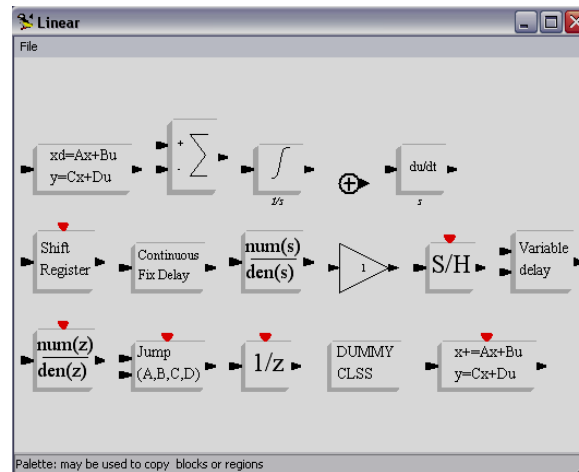


บล็อกช่องสัญญาณออก

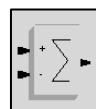


บล็อกเขียนสัญญาณเอาต์พุต

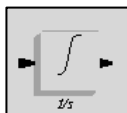
3. Linear library ประกอบด้วยบล็อกที่เป็นตัวดำเนินการของสมการเชิงเส้น เช่น ผลรวมอัตราขยาย และระบบไดนามิกส์เชิงเส้นต่าง ๆ ทั้งเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.25 โดยความหมายของแต่ละบล็อกยกตัวอย่างได้ดังนี้



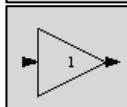
รูปที่ 2.25 หน้าต่างคำสั่ง Linear



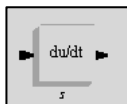
บล็อกผลรวมของสมการ



บล็อกอินทิเกรต

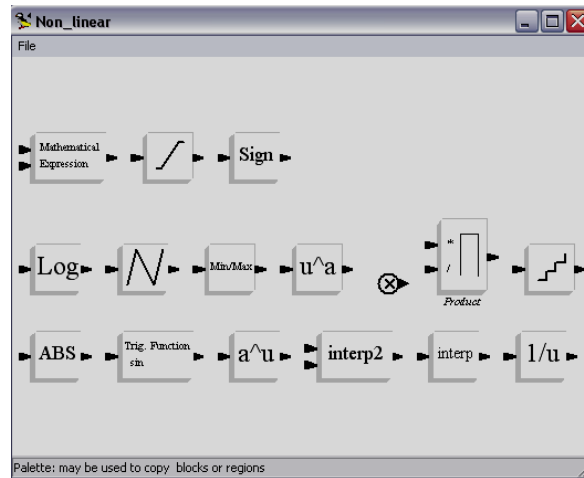


บล็อกอัตราขยาย

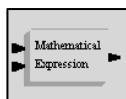


บล็อกอนุพันธ์

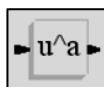
4. Non-linear library ประกอบด้วยบล็อกที่เป็นตัวดำเนินการของสมการไม่เชิงเส้น ที่เรียกว่า “Mathematical expression” ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.26 โดยความหมายของแต่ละบล็อกยกตัวอย่างได้ดังนี้



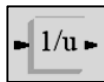
รูปที่ 2.26 หน้าต่างคำสั่ง Non-linear library



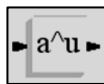
บล็อกสมการคณิตศาสตร์ใช้สร้างสมการทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น



บล็อกสัญญาณอินพุตยกกำลังค่าคงที่ a

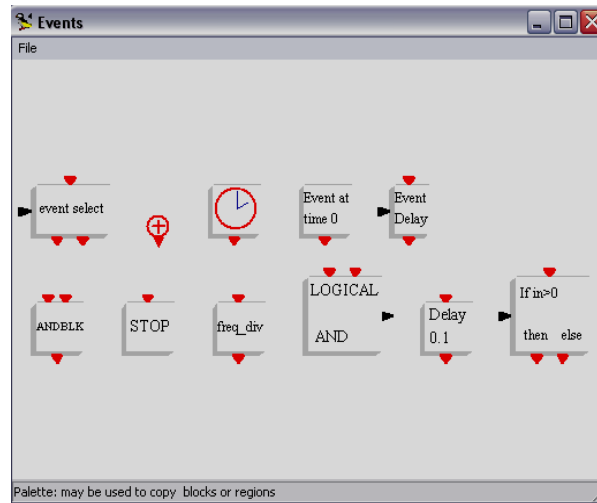


บล็อก 1 หารด้วยสัญญาณอินพุต

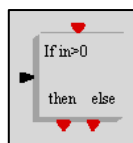


บล็อกค่าคงที่ a ยกกำลังสัญญาณอินพุต

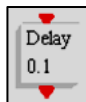
5. Event library ประกอบด้วยบล็อกต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.27 โดยความหมายของแต่ละบล็อกยกตัวอย่างได้ดังนี้



รูปที่ 2.27 หน้าต่างคำสั่ง Event library



บล็อกเงื่อนไข if ใช้ตรวจสอบเงื่อนไขของสัญญาณอินพุต



บล็อกหน่วงเวลา

2.8.2 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วย SCICOS

ถ้าต้องการให้ SCICOS แก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ดังต่อไปนี้

$$2 \frac{d^3 y}{dt^3} + 4 \frac{d^2 y}{dt^2} + 8 \frac{dy}{dt} + 10y = 10u(t)$$

สามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ SCICOS ได้ดังนี้

เลือกตัวแปรสถานะ (state variables) โดยกำหนดให้ $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = \ddot{y}$

จากตัวแปรสถานะที่เรากำหนดสามารถเขียนสมการสถานะ (state equation) ได้ดังนี้

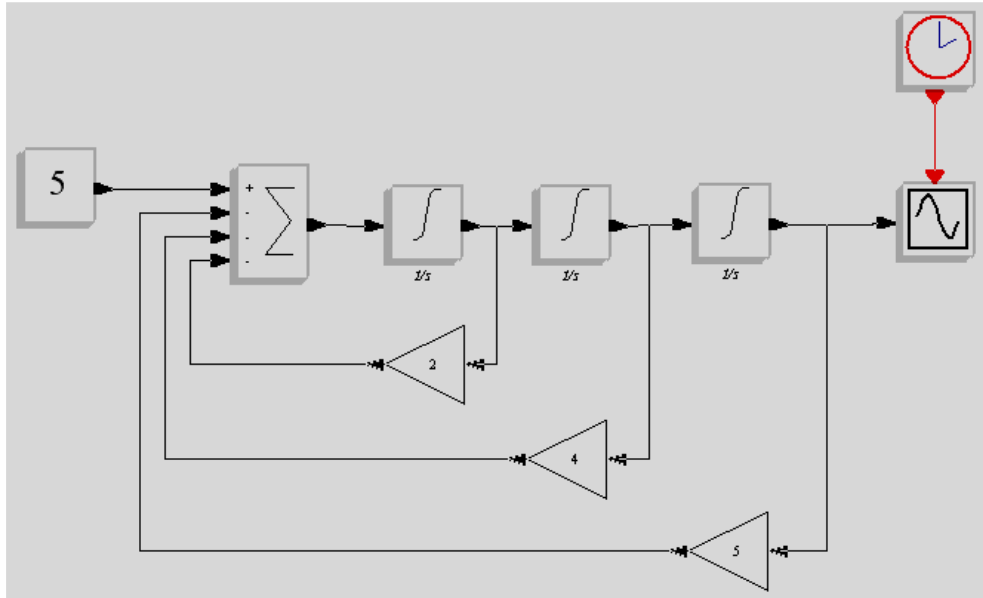
$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

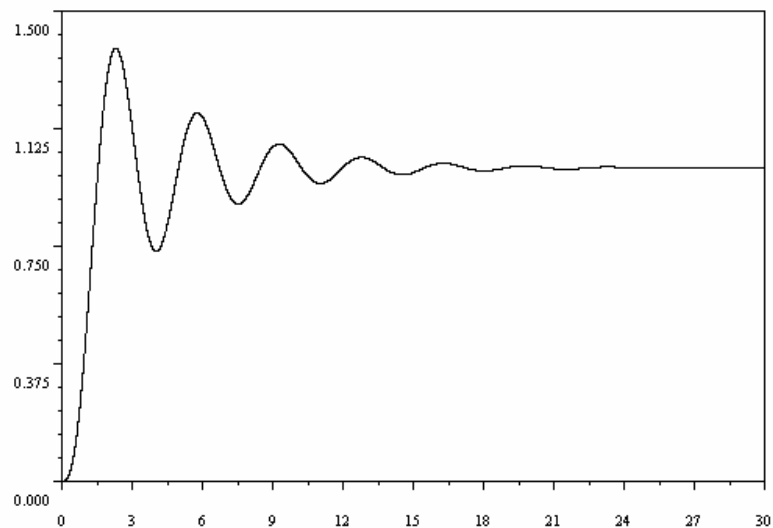
$$\dot{x}_3 = -5x_1 - 4x_2 - 2x_3 + 5u(t)$$

และสมการเอาต์พุต คือ $y = [1 \ 0 \ 0]x$

ดังนั้นจากสมการสถานะสามารถนำมาสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ SCICOS ได้ดังรูปที่ 2.28 และผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์จะได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.28 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ตัวอย่างด้วย SCICOS



รูปที่ 2.29 ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ตัวอย่าง

2.9 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว รวมทั้งการจำลองผลระบบไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลอง SCICOS ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร

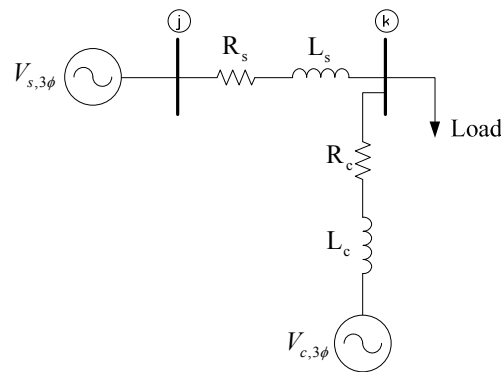
3.1 บทนำ

การจำลองผลระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในสถานะชั่วคราว ดังแสดงในบทที่ 2 เป็นการจำลองระบบในสถานะชั่วคราวอย่างง่าย ซึ่งระบบประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สายป้อน และ โหลด โดยไม่มีการติดตั้งตัวชดเชยเข้าไปในระบบ เป็นต้น

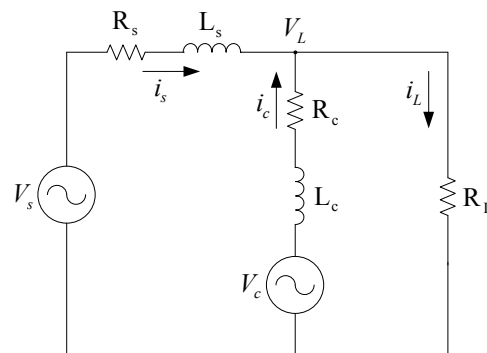
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร เพื่อนำไปใช้กับการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม พร้อมทั้งกล่าวถึงผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ และยังกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม ลำดับต่อมากล่าวถึงผลเฉลยการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตตคอมโดยใช้ SCICOS

3.2 แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

ดี-สแตตคอมที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว ซึ่งจะไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงดีซี สามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 3.1 กำหนดให้โหลดที่พิจารณาเป็นโหลดชนิดความต้านทาน (R_L) และกำหนดให้ R_c และ L_c คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในตัวของดี-สแตตคอมตามลำดับ จากรูปที่ 3.1 สามารถหาจรรยาสมมูลของแบบจำลองได้ดังนี้



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 ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งผลจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการสับวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ออกไปได้ 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

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

และพิจารณาที่คี่-สแตตคอม 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)

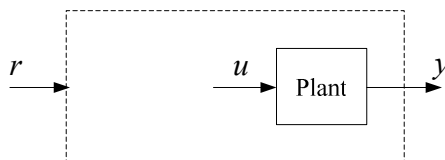
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{dV_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{R_c}{L_c} & \frac{-R_c - R_L}{R_L L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ V_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s}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

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 การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วครู่สำหรับดี-สแตตคอม

ระบบควบคุมส่วนมากจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.3 ซึ่งพลานต์และสัญญาณอ้างอิง $r(t)$ จะต้องรู้มาก่อนแล้ว อินพุต $u(t)$ ของพลานต์ เรียกว่า สัญญาณเร้าร์ (actuating signal) หรือ สัญญาณควบคุม (control signal) เอาต์พุต $y(t)$ ของพลานต์ เรียกว่า พลานต์เอาต์พุต (plant output) หรือ controlled signal ปัญหาก็คือการออกแบบระบบรวมทั้งหมดเพื่อให้ได้มาซึ่งพลานต์เอาต์พุตตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างใกล้เคียงเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะมีวิธีการควบคุมอยู่ 2 วิธี ถ้าสัญญาณเร้าร์ขึ้นอยู่กับสัญญาณอ้างอิงเท่านั้นและไม่เกี่ยวข้องกับพลานต์เอาต์พุต การควบคุมนี้เรียกว่า การควบคุมแบบวงเปิด (open-loop control) และถ้าสัญญาณเร้าร์ขึ้นอยู่กับสัญญาณอ้างอิงและพลานต์เอาต์พุต การควบคุมนี้เรียกว่า การควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control) หรือการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) (Chen, 1999)



รูปที่ 3.3 การออกแบบระบบควบคุม

โดยทั่วไปการควบคุมระบบวงเปิดยังให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ ซึ่งนั่นหมายถึงสัญญาณหรือพลังงานอื่น ๆ จากภายนอกเข้า

ไปกระทำกับระบบ สัญญาณที่แทรกเข้ามาจากภายนอกเหล่านี้ เรียกว่า การรบกวน (disturbances) ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับสามารถช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต และกำจัดสัญญาณรบกวนหรือการรบกวนอื่น ๆ ได้ (Chen, 1999) ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนกลับจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับโดยใช้สมการปริภูมิสถานะ (state-space equation) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

พิจารณาสมการสถานะตัวแปรเดียวขนาด n จะได้ว่า

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

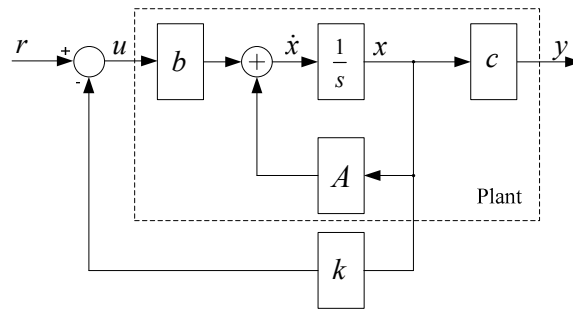
โดยกำหนดให้ $d = 0$ เพื่อจะได้พิจารณาอย่างง่าย ในสถานะป้อนกลับ (state feedback) อินพุต u จะหาได้โดย

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

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

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

แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 แต่ละอัตราขยายป้อนกลับ k_i (feedback gain) จะเป็นค่าคงที่จำนวนจริง ซึ่งเรียกว่า อัตราขยายคงที่ของสถานะป้อนกลับแบบลบ (constant gain negative state feedback) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า สถานะป้อนกลับ การหาค่าอัตราขยายป้อนกลับนั้นสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชัน *place* ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งการใช้ฟังก์ชันนี้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 3.4 โครงสร้างสถานะป้อนกลับ

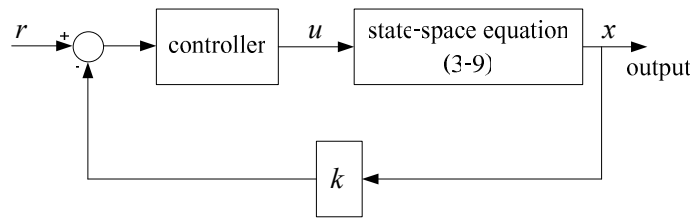
ซึ่งจากสมการที่ (3-12) จะได้เมทริกซ์ $A-bk$ หรือ A' ดังนี้

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

เมื่อพิจารณาถึงการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตตคอม จากแบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตรในสมการที่ (3-9) จะได้ว่าตัวแปรสถานะ (state variables) คือ กระแสจากแหล่งจ่าย i_s (current source) และแรงดันโหลด V_L (load voltage) ส่วนตัวแปรอินพุต (input variables) คือ แรงดันจากแหล่งจ่าย V_s (voltage source) และแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตตคอม 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-สแตตคอม ดังรูปที่ (3.5)



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional controller) เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยเป็นการควบคุมเอาต์พุตของตัวควบคุมโดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมหรือค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบสัดส่วน (k_p) เพื่อให้เอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ไวตามความต้องการและทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย

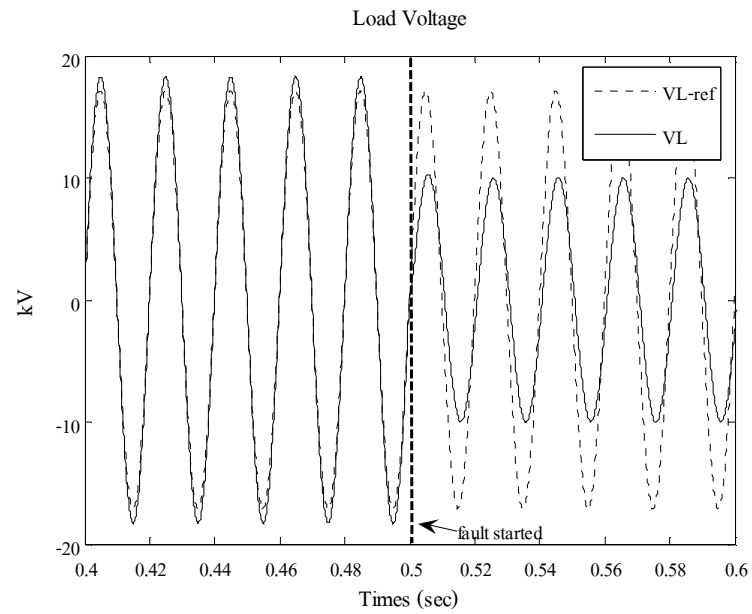
3.4 ผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม

ในการทดสอบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตคคอม จะทดสอบกับระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัส ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 การทดสอบจะจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมมาตรที่บัสโหลด เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่บัสโหลดลดลง และติดตั้งดี-สแตคคอมที่บัสโหลด เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจรสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุม ได้ดังนี้

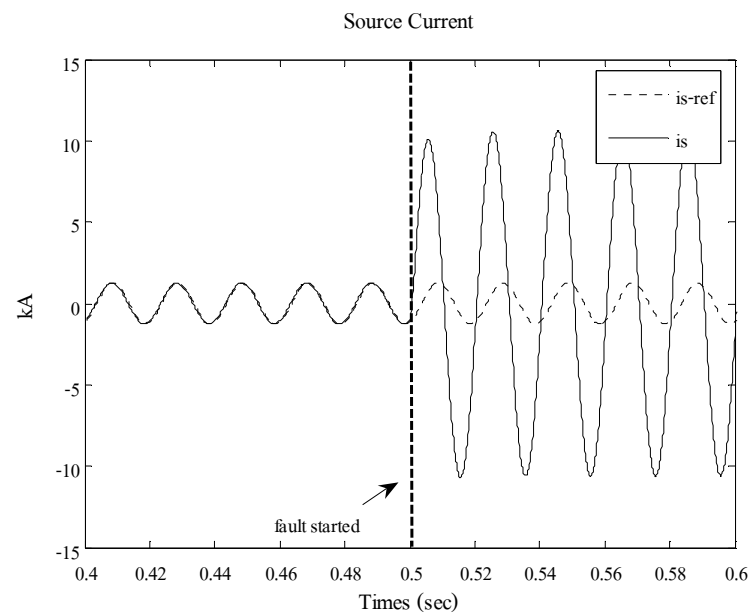


รูปที่ 3.6 ระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัส

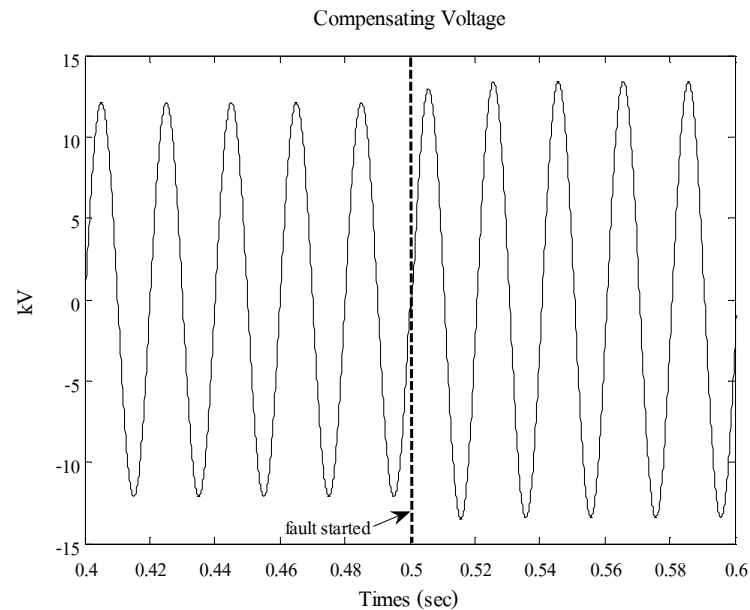
3.4.1 สถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



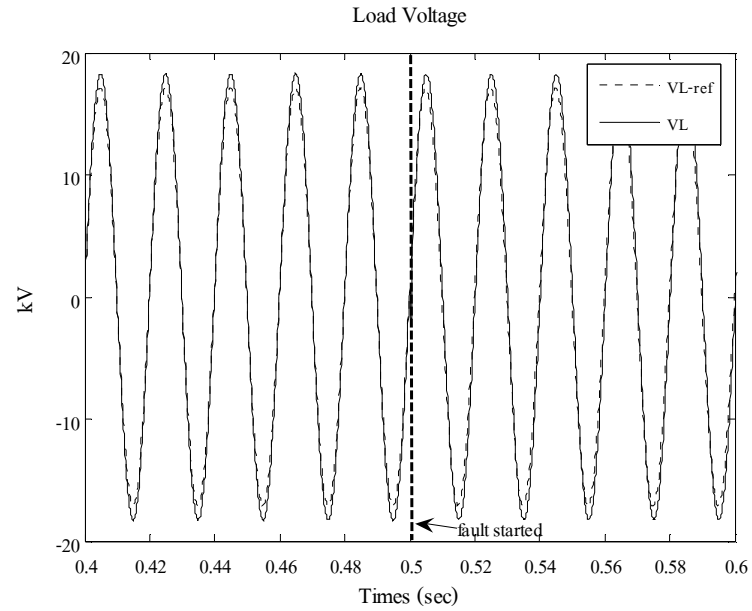
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



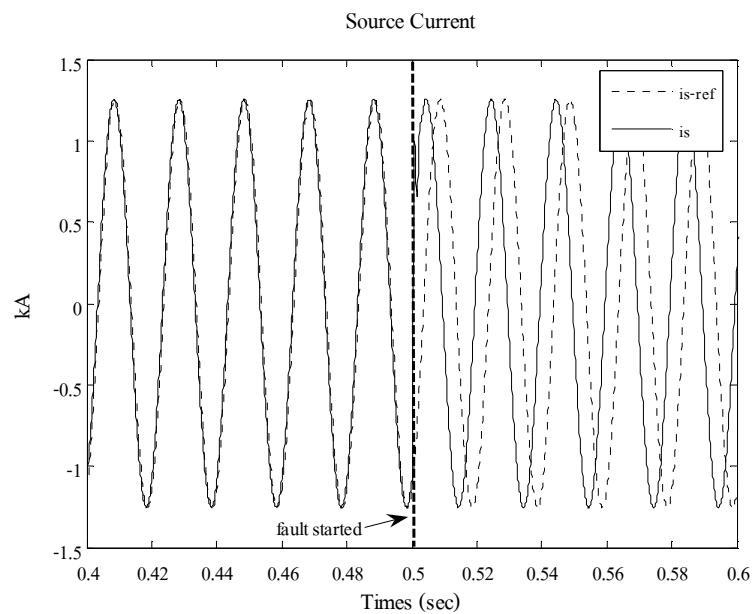
รูปที่ 3.9 แรงดันที่ตี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)

รูปที่ 3.7 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ทำให้เกิดแรงดันตกเนื่องมาจากเกิดการลัดวงจร รูปที่ 3.8 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง และรูปที่ 3.9 แสดงแรงดันที่ตี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบจะมีขนาดแรงดันมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ไม่มาก เพราะเนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด

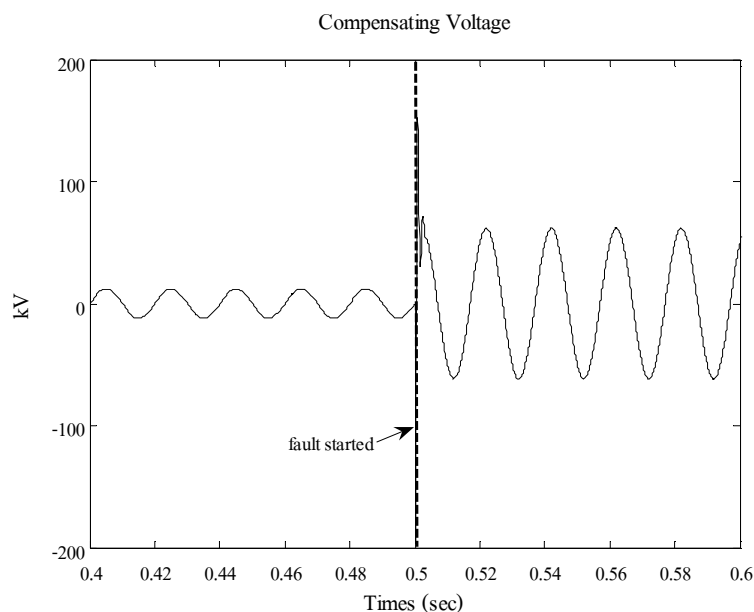
3.4.2 สถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 3.12 แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)

รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดปกติที่เวลา 0.5 วินาที ตัวควบคุมสามารถช่วยลดเซชแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจรได้เป็นอย่างดี รูปที่ 3.11 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง แต่มุมเฟสไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงมุมเฟสแต่อย่างใด รูปที่ 3.12 แสดงแรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบมีการกระเพื่อมของแรงดันมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม

จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังตารางที่ 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 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับสำหรับดี-สแตตคอม

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น พิจารณาจากความสามารถควบคุมได้ (controllable) และความสามารถสังเกตได้ (observable) หรือพิจารณาจากค่าเฉพาะ (eigenvalues) ของเมทริกซ์ A' ของระบบในสมการปริภูมิสถานะ ดังสมการที่ (3-13) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 ตรวจสอบความสามารถควบคุมได้

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

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 ส่วนอันดับของเมทริกซ์ความ สังกะไดได้เท่ากับ 2 แสดงว่า “ระบบสามารถสังกะไดได้”

3.5.3 ตรวจสอบค่าเจาะจง

วิธีการตรวจสอบนี้เป็นวิธีการตรวจสอบจากค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' ของระบบใน สมการปริภูมิสถานะ ซึ่งระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงที่หาออกมาได้นั้นเป็นจำนวนจริง ลบทุกสมาชิก สามารถตรวจสอบได้ง่ายโดยใช้ฟังก์ชัน *eig* ในโปรแกรม MATLAB

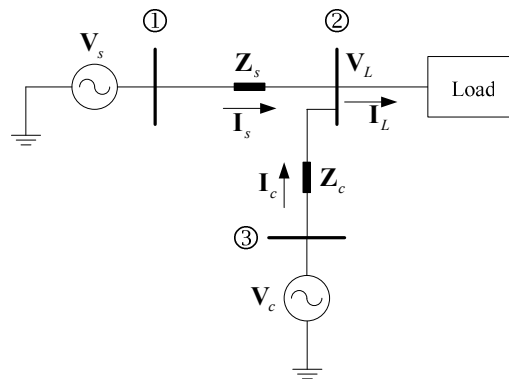
ผลการตรวจสอบ

$$\text{eigenvalues} = \begin{bmatrix} -44787 \\ -4.0428 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อหาค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' จะได้เป็นจำนวนจริงลบ ทุกสมาชิกแสดงว่า “ระบบมีเสถียรภาพ”

3.6 ผลเฉลยการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตตคอม โดยใช้ SCICOS

ปัญหาของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและคุณภาพกำลังไฟฟ้าในโครงข่ายระบบจ่าย กำลังไฟฟ้า คือ การกำหนดอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า ระหว่างที่เกิดแรงดันหย่อน แรงดันโหลดที่บัสที่ติดตั้งดี-สแตตคอมจะสามารถรักษาระดับแรงดัน ได้ โดยการฉีดกระแสชดเชยเข้าไปในระบบ กระแสที่ฉีดเข้าไปเกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับ วิธีการควบคุมที่ยุงยาก ซับซ้อน จากงานวิจัยที่ผ่านมาวิธีในการควบคุมอยู่หลายวิธี ซึ่งปกติจะใช้ วิธีที่เกี่ยวกับการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการกราฟิก (graphical method) ในการ ออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอม ผ่านแบบจำลอง SCICOS โดยใช้ระบบกำลังไฟฟ้าอย่าง ง่าย 2 บัส ที่ติดตั้งดี-สแตตคอม (Sumpavakup and Kulworawanichpong, 2008) ดังรูปที่ 3.13 มาทำ การทดสอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 2 บัส ที่ติดตั้งดี-สแตคคอม

พิจารณาแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เหมือนกับสมการที่ (3-1) สามารถพิจารณาในรูปแบบของเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$V_c = |V_c| \angle \delta_c \quad (3-15)$$

โดยที่ V_c คือ เฟสเซอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมที่ต่อเชื่อมเข้ากับระบบ
 $|V_c|$ คือ ขนาดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
 δ_c คือ มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตคคอม

จากรูปที่ 3.13 ใช้หลักการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าแบบโหนดที่บัสโหนด จะได้

$$I_L = I_s + I_c \quad (3-16)$$

พิจารณาโหนดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) จะได้

$$\frac{V_L}{R_L} = \frac{V_s - V_L}{Z_s} + \frac{V_c - V_L}{Z_c} \quad (3-17)$$

จัดรูปสมการที่ (3-17) ให้อยู่ในรูปของ V_L และเขียนให้อยู่ในรูปของขนาดและมุมเฟสจะได้

$$|\mathbf{V}_L| \angle \delta_L = |\mathbf{Z}_A| \angle \theta_A |\mathbf{V}_s| \angle 0^\circ + |\mathbf{Z}_B| \angle \theta_B |\mathbf{V}_c| \angle \delta_c \quad (3-18)$$

โดยที่

$$\mathbf{Z}_A = \frac{R_L \mathbf{Z}_c}{\mathbf{Z}_c \mathbf{Z}_s + R_L \mathbf{Z}_c + R_L \mathbf{Z}_s} \quad \text{และ} \quad \mathbf{Z}_B = \frac{R_L \mathbf{Z}_s}{\mathbf{Z}_c \mathbf{Z}_s + R_L \mathbf{Z}_c + R_L \mathbf{Z}_s}$$

จากสมการที่ (3-18) แยกส่วนจริง (real parts) กับส่วนจินตภาพ (imaginary parts) จะได้

ส่วนจริง คือ

$$|\mathbf{V}_L| \cos \delta_L = |\mathbf{Z}_A| |\mathbf{V}_s| \cos \theta_A + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_B \cos \delta_c - |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_B \sin \delta_c \quad (3-19)$$

ส่วนจินตภาพ คือ

$$|\mathbf{V}_L| \sin \delta_L = |\mathbf{Z}_A| |\mathbf{V}_s| \sin \theta_A + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_B \sin \delta_c + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_B \cos \delta_c \quad (3-20)$$

กำหนดให้

$$A = |\mathbf{Z}_A| |\mathbf{V}_s| \cos \theta_A + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_B \cos \delta_c - |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_B \sin \delta_c$$

$$B = |\mathbf{Z}_A| |\mathbf{V}_s| \sin \theta_A + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_B \sin \delta_c + |\mathbf{Z}_B| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_B \cos \delta_c$$

นำสมการที่ (3-20) หาร สมการที่ (3-19) จะได้

$$\delta_L = \tan^{-1} \left[\frac{B}{A} \right] \quad (3-21)$$

และนำสมการที่ (3-19)² บวก สมการที่ (3-20)² จะได้

$$|\mathbf{V}_L| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3-22)$$

จัดรูปสมการที่ (3-16) ให้อยู่ในรูปของ \mathbf{I}_s จะได้

$$\mathbf{I}_s = \frac{\mathbf{V}_L}{R_L} - \frac{\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_L}{\mathbf{Z}_c} \quad (3-23)$$

จัดรูปสมการที่ (3-23) ใหม่ เขียนให้อยู่ในรูปของขนาดและมุมเฟสจะได้

$$|\mathbf{I}_s| \angle \phi_s = |\mathbf{Z}_E| \angle \theta_E |\mathbf{V}_L| \angle \delta_L - |\mathbf{Z}_D| \angle \theta_D \mathbf{V}_c \angle \delta_c \quad (3-24)$$

โดยที่ $\mathbf{Z}_E = \frac{R_L + \mathbf{Z}_c}{R_L \mathbf{Z}_c}$ และ $\mathbf{Z}_D = \frac{1}{\mathbf{Z}_c}$

จากสมการที่ (3-24) แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพจะได้

ส่วนจริง คือ

$$|\mathbf{I}_s| \cos \phi_s = |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \cos \theta_E \cos \delta_L - |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \sin \theta_E \sin \delta_L - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_D \cos \delta_c + |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_D \sin \delta_c \quad (3-25)$$

ส่วนจินตภาพ คือ

$$|\mathbf{I}_s| \sin \phi_s = |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \cos \theta_E \sin \delta_L + |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \sin \theta_E \sin \delta_L - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_D \sin \delta_c - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_D \cos \delta_c \quad (3-26)$$

กำหนดให้

$$C = |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \cos \theta_E \cos \delta_L - |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \sin \theta_E \sin \delta_L - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_D \cos \delta_c + |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_D \sin \delta_c$$

$$D = |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \cos \theta_E \sin \delta_L + |\mathbf{Z}_E| |\mathbf{V}_L| \sin \theta_E \sin \delta_L - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \cos \theta_D \sin \delta_c - |\mathbf{Z}_D| |\mathbf{V}_c| \sin \theta_D \cos \delta_c$$

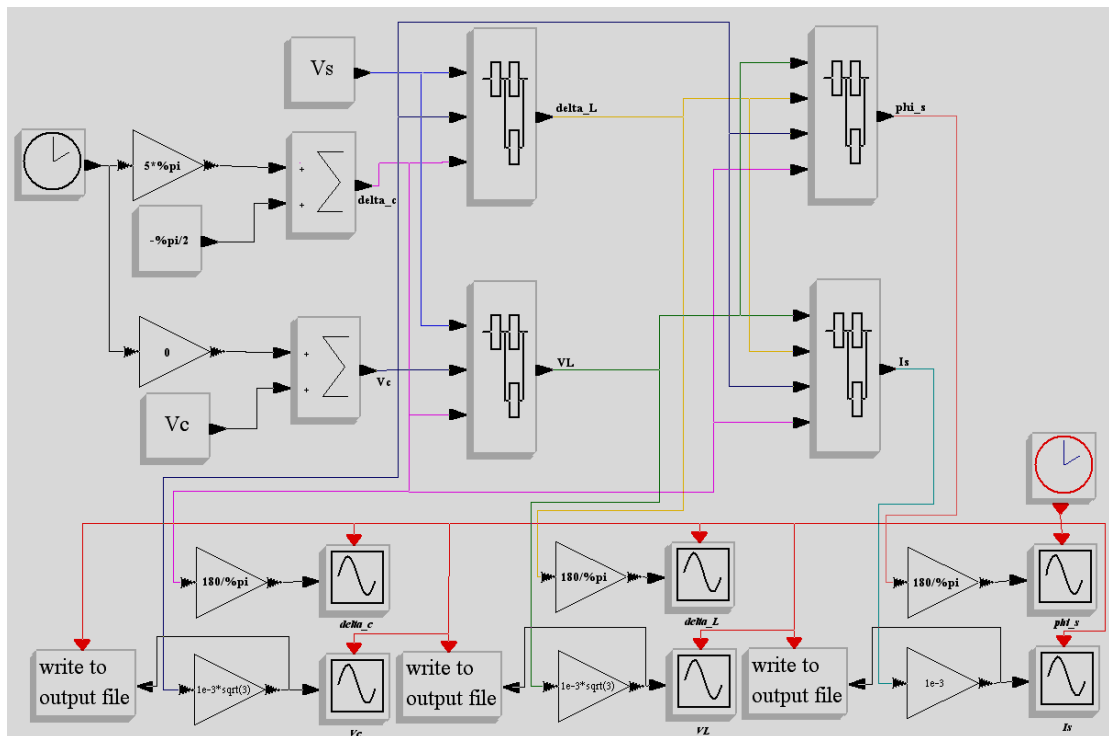
นำสมการที่ (3-26) หาร สมการที่ (3-25) จะได้

$$\phi_s = \tan^{-1} \left[\frac{D}{C} \right] \quad (3-27)$$

และนำสมการที่ (3-25)² บวก สมการที่ (3-26)² จะได้

$$|I_s| = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (3-28)$$

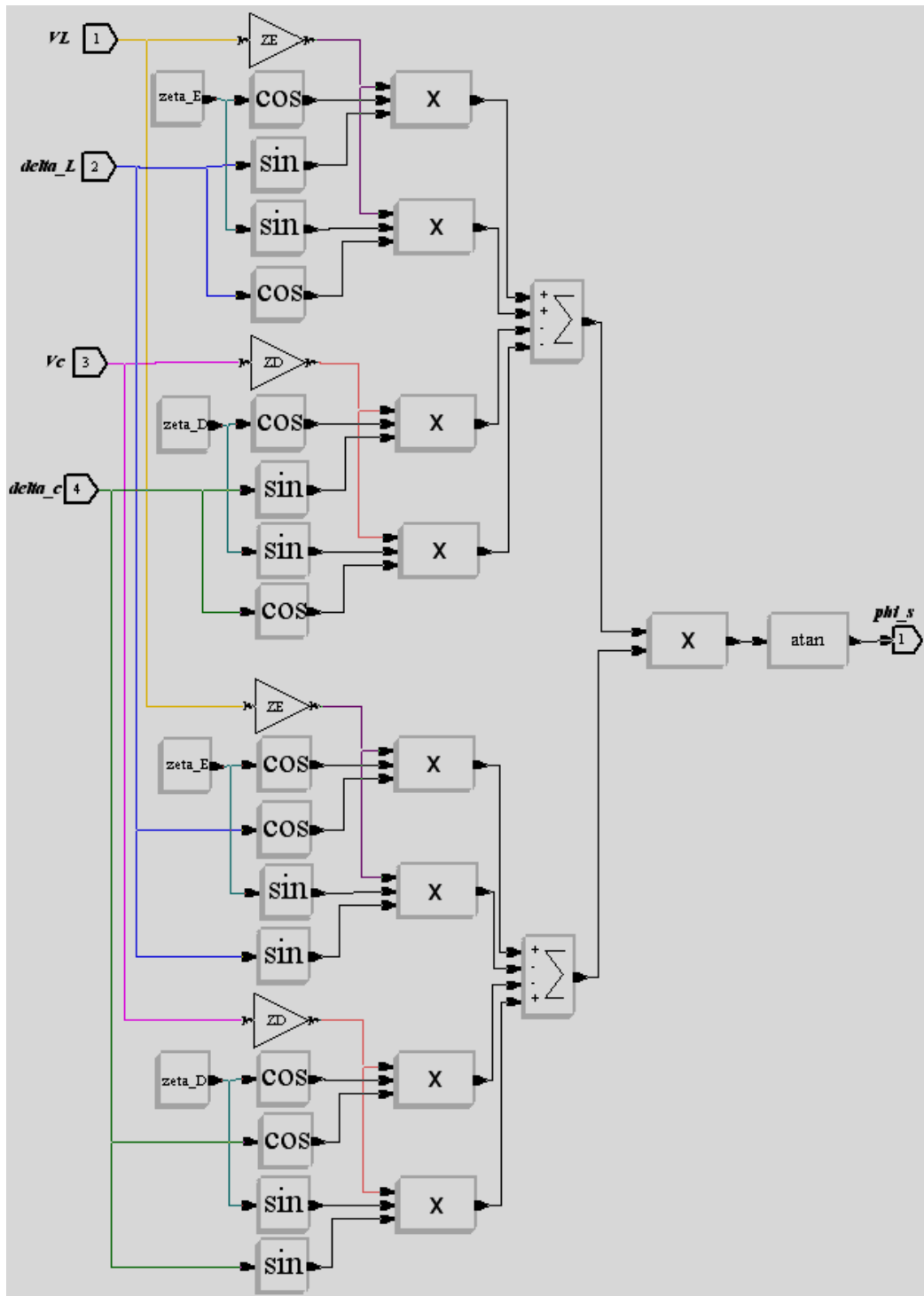
จากแบบจำลองของดี-สแตคคอมที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง SCICOS ได้ดังรูปที่ 3.14



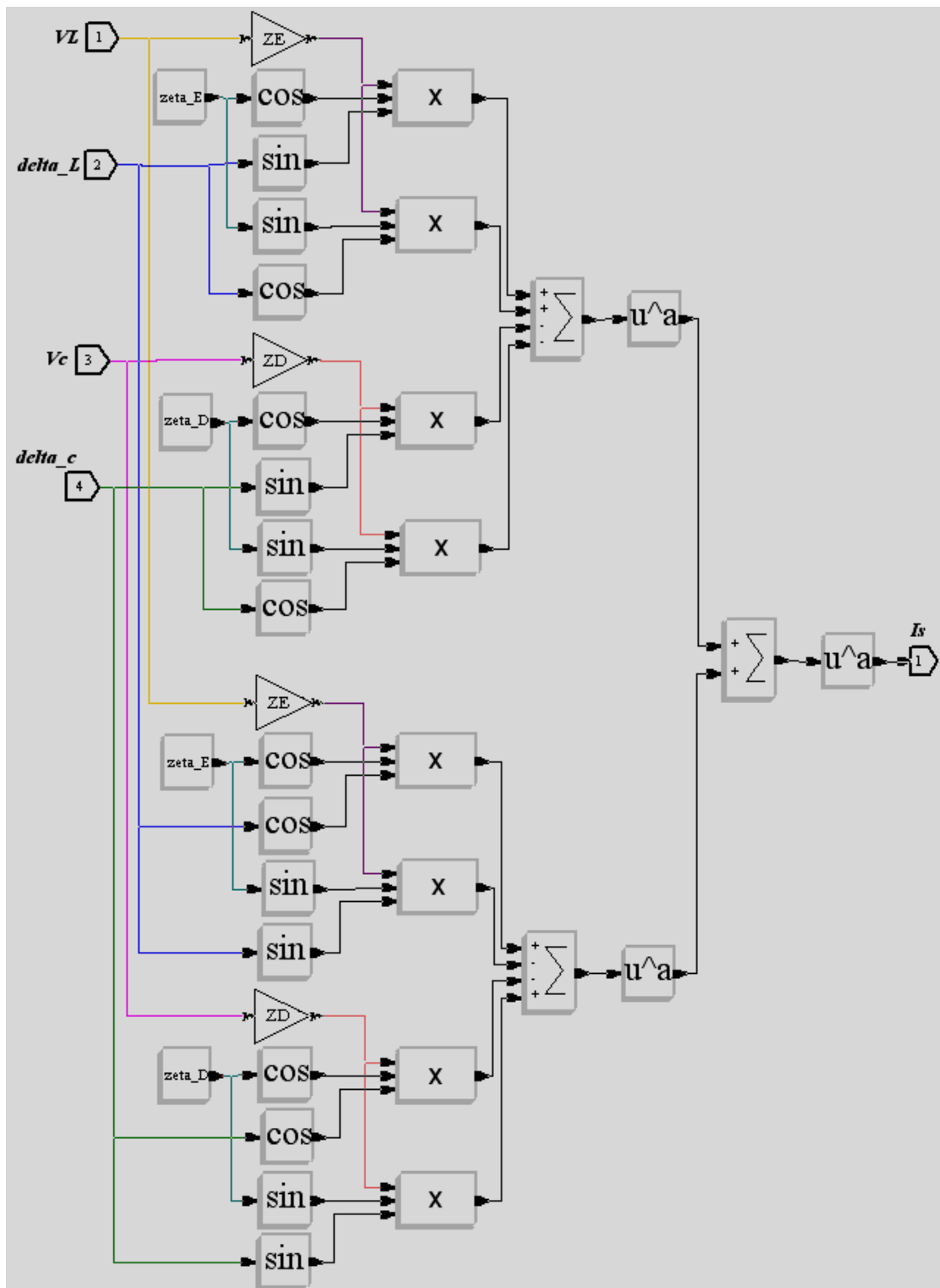
รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของดี-สแตคคอม

จากรูปที่ 3.14 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย 2 บัซ ที่ติดตั้งดี-สแตคคอมดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ คือ สมการที่ (3-26), (3-27), (3-20) และ

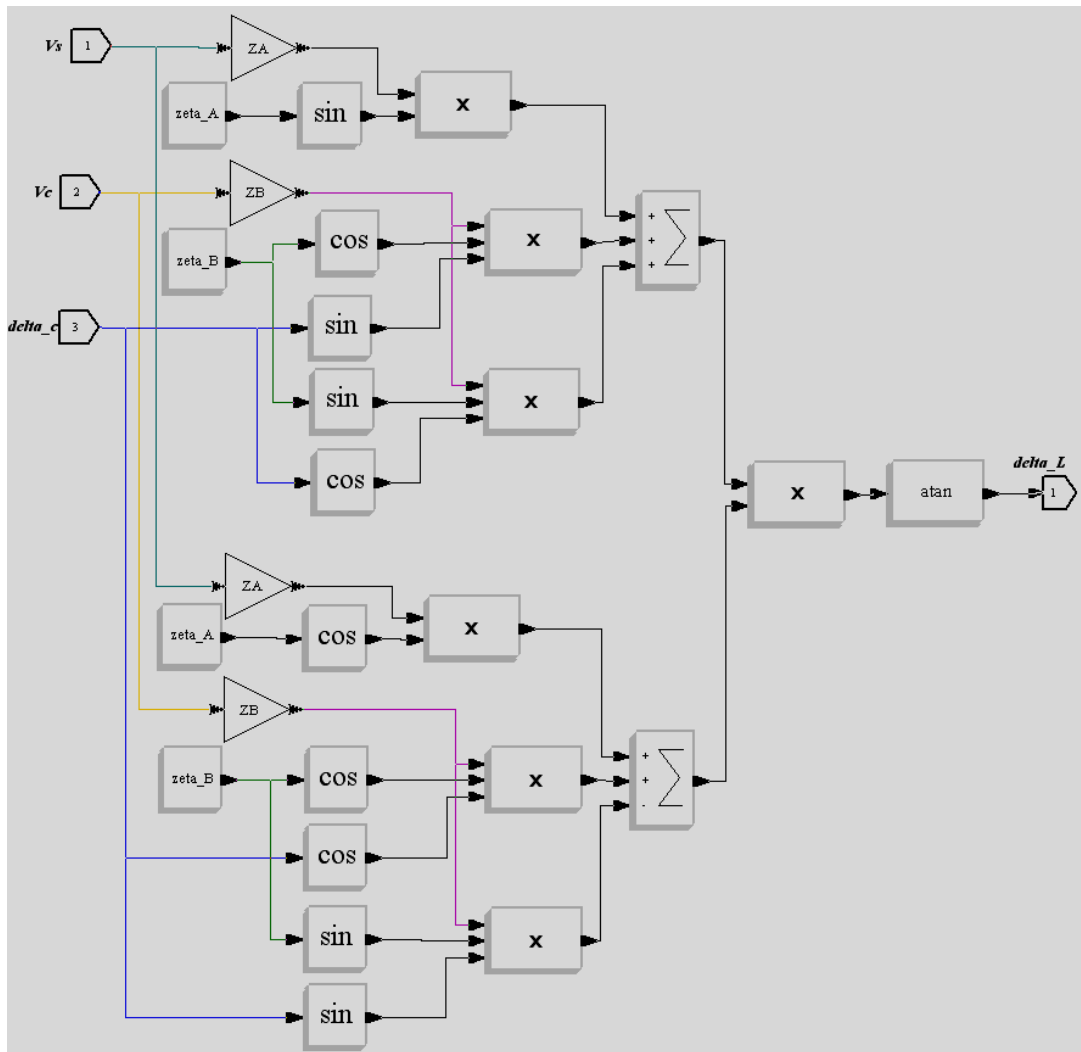
(3-21) ซึ่งก็คือ ϕ_s , $|I_s|$, δ_L และ $|V_L|$ ตามลำดับ โดยบล็อกไดอะแกรมของแต่ละสมการ แสดงได้ ดังรูปที่ 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-26)



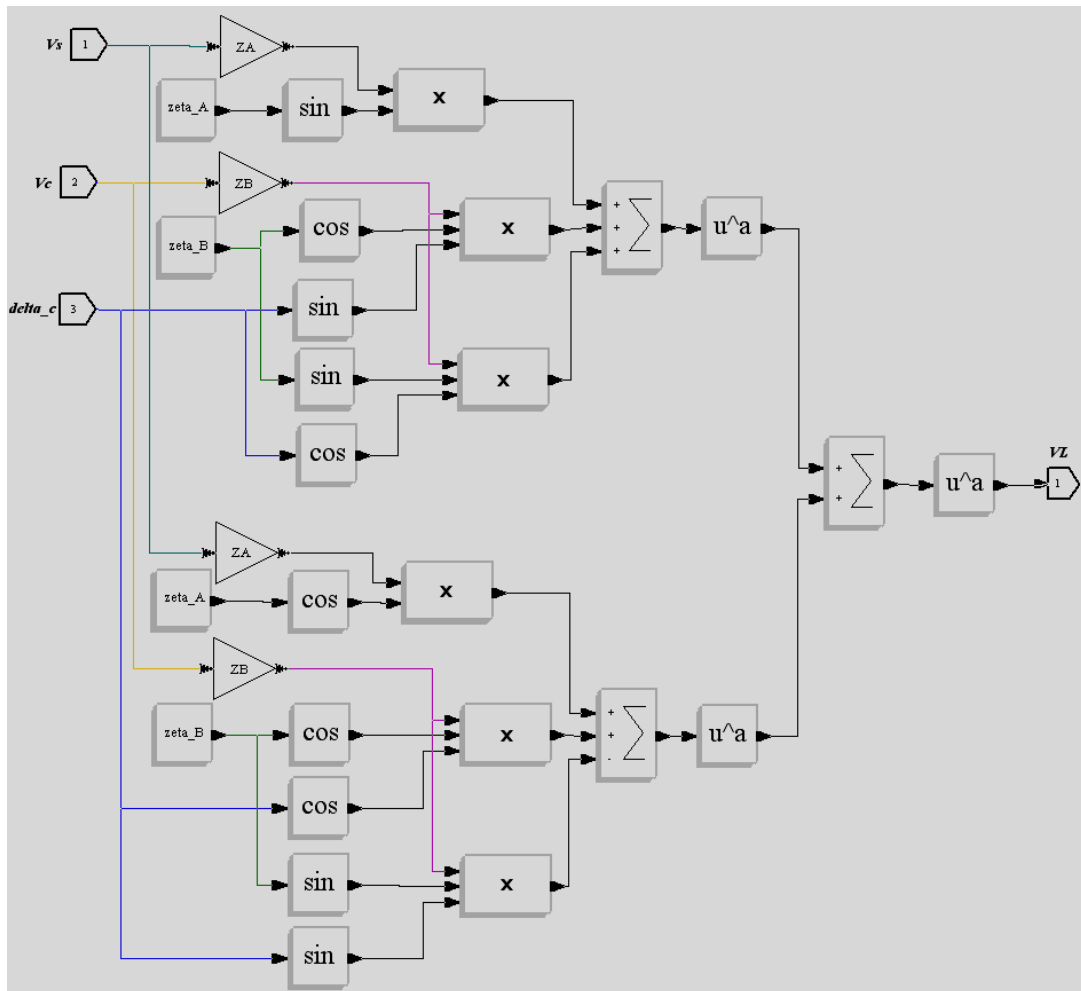
รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-27)



รูปที่ 3.17 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-20)

การจำลองผลใช้ระบบสายป้อนอย่างง่ายที่ติดตั้งดี-สแตคคอมในรูปที่ 3.13 เป็นระบบทดสอบ ในการออกแบบตัวชดเชยจะกำหนดเงื่อนไขให้รักษาระดับกระแสจากแหล่งจ่ายและแรงดันโหลดให้คงที่ตามค่าที่กำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบมีดังนี้

Input Voltage	: 20 kV, 22 kV
Frequency	: 50 Hz
Line Impedance	: 0.18 Ω , 0.4 mH
Interface Impedance	: 3 Ω , 28.6 mH
Load	: 400 Ω , 1 Ω



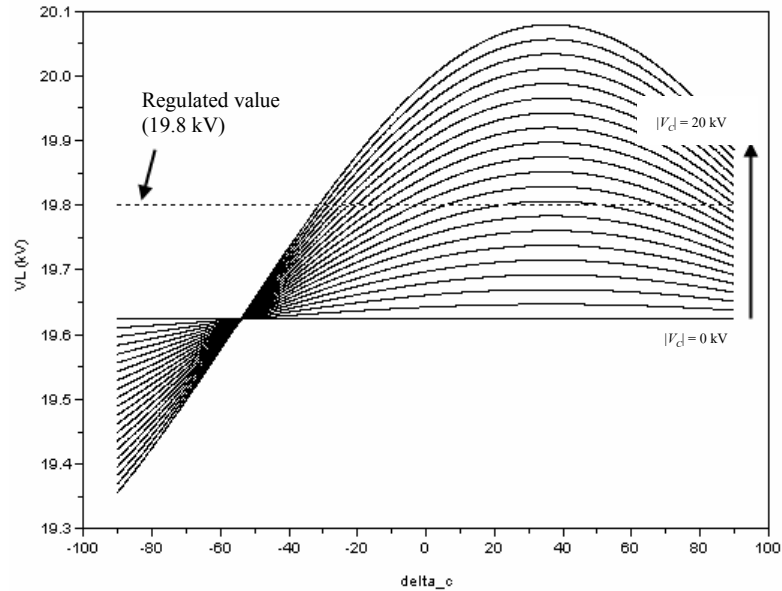
รูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมของสมการที่ (3-21)

ในการจำลองผลเราจะทำการแปรค่ามุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตตคอม δ_c จาก $-\pi/2$ ถึง $\pi/2$ และแปรค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $|V_c|$ ในกรณีค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 400Ω $|V_c|$ อยู่ในช่วง 0 ถึง 20 กิโลโวลต์ ทีละ 1 กิโลโวลต์ ส่วนในกรณีค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 1Ω $|V_c|$ อยู่ในช่วง 0 ถึง 250 กิโลโวลต์ ทีละ 10 กิโลโวลต์ จนกว่าจะได้ขนาดแรงดันโหลด $|V_L|$ และขนาดกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ ตามที่ต้องการให้คงที่ ซึ่งผลการจำลองผลแสดงได้ดังนี้

3.6.1 แรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์

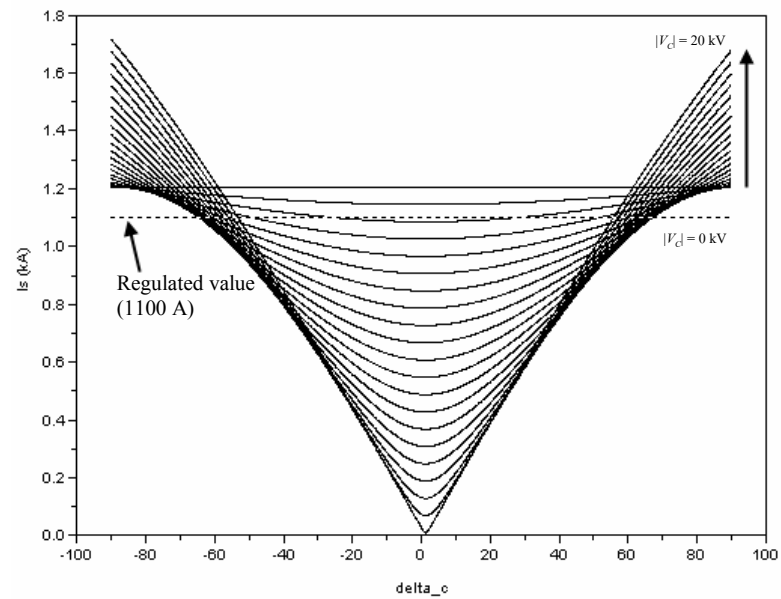
เมื่อกำหนดให้แรงดันจากแหล่งจ่ายที่เข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ในสภาวะปกติ โดยกำหนดขนาดแรงดันโหลด $|V_L|$ และขนาดกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ ที่ต้องการ คือ 19.8 กิโลโวลต์ และ 1100 แอมแปร์ ซึ่งเมื่อแปรค่า $|V_c|$ และ δ_c โดยเปรียบเทียบผลค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 400Ω และ 1Ω ผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.19-3.23

- ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 400 Ω

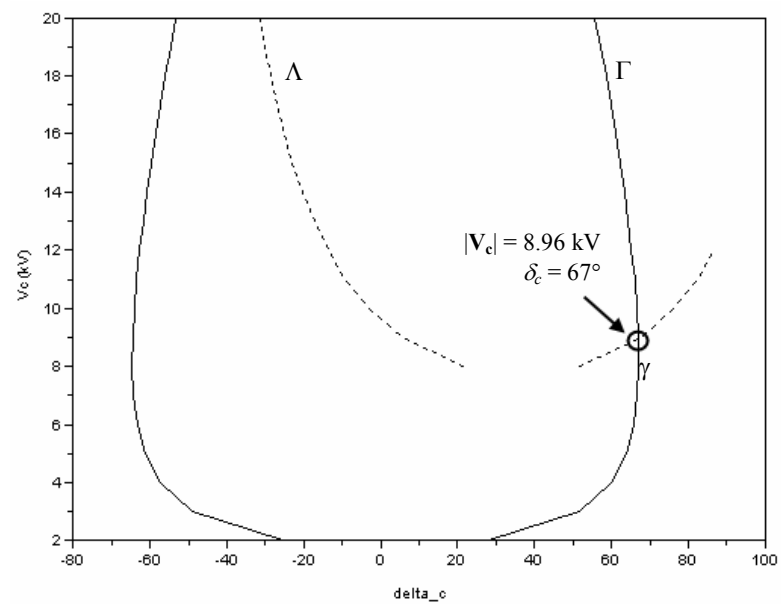


รูปที่ 3.19 ขนาดของแรงดันโหลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 400 Ω

กรณีเมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 400 Ω จากรูปที่ 3.19 แสดงขนาดของแรงดันโหลด $|V_L|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|V_L|$ ที่เราต้องการ (regulated value) แสดงได้ดั่งเส้นประในรูปที่ 3.19 คือ 19.8 กิโลโวลต์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Λ ซึ่ง Λ คือ ค่า $|V_c|$ และ δ_c ที่มีค่าเท่ากับ $|V_L|$ ที่เรากำหนดไว้ หรือเขียนในรูปของเซตจะได้ว่า $\Lambda = \{|V_c|, \delta_c\} : |V_L| = 19.8 \text{ kV}\}$ และจากรูปที่ 3.20 แสดงขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|I_s|$ ที่เราต้องการแสดงได้ดั่งเส้นประในรูปที่ 3.20 คือ 1100 แอมแปร์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Γ ซึ่ง Γ คือ ค่า $|V_c|$ และ δ_c ที่มีค่าเท่ากับ $|I_s|$ ที่เรากำหนดไว้ หรือเขียนในรูปของเซตจะได้ว่า $\Gamma = \{|V_c|, \delta_c\} : |I_s| = 1100 \text{ A}\}$ ในการหาจุดทำงานของดี-สแตตคอมหรือ γ ซึ่ง γ หาได้จากจุดตัดระหว่าง Λ กับ Γ หรือเขียนในรูปของเซตจะได้ว่า $\gamma = (|V_c|^*, \delta_c^*)$ แสดงได้ดั่งรูปที่ 3.21 ซึ่งจากรูปสามารถหาจุดทำงานของดี-สแตตคอมได้ง่ายคือ $|V_c|^*$ เท่ากับ 8.96 กิโลโวลต์ และ δ_c^* เท่ากับ 67°

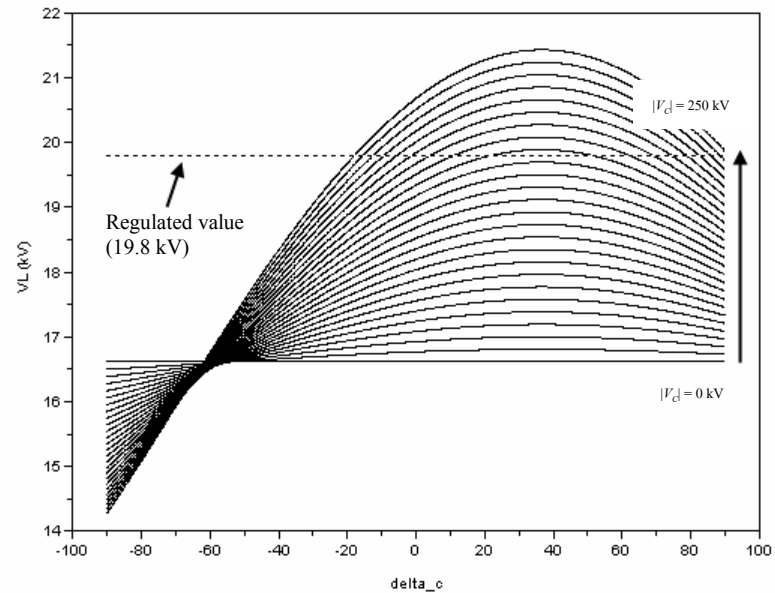


รูปที่ 3.20 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทาน โหลดเท่ากับ 400 Ω

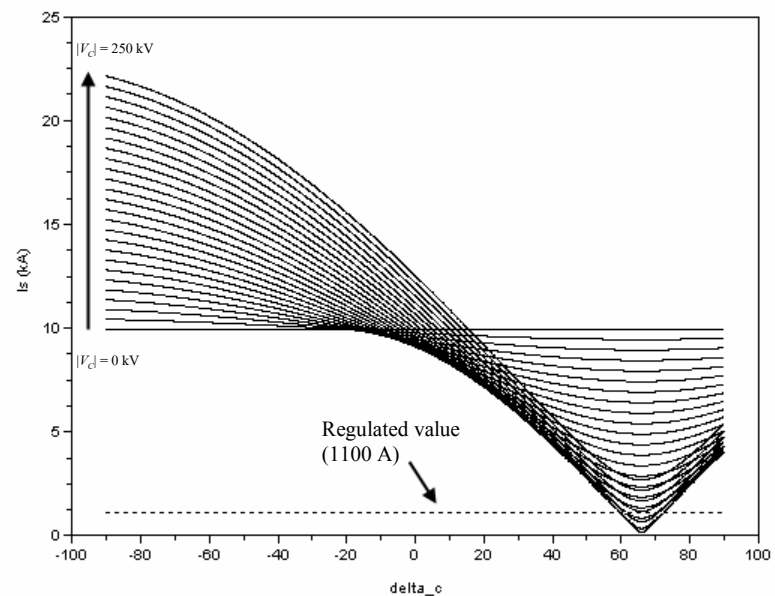


รูปที่ 3.21 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่าย เท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทาน โหลดเท่ากับ 400 Ω

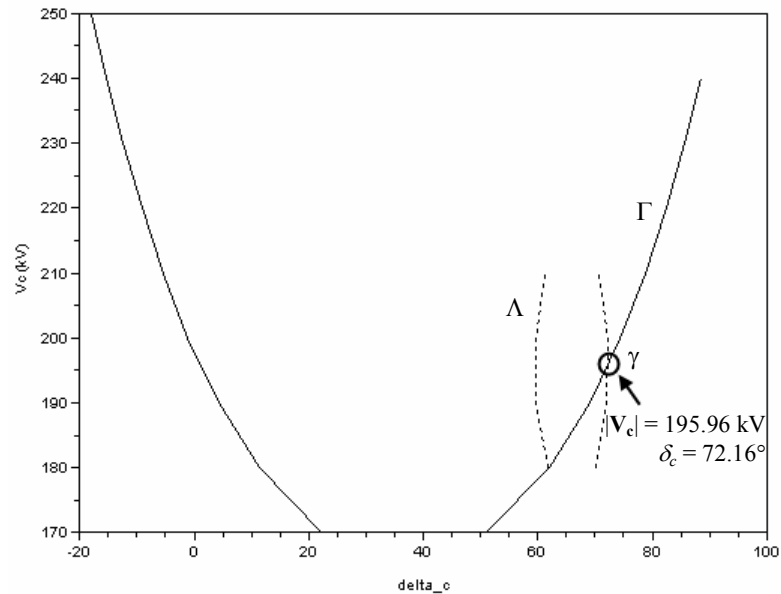
- ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



รูปที่ 3.22 ขนาดของแรงดันโหลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



รูปที่ 3.23 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



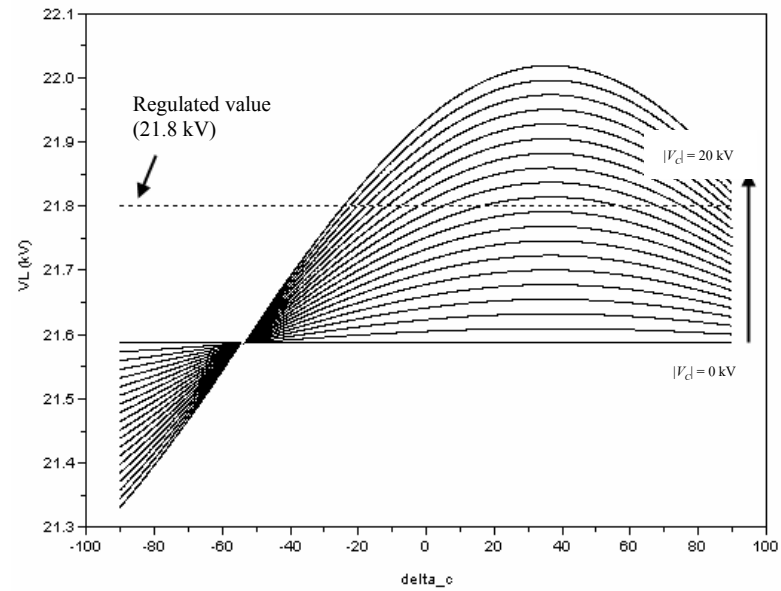
รูปที่ 3.24 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่าย เท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทาน โหลดเท่ากับ 1 Ω

กรณีเมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 กิโลโวลต์และค่าความต้านทาน โหลด เท่ากับ 1 Ω จากรูปที่ 3.22 แสดงขนาดของแรงดันโหลด $|V_L|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|V_L|$ ที่เรา ต้องการแสดงได้ตั้งเส้นประในรูปที่ 3.22 คือ 19.8 กิโลโวลต์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Λ จะได้ว่า $\Lambda = \{(|V_c|, \delta_c) : |V_L| = 19.8 \text{ kV}\}$ และจากรูปที่ 3.23 แสดงขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|I_s|$ ที่เราต้องการแสดงได้ตั้งเส้นประในรูปที่ 3.23 คือ 1100 แอมแปร์ โดยเส้นนี้ จะตัดกับ Γ จะได้ว่า $\Gamma = \{(|V_c|, \delta_c) : |I_s| = 1100 \text{ A}\}$ การหาจุดทำงานของดี-สแตตคอม หรือ γ จะ ได้ว่า $\gamma = (|V_c|^*, \delta_c^*)$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจากรูปสามารถหาจุดทำงานของดี-สแตตคอมได้ ง่าย คือ $|V_c|^*$ เท่ากับ 195.96 กิโลโวลต์ และ δ_c^* เท่ากับ 72.16°

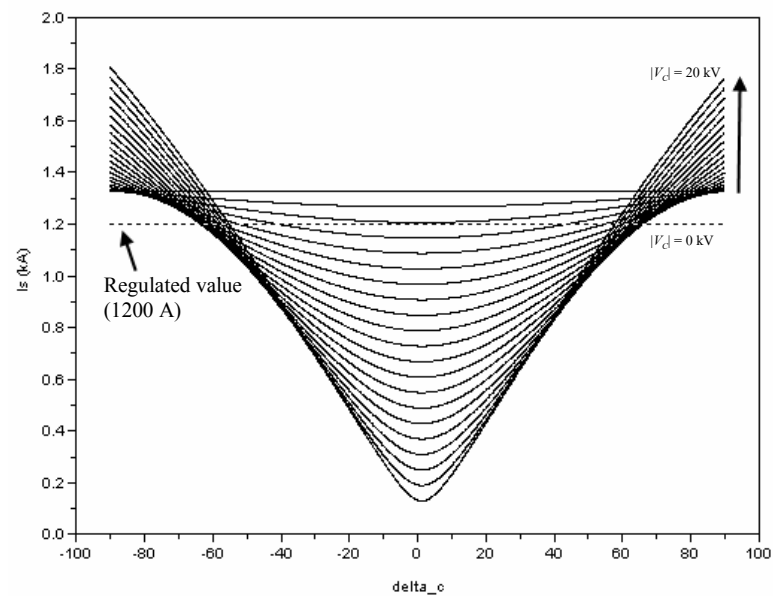
3.6.2 แรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์

เมื่อกำหนดให้แรงดันจากแหล่งจ่ายที่เข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ในสภาวะ ปกติ โดยกำหนดขนาดแรงดันโหลด $|V_L|$ และขนาดกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ ที่ต้องการ คือ 21.8 กิโลโวลต์ และ 1200 แอมแปร์ ซึ่งเมื่อแปรค่า $|V_c|$ และ δ_c โดยเปรียบเทียบผลค่าความ ต้านทานโหลดเท่ากับ 400 Ω และ 1 Ω ผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.25-3.29

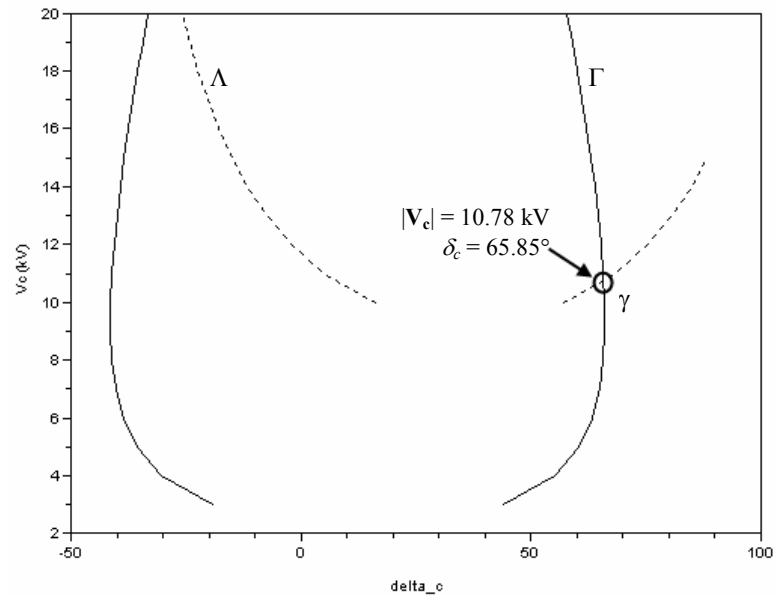
- ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $400\ \Omega$



รูปที่ 3.25 ขนาดของแรงดันโหลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $400\ \Omega$



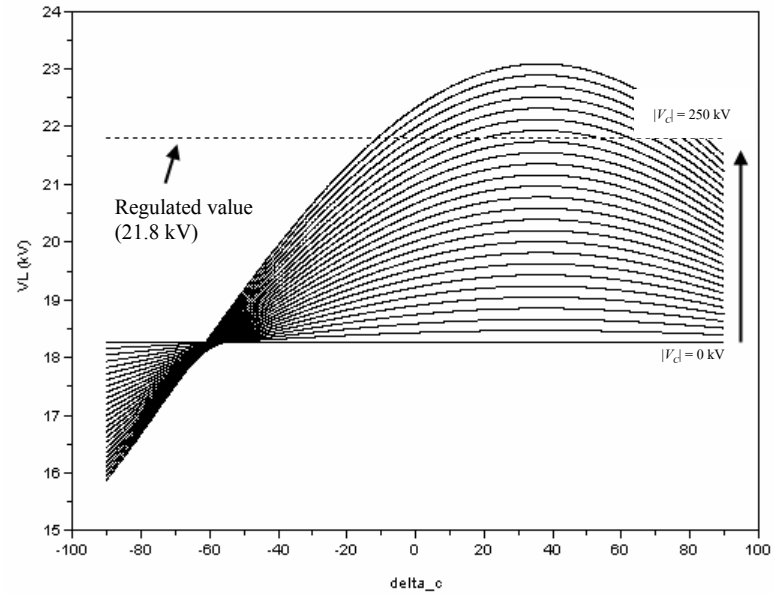
รูปที่ 3.26 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $400\ \Omega$



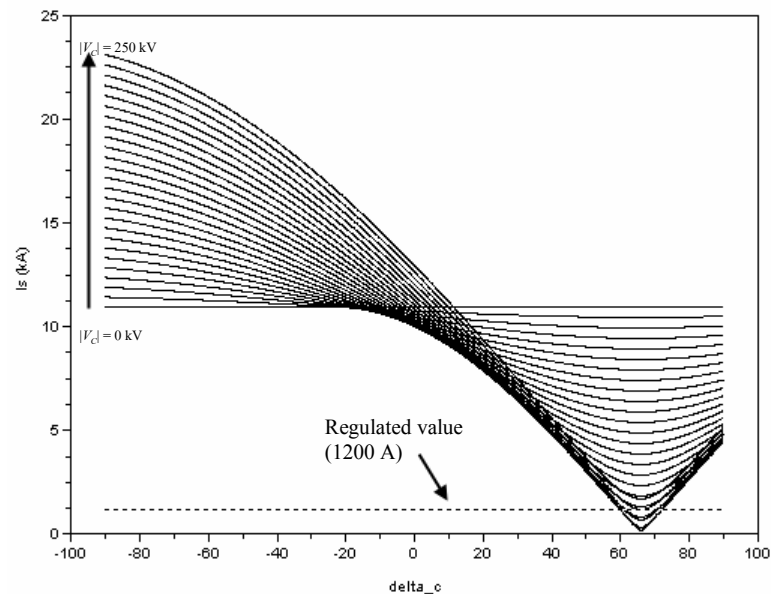
รูปที่ 3.27 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่าย เท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทาน โหลดเท่ากับ 400 Ω

กรณีเมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโหลด เท่ากับ 400 Ω จากรูปที่ 3.25 แสดงขนาดของแรงดันโหลด $|V_L|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|V_L|$ ที่เรา ต้องการ แสดงได้ดังเส้นประในรูปที่ 3.25 คือ 21.8 กิโลโวลต์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Λ จะได้ว่า $\Lambda = \{(|V_c|, \delta_c): |V_L| = 21.8 \text{ kV}\}$ และจากรูปที่ 3.26 แสดงขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ เทียบ กับ δ_c โดยค่า $|I_s|$ ที่เราต้องการแสดงได้ดังเส้นประในรูปที่ 3.26 คือ 1200 แอมแปร์ โดยเส้นนี้จะ ตัดกับ Γ จะได้ว่า $\Gamma = \{(|V_c|, \delta_c): |I_s| = 1200 \text{ A}\}$ ในการหาจุดทำงานของดี-สแตตคอม หรือ γ จะ ได้ว่า $\gamma = (|V_c|^*, \delta_c^*)$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.27 ซึ่งจากรูปสามารถหาจุดทำงานของดี-สแตตคอมได้ง่าย คือ $|V_c|^*$ เท่ากับ 10.78 กิโลโวลต์ และ δ_c^* เท่ากับ 65.85°

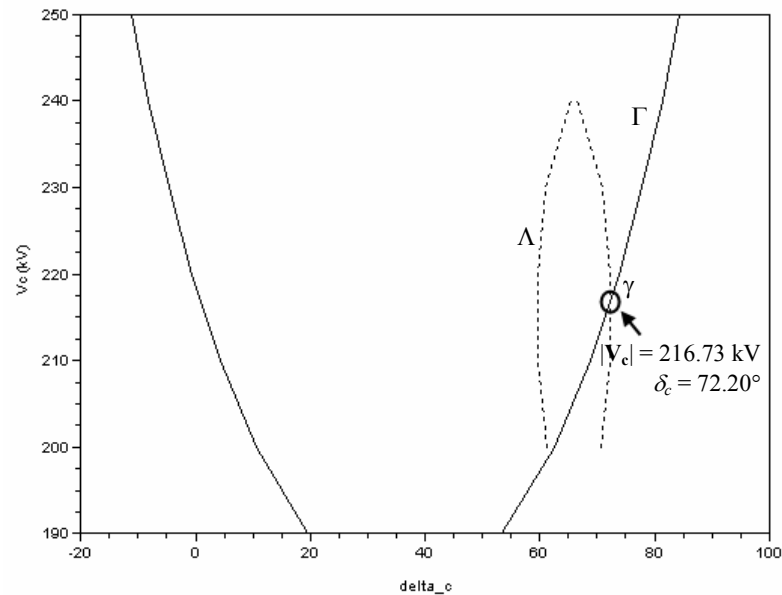
- ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



รูปที่ 3.28 ขนาดของแรงดันโหลดเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



รูปที่ 3.29 ขนาดของกระแสจากแหล่งจ่ายเทียบกับ δ_c เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ $1\ \Omega$



รูปที่ 3.30 การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตตคอมด้วยวิธีกราฟฟิก เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่าย เท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 1 Ω

กรณีเมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายเท่ากับ 22 กิโลโวลต์และค่าความต้านทานโหลด เท่ากับ 1 Ω จากรูปที่ 3.28 แสดงขนาดของแรงดันโหลด $|V_L|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|V_L|$ ที่เรา ต้องการ แสดงได้ดั่งเส้นประในรูปที่ 3.28 คือ 21.8 กิโลโวลต์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Λ จะ ได้ ว่า $\Lambda = \{(|V_c|, \delta_c) : |V_L| = 21.8 \text{ kV}\}$ และจากรูปที่ 3.29 แสดงขนาดของกระแสจาก แหล่งจ่าย $|I_s|$ เทียบกับ δ_c โดยค่า $|I_s|$ ที่เราต้องการแสดงได้ดั่งเส้นประในรูปที่ 3.29 คือ 1200 แอมแปร์ โดยเส้นนี้จะตัดกับ Γ จะได้ว่า $\Gamma = \{(|V_c|, \delta_c) : |I_s| = 1200 \text{ A}\}$ ในการหาจุดทำงาน ของดี-สแตตคอม หรือ γ จะได้ว่า $\gamma = (|V_c|^*, \delta_c^*)$ แสดงได้ดั่งรูปที่ 3.30 ซึ่งจากรูปสามารถหาจุด ทำงานของดี-สแตตคอมได้ง่าย คือ $|V_c|^*$ เท่ากับ 216.73 กิโลโวลต์ และ δ_c^* เท่ากับ 72.20°

3.7 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึง แบบจำลองในสภาวะชั่วครู่ของดี-สแตตคอม สำหรับระบบ ไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร การออกแบบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับในสภาวะชั่วครู่สำหรับดี- สแตตคอม พร้อมทั้งกล่าวถึงผลการทดสอบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับในสภาวะชั่วครู่สำหรับดี- สแตตคอม โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่าย กำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาด

แรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมสามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และยังกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม ซึ่งจากตรวจสอบเสถียรภาพของระบบทั้ง 3 วิธีจะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม มีความสามารถควบคุมได้ สามารถสังเกตได้และมีสมาชิกทุกตัวจากการหาค่าจะจงเป็นลบทุกตัวแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ และลำดับต่อมากล่าวถึงผลเฉลยการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอม โดยใช้ SCICOS ซึ่งจะพบว่าการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอม โดยใช้ SCICOS นั้นสามารถทำได้ง่าย โดยใช้การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตคคอมด้วยวิธีการฟิสิก อีกทั้งยังสามารถควบคุมค่าขนาดของแรงดันโวลต์ $|V_L|$ และขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ ได้ตามที่เราร้องการอีกด้วย โดยเนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรจะนำไปเปรียบเทียบกับ การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร

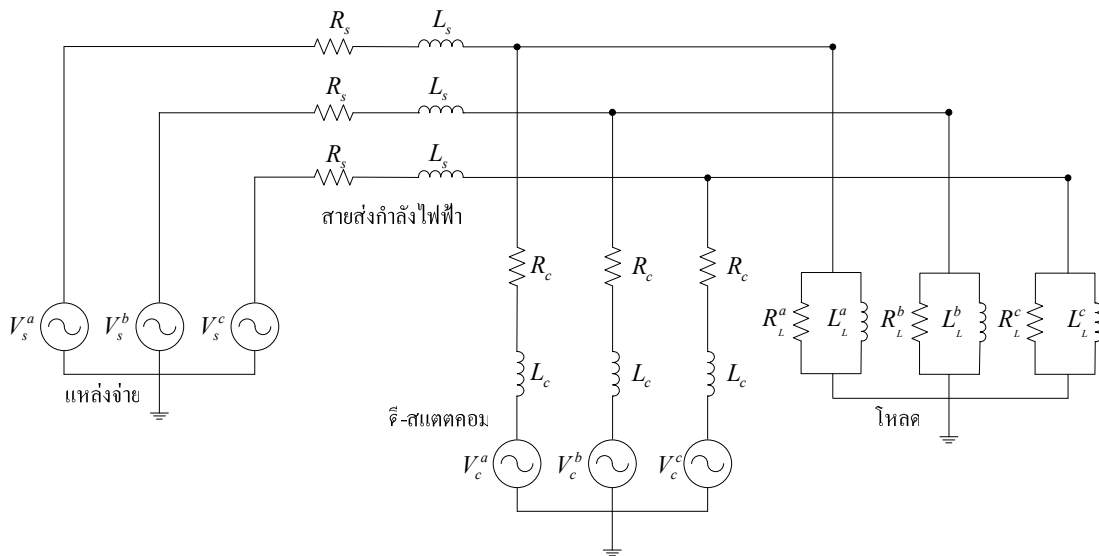
4.1 บทนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ดังแสดงในบทที่ 3 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแบบสมมาตรในสถานะชั่วคราว โดยใช้วิธีการออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกับ รวมทั้งการเลือกขนาดการชดเชยด้วยดี-สแตตคอมโดยใช้ SCICOS ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร เพื่อนำไปใช้กับเทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบด้วยวิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไหล การแปลงพาร์กและการแปลงพิกิวอาร์ ลำดับต่อมากล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน รวมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

4.2 แบบจำลองของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

แบบจำลองของดี-สแตตคอมที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะชั่วคราว ซึ่งจะไม่พิจารณาผลในสถานะชั่วคราวจากการสับวิตช์ของอินเวอร์เตอร์และตัวเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงคิซีสามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 4.1 เมื่อ I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ I_s คือ กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย กำหนดให้โหลดที่พิจารณาเป็นโหลดชนิดความต้านทานขนานกับความเหนี่ยวนำ R_c และ L_c คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในตัวของดี-สแตตคอม ส่วน R_s และ L_s คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

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 คือ แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 V_c^a, V_c^b และ V_c^c คือ ขนาดของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ของดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ
 δ_c คือ มุมที่ใช้ควบคุมดี-สแตคคอม

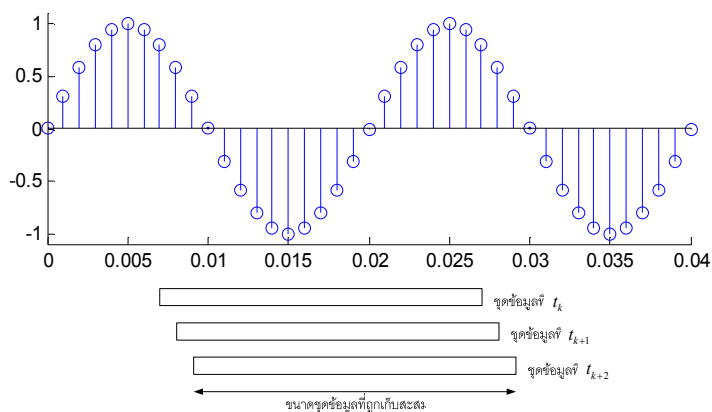
4.3 เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะต้องมีความรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการที่แรงดันตกชั่วขณะ

ในระหว่างเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จะต้องการการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รวดเร็วและแม่นยำมากกว่าโหลดชนิดอื่น ๆ ซึ่งถ้าไม่ใช้วิธีที่รวดเร็วและแม่นยำแล้ว อาจเกิดผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมนั้น ๆ วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้านั้นมีมากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน (วารุณี ศรีสงคราม วันชัย ทรัพย์สิงห์ และ ไพศาล บุญเจียม, 2549) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล (sliding root mean square: rms) วิธีการแปลงปาร์ก (park transformation) และวิธีการแปลงพีคิวอาร์ (pqr transformation)

4.3.1 วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล

ปัญหาหลักประการหนึ่งในการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ การคำนวณเฟสเซอร์แรงดันซึ่งถูกนิยามให้มีค่าขนาดแรงดัน (ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย) และมุมเฟส ต้องใช้การเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงดันในหนึ่งคาบเวลา ทำให้การชดเชยแรงดันหย่อนพลวัตเป็นไปได้ โดยหลักการ อย่างไรก็ตาม โดยการใช้เทคนิคการสะสมข้อมูลแบบหน้าต่างเลื่อน (sliding-window storage technique) ที่ดำเนินการเก็บข้อมูลจากการซักร้อยอย่างในหนึ่งคาบด้วยอัตราการซักร้อยอย่างที่แน่นอน เมื่อมีข้อมูลการซักร้อยอย่างในลำดับถัดไป ข้อมูลที่ถูกเก็บสะสมไว้ตัวที่มีลำดับเก่าที่สุดจะถูกลบทิ้งไป และเลื่อนดัชนีข้อมูลที่ถูกสะสมดังกล่าวให้มีค่าลดลงหนึ่งลำดับ จะได้ที่ว่างในตำแหน่งล่าสุด ซึ่งจะถูกรับที่ด้วยข้อมูลการซักร้อยอย่างล่าสุดนั่นเอง ด้วยหลักการนี้ร่วมกับเทคนิคการหาจุดตัดศูนย์ของข้อมูลส่งผลให้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและค่ามุมเฟสสามารถคำนวณได้ ทุก ๆ จุดการซักร้อยอย่างนั่นเอง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเก็บสะสมข้อมูลในหนึ่งคาบแบบหน้าต่างเลื่อน

ในกรณีของการ sampling n จุดต่อคาบเวลา T สูตรการคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ย จำนวนได้ดังนี้ (न्छชัย กุศลรวานิชพงษ์, 2550)

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

4.3.2 วิธีการแปลงปาร์ก

การแปลงปาร์ก (park transformation) หรือที่ส่วนใหญ่เรียกกันว่าการแปลงซีโรดีกีว (0dq transformation) ซึ่งประกอบด้วยแกนดี (direct axis) และแกนกีว (quadrature axis) ส่วนใหญ่จะใช้ในเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกล 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) ซึ่งการย้ายแกนจะทำมุมห่างกันเท่ากับ 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) (Saadat, 2004)

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

4.3.3 วิธีการแปลงพิกัด

วิธีการแปลงพิกัดนั้นมาจากทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (instantaneous power theory) โดยพินั้นมาจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous active power) ส่วนพิกัดกับอาร์นั้นจะมาจากกำลังไฟฟารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) ซึ่งจะใช้พิจารณาในระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยทั้ง 3 องค์ประกอบนี้จะอิสระเชิงเส้นต่อกัน (Kim and Akagi, 1999) ซึ่งในการใช้วิธีการแปลงพิกัด แรงดันอ้างอิงทั้ง 3 ในพิกัด $p-q-r$ จะกลายเป็นรูปแบบที่ง่ายโดยจะกลายเป็นค่าดีซี ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมในพิกัด $p-q-r$ ก็จะง่ายตามไปด้วย โดยอัลกอริทึมในการควบคุมการชดเชยนั้นสามารถใช้ได้ครอบคลุมความผิดปกติของแรงดันชนิดต่าง ๆ ได้ และสามารถอธิบายวิธีการแปลงพิกัดได้ดังนี้

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)

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

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

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

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

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

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

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

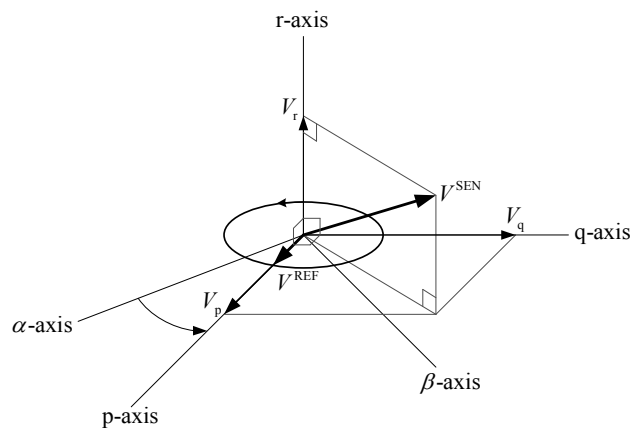
$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{V_{\alpha REF}}{V_{\alpha\beta REF}} & -\frac{V_{\beta REF}}{V_{\alpha\beta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

ความหมายทางกายภาพของการแปลงพิกัดอาร์ (pqr transformation) แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 รูปคลื่นอ้างอิงของปริภูมิเวกเตอร์ V^{REF} จะหมุนบนระนาบ $\alpha-\beta$ โดยทำมุมขณะหนึ่ง $\theta(t) = \text{Tan}^{-1}(V_{\beta REF}(t)/V_{\alpha REF}(t))$ 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 จะกลายเป็นหมุนอยู่ในพิกัด $p-q-r$

นอกจากนั้นปริภูมิเวกเตอร์แรงดันที่ส่งเข้ามา V^{SEN} สามารถแยกเป็นองค์ประกอบพี (p-component) V_p องค์ประกอบควิว (q-component) V_q และองค์ประกอบอาร์ (r-component) V_r โดยวิธีการแปลงพิกัดอาร์ในสมการที่ (4-10) โดยปกติ V_p และ V_q จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซี (dc-component) และองค์ประกอบเอซี (ac-component) ในขณะที่ V_r จะมีแต่องค์ประกอบเอซี เท่านั้น องค์ประกอบดีซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากองค์ประกอบลำดับบวกของแรงดันที่ส่งเข้ามาทั้ง 3 เฟส องค์ประกอบเอซีของ V_p และ V_q นั้นจะมาจากสภาพแรงดันที่ผิดปกติ เช่น ความไม่สมดุลหรือฮาร์โมนิกส์ 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 จะไม่มีค่าในขณะที่ V_p จะประกอบด้วยองค์ประกอบดีซีเท่านั้นและจะมีค่าเท่ากับ $|V^{SEN}|$ (Kim, Lee and Sul, 2004) ซึ่งสภาพของแรงดันนี้จะเป็นจุดมุ่งหมายสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าโดยดี-สแตตคอม



รูปที่ 4.3 แผนภาพเวกเตอร์ขององค์ประกอบการแปลงพิกัดอาร์

4.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

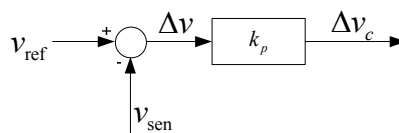
การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอมนั้นขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมระดับแรงดัน โหลด โดยการรักษาระดับแรงดันโหลดนั้นจะใช้ข้อมูลจากการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่โหลดแต่ละเฟส ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่ได้กล่าวมาแล้วมีทั้งสิ้น 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล วิธีการแปลงพาร์กและวิธีการแปลงฟิลาอวาร์ ซึ่งแต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดสภาวะการทำงานผิดปกติหรือเกิดความผิดปกติในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดตกชั่วขณะ แรงดันไฟฟ้านี้จะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วส่งขนาดแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม เพื่อปรับสภาพสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปให้ดี-สแตตคอมสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ นอกจากนั้นตัวควบคุมจะต้องมีความไวในการตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง และสามารถสั่งให้ดี-สแตตคอมทำงานได้อย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมจะต้องมีความแม่นยำในการปรับระดับแรงดันที่ไปชดเชยให้พอเหมาะกับสภาวะผิดปกตินั้น ซึ่งเทคนิคการควบคุมแรงดันนั้นใช้หลักการควบคุมแบบพีไอดี รายละเอียดมีดังนี้

4.4.1 การควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยชื่อของตัวควบคุม พี คือ ตัวอักษร P ที่เป็นตัวอักษรแรกของคำว่า proportional หมายถึง การปรับสัดส่วนสัญญาณ ไอ คือ ตัวอักษร I ที่เป็นตัวอักษรแรกของคำว่า integral หมายถึง การอินทิเกรตสัญญาณและดี คือ ตัวอักษร D ที่เป็นตัวอักษรแรกของคำว่า derivative หมายถึง การอนุพันธ์สัญญาณ กลไกทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสม ให้เกิดผลเป็นการควบคุมระบบอย่างอัตโนมัติ ในการใช้งานตัวควบคุมอาจมิได้ใช้กลไกทั้งสามพร้อมกันทีเดียว อาจใช้ พี แต่เพียงอย่างเดียว หรือใช้ พีไอควบกัน เป็นต้น สาเหตุที่กลไกเหล่านี้เมื่อทำงานผสมผสานกันแล้วให้ผลดีต่อการควบคุมระบบ ก็เพราะว่าตัวควบคุมพีไอนั้นเสมือนกับตัวชดเชย ซึ่งแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีของตัวเอง และใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะที่แตกต่างกันในการชดเชยพลวัตของระบบ อย่างไรก็ตามตัวควบคุมพีไอดีจะสามารถทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อได้รับการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษา (สรวาฐิ สุจิตจร, 2546) ในงานวิจัยนี้เราหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคชาญฉลาด (intelligent optimization technique) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms: GA)

- ตัวควบคุมแบบพี (P-controller)

ตัวควบคุมแบบพี จะเป็นการควบคุมเอาต์พุตของตัวควบคุม โดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมหรือค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพี (k_p) เพื่อให้เอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ไปตามความต้องการและทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายข้อเสียซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวควบคุมแบบพี คือไม่สามารถกำจัดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว (steady-state error) ที่เกิดขึ้นหลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ซึ่งจะเกิดขึ้นกับตัวควบคุมแบบพีในทุก ๆ ค่า k_p ในทางทฤษฎีค่าผิดพลาดสถานะคงตัวสามารถกำจัดได้โดยการปรับค่าสัญญาณควบคุมอีกครั้งหลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่ได้เป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากต้องอาศัยผู้มีความชำนาญในการปรับแต่ง การแก้ไขปัญหานี้ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวควบคุมแบบไอ (I-controller) เข้ามาช่วยซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น เนื่องจากการควบคุมแบบไอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าการควบคุมเพื่อลดค่าผิดพลาดสถานะคงตัวจนกระทั่งค่าความผิดพลาดนั้นเป็นศูนย์ ในการควบคุมระบบบางระบบที่ไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดค่าผิดพลาดสถานะคงตัว ตัวควบคุมแบบพีก็มีความเหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพี

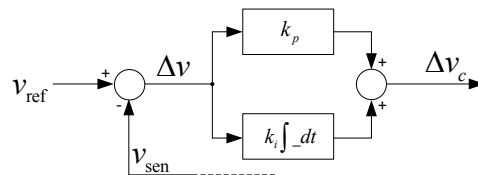
จากรูปที่ 4.4 สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ได้ดังนี้

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

- ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI-controller)

วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมแบบไอ คือ การกำจัดค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว แต่ตัวควบคุมแบบไอจะไม่ใช้งานเพียงตัวเดียวเพราะจะให้ผลในการควบคุมน้อยมาก นอกจากจะเกิดสัญญาณผิดพลาดขึ้นมาอย่างต่อเนื่องในบางเวลาเท่านั้น ดังนั้น จึงมักนำการควบคุมแบบไอมาใช้งานร่วมกับการควบคุมแบบพี หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ เพราะการควบคุม

แบบพีไอจะให้ผลการควบคุมที่รวมเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมทั้งสองเข้าด้วยกัน โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

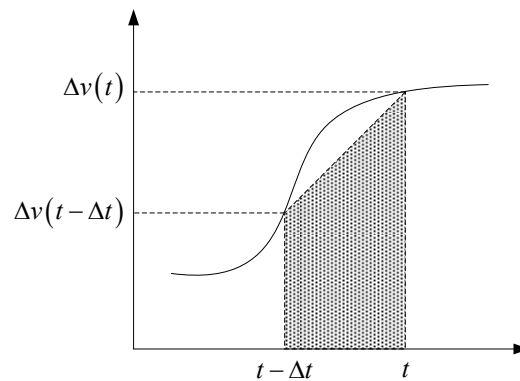


รูปที่ 4.5 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากรูปที่ 4.5 สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอ ได้ดังนี้

$$\Delta v_c = k_p \Delta v + k_i \int_{t-\Delta t}^t \Delta v dt \quad (4-15)$$

ประมาณค่าปริพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule of integration) ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลขด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จะได้ว่า

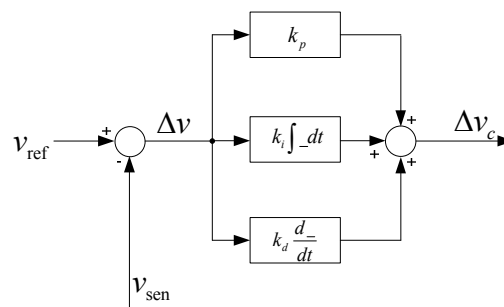
$$\Delta v_c(t) - \Delta v_c(t - \Delta t) = k_p \Delta v(t) + k_i \left[\frac{\Delta t}{2} (\Delta v(t) + \Delta v(t - \Delta t)) \right] \quad (4-16)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\Delta v_c(t) = \left[k_p + \left(\frac{\Delta t}{2} \right) k_i \right] \Delta v(t) + \left[\left(\frac{\Delta t}{2} \right) k_i \right] \Delta v(t - \Delta t) + \Delta v_c(t - \Delta t) \quad (4-17)$$

- ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-controller)

วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมแบบพีไอดี คือ การทำให้การตอบสนองชั่วคราวของระบบดีขึ้น มีค่าพุ่งเกินและการแกว่งลดลง แต่การควบคุมแบบพีไอดีจะไม่ใช้งานเพียงตัวเดียวแต่จะใช้งานร่วมกับการควบคุมแบบพีหรือพีไอ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบพีไอ หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี เพราะการควบคุมแบบพีไอดีจะให้ผลการควบคุมที่รวมเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมทั้งสองเข้าด้วยกัน โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.7 สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอดี ได้ดังนี้

$$\Delta v_c = k_p \Delta v + k_i \int_{t-\Delta t}^t \Delta v dt + k_d \frac{d\Delta v}{dt} \quad (4-18)$$

ประมาณค่าอนุพันธ์โดยใช้หลักการผลต่างอันดับย้อนหลัง (backward finite difference) จะได้

$$\frac{d\Delta v}{dt} = \frac{\Delta v(t) - \Delta v(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4-19)$$

นั่นคือ

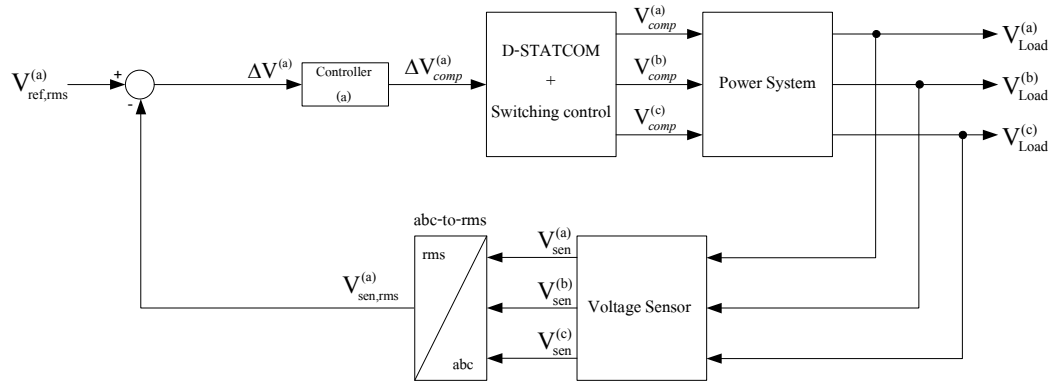
$$\Delta v_c(t) - \Delta v_c(t - \Delta t) = k_p \Delta v(t) + k_i \left[\frac{\Delta t}{2} (\Delta v(t) + \Delta v(t - \Delta t)) \right] + k_d \left[\frac{\Delta v(t) - \Delta v(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \quad (4-20)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

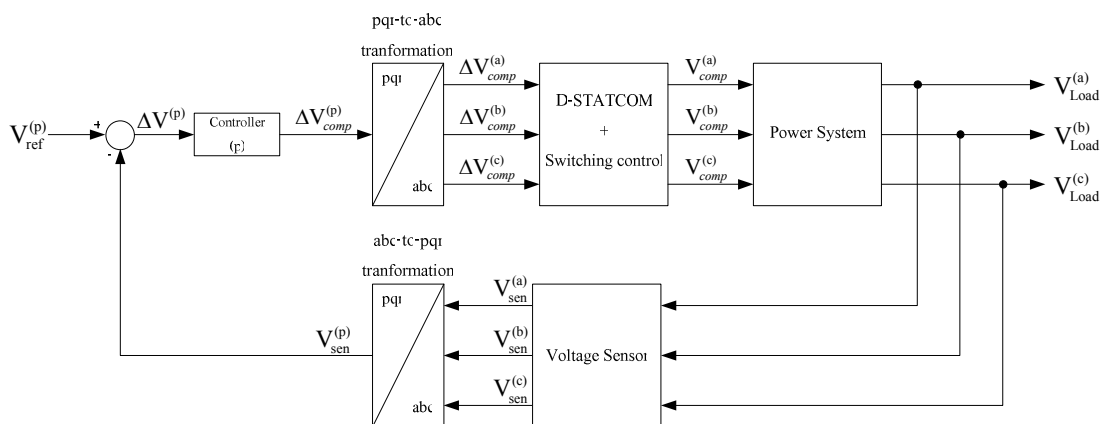
$$\Delta v_c(t) = \left[k_p + \left(\frac{\Delta t}{2} \right) k_i + \left(\frac{1}{\Delta t} \right) k_d \right] \Delta v(t) + \left[\left(\frac{\Delta t}{2} \right) k_i - \left(\frac{1}{\Delta t} \right) k_d \right] \Delta v(t - \Delta t) + \Delta v_c(t - \Delta t) \quad (4-21)$$

เทคนิคการควบคุมระดับแรงดันที่นำเสนอนี้ใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) ซึ่งเป็นหลักการควบคุมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยจะใช้หลักการนี้หาขนาดและมุมเฟสของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติในขณะเกิดความผิดพลาดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี (k_p) นั้น ใช้เทคนิคขบวนการวิชันเนติกอัลกอริทึมโดยจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ การลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งจะมีความรุนแรงมากที่สุด และชนิดเฟสเดียวลงดิน ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดพลาดมากที่สุด โดยแต่ละชนิดจะมีเทคนิคการควบคุมแรงดันดังนี้ (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์, 2550)

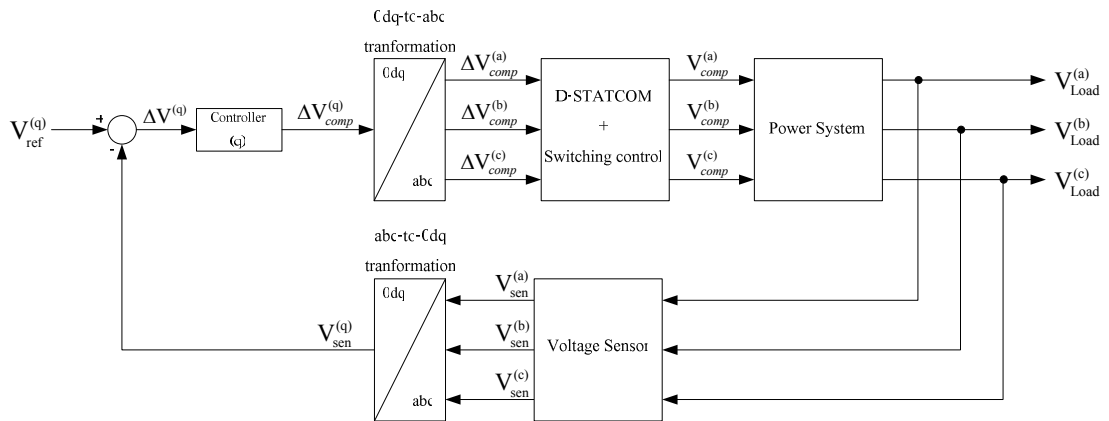
1. ลัตวจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.8 แผนภาพการรักษากระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบใดลเมื่อเกิดการลัตวจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



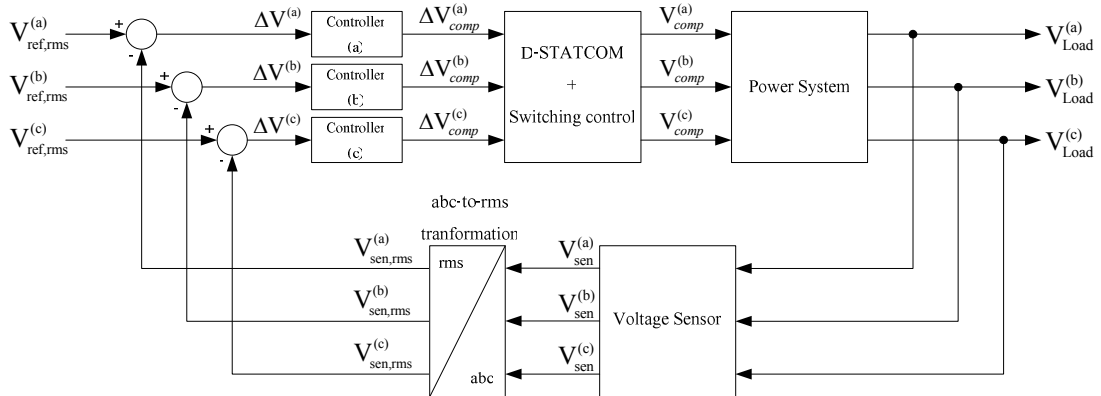
รูปที่ 4.9 แผนภาพการรักษากระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพีคิวอาร์เมื่อเกิดการลัตวจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



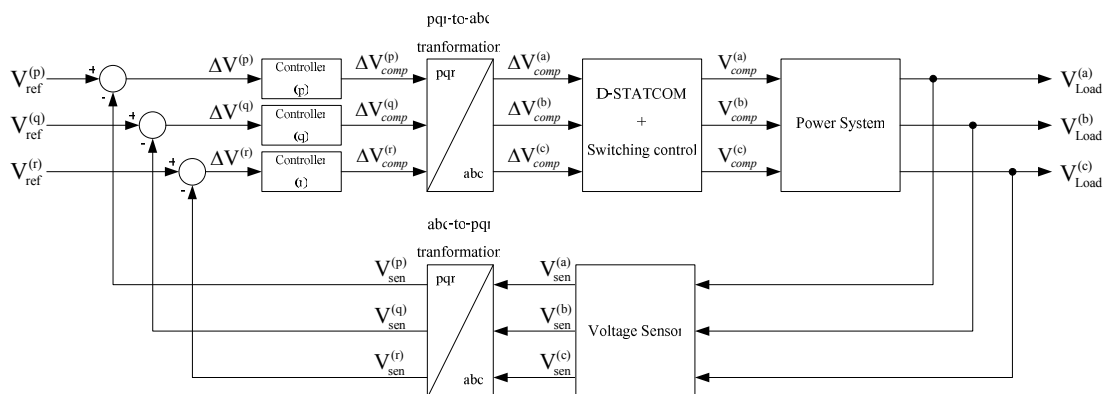
รูปที่ 4.10 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงพาร์ก
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันที่โหลดตกชั่วขณะ แรงดันไฟฟ้าจะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีระดับแรงดันที่ต่ำลง ประมาณ 5 โวลต์ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการตรวจจับแรงดัน เมื่อทำการตรวจจับแล้วจะส่งขนาดของแรงดันนี้ให้กับตัวควบคุม เพื่อปรับสภาพสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปให้ดีสแตคคอมสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเพื่อให้ได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่นำไปชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบให้เป็นปกติ เมื่อได้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมแล้วแรงดันไฟฟ้านี้ก็จะถูกแปลงแรงดันโดยหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีระดับแรงดันเท่ากับพิกัดของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและส่งเข้าระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป จากวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีจะพบว่า การควบคุมด้วยเทคนิคทั้งสามใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวเท่านั้น คือ เทคนิคค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกลใช้ตัวควบคุมเฟสใดก็ได้เฟสหนึ่ง เทคนิคการแปลงพาร์กใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบคิว ส่วนเทคนิคการแปลงพิกิวอาร์ใช้ตัวควบคุมสำหรับองค์ประกอบพี เพราะว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นเป็นชนิดสามเฟสแบบสมมาตร ซึ่งเราทำการปรับค่าตัวควบคุมเพียงตัวเดียวจะทำให้เกิดผลการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 เฟส ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้ตัวควบคุมเพียงชุดเดียวก็เพียงพอที่จะชดเชยระบบให้เป็นปกติได้

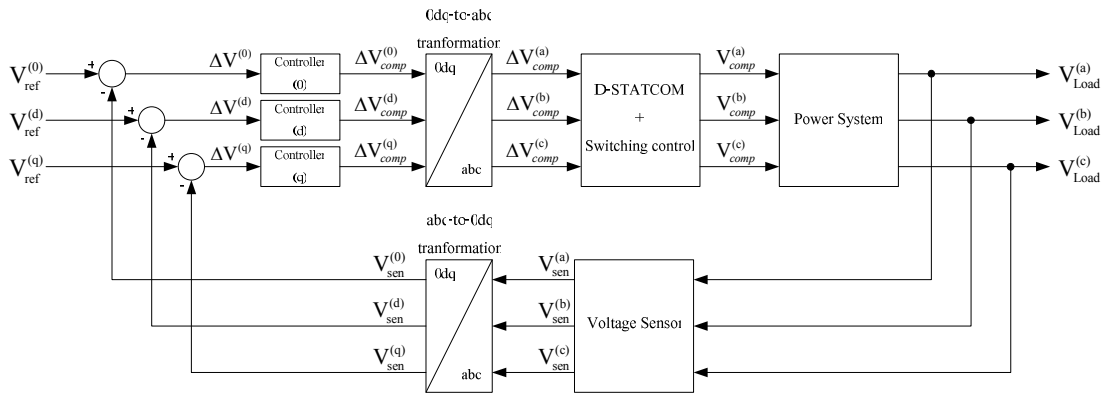
2. ลัตวจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.11 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล
เมื่อเกิดการลัตวจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.12 แผนภาพการรักษาระดับแรงดันโหลดด้วยวิธีการแปลงพิกิวอาร์
เมื่อเกิดการลัตวจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.13 แผนภาพการรักษาระดับแรงดัน โหลดด้วยวิธีการแปลงพาร์ก
เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

เทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินขึ้นในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเหมือนกับเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรจะต่างกันตรงที่จำนวนชุดของตัวควบคุมเท่านั้น โดยเทคนิคการควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินทั้ง 3 วิธีจะใช้ตัวควบคุมทั้ง 3 ชุดควบคุมทั้ง 3 เฟส

4.4.2 จีเนติกอัลกอริทึม

จีเนติกอัลกอริทึมเป็นการจำลองกระบวนการวิวัฒนาการในระดับยีน (Goldberg and Edward, 1989 and Rashidi, Rashidi and Monavar, 2003) โดยการสร้างกลุ่มประชากรโครโมโซมแทนผลเฉลย จากนั้น ประชากรในกลุ่มจะแข่งขันกันเพื่อความอยู่รอด โครโมโซมที่ถูกเลือกในแต่ละรุ่นการถ่ายทอด (generation) เท่านั้นที่มีสิทธิ์สร้างลูกหลานหรือทายาทในรุ่นถัดไป การสร้างลูกหลานจะใช้การดำเนินการทางสายพันธุ์ ซึ่งประกอบด้วย ครอสโอเวอร์และการผ่าเหล่า ลูกหลานหรือทายาทที่ถูกสร้างขึ้นจะแทนที่โครโมโซมต้นแบบโดยสมบูรณ์ โดยใช้หลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Darwin's natural selection) สามารถสร้างผลเฉลยที่ดีได้จากกระบวนการนี้ สำหรับองค์ประกอบหลัก ๆ ของจีเนติกอัลกอริทึม มีดังนี้

- การเข้ารหัสโครโมโซม (chromosome encoding)

คือ ขั้นตอนสำหรับแปลงทางเลือกสำหรับการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซม ในการแปลงวิธีการสำหรับแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ ให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซมนั้นสามารถที่จะทำได้ในหลายรูปแบบซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละปัญหา

- ประชากรเริ่มต้น (initial population)

คือ การสุ่มเลือกเพื่อสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มเข้ากระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึม โดยประชากรกลุ่มแรก หรือประชากรต้นกำเนิด จะเกิดจากการสุ่มเลือกขึ้นมาจาก กลุ่มของประชากรทั้งหมดที่มีอยู่ โดยในการสุ่มเลือกจะทำการสุ่มตามจำนวนของประชากรที่ได้กำหนดไว้เป็นพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

- ฟังก์ชันความฟิต (fitness function)

คือ ฟังก์ชันสำหรับประเมินค่าความเหมาะสม เพื่อให้คะแนนสำหรับคำตอบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ของปัญหา โครโมโซมทุกตัวจะมีค่าความเหมาะสมของตัวเองเพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่าโครโมโซมตัวนั้นเหมาะหรือไม่ที่จะนำมาใช้สืบทอดพันธุกรรมสำหรับสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ โดยวิธีการสำหรับคิดค่าความเหมาะสมนั้นจะใช้สมการที่สอดคล้องกับแต่ละปัญหา

- การดำเนินการทางสายพันธุ์ (genetic operator)

คือ การดำเนินการต่าง ๆ ตามขั้นตอนของจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อให้การเกิดวิวัฒนาการไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น ซึ่งได้แก่ การคัดเลือก (selection) ครอสโอเวอร์ (crossover) และการผ่าเหล่า (mutation)

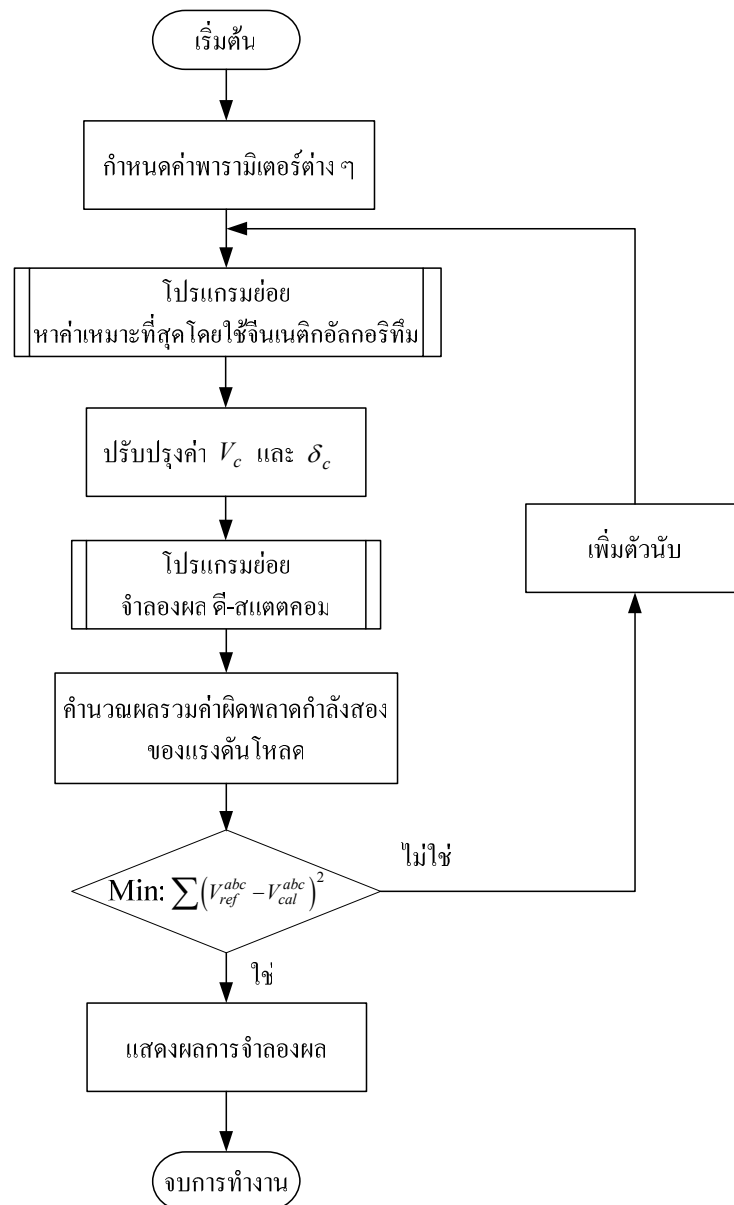
- พารามิเตอร์ (parameter)

คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม เช่น ขนาดของประชากร ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์หรือความน่าจะเป็นของการการผ่าเหล่า

งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดต่อไปนี้โดยใช้ MATLAB's GADS TOOLBOX (Sumpavakup and Kulworawanichpong, 2008)

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

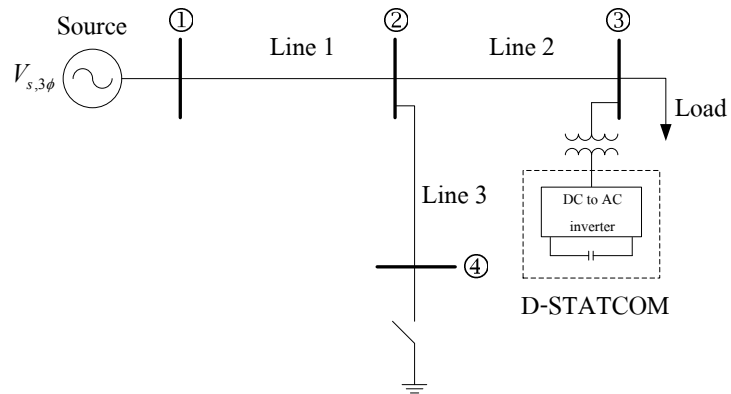
แผนผังลำดับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.14 แผนผังลำดับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

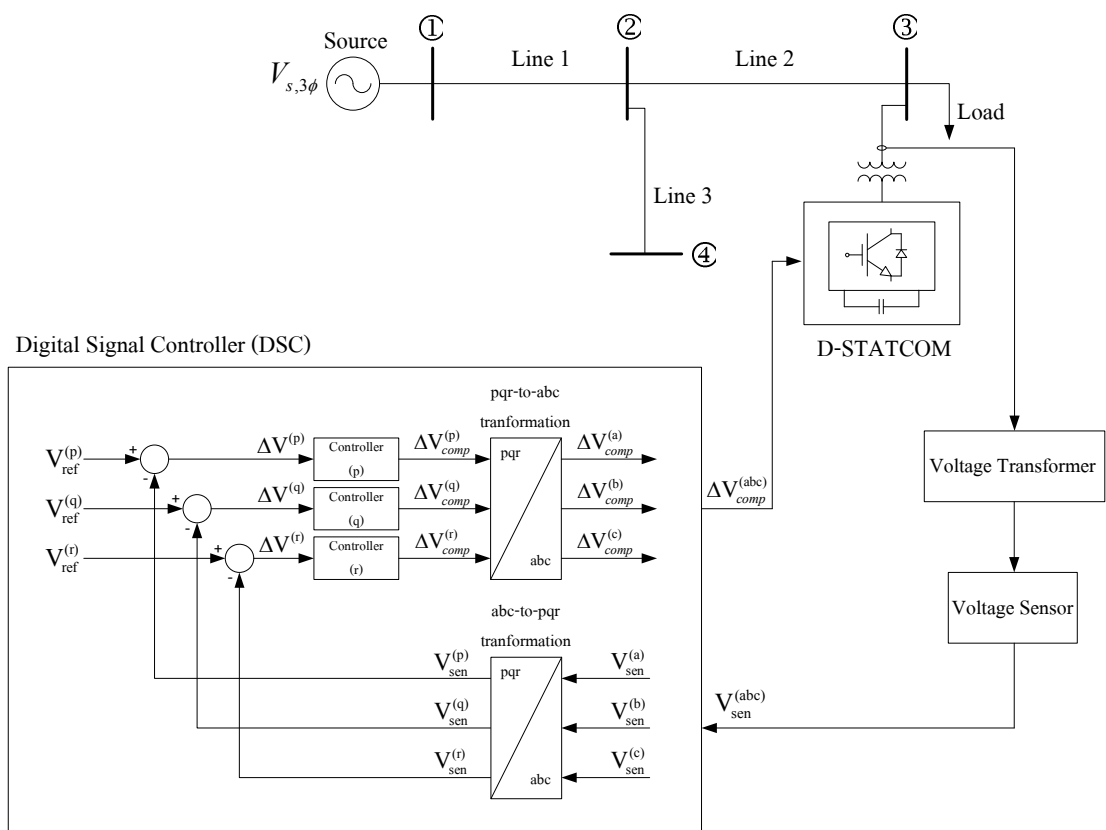
4.5 ผลการทดสอบ

ในการจำลองผลดี-สแตกคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร จะใช้ระบบทดสอบ 4 บัส ดังรูปที่ 4.15 มาทำการทดสอบ ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท คือ ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 และชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ที่เวลา 0.1 วินาที และใช้เวลาในการจำลองผลทั้งสิ้น 0.2 วินาที ซึ่งผลทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.15 ระบบทดสอบ 4 บัส

ดังนั้น เมื่อพิจารณาระบบโดยรวมทั้งหมด จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



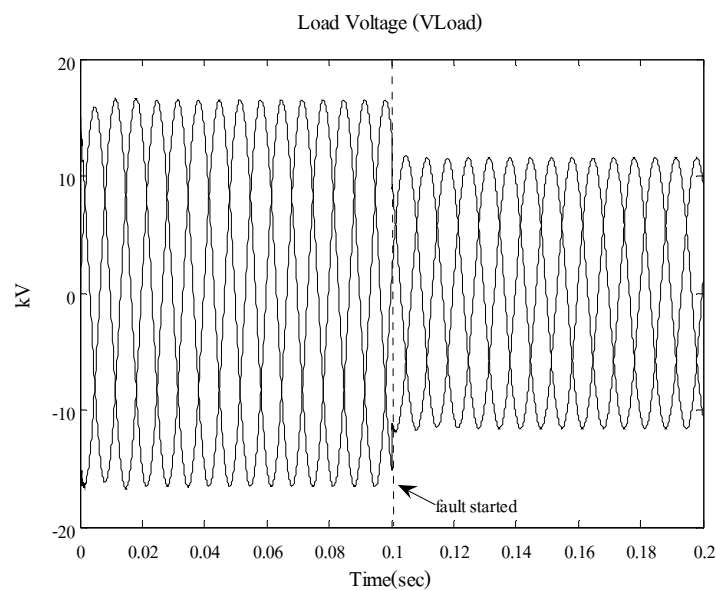
รูปที่ 4.16 ระบบโดยรวมในการจำลองผลและควบคุมดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร

4.5.1 ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

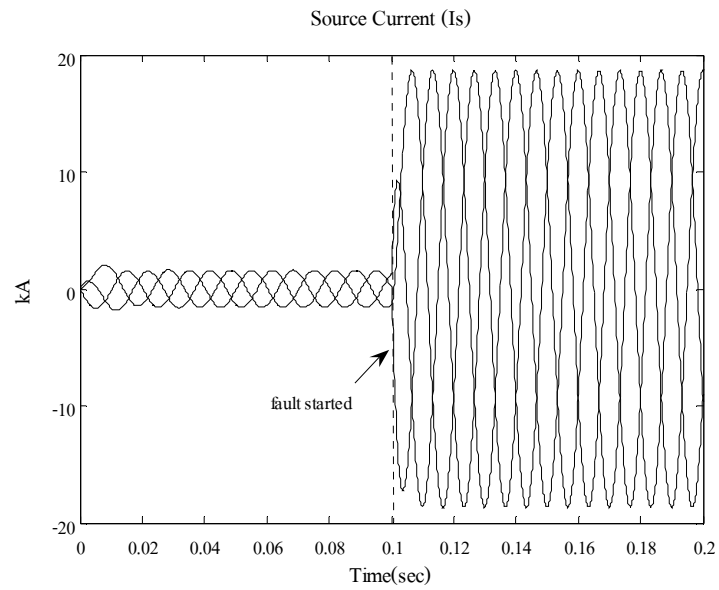
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

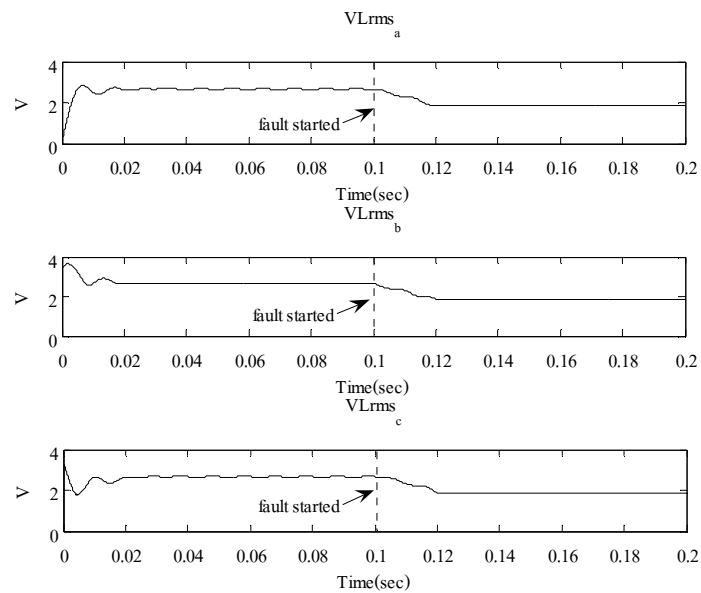
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 ทั้ง 3 เฟส ลดลงจากสถานะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4 และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสถานะผิดปกติสามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.19 4.20 และ 4.21



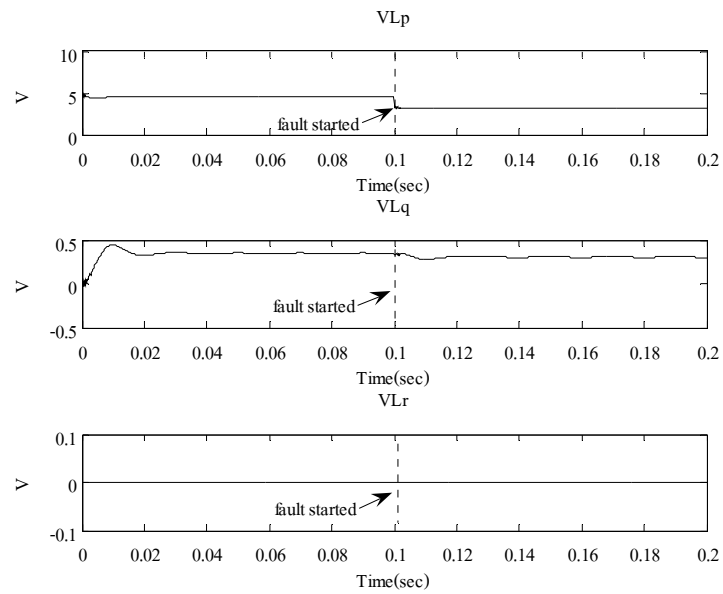
รูปที่ 4.17 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



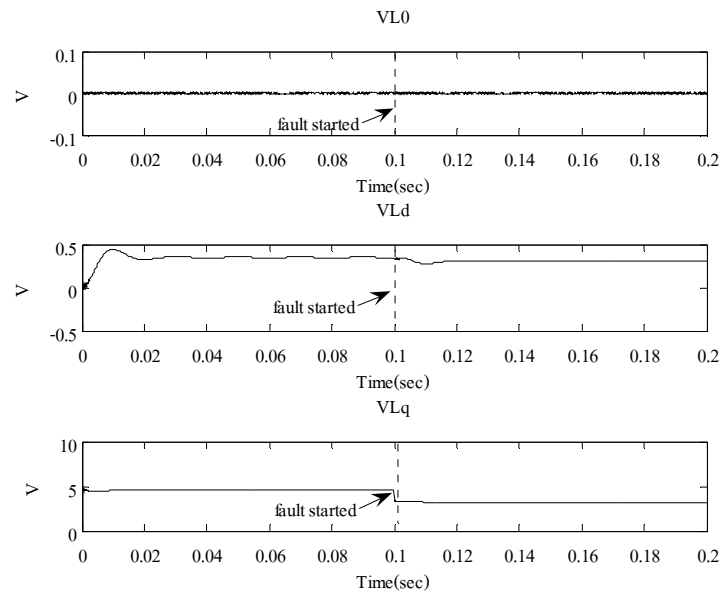
รูปที่ 4.18 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.19 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.20 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.21 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.19 4.20 และ 4.21 แสดงแรงดันโหลดที่ได้จากการใช้วิธีค่าราคาล้างสองเฉลี่ยแบบไถล วิธีการแปลงฟิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะที่เกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.19 แรงดันทั้ง 3 เฟสมีค่าลดลง รูปที่ 4.20 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ p จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงฟิวอาร์ จะให้แรงดันจากองค์ประกอบ p เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ ในรูปที่ 4.21 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ q จะเห็นชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงปาร์ก จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ q เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

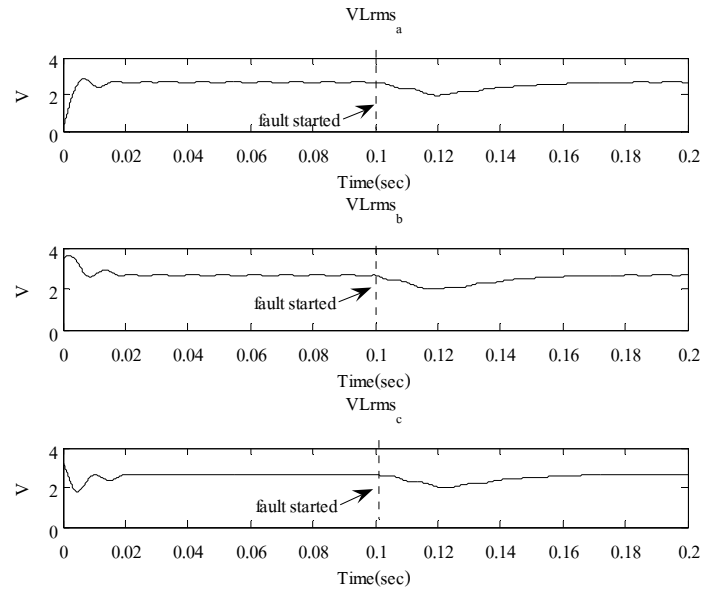
Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^{abc} \in [0, 0.1]$, $k_p^{pqr} \in [5, 15]$, $k_p^{0dq} \in [5, 15]$

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

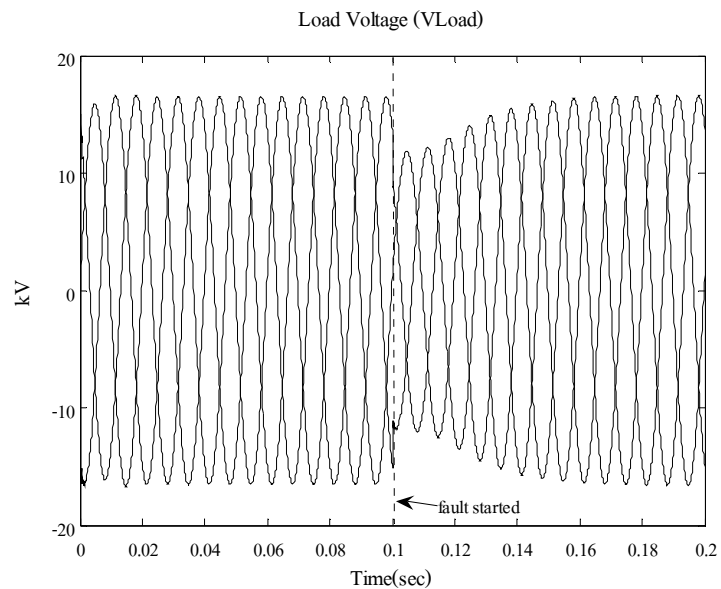
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 4

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่าราคาล้างสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^{abc} = 0.056$
- การแปลงฟิวอาร์	$k_p^{pqr} = 11.7770$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^{0dq} = 11.7643$

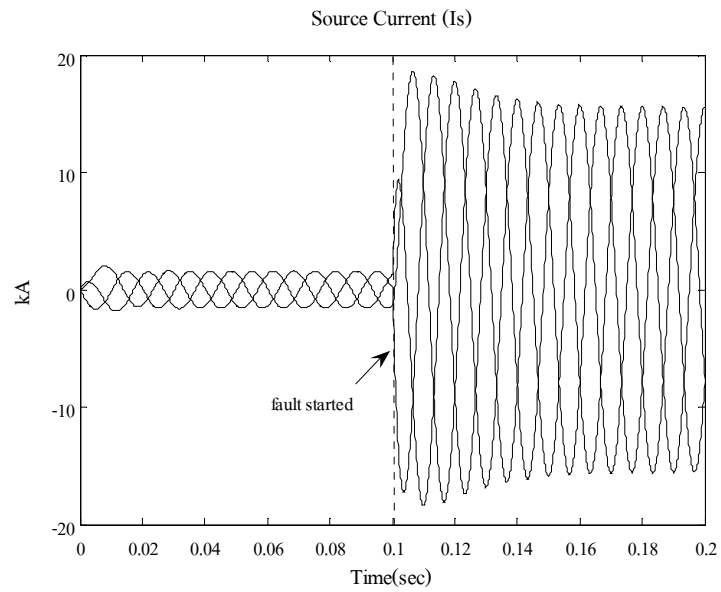
- วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไหล



รูปที่ 4.22 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

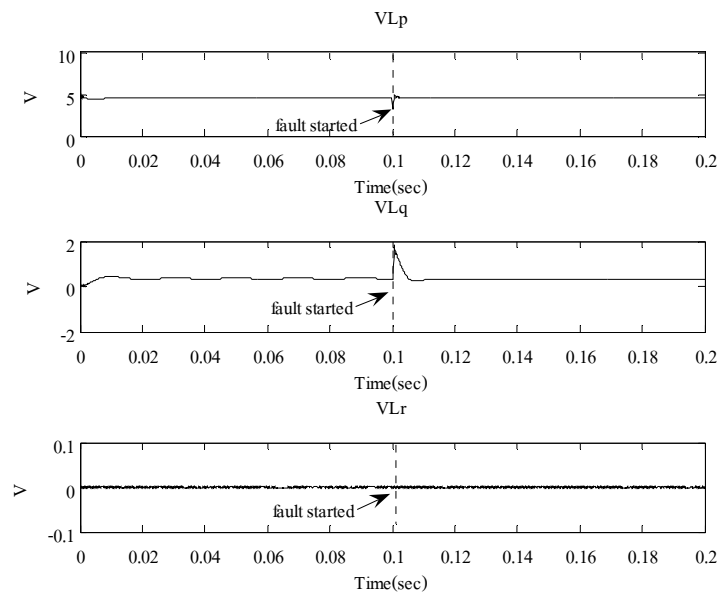


รูปที่ 4.23 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไหล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

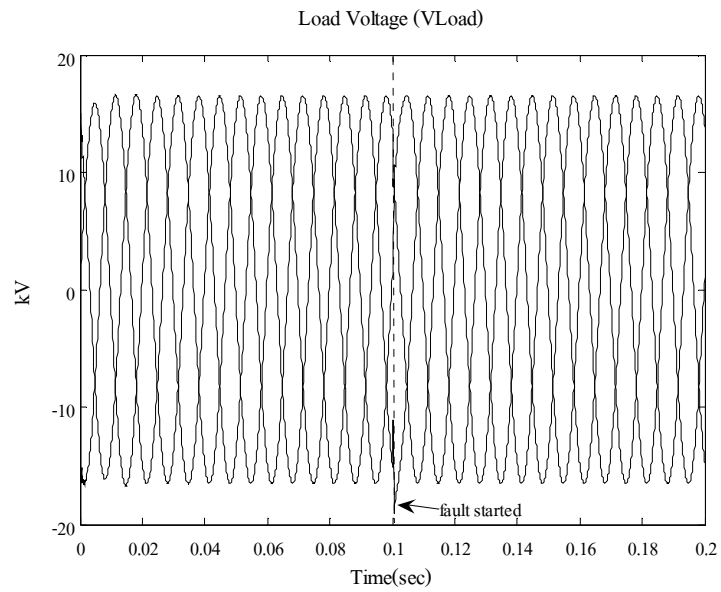


รูปที่ 4.24 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

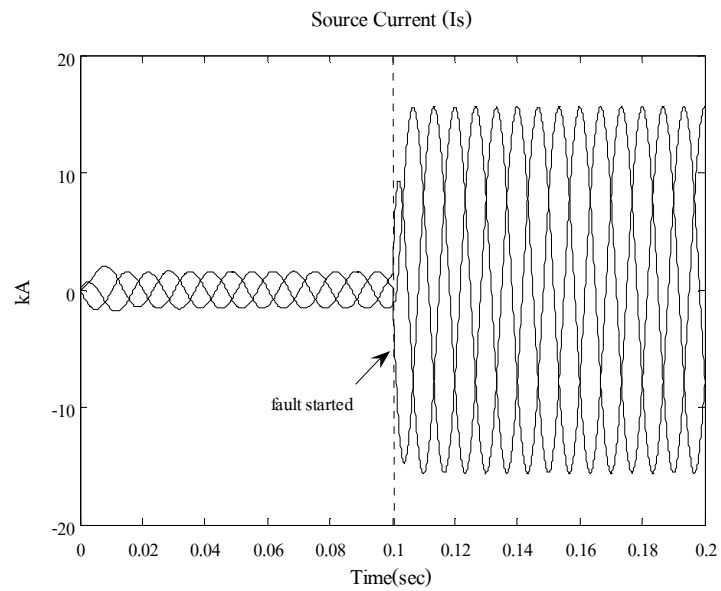
- วิธีการแปลงฟิควาร์



รูปที่ 4.25 แรงดันโพลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

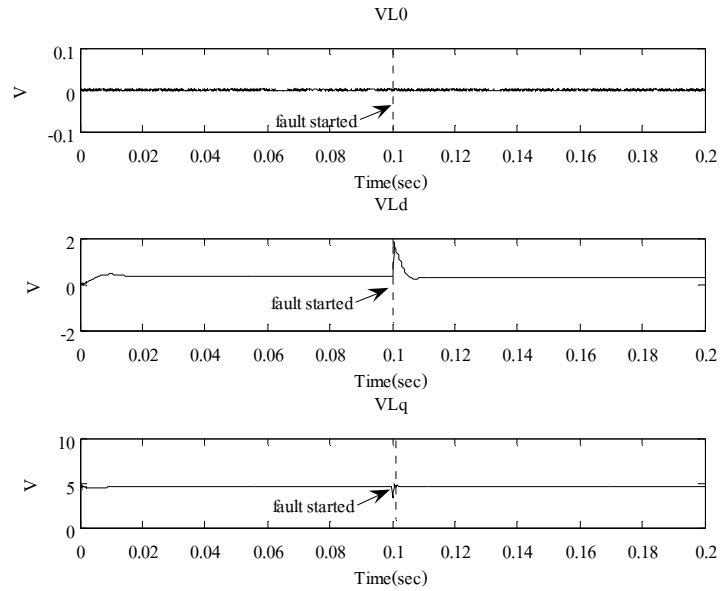


รูปที่ 4.26 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

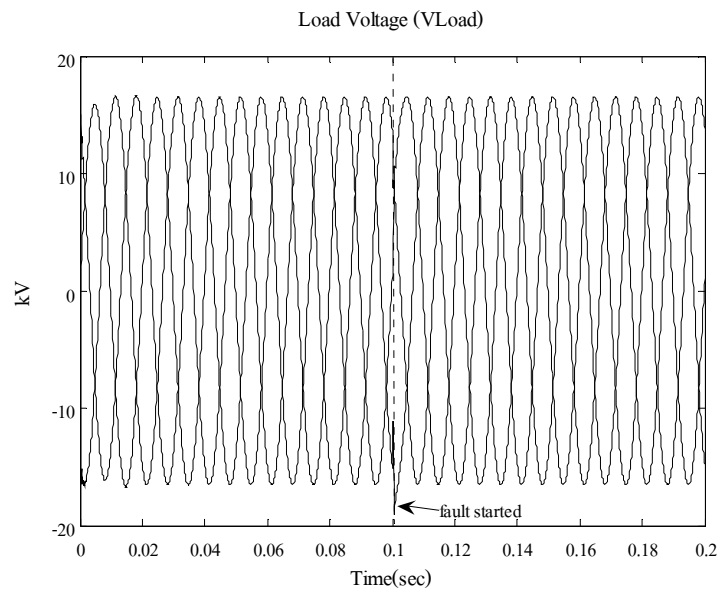


รูปที่ 4.27 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

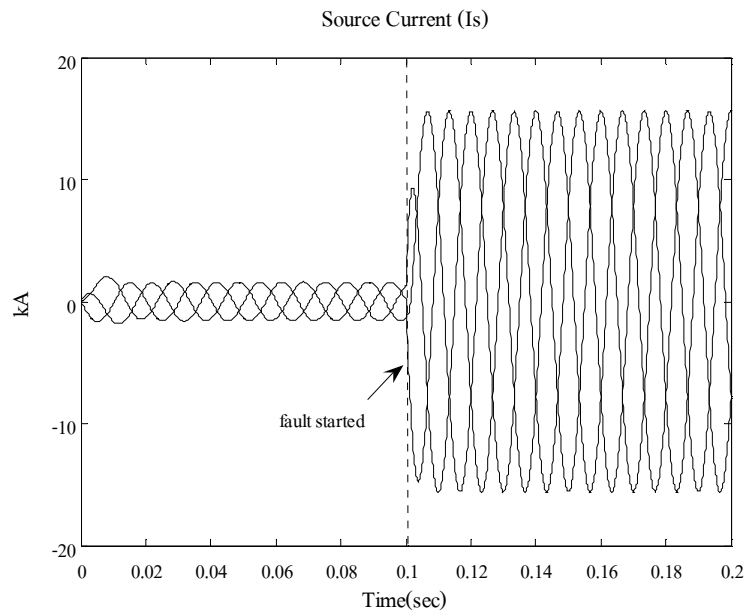
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 4.28 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.29 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 4.30 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ตกคร่อมโหลด แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 4.25 และ 4.28 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 ซึ่งเทคนิคการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติ ประมาณ 64.3 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงพิกิวาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ใช้เวลาในการชดเชยแรงดันเท่ากัน คือ 1.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น รูปที่ 4.23 4.26 และ 4.29 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล เทคนิคการแปลงพิกิวาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม ส่วนรูปที่ 4.24 4.27 และ 4.30 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล เทคนิคการแปลงพิกิวาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจาก

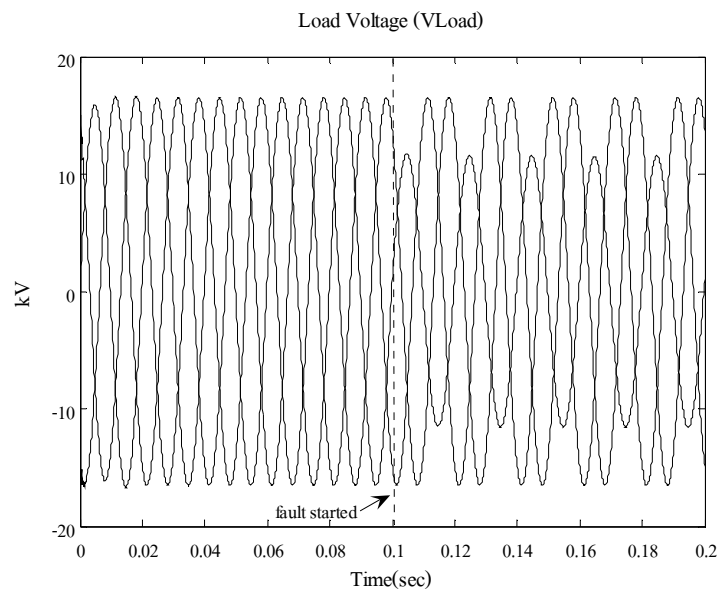
เดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอม โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคค่ารอกำลังสองเฉลี่ยแบบโลดจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด

4.5.2 ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

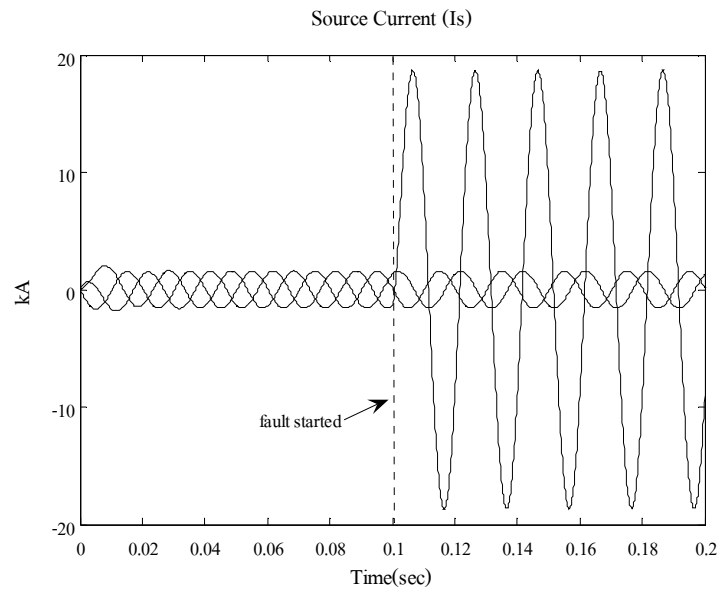
ผลการทดสอบกับระบบทดสอบ 4 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

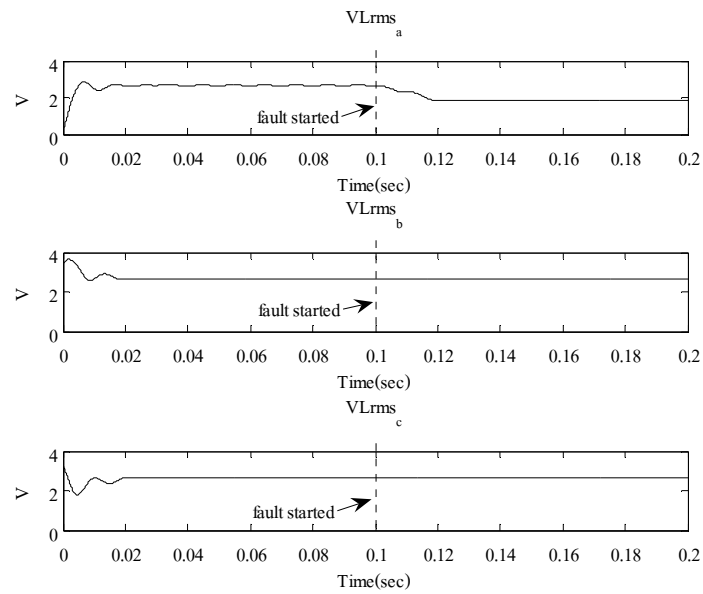
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 4 เฟส a ลดลงจากสภาวะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเฟส a มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติ สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.33 4.34 และ 4.35



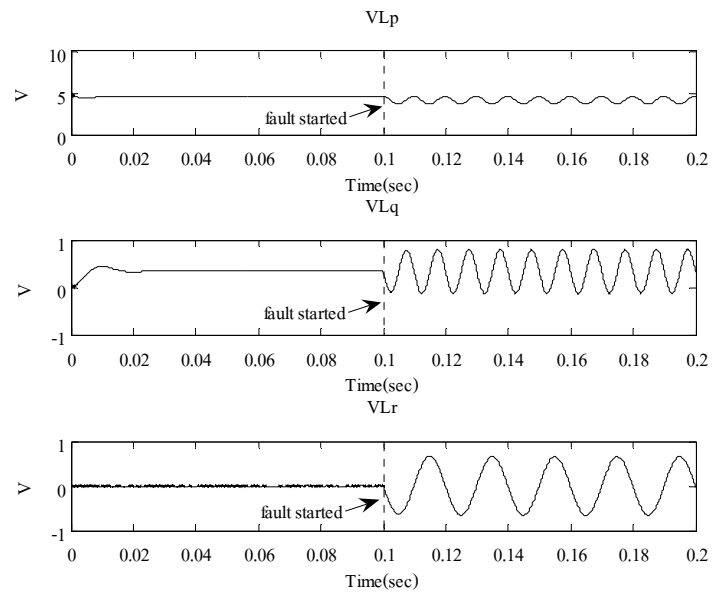
รูปที่ 4.31 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



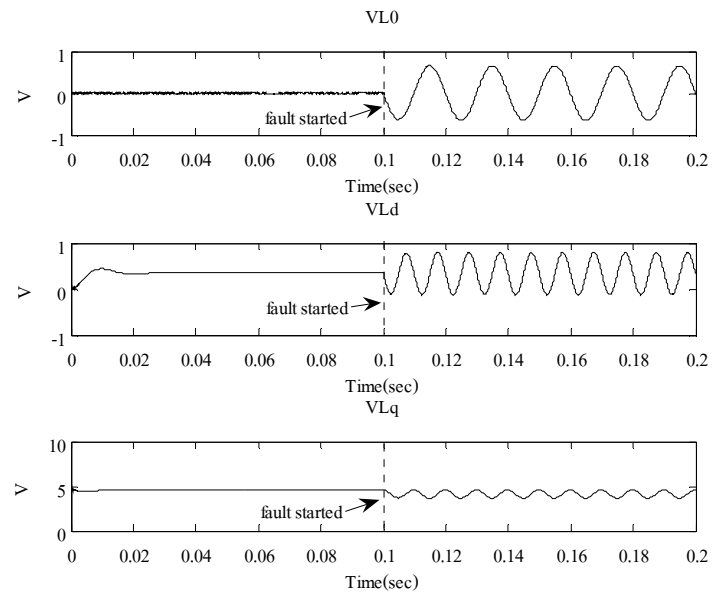
รูปที่ 4.32 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.33 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.34 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.35 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 4.33 4.34 และ 4.35 แสดงแรงดันโหลดที่ได้จากการใช้วิธีค่าราคากำลังสองเฉลี่ยแบบไถล วิธีการแปลงฟิวเจอร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะที่เกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 4.34 แรงดันที่เฟส a มีค่าลดลง รูปที่ 4.34 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้ รูปที่ 4.35 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q จะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังเช่นวิธีการแปลงฟิวเจอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้เช่นกัน

- กรณีมีตัวชดเชย

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

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิดการลัดวงจร

ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

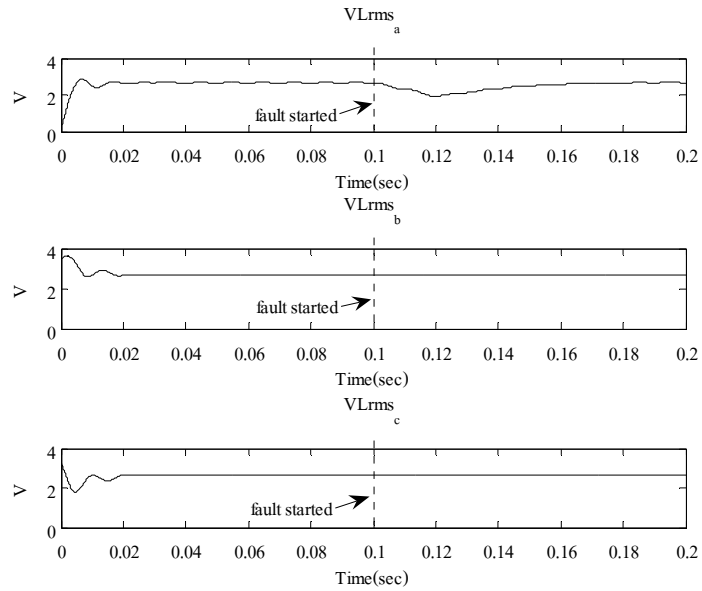
Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^a \in [0, 0.1]$, $k_p^{pqr} \in [0, 0.5]$, $k_p^{0dq} \in [0, 0.5]$

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร

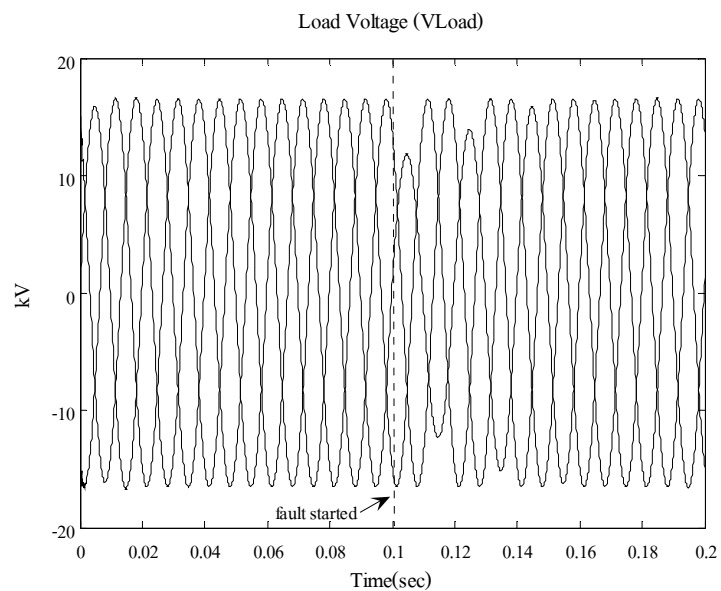
ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a

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

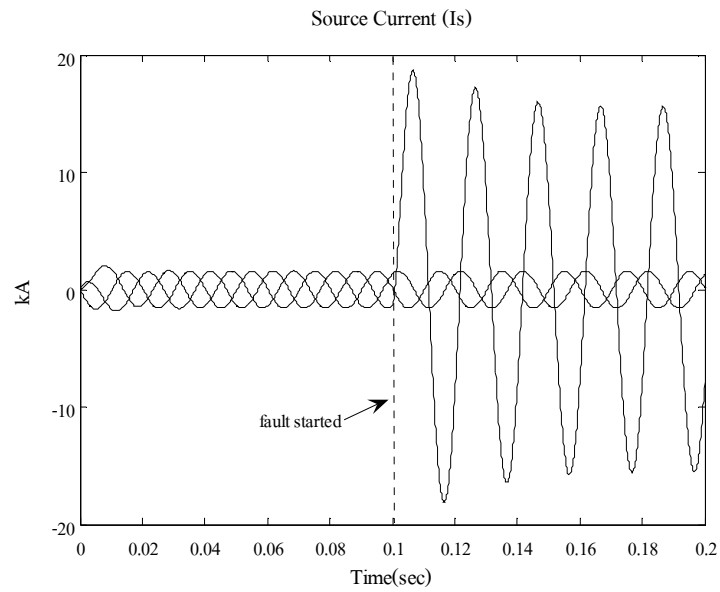
- วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล



รูปที่ 4.36 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

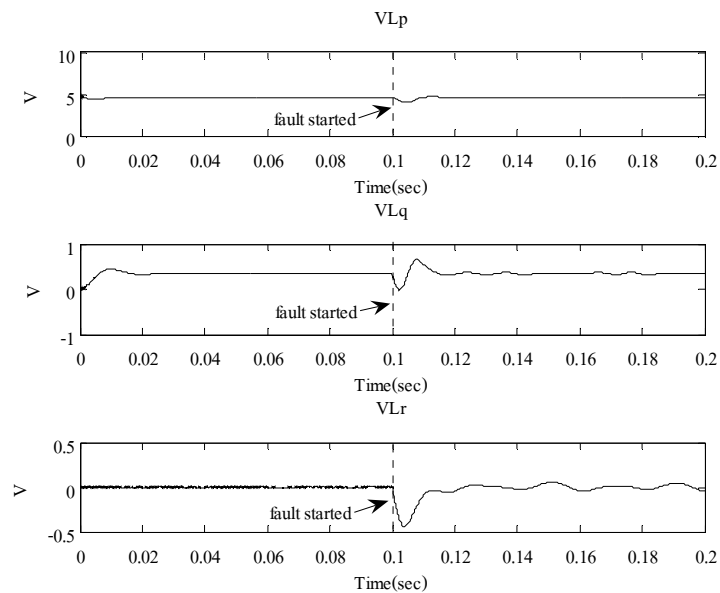


รูปที่ 4.37 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

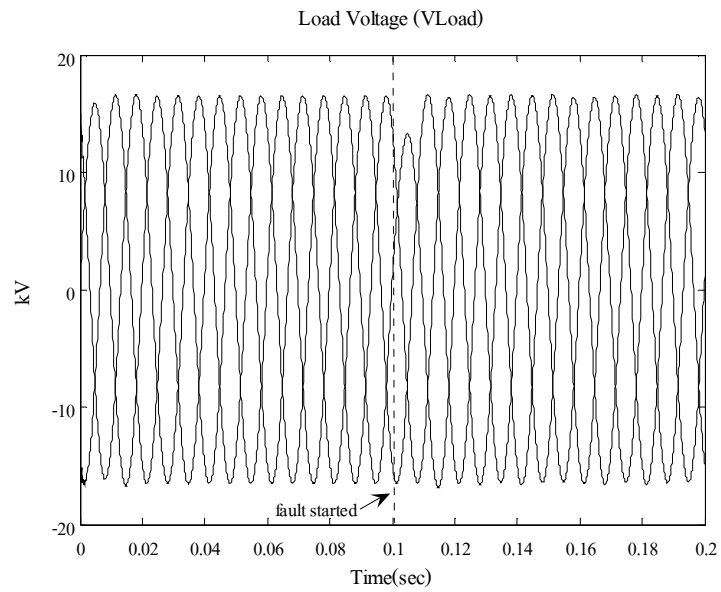


รูปที่ 4.38 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีค่ารากลำกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

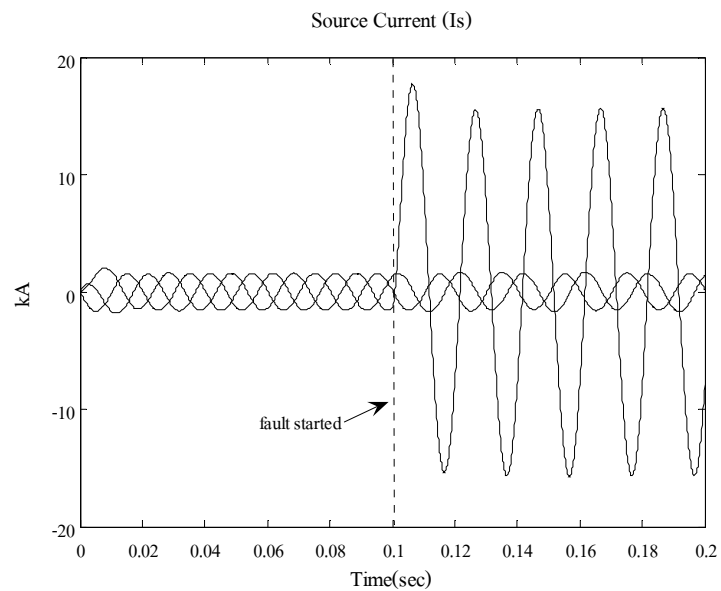
- วิธีการแปลงฟิควาร์



รูปที่ 4.39 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

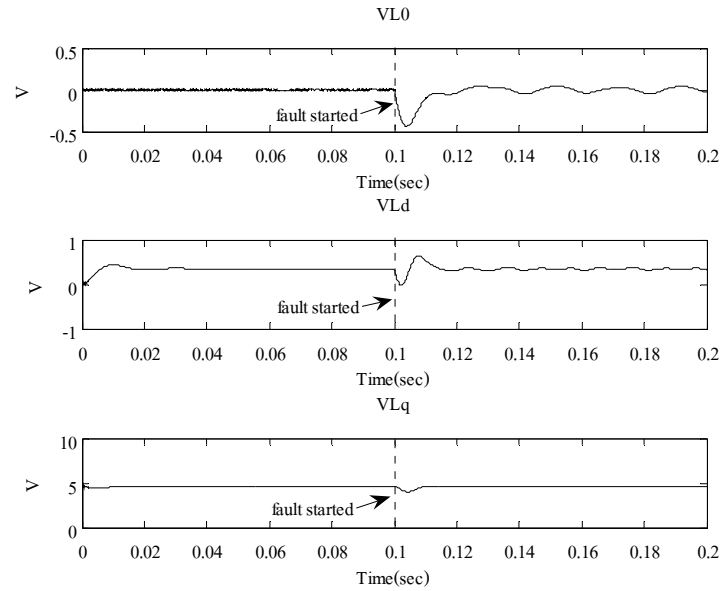


รูปที่ 4.40 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

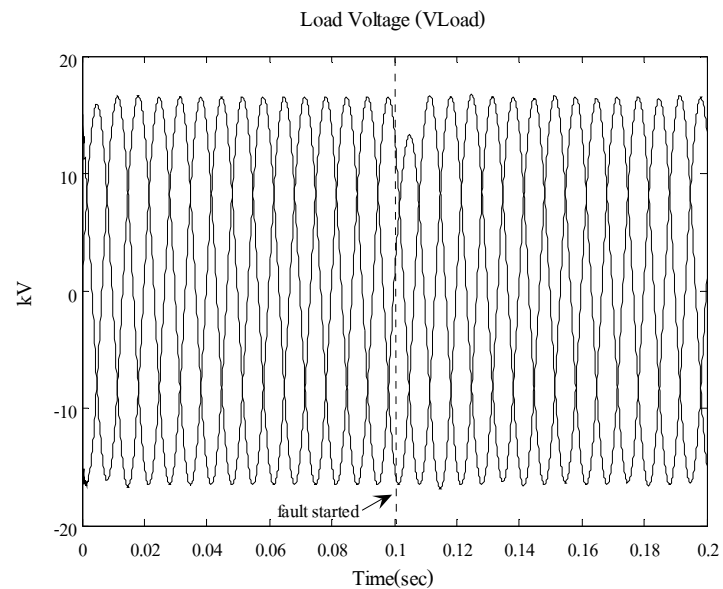


รูปที่ 4.41 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

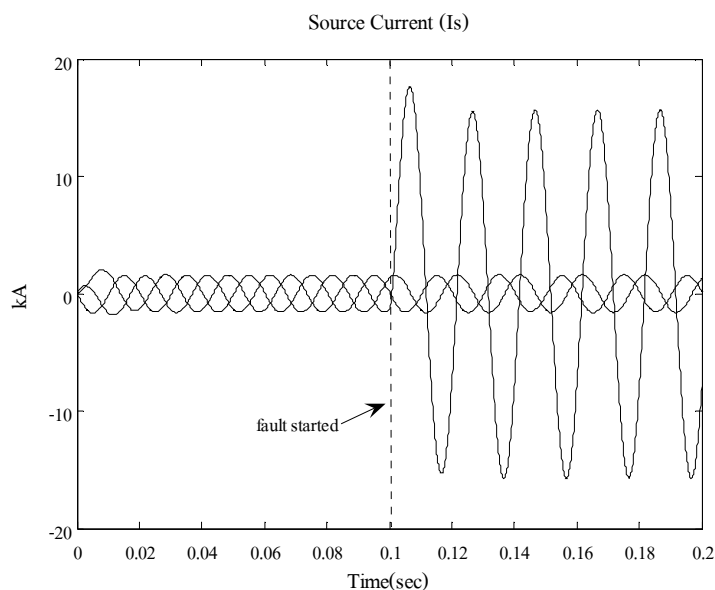
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 4.42 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.43 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 4.44 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ตกคร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 4.39 และ 4.42 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ทำให้แรงดัน rms เฟส a ที่โหลดตก แรงดันโหลดขององค์ประกอบ p-q-r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0-d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q ลดลง ทำให้ดี-สแตตคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไกลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 70 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงพิกิวอาร์และเทคนิคการแปลงพาร์กใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 8.8 มิลลิวินาทีเท่านั้น แต่องค์ประกอบ r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0 ในกรอบอ้างอิง 0-d-q มีการแกว่งของแรงดันเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.37 4.40 และ 4.43 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไกล เทคนิคการแปลงพิกิวอาร์และเทคนิคการแปลงพาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะเกิดการลัดวงจร จากรูปกราฟทั้งสามจะเห็นว่าแรงดันที่เฟส a ตกลง และเกิดการกระเพื่อมของแรงดันเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม ส่วนรูปที่ 4.38 4.41 และ 4.44 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบไกล เทคนิคการแปลงพิกิวอาร์และเทคนิคการแปลงพาร์ก

ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามจะเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด อีกทั้งกระแสเฟสของแหล่งจ่ายในกรณีที่มีตัวชดเชย มีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม โดยสังเกตได้ว่าเทคนิคการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถลเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด เหมือนกับในกรณีการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร

4.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงแบบจำลองในสภาวะชั่วครู่ของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล วิธีการแปลงฟิควาร์ และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินในระบบทดสอบ 4 บัส ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอม เพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ จากการดำเนินงานพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดินดี-สแตตคอมสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร คือ วิธีการแปลงฟิควาร์และวิธีการแปลงปาร์ก สำหรับวิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถลให้ผลตอบสนองที่ช้า เมื่อเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าว และเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน วิธีที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุด คือ วิธีการแปลงฟิควาร์ วิธีการแปลงปาร์ก และวิธีการากกำลังสองเฉลี่ยแบบไถลตามลำดับ โดยเนื้อหาที่กล่าวในบทที่ 3 เป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร และบทนี้ซึ่งเป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์

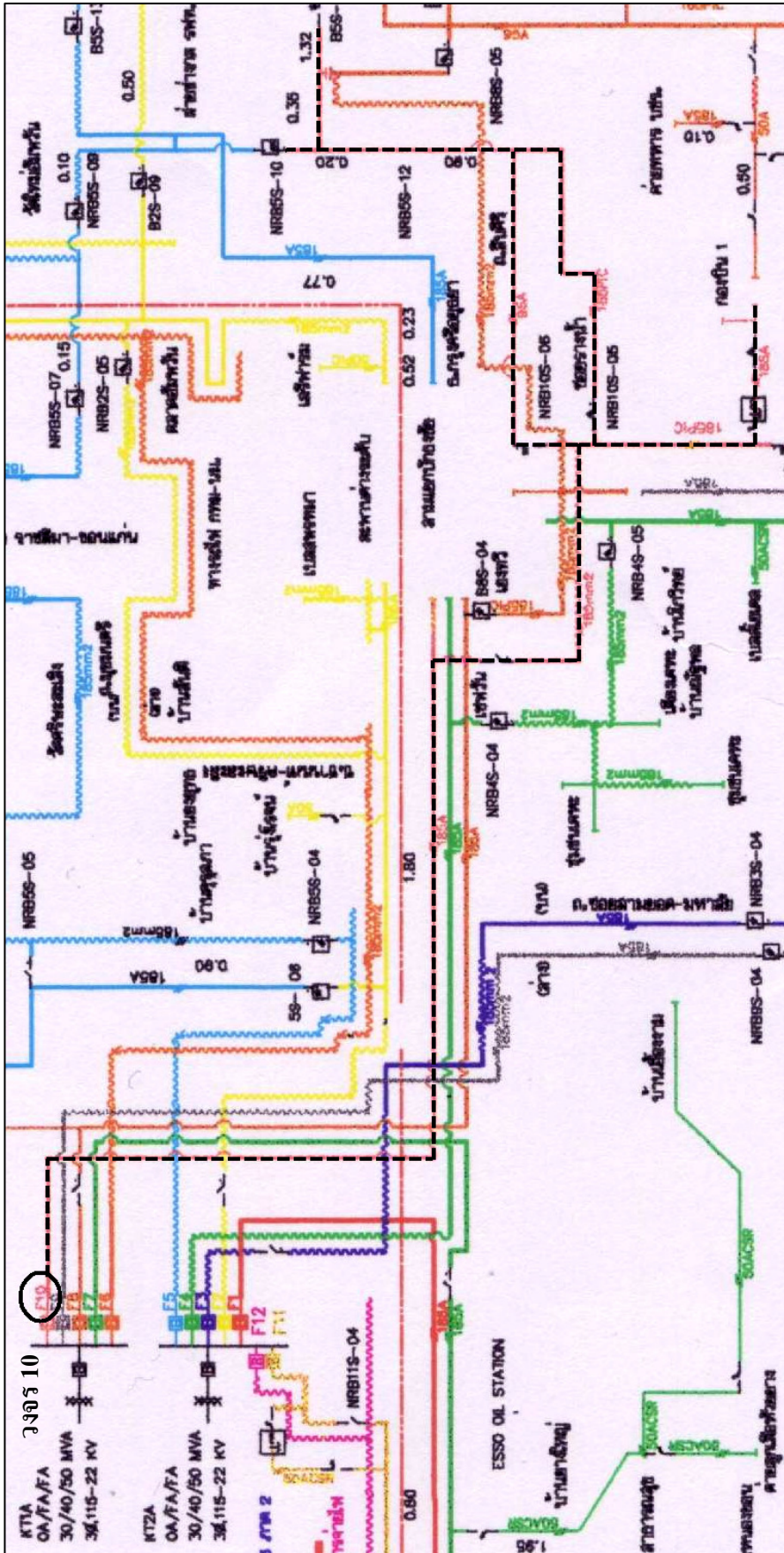
5.1 บทนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรในสถานะชั่วคราว โดยใช้ระบบทดสอบตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ซึ่งจากการดำเนินการที่ผ่านมาทั้ง 2 วิธีนี้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ในสถานะผิดปกติ

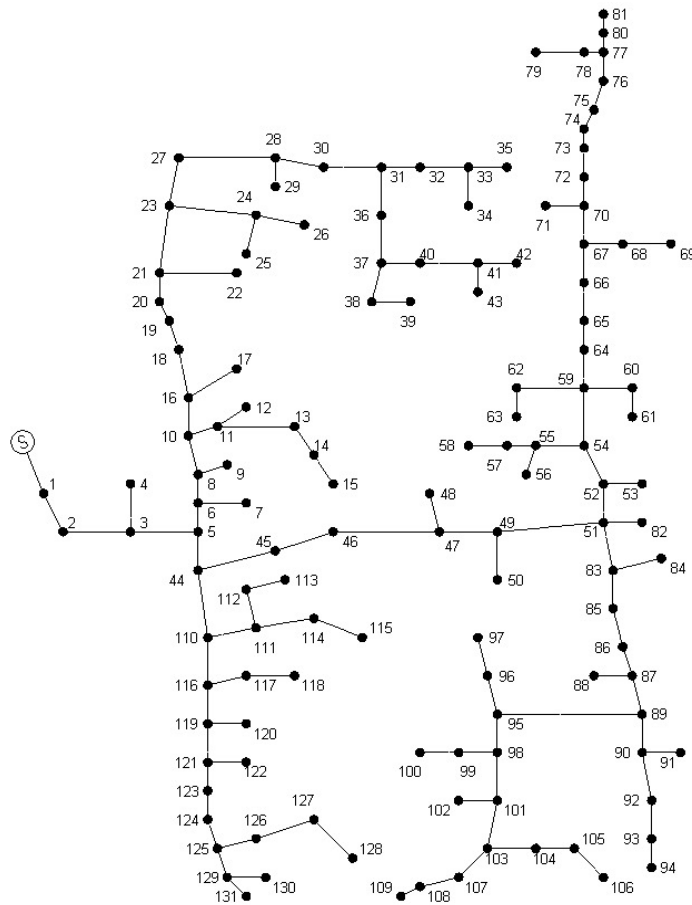
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร เทคนิคการออกแบบตัวชดเชยในแต่ละแบบเบื้องต้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 แล้วตามลำดับ ระบบทดสอบใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) จำนวน 131 บัส มาทำการทดสอบ พร้อมทั้งกล่าวถึงเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบชุดควบคุม ดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น 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 เดินสายไปทางทิศตะวันออกผ่านถนนมิตรภาพประมาณ 5 กิโลเมตร ลากสายไฟทางทิศใต้สู่การเคหะ จากนั้นสายจ่ายแยกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งไปทางทิศใต้สิ้นสุดที่กองบิน 1 อีกทางหนึ่งลากไปทางทิศตะวันออกตามถนนสี่สีริและซอยรางน้ำ 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



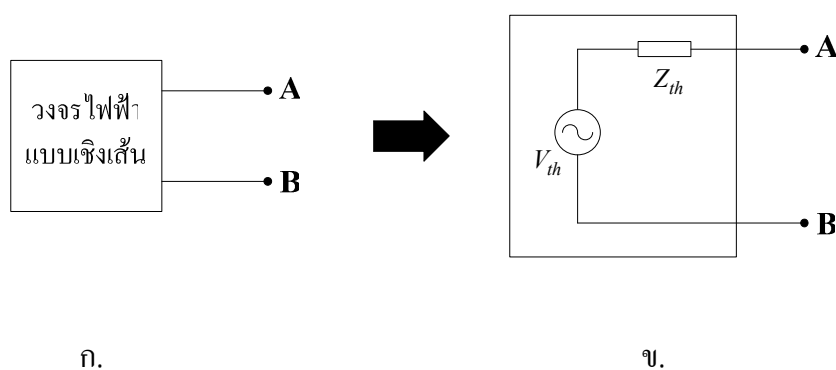
รูปที่ 5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10)

5.3 เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ การจำลองผลทั้งระบบโดยสมบูรณ์ใช้เวลานาน ดังนั้นการนำเทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังเข้ามาช่วยในการจำลองผลเพื่อให้ใช้เวลาในการจำลองผลน้อยลง 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} (Grainger and Stevenson, 1994) ดังรูปที่ 5.3 ในงานวิจัยนี้การหาค่า V_{th} และ Z_{th} ใช้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย, 2548) ส่งผลให้ลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังจากทั้งหมด 131 บัส เหลือเพียง 2 บัส เท่านั้น โดยระบบไฟฟ้าถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ โหลด k ที่ตำแหน่งติดตั้งดี-สแตคคอม โหลดที่อยู่หลังตำแหน่งติดตั้งพิจารณาเป็นกลุ่มโหลดที่ถูกป้องกัน

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

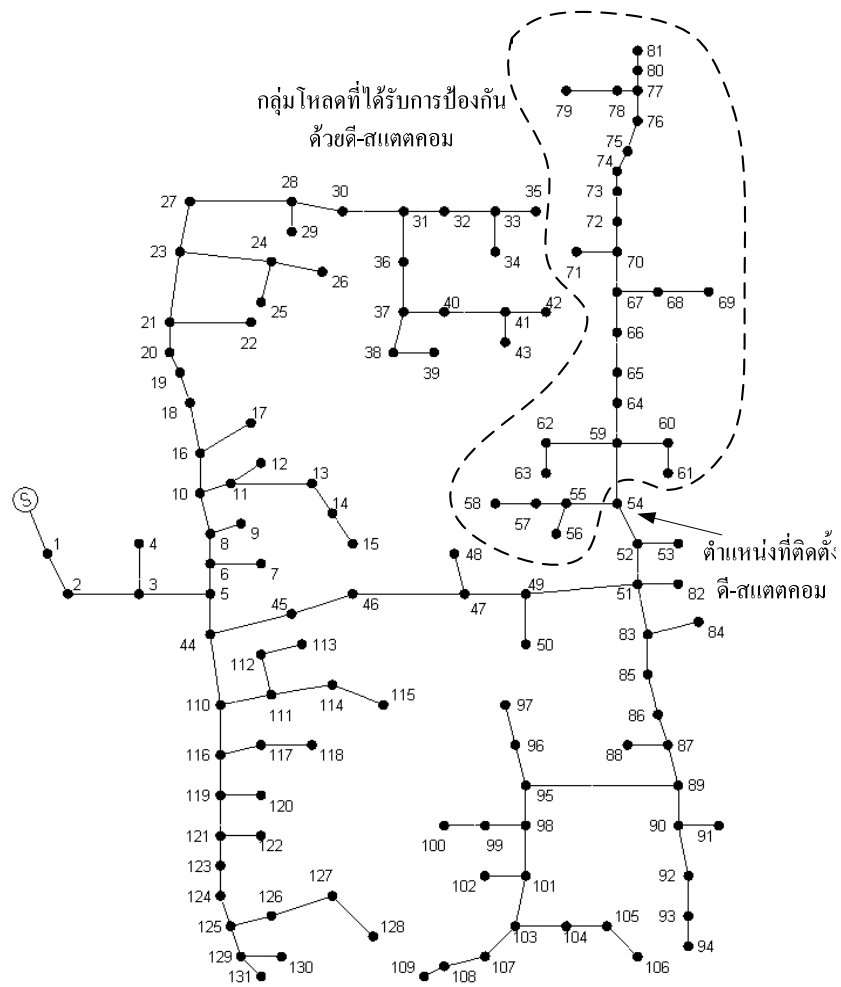


รูปที่ 5.3 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใด ๆ และวงจรสมมูลของเทวินิน

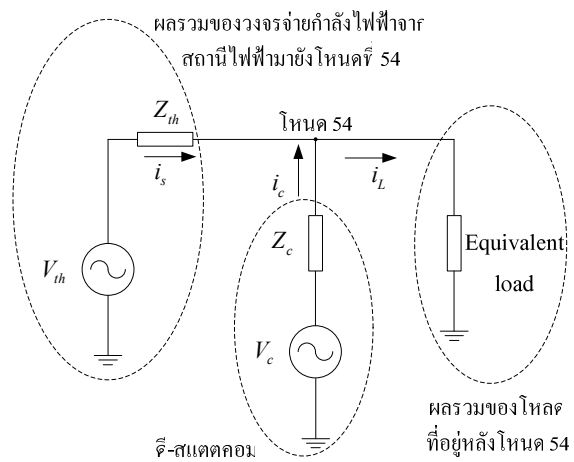
5.4 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

แบบสมมาตร

การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ใช้หลักการออกแบบตัวชดเชยสถานะย้อนกลับดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 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



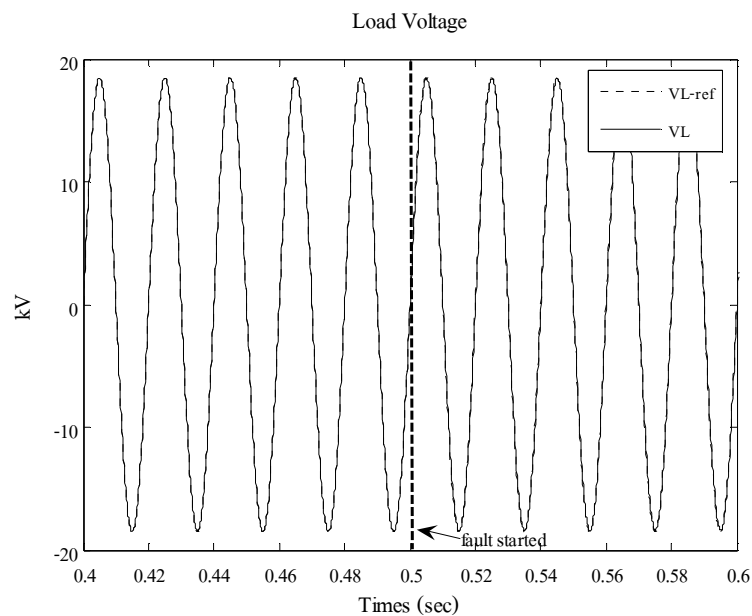
รูปที่ 5.4 การรวมโหนดที่บัส 54



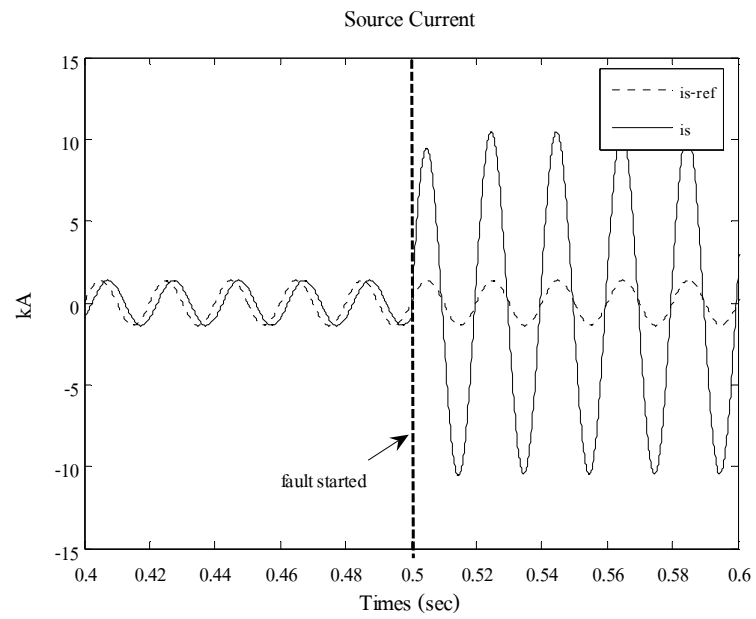
รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร

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 การทดสอบจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมมาตรที่โหลด คือ บัสที่ 54 เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่บัสโหลดลดลง การติดตั้งดี-สแตคคอมที่บัสโหลดเพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดและกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัวควบคุมได้ดังนี้

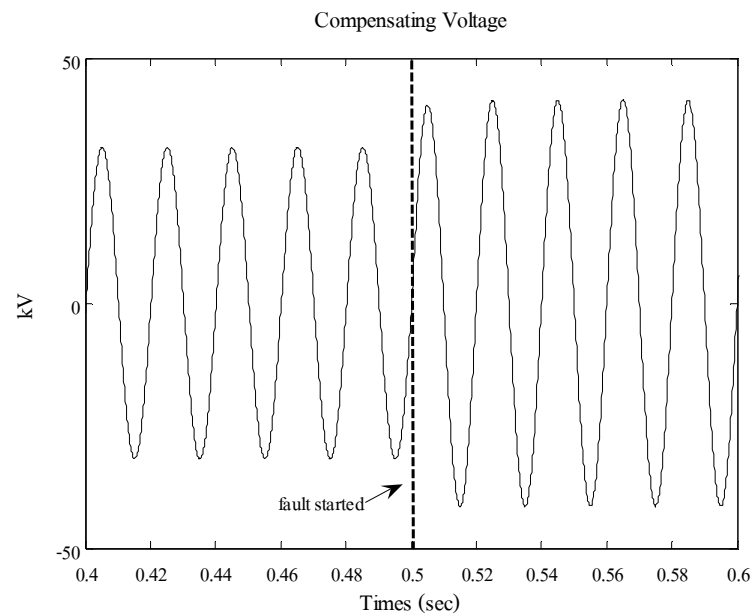
5.4.1 สภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันโหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



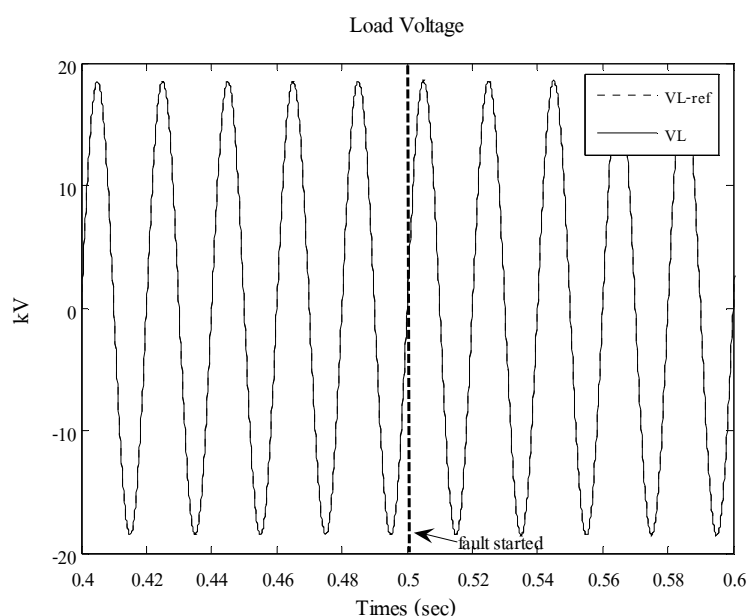
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)



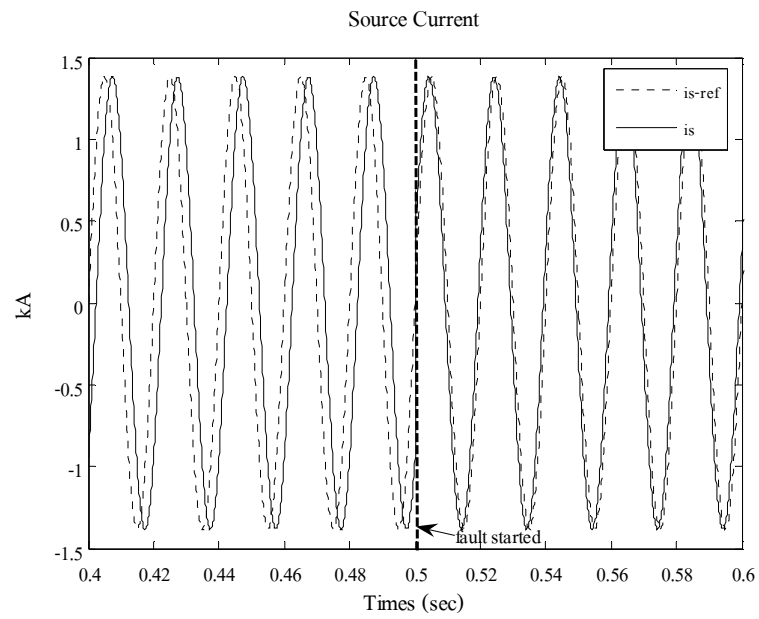
รูปที่ 5.8 แรงดันที่ตี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดปกติ (ไม่มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะ ผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดพร้อมที่เวลา 0.5 วินาที ทำให้เกิดแรงดัน ตกเพียงเล็กน้อยเนื่องมาจากเกิดการลัดวงจร รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่าย อ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่ จำลองผลได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง และรูปที่ 5.8 แสดงแรงดันที่ ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุมสังเกตได้ว่าขณะเกิดความ ผิดพร้อม แรงดันที่ ดี-สแตคคอมจ่ายให้กับระบบจะมีขนาดแรงดันมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ไม่มาก เพราะ เนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด

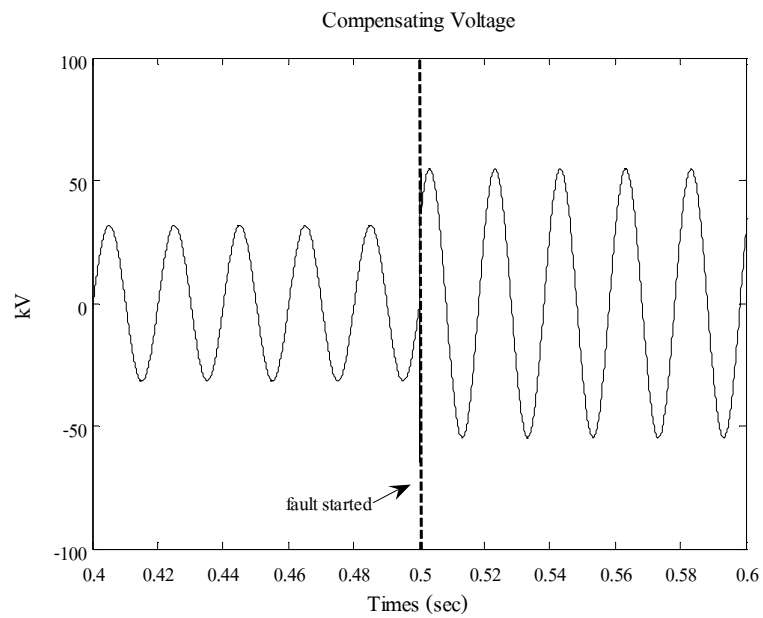
5.4.2 สภาวะผิดพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดพร้อม (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)



รูปที่ 5.11 แรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสถานะผิดปกติ (มีตัวควบคุม)

รูปที่ 5.9 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัน โหลดอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะ ผิดพร้อมเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่า ขณะเกิดความผิดพร้อมที่เวลา 0.5 วินาที ตัวควบคุมสามารถ ช่วยชดเชยแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจรได้เป็นอย่างดี รูปที่ 5.10 แสดงผลการเปรียบเทียบ กระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิงกับที่จำลองผลได้ ในสภาวะผิดพร้อมเมื่อมีตัวควบคุม สังเกตได้ว่าขณะ เกิดความผิดพร้อม ขนาดกระแสจากแหล่งจ่ายที่จำลองผลได้มีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายอ้างอิง แต่มุมเฟสไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงมุมเฟสแต่อย่างใด รูปที่ 5.11 แสดงแรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบ ในสภาวะผิดพร้อมเมื่อมีตัวควบคุม สังเกต ได้ว่าขณะเกิดความผิดพร้อม แรงดันที่ดี-สแตตคอมจ่ายให้กับระบบมีการกระเพื่อมของแรงดันมาก ในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม

จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าในสภาวะผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุมกับมีตัว ควบคุมได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลดในสภาวะผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

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

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสแหล่งจ่ายในสภาวะผิดพร้อมเมื่อไม่มีตัวควบคุม กับมีตัวควบคุม

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

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

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น พิจารณาจากความสามารถควบคุมได้ และความสามารถสังเกตได้หรือพิจารณาจากค่าเฉพาะของเมทริกซ์ 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

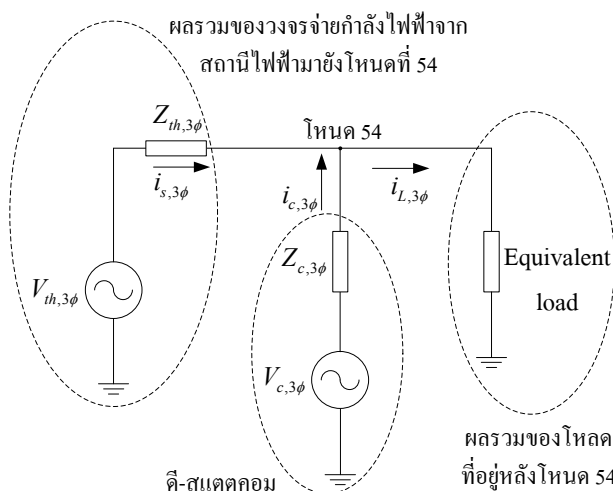
$$\text{eigenvalues} = \begin{bmatrix} -26947 \\ -8.9455 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

ผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อหาค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A' จะได้เป็นจำนวนจริงลบทุกสมาชิกแสดงว่า “ระบบมีเสถียรภาพ”

5.5 การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

แบบไม่สมมาตร

ในการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตรนั้น ใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส และหลักการควบคุมแบบสัดส่วนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) เป็นระบบทดสอบ และกำหนดให้ติดตั้งดี-สแตตคอมไว้ที่บัส 54 เช่นเดียวกับการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร และใช้เทคนิคการลดทอนระบบไฟฟ้ากำลังดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.3 มาทำการลดทอนระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 โดยโหนดที่เราพิจารณาเป็นการรวมโหนดตั้งแต่บัสที่ 54 เป็นต้นไป จนถึงบัสที่ 81 ดังรูปที่ 5.4 โดยเมื่อรวมโหนดแล้วจะได้โหนดรวมแต่ละเฟสที่บัส 54 มีค่าดังนี้ คือ เฟส a และเฟส b เท่ากับ 278.056 กิโลวัตต์ 153.843 กิโลวาร์ ส่วนเฟส c มีค่าเท่ากับ 286.806 กิโลวัตต์ 158.685 กิโลวาร์



รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลเทวินินที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

วงจรสมมูลเทวินินของระบบที่ใช้ในการจำลองผลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมมาตร แสดงดังรูปที่ 5.12 สามารถหาค่า $V_{th,3\phi}$ และ $Z_{th,3\phi}$ แต่ละเฟสได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ค่า V_{th}^a เท่ากับ $1.0089 \angle -0.0094^\circ$ pu, V_{th}^b เท่ากับ $1.0155 \angle -2.1005^\circ$ pu, และ V_{th}^c เท่ากับ $1.0153 \angle 2.0881^\circ$ pu. ค่า Z_{th}^a เท่ากับ $0.0362 + j0.1195$ โอห์ม ส่วนค่า Z_{th}^b และ Z_{th}^c มีค่าเท่ากับ $0.0079 + j0.0657$ โอห์ม และจำลองสถานการณ์การเกิดลัดวงจร 2 ประเภท ที่บัสโหลด คือ ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 54 และชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a ที่เวลา 0.1 วินาที และใช้เวลาในการจำลองผลทั้งสิ้น 0.2 วินาที ซึ่งผลทดสอบแสดงได้ดังนี้

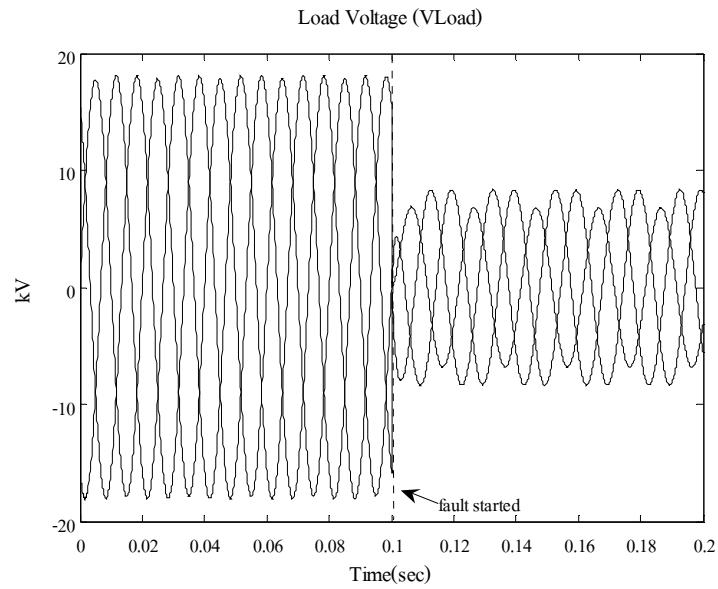
5.5.1 ลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 54

ผลการทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 54 สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสถานะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

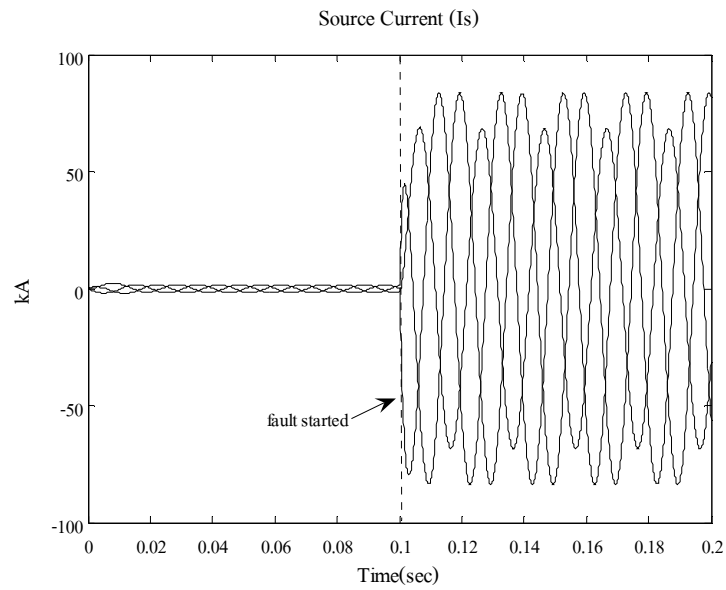
- กรณีไม่มีตัวชดเชย

ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตุได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 54 ทั้ง 3 เฟส ลดลงจากสถานะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่

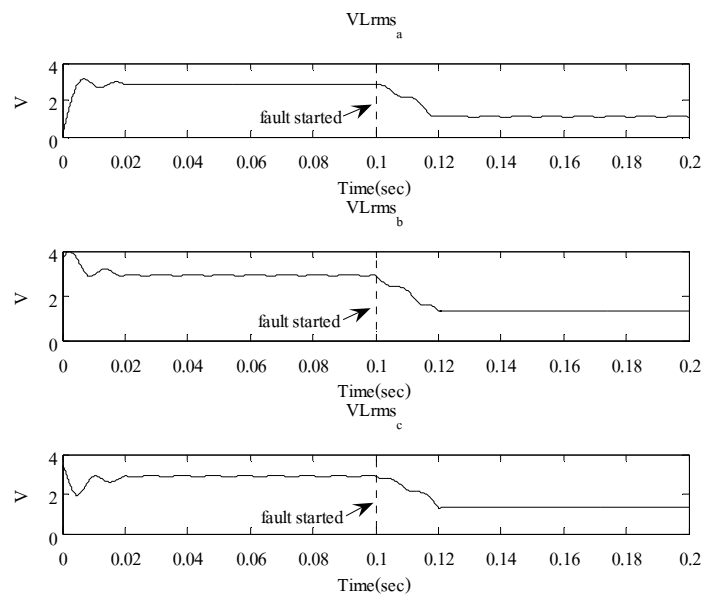
บัส 54 และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติพร้อม สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 5.15 5.16 และ 5.17



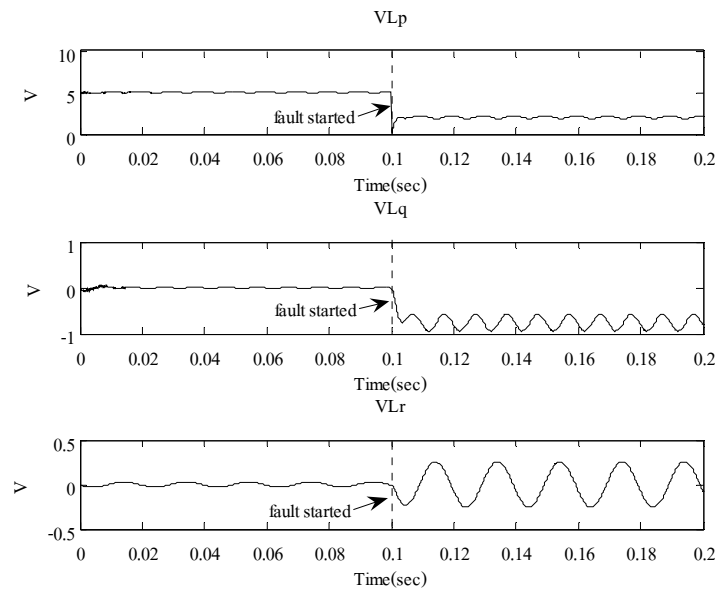
รูปที่ 5.13 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



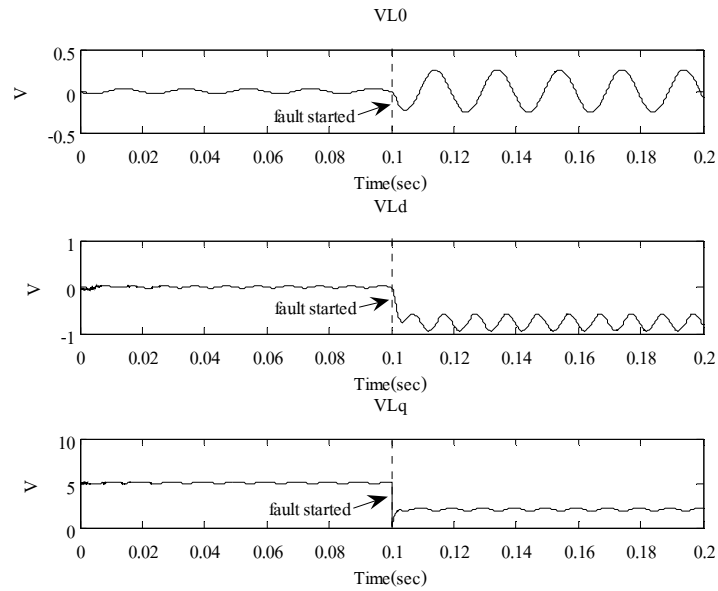
รูปที่ 5.14 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 5.15 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 5.16 แรงดันโพลที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 5.17 แรงดันโพลที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 5.15 5.16 และ 5.17 แสดงแรงดันโหลดที่ได้จากการใช้วิธีค่าราคาล้างสองเฉลี่ยแบบไหล วิธีการแปลงฟิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะที่เกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 5.15 แรงดัน rms ทั้ง 3 เฟสมีค่าลดลง และเนื่องจากการลัดวงจรเป็นแบบชนิดสมมาตร ดังนั้นเลือกตัวตรวจจับความผิดปกติเพียงตัวเดียว รูปที่ 5.16 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ p ชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงฟิวอาร์ จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ p เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ ในรูปที่ 5.17 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันที่องค์ประกอบ q ชัดเจนที่สุด ดังนั้นในการควบคุมแรงดันด้วยเทคนิคการแปลงปาร์ก จะใช้แรงดันจากองค์ประกอบ q เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติ

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีทีดีทีที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 5.4 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

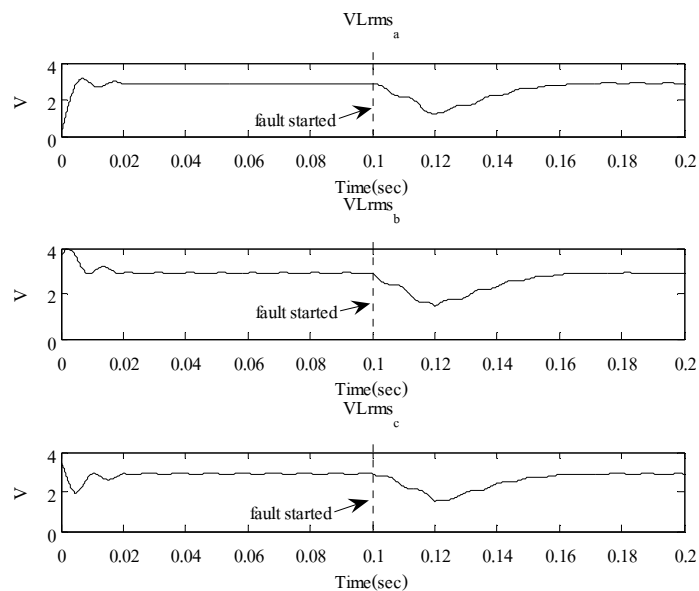
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิด 3 ϕ F ที่บัส 54

Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^{abc} \in [0, 2]$, $k_p^{pqr} \in [0, 3]$, $k_p^{0dq} \in [0, 3]$

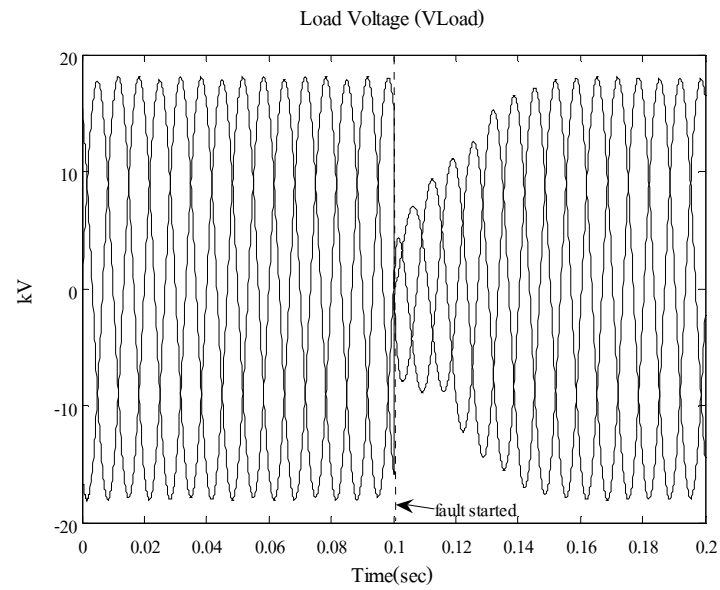
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตรที่บัส 54

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่าราคำลังสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^{abc} = 1.15$
- การแปลงพิกิวอาร์	$k_p^{pqr} = 2.3338$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^{0dq} = 2.3974$

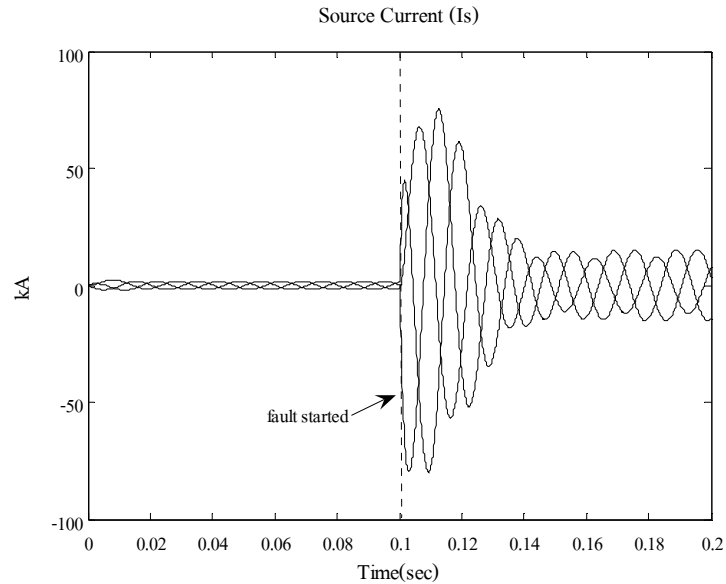
- วิธีค่าราคำลังสองเฉลี่ยแบบไถล



รูปที่ 5.18 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

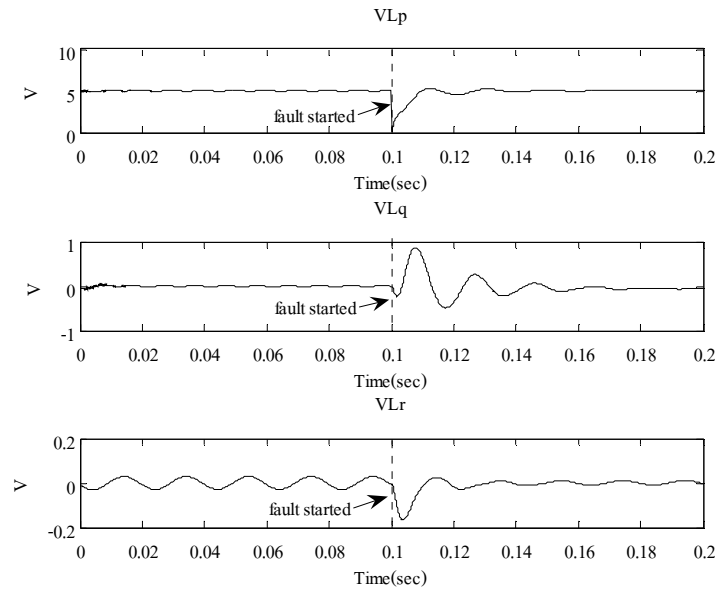


รูปที่ 5.19 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

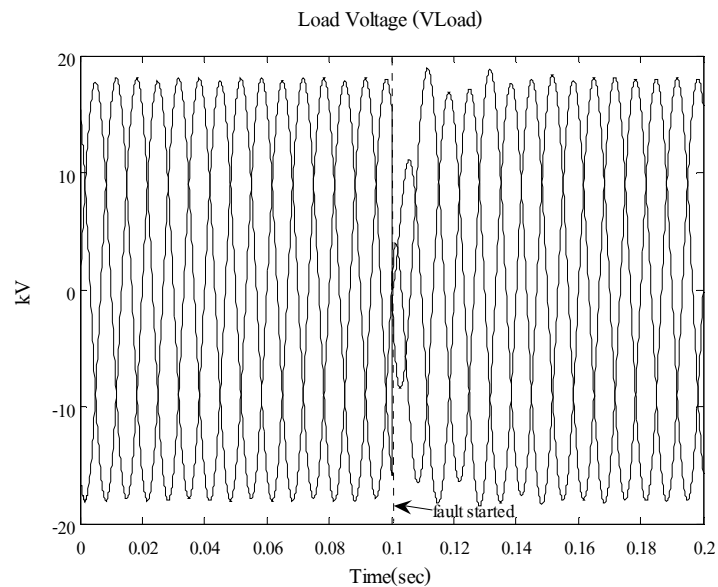


รูปที่ 5.20 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

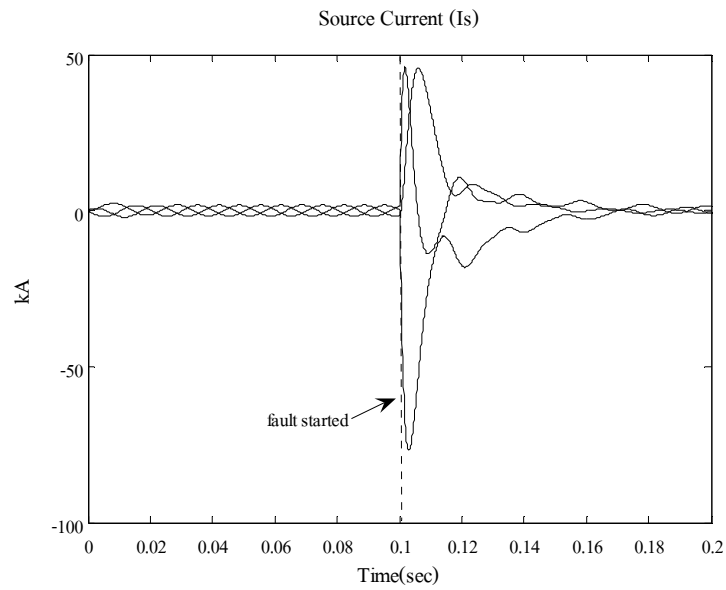
- วิธีการแปลงฟิวอาร์



รูปที่ 5.21 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

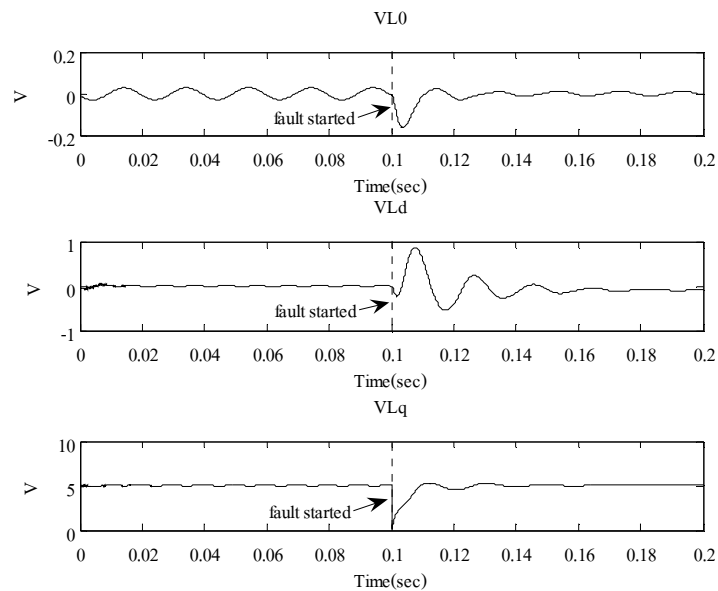


รูปที่ 5.22 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

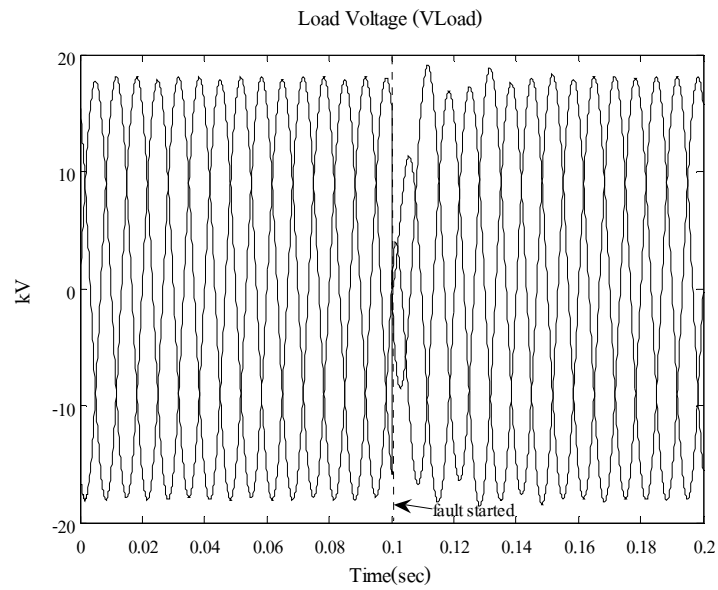


รูปที่ 5.23 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

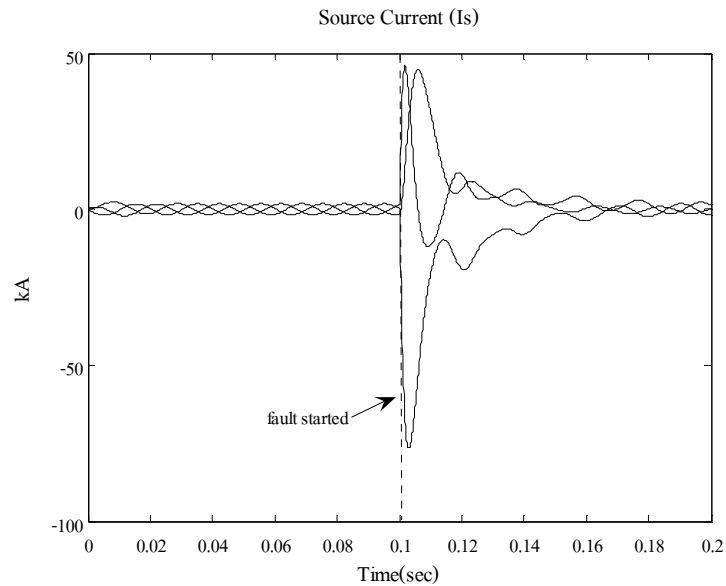
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 5.24 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 5.25 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร



รูปที่ 5.26 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงปาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสแบบสมมาตร

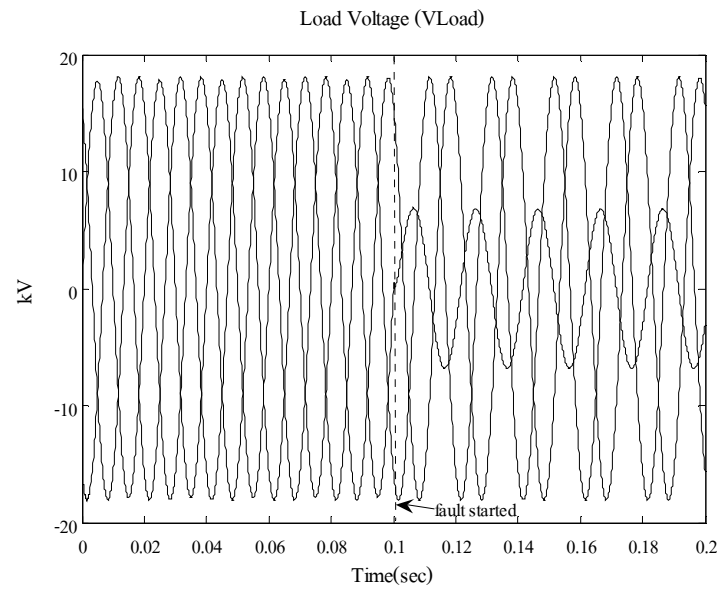
ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ตกคร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 5.21 และ 5.24 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรที่บัส 54 ทำให้แรงดัน rms ที่โหลดตก แรงดันโหลดขององค์ประกอบ p-q ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ดี-สแตตคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติ 63 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์กใช้เวลาในการชดเชยแรงดันเท่ากัน คือ 43.1 มิลลิวินาที รูปที่ 5.19 5.22 และ 5.25 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของแรงดันมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม ส่วนรูปที่ 5.20 5.23 และ 5.26 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของกระแสมากในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด สันเกตได้ว่าเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกลเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด

5.5.2 ลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a

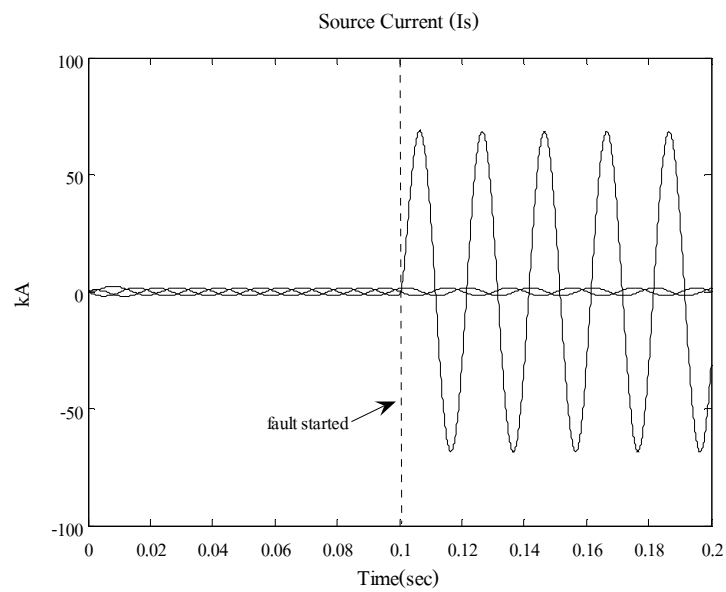
ผลการทดสอบกับระบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโหลด และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติเมื่อไม่มีตัวชดเชยกับมีตัวชดเชยได้ดังนี้

- กรณีไม่มีตัวชดเชย

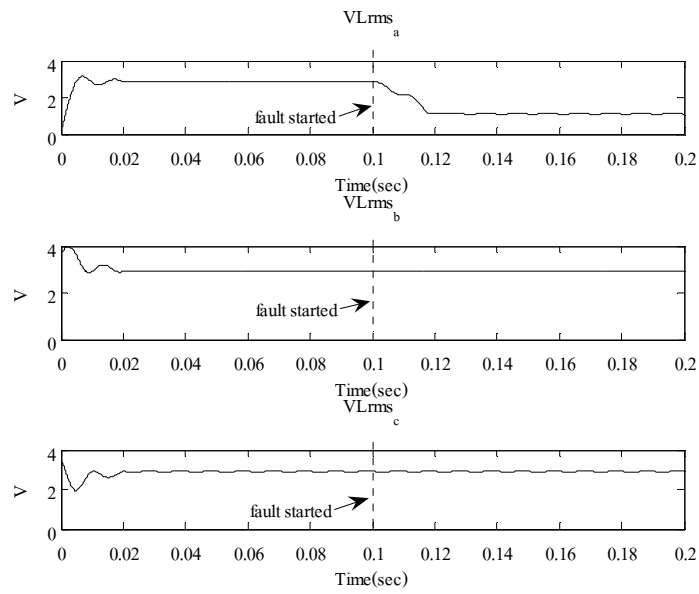
ในกรณีไม่มีตัวชดเชย แรงดันเฟสที่โหลดและกระแสเฟสของแหล่งจ่ายแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที ทำให้แรงดันเฟสที่โหลดที่บัส 54 เฟส a ลดลงจากสภาวะปกติ และกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเฟส a มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a และจากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติ สามารถแสดงแรงดันที่ได้จากการตรวจจับได้ดังรูปที่ 5.29 5.30 และ 5.31



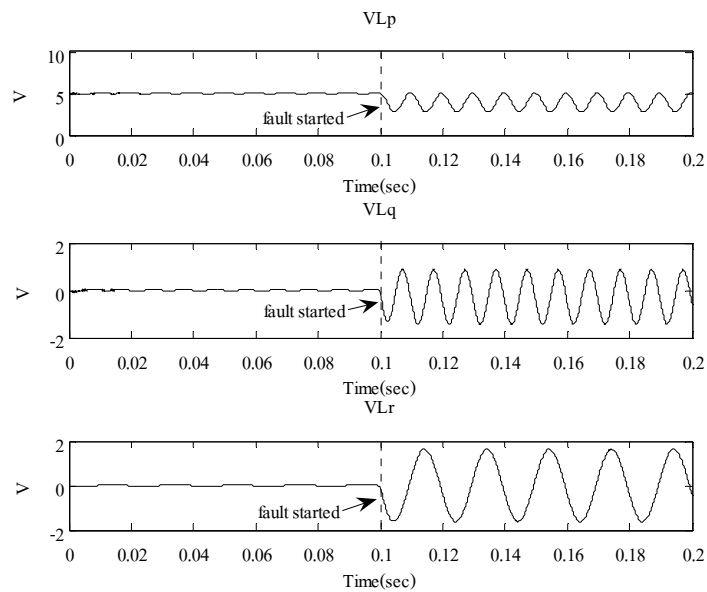
รูปที่ 5.27 แรงดันเฟสที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



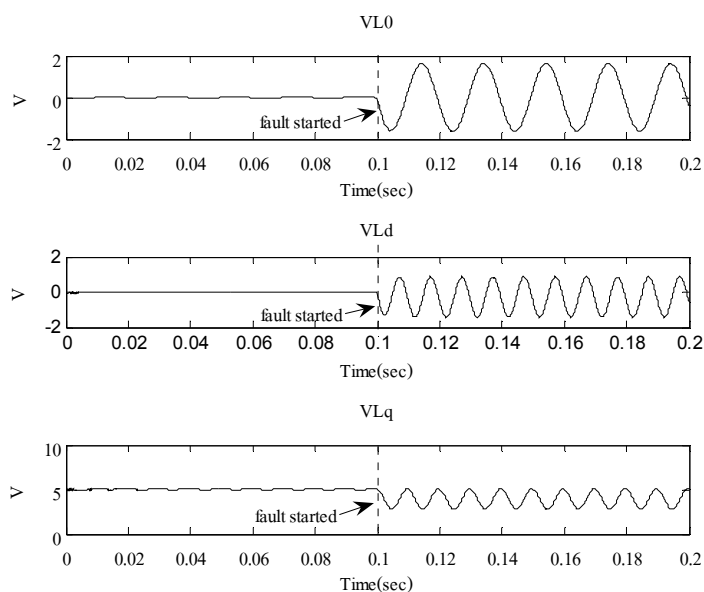
รูปที่ 5.28 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 5.29 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 5.30 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีไม่มีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 5.31 แรงดันโวลต์ที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีไม่มีตัวชดเชย
 ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

กรณีไม่มีตัวชดเชย จากรูปที่ 5.29 5.30 และ 5.31 แสดงแรงดันโวลต์ที่ได้จากการใช้วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล วิธีการแปลงฟิวดาร์และวิธีการแปลงปาร์ก ตามลำดับ จะเห็นว่าในขณะที่เกิดการลัดวงจรที่เวลา 0.1 วินาที ในรูปที่ 5.29 แรงดันที่เฟส a มีค่าลดลง รูปที่ 5.30 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r มีค่าเปลี่ยนแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้ รูปที่ 5.31 แรงดันที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q มีค่าเปลี่ยนแปลงดังเช่นวิธีการแปลงฟิวดาร์ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของแรงดันที่ตรวจจับได้เช่นกัน

- กรณีมีตัวชดเชย

ในกรณีมีตัวชดเชย ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมจำนวน 30 ครั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX แสดงได้ดังตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีดีที่ดีที่สุดของแต่ละวิธี แสดงได้ดังตารางที่ 5.6 และสามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัสโวลต์ และกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบทดสอบที่ได้จากเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 วิธีในสภาวะผิดปกติได้ดังนี้

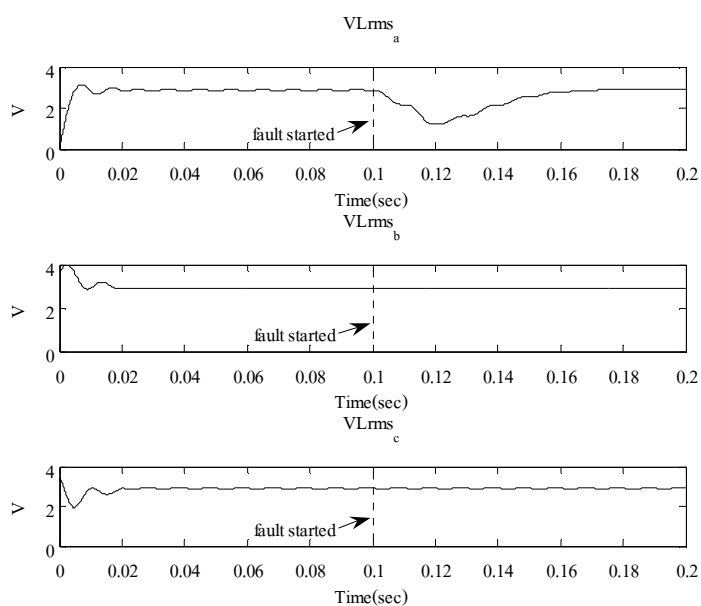
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB's GADS TOOLBOX ขณะเกิด SLGF ที่บัส 54 เฟส a

Total Generation	300
Population Size	100
Stall Generation Limit	20
Mutation rate	0.05
Crossover rate	0.5
Population Range	$k_p^a \in [0,1]$, $k_p^{pqr} \in [0,3]$, $k_p^{0dq} \in [0,3]$

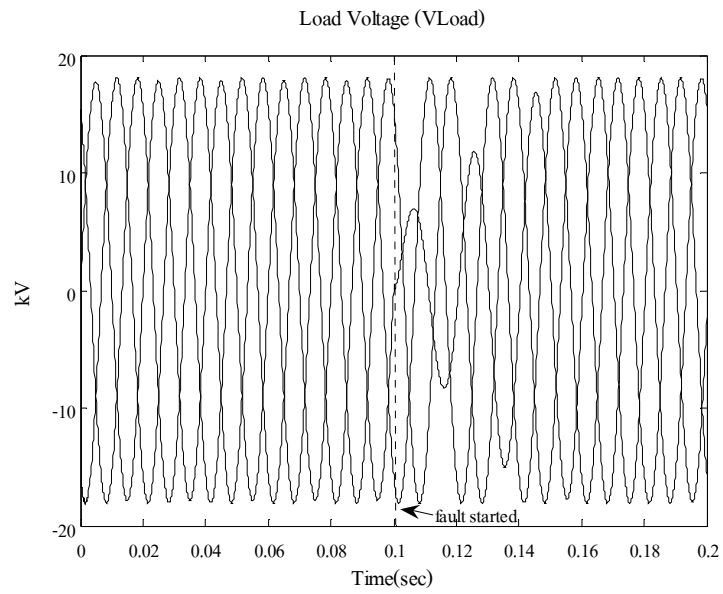
ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีในกรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจร
ชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 54 เฟส a

เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแส	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
- ค่ารอกกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล	$k_p^a = 0.95$
- การแปลงพิกิวอาร์	$k_p^p = 1.9921$, $k_p^q = 2.6746$, $k_p^r = 1.9891$
- การแปลงปาร์ก	$k_p^0 = 2.0810$, $k_p^d = 2.6451$, $k_p^q = 2.0892$

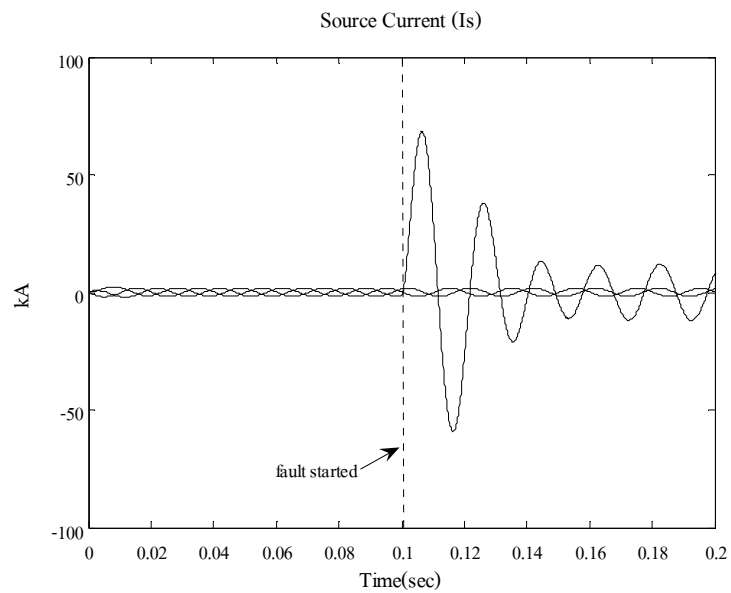
- วิธีค่ารอกกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล



รูปที่ 5.32 แรงดัน rms ที่โหลด กรณีมีตัวชดเชย ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

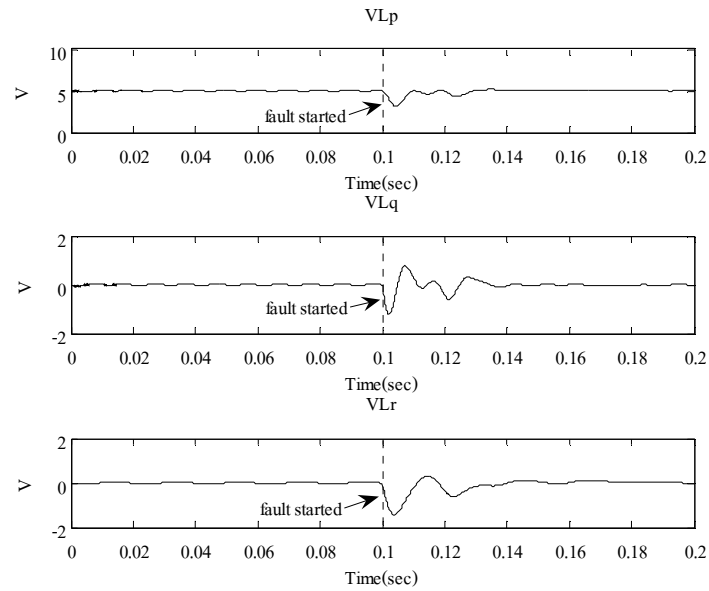


รูปที่ 5.33 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

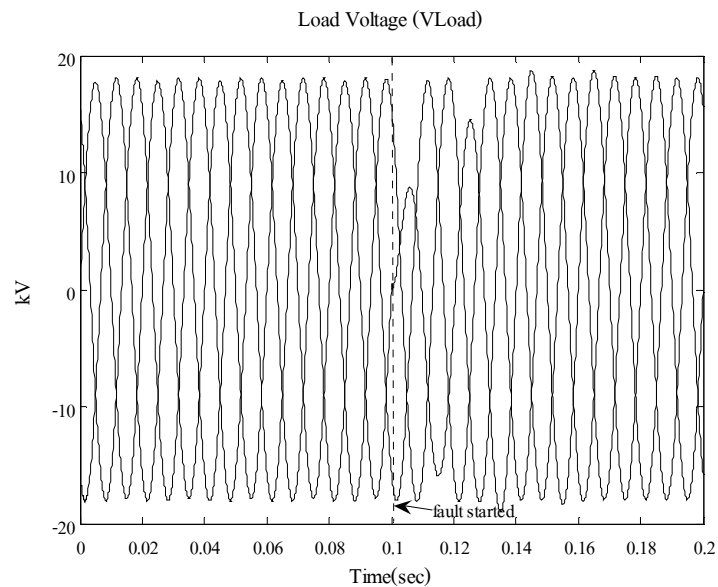


รูปที่ 5.34 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยแบบไถล กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

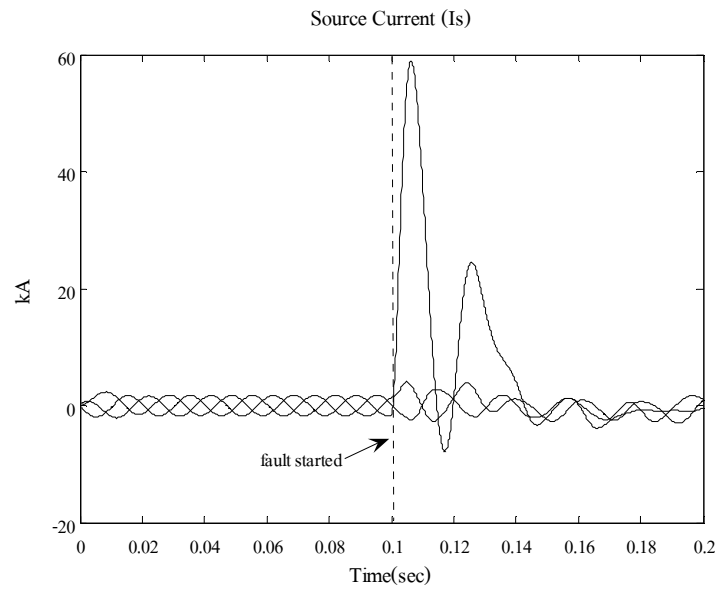
- วิธีการแปลงฟิวอาร์



รูปที่ 5.35 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p q และ r กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

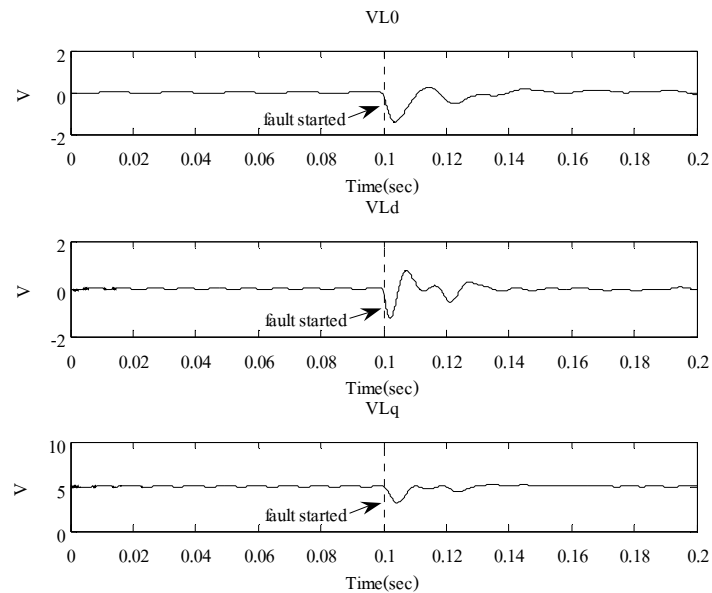


รูปที่ 5.36 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิวอาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

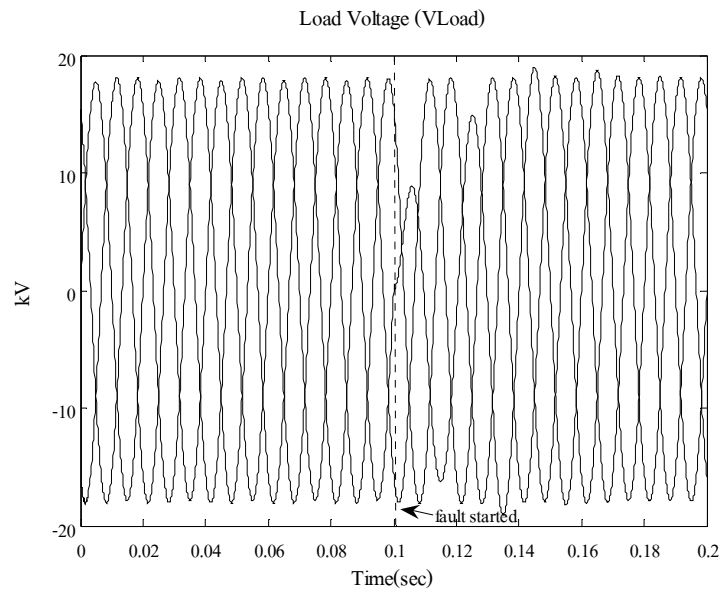


รูปที่ 5.37 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงฟิควาร์ กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

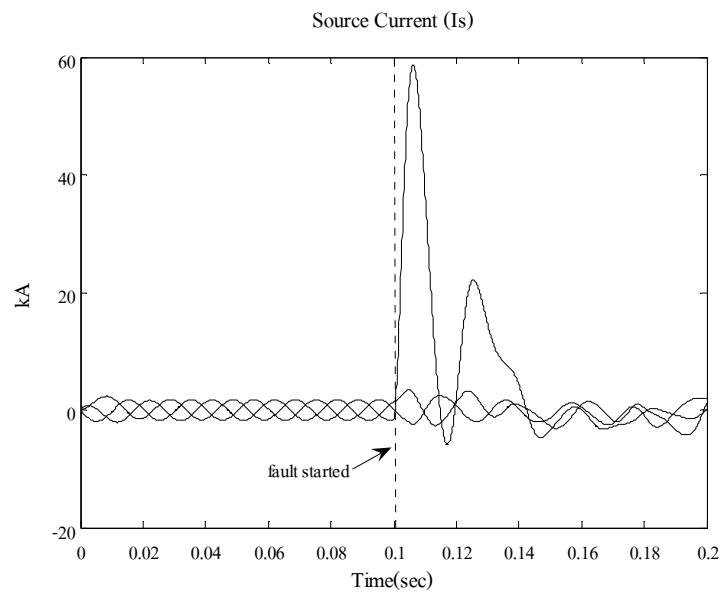
- วิธีการแปลงพาร์ก



รูปที่ 5.38 แรงดัน โหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0 d และ q กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 5.39 แรงดันเฟสที่โหลด เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน



รูปที่ 5.40 กระแสเฟสของแหล่งจ่าย เมื่อใช้วิธีการแปลงพาร์ก กรณีมีตัวชดเชย
ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน

ในสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดัน rms ในแต่ละเฟสที่ตกคร่อมโหลด แรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ p-q-r และแรงดันโหลดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบ 0-d-q มีค่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 4.35 และ 4.38 ตามลำดับ เมื่อเวลาจำลองผลผ่านไป 0.1 วินาที กำหนดให้เกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินที่บัส 4 เฟส a ทำให้แรงดัน rms เฟส a ที่โหลดตก แรงดันโหลดขององค์ประกอบ p-q-r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0-d-q ในกรอบอ้างอิง 0-d-q ลดลง ทำให้ดี-สแตตคอมเริ่มทำงานเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกอันเนื่องมาจากการเกิดการลัดวงจร ซึ่งเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกลใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติประมาณ 64.5 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคการแปลงฟิควาร์ใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติ 37.4 มิลลิวินาที และเทคนิคการแปลงปาร์กใช้เวลาในการชดเชยแรงดันจนเข้าสู่สภาวะปกติ ประมาณ 47 มิลลิวินาที แต่องค์ประกอบ r ในกรอบอ้างอิง p-q-r และองค์ประกอบ 0 ในกรอบอ้างอิง 0-d-q มีการแกว่งของแรงดันมาก ก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.33 4.36 และ 4.39 แสดงแรงดันเฟสที่โหลดเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจร จากรูปกราฟทั้งสามจะเห็นว่าแรงดันที่เฟส a ตกลง และเกิดการกระเพื่อมของแรงดันมาก ในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอม ส่วนรูปที่ 4.34 4.37 และ 4.40 แสดงกระแสเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อใช้เทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกล เทคนิคการแปลงฟิควาร์และเทคนิคการแปลงปาร์ก ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 0.1 วินาที ในขณะที่เกิดการลัดวงจรรูปกราฟทั้งสามเกิดการกระเพื่อมของกระแสในช่วงแรก ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด สังเกตได้ว่าเทคนิคการกำจัดสองเฉลี่ยแบบโกลจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าที่สุด เหมือนกับในกรณีการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร

5.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้ที่กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร โดยทดสอบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคลดทอนระบบไฟฟ้า กำลังเข้ามาช่วยในออกแบบชุดควบคุม การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรได้แสดงแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยใช้การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม พร้อมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสโหลด ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้

มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม ซึ่งจากตรวจสอบเสถียรภาพของระบบทั้ง 3 วิธีจะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมมีความสามารถควบคุมได้ สามารถสังเกตได้และมีสมาชิกทุกตัวจากการหาค่าจะจงเป็นลบทุกตัวแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ ส่วนการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ได้แสดงแบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบไกล วิธีการแปลงพีคิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดพลาดด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินในระบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัส โหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดิน แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี แม้ว่าเทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี จะใช้เวลาช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติต่างกัน

บทที่ 6

กรณีศึกษา - การออกแบบตัวชดเชยดี-สแตตคอม สำหรับงานอุตสาหกรรม

6.1 บทนำ

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

6.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ผลิตโลหะสังกะสีแห่งเดียวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท คือ โลหะสังกะสีแท่งบริสุทธิ์และโลหะสังกะสีผสม ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ปัจจุบันทางโรงงานประสบปัญหาเรื่อง ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ที่ขาดเสถียรภาพ ทำให้โรงงานต้องหยุดกระบวนการผลิต 5-6 ครั้งต่อปี แต่ครั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเริ่มเดินเครื่องประมาณ 1-1.5 ล้านบาท รายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานมีดังนี้

6.2.1 รายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้า

โรงงานนี้ใช้แหล่งพลังงาน 3 แหล่ง คือ

- ระบบสายจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

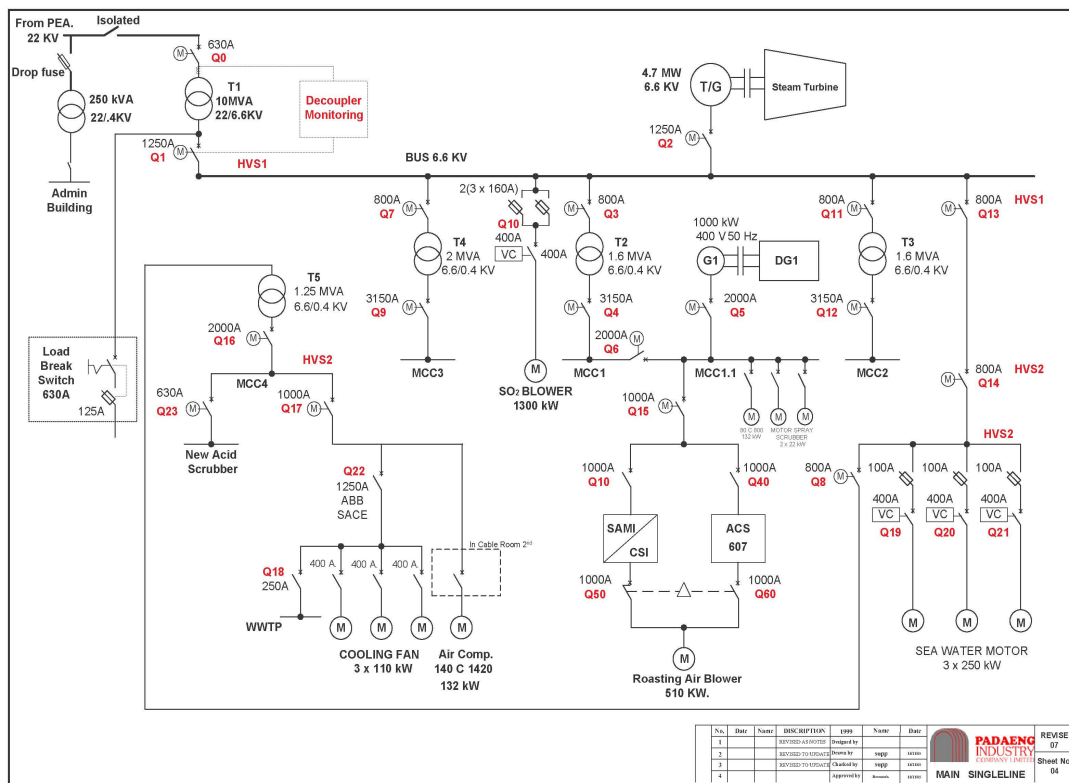
โรงงานนี้รับไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในปริมาณ 200 กิโลวัตต์ หรือไม่เกิน 5% ของความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด อย่างไรก็ตาม จะนำเข้าพลังงานไฟฟ้ามากในช่วงเริ่มเดินเครื่องในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่จ่ายโหลด

- โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam Turbine Power Plant)

ความสามารถของเตาอย่างแรกของโรงงาน สร้างความร้อนได้ประมาณ 900 องศาเซลเซียส ทำให้โรงงานสามารถผลิตไอน้ำเพื่อไปผลิตกำลังงานไฟฟ้า ใช้ในโรงงานได้ประมาณ 3.0 เมกกะวัตต์ ซึ่งการผลิตนี้เกือบจะเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในโรงงาน

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel Generator)

โรงงานนี้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน ในกรณีที่สายจ่ายของกรไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สามารถจ่ายไฟให้โรงงานได้ ทำให้สวิตช์ Q1 ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ตัดกระแสไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคออกจากระบบของโรงงาน 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 ใช้ไฟฟ้าวร่วมสายจ่ายเดียวกัน เมื่อโรงงานอื่น ๆ เริ่มเดินเครื่องจักรขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้กระแสและแรงดันของวงจรสายจ่ายไฟฟ้างกล่าวเกิดการกระเพื่อมขึ้น สวิตช์ Q1 ตรวจพบความผิดปกติ และได้ตัดระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคออกและใช้กระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำที่ผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ 3.0 เมกกะวัตต์ทดแทน ซึ่งไม่

เพียงพอต่อปริมาณการใช้งาน ส่งผลให้ต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเพื่อช่วยจ่ายโหลด แต่กระบวนการดังกล่าวใช้เวลานานเกินไป ส่งผลให้เกิดโหลดเกินและทำให้เกิดไฟฟ้าดับฉุกเฉิน (emergency shutdown) ทั้งระบบขึ้น

6.3 การแก้ปัญหาด้วยตัวชดเชยดี-สแตตคอม

เนื่องจากทางโรงงานประสบปัญหาเรื่องระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาคที่ขาดเสถียรภาพ ทำให้โรงงานต้องหยุดกระบวนการผลิต 5-6 ครั้งต่อปี โดยแต่ละครั้ง ค่าใช้จ่ายในการเริ่มเดินเครื่องประมาณ 1-1.5 ล้านบาท แนวทางแก้ไขปัญหานี้แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์นี้ คือ การติดตั้งดี-สแตตคอมเข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยผลกระทบจากสถานะชั่วคราวที่เกิดจากโรงงานอื่น ๆ เช่น การเริ่มเดินเครื่องจักรขนาดใหญ่หรือการเกิดลัดวงจรในสายจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งดี-สแตตคอมนั้นใช้หลักการเดียวกับการหาขนาดพิกัดกิโลโวลต์เอ (kVA) ขั้นต่ำที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของแรงดันวูบ (voltage dip) เครื่องจักรของโรงงานนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นหลัก ซึ่งการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ด้วยวิธีต่างกัน จะให้กระแสเริ่มเดินเครื่องไม่เท่ากัน การเริ่มเดินเครื่องแบบต่อตรง (direct on line: DOL) ให้กระแสเริ่มเดินเครื่องสูงสุดทำให้เกิดแรงดันวูบมากที่สุด ในขณะที่วิธีเริ่มเดินเครื่องแบบลดแรงดัน (reduced voltage start) หรือแบบวาย-เคลต้า จะช่วยให้กระแสเริ่มเดินเครื่องน้อยลง (ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 2548) โดยการหา kVA ขณะเริ่มเดินเครื่องของการต่อมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ หาได้ดังนี้

- การเริ่มเดินเครื่องแบบ DOL

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

- การเริ่มเดินเครื่องแบบ Y-Δ

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

โดยที่ $kVA_{(s)}$	คือ	ขนาดพิกัดกิโลโวลต์เอเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์
$kVA(I/P)$	คือ	ขนาดพิกัดกิโลโวลต์เออินพุตของมอเตอร์

แรงดันวูบอันเนื่องจากการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์จะต้องควบคุมได้ตามชนิดโหลด เช่น โหลดคอมพิวเตอรืหรืออุปกรณ์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แรงดันวูบไม่เกิน 10% โหลดโรงงาน

อุตสาหกรรม แรงดันวูบไม่เกิน 15-25% เป็นต้น ถ้าต้องการจำกัดแรงดันวูบที่ค่าหนึ่ง ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ของ $kVA_{(s)}$ ของมอเตอร์กับขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า $kVA_{(c)}$ ได้ดังนี้

แรงดันวูบ 30 %	$kVA_{(s)} = 2.1 kVA_{(c)}$
แรงดันวูบ 26 %	$kVA_{(s)} = 1.8 kVA_{(c)}$
แรงดันวูบ 20 %	$kVA_{(s)} = 1.25 kVA_{(c)}$
แรงดันวูบ 16 %	$kVA_{(s)} = kVA_{(c)}$
แรงดันวูบ 10 %	$kVA_{(s)} = 0.55 kVA_{(c)}$

6.3.1 การหาขนาด kVA ขั้นต่ำของดี-สแตตคอม

การขนาดพิกัด kVA ของดี-สแตตคอมสำหรับงานหนึ่ง ๆ นั้น ต้องทำการวิเคราะห์โหลด โดยแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ โหลดในสภาวะคงตัว (steady-state loading) และโหลดในสภาวะชั่วคราว (transient loading) รายละเอียดแสดงได้ดังนี้

- โหลดในสภาวะคงตัว

โหลดในสภาวะคงตัว คือ โหลดทั้งหมดที่ดี-สแตตคอมจะต้องจ่ายให้ โหลดทั้งหมดนี้ได้มาจากการรวมโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จะใช้กับดี-สแตตคอม โดยคิดขนาดของโหลดเป็นกิโลวัตต์ (kW) หรือกิโลวีเอ (kVA) การหาโหลดจำเป็นต้องรู้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น เพื่อใช้ข้อมูลคำนวณหา กำลังงานเอาต์พุต ซึ่งคือ โหลดที่ดี-สแตตคอมต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชย และถ้าต้องการคำนวณ kVA ต้องใช้ข้อมูลตัวประกอบกำลัง (power factor) ด้วยตามสมการต่อไปนี้

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

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

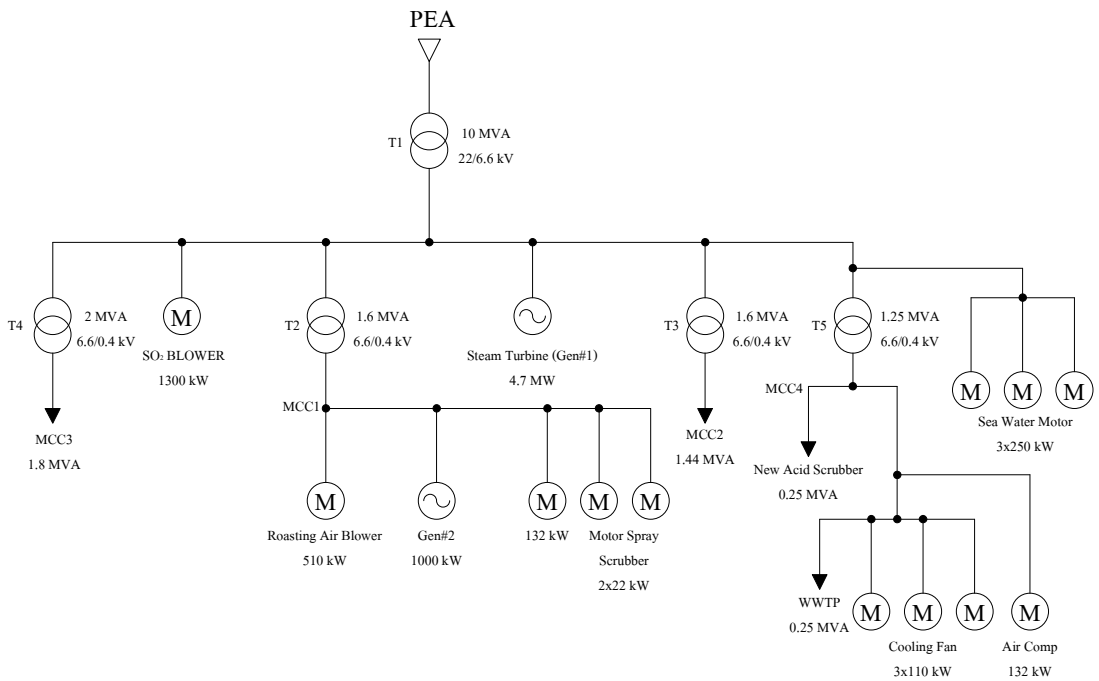
โดยที่ $kW_{(c)}$	คือ	โหลดของดี-สแตตคอม
$kW(O/P)$	คือ	กำลังพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้า
η	คือ	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า
P.F.	คือ	ตัวประกอบกำลัง

- โหลดในสภาวะชั่วคราว

โหลดสภาวะชั่วคราวเกิดจากการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดันวูบ โหลดในสภาวะชั่วคราวประเมินได้จาก $kVA_{(s)}$ ของมอเตอร์ร่วมกับ kVA ของโหลดอื่น ๆ ที่ต่อรวมอยู่

แผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงานมีวงจรถูกที่ย่างยากซับซ้อน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงแผนภาพหลักเส้นเดียวของโรงงาน รายละเอียดของโหลดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 6.1

เนื่องจากการหาขนาดของดี-สแตคคอมจำเป็นต้องรู้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า นั้น ๆ และตัวประกอบกำลังด้วย Tagare (2004) ได้กล่าวถึงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยขนาดมอเตอร์ที่ใหญ่ที่สุด คือ 30 แรงม้าหรือประมาณ 22 กิโลวัตต์ มีค่าประสิทธิภาพมาตรฐานเท่ากับ 90.4% และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามขนาดของมอเตอร์ ซึ่งขนาดมอเตอร์ในโรงงานนี้มีขนาดใหญ่สุดถึง 1300 กิโลวัตต์ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพมาตรฐานของมอเตอร์ตั้งแต่ขนาด 22 กิโลวัตต์ ขึ้นไปมีค่าเท่ากับ 95% และ Tagare (2004) ยังได้กล่าวอีกว่า มอเตอร์ที่ใช้งานในส่วน ของโรงงานอุตสาหกรรมจะมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 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. โหลดรวมอื่น ๆ	3740 กิโลวัตต์	-	0.85	-

โหลดโรงงานอุตสาหกรรม แรงดันขุมต้องไม่เกิน 15-25% (ประสิทธิภาพ พิทยพัฒน์, 2548) ดังนั้นในการหาขนาดดี-สแตคคอมกำหนดให้แรงดันขุมไม่เกิน 20% จะได้

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

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

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

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

2. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y- Δ) ขนาด 110 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 95%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{110}{0.95} = 115.79$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{110}{0.95 \times 0.85} = 136.22$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 272.45$$

3. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ) ขนาด 132 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 95%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{132}{0.95} = 138.95$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{132}{0.95 \times 0.85} = 163.47$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 326.93$$

4. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ) ขนาด 250 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 95%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{250}{0.95} = 263.16$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{250}{0.95 \times 0.85} = 309.60$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 619.20$$

5. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ) ขนาด 510 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 95%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{510}{0.95} = 536.84$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{510}{0.95 \times 0.85} = 631.58$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 1263.16$$

6. มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Y-Δ) ขนาด 1300 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85 η = 95%

$$\text{kW(I/P)} = \frac{1300}{0.95} = 1368.42$$

$$\text{kVA(I/P)} = \frac{1300}{0.95 \times 0.85} = 1609.91$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 2 \text{ kVA(I/P)} = 3219.81$$

7. โหลดรวมอื่น ๆ ขนาด 3740 กิโลวัตต์ P.F. = 0.85

$$\text{kW(I/P)} = 3740 \times 0.85 = 3179$$

$$\text{kVA(I/P)} = 3740$$

$$\text{kVA}_{(s)} = 3740$$

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-สแตตคอม กรณีไม่พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับแรงดันวูบไม่เกิน 20% ยอมให้

$$kVA_{(s)} = 1.25 kVA_{(C)}$$

ถ้าเริ่มเดินเครื่องพร้อมกันหมด จะได้

$$kVA_{(C)} = \frac{11666.30}{1.25} = 9333.04$$

$$kW_{(C)} = 9333.04 \times 0.85 = 7933.08$$

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

- การหาพิกัดดี-สแตตคอม กรณีพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

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

ช่วงพิกัดดี-สแตตคอมที่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าของโรงงานนี้ได้ อยู่ในช่วง 2233-7933.08 กิโลวัตต์ หรือ 2627.16-9333.04 กิโลวัตต์ ในขณะที่เดียวกันถ้าระบบไฟฟ้าของโรงงานนี้ไม่มีโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ดี-สแตตคอมก็สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้ แต่ถ้าพิจารณาทั้ง 3 อย่าง คือ เมื่อเกิดแรงดันวูบ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และดี-สแตตคอมจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีความเป็นไปได้น้อย เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องนานเมื่อไม่ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ระบบอาจจะล่มก่อนที่เริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลได้สำเร็จ

6.4 สรุป

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

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ภายใต้สภาวะการเกิดความผิดปกติ-สแตตคอมเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าติดตั้งขนานกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันในระบบให้คงที่หรือเกือบคงที่ในทุก ๆ สภาวะการทำงาน การออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรใช้หลักการสถานะป้อนกลับ ส่วนการออกแบบตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอม สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตรใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส การตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต้องรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโหลด วิธีที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีมากมาย แต่ละวิธีมีความเร็วในการตรวจจับที่แตกต่างกัน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจจับ 3 วิธี คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยแบบโกล การแปลงปาร์กและการแปลงฟิควาร์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดใช้จินเนติกอัลกอริทึม การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบทดสอบ 4 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส 10 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส จากผลการดำเนินงานพบว่า ดี-สแตตคอม สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรและไม่สมมาตร ภายใต้การทำงานในสภาวะผิดปกติได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้งานวิจัยได้ประยุกต์หลักการออกแบบเพื่อหาพิกัดติดตั้งของดี-สแตตคอมกับตัวอย่างงานอุตสาหกรรมผลการทดสอบได้นำเสนอการออกแบบการชดเชยกำลังไฟฟ้าของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เพื่อเป็นกรณีศึกษา จากผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตตคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตรได้แสดงแบบจำลองในสภาวะชั่วคราวของดี-สแตตคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบสมมาตร โดยใช้การออกแบบตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสภาวะชั่วคราวสำหรับดี-สแตตคอม พร้อมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสโหลด ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตตคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น

เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ นำมาทดสอบกับระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัสและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานตามปกติได้เป็นอย่างดี และยังกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม ซึ่งจากตรวจสอบเสถียรภาพของระบบทั้ง 3 วิธี จะเห็นว่า ระบบเมื่อติดตั้งตัวชดเชยสถานะป้อนกลับในสถานะชั่วคราวสำหรับดี-สแตคคอม มีความสามารถควบคุมได้ สามารถสังเกตได้ และมีสมาชิกทุกตัวจากการหาค่าเจาะจงเป็นลบทุกตัวแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ และลำดับต่อมา กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอม โดยใช้ SCICOS นำมาทดสอบกับระบบทดสอบอย่างง่าย 2 บัส ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอมโดยใช้ SCICOS นั้นสามารถทำได้ง่าย โดยใช้การออกแบบจุดทำงานของดี-สแตคคอม ด้วยวิธีกราฟฟิก อีกทั้งยังสามารถควบคุมค่าขนาดของแรงดันโหลด $|V_L|$ และขนาดของกระแสจากแหล่งจ่าย $|I_s|$ ได้ตามที่เรากำลังต้องการอีกด้วย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองการชดเชยกำลังไฟฟ้าในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัวด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมาตร ที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี

2) การชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ได้แสดงแบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร โดยใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้ง 3 วิธี คือ วิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบโกล วิธีการแปลงพิกิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดินในระบบทดสอบ ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสโหลด และติดตั้งดี-สแตคคอมเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ระบบทดสอบ 4 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) ถูกนำมาใช้ในการทดสอบ จากการดำเนินงานพบว่า วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตร คือ วิธีการแปลงพิกิวอาร์และวิธีการแปลงปาร์ก สำหรับวิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบโกลให้ผลตอบสนองที่ช้า เมื่อเทียบกับ 2 วิธีดังกล่าว และเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดเฟสเดียวลงดิน วิธีที่สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบให้เป็นปกติเร็วที่สุด คือ วิธีการแปลงพิกิวอาร์วิธีการแปลงปาร์ก และวิธีคำนวณกำลังสองเฉลี่ยแบบโกลตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรหรือเฟสเดียวลงดิน แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของดี-สแตคคอมสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมาตร ที่ได้พัฒนาขึ้นมา สามารถช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบได้เป็นอย่างดี แม้ว่าเทคนิค

การตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 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) การจำลองผลระบบไฟฟ้าในสภาวะชั่วคราว ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข สำหรับการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขจะใช้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแบบโหนด ซึ่งการสร้างอัลกอริทึมสำหรับคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลขต้องใช้หลักการแบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นส่วน ๆ ที่มีขนาดเล็กและนำมาต่อเชื่อมกัน ซึ่งถ้าระบบทดสอบมีขนาดใหญ่จะทำให้ใช้เวลาในการจำลองผลช้า ดังนั้นควรใช้เทคนิคเมทริกซ์มากเลขศูนย์ (sparse matrix) มาช่วยในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลข เพื่อจะได้ทำให้การจำลองผลนั้นเร็วยิ่งขึ้น

2) การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ ค่าเริ่มต้นที่กำหนดได้จากการสุ่มค่าระหว่างขอบเขตที่กำหนด ถ้าค่าเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม จะทำให้การจำลองผลหรือหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลานาน หรือค่าพารามิเตอร์ที่ได้อาจจะไม่สามารถทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้น ควรกำหนดขอบเขตของคำตอบให้มีขนาดเล็กมากพอและครอบคลุมคำตอบ เพื่อให้การหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นใช้เวลาไม่มากนัก

3) การใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ยังเกิดค่าผิดพลาดสภาวะคงตัวอยู่ จึงควรใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือตัวควบคุมแบบพีไอดี จะทำให้การตอบสนองชั่วคราวของระบบดีขึ้น ค่าผิดพลาดสภาวะคงตัว ค่าพุ่งเกิน และการแกว่งลดลง

4) เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเพียงแค่ให้ดี-สแตคคอมสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาถึงเรื่องขนาดพิกัดของดี-สแตคคอมที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ ดังนั้นควรจะพิจารณาเพิ่มเติมในเรื่องของขนาดพิกัดของดี-สแตคคอมที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

รายการอ้างอิง

- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์. (2550). เทคนิคการแปลงฟิวเจอร์สำหรับการรักษาระดับแรงดันโหลดโดยใช้ D-STATCOM. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 25-26 ตุลาคม: 77-78.
- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และ ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์. (2550). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบเทคนิคการรักษาระดับแรงดันของโหลดโดยใช้ ดี-สแตตคอม เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 1-2 พฤษภาคม.
- ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 130-139.
- ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์ (2550). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 130-139.
- ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์ (2550). เทคนิคการจำลองผลสำหรับวิศวกรไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 130-139.
- นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย (2548). การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุล. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 5-24.
- ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. (2548). การออกแบบระบบไฟฟ้า. 5000. 2. กรุงเทพฯ: ทีซีจี พรินติ้ง.
- วารุณี ศรีสงคราม วันชัย ทรัพย์สิงห์ และ ไพศาล บุญเยี่ยม. (2549). การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ที่ไม่สมมาตรเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON29) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 9-10 พฤษภาคม: 77-78.
- สรารุณี สุจิตจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
- 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.

- Blazic, B., and Pasic, I. (2006). Improved D-STATCOM Control for Operation with Unbalanced Currents and Voltages. **IEEE Trans. Power Delivery**. 21: 225-233.
- Boonchiam, P., and Mithulananthan, N. (2006). Analysis and Control of DSTATCOM for Voltage Regulation. **Proc. Conf. Electrical Engineering (EECON-29)**. 189-192.
- Bucci, G., Fiorucci, E., and Landi, C. (2003). Digital Measurement Equipment for Steady-State PQ Measurements. **IEEE Conf. Bologna Power Tech**. 4.
- Chang, W.N., and Yeh, K.Dih. (2001). Design of D-STATCOM for Fast Load Compensation of Unbalanced Distribution System. **IEEE Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems**. 2: 801-806.
- Chen, C.T. (1999). **Linear System Theory and Design**. 3.USA: Oxford University Press.
- 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.
- Domijan, A., Montenegro, A., Keri, A.J.F., and Mattern, K.E. (2005). Custom Power Devices: An interaction study. **IEEE Trans. Power System**. (2)20: 1111-1118.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2002). **Electrical Power System Quality**. USA: McGraw-Hill.
- Escobar, G., Stankovic, A.M., and Mattavelli, P. (2004). An Adaptive Controller in Stationary Reference Frame for D-STATCOM in Unbalanced Operation. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. (2)51: 401-409.
- Goldberg, D.E., and Edward, D. (1989). **Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning**. Wiley.
- Grainger, J.J., and Stevenson, W.D. (1994). **Power System Analysis**. Singapore: McGraw-Hill.
- Haque, M.H. (2001). Compensation of Distribution System Voltage Sag by DVR and D-STATCOM. **IEEE Proc. Power Tech**.
- Hingorani, N.G. (1995). Introducing Custom Power. **IEEE Spectrum**. 32: 41-48.
- IEEE std 1159-1995. (1995). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. **IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality**.

- Izzri, N., Wahab, A., Mariun, N., Mohamed, A., and Mohamad, M. (2003) Response of D-STATCOM Under Unbalanced Voltage Condition Caused By SLG Fault. **IEEE Student Conf. Research and Development**. 395-400.
- 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.
- 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.
- Krishnan, R. (2001). **Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control**. USA: Prentice Hall.
- MacGregor, S.D. (1998). An Overview of Power Quality Issues and Solutions. **IEEE Cement Industry Conference**.
- Mariun, N., Hizam, H., Izzri, A.W.N., and Aizam, S. (2005). Design of the Pole Placement Controller for D-STATCOM in Mitigating Three Phase Fault. **IEEE Power Engineering Society Inaugural Conf. and Exposition in Africa**. 349-355.
- Miller, T.J.E. (1982). **Reactive Power Control in Electric System**. USA: John Wiley & Sons.
- Osborne, M.M., Kitchin, R.H., and Ryan, H.M. (1995). Custom Power Technology in Distribution System. **IEE North East Centre Symposium on Reliability and Security of Distribution System**. 10/1-10/11.
- 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.
- 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.
- Saadat, H. (2004). **Power system analysis**. 2. Singapore: McGraw-Hill.
- Sabin, D.D., and Sannino, A. (2003). A Summary of the Draft IEEE P1409 Custom Power Application Guide. **IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition**. 3: 931-936.
- Song, Y.H., and Johns, A.T. (1999). **Flexible AC Transmission System (FACTS)**. Institute of Electrical Engineering.

- Stones, J., and Collinson, A. (2001). Power Quality. **Jour. Power Engineering**. 15: 58-64.
- Sumpavakup, C., and Kulworawanichpong, T. (2008). Graphical Compensation Design of D-STATCOM Using a SCICOS Simulator. **Proc. IASTED Int. Conf. Modelling, Identification and Control (MIC 2008)**. : 7-12.
- 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)**.
- Tagare, D.M. (2004). **Reactive Power Management**. New Delhi:Tata McGraw-Hill.
- 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.
- Yu, Y., Jianye, C., and Yingduo, H. (2000). STATCOM Modeling and Analysis in Damping Power System Oscillations. **Energy Conversion Engineering Conf. and Exhibit**. 2: 756-762.
- Zeng, Q., and Chang, L. (2004). A New Method for Three-Phase Voltage Detection and Protection based on Reference Frame Transformation. **IEEE Conf. Power Electronics Specialists**. 4: 2489-2493.

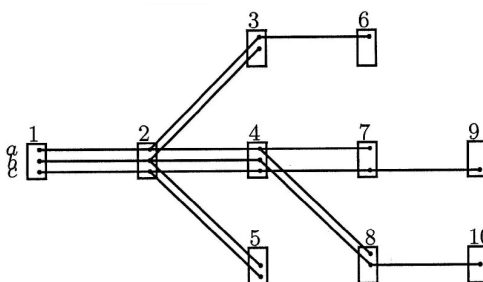
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 4 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 2 บัส 4 บัส 10 บัส และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วจร 10) 131 บัส รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

ก.1 ระบบทดสอบ 10 บัส



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 10 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 10 บัส

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
1	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	Slack bus
2	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
3	1.0	1.0	-	0	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
4	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
5	-	1.0	1.0	-	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
6	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
7	1.0	-	1.0	0	-	120	0.0	0.0	PQ bus
8	1.0	1.0	-	0	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
9	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
10	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 10 บัส

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
1	0	0	0	0	0	0
2	50	25	50	25	50	12.5
3	50	25	37.5	12.5	0	0
4	50	25	25	25	25	25
5	0	0	37.5	12.5	50	12.5
6	100	75	0	0	0	0
7	100	75	0	0	25	12.5
8	100	75	25	12.5	0	0
9	0	0	0	0	25	12.5
10	0	0	25	12.5	0	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 10 บัส

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω)					
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc
1	1	2	1+2j	0.5j	0.5j	1+2j	0.5j	1+2j
2	2	3	1+1j	0.25j	0.25j	1+1j	0.25j	1+1j
3	2	4	1+2j	0.5j	0.5j	1+2j	0.5j	1+2j
4	2	5	1+1j	0.25j	0.25j	1+1j	0.25j	1+1j
5	3	6	4+2.5j	0	0	4+2.5j	0	4+2.5j
6	4	7	1+1j	0.25j	0.25j	1+1j	0.25j	1+1j
7	4	8	1+1j	0.25j	0.25j	1+1j	0.25j	1+1j
8	7	9	5+5j	0	0	5+5j	0	5+5j
9	8	10	6+4.5j	0	0	6+4.5j	0	6+4.5j

ก.2 ระบบทดสอบ 2 บัส

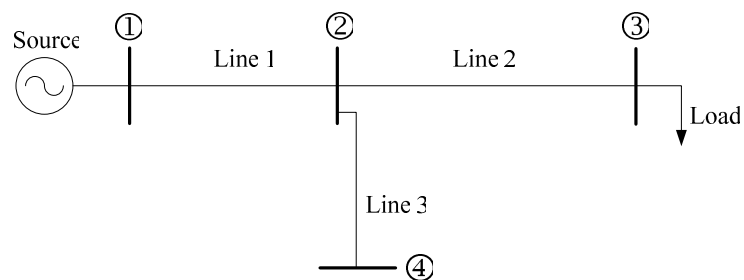


รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 2 บัส

ตารางที่ ก.4 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

ก.3 ระบบทดสอบ 4 บัส

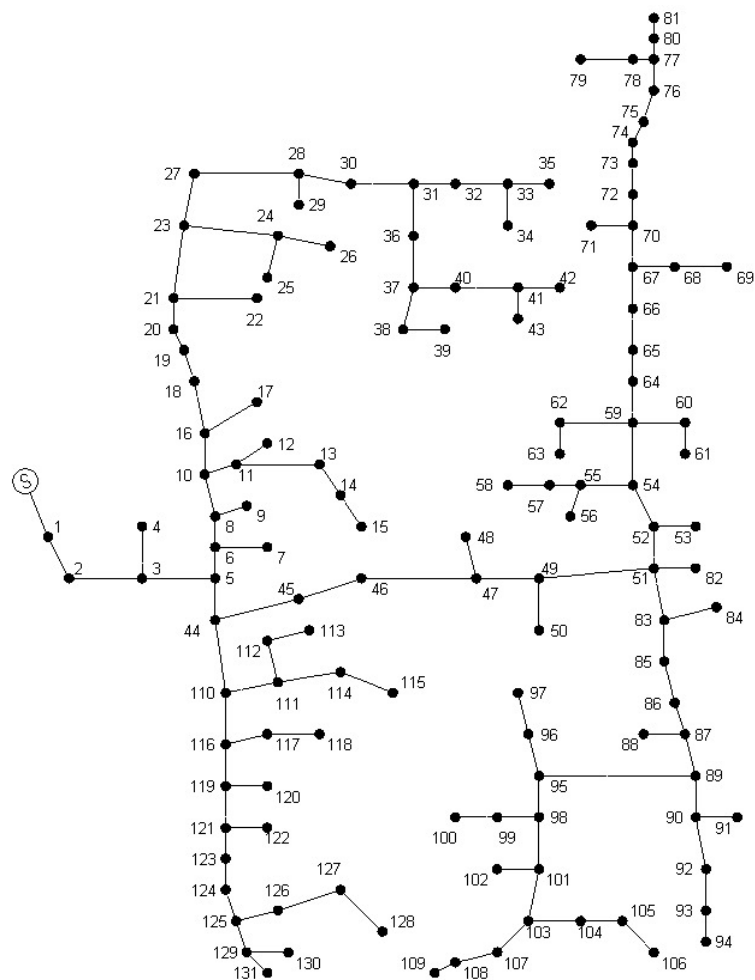


รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ 4 บัส

ตารางที่ ก.5 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

ก.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ นครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส



รูปที่ ก.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ของสถานีนครราชสีมา 2 (วงจร 10) 131 บัส

ตารางที่ ก.6 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.7 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.7 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.7 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.8 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.8 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.8 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.8 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.8 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.8 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

ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ชื่อฟังก์ชัน	หน้าที่
$ctrb(A,b)$	คำนวณ controllability matrix สำหรับระบบปริภูมิสถานะ ฟังก์ชันรับอินพุต 2 ค่า คือ เมทริกซ์ A และ b ของระบบปริภูมิสถานะ
$eig(A)$	คำนวณ eigenvalues ของเมทริกซ์ A สำหรับระบบปริภูมิสถานะ ฟังก์ชันรับอินพุต 1 ค่า คือ เมทริกซ์ A ของระบบปริภูมิสถานะ
$obsv(A,c)$	คำนวณ observability matrix สำหรับระบบปริภูมิสถานะ ฟังก์ชันรับอินพุต 2 ค่า คือ เมทริกซ์ A และ c ของระบบปริภูมิสถานะ
$place(A,b,p)$	คำนวณอัตราขยายป้อนกลับสำหรับระบบหลายอินพุตจนกระทั่ง ตำแหน่งโพลวงปิดที่ต้องการของระบบปริภูมิสถานะหลายอินพุตตรงตามเวกเตอร์ p ฟังก์ชันรับอินพุต 3 ค่า คือ เมทริกซ์ A และ b ของระบบปริภูมิสถานะ และเวกเตอร์ p ซึ่งเวกเตอร์ p คือ ตำแหน่งโพลวงปิดที่ต้องการ
$rank(A)$	หาค่าประมาณของจำนวนแถวหรือหลักที่เป็นอิสระเชิงเส้นของเมทริกซ์ A หรือเรียกว่าการหาค่าอันดับของเมทริกซ์ A ฟังก์ชันรับอินพุต 1 ค่า คือ เมทริกซ์ A

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “เทคนิคการแปลงฟิวอาร์สำหรับการรักษาระดับแรงดันโหลดโดยใช้ D-STATCOM”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี 25-26 ตุลาคม 2550 หน้า 77-80.
2. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบเทคนิคการรักษาระดับแรงดันของโหลดโดยใช้ดี-สแตตคอม เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน” การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 1-2 พฤศจิกายน 2550.
3. “Graphical Compensation Design of D-STATCOM Using a SCICOS Simulator”. In Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2008). pp.7-12, 11-13 February 2008.
4. “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), pp.1021-1024, 14-17 May 2008.
5. “Distribution Voltage Regulation Under Three-Phase Fault By Using D-STATCOM”. the International Conference on Electric Power and Energy Systems (EPES 2008), 4-6 July 2008.

ประวัติผู้เขียน

นายชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนรัตนวิเชียร จังหวัดนนทบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 2 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 และ (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 โดยมีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะศึกษา:

1. เทคนิคการแปลงพิกิวอาร์สำหรับการรักษาระดับแรงดันโหลดโดยใช้ D-STATCOM
2. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบเทคนิคการรักษาระดับแรงดันของโหลดโดยใช้ดี-สแตตคอม เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดสามเฟสสมมาตรและชนิดเฟสเดียวลงดิน
3. Graphical Compensation Design of D-STATCOM Using a SCICOS Simulator
4. Distribution Voltage Regulation Under Single-Line-To-Ground Fault By Using D-STATCOM
5. Distribution Voltage Regulation Under Three-Phase Fault By Using D-STATCOM