

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

นายทศพล รัตน์นิยมชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

**ELECTRIC POWER DISTRIBUTION PLANNING BY
USING DYNAMIC VOLTAGE RESTORERS**

Tosaphol Ratniyomchai

**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 2006

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟิวส์แรงดันพลวัต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกมล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชนัดชัช กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานิช)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทศพล รัตนนิมิตต์ : การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
(ELECTRIC POWER DISTRIBUTION PLANNING BY USING DYNAMIC
VOLTAGE RESTORERS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์, 260 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดสถานะแรงดันตกที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม การติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะติดตั้งอนุกรมกับสายป้อนเพื่อปรับปรุงขนาดแรงดันโวลต์ปลายทางให้มีขนาดสูงขึ้น หน้าที่หลักของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตคือช่วยป้องกันกลุ่มโวลต์ที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือบัสที่อ่อนแอที่สุดในทางระบบไฟฟ้ากำลังบัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัสที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โวลต์อย่างต่อเนื่องมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สถานะการทำงานในสถานะคงตัวสามารถทำได้โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ วิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ไม่สมดุล โดยพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใหม่ ได้แก่ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวิธีการเกาส์-ไซเดลและนิวตัน-ราฟสัน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสถานะคงตัว แบบจำลองการฉีดกระแส การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้น โคงกำลัง-แรงดันและกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดจากการประเมินด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เมื่อหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตได้แล้ว ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมดำเนินการโดยการแก้ปัญหาที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขบังคับ โดยใช้การโปรแกรมลำดับควอคราติก จากผลการทดสอบ จะพบว่าการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพ ความเชื่อถือได้ และเสถียรภาพแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้ทันสมัย สำหรับระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบต้องอาศัยการประสานสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ซึ่งได้อธิบายไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

TOSAPHOL RATNIYOMCHAI : ELECTRIC POWER DISTRIBUTION
PLANNING BY USING DYNAMIC VOLTAGE RESTORERS. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG,
Ph.D. 260 PP.

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER/WEAKEST BUS/POWER FLOW

This thesis presents study and development of electric power distribution planning by using Dynamic Voltage Restorer (DVR) for reactive power compensation. DVR is a series compensator used in power distribution systems in order to regulate load voltage at a critical location, which is examined by weakest bus identification. The determination of the weakest bus is based on the maximum reactive load allowance of load buses. The most vulnerable bus in the system corresponds to the bus having the smallest maximum permissible reactive load. In this thesis, a steady-state current injection model of DVR is proposed and used for power flow calculation. The Gauss-Seidel and Newton-Raphson methods are employed to solve a set of nonlinear power flow equations. The proposed schemes of DVR operations are derived from PV curve and loss minimization. The weakest bus evaluation by using voltage stability indices is determined to be an appropriate location of the DVR installation used in the thesis. When the location of the DVR is successfully assigned, its optimal size can be obtained by solving a relevant constrained optimization problem using Sequential Quadratic Programming (SQP).

As a result, installing a DVR in power distribution systems solution enhances efficiency, reliability and voltage stability of electric power distribution systems. In addition, to modernize a power distribution system where shunt compensators,

e.g. capacitor banks , have been already installed, coordination between DVR and capacitor banks is illustrated.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

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

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

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

ทศพล รัตนนิยมชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชมนวัตกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ปรัชมนวัตกรรม	6
2.2.1 การชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ	6
2.2.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	9
2.2.3 โครงสร้างและการควบคุมตัวฟุ้งแรงดันพลวัต.....	10
2.2.4 กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด.....	11
2.2.5 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	12
2.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	14
2.3.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	18
2.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ.....	26
2.5 โครงสร้างและการทำงานของตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัต.....	30
2.6 สรุป.....	32
3 แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัต	33
3.1 บทนำ	33
3.2 แบบจำลองในสภาวะคงตัวของตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัต	33
3.3 แบบจำลองการฉีดกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์	35
3.4 ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัต.....	38
3.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	38
3.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	42
3.5 ผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้า	50
3.6 สรุป.....	98
4 การทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด	99
4.1 บทนำ	99
4.2 การควบคุมตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้น โค้งกำลัง-แรงดัน	99
4.3 การควบคุมตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด.....	101
4.4 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	103
4.5 ผลทดสอบ.....	105
4.6 สรุป.....	109
5 การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟ้้นฟูแรงดันพลวัต.....	110
5.1 บทนำ	110
5.2 การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	110
5.2.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI.....	111
5.2.2 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง L_{mn}	114
5.2.3 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง LQP.....	116

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัตที่เหมาะสม.....	116
5.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัต.....	116
5.3.2 การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของตัวฟิวแรงดันพลวัต.....	117
5.3.3 การโปรแกรมลำดับควอดราติก.....	119
5.4 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิวแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	123
5.4.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	124
5.4.2 แบบจำลองซัสเซปแดนซ์.....	124
5.5 ผลทดสอบ.....	125
5.6 สรุป.....	188
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	189
6.1 สรุป.....	189
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	191
รายการอ้างอิง.....	192
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ระบบทดสอบ.....	196
ภาคผนวก ข. ผลทดสอบ.....	246
ภาคผนวก ค. โปรแกรมสำหรับจำลองผล.....	252
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	258
ประวัติผู้เขียน.....	260

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 52
3.2	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส..... 56
3.3	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อ ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 56
3.4	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 59
3.5	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส..... 63
3.6	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 63
3.7	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 66
3.8	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส..... 67
3.9	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 67
3.10	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 70
3.11	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส..... 71
3.12	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.13 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และ เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	74
3.14 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	75
3.15 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	75
3.16 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4	79
3.17 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4	80
3.18 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส.....	80
3.19 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15	83
3.20 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15	84
3.21 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส.....	84
3.22 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20	87
3.23 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20	88
3.24 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.25 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79	91
3.26 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79	92
3.27 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส.....	92
3.28 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60	95
3.29 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60	96
3.30 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส.....	96
4.1 จุดพักหลายแรงดัน ไฟฟ้าเมื่อเลือกค่าขนาดและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ที่เหมาะสม	108
5.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส.....	128
5.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส.....	129
5.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส.....	132
5.4 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส.....	135
5.5 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส.....	139
5.6 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส <i>b</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	143
5.7 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส.....	144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
5.8	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	144
5.9	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	147
5.10	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส.....	148
5.11	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	148
5.12	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	151
5.13	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส.....	152
5.14	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	152
5.15	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	155
5.16	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส.....	156
5.17	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	156
5.18	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	159
5.19	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	160

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.20	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัต 160
5.21	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิวแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ 162
5.22	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิวแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ 163
5.23	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส b และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิวแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ 164
5.24	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิวแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ 165
5.25	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัสเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟิว แรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ..... 166
5.26	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส $4b$ และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัตที่บัส $10b$ 169
5.27	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส $4b$ และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัตที่บัส $10b$ 170
5.28	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟิวแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส..... 170
5.29	แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส $14a$ และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัตที่บัส $12a$ 173
5.30	กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส $14a$ และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัตที่บัส $12a$ 174
5.31	ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟิวแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส..... 174

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.32 แรงดันบั๊ตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บั๊ต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 18 <i>b</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ต 30 <i>b</i>	177
5.33 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บั๊ต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 18 <i>b</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ต 30 <i>b</i>	178
5.34 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บั๊ต	178
5.35 แรงดันบั๊ตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บั๊ต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 79 <i>a</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ต 118 <i>a</i>	181
5.36 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บั๊ต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 79 <i>a</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ต 118 <i>a</i>	182
5.37 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บั๊ต	182
5.38 แรงดันบั๊ตและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บั๊ต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 126 <i>c</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน พลวัตที่บั๊ต 158 <i>c</i>	185
5.39 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บั๊ต ของระบบ ปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ต 126 <i>c</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ต 158 <i>c</i>	186
5.40 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บั๊ต	186
ก.1 ข้อมูลบั๊ตของระบบทดสอบ 10 บั๊ต	197
ก.2 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 10 บั๊ต	198
ก.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 10 บั๊ต	198
ก.4 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 10 บั๊ต	199
ก.5 ข้อมูลบั๊ตของระบบทดสอบ 25 บั๊ต	200
ก.6 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 25 บั๊ต	201
ก.7 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 25 บั๊ต	202

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8	ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 25 บัส 203
ก.9	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 37 บัส..... 205
ก.10	ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 37 บัส 206
ก.11	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 37 บัส 208
ก.12	ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 37 บัส 210
ก.13	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส..... 212
ก.14	ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส 216
ก.15	ข้อมูลการติดตั้งตัวเก็บประจุ..... 221
ก.16	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส 224
ก.17	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส..... 229
ก.18	ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 230
ก.19	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 233
ก.20	ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 239

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3
2.1	แผนภาพทั่วไปของเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าเอกทีฟ 8
2.2	แผนภาพการแบ่งประเภทของเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าเอกทีฟ..... 8
2.3	บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น 14
2.4	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล..... 18
2.5	แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน 26
2.6	ส่วนประกอบแบบกึ่งเดียวของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย..... 27
2.7	เส้นโค้งกำลัง-แรงดัน 28
2.8	แบบแผนพื้นฐาน ไทริสเตอร์ของตัวควบคุม FACT..... 29
2.9	โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 31
2.10	ระบบสายป้อนอย่างง่ายที่ติดตั้ง DVR 32
3.1	ระบบสายป้อนอย่างง่ายที่ติดตั้ง DVR 33
3.2	วงจรสมมูลของรูปที่ 3.1..... 35
3.3	ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอนุกรมกับสายป้อน 36
3.4	วงจรที่เหลือจากการกำจัดบัส i ทิ้งไป..... 36
3.5	วงจรสมมูลอันดับ 36
3.6	แบบจำลองการฉีดกระแสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 37
3.7	แผนผังระบบไฟฟ้าบัส k และ บัส j เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต..... 38
3.8	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ 53
3.9	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4..... 53
3.10	แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 54
3.11	การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a 54
3.12	การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส b 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การเปรียบเทียบแรงดันบัลของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส.....	55
3.14 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และหลังติดตั้ง DVR.....	57
3.15 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	57
3.16 แรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ	60
3.17 แรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4.....	60
3.18 แรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	61
3.19 การเปรียบเทียบแรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a	61
3.20 การเปรียบเทียบแรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส b	62
3.21 การเปรียบเทียบแรงดันบัลของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส c	62
3.22 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และหลังติดตั้ง DVR.....	64
3.23 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	64
3.24 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และหลังติดตั้ง DVR.....	68
3.25 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	68
3.26 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และหลังติดตั้ง DVR.....	72
3.27 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	72
3.28 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และหลังติดตั้ง DVR.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	77
3.30 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 2 และ 4....	81
3.31 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	81
3.32 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 14 และ 15	85
3.33 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	85
3.34 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 19 และ 20	89
3.35 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	89
3.36 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 75 และ 79	93
3.37 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	93
3.38 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 60.....	97
3.39 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	97
4.1 ระบบทดสอบ 2 บัส อย่างง่าย.....	100
4.2 เส้นโค้งกำลัง-แรงดัน	101
4.3 แผนผังขั้นตอนการจำลองผล	102
4.4 PV curve ของระบบก่อนและหลังติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัต.....	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	PV curve โดยให้ขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัตคงที่ที่ 0.2 p.u. และเปลี่ยนค่ามุมเฟสจาก 0 ถึง 180 องศา..... 107
4.6	PV curve โดยให้มุมเฟสของแรงดันคงที่ที่ 30 องศา และเปลี่ยนค่าขนาดแรงดันจาก 0 ถึง 0.4 p.u..... 107
4.7	กำลังงานสูญเสียในสายป้อนในทุกช่วงของแรงดันโหลด..... 108
4.8	กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในช่วงแรงดันโหลด $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันพิกัด..... 108
4.9	แผนภาพของชุดควบคุมตัวฟิวแรงดันพลวัต..... 109
5.1	แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส..... 111
5.2	แผนภาพของระบบส่งจ่ายแบบเส้นเดียว 114
5.3	การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว..... 116
5.4	แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 118
5.5	แผนภาพการทำงานของการทำงานหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟิวแรงดันพลวัต 119
5.6	ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ 124
5.7	ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าซัสเซปแดนซ์คงที่ B_c 125
5.8	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส 126
5.9	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mm} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส..... 127
5.10	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส 127
5.11	แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส..... 128
5.12	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส 130
5.13	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mm} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส..... 130
5.14	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส 131
5.15	แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส..... 131
5.16	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส 133
5.17	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mm} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส..... 133
5.18	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส 134
5.19	แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส..... 134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส 136
5.21	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส 137
5.22	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส 137
5.23	แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส 138
5.24	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบ ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 140
5.25	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบ ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 140
5.26	ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบ ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 141
5.27	แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส 141
5.28	การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 10 บัส 143
5.29	ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR 145
5.30	เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 10 เฟส b ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 145
5.31	การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 25 บัส 147
5.32	ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR 149
5.33	เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 149
5.34	การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 37 บัส 151
5.35	ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR 153
5.36	เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต 153
5.37	การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 118 บัส 155
5.38	ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR 157

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	157
5.40 การคู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	159
5.41 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และหลังติดตั้ง DVR	161
5.42 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	161
5.43 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 10 เฟส b	171
5.44 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	171
5.45 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 12 เฟส a	175
5.46 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	175
5.47 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 30 เฟส b	179
5.48 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	179
5.49 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 118 เฟส a	183
5.50 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟิวแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟิวแรงดันพลวัต	183
5.51 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126 เฟส c และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 158 เฟส c	187

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.52 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	187
ก.1 ระบบทดสอบ 10 บัส	197
ก.2 ระบบทดสอบ 25 บัส	199
ก.3 ระบบทดสอบ 37 บัส	204
ก.4 ระบบทดสอบ 118 บัส	211
ก.5 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	229

บทที่ 1

บทนำ

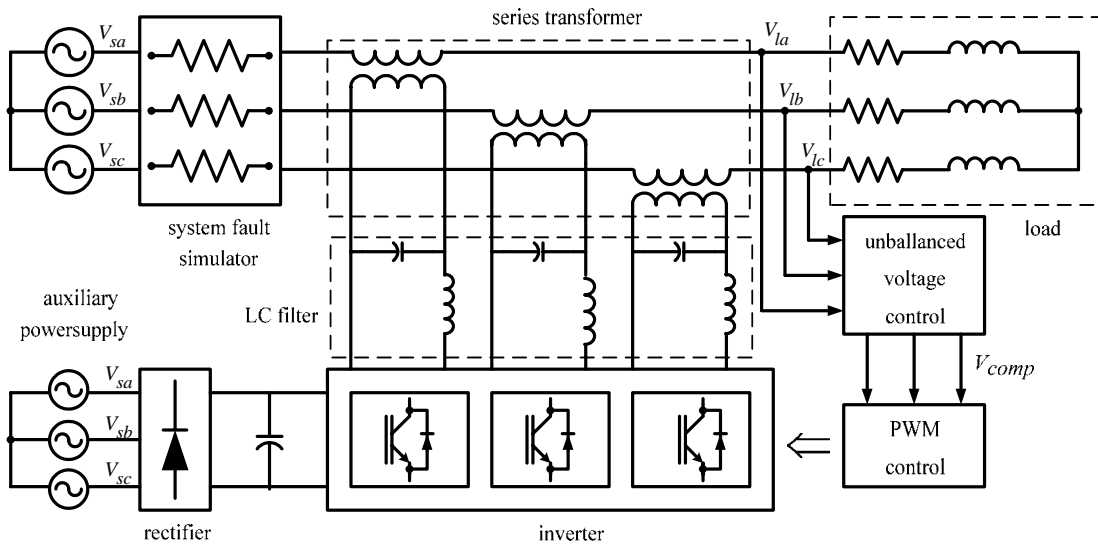
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศไทยเกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ภายใต้การแปรรูปกิจการไฟฟ้า (privatization of electric utilities) ส่งผลให้เกิดตลาดซื้อขายไฟแบบเสรีหรือแบบกึ่งเสรีขึ้น การทำงานของระบบไฟฟ้าจะเป็นแบบเปิดที่มีการแข่งขันโดยเน้นไปที่การลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มผลกำไรจากการขายไฟเมื่อระบบผลิตและการขายไฟให้กลุ่ม โหลดเกิดการแข่งขันกันอย่างอิสระภายใต้เงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ ย่อมทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากจุดทำงานที่ให้ต้นทุนการผลิตต่ำสุดหรือผลกำไรจากการขายไฟสูงสุด อาจจะไม่สอดคล้องกับความมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบ การปรับปรุงเสถียรภาพการทำงานของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยขึ้นอยู่กับการวางแผนการทำงานที่เหมาะสมของระบบสายส่งโดยตรง ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในครัวเรือน ซึ่งมีอยู่ทั่วประเทศส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟ ดังนั้นระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีกระบวนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปสู่โหลดในพื้นที่ต่าง ๆ ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งได้ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (electric power transmission system) รับผิดชอบการเชื่อมต่อหม้อแปลงดันทางจากลานไถไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง ในปัจจุบันนิยมส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระดับแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage: EHV) ที่มีระดับแรงดันสูงกว่า 275 kV ในส่วนนี้จะอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามาตรฐานทั้งสิ้น 5 ระบบ ประกอบด้วย ระบบเอชวี 69 115 230 และ 500 kV และระบบดีซี 500 kV ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (electric power distribution system) รับผิดชอบการเชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟ โดยทั่วไปใช้ระดับแรงดันปานกลาง 11 22 24 และ 33 kV และระดับแรงดันต่ำ 380/220 V ในส่วนนี้จะอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้านครหลวง สำหรับเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พื้นที่อื่น ๆ จะอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟเป็นหลัก ซึ่งอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปัจจุบันปัญหาที่สำคัญของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า คือ ปัญหาแรงดันตก (voltage drop) ที่ปลายทางหรือจุดโหลด อันเนื่องมาจากความยาวของสายป้อน ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ นอกจากนี้เมื่อมีการใช้โหลดเพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลให้แรงดันในระบบลดต่ำลง ถ้าขนาดแรงดันลดลงจนถึงจุดพังทลาย (collapsing point) จะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ เกิดไฟดับตามมาได้หรือในกรณีที่เลวร้ายที่สุด จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความล่มสลายทั้งระบบ ปัจจุบันได้มีการแสวงหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อรักษาระดับแรงดันคร่อมโหลดให้อาจจะเป็นคงที่หรือเกือบคงที่ในทุกสภาวะการจ่ายโหลด โดยการติดตั้งตัวชดเชยเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า อาจจะเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor bank) หม้อแปลงชนิดเปลี่ยนค่าแท็ปได้ (tap-changing transformer) ตัวชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบสถิต (static var compensator) หรือตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer: DVR) เป็นต้น อุปกรณ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เมื่อเกิดแรงดันตกขึ้นในสายป้อน อาจจะทำให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิต จากมูลค่าของความเสียหายที่เพิ่มสูงขึ้นทุกปี ส่งผลให้ในช่วง 5 ปี ที่ผ่านมามีคณะวิจัยจากสถาบันต่าง ๆ ทั่วโลกได้พัฒนาองค์ความรู้และดำเนินงานวิจัยเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยเฉพาะการศึกษารนำ DVR มาใช้งานได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาดังกล่าว อาจกล่าวได้ว่างานวิจัยทางการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่เน้นไปที่ DVR (Vilathgamuwa, Perera, and Choi, 2003) DVR เป็นตัวชดเชยอนุกรม (series compensator) ที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ช่วยป้องกันโหลดจากแรงดันตกและทำหน้าที่ฟื้นฟูแรงดันโหลดให้คงที่ เมื่อเกิดแรงดันตกหรือแรงดันเกินชั่วขณะ (voltage sag and voltage swells) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (Jung, Suh, Kim, Kim, Choi, and ong, 2002 and Fitzer, Barnes, and Geen, 2004 and Sng, Choi, and Vilathgamuwa, 2004)

ถึงแม้ว่า การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบจำหน่ายสามารถทำได้หลายวิธี วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการใช้อุปกรณ์สำหรับระบบจำหน่ายตัวใหม่ที่มีชื่อว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม ปัญหาที่สำคัญสำหรับการใช้อุปกรณ์ชดเชยดังกล่าว ได้แก่ การเลือกตำแหน่งติดตั้งและการกำหนดพิกัดของอุปกรณ์ที่เหมาะสม (optimal location and sizing) วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้ง DVR ที่เหมาะสมโดยใช้การประเมินดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว (fast voltage stability index: FVSI) (Musirin, and Abdul Rahman, 2002) บัสใดก็ตามที่ให้ค่าดัชนีดังกล่าวเท่ากับหรือใกล้เคียง 1.0 และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่โหลดต่ำที่สุด หมายถึง การมีโอกาสหรือความเสี่ยงสูงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า (voltage collapse) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดไฟดับทั้งระบบ

(system blackout) DVR จะถูกติดตั้งโดยต่ออนุกรมเข้ากับสายป้อนจำหน่ายเส้นที่ได้รับผลประโยชน์ ว่าบัสที่ต่อปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด ผลการดำเนินงานดังกล่าว จะช่วยให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าทำงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย มีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้สูง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า และช่วยลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้มีค่าน้อยที่สุด
- เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ตามมาตรฐานการจ่ายไฟในกรณีที่โหลดมีขนาดมากขึ้น
- เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โหลด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
- เพื่อหาดำแหน่งติดตั้งของ DVR ที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ทดสอบกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบสายป้อนสมดุลทั้งในสภาวะการจ่ายโหลดสมดุลและไม่สมดุล
- ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

- ไม่คิดกำลังงานสูญเสียใน DVR กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กและการอิมิตีวทางแม่เหล็กของโหลดหม้อแปลงผู้ใช้ไฟ
- ใช้แบบจำลองสายป้อนระยะสั้น
- ความถี่ทำงานของระบบกำหนดให้ใช้ 50 Hz ทุกระบบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- จำลองผลการทำงานของ DVR ในสถานะคงตัว เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและช่วยลดกำลังงานสูญเสียในระบบ
- ศึกษาวิเคราะห์และจำลองผล โดยเน้นไปที่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยเฉพาะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่ต้องเสียเงินในส่วนนี้ และจะช่วยเพิ่มรายได้ให้กับผู้ผลิตกำลังไฟฟ้าอีกด้วย
- สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น และช่วยให้โหลดที่ต่อไม่เสียหายได้ง่าย จากสถานะแรงดันตก
- สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดที่มีความจำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้าตลอดเวลาให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับความผิดปกติที่เกิดแบบไม่รุนแรงมากนัก (อยู่ในช่วงที่ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตสามารถชดเชยได้)
- ช่วยทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV มีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้สูงขึ้น

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 4 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ รวมทั้งโครงสร้างและการทำงานของตัวฟิวส์แรงดันพลวัต

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของตัวพินฟูแรงดันพลวัต แบบจำลองในสถานะคงตัวของตัวพินฟูแรงดันพลวัต แบบจำลองการฉีดกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บัลแอตมิตแดนซ์ ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน รวมทั้งผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด การควบคุมตัวพินฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน การควบคุมตัวพินฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งผลทดสอบการทำงานของตัวพินฟูแรงดันพลวัต

บทที่ 5 กล่าวถึงการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวพินฟูแรงดันพลวัต การค้นหาตำแหน่งบัลที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวพินฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ รวมทั้งผลทดสอบการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวพินฟูแรงดันพลวัต และการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างตัวพินฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของระบบทดสอบ ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล ประกอบด้วย ระบบทดสอบ 10 บัส 118 บัส เป็นระบบทดสอบ 8.66 kV 25 บัส เป็นระบบทดสอบ 4.16 kV 37 บัส เป็นระบบทดสอบ 4.8 kV และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เป็นระบบทดสอบ 22 kV ระบบทดสอบทั้งหมดมีกำลังไฟฟ้า 100 kVA

ภาคผนวก ข. รายละเอียดผลทดสอบทั้งหมดที่ไม่ได้แสดงในรายงาน

ภาคผนวก ค. โปรแกรมสำหรับจำลองผลของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นประเด็นที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากปัจจุบันความหลากหลายของโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะโหลดประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติ หรือ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งมีความเสี่ยงสูง และสามารถรับรู้ได้เร็วถึงระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดทำได้น้อยลง เป็นผลมาจากอิมพีแดนซ์รวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นและแรงดันมีค่าลดต่ำลง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจะทำให้อิมพีแดนซ์รวมในระบบมีค่าลดลงและแรงดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น และโหลดสามารถทำงานได้เป็นปกติ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยปรีทัศน์วรรณกรรมจะประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้แก่ การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โครงสร้างและการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและนิวตัน-ราฟสัน การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และโครงสร้างและการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้แก่

2.2.1 การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (reactive power compensation)

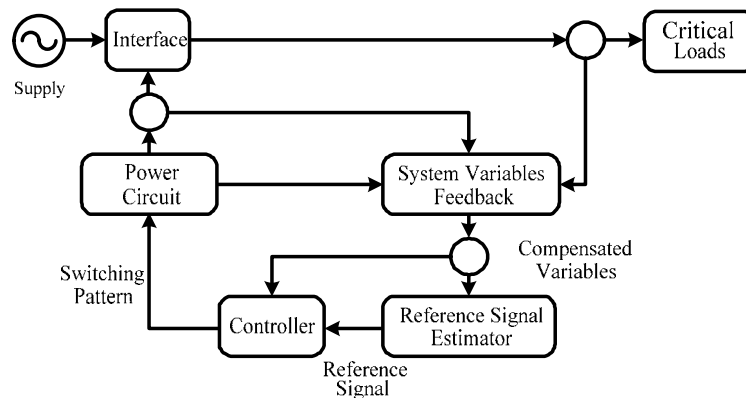
ในปัจจุบัน การใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นขนาดเล็กเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารหรืออุปกรณ์มัลติมีเดีย เป็นต้น ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า สืบเนื่องมาจากกฎหมายควบคุมคุณภาพของการจ่ายไฟต้องการระดับของฮาร์มอนิกและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในเกณฑ์ต่ำ จึงมีวิธีการมากมายสำหรับการแก้ไขปัญหา

ด้วยการติดตั้งตัวกรองแบบแอกทีฟและตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามเงื่อนไขของระบบไฟฟ้ากำลัง (Welsh, Mehta, and Darwish, 2000) การศึกษาเกี่ยวกับตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีหลายวิธี โครงสร้างของตัวชดเชยสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.1 แผนภาพประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟและโหลดวิกฤต การชดเชยกำลังไฟฟ้าดำเนินการผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อ (interface) และตัวตรวจรู้สถานะของระบบแบบป้อนกลับ (system variable feedback) ตัวควบคุมดำเนินการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ เช่น แรงดันคร่อมโหลดกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อนำมาประกอบการตัดสินใจดำเนินการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยขนาดการชดเชยที่พอเหมาะผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อ (El-Habrouk, Darwish, and Mehta, 2000) และสามารถแสดงแผนภาพการแบ่งประเภทของเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าแอกทีฟดังรูปที่ 2.2

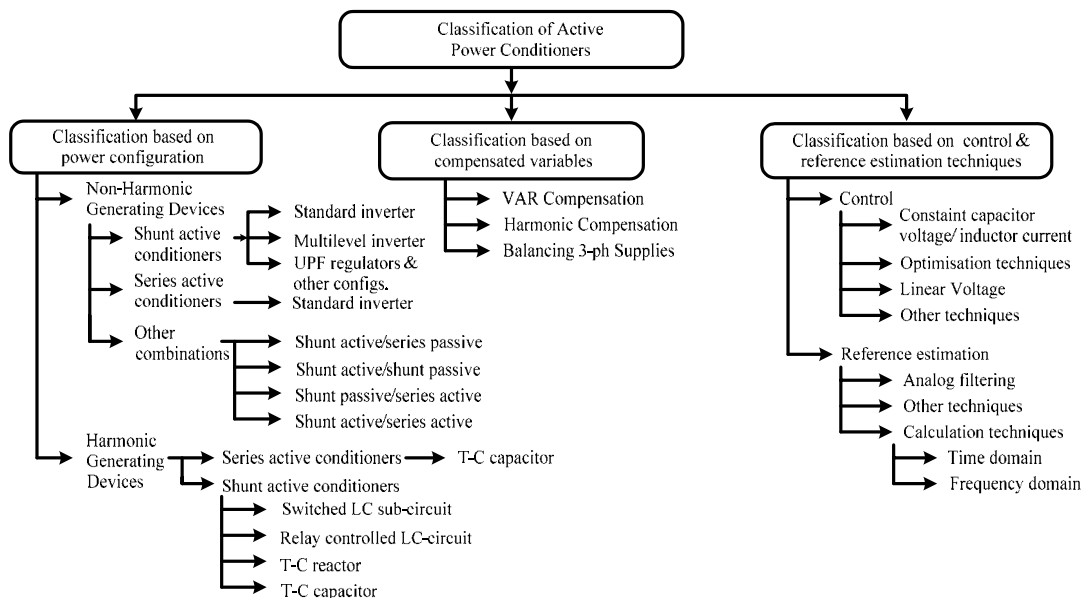
ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ การแบ่งประเภทของรูปแบบแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยน การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีคุณภาพและความเชื่อถือได้ของการจ่ายไฟให้กับผู้บริโภค ทำได้โดยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสโหลดให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบหรือความต้องการกำลังไฟฟ้า ปัจจัยเหล่านี้สามารถทำให้แรงดันในระบบไฟฟ้าสูงขึ้นหรือต่ำลง การวินิจฉัยผลกระทบดังกล่าวต้องอาศัยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือสำคัญ เพื่อค้นหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และการตัดแปลงโครงสร้างการเชื่อมต่อสายป้อนสำหรับวางแผนการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบรายวัน ในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบจำหน่ายแบบอัตโนมัติ (Distribution Automation System: DAS) สำหรับการควบคุมการจ่ายไฟและแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Jerome, 2001) นำเสนอการแก้ปัญหาด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับโครงสร้างการจ่ายไฟแบบรัศมี

นอกจากนี้ยังมีแนวทางใหม่ที่ใช้ (Strength Pareto Evolutionary Algorithm: SPEA) กับตำแหน่งชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้าซึ่งคล้ายกับปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (multiobjective) เป็นการปรับเงื่อนไขแบบดั้งเดิมเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบใหม่ ภาพรวมจะสัมพันธ์กับการปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ปริมาณของการลงทุนในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังรีแอกทีฟ กำลังงานสูญเสียในสายส่ง และความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้า ในเวลาเดียวกันขอบเขตเงื่อนไขพารามิเตอร์จะต้องมีความเชื่อถือได้ และรูปร่างแรงดันไฟฟ้าไม่ผิดเพี้ยน โดยการกำหนดคำตอบที่เหมาะสมของเซตพารेट (pareto set) หากการตัดสินใจที่ได้คำตอบที่ดีที่สุด (Ramos, Vallejos, and Baran, 2004) และการใช้เงินเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ใช้รหัสจำนวนเต็ม (Integer-coded, multiobjective Genetic Algorithm: IGA) กับปัญหาการวางแผนชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive-Power Compensation Planning: RCP) พิจารณาทั้งความไม่เปลี่ยนแปลงและความไม่แน่นอนของสถานะการทำงาน IGA จะใช้แก้ปัญหาทั้งสองนี้ คือ ค่าที่เหมาะสมของการติดตั้งอุปกรณ์ใหม่และปัญหาเกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์นั้น ค่าที่เหมาะสม

ของเทปหม้อแปลงและตัวควบคุมคุณลักษณะของอุปกรณ์ชดเชยพลังวัต จุดประสงค์คือ วางแผนค่าที่เหมาะสมที่ไม่ขัดกับระบบหรือเงื่อนไขการทำงาน และค่าที่เหมาะสมในเทอมของความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าจากอุดมคติ รวมทั้งราคาจากการติดตั้ง ตลอดจนการใช้งานของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งวัตถุประสงค์ทั้งหมดใช้ความเหมาะสมแบบพารโต (pareto optimality) (Furong, Pilgrim, Dabeedin, Chebbo, and Aggarwal, 2005) เพื่อแก้ปัญหา



รูปที่ 2.1 แผนภาพทั่วไปของเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ



รูปที่ 2.2 แผนภาพการแบ่งประเภทของเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

2.2.2 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (power distribution systems)

โดยทั่วไประบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีโครงสร้างเป็นแบบรัศมี ซึ่งโครงสร้างนี้มีประโยชน์ คือ กระแสผิดพลาดมีขนาดน้อยที่สุด ลดราคาของอุปกรณ์ควบคุม และง่ายต่อการป้องกันระบบ การดัดแปลงระบบจำหน่ายทำได้โดยการเปิดปิดสวิตช์ แต่โครงสร้างของสายป้อนยังคงเป็นแบบรัศมี ในอดีตการดัดแปลงระบบจำหน่ายมีวัตถุประสงค์คือ การสูญเสียในระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด ยกกระตือรือร้นแรงดันไฟฟ้า และทำให้สายป้อนจ่ายโหลดสมดุล โดยใช้วิธีการจำลองการอบอ่อน (simulated annealing) เจนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms) และการค้นหาแบบตาบอด (tabu search) เป็นต้น วิธีการดังกล่าวจะไม่พิจารณาสิ่งที่มีผลกระทบต่อ การดัดแปลงโครงสร้างกับดัชนีความเชื่อถือได้ ในเนื้อหานี้การดัดแปลงโครงสร้างระบบจำหน่าย อาจจะมีผลกระทบกับตัวเลือกสำหรับการจำหน่ายกำลังไฟฟ้า การดัดแปลงโครงสร้างโดยการเปิด-ปิดสวิตช์ไม่มีผลกับราคาในการจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความสำคัญมากในการพัฒนาวิธีการอธิบายสำหรับความสัมพันธ์เกี่ยวกับการสูญเสียทางไฟฟ้า รูปร่างแรงดันไฟฟ้า ความสมดุลของโหลด และความเชื่อถือได้ระหว่างดัดแปลงโครงสร้างระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า จุดประสงค์หลักของหลักการนี้คือ การสูญเสียทางไฟฟ้าที่น้อยที่สุด พิจารณาเงื่อนไขเกี่ยวกับโหลดเกิน แรงดันตก และการเปลี่ยนแปลงของดัชนีความเชื่อถือได้โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบอ่อน (Coelho, Rodrigues, and Da Silva, 2004)

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา พัฒนาการด้านอุปกรณ์และระบบอัตโนมัติในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความก้าวหน้าไปมาก และได้รับความสนใจจากวิศวกรระบบไฟฟ้า ผู้ปฏิบัติงานและนักวิจัยอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านระบบเฝ้าระวัง (condition monitoring) การควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ของสายป้อนจำหน่าย (switching control of distribution feeders) หรืองานด้านระบบป้องกันสถานีย่อย (Ozay, Guven, Buyuksemerci, and Fettahlioglu, 1999 and Ying, Guven, Buyuksemerci, and Fettahlioglu, 2000) หน้าที่หลักที่สำคัญของระบบจำหน่ายแบบอัตโนมัติอาจแบ่งได้เป็น 1. การควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage regulation) 2. การหาตำแหน่งเกิดความผิดพลาด และการแยกโดดความผิดพลาด (fault location and isolation) 3. ควบคุมการจ่ายโหลด (load flow control) และ 4. การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบสายป้อน (feeder reconfiguration) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานทั้งในสภาวะปกติ สภาวะเกิดความผิดพลาด และสภาวะจ่ายโหลดฉุกเฉิน สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความซับซ้อนและขยายขนาดขึ้นเรื่อย ๆ ปัญหาทางด้านการวางแผนปฏิบัติงานของระบบจำหน่ายจึงได้รับความสำคัญเพิ่มมากขึ้น การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบ ในเวลาจริงหรือการใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะ (state estimation) เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาและวินิจฉัยระบบเพื่อควบคุมให้

ระบบจำหน่ายปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัด อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย มีความเชื่อถือได้ มีความมั่นคง และมีเสถียรภาพ (Ke, 1996 and De Souza, Filho, Meza, and Schilling, 2003)

ปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการกำหนดปริมาณคุณภาพแรงดันตกของสายป้อน เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะวัดระดับแรงดันตกที่ทุก ๆ โหนดของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้น การประมาณค่าจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการวัดค่าที่โหนดที่ไม่สามารถวัดได้ แนวคิดของการประเมินค่าแรงดันตก และอัลกอริทึม สามารถทำได้โดย (Lang, and Pahwa, 2000)

- 1) ใช้การเชื่อมต่อแบบรัศมีของสายป้อนระบบจำหน่าย
- 2) จำนวนขอบเขตของจุดที่วัด
- 3) ใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square) ทำนายแรงดันตกในสายป้อน

ผลของการประเมินค่าแรงดันตก สามารถใช้คำนวณคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ เช่น System Average RMS Frequency Index (SARFIx) เป็นต้น ความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในการจ่ายไฟให้ผู้บริโภคได้อย่างต่อเนื่องมีความสำคัญอย่างมากกับการควบคุมระบบปฏิบัติการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง วิธีการนี้ประเมิน โครงสร้างสายป้อนเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของระบบ ในรูปของดัชนีความเสี่ยง (risk indices) สามารถวินิจฉัยหาสายป้อนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด จะช่วยทำให้ทราบจุดที่เสี่ยงต่อการเกิดความผิดปกติ ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว (Wang, Wilsun and Zhencun, 2005)

2.2.3 โครงสร้างและการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (DVR structure and control)

คุณภาพกำลังไฟฟ้ามีความสำคัญมากต่อผู้ใช้ไฟ ประกอบด้วย ฮาร์มอนิก แรงดันเกิน แรงดันตก และการขัดจังหวะต่าง ๆ (Praveen, Muni, Venkateshwarlu, and Makthal, 2004) ปัจจุบันในกระบวนการอุตสาหกรรมมีระบบอัตโนมัติที่ใช้กับตัวควบคุมและคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย สำหรับระบบการจัดการคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ต่ำมีผลทำให้เกิดความสูญเสียของข้อมูลและเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ตามมา การใช้ DVR ช่วยลดปัญหาความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการทำงานของเครื่องมือต่าง ๆ ความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ราคาแพงและคุณภาพที่ต่ำของผลิตภัณฑ์

DVR พัฒนาโดยบริษัท Westing House การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ DVR สามารถใช้ป้องกันแรงดันตกได้ (Zhan, Wu, Kromlidis, Ramachandaramurthy, Barnes, Jenkins, and Ruddell, 2003 and Brumsickle, Schneider, Luckjiff, Divan, and McGranaghan, 2001) DVR ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ช่วยชดเชยแรงดันตก (Woodley, 2000) ป้องกันกระบวนการทางอุตสาหกรรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากความไม่แน่นอนของแรงดัน การเกิดไฟฟ้าขัดข้อง การฟื้นฟูคุณภาพของกำลังไฟฟ้าของโหลดที่รับรู้ได้ไว จะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เมื่อเจอกับวิกฤตของคุณภาพกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบจำหน่ายแบบใหม่ DVR จะจ่ายแรงดันแบบเฟสเดียว 3 ชุดต่ออนุกรมกับหม้อแปลงแรงดัน รูปแบบแรงดันเอาต์พุตค่อนข้างเรียบ การจ่ายแรงดันจะควบคุมขนาดและมุมเฟส มีการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าระหว่าง DVR และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เงื่อนไขการอนุกรมของ DVR จะอยู่บนพื้นฐานของ PWM inverter แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) ซึ่งจะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบอิสระ การจ่ายแรงดันของ DVR จะเป็นอิสระในการฟื้นฟูแรงดันไฟฟ้าของโหลดที่รับรู้ได้ไวกจากแรงดันตก ที่มีสาเหตุมาจาก ความไม่สมดุล และความผิดปกติทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (Li, Choi, and Vilathgamuwa, 2001) DVR ชดเชยฮาร์มอนิกและทำให้สมรรถนะแรงดันในสถานะชั่วครู่ดีขึ้น

2.2.4 กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด (loss minimization)

โครงสร้างของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าปกติเป็นแบบรัศมี สำหรับการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพของการป้องกันระบบ โครงข่ายระบบจำหน่ายส่วนใหญ่ใช้สวิตช์ตัดต่อที่ปกติปิด จากช่วงเวลาหนึ่งไปสู่อีกช่วงเวลาหนึ่ง การตัดแปลงโครงสร้างรัศมีของสายป้อนโดยการเปลี่ยนแปลงสถานะเปิด-ปิดบางส่วนและการบังคับสวิตช์เพื่อถ่ายโอนโหลดจากสายป้อนหนึ่งไปยังที่อื่น ๆ ที่สำคัญตามเงื่อนไขการทำงานจากระบบโดยรวม สายป้อนในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าปกติจะเป็นจุดรวมของระบบอุตสาหกรรม การค้า ที่อยู่อาศัยและโหลดแสงสว่าง จุดยอดของโหลดที่หม้อแปลงในสถานีและสายป้อนเกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ กันของแต่ละวัน เพราะฉะนั้นระบบจำหน่ายจึงจ่ายโหลดสูงสุดและต่ำสุดที่เวลาแน่นอนในแต่ละวัน การลดกำลังงานสูญเสียสามารถทำได้โดยการถ่ายโอนโหลดจากสายป้อนที่มีโหลดหนักไปยังสายป้อนที่มีโหลดน้อย โดยการตัดแปลงโครงสร้าง ดังนั้น โครงสร้างรัศมีของสายป้อนระบบจำหน่าย สามารถตัดแปลงจากเวลาหนึ่งไปสู่อีกเวลาหนึ่งได้โดยการถ่ายโอนโหลด วิธีการนี้มีประสิทธิภาพมากสำหรับกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดในระบบ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการปรับปรุง ความต้องการแรงดันที่สูงที่สุดในสายป้อนและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบ (Kashem, Ganapathy, Jasmon, and Buhari, 2000) การทำงานและมาตรฐานการออกแบบสำหรับโครงสร้างระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีการตัดแปลงแตกต่างกันไป ควรคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ ด้าน (Augugliaro, Dusonchet, Favuzza, and Sanseverino, 1998) เช่น

- 1) ความสนใจเกี่ยวกับการประหยัดพลังงาน และการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่
- 2) ราคาของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมต้องถูก
- 3) ความต้องการคุณภาพสูงที่สุดของการบริการสู่ผู้บริโภค
- 4) ระบบใหม่สำหรับแสดงโครงข่ายระบบและระบบควบคุมใหม่ที่มีความสัมพันธ์

ระหว่าง การผลิต การจำหน่าย และผู้ใช้ไฟ

การจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้า โดยใช้การโปรแกรมและการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนในระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถเขียนแทนด้วยไดอะแกรมเส้นเดียว ซึ่งมีการเชื่อมต่อระบบประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่งหรือสายจำหน่าย และโหลด ส่วนประกอบทั้งหมด เช่น สายส่งและหม้อแปลงจะมีความต้านทาน ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย ถ้ามีกระแสไหลผ่าน กำลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไหลในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับบัส สามารถคำนวณโดยการจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้า ค่าต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียมีความสำคัญมาก เพราะจะเกี่ยวข้องกับหลักเศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าทราบว่ากำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นที่จุดใด ก็สามารถทำให้มีค่าต่ำที่สุดได้ กำลังงานสูญเสียสามารถหาได้หลายวิธี กำลังงานสูญเสียในสายส่งสามารถคำนวณได้จาก I^2R หรือผลรวมของกำลังงานสูญเสียทั้งระบบหากำลังไฟฟ้าที่หายไปในสายส่งจากต้นสายกับปลายสาย (Rider, Paucar, and Garcia, 2004) กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลัง (Electric Power System: EPS) อาจพิจารณาความต้องการพื้นฐานของการแข่งขันในตลาดไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับหลักเศรษฐศาสตร์และคุณภาพกำลังไฟฟ้า ในการวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง และการปฏิบัติงานอย่างปลอดภัยและเชื่อถือได้ กำหนดโดยการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) วัตถุประสงค์ของ OPF คือใช้หาการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะคงตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหา OPF อาจจะมีแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวัตถุประสงค์คือ เทคนิคการหาค่าต่ำสุดของกำลังงานสูญเสีย และเงื่อนไขทางเศรษฐกิจ สำหรับวิธีการคำนวณกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คำนวณจาก OPF กับเงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้นแบบเท่ากันและแบบไม่เท่ากัน ซึ่งคำนึงถึงความปลอดภัยในระบบไฟฟ้ากำลัง OPF แก้ไขโดยใช้วิธีการคูณของตัวทำนายและตัวปรับแก้ (Multiple Predictor-Corrector: MPC) ของตระกูลอันดับสูงของวิธีการจุดภายใน (interior-point) สำหรับคำนวณความยาวขั้นระหว่างการวนซ้ำแบบนิวตัน วิธีการของ MPC จะมีการลู่ออกที่เร็วและมีการวนรอบน้อย และใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ (Lukman, and Blackburn, 2001)

2.2.5 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (voltage stability in power distribution systems)

ปัจจุบันเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์มีผลกับระบบไฟฟ้ากำลัง ในการทำงานให้อยู่ในขอบเขตของความปลอดภัย ในอดีตขอบเขตจะเกี่ยวข้องกับความร้อนและข้อจำกัดเสถียรภาพชั่วคราว อย่างไรก็ตามข้อจำกัดเสถียรภาพชั่วคราวกลายเป็นข้อจำกัดที่มีผลน้อยลงในปัจจุบัน เนื่องจากมีการใช้รีเลย์ความไวสูง เพื่อลดเวลาสำหรับกำจัดความผิดปกติและผลตอบแทนอย่างรวดเร็วที่กระตุ้นระบบและอุปกรณ์ จากผลกระทบของความแปรปรวนในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้ระบบไฟฟ้าทั่วทั้งโลกมีความเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและปัญหาการพังทลายของ

แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น (Jia, Yu, and Yu, 2004) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจากเกิดไฟดับ วันที่ 14 สิงหาคม ในนิวยอร์ก 29 สิงหาคม ในลอนดอน 23 กันยายน ในเคนมาร์กและสวีเดน และ 28 กันยายน ในอิตาลีปี 2004 ซึ่งมีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

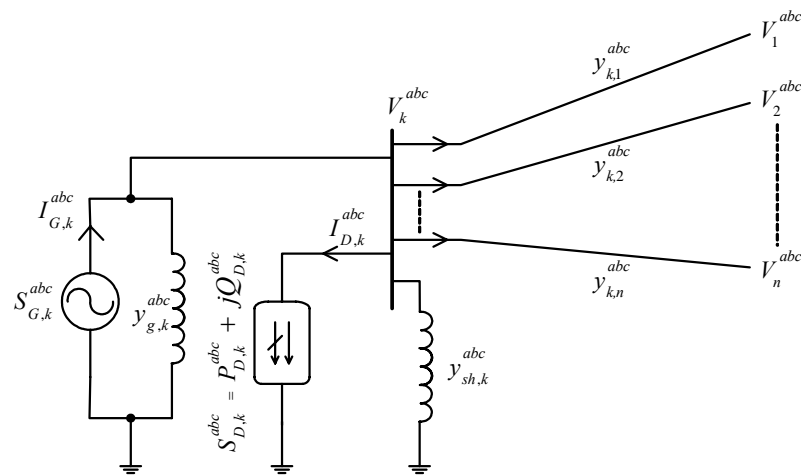
การป้องกันการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า วิศวกรต้องการดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (voltage stability index) ที่มีความไวและแม่นยำในการทำนายเพื่อช่วยแสดงเงื่อนไขในการทำงานของระบบ ในอดีตได้มีการพัฒนาแนวคิดสำหรับออกแบบดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากมาย เช่น (Abdul Rahman, and Jasmon, 1995) นำเสนอเทคนิคใหม่ในการหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสถิติของบัสโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง เงื่อนไขในการทำงานจะจำแนกบัสโหลดที่เสี่ยงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าโดยดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้านี้หาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายระบบไฟฟ้า 2 บัส และคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลเทวินิน ของระบบไฟฟ้ากำลังที่อ้างอิงไปที่บัสโหลด ดัชนีจะแสดงให้เห็นว่าบัสโหลดมีแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่ วิธีการนี้จะทดสอบกับเฉพาะบัสโหลดเท่านั้น เพราะฉะนั้นอาจจะเกิดการทำนายที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากอาจจะไม่มีบัสที่ไม่มีโหลดต่ออยู่เกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้ ต่อมา (Musirin, and Abdul Rahman, 2002) ใช้กระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบบเร็ว (Fast Voltage Stability Index: FVSI) สามารถหาสายส่งเส้นที่มีความเสี่ยงอันตรายและรวมถึงบัสที่เสี่ยงต่ออันตรายจากการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้ FVSI มีประสิทธิภาพสูงในการประมาณค่าสายส่งและบัส ขณะที่กำลังไฟรีแอกทีฟที่มีค่าต่ำ แสดงว่าบัสนั้นมีความเสี่ยงสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง FVSI จะใช้สมการการคำนวณเงื่อนไขของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบโดยอ้างอิงที่สายส่ง สูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่อนข้างง่ายและสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว FVSI สามารถอ้างอิงที่บัสหรือสายส่งก็ได้ สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอนี้จะอ้างอิงที่สายส่ง โดยทั่วไปจะเริ่มคำนวณจากสมการกระแสในลักษณะของสมการกำลังสองของกำลังไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า แนวคิดของดัชนีนี้คล้าย ๆ กับ (Moghavemmi, and Omar, 1998) ซึ่งจะหาดัชนีเสถียรภาพสายส่ง (Line Stability Index: L_{mn}) แนวคิดจะอยู่บนพื้นฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองแบบพายและ (Mohamed, Jasmon, and Yusoff, 1989) ซึ่งจะหาตัวประกอบเสถียรภาพสายส่ง (Line Stability Factor: LQP) แนวคิดจะอยู่บนพื้นฐานของสายส่งกำลังไฟฟ้า สมการเริ่มต้นจากสมการกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังระบบบัส 2 บัส จากการทดสอบ FVSI สามารถระบุตำแหน่งสายส่งและบัสที่เสี่ยงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและผลการทดสอบคล้ายกับดัชนี L_{mn} และ LQP ทำให้ FVSI มีการทำงานที่สามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะตรวจสอบเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ FVSI เนื่องจากสมการที่ใช้ไม่สลับซับซ้อนและสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว และมีความเชื่อถือได้

2.3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีของระบบส่งจ่าย จะถือวาระบบส่งจ่ายมีความสมดุลมากจึงสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระบบต่อเฟสได้ ผลที่ได้จากการคำนวณจะถือว่ามีค่าเท่ากันทุกเฟส ซึ่งแตกต่างจากระบบสายป้อนที่ความต้านทานสายส่งจะมีผลของความต้านทานระหว่างเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากระบบสายป้อนบางช่วงอาจมีการเดินสายไปแค่สองเฟสหรืออาจเพียงเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งปริมาณโหลดที่ใช้ในแต่ละเฟส อาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้กระแสที่ไหลในสายแต่ละเฟสไม่สมดุล แรงดันในแต่ละเฟสของบัสเดียวกันมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ด้วยระบบต่อเฟส ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสถูกนำมาใช้แทนระบบต่อเฟส (นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย, 2548)

2.3.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัส มีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อบัสสลैค (slack bus)



รูปที่ 2.3 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยใช้การวิเคราะห์แบบโนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โนด k ใด ๆ ดังนี้

$$y_{k,1}^{abc} (V_k^{abc} - V_1^{abc}) + y_{k,2}^{abc} (V_k^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{k,n}^{abc} (V_k^{abc} - V_n^{abc}) = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} \quad (2-1)$$

โดยที่ $I^{abc} = y_{bus}^{abc} V^{abc}$ จะได้

$$I_k^{abc} = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n I_{k,i}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (2-2)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\left(\frac{S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (2-3)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้สมการการไหลกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ ได้ดังสมการที่ (2-4)

$$(S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (2-4)$$

โดยที่ $S_{G,k}^{abc}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$S_{D,k}^{abc}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่โหลดที่บัส k ตามลำดับ

V_k^{abc} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่บัส k

$y_{k,i}^{abc}$ คือ แอดมิตแตนซ์เฟส a, b และ c ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i

V_i^{abc} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่บัส i

* คือ ตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

จากสมการการไหลกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ กำหนดให้ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ และ

$P_{sch}^{abc} = P_G^{abc} - P_D^{abc}$ และ $Q_{sch}^{abc} = Q_G^{abc} - Q_D^{abc}$ จะได้

$$(S_{sch,k}^{abc})^* = (S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc})$$

$$\left(\frac{S_{sch,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* = \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc})$$

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} V_k^{abc} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (2-5)$$

จากการคำนวณหาเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ (bus admittance matrix) จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[Y]_{bus}^{abc} : \quad Y_{k,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n y_{k,i}^{abc} \quad \text{และ} \quad Y_{k,i}^{abc} = -y_{k,i}^{abc}$$

จัดรูปสมการที่ (2-5) โดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ จะได้ว่า

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} = Y_{k,k}^{abc} V_k^{abc} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (2-6)$$

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (2-7)$$

$$\text{โดยที่} \quad Y_{k,i}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{k,i}^{aa} & Y_{k,i}^{ab} & Y_{k,i}^{ac} \\ Y_{k,i}^{ba} & Y_{k,i}^{bb} & Y_{k,i}^{bc} \\ Y_{k,i}^{ca} & Y_{k,i}^{cb} & Y_{k,i}^{cc} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V_i^{abc} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V_k^{abc} = \begin{bmatrix} V_k^a \\ V_k^b \\ V_k^c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2-7) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังนี้

$$V_k^{abc} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right\} \quad (2-8)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{\left(V_k^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} \right\} \quad (2-9)$$

สมการที่ (2-9) เป็นการปรับปรุงตามวิธีการวนรอบแบบเกาส์ สำหรับวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดล จะดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปถึง n ดังนั้นการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว วิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ค่าจากการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั้นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเดลดังนี้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{\left(V_k^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} \right\} \quad (2-10)$$

สมการที่ (2-10) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีกำหนดบัสสแล็ก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วย โดยปกติแล้วกำหนดให้เฟส a มีมุมเฟสเป็น 0 องศา เฟส b มีมุมเฟสเป็น -120 องศา และเฟส c มีมุมเฟสเป็น 120 องศา สำหรับบัสสแล็ก และไม่ต้องคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ เท่านั้น

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ (เฟส a, b และ c) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในรอบแรก และการคำนวณซ้ำในรอบต่อไป

2) คำนวณค่าเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ Y_{bus}^{abc} ในระบบต่อหน่วย (per-unit-system)

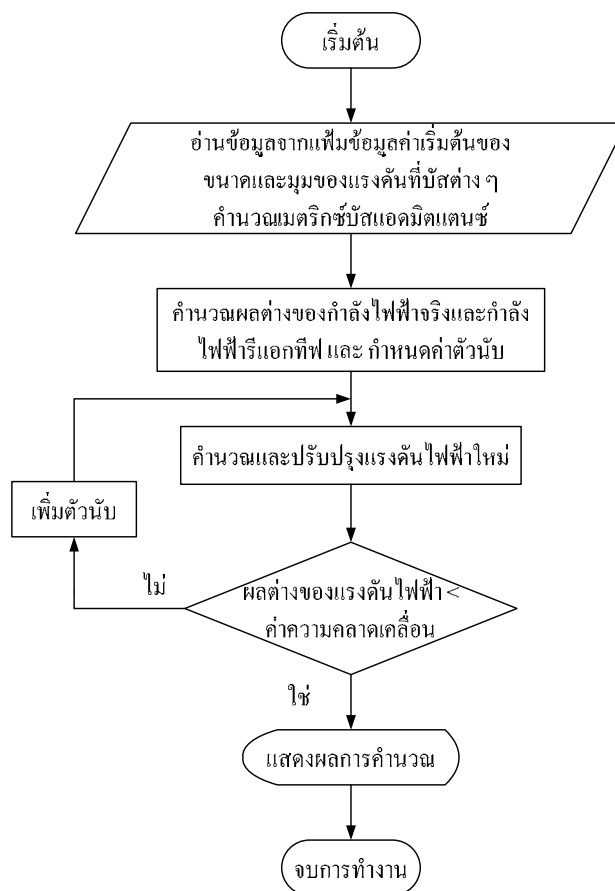
3) คำนวณผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริง ($P_G^{abc} - P_D^{abc}$) และผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($Q_G^{abc} - Q_D^{abc}$) สำหรับบัสโหลด

4) คำนวณแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ $(h+1)$ ที่บัสโหลด k ใด ๆ ($V_k^{abc^{(h+1)}}$)

5) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

6) ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

2.3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\text{จากสมการที่ (2-7)} \quad \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

จัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ จะได้ว่า

$$\frac{(S_{sch,k}^{abc})^*}{(V_k^{abc})^*} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

$$\text{นั่นคือ } (S_{sch,k}^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (2-11)$$

สมการที่ (2-11) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$V_k^{abc} = |V_k^{abc}| \angle \delta_k^{abc} = |V_k^{abc}| e^{j\delta_k^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } k$$

$$V_i^{abc} = |V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc} = |V_i^{abc}| e^{j\delta_i^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } i$$

$$Y_{k,i}^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| e^{j\theta_{k,i}^{abc}} \quad \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของเมตริกซ์บัส}$$

แอดมิตแตนซ์ 3 เฟส

จากสมการที่ (2-11) เมื่อพิจารณาในรูปพิกัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$(S_{sch,k}^{abc})^* = (|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}) \sum_{i=1}^n [(|Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc}) (|V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc})]$$

$$(S_{sch,k}^{abc})^* = \sum_{i=1}^n |V_k^{abc}| |V_i^{abc}| |Y_{k,i}^{abc}| \angle (\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) \quad (2-12)$$

โดยที่ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ และ $P_{sch}^{abc} = P_G^{abc} - P_D^{abc}$ และ $Q_{sch}^{abc} = Q_G^{abc} - Q_D^{abc}$ จะได้ว่า

$$(P_{G,k}^{abc} - P_{D,k}^{abc}) - j(Q_{G,k}^{abc} - Q_{D,k}^{abc}) = \sum_{i=1}^n |V_k^{abc}| |V_i^{abc}| |Y_{k,i}^{abc}| \angle (\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) \quad (2-13)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบัสที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้จะทำให้สมการเชิงซ้อน (2-13) สมดุล อย่างไรก็ตามในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของ

เฟสเซอร์แรงดันบัสดังกล่าวได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นโดยการกำหนดให้แรงดันบัสดำเนินต้นทุกบัสดำเนินต้นเป็น $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. สำหรับเฟส a , $1.0 \angle -120^\circ$ สำหรับเฟส b และ $1.0 \angle 120^\circ$ สำหรับเฟส c หรืออาจจะใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบจะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บัสดำเนินต้นมา เรียกว่าความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (power mismatches) ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k^{abc} = P_{sch,k}^{abc} - P_{cal,k}^{abc} = f_{p,k}^{abc} \quad (2-14)$$

$$\Delta Q_k^{abc} = Q_{sch,k}^{abc} - Q_{cal,k}^{abc} = f_{q,k}^{abc} \quad (2-15)$$

โดยที่
$$P_{cal,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \cos(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc})$$

$$Q_{cal,k}^{abc} = -\sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \sin(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc})$$

หรือในรูปที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายกว่า ดังนี้

$$P_{cal,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad (2-16)$$

$$Q_{cal,k}^{abc} = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad (2-17)$$

โดยที่ $p \in (a, b, c)$ และ $\phi \in (a, b, c)$

ใช้วิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสันประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1}^{abc} = \Delta P_{k+1}^{abc} = \Delta P_k^{abc} + [\nabla f_{p,k}^{abc}]^T \cdot \Delta X^{abc} = 0$$

$$\Delta P_k^{abc} = -[\nabla f_{p,k}^{abc}]^T \cdot \Delta X^{abc}$$

โดยที่ $X = [\delta^{abc} \quad |V^{abc}|]^T$ จะได้

$$\Delta P_k^{abc} = -\left(\frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \right)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}^{abc}$ มีค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า $\frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial X} = -\frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial X}$ นั่นคือ

$$\Delta P_k^{abc} = \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (2-18)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k^{abc} = \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (2-19)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธี
นิวตัน-ราฟสัน หรือ Mismatches (power) = Jacobian \times Corrections (voltage) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{abc} \\ \Delta Q^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial P_{cal}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \\ \frac{\partial Q_{cal}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial Q_{cal}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1^{abc} & J2^{abc} \\ J3^{abc} & J4^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{abc} \\ \Delta P_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{abc} \\ \hline \Delta Q_1^{abc} \\ \Delta Q_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \vdots & \vdots & J1 & \vdots & \vdots & \vdots & J2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \hline \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \vdots & \vdots & J3 & \vdots & \vdots & \vdots & J4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{abc} \\ \Delta \delta_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{abc} \\ \hline \Delta |V_1^{abc}| \\ \Delta |V_2^{abc}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{abc}| \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

ถ้าให้ บัสที่ m เป็นบัสสลัก จากสมการที่ (2-20) หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ได้ดังนี้

$$\text{เมตริกซ์ย่อย } J1^{abc} : \text{ โดยที่ } [J1^{abc}] = \begin{bmatrix} J1_{11}^{abc} & J1_{12}^{abc} & \cdots & J1_{1(n-1)}^{abc} \\ J1_{21}^{abc} & J1_{22}^{abc} & \cdots & J1_{2(n-1)}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J1_{n1}^{abc} & J1_{n2}^{abc} & \cdots & J1_{n(n-1)}^{abc} \end{bmatrix}$$

$$J1^{abc} = \begin{bmatrix} J1_{11}^{aa} & J1_{11}^{ab} & J1_{11}^{ac} & J1_{12}^{aa} & J1_{12}^{ab} & J1_{12}^{ac} & \cdots & J1_{1n}^{aa} & J1_{1n}^{ab} & J1_{1n}^{ac} \\ J1_{11}^{ba} & J1_{11}^{bb} & J1_{11}^{bc} & J1_{12}^{ba} & J1_{12}^{bb} & J1_{12}^{bc} & \cdots & J1_{1n}^{ba} & J1_{1n}^{bb} & J1_{1n}^{bc} \\ J1_{11}^{ca} & J1_{11}^{cb} & J1_{11}^{cc} & J1_{12}^{ca} & J1_{12}^{cb} & J1_{12}^{cc} & \cdots & J1_{1n}^{ca} & J1_{1n}^{cb} & J1_{1n}^{cc} \\ \hline J1_{21}^{aa} & J1_{21}^{ab} & J1_{21}^{ac} & J1_{22}^{aa} & J1_{22}^{ab} & J1_{22}^{ac} & \cdots & J1_{2n}^{aa} & J1_{2n}^{ab} & J1_{2n}^{ac} \\ J1_{21}^{ba} & J1_{21}^{bb} & J1_{21}^{bc} & J1_{22}^{ba} & J1_{22}^{bb} & J1_{22}^{bc} & \cdots & J1_{2n}^{ba} & J1_{2n}^{bb} & J1_{2n}^{bc} \\ J1_{21}^{ca} & J1_{21}^{cb} & J1_{21}^{cc} & J1_{22}^{ca} & J1_{22}^{cb} & J1_{22}^{cc} & \cdots & J1_{2n}^{ca} & J1_{2n}^{cb} & J1_{2n}^{cc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline J1_{n1}^{aa} & J1_{n1}^{ab} & J1_{n1}^{ac} & J1_{n2}^{aa} & J1_{n2}^{ab} & J1_{n2}^{ac} & \cdots & J1_{nn}^{aa} & J1_{nn}^{ab} & J1_{nn}^{ac} \\ J1_{n1}^{ba} & J1_{n1}^{bb} & J1_{n1}^{bc} & J1_{n2}^{ba} & J1_{n2}^{bb} & J1_{n2}^{bc} & \cdots & J1_{nn}^{ba} & J1_{nn}^{bb} & J1_{nn}^{bc} \\ J1_{n1}^{ca} & J1_{n1}^{cb} & J1_{n1}^{cc} & J1_{n2}^{ca} & J1_{n2}^{cb} & J1_{n2}^{cc} & \cdots & J1_{nn}^{ca} & J1_{nn}^{cb} & J1_{nn}^{cc} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2-16) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J1_{kk}^{pp} &= \frac{\partial P_k^p}{\partial \delta_k^p} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_k^p} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J1_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial P_k^p}{\partial \delta_i^\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_i^\phi} \\
 &= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-22)
 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ย่อย $J2^{abc}$: จากสมการที่ (2-16) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J2_{kk}^{pp} &= \frac{\partial P_k^p}{\partial |V_k^p|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial |V_k^p|} \\
 &= 2|V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \cos(\theta_{k,k}^{pp}) + \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \\
 &\quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J2_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial P_k^p}{\partial |V_i^\phi|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial |V_i^\phi|} \\
 &= |V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-24)
 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ย่อย $J3^{abc}$: จากสมการที่ (2-17) จะได้

$$\begin{aligned}
 J3_{kk}^{pp} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_k^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_k^p} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J3_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_i^\phi} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_i^\phi} \\
 &= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-26)
 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ย่อย $J4^{abc}$: จากสมการที่ (2-17) จะได้

$$\begin{aligned}
 J4_{kk}^{pp} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_k^p|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial |V_k^p|} \\
 &= 2|V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \sin(\theta_{k,k}^{pp}) - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \\
 &\quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J4_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_i^\phi|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial |V_i^\phi|} \\
 &= -|V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (2-28)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2-20) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta\delta^{abc} \\ \Delta|V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P^{abc} \\ \Delta Q^{abc} \end{bmatrix}^{(h)}$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้หรือ $\max(|P_{mis,max}^{abc}|, |Q_{mis,max}^{abc}|) < \epsilon_{tot}$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรกและครั้งต่อไป

2) คำนวณเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ Y_{bus}^{abc} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)

3) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

4) คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน $J1-J4$

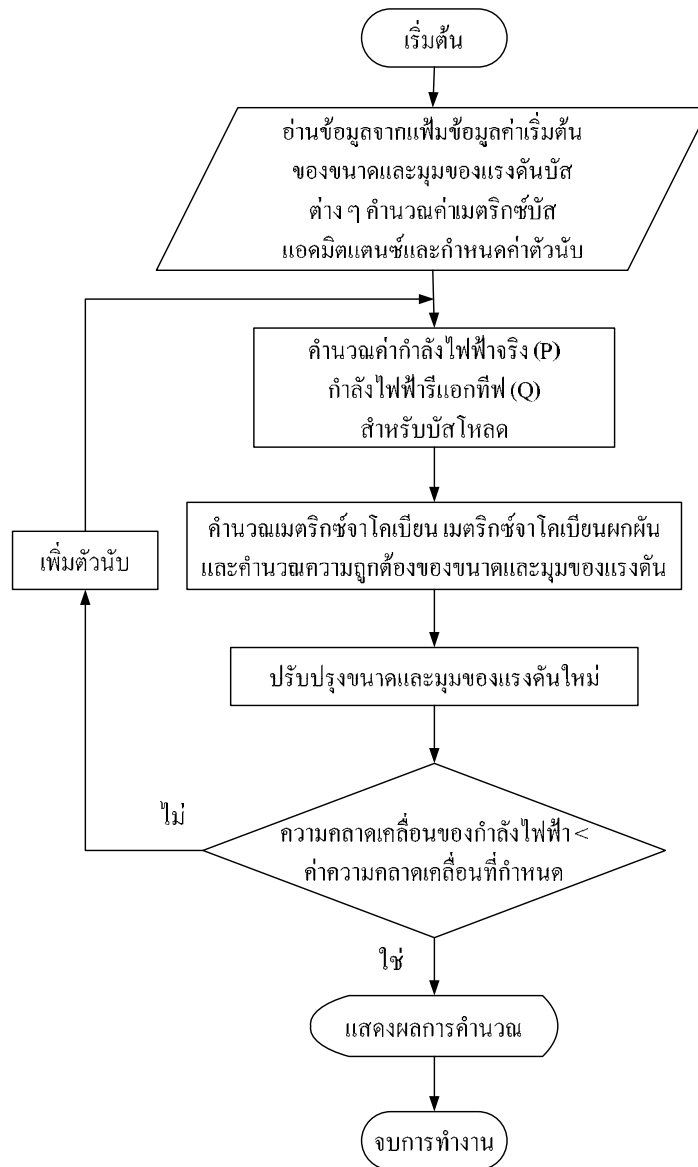
5) คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ ทุกบัส

6) คำนวณ δ^{abc} และ $|V^{abc}|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ กับค่าเก่า

7) ตรวจสอบค่า ΔP^{abc} และ ΔQ^{abc} หรือค่า $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่

8) ถ้า ΔP^{abc} และ ΔQ^{abc} หรือค่า $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

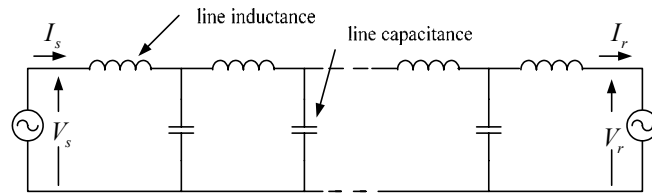
สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.4 การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

คุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับมีพารามิเตอร์กระจายในวงจร ประกอบด้วย ความต้านทานไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอนุกรม และความจุไฟฟ้าขนาน ลักษณะการทำงานของสายส่งเบื้องต้นหาได้จากส่วนประกอบวงจรรีแอกทีฟคือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอนุกรม l และความจุไฟฟ้าขนาน c แสดงเป็นส่วนประกอบแบบก้อนเดียว (lumped-element) แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบแบบก้อนเดียวของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless line)

การส่งกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.6 กำหนดโดยสมการ

$$P = \frac{V_s V_r}{Z_0 \sin \theta} \sin \delta \quad (2-29)$$

โดยที่ V_s คือ ขนาดของแรงดันปลายส่ง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

V_r คือ ขนาดของแรงดันปลายรับ (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

δ คือ มุมเฟสระหว่าง V_s และ V_r (มุมเฟสของการส่งจ่ายหรือโหลด)

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์เสิร์จ (surge impedance) มีค่าเท่ากับ $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

θ คือ ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งมีหน่วยเป็นเรเดียน

พิจารณาลักษณะสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบอุมคติ อิมพีแดนซ์เสิร์จ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า natural loading จะส่งกำลังไฟฟ้างตามสมการที่ (2-30)

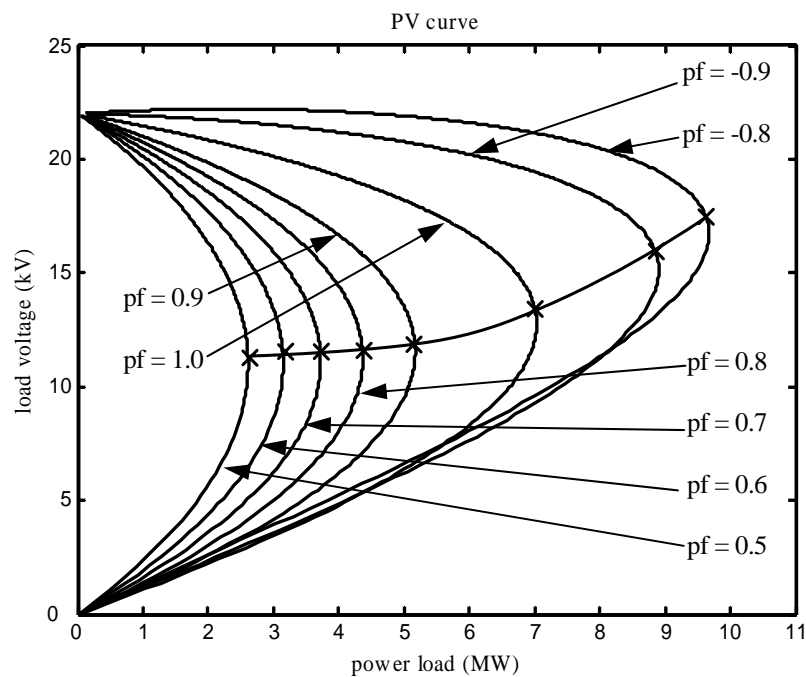
$$P_0 = \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (2-30)$$

ที่ค่า natural loading ขนาดของแรงดันสายส่งจะคงที่ และแรงดันกับกระแสมีเฟสตรงกัน (ตัวประกอบกำลังเป็น 1.0) ที่สภาวะนี้ การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีความสมดุลมาก และสายส่งเป็นตัวชดเชยแบบขนานด้วยตัวเอง ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของรีแอกแตนซ์สายส่งอนุกรมได้มาจากการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของความจุไฟฟ้าขนานของสายส่ง

โหลดส่วนใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นส่วนประกอบของความเหนี่ยวนำไฟฟ้า / เมื่อโหลดมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้โหลดมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายผ่านสายส่งลดลงตามสมการที่ (2-30) แรงดันที่ตกคร่อมสายส่งน้อยลงและ

แรงดันที่โหลดลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (ตัวเก็บประจุ c) เพื่อให้โหลดมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์เสิร์จ

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่โหลด P (MW) กับแรงดันที่บัสโหลด V (kV) เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า PV curve ที่ตัวประกอบกำลังค่าต่าง ๆ จากรูปที่ 2.7 เส้นที่ลากขวางกราฟทุกเส้นเป็นจุดฟังก์ทลยของแรงดันที่โหลดต่าง ๆ จะเห็นว่าที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 ถึง 1.0 จุดฟังก์ทลยของแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น ปกติเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบกำลังลดลง ส่งผลทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้น้อยลง และแรงดันที่โหลดลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้ตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นตามสมการ $pf = P/S$ เมื่อ $(S = P + jQ)$ และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และแรงดันไม่ตก

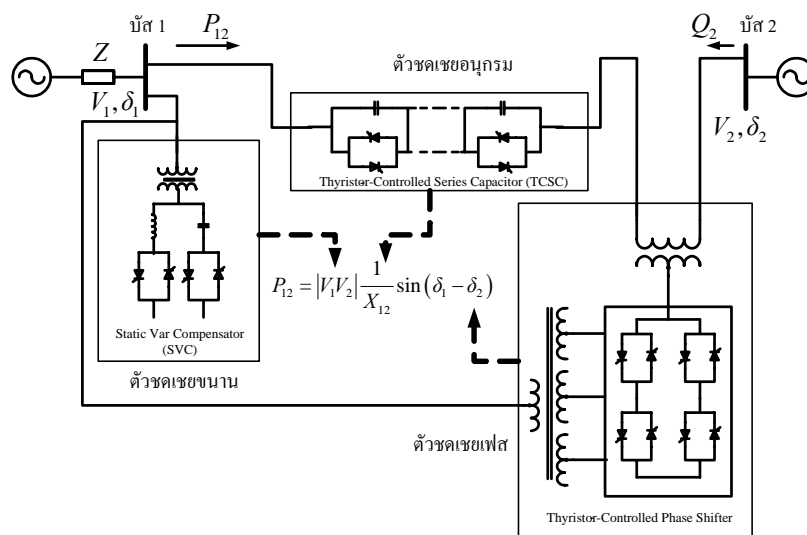


รูปที่ 2.7 เส้นโค้งกำลัง-แรงดัน

สำหรับการชดเชยในที่นี่จะกล่าวถึงตัวชดเชยในตระกูล Flexible AC Transmission Systems หรือเรียกย่อ ๆ ว่า FACTS ซึ่งจะประกอบด้วยตัวชดเชยแบบขนาน ตัวชดเชยแบบอนุกรม ตัวเลื่อนเฟส และตัวชดเชยแบบผสม ตัวชดเชยที่กล่าวมาจะมีหน้าที่และวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แตกต่างกัน การต่อตัวชดเชย FACTS ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงเป็นการเชื่อมต่อระหว่างบัส 2 บัส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในรูปเป็นแบบแผนพื้นฐานการควบคุมไทรสเตอร์ของ FACTS สามารถอธิบายเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

1) การชดเชยแบบขนาน (shunt compensation)

ตัวชดเชยแบบขนานของอุปกรณ์ FACTS มีหลายชนิด ได้แก่ Static Var Compensator (SVC), Static Synchronous Compensator (STATCOM) ตัวชดเชยทั้งสองมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ SVC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ที่ละตัวแต่ STATCOM จะใช้การสวิตช์แบบ converter ในการจ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ ทั้งสองตัวสามารถจ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟได้ทั้งบวกและลบ (มีทั้ง C และ L) จากรูปที่ 2.8 ตัวชดเชยแบบขนานจะต่อเข้ากับบัสที่ต้องการชดเชยกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ ทำให้แรงดันที่บัสสูงขึ้น และการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามสมการที่ปรากฏ



รูปที่ 2.8 แบบแผนพื้นฐานไทรสเตอร์ของตัวควบคุม FACTS

2) การชดเชยแบบอนุกรม (series compensation)

ตัวชดเชยแบบอนุกรมของอุปกรณ์ FACTS มีหลายชนิด ได้แก่ Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC), Static Synchronous Series Compensator (SSSC), Dynamic Voltage Restorer (DVR) ตัวชดเชยทั้งสามมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ TCSC จะใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ที่ละตัวแต่ SSSC และ DVR จะใช้การสวิตช์แบบ converter ในการจ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ จากรูปที่ 2.8 ตัวชดเชยแบบอนุกรมจะต่อระหว่างบัสโหนดที่ต้องการชดเชยกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ โดยอิมพีแดนซ์ของตัวชดเชยจะอนุกรมกับสายส่งและจะทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายส่งลดลง ทำให้การไหลกำลังไฟฟ้าสายส่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามสมการที่ปรากฏ

3) การชดเชยแบบเลื่อนเฟส (phase-shifter)

ตัวชดเชยแบบเลื่อนเฟส หรือเรียกว่า Thyristor-Controlled Phase Shifter ตัวเลื่อนเฟส ไม่ได้มีผลกับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยตรง แต่จะเป็นตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าในระบบให้สมดุลมากที่สุด โดยเฟสได้มาจากการทำงานของชุดสวิตช์ในส่วนของหม้อแปลงปรับแก้ได้และจ่ายให้กับระบบผ่านหม้อแปลงอนุกรม

4) การชดเชยแบบผสม (hybrid compensation)

ตัวชดเชยแบบผสมเป็นตัวชดเชยที่รวมเอาทั้งตัวชดเชยแบบขนานและแบบอนุกรมไว้ในตัวเดียวกัน เรียกว่า Unified Power Flow Controller (UPFC) และ Interline Power Flow Controller (IPFC) ตัวชดเชยแบบผสมเป็นอุปกรณ์ FACTS ที่สมบูรณ์มากในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ UPFC สามารถควบคุมพารามิเตอร์ของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ทั้งหมด (แรงดัน อิมพีแดนซ์ และมุมเฟส) และควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่ง ส่วน IPFC ใช้ในการควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้ สำหรับระบบสายส่งหลาย ๆ เส้น เช่น การทำงานร่วมกันของ SSSC ต่อเชื่อมกันระหว่างสายส่ง 2 เส้น การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นอิสระต่อกัน สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างสายส่งที่ชดเชยได้ เป็นต้น

2.5 โครงสร้างและการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย

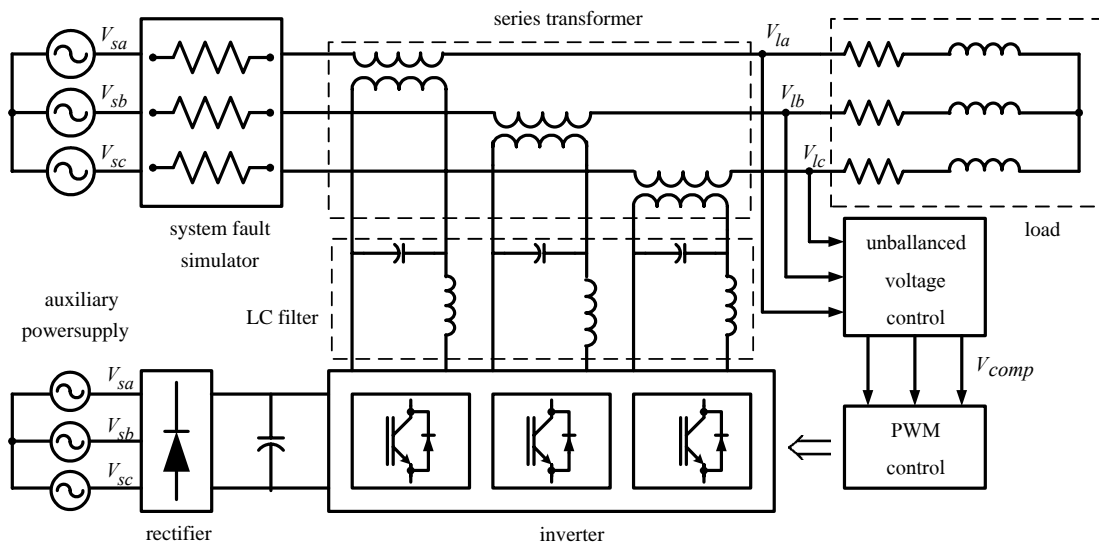
1) วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Converter: VSC)

วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (หรืออินเวอร์เตอร์) จะแปลงแรงดันกระแสตรงจากอินพุตซึ่งเป็นตัวเก็บประจุกระแสตรง (dc-link) เป็นแรงดันกระแสสลับจ่ายให้กับวงจรกรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอก (LC-filter) วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันจะเป็นแบบเฟสเดียวสามชุดต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส โดยในแต่ละชุดประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (IGBT เป็นต้น) ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรชุดละ 4 ตัว การควบคุมและการทำงานของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันแต่ละชุดจะเป็นอิสระต่อกัน

2) แหล่งจ่ายกำลังงาน

DVR ต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในการฟื้นฟูแรงดัน ซึ่งสามารถจ่ายโดยพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ หรือแหล่งจ่ายช่วย หรือจากสายส่งที่เชื่อมต่อแบบขนานกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทั้งหมดเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ข้อดีของ DVR คือ มีแหล่งจ่ายกำลังงานภายนอกที่เก็บหรือสะสมพลังงานเอาไว้และเตรียมพร้อมตลอดเวลาสำหรับการทำงาน ทำให้ DVR สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด

ปลายทางที่ต่ออยู่ได้เมื่อในระบบเกิดความผิดปกติต่าง ๆ แล้วทำให้เกิดไฟดับ แต่โหลดยังสามารถทำงานต่อไป



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

3) หม้อแปลงอนุกรม

สำหรับแบบแผนของหม้อแปลงอนุกรม แรงดันที่จ่ายมากที่สุดหาได้จากแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง (DC-link voltage) โครงสร้างของหม้อแปลงอนุกรม จะต่อแบบขั้น (cascaded) กับสวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ การใช้งานจะเน้นที่ขนาดพอเหมาะและมีกำลังงานสูญเสียน้อย

4) วงจรกรอง (Filter)

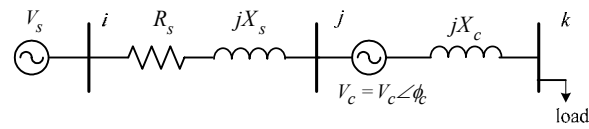
วงจรกรองที่ใช้ LC-filter ใช้สำหรับกรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอกที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แล้วผ่านสู่หม้อแปลงอนุกรม แบบแผนของวงจรกรองใน DVR สามารถเป็นชนิดในสายหรือในอินเวอร์เตอร์ของหม้อแปลงอนุกรม การสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกซึ่งจะต้องกรองก่อนจ่ายให้กับโหลด

5) ชุดควบคุม

ชุดควบคุมจะประกอบด้วยชุดตรวจวัดแรงดันที่ปลายสายเพื่อวินิจฉัยถึงสถานะแรงดันของโหลดในแต่ละเฟส และชุดควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ในการควบคุมแบบ PWM

เมื่อพิจารณา DVR ในสถานะคงตัวสามารถพิจารณาได้เป็นแบบจำลองดังรูปที่ 2.10 เมื่อ V_c คือ เฟสเซอร์แรงดันที่ DVR จ่ายให้กับระบบ X_c คือ รีแอกแตนซ์ของ DVR พารามิเตอร์ที่

สำคัญที่สามารถควบคุมได้และมีผลกับการไหลกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบคือ ขนาดและมุมเฟสของ DVR รวมทั้งรีแอคแตนซ์ของ DVR



รูปที่ 2.10 ระบบสายป้อนอย่างง่ายที่ติดตั้ง DVR

2.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบสามเฟสไม่สมดุล การชดเชยกำลังไฟฟารีแอคทีฟและโครงสร้างและการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสถานะคงตัวที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

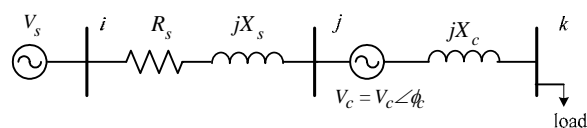
3.1 บทนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในบทที่ 2 เป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบในสถานะคงตัว ระบบประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สายป้อน และโหลด โดยไม่มีการติดตั้งตัวชดเชยเข้าไปในระบบ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แบบจำลองในสถานะคงตัวของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัวในรูปของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ลำดับต่อมา กล่าวถึงแบบจำลองการฉีดกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ เนื่องจากการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอนุกรมกับสายป้อนทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายป้อนเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามด้วย รวมถึงการหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและวิธีนิวตัน-ราฟสัน ต้องปรับปรุงสมการการคำนวณเพื่อให้ได้ผลเฉลยแรงดันที่ได้รับการชดเชยจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต รวมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติด้วยการลัดวงจรในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกที่บัสใกล้เคียง และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยแรงดันให้มีขนาดแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ

3.2 แบบจำลองในสถานะคงตัวของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสถานะคงตัวสามารถพิจารณาได้ด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 3.1 เมื่อ V_c คือ เฟสเซอร์แรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจ่ายให้กับระบบ X_c คือ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (ทศพล รัตน์นิยมชัย และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2548)



รูปที่ 3.1 ระบบสายป้อนอย่างง่ายที่ติดตั้ง DVR

ใช้หลักการ KCL หาผลรวมของกระแสที่บัสใด ๆ จะได้ว่า

$$\text{บัส } i: Y_s V_i - Y_s V_j = I_s \quad (3-1)$$

$$\text{บัส } j: Y_s V_i - (Y_s + Y_c) V_j + Y_c V_k = I_c \quad (3-2)$$

$$\text{บัส } k: Y_c V_j - (Y_c - Y_k) V_k = I_c \quad (3-3)$$

สมการ (3-1)-(3-3) สามารถเขียนให้รูปสมการโหนดได้ดังนี้

$$Y_{bus} V_{bus} = I_{bus} \quad (3-4)$$

ในกรณีการจ่ายโหลดโดยให้ตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่จะได้

$$\frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \text{pf} = \text{constant} \quad (3-5)$$

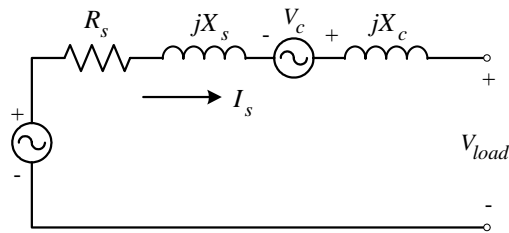
นั่นคือ

$$Q = \frac{P}{\text{pf}} \sqrt{1 - \text{pf}^2} \quad (3-6)$$

ถ้ากำหนดให้โหลดในขณะที่พิจารณามีค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนเป็น S_{load} และจากความสัมพันธ์

$$I_{load} = (S_{load} / V_{load})^* \quad (3-7)$$

จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนเป็นวงจรรูปเดียวได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของรูปที่ 3.1

ใช้หลักการ KVL กับรูปที่ 3.2 จะได้ว่า

$$V_s = V_{load} - V_c + I_s [R_s + j(X_s + X_c)] \quad (3-8)$$

$$\text{นั่นคือ } V_{load} = V_s + V_c - \frac{S_{load}^*}{V_{load}^*} [R_s + j(X_s + X_c)] \quad (3-9)$$

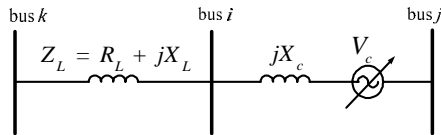
สมการที่ (3-9) เป็นสมการเริ่มต้นที่ใช้ในการหาค่าแรงดันโหลด ซึ่งจะแก้ปัญหาโดยใช้วิธีเกาส์-ไซเดล การวิเคราะห์สมรรถนะในสถานะคงตัวของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ทั้งก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และการควบคุมการทำงานเพื่อให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในขณะที่ยังคงรักษาระดับแรงดันโหลดให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ จะนำเสนอในบทต่อไป

3.3 แบบจำลองการฉีดกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์

หัวข้อนี้แนะนำแบบจำลองการฉีดกระแส (current injection model) ในสถานะคงตัวของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Ratniyomchai, and Kulworawanichpong, 2006) และการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ (\mathbf{Y}_{bus}) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า แบบจำลองนี้มีผลกระทบโดยตรงกับสมการการไหลกำลังไฟฟ้าและเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ ดังนั้นผลของการฉีดกระแสจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสมการการไหลกำลังไฟฟ้าจะต้องได้รับการปรับปรุง

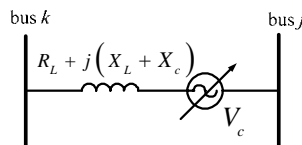
ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรมชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกระแสตรง อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแยกเฟส 3 ชุด ตัวกรอง LC หม้อแปลงอนุกรม วงจรควบคุมการสวิตช์ และ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก เป็นต้น สำหรับการทำงานในสถานะคงตัวกับโหลดที่มีค่าสูง ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะฉีดแรงดันอนุกรมกับแรงดันของสายป้อน

เพื่อช่วยยกระดับแรงดันและรักษาระดับแรงดันที่โหลดให้คงที่หรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ การ
ใช้การควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์ (Ghosh, Jindal, and Joshi, 2004) ก็เพียงพอ
สำหรับการนำเสนอแบบจำลองของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแสดงในรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าตัวฟื้นฟู
แรงดันพลวัตสมมติว่าติดตั้งอยู่ระหว่างบัส i และ j

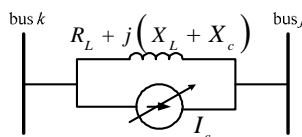


รูปที่ 3.3 ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอนุกรมกับสายป้อน

โดยทั่วไปการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีบัสชั่วคราวในการเชื่อมต่อดังในรูปที่ 3.3
บัส i เป็นบัสชั่วคราวส่งผลให้มีมิติของเมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้น บัส i จะต้องถูกกำจัด
ทิ้งไป ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจัดเรียงบัสใหม่ โดยพิจารณาเฉพาะที่ บัส k และ j โดยไม่ทำให้มิติ
ของเมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ยิ่งไปกว่านั้น รูปที่ 3.5
นำเสนอวงจรสมมูลนอร์ตัน ซึ่งจะถูกนำไปใช้แก้ไขสมการการไหลกำลังไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 3.4 วงจรที่เหลือจากการกำจัดบัส i ทิ้งไป



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลนอร์ตัน

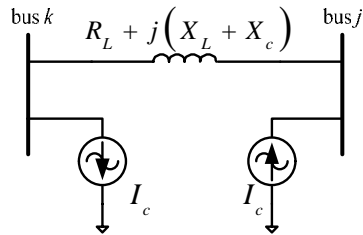
โดยที่ Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของสายป้อน

I_c คือ กระแสที่ฉีดโดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

V_c คือ แรงดันอนุกรมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

X_c คือ รีแอกแตนซ์ภายในของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

แบบจำลองการฉีดกระแสสามารถแทนได้ด้วยวงจรมุมูลในรูปที่ 3.6 ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอยู่ในรูปที่ง่ายและสามารถรวมเข้ากับสมการการไหลกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการฉีดกระแสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

จากรูปที่ 3.6 กำหนดให้

$$I_c = \frac{V_c}{R_L + j(X_L + X_c)} \quad (3-10)$$

การปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ ทำได้ดังนี้

$$Y_{bus,kk}^{new} = Y_{bus,kk}^{old} + Y_{cL} - Y_{L,kj} \quad (3-11)$$

และ

$$Y_{bus,kj}^{new} = Y_{bus,kj}^{old} - Y_{cL} + Y_{L,kj} \quad (3-12)$$

โดยที่ $Y_{bus,kk}^{old}$, $Y_{bus,kk}^{new}$ คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ก่อนและหลังปรับปรุงในตำแหน่งแนวทแยงมุมของบัส k และ j ตามลำดับ

$Y_{bus,kj}^{old}$, $Y_{bus,kj}^{new}$ คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ก่อนและหลังปรับปรุงในตำแหน่งนอกแนวทแยงมุมของบัส k และ j ตามลำดับ

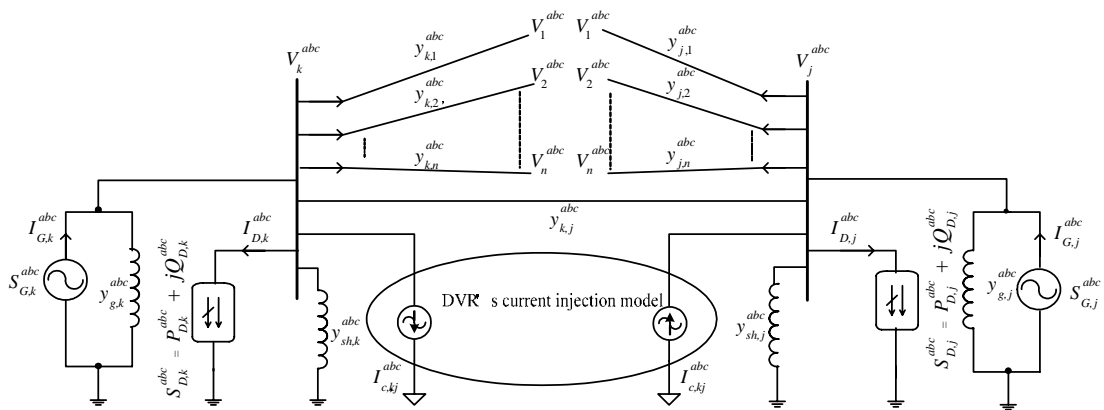
Y_{cL} คือ แอดมิตแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตรวมกับสายป้อนระหว่างบัส k และ j

$Y_{L,kj}$ คือ แอดมิตแตนซ์ของสายป้อนระหว่างบัส k และ j

3.4 ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

จากการพัฒนาแบบจำลองการคิดกระแสและปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ ในหัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Ratniyomchai, and Kulworawanichpong, 2006) ดังนี้

3.4.1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล



รูปที่ 3.7 แผนผังระบบไฟฟ้าบัส k และ บัส j เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้การวิเคราะห์แบบโนด จะได้สมการสมดุลกระแสที่บัส k ใด ๆ ดังนี้

$$y_{k,1}^{abc} (V_k^{abc} - V_1^{abc}) + y_{k,2}^{abc} (V_k^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{k,n}^{abc} (V_k^{abc} - V_n^{abc}) + I_{c,kj}^{abc} = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} \tag{3-13ก}$$

สำหรับบัส j จะได้

$$y_{j,1}^{abc} (V_j^{abc} - V_1^{abc}) + y_{j,2}^{abc} (V_j^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{j,n}^{abc} (V_j^{abc} - V_n^{abc}) + I_{c,kj}^{abc} = I_{G,j}^{abc} - I_{D,j}^{abc} \quad (3-13\text{ข})$$

โดยที่ $I^{abc} = y_{bus}^{abc} V^{abc}$ จะได้

$$I_k^{abc} = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n I_{k,i}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3-14)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ว่า

$$\left(\frac{S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3-15)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ เป็น

$$\left(S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc} \right)^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3-16)$$

โดยที่ $S_{G,k}^{abc}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$S_{D,k}^{abc}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่โหลดที่บัส k ตามลำดับ

V_k^{abc} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่บัส k

$y_{k,i}^{abc}$ คือ แอดมิตแตนซ์เฟส a, b และ c ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส k และบัส i

V_i^{abc} คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่บัส i

$I_{c,kj}^{abc}$ คือ กระแสไฟฟ้าเฟส a, b และ c ที่ออกจากบัส k ไปบัส j ของ DVR

จากสมการการไหลกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ กำหนดให้ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ และ

$P_{sch}^{abc} = P_G^{abc} - P_D^{abc}$ และ $Q_{sch}^{abc} = Q_G^{abc} - Q_D^{abc}$ จะได้

$$\left(S_{sch,k}^{abc} \right)^* = \left(S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc} \right)^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3-17)$$

$$\left(\frac{P_{sch,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* = \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc})$$

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} V_k^{abc} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

จากการคำนวณหาเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ (bus admittance matrix)

$$[Y]_{bus}^{abc} : \quad Y_{k,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n y_{k,i}^{abc} \quad \text{และ} \quad Y_{k,i}^{abc} = -y_{k,i}^{abc}$$

จะได้รูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = Y_{k,k}^{abc} V_k^{abc} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3-18)$$

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3-19)$$

$$\text{โดยที่} \quad Y_{k,i}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{k,i}^{aa} & Y_{k,i}^{ab} & Y_{k,i}^{ac} \\ Y_{k,i}^{ba} & Y_{k,i}^{bb} & Y_{k,i}^{bc} \\ Y_{k,i}^{ca} & Y_{k,i}^{cb} & Y_{k,i}^{cc} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V_i^{abc} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V_k^{abc} = \begin{bmatrix} V_k^a \\ V_k^b \\ V_k^c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3-18) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังนี้

$$V_k^{abc} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3-20)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุงที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{\left(V_k^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3-21)$$

สมการที่ (3-21) เป็นการปรับปรุงตามวิธีการวนรอบแบบเกาส์ ดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุงจาก 1 ไปถึง n ตามลำดับ ดังนั้นในการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว วิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั่นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลสำหรับบัส k ดังนี้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{\left(V_k^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3-22ก)$$

สำหรับบัส j จะได้

$$V_j^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{j,j}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,j}^{abc} - jQ_{sch,j}^{abc}}{\left(V_j^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{i=1}^{j-1} Y_{j,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=j+1}^n Y_{j,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3-22ข)$$

สมการที่ (3-22ก) และ (3-22ข) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีการกำหนดบัสสแล็ก เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วย โดยปกติแล้วกำหนดให้เฟส a มีมุมเฟสเป็น 0 องศา เฟส b มีมุมเฟสเป็น -120 องศา และเฟส c มีมุมเฟสเป็น 120 องศา สำหรับบัสสแล็ก

และไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น

3.4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\text{จากสมการที่ (3-19) ได้แก่ } \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

จัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ จะได้ว่า

$$\frac{(S_{sch,k}^{abc})^*}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

$$(S_{sch,k}^{abc})^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3-23)$$

สมการที่ (3-23) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส k ใดๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$V_k^{abc} = |V_k^{abc}| \angle \delta_k^{abc} = |V_k^{abc}| e^{j\delta_k^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } k$$

$$V_i^{abc} = |V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc} = |V_i^{abc}| e^{j\delta_i^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } i$$

$$I_{c,kj}^{abc} = |I_{c,kj}^{abc}| \angle \alpha_{c,kj}^{abc} = |I_{c,kj}^{abc}| e^{j\alpha_{c,kj}^{abc}} \quad \text{คือ กระแสไฟฟ้า 3 เฟสของ DVR จากบัส } k \text{ ไปยังบัส } j$$

$$Y_{k,i}^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| e^{j\theta_{k,i}^{abc}} \quad \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของเมตริกซ์บัส}$$

แอดมิตแตนซ์ 3 เฟส

จากสมการที่ (3-23) เมื่อพิจารณาในรูปพิกัดเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} (S_{sch,k}^{abc})^* &= (|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}) \sum_{i=1}^n [(|Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc}) (|V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc})] \\ &+ (|I_{c,kj}^{abc}| \angle \alpha_{c,kj}^{abc}) (|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (S_{sch,k}^{abc})^* &= \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \angle(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) \\ &\quad + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \angle(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \end{aligned} \quad (3-24)$$

โดยที่ $S_{sch}^{abc} = P_{sch}^{abc} + jQ_{sch}^{abc}$ และ $P_{sch}^{abc} = P_G^{abc} - P_D^{abc}$ และ $Q_{sch}^{abc} = Q_G^{abc} - Q_D^{abc}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} &(P_{G,k}^{abc} - P_{D,k}^{abc}) - j(Q_{G,k}^{abc} - Q_{D,k}^{abc}) \\ &= \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \angle(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \angle(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \end{aligned} \quad (3-25)$$

สำหรับเฟสเซอร์แรงดันบั๊ตที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการนี้จะทำให้สมการสมดุลอย่างไรก็ตามในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบั๊ตซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นโดยการกำหนดให้แรงดันบั๊ตเริ่มต้นทุกบั๊ตมีค่าเป็น $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. สำหรับเฟส a , $1.0 \angle -120^\circ$ สำหรับเฟส b และ $1.0 \angle 120^\circ$ สำหรับเฟส c หรืออาจจะใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบจะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงานไฟฟ้าที่บั๊ตขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนี้

$$\Delta P_k^{abc} = P_{sch,k}^{abc} - P_{cal,k}^{abc} = f_{p,k}^{abc}$$

$$\Delta Q_k^{abc} = Q_{sch,k}^{abc} - Q_{cal,k}^{abc} = f_{q,k}^{abc}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } P_{cal,k}^{abc} &= \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \cos(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) \\ &\quad + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \cos(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \end{aligned} \quad (3-26)$$

$$\begin{aligned} Q_{cal,k}^{abc} &= -\sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \sin(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) \\ &\quad - |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \sin(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \end{aligned} \quad (3-27)$$

หรือ

$$\text{บัส } k: P_{cal,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-28ก)$$

$$Q_{cal,k}^{abc} = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-28ข)$$

$$\text{บัส } j: P_{cal,j}^{abc} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_j^p V_i^\phi Y_{j,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{j,i}^{p\phi} - \delta_j^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_j^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_j^p) \quad (3-29ก)$$

$$Q_{cal,j}^{abc} = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_j^p V_i^\phi Y_{j,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{j,i}^{p\phi} - \delta_j^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_j^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_j^p) \quad (3-29ข)$$

โดยที่ $p \in (a, b, c)$ และ $\phi \in (a, b, c)$

ใช้วิธีการวนรอบของนิวตัน-ราฟสันประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใด ๆ จะได้

$$f_{p,k+1}^{abc} = \Delta P_{k+1}^{abc} = \Delta P_k^{abc} + [\nabla f_{p,k}^{abc}]^T \cdot \Delta X^{abc} = 0$$

$$\Delta P_k^{abc} = -[\nabla f_{p,k}^{abc}]^T \cdot \Delta X^{abc}$$

โดยที่ $X = [\delta^{abc} \quad |V^{abc}|]^T$ นั่นคือ

$$\Delta P_k^{abc} = -\left(\frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \right)$$

เนื่องจาก $P_{sch,k}^{abc}$ มีค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า $\frac{\partial f_{p,k}^{abc}}{\partial X} = -\frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial X}$ นั่นคือ

$$\Delta P_k^{abc} = \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (3-30)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k^{abc} = \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (3-31)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธี
นิวตัน-ราฟสัน หรือ Mismatches (power) = Jacobian \times Corrections (voltage) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{abc} \\ \Delta Q^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial P_{cal}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \\ \frac{\partial Q_{cal}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial Q_{cal}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1^{abc} & J2^{abc} \\ J3^{abc} & J4^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{abc} \\ \Delta P_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{abc} \\ \Delta Q_1^{abc} \\ \Delta Q_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \vdots & \vdots & J1 & \vdots & \vdots & \vdots & J2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} & \dots & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{abc} \\ \Delta \delta_2^{abc} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{abc} \\ \Delta |V_1^{abc}| \\ \Delta |V_2^{abc}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{abc}| \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

ถ้าให้ บัสดที่ m เป็นบัสดเล็ก จากสมการที่ 2.25 หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ได้ดังนี้

$$\text{เมตริกซ์ย่อย } J1^{abc} : \text{ โดยที่ } [J1^{abc}] = \begin{bmatrix} J1_{11}^{abc} & J1_{12}^{abc} & \cdots & J1_{1(n-1)}^{abc} \\ J1_{21}^{abc} & J1_{22}^{abc} & \cdots & J1_{2(n-1)}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J1_{n1}^{abc} & J1_{n2}^{abc} & \cdots & J1_{n(n-1)}^{abc} \end{bmatrix}$$

$$J1^{abc} = \begin{bmatrix} J1_{11}^{aa} & J1_{11}^{ab} & J1_{11}^{ac} & J1_{12}^{aa} & J1_{12}^{ab} & J1_{12}^{ac} & \cdots & J1_{1n}^{aa} & J1_{1n}^{ab} & J1_{1n}^{ac} \\ J1_{11}^{ba} & J1_{11}^{bb} & J1_{11}^{bc} & J1_{12}^{ba} & J1_{12}^{bb} & J1_{12}^{bc} & \cdots & J1_{1n}^{ba} & J1_{1n}^{bb} & J1_{1n}^{bc} \\ J1_{11}^{ca} & J1_{11}^{cb} & J1_{11}^{cc} & J1_{12}^{ca} & J1_{12}^{cb} & J1_{12}^{cc} & \cdots & J1_{1n}^{ca} & J1_{1n}^{cb} & J1_{1n}^{cc} \\ J1_{21}^{aa} & J1_{21}^{ab} & J1_{21}^{ac} & J1_{22}^{aa} & J1_{22}^{ab} & J1_{22}^{ac} & \cdots & J1_{2n}^{aa} & J1_{2n}^{ab} & J1_{2n}^{ac} \\ J1_{21}^{ba} & J1_{21}^{bb} & J1_{21}^{bc} & J1_{22}^{ba} & J1_{22}^{bb} & J1_{22}^{bc} & \cdots & J1_{2n}^{ba} & J1_{2n}^{bb} & J1_{2n}^{bc} \\ J1_{21}^{ca} & J1_{21}^{cb} & J1_{21}^{cc} & J1_{22}^{ca} & J1_{22}^{cb} & J1_{22}^{cc} & \cdots & J1_{2n}^{ca} & J1_{2n}^{cb} & J1_{2n}^{cc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J1_{n1}^{aa} & J1_{n1}^{ab} & J1_{n1}^{ac} & J1_{n2}^{aa} & J1_{n2}^{ab} & J1_{n2}^{ac} & \cdots & J1_{nn}^{aa} & J1_{nn}^{ab} & J1_{nn}^{ac} \\ J1_{n1}^{ba} & J1_{n1}^{bb} & J1_{n1}^{bc} & J1_{n2}^{ba} & J1_{n2}^{bb} & J1_{n2}^{bc} & \cdots & J1_{nn}^{ba} & J1_{nn}^{bb} & J1_{nn}^{bc} \\ J1_{n1}^{ca} & J1_{n1}^{cb} & J1_{n1}^{cc} & J1_{n2}^{ca} & J1_{n2}^{cb} & J1_{n2}^{cc} & \cdots & J1_{nn}^{ca} & J1_{nn}^{cb} & J1_{nn}^{cc} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3-28ก) จะได้ว่า

$$J1_{kk}^{pp} = \frac{\partial P_k^p}{\partial \delta_k^p} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_k^p}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$$

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (3-33ก)

$$\text{บัสด k: } J1_{kk}^{pp(DVR)} = J1_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-33ข)$$

บ้สจ: $J1_{jj}^{pp(DVR)} = J1_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3-33ก)

$$J1_{ki}^{p\phi} = \frac{\partial P_k^p}{\partial \delta_i^\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_i^\phi}$$

$$= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้่า } i = k, p \neq \phi \quad (3-34)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2^{abc}$: จากสมการที่ (3-28ก) จะได้

$$J2_{kk}^{pp} = \frac{\partial P_k^p}{\partial |V_k^p|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_k^p|}$$

$$= 2|V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \cos(\theta_{k,k}^{pp}) + \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)$$

$$+ |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$$

$$\quad \text{ถ้่า } i = k, p \neq \phi \quad (3-35ก)$$

บ้สค: $J2_{kk}^{pp(DVR)} = J2_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3-35ข)

บ้สจ: $J2_{jj}^{pp(DVR)} = J2_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3-35ค)

$$J2_{ki}^{p\phi} = \frac{\partial P_k^p}{\partial |V_i^\phi|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_i^\phi|}$$

$$= |V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้่า } i = k, p \neq \phi \quad (3-36)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3^{abc}$: จากสมการที่ (3-28ข) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J3_{kk}^{pp} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_k^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_k^p} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \\
 &\quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (3-37\text{ก})
 \end{aligned}$$

$$\text{ข้อ ก: } J3_{kk}^{pp(DVR)} = J3_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-37ข)$$

$$\text{ข้อ จ: } J3_{jj}^{pp(DVR)} = J3_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-37ค)$$

$$\begin{aligned}
 J3_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_i^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_i^p} \\
 &= -\sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (3-38)
 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ย่อย $J4^{abc}$: จากสมการที่ (3-28ข) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J4_{kk}^{pp} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_k^p|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_k^p|} \\
 &= 2|V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \sin(\theta_{k,k}^{pp}) - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \\
 &\quad - |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \\
 &\quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (3-39\text{ก})
 \end{aligned}$$

$$\text{บัส } k: \quad J4_{kk}^{pp(DVR)} = J4_{kk}^{pp} - |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-39\text{ข})$$

$$\text{บัส } j: \quad J4_{jj}^{pp(DVR)} = J4_{jj}^{pp} + |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3-39\text{ค})$$

$$J4_{ki}^{p\phi} = \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_i^\phi|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_i^\phi|}$$

$$= -|V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (3-40)$$

จากสมการที่ (3-32) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta P^{abc} \\ \Delta Q^{abc} \end{bmatrix}^{(h)}$$

การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้หรือ

$$\max(|P_{mis,max}^{abc}|, |Q_{mis,max}^{abc}|) < \varepsilon_{tol}$$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรกและครั้งต่อไป

2) คำนวณและปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ Y_{bus}^{abc} ในระบบต่อหน่วย เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

3) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) สำหรับบัสโหลด

4) คำนวณและปรับปรุงเมตริกซ์จาโคเบียน $J1-J4$ เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

5) คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียนผกผัน และคำนวณความถูกต้องของแรงดัน $\Delta \delta^{abc}$ และ $\Delta |V^{abc}|$ ทุกบัส

- 6) คำนวณ δ^{abc} และ $|V^{abc}|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ กับค่าเก่า
- 7) ตรวจสอบค่า ΔP^{abc} และ ΔQ^{abc} หรือค่า $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่
- 8) ถ้า ΔP^{abc} และ ΔQ^{abc} หรือค่า $\Delta\delta^{abc}$ และ $\Delta|V^{abc}|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้แสดงผลที่ทำการคำนวณได้

3.5 ผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้า

ผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่เกิดลัดวงจร และส่วนที่ 2 เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร โดยทั้ง 2 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. การทดสอบจะแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าของบัสแต่ละบัส และจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมดุลผ่าน Z_f ลงกราวด์ที่บัสที่กำหนด เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีแรงดันบัสลดลง และจะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบเปรียบเทียบแรงดันที่บัส กระแสลัดวงจร และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบไฟฟ้าปกติ เกิดความผิดพลาดและเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่เกิดลัดวงจร

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

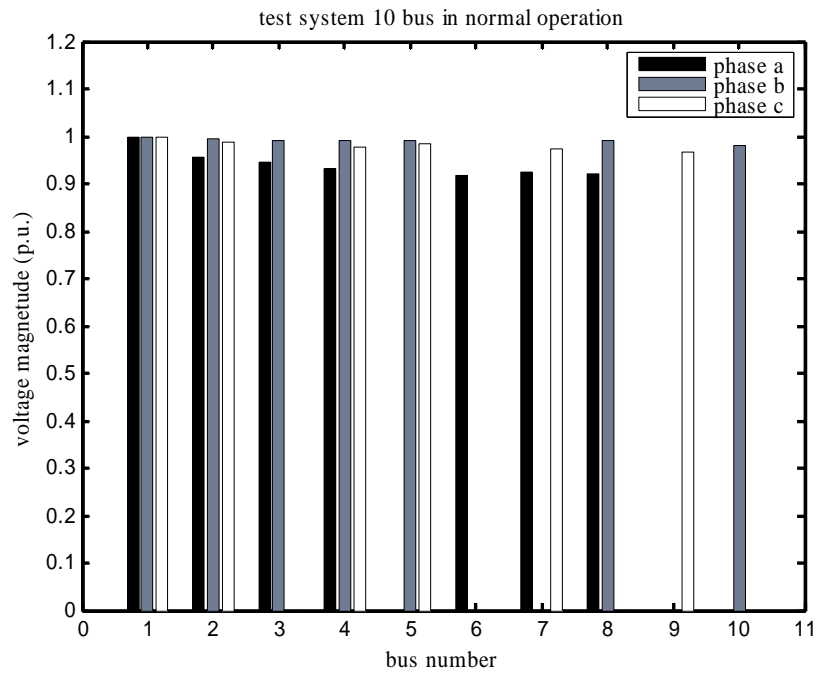
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 10 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้างแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 28.956 kW สามารถแสดงขนาดแรงดันเป็นแผนภูมิแท่งดังในรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าแรงดันค่ายอดมีขนาดใกล้เคียงกันมาก แผนภูมิแท่งสีเข้มแสดงขนาดแรงดันในเฟส a จะมีขนาดต่ำกว่าเฟสอื่น ๆ เนื่องจากโหลดในเฟส a มีขนาดสูงกว่าในเฟส b และ c สามารถดูข้อมูลของระบบทดสอบได้ในภาคผนวก ก. เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันตกที่บัส จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 4 แบบ 3 เฟสสมดุลผ่าน $Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.1 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 ทำให้แรงดันที่บัส 4 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a จาก 0.93059 เป็น 0.58502 p.u. เฟส b จาก 0.99165 เป็น 0.63809 p.u. และเฟส c จาก 0.97844 เป็น 0.64239 p.u. กำลังงาน

สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2856.200 kW เนื่องจากแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดลดลง ทำให้กระแสในสายป้อนมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังงานสูญเสียมีค่าสูงขึ้นมาก ขนาดของแรงดันที่มีขนาดลดลงพิจารณาได้จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าขนาดแรงดันของบัส 4 มีค่าต่ำที่สุด และขนาดแรงดันบัสอื่น ๆ มีขนาดลดลงจากรูปที่ 3.8 อย่างชัดเจน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสเกิดลัดวงจรทั้ง 3 เฟส โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่ติดตั้งเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุด มีการทำงานอิสระต่อกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.1 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จะพบว่าขนาดแรงดันบัสทุกบัสรวมทั้งบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น สำหรับบัส 4 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.58502 เป็น 1.04080 p.u. เฟส b จาก 0.63809 เป็น 0.92782 p.u. และเฟส c จาก 0.64239 เป็น 0.90145 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือเพียง 586.860 kW กำลังงานสูญเสียลดลงเนื่องจากขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้กระแสลดลง พิจารณาได้จากรูปที่ 3.10 รูปที่ 3.11-3.13 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแรงดันบัสในสภาวะการทำงานปกติ สภาวะการลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a b และ c ด้วยแผนภูมิแท่งสี่เหลี่ยม จาง และขาตามลำดับ พบว่าขนาดของแรงดันในเฟส a เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีขนาดมากกว่าระบบปกติเนื่องจากขนาดของแรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยในเฟส a มีขนาดมากกว่าในเฟส b และ c จากผลทดสอบสำหรับระบบทดสอบ 10 บัส แสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันตกให้มีขนาดเพิ่มขึ้นได้ รูปที่ 3.14 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.15 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.3 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 ทั้ง 3 เฟส ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 3 เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 และบัส 4 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 5.82480 เป็น 36.85900 p.u. เฟส b จาก 2.25710 เป็น 34.77780 p.u. และเฟส c จาก 1.794340 เป็น 34.59690 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 3 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 3.30090 เป็น 33.72850 p.u. เฟส b จาก 0.91250 เป็น 33.09890 p.u. และเฟส c จาก 0.92570 เป็น 33.30960 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 3 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 36.85900 เป็น 11.97930 p.u. เฟส b จาก 34.77780 เป็น 9.60250 p.u. และเฟส c จาก 34.59690 เป็น 5.88510 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 3 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากในเฟส a จาก 33.72850 เป็น 21.38310 p.u. เฟส b จาก 33.09890 เป็น 18.41690 p.u.

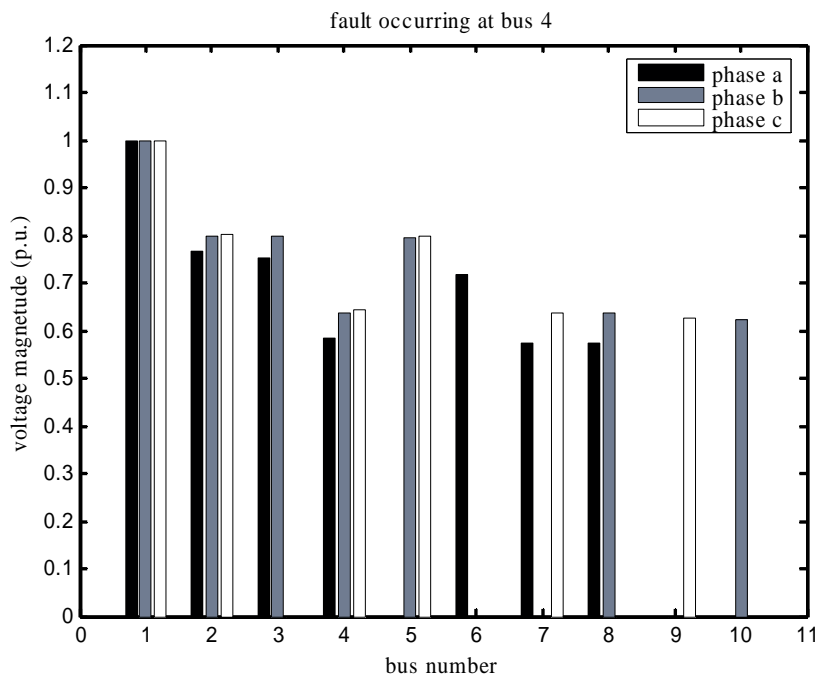
และเฟส c จาก 33.30960 เป็น 19.79500 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟิวแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟิวแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้

ตารางที่ 3.1 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัต

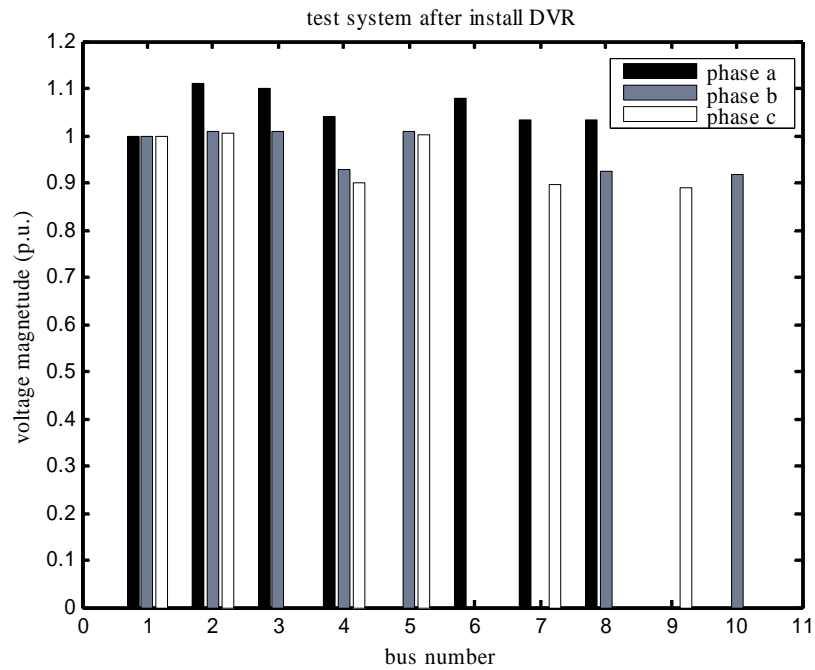
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4	เมื่อติดตั้ง DVR
2	a	0.95564	0.76528	1.10880
	b	0.99303	0.79858	1.01010
	c	0.98638	0.80188	1.00540
4	a	0.93059	0.58502	1.04080
	b	0.99165	0.63809	0.92782
	c	0.97844	0.64239	0.90145
5	a	-	-	-
	b	0.99063	0.79560	1.00770
	c	0.98423	0.79924	1.00330
7	a	0.92359	0.57370	1.03460
	b	-	-	-
	c	0.97486	0.63679	0.89762
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		28.956	2856.200	586.860



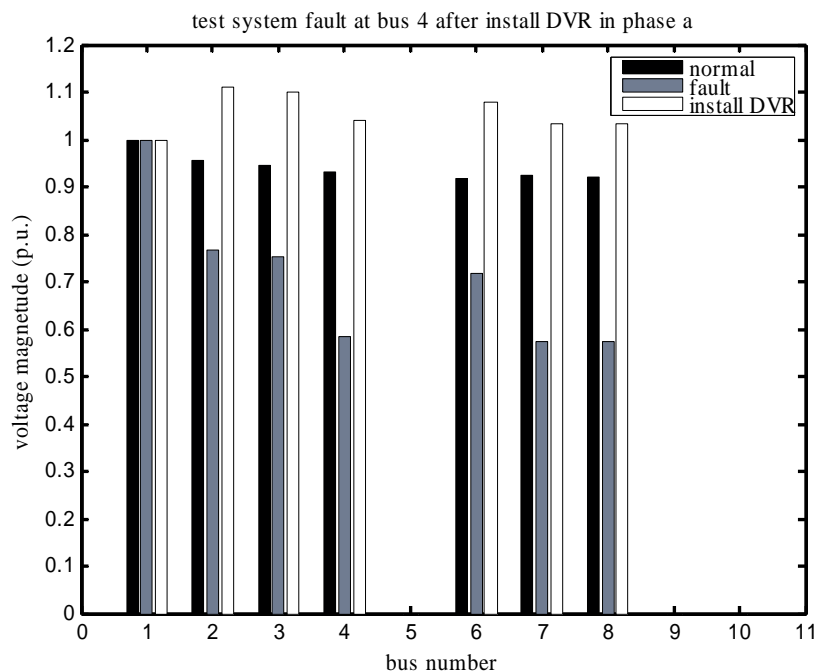
รูปที่ 3.8 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ



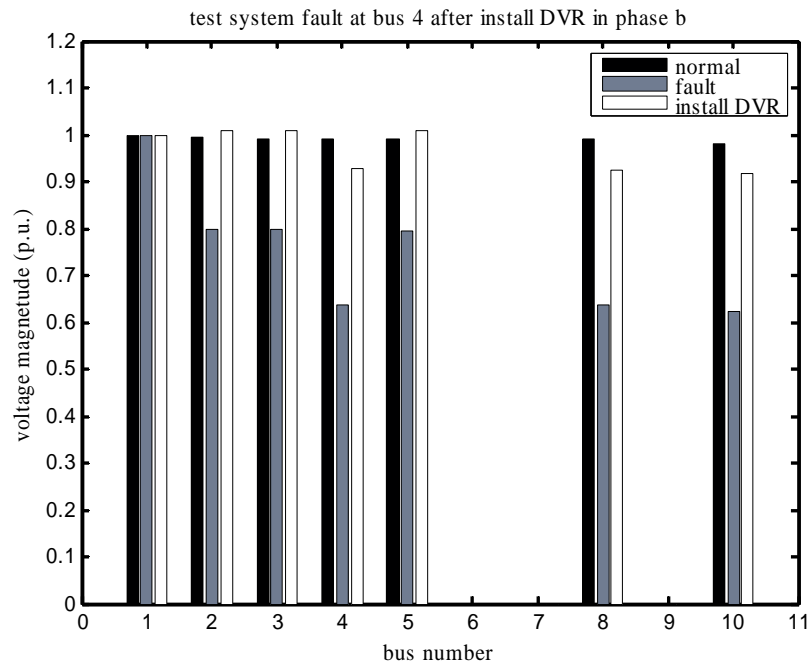
รูปที่ 3.9 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4



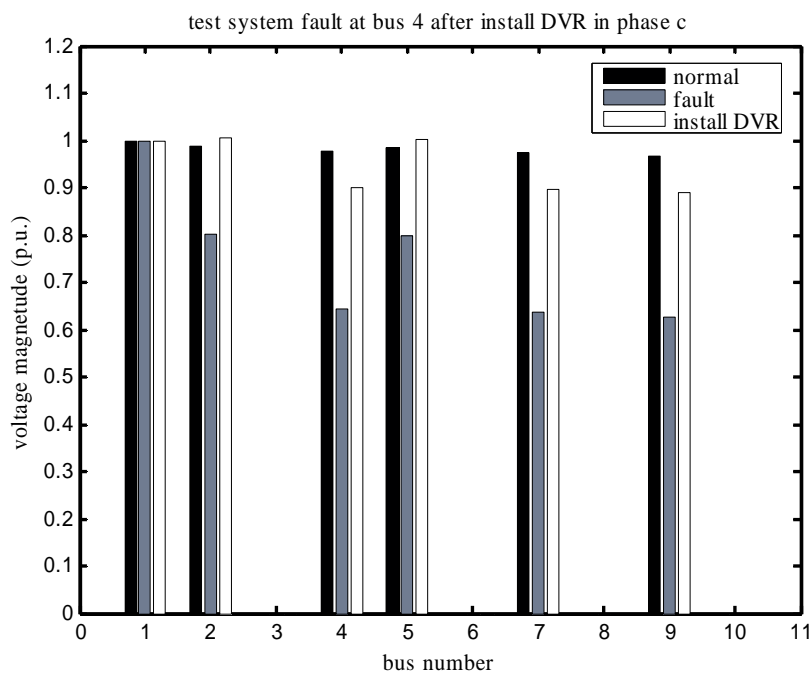
รูปที่ 3.10 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a



รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพวลวัตเฟส *b*



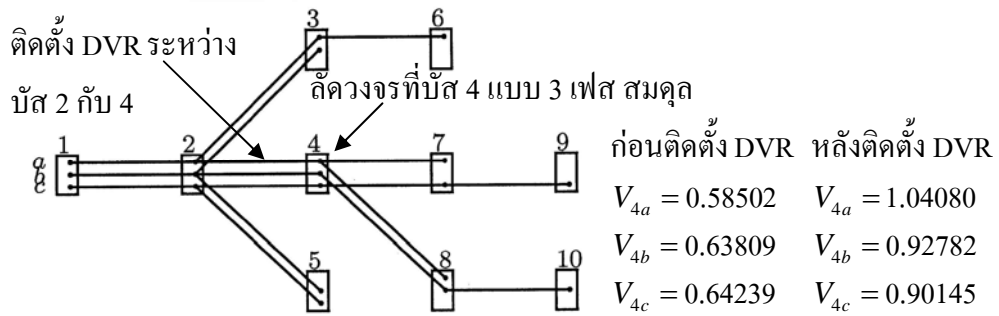
รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 10 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 4 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพวลวัตเฟส *c*

ตารางที่ 3.2 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส

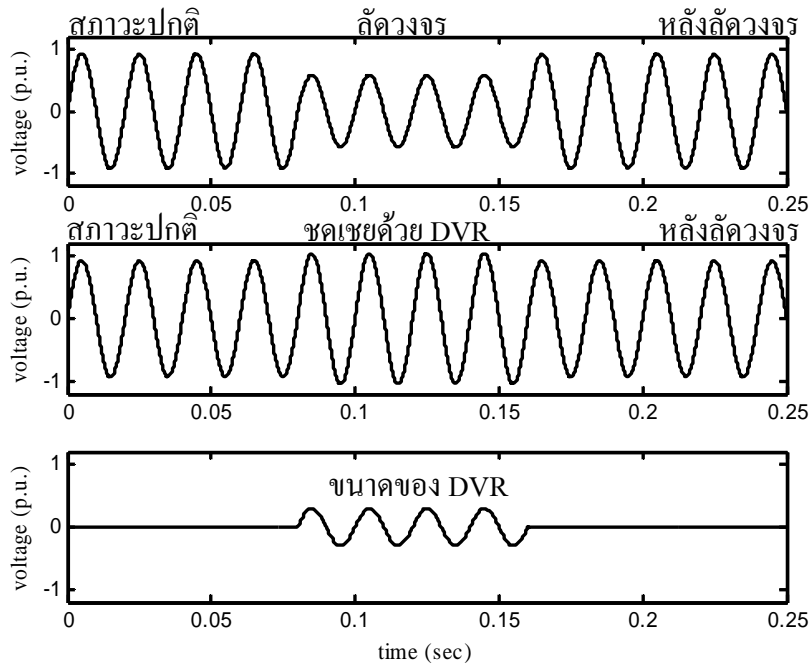
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.30122	292.32000	0.01000
<i>b</i>	0.25925	35.26900	0.01000
<i>c</i>	0.23510	266.34000	0.01000

ตารางที่ 3.3 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และ เมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	5.82480	36.85900	11.97930
	<i>b</i>	2.25710	34.77780	9.60250
	<i>c</i>	1.94340	34.59690	5.88510
2	<i>a</i>	1.94550	2.47580	1.66480
	<i>b</i>	0.39810	0.49500	0.39170
	<i>c</i>	-	-	-
3	<i>a</i>	3.30090	33.72850	21.38310
	<i>b</i>	0.91250	33.09890	18.41690
	<i>c</i>	0.92570	33.30960	19.79500
4	<i>a</i>	-	-	-
	<i>b</i>	0.39900	0.49680	0.39250
	<i>c</i>	0.52360	0.64490	0.51400
5	<i>a</i>	1.36020	1.73970	1.16140
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	-	-	-
6	<i>a</i>	1.35340	2.17880	1.21010
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	0.57570	0.88630	0.62650



รูปที่ 3.14 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

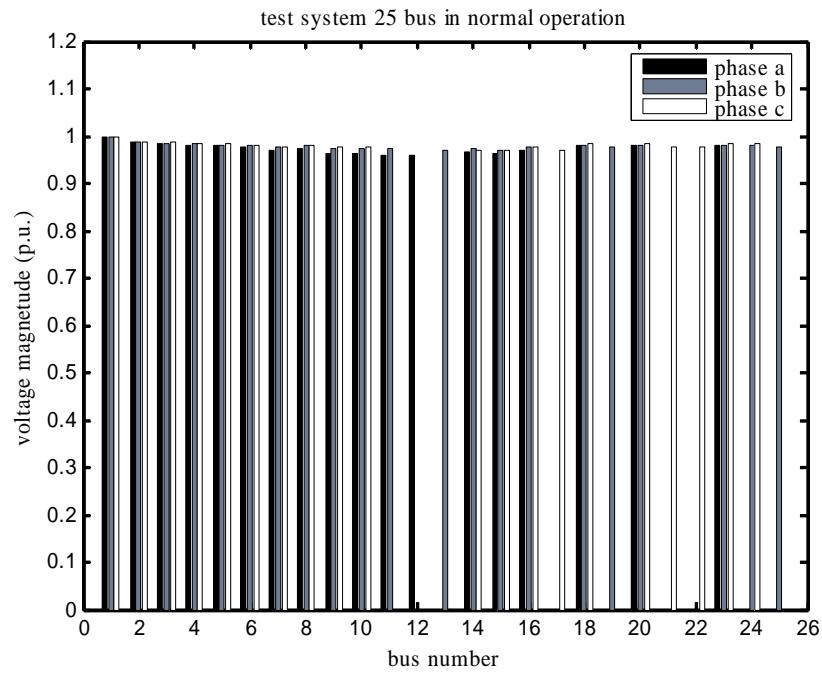
จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 25 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งแสดงขนาดแรงดันเฉพาะในบริเวณใกล้กับบัสที่เกิดลัดวงจร ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข. สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 37.919 kW สามารถแสดงขนาดแรงดันเป็นแผนภูมิแท่งดังในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าแรงดัน

ถ่ายถอดมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากโหลดในแต่ละเฟสมีขนาดใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน (ดูข้อมูลของระบบทดสอบได้ในภาคผนวก ก.) แผนภูมิแท่งสี่เหลี่ยม จาง และขาว แสดงขนาดแรงดันในเฟส a b และ c ตามลำดับ เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันตกที่บัส ได้จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 15 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.014 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.4 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 ทำให้แรงดันที่บัส 15 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a จาก 0.96404 เป็น 0.60836 p.u. เฟส b จาก 0.97086 เป็น 0.61390 p.u. และเฟส c จาก 0.96873 เป็น 0.64369 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 5008.800 kW ในขณะที่ขนาดของแรงดันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.17 ขนาดแรงดันที่บัส 15 มีค่าต่ำที่สุด และแรงดันบัสอื่น ๆ มีขนาดลดลง อย่างชัดเจน ต่อมาเมื่อดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสเกิดลัดวงจรทั้ง 3 เฟส โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่ติดตั้งเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุด ทำงานอิสระต่อกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.4 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จะพบว่าแรงดันบัสทุกบัสรวมทั้งบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้นสำหรับบัส 15 ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.60836 เป็น 0.98017 p.u. เฟส b จาก 0.61390 เป็น 0.94460 p.u. และเฟส c จาก 0.64369 เป็น 0.97259 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าลดลงเป็น 351.280 kW ขนาดแรงดันที่เพิ่มขึ้นของสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.18 รูปที่ 3.19-3.21 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแรงดันบัสในสภาวะการทำงานปกติ เกิดลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a b และ c ด้วยแผนภูมิแท่งสี่เหลี่ยม จาง และขาว ตามลำดับ ขนาดของแรงดัน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีขนาดใกล้เคียงกับระบบปกติเนื่องมาจากขนาดของแรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าในทุก ๆ เฟส จากผลการทดสอบสำหรับระบบทดสอบ 25 บัส แสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันตกให้มีขนาดเพิ่มขึ้นได้ รูปที่ 3.22 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.23 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.6 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 ทั้ง 3 เฟส (แสดงเฉพาะสายป้อนที่มีกระแสลัดวงจรสูง) ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 สายป้อนเส้นที่ 13 เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 และบัส 6 สายป้อนเส้นที่ 15 เชื่อมต่อระหว่างบัส 6 และบัส 7 สายป้อนเส้นที่ 17 เชื่อมต่อระหว่างบัส 7 และบัส 14 และสายป้อนเส้นที่ 18 เชื่อมต่อระหว่างบัส 14 และบัส 15 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 6.61510 เป็น 50.14460 p.u. เฟส b จาก 6.06400 เป็น 49.72070 p.u. และเฟส c จาก 6.32220 เป็น 52.02970 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมากสายป้อนเส้นที่ 18 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 1.72880 เป็น 44.80690 p.u. เฟส b จาก

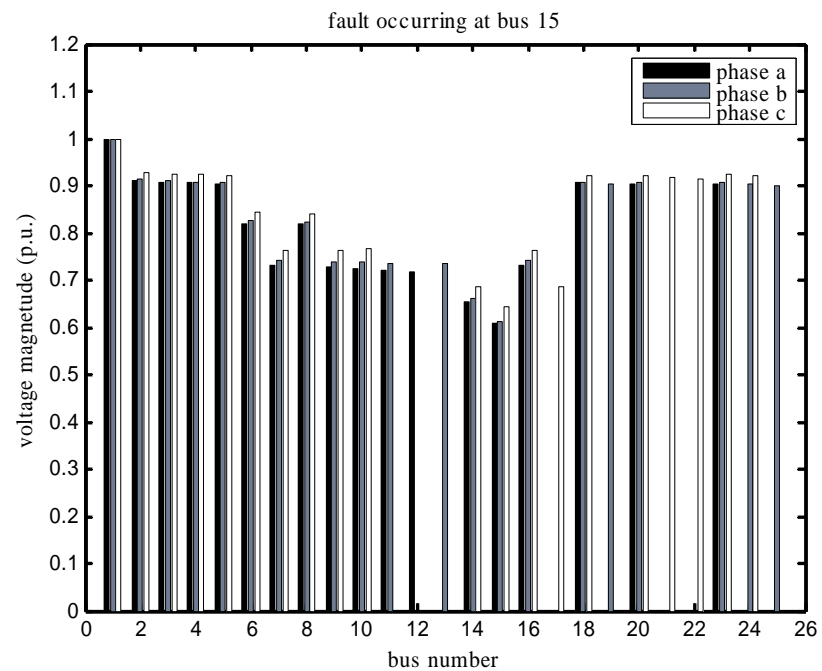
1.71670 เป็น 45.17420 p.u. และเฟส c จาก 1.72050 เป็น 47.15500 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 18 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 50.14460 เป็น 7.08730 p.u. เฟส b จาก 49.72070 เป็น 5.78680 p.u. และเฟส c จาก 52.02970 เป็น 6.10610 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 18 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากในเฟส a จาก 44.80690 เป็น 36.66450 p.u. เฟส b จาก 45.17420 เป็น 36.96730 p.u. และเฟส c จาก 47.15500 เป็น 38.35020 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้

ตารางที่ 3.4 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

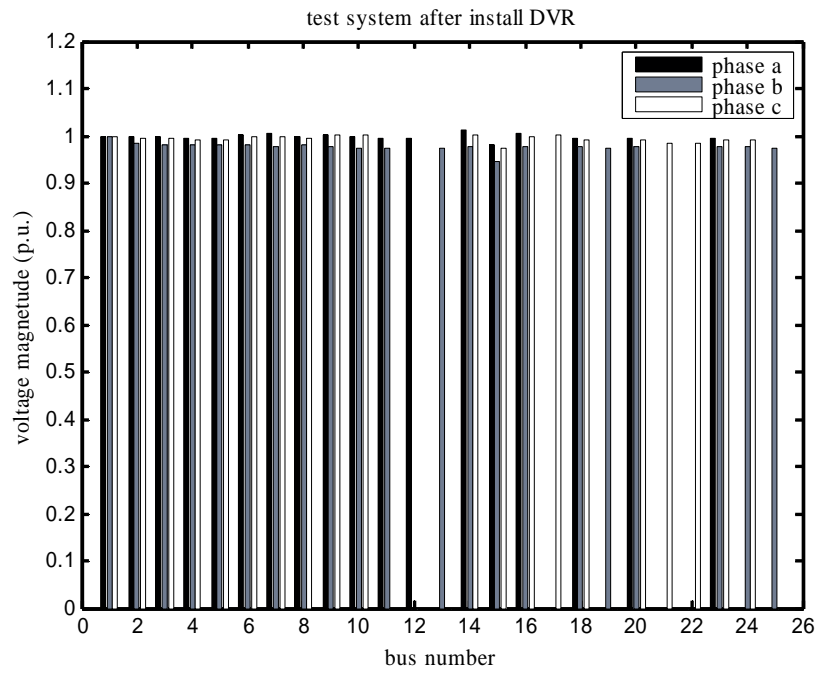
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15	เมื่อติดตั้ง DVR
10	a	0.96196	0.72299	0.99783
	b	0.97298	0.73694	0.97539
	c	0.97709	0.76493	1.00030
14	a	0.96614	0.65422	1.01300
	b	0.97291	0.66090	0.97859
	c	0.97062	0.68643	1.00210
15	a	0.96404	0.60836	0.98017
	b	0.97086	0.61390	0.94460
	c	0.96873	0.64369	0.97259
16	a	0.96938	0.73289	1.00500
	b	0.97647	0.74154	0.97891
	c	0.97653	0.76419	0.99977
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		37.919	5008.800	351.280



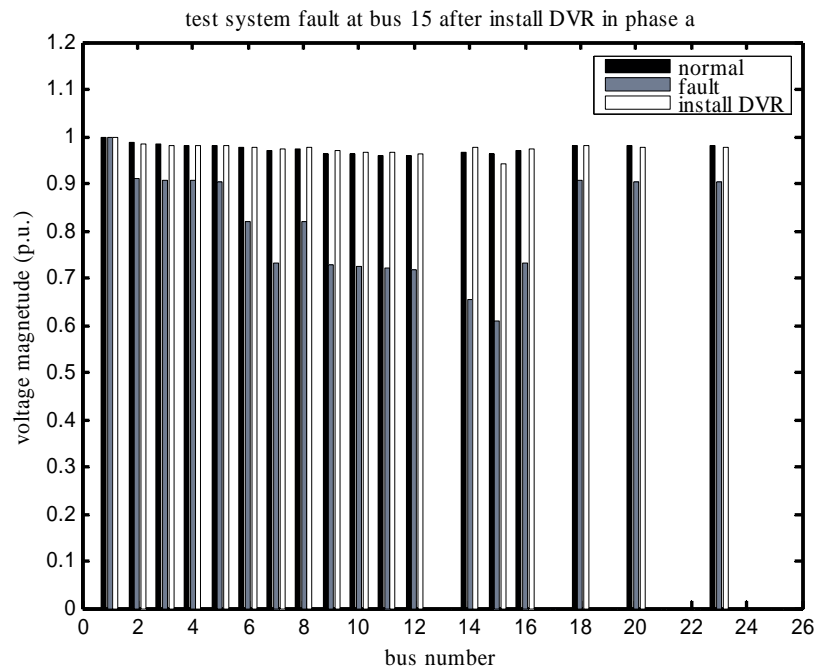
รูปที่ 3.16 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ



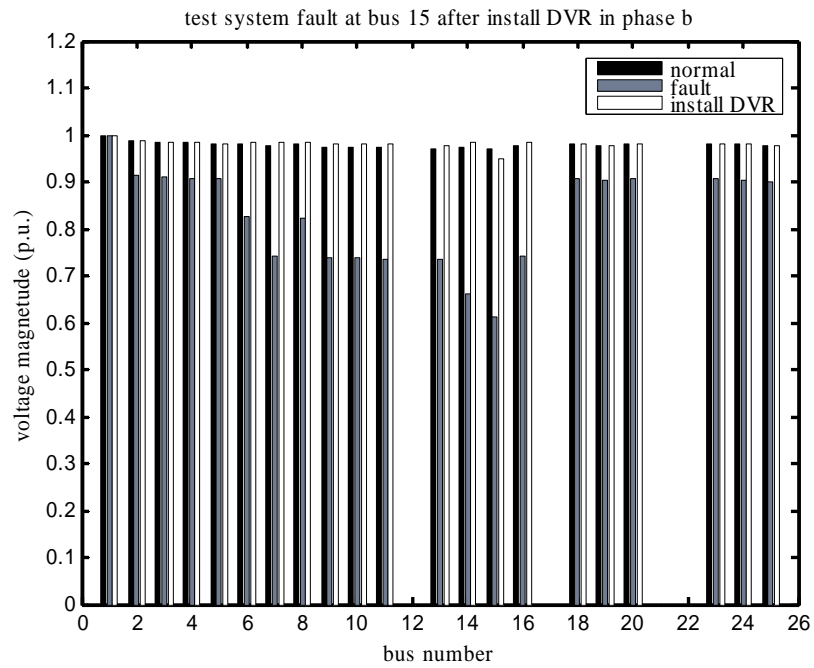
รูปที่ 3.17 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4



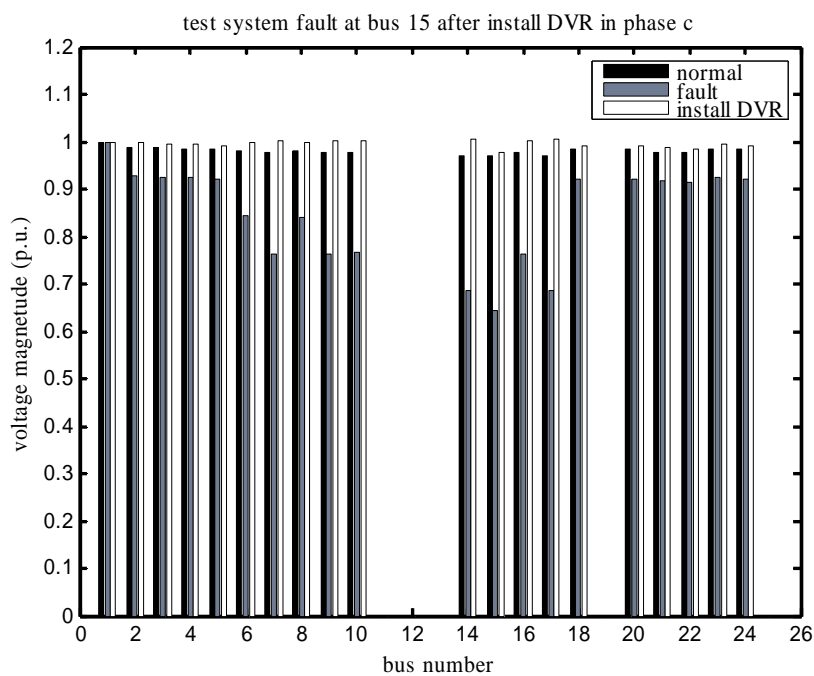
รูปที่ 3.18 แรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต



รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส a



รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส *b*



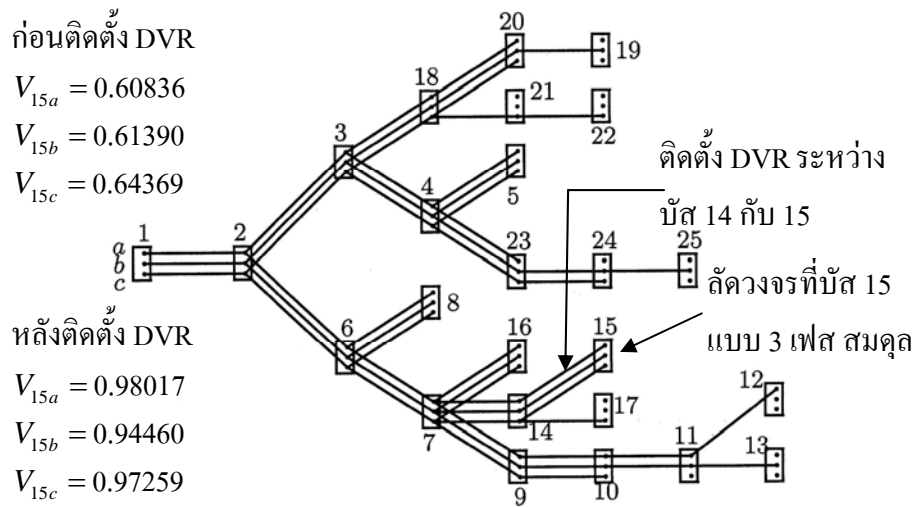
รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบแรงดันบัสของระบบทดสอบ 25 บัส ในสภาวะการทำงานปกติ เกิด
ลัดวงจรที่บัส 15 และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเฟส *c*

ตารางที่ 3.5 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบ
ทดสอบ 25 บัส

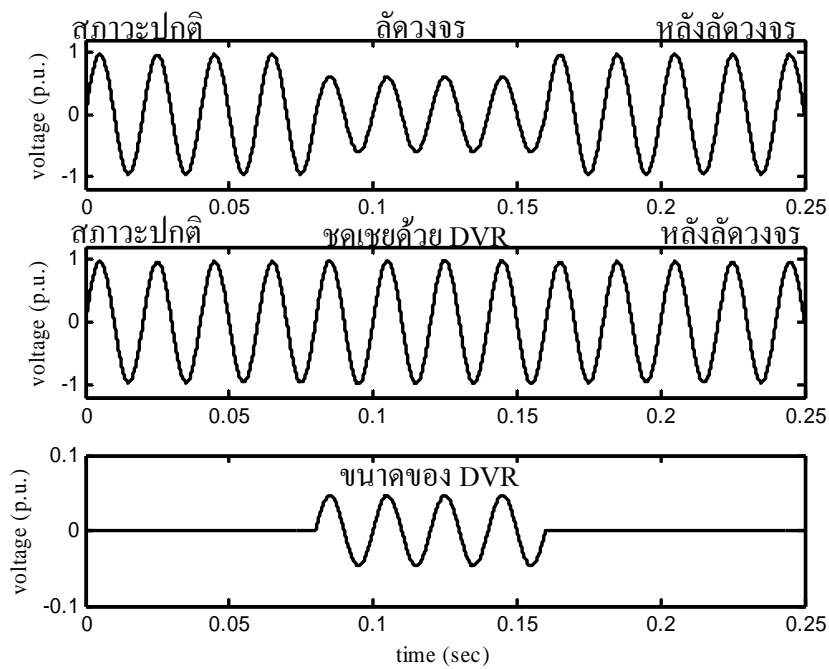
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.04685	337.61000	0.01000
<i>b</i>	0.04656	279.81000	0.01000
<i>c</i>	0.04669	0.29332	0.01000

ตารางที่ 3.6 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และ
เมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของ สายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	6.61510	50.14460	7.08730
	<i>b</i>	6.06400	49.72070	5.78680
	<i>c</i>	6.32220	52.02970	6.10610
2	<i>a</i>	2.29340	2.48670	2.29910
	<i>b</i>	2.80850	3.04120	2.81500
	<i>c</i>	2.80320	2.99360	2.78230
13	<i>a</i>	4.32170	47.81940	4.98550
	<i>b</i>	3.25550	46.91260	3.01640
	<i>c</i>	3.51900	49.24390	4.17750
15	<i>a</i>	3.80890	47.25950	4.54350
	<i>b</i>	2.74520	46.36490	2.52350
	<i>c</i>	3.00900	48.70370	3.94160
17	<i>a</i>	1.72880	44.80690	3.00670
	<i>b</i>	1.71670	45.17420	1.56700
	<i>c</i>	3.00900	48.70370	3.94160
18	<i>a</i>	1.72880	44.80690	36.66450
	<i>b</i>	1.71670	45.17420	36.96730
	<i>c</i>	1.72050	47.15500	38.35020



รูปที่ 3.22 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 37 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งแสดงขนาดแรงดันเฉพาะในบริเวณใกล้กับบัสที่เกิดลัดวงจร ผลการ

ทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข. สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 135.300 kW สำหรับระบบทดสอบนี้มีจำนวนบัสมากจึงไม่สามารถแสดงแผนภูมิแท่งได้ ซึ่งผลที่ได้จะคล้ายกับระบบทดสอบ 10 บัส และ 25 บัส เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันตกที่บัส ได้จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 20 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.010 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.7 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 ทำให้แรงดันที่บัส 20 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส *a* จาก 1.01700 เป็น 0.63502 p.u. เฟส *b* จาก 1.03720 เป็น 0.67823 p.u. และเฟส *c* จาก 1.01440 เป็น 0.64364 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 14399.000 kW ต่อมาเมื่อดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสเกิดลัดวงจรทั้ง 3 เฟส โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่ติดตั้งเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุด ทำงานอิสระต่อกันดังแสดงในตารางที่ 3.8 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.7 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จะพบว่าแรงดันบัสทุกบัสรวมทั้งบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับ บัส 20 ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 0.63502 เป็น 0.98555 p.u. เฟส *b* จาก 0.67823 เป็น 0.97655 p.u. และเฟส *c* จาก 0.64364 เป็น 0.97463 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าลดลงเป็น 850.890 kW ขนาดของแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีขนาดใกล้เคียงกับระบบปกติเนื่องมาจากขนาดของแรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าในทุกเฟส จากผลการทดสอบสำหรับระบบทดสอบ 37 บัส แสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันตกให้มีขนาดเพิ่มขึ้นได้ รูปที่ 3.24 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 20 เฟส *a* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.25 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.9 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 ทั้ง 3 เฟส (แสดงเฉพาะสายป้อนที่มีกระแสลัดวงจรสูง) ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 สายป้อนเส้นที่ 2 เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 และบัส 3 สายป้อนเส้นที่ 5 เชื่อมต่อระหว่างบัส 3 และบัส 17 สายป้อนเส้นที่ 17 เชื่อมต่อระหว่างบัส 17 และบัส 18 สายป้อนเส้นที่ 19 เชื่อมต่อระหว่างบัส 18 และบัส 19 และสายป้อนเส้นที่ 20 เชื่อมต่อระหว่างบัส 19 และบัส 20 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 8.01230 เป็น 73.18790 p.u. เฟส *b* จาก 6.91030 เป็น 75.54060 p.u. และเฟส *c* จาก 11.94530 เป็น 78.27830 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 20 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 0.46170 เป็น 64.16430 p.u. เฟส *b* จาก 0.45270 เป็น 68.44270 p.u. และเฟส *c* จาก 0.46290 เป็น 65.01710 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 20 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลง

ในเฟส *a* จาก 73.18790 เป็น 13.67270 p.u. เฟส *b* จาก 75.54060 เป็น 11.97340 p.u. และเฟส *c* จาก 78.27830 เป็น 14.63020 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 20 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากในเฟส *a* จาก 64.16430 เป็น 54.60240 p.u. เฟส *b* จาก 68.44270 เป็น 53.89170 p.u. และเฟส *c* จาก 65.01710 เป็น 53.04930 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟิวแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟิวแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้

ตารางที่ 3.7 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และเมื่อติดตั้งตัวฟิวแรงดันพลวัต

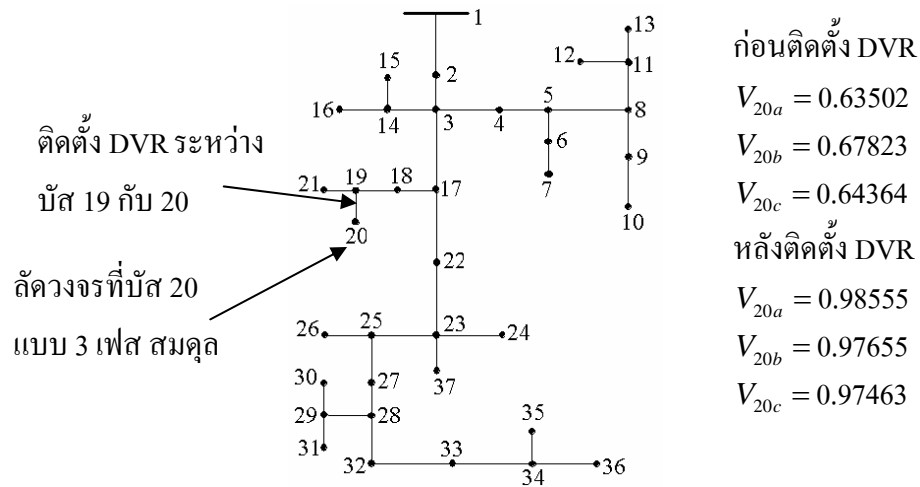
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20	เมื่อติดตั้ง DVR
18	<i>a</i>	1.01860	0.72598	1.02570
	<i>b</i>	1.03770	0.77159	1.02140
	<i>c</i>	1.01480	0.72903	1.01510
19	<i>a</i>	1.01740	0.68513	1.02570
	<i>b</i>	1.03760	0.73225	1.01780
	<i>c</i>	1.01470	0.69417	1.01390
20	<i>a</i>	1.01700	0.63502	0.98555
	<i>b</i>	1.03720	0.67823	0.97655
	<i>c</i>	1.01440	0.64364	0.97463
21	<i>a</i>	1.01670	0.68408	1.02500
	<i>b</i>	1.03760	0.73240	1.01790
	<i>c</i>	1.01480	0.69429	1.01390
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		135.300	14399.000	850.890

ตารางที่ 3.8 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบ
ทดสอบ 37 บัส

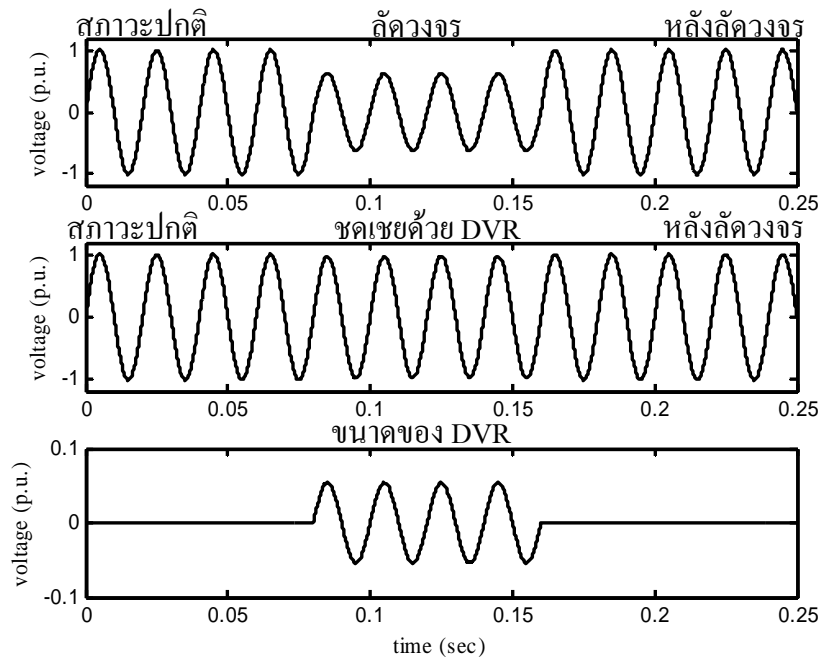
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.05396	227.28000	0.01000
<i>b</i>	0.05319	183.52000	0.01000
<i>c</i>	0.05426	79.134000	0.01000

ตารางที่ 3.9 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20
และเมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของ สายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	8.01230	73.18790	13.67270
	<i>b</i>	6.91030	75.54060	11.97340
	<i>c</i>	11.94530	78.27830	14.63020
2	<i>a</i>	6.50350	71.58850	12.64180
	<i>b</i>	5.40940	73.97050	10.49580
	<i>c</i>	8.15300	74.19820	11.49830
5	<i>a</i>	5.31830	70.24740	11.89630
	<i>b</i>	1.81210	70.01250	6.98760
	<i>c</i>	5.16080	70.79000	9.35340
17	<i>a</i>	1.38510	65.41030	10.19870
	<i>b</i>	0.45270	68.44270	5.69290
	<i>c</i>	0.92560	65.60940	7.45560
19	<i>a</i>	1.38510	65.41030	10.19870
	<i>b</i>	0.45270	68.44270	5.69290
	<i>c</i>	0.46290	65.01710	7.37850
20	<i>a</i>	0.46170	64.16430	54.60240
	<i>b</i>	0.45270	68.44270	53.89170
	<i>c</i>	0.46290	65.01710	53.04930



รูปที่ 3.24 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 3.25 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 118 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.10 ซึ่งแสดงขนาดแรงดันเฉพาะในบริเวณใกล้กับบัสที่เกิดลัดวงจร ผลการ

ทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข. สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 275.320 kW สำหรับระบบทดสอบนี้มีจำนวนบัสมากจึงไม่สามารถแสดงแผนภูมิแท่งได้ ซึ่งผลที่ได้จะคล้ายกับระบบทดสอบ 10 บัส และ 25 บัส เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันตกที่บัส ได้จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 79 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.010 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.10 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 ทำให้แรงดันที่บัส 79 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส *a* จาก 0.96001 เป็น 0.54887 p.u. เฟส *b* จาก 1.01060 เป็น 0.60072 p.u. และเฟส *c* จาก 0.97860 เป็น 0.60436 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 14659.000 kW ต่อมาดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสเกิดลัดวงจรทั้ง 3 เฟส โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่ติดตั้งเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุดทำงานอิสระต่อกันดังแสดงในตารางที่ 3.11 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.10 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จะพบว่าแรงดันบัสทุกบัสรวมทั้งบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับบัส 79 ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 0.54887 เป็น 0.96383 p.u. เฟส *b* จาก 0.60072 เป็น 0.96699 p.u. และเฟส *c* จาก 0.60436 เป็น 0.97097 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเป็น 373.900 kW ขนาดของแรงดัน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีขนาดใกล้เคียงกับระบบปกติ เนื่องจากขนาดของแรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าในทุก ๆ เฟส จากผลการทดสอบสำหรับระบบทดสอบ 118 บัส แสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันตกให้มีขนาดเพิ่มขึ้นได้ รูปที่ 3.26 แสดงระบบทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 79 เฟส *a* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.27 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.12 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 ทั้ง 3 เฟส (แสดงเฉพาะสายป้อนที่มีกระแสลัดวงจรสูง) ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นอื่นที่แสดงในตารางเชื่อมต่อระหว่างบัส 2 ไปจนถึงบัส 79 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 16.58780 เป็น 77.70530 p.u. เฟส *b* จาก 10.31980 เป็น 73.88020 p.u. และเฟส *c* จาก 13.32420 เป็น 77.96500 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 77 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 3.22940 เป็น 59.80430 p.u. เฟส *b* จาก 3.28510 เป็น 64.97270 p.u. และเฟส *c* จาก 2.24960 เป็น 63.62450 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 77 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *a* จาก 77.70530 เป็น 17.32310 p.u. เฟส *b* จาก 73.88020 เป็น 14.04570 p.u. และเฟส *c* จาก 77.96500 เป็น 16.25240 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่าย

กระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 77 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากในเฟส a จาก 59.80430 เป็น 58.10350 p.u. เฟส b จาก 64.97270 เป็น 60.46880 p.u. และเฟส c จาก 63.62450 เป็น 57.80110 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้

ตารางที่ 3.10 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และเมื่อติดตั้งตัวฟิวส์แรงดันพลวัต

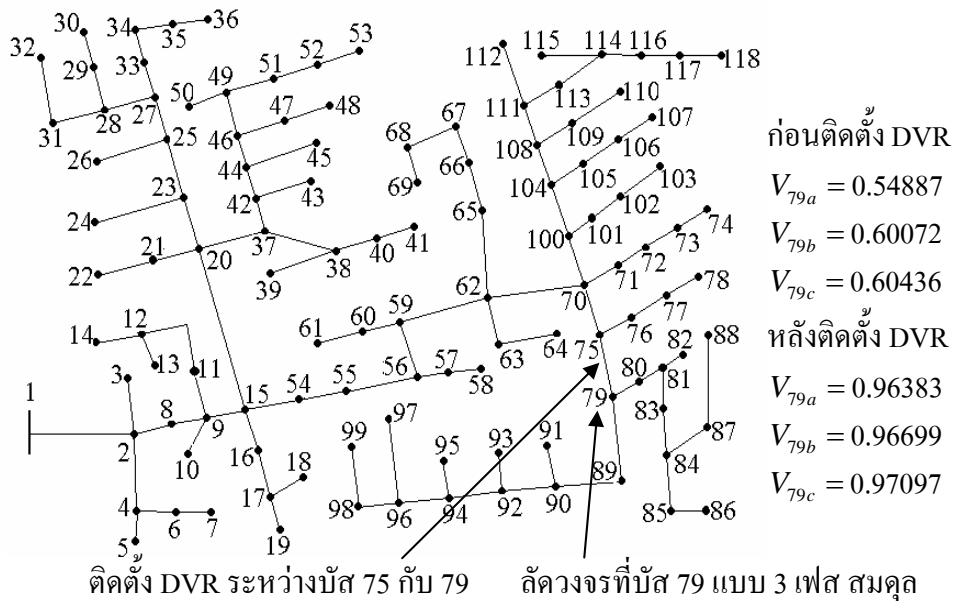
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79	เมื่อติดตั้ง DVR
75	a	0.96155	0.56157	0.97413
	b	1.01200	0.62041	0.98399
	c	0.97900	0.61437	0.97845
78	a	-	-	-
	b	-	-	-
	c	0.97380	0.60602	0.97325
79	a	0.96001	0.54887	0.96383
	b	1.01060	0.60072	0.96699
	c	0.97860	0.60436	0.97097
80	a	0.95942	0.54777	0.96326
	b	1.00990	0.59965	0.96627
	c	0.97787	0.60314	0.97024
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		275.320	14659.000	373.900

ตารางที่ 3.11 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส

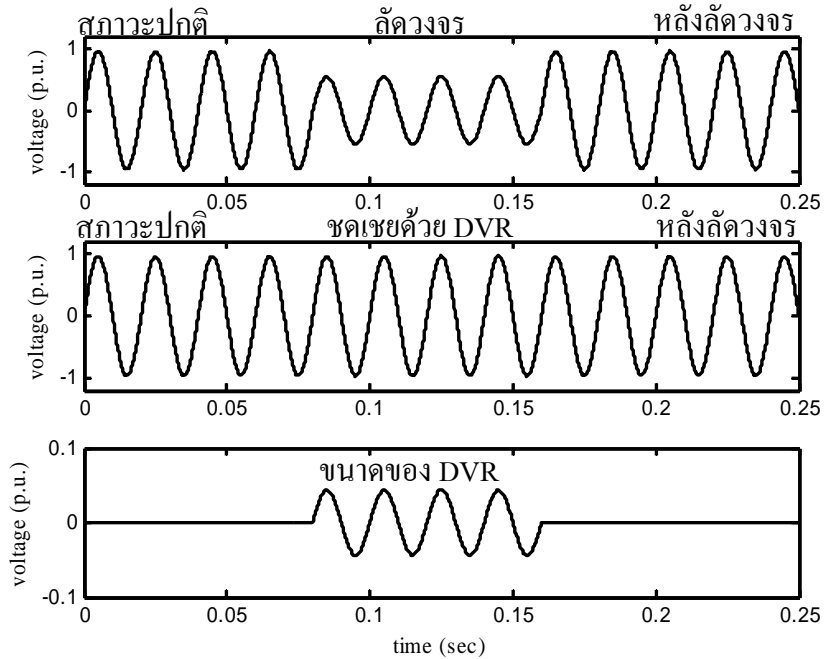
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.04379	149.76000	0.01000
<i>b</i>	0.04314	162.71000	0.01000
<i>c</i>	0.04279	216.34000	0.01000

ตารางที่ 3.12 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และเมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	16.58780	77.70530	17.32310
	<i>b</i>	10.31980	73.88020	14.04570
	<i>c</i>	13.32420	77.96500	16.25240
57	<i>a</i>	7.86960	67.19120	8.73090
	<i>b</i>	6.28400	69.28660	10.07260
	<i>c</i>	7.40610	71.14300	10.41150
60	<i>a</i>	7.86960	67.19120	8.73090
	<i>b</i>	5.84740	68.71710	9.63710
	<i>c</i>	7.40610	71.14300	10.41150
64	<i>a</i>	6.73430	65.43880	7.65240
	<i>b</i>	4.61050	66.94190	8.41530
	<i>c</i>	5.22580	68.03610	8.31600
71	<i>a</i>	3.22940	59.80430	4.38120
	<i>b</i>	3.28510	64.97270	7.10820
	<i>c</i>	3.62390	65.66320	6.78400
77	<i>a</i>	3.22940	59.80430	58.10350
	<i>b</i>	3.28510	64.97270	60.46880
	<i>c</i>	2.24960	63.62450	57.80110



รูปที่ 3.26 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัสจะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.13 ซึ่งแสดงขนาดแรงดันเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับบัสที่เกิดลัดวงจร ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข. สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. ดังนั้นในการทดสอบจึงเพิ่มขนาดของโหลดเป็น 5 เท่าจากระบบปกติที่ทุกบัส เนื่องจากระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 22 kV ขนาดพิกัดของระบบไฟฟ้ามีค่าสูง แต่โหลดในระบบทดสอบมีขนาดน้อยมาก ทำให้แรงดันบัสทุกบัสมีค่าสูง ค่าที่แสดงในตารางที่ 3.13 ในสภาวะการทำงานปกติเป็นค่าของระบบเมื่อเพิ่มโหลดเป็น 5 เท่า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 2985.200 kW ระบบทดสอบนี้มีจำนวนบัสมากจึงไม่สามารถแสดงแผนภูมิแท่งได้ ซึ่งผลที่ได้จะคล้ายกับระบบทดสอบ 10 บัส และ 25 บัส เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันตกที่บัส ได้จำลองสถานการณ์การลัดวงจรเกิดขึ้นที่บัส 60 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.002 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.13 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 ทำให้แรงดันที่บัส 60 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a จาก 0.90907 เป็น 0.64082 p.u. เฟส b จาก 0.90584 เป็น 0.64124 p.u. และเฟส c จาก 0.90361 เป็น 0.63787 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 32709.000 kW ต่อมาดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสเกิดลัดวงจรทั้ง 3 เฟส โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่ติดตั้งเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุด ทำงานอิสระต่อกันดังแสดงในตารางที่ 3.14 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.13 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จะพบว่าขนาดแรงดันบัสทุกบัสรวมทั้งบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับบัส 60 ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.64082 เป็น 1.11310 p.u. เฟส b จาก 0.64124 เป็น 0.93854 p.u. และเฟส c จาก 0.63787 เป็น 1.02630 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเป็น 2283.000 kW ขนาดของแรงดัน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีขนาดใกล้เคียงกับระบบปกติเนื่องมาจากขนาดของแรงดันที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าในทุก ๆ เฟส จากผลการทดสอบสำหรับระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส แสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันตกให้มีขนาดเพิ่มขึ้นได้ รูปที่ 3.28 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.29 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.15 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 ทั้ง 3 เฟส (แสดงเฉพาะสายป้อนที่มีกระแสลัดวงจรสูง) ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นอื่นที่แสดงในตารางเชื่อมต่อระหว่างบัส 2 ไปจนถึงบัส 60 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่ม

มากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 250.61780 เป็น 606.81200 p.u. เฟส *b* จาก 251.53280 เป็น 607.54580 p.u. และเฟส *c* จาก 259.38230 เป็น 614.75600 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 59 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 6.07890 เป็น 328.19230 p.u. เฟส *b* จาก 6.10060 เป็น 328.39890 p.u. และเฟส *c* จาก 6.11570 เป็น 326.75350 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 59 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *a* จาก 606.81200 เป็น 225.77980 p.u. เฟส *b* จาก 607.54580 เป็น 177.41700 p.u. และเฟส *c* จาก 614.75600 เป็น 208.50210 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 59 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มาก ในเฟส *a* จาก 328.19230 เป็น 297.41120 p.u. เฟส *b* จาก 328.39890 เป็น 211.71030 p.u. และเฟส *c* จาก 326.75350 เป็น 263.28850 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้

ตารางที่ 3.13 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60	เมื่อติดตั้ง DVR
59	<i>a</i>	0.90923	0.64651	1.11550
	<i>b</i>	0.90599	0.64685	0.93974
	<i>c</i>	0.90376	0.64348	1.03110
60	<i>a</i>	0.90907	0.64082	1.11310
	<i>b</i>	0.90584	0.64124	0.93854
	<i>c</i>	0.90361	0.63787	1.02630
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		2985.200	32709.000	2283.000

ตารางที่ 3.14 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

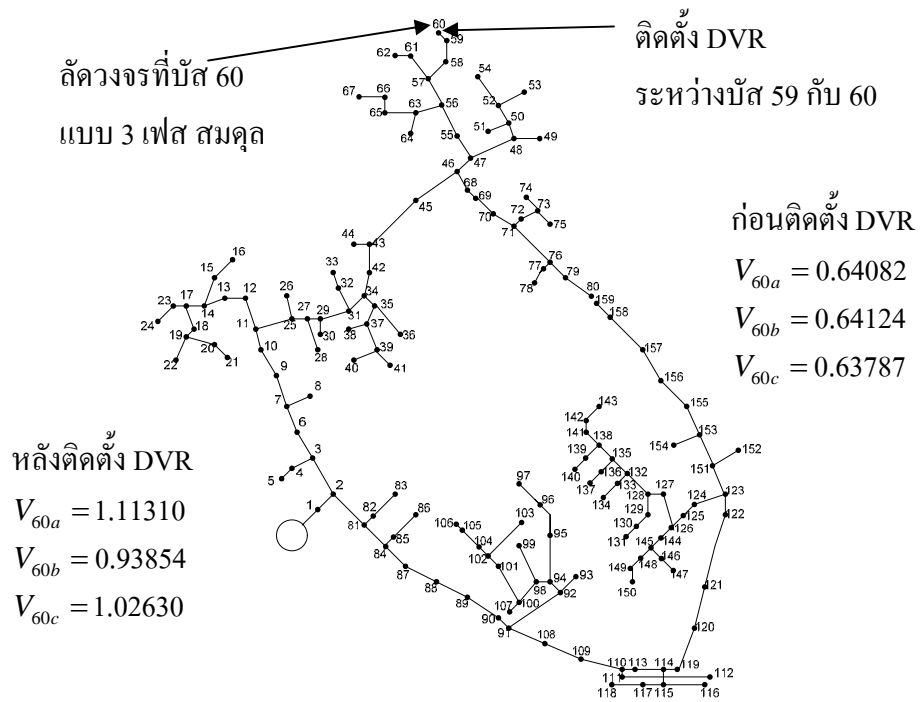
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.01533	149.76000	0.01000
<i>b</i>	0.01518	262.71000	0.01000
<i>c</i>	0.01536	216.33000	0.01000

ตารางที่ 3.15 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และเมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

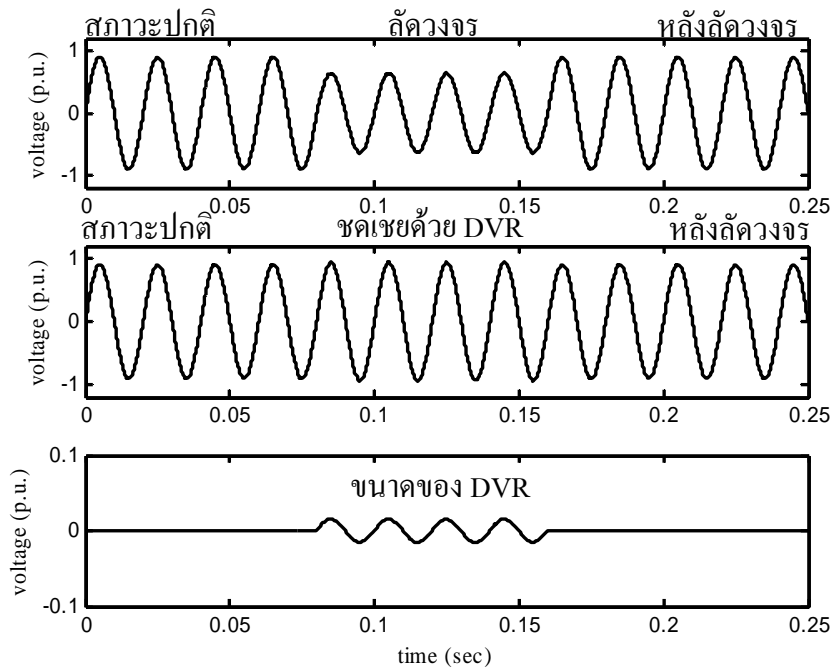
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	250.61780	606.81200	225.77980
	<i>b</i>	251.53280	607.54580	177.41700
	<i>c</i>	259.38230	614.75600	208.50210
2	<i>a</i>	164.17590	519.72090	149.14330
	<i>b</i>	164.63250	519.99810	90.61090
	<i>c</i>	167.56580	522.22880	130.25360
10	<i>a</i>	152.13330	506.87780	139.49940
	<i>b</i>	152.57690	507.15050	78.63480
	<i>c</i>	154.82800	508.6705	120.94410
24	<i>a</i>	114.61610	463.87130	113.62730
	<i>b</i>	114.98630	464.12680	41.62000
	<i>c</i>	117.18440	465.53770	99.64640
26	<i>a</i>	114.61640	463.87150	113.62710
	<i>b</i>	114.98650	464.12700	41.62030
	<i>c</i>	117.18460	465.53790	99.64600
28	<i>a</i>	114.61660	463.87160	113.62690
	<i>b</i>	114.98670	464.12710	41.62060
	<i>c</i>	117.18480	465.53800	99.64570

ตารางที่ 3.15 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบ
ปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (ต่อ)

ลำดับของ สายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60	เมื่อติดตั้ง DVR
45	a	75.74790	417.49140	94.05340
	b	76.02140	417.72610	8.640300
	c	77.67250	418.39700	89.30300
46	a	60.73610	398.26870	89.65980
	b	60.95240	398.48090	15.50630
	c	61.10240	397.18500	90.10250
54	a	36.46340	367.24970	86.36260
	b	36.59350	367.44450	38.07330
	c	36.68370	366.00110	95.81130
55	a	36.46360	367.24980	86.36210
	b	36.59370	367.44450	38.07320
	c	36.68400	366.00110	95.81070
56	a	24.30800	351.58140	86.67080
	b	24.39470	351.77890	49.93850
	c	24.45490	350.25500	100.57000
57	a	18.23250	343.78290	87.28850
	b	18.29760	343.98250	55.90230
	c	18.34270	342.41850	103.32130
58	a	12.15680	335.98750	88.20830
	b	12.20020	336.19010	61.87790
	c	12.23030	334.58560	106.29870
59	a	6.07890	328.19230	297.41120
	b	6.10060	328.39890	211.71030
	c	6.11570	326.75350	263.28850



รูปที่ 3.28 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ส่วนที่ 2 เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 10 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.16 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 28.956 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 3 แบบ 2 เฟสสมมูล ได้แก่ เฟส a และ b ผ่าน $Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.16 ทำให้แรงดันที่บัส 3 ทั้ง 2 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a จาก 0.94458 เป็น 0.55606 p.u. และเฟส b จาก 0.99295 เป็น 0.70414 p.u. แรงดันที่บัส 4 ในเฟส a จาก 0.93059 เป็น 0.68717 p.u. และเฟส b จาก 0.99165 เป็น 0.83043 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1992.500 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.17 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 2 เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 และบัส 3 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 5.82480 เป็น 35.60620 p.u. และเฟส b จาก 2.25710 เป็น 37.84820 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 2 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 1.94550 เป็น 30.73270 p.u. และเฟส b จาก 0.39810 เป็น 35.73990 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4 ทั้ง 2 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.18 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.16 จะพบว่าแรงดันที่บัส 4 รวมทั้งบัสที่เชื่อมต่อกับบัส 4 ไปยังโหลดปลายทาง ได้แก่ บัส 7 8 และ 10 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 4 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a จาก 0.68717 เป็น 0.86541 p.u. และเฟส b จาก 0.83043 เป็น 0.89385 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1449.100 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 3 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.30 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.31 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 35.60620 เป็น 17.79900 p.u. และเฟส b จาก 37.84820 เป็น 18.85350 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 2 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 30.73270 เป็น 34.93880 p.u. และเฟส b จาก 35.73990 เป็น 37.81780 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์

ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 3 ต่อกับบัส 4 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 4.49580 เป็น 12.03140 p.u. และเฟส *b* จาก 1.09130 เป็น 11.28280 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 4 และบัสที่เชื่อมต่อกับบัส 4 ไปยังโหลดปลายทาง เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟิวส์แรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3

ตารางที่ 3.16 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟิวส์แรงดันพลวัตที่บัส 4

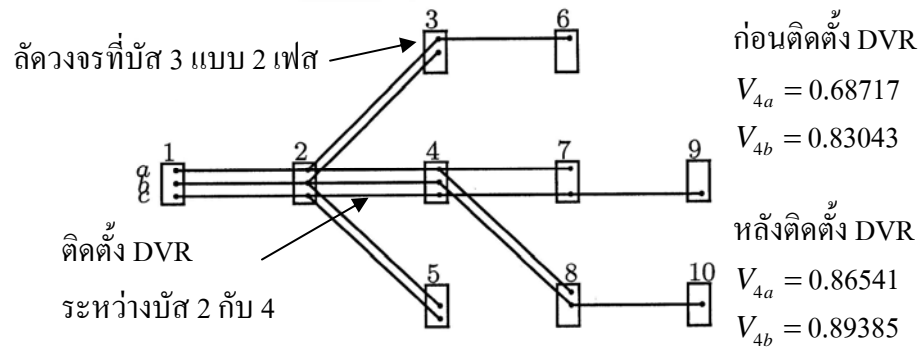
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 4
2	<i>a</i>	0.95564	0.72189	0.83327
	<i>b</i>	0.99303	0.83117	0.87921
	<i>c</i>	0.98638	1.02400	1.02150
3	<i>a</i>	0.94458	0.55606	0.64981
	<i>b</i>	0.99295	0.70414	0.74630
	<i>c</i>	-	-	-
4	<i>a</i>	0.93059	0.68717	0.86541
	<i>b</i>	0.99165	0.83043	0.89385
	<i>c</i>	0.97844	1.01770	1.02060
7	<i>a</i>	0.92359	0.67735	0.85780
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	0.97486	1.01440	1.01690
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		28.956	1992.500	1449.100

ตารางที่ 3.17 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4

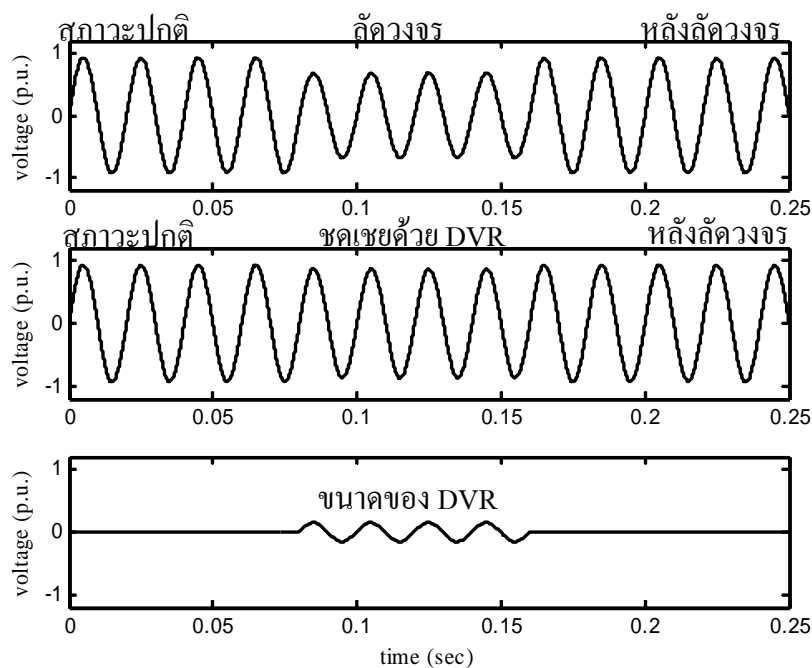
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 4
1	a	5.82480	35.60620	17.79900
	b	2.25710	37.84820	18.85350
	c	1.94340	1.87020	1.86650
2	a	1.94550	30.73270	34.93880
	b	0.39810	35.73990	37.81780
	c	-	-	-
3	a	3.30090	4.49580	12.03140
	b	0.91250	1.09130	11.28280
	c	0.92570	0.88950	0.87740
4	a	-	-	-
	b	0.39900	0.47720	0.45100
	c	0.52360	0.50430	0.50550
6	a	1.35340	1.84540	1.45720
	b	-	-	-
	c	0.57570	0.55310	0.55170
7	a	1.35470	1.84780	1.45860
	b	0.56710	0.67880	0.63010
	c	-	-	-

ตารางที่ 3.18 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
a	0.14994	0.29590	0.01000
b	0.12464	359.98000	0.01000



รูปที่ 3.30 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 2 และ 4



รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 25 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.19 สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 37.919 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 9 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.012 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.19 ทำให้แรงดันที่บัส 9 ทั้ง 3 เฟส มี

ขนาดลดลงในเฟส a จาก 0.96484 เป็น 0.61070 p.u. เฟส b จาก 0.97483 เป็น 0.61936 p.u. และเฟส c จาก 0.97679 เป็น 0.65582 p.u. แรงดันที่บัส 15 ในเฟส a จาก 0.96404 เป็น 0.69264 p.u. เฟส b จาก 0.97086 เป็น 0.69954 p.u. และเฟส c จาก 0.96873 เป็น 0.72365 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5246.200 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.20 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 20 เชื่อมต่อระหว่างบัส 7 และบัส 9 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 6.61510 เป็น 56.54970 p.u. เฟส b จาก 6.06400 เป็น 56.29500 p.u. และเฟส c จาก 6.32220 เป็น 59.24870 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 20 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 2.08010 เป็น 51.53710 p.u. เฟส b จาก 1.02850 เป็น 50.85760 p.u. และเฟส c จาก 1.04000 เป็น 52.46550 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.21 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.19 จะพบว่าแรงดันที่บัส 15 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 15 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a จาก 0.69264 เป็น 0.93110 p.u. เฟส b จาก 0.69954 เป็น 0.94600 p.u. และเฟส c จาก 0.72365 เป็น 0.91376 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 3495.700 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 9 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.32 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรหลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ดังรูปที่ 3.33 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 56.54970 เป็น 29.36250 p.u. เฟส b จาก 56.29500 เป็น 29.7080 p.u. และเฟส c จาก 59.24870 เป็น 31.18780 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 20 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 51.53710 เป็น 61.71520 p.u. เฟส b จาก 50.85760 เป็น 61.55320 p.u. และเฟส c จาก 52.46550 เป็น 61.14690 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหนดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 18 ต่อกับบัส 15 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 2.40620 เป็น 18.56240 p.u. เฟส b จาก 2.38250 เป็น 18.10650 p.u. และเฟส c จาก 2.30320 เป็น 18.34320 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น

ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 15 เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9

ตารางที่ 3.19 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15

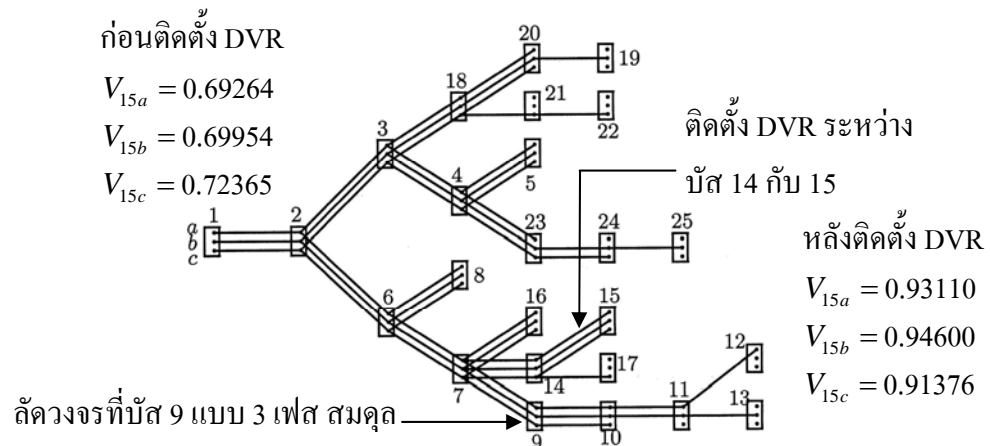
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 15
8	a	0.97509	0.79530	0.89694
	b	0.97964	0.80069	0.90524
	c	0.98032	0.82181	0.90102
9	a	0.96484	0.61070	0.74414
	b	0.97483	0.61936	0.75607
	c	0.97679	0.65582	0.76434
14	a	0.96614	0.69559	0.91254
	b	0.97291	0.70236	0.92651
	c	0.97062	0.72616	0.89984
15	a	0.96404	0.69264	0.93110
	b	0.97086	0.69954	0.94600
	c	0.96873	0.72365	0.91376
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		37.919	5246.200	3495.700

ตารางที่ 3.20 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15

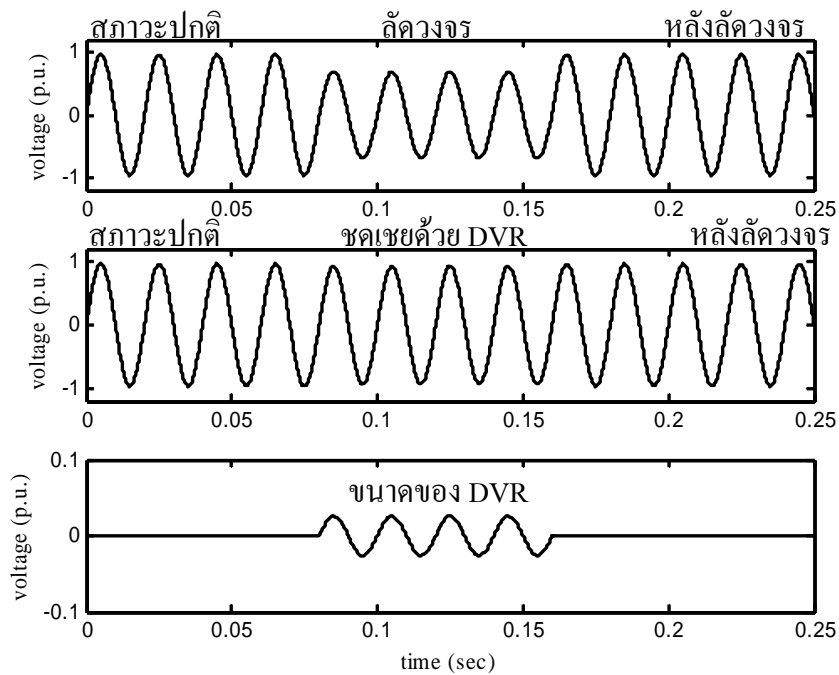
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 15
1	a	6.61510	56.54970	29.36250
	b	6.06400	56.29500	29.70800
	c	6.32220	59.24870	31.18780
13	a	4.32170	54.20690	27.18250
	b	3.25550	53.46590	27.15370
	c	3.51900	56.45730	28.42080
15	a	3.80890	53.63640	26.68360
	b	2.74520	52.90750	26.68390
	c	3.00900	55.91130	27.89970
17	a	1.72880	2.40620	35.06670
	b	1.71670	2.38250	34.89730
	c	3.00900	4.02610	34.13540
18	a	1.72880	2.40620	18.56240
	b	1.71670	2.38250	18.10650
	c	1.72050	2.30320	18.34320
20	a	2.08010	51.53710	61.71520
	b	1.02850	50.85760	61.55320
	c	1.04000	52.46550	61.14690

ตารางที่ 3.21 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
a	0.02586	339.58000	0.01000
b	0.02574	330.58000	0.01000
c	0.02588	0.07509	0.01000



รูปที่ 3.32 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 14 และ 15



รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 37 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.22 สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ

เท่ากับ 135.300 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 23 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.006 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.22 ทำให้แรงดันที่บัส 23 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส *a* จาก 1.01120 เป็น 0.54372 p.u. เฟส *b* จาก 1.03810 เป็น 0.60362 p.u. และเฟส *c* จาก 1.00720 เป็น 0.55586 p.u. แรงดันที่บัส 20 ในเฟส *a* จาก 1.01700 เป็น 0.70103 p.u. เฟส *b* จาก 1.03720 เป็น 0.75372 p.u. และเฟส *c* จาก 1.01440 เป็น 0.69878 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11544.000 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.23 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 22 เชื่อมต่อระหว่างบัส 22 และบัส 23 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 8.01230 เป็น 93.50820 p.u. เฟส *b* จาก 6.91030 เป็น 99.18280 p.u. และเฟส *c* จาก 11.94530 เป็น 99.79490 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 22 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 3.93320 เป็น 88.47300 p.u. เฟส *b* จาก 1.35940 เป็น 92.66090 p.u. และเฟส *c* จาก 3.30410 เป็น 89.01320 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.24 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.22 จะพบว่าแรงดันที่บัส 20 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 20 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *a* จาก 0.70103 เป็น 0.89452 p.u. เฟส *b* จาก 0.75372 เป็น 0.92887 p.u. และเฟส *c* จาก 0.69878 เป็น 0.93325 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 9456.800 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 23 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.34 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 20 เฟส *a* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.35 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *a* จาก 93.50820 เป็น 61.82030 p.u. เฟส *b* จาก 99.18280 เป็น 65.27530 p.u. และเฟส *c* จาก 99.79490 เป็น 64.65140 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 22 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 88.47300 เป็น 100.95420 p.u. เฟส *b* จาก 92.66090 เป็น 104.07250 p.u. และเฟส *c* จาก 89.01320 เป็น 103.49340 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 20 ต่อกับบัส 20 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 0.66980 เป็น 23.50250 p.u. เฟส *b* จาก 0.62300 เป็น 22.95200 p.u. และเฟส *c* จาก 0.67200 เป็น 24.61590 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้

ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 20 เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23

ตารางที่ 3.22 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20

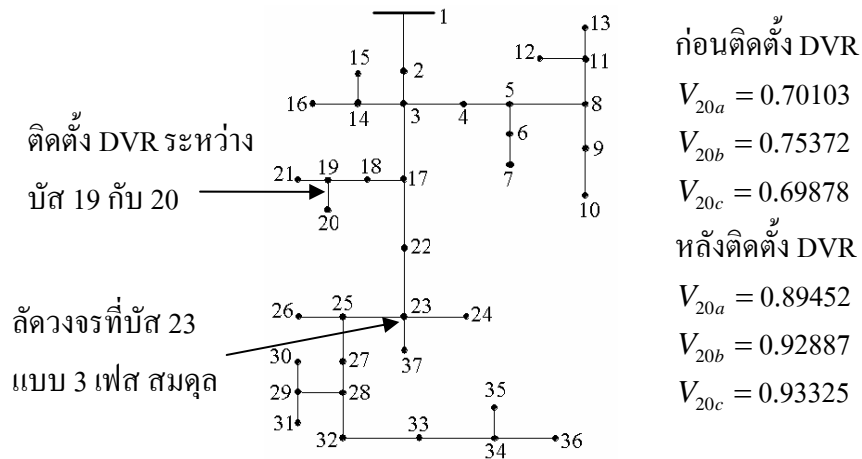
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 20
19	a	1.01740	0.70158	0.87833
	b	1.03760	0.75419	0.91182
	c	1.01470	0.69934	0.91186
20	a	1.01700	0.70103	0.89452
	b	1.03720	0.75372	0.92887
	c	1.01440	0.69878	0.93325
22	a	1.01350	0.58359	0.67887
	b	1.03810	0.64083	0.72261
	c	1.00890	0.59039	0.69999
23	a	1.01120	0.54372	0.63428
	b	1.03810	0.60362	0.68132
	c	1.00720	0.55586	0.65879
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		135.300	11544.000	9456.800

ตารางที่ 3.23 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20

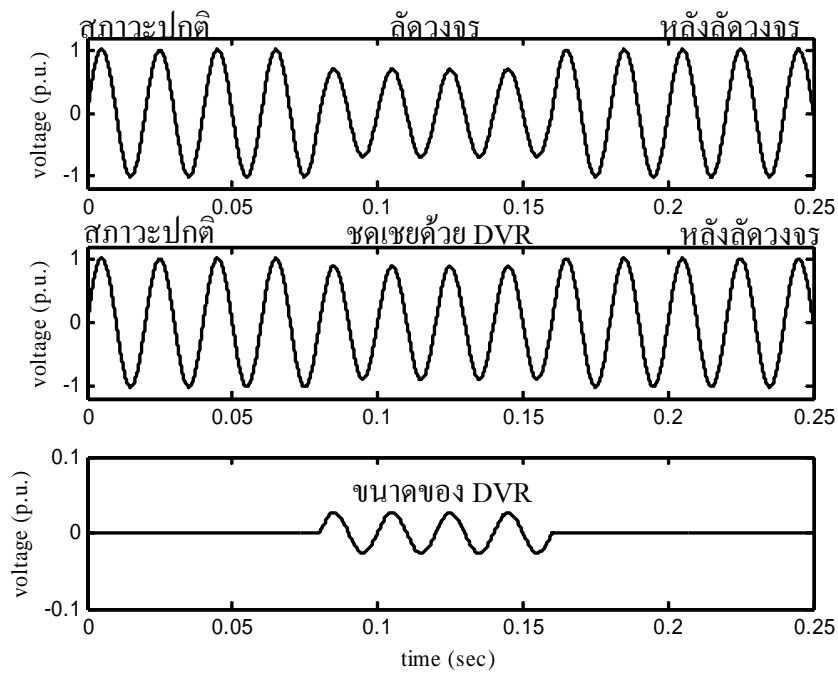
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 20
1	<i>a</i>	8.01230	93.50820	61.82030
	<i>b</i>	6.91030	99.18280	65.27530
	<i>c</i>	11.94530	99.79490	64.65140
2	<i>a</i>	6.50350	91.83340	60.20120
	<i>b</i>	5.40940	97.53540	63.69700
	<i>c</i>	8.15300	95.49730	60.59430
5	<i>a</i>	5.31830	90.38510	58.84860
	<i>b</i>	1.81210	93.24600	59.71380
	<i>c</i>	5.16080	91.77650	57.23130
18	<i>a</i>	3.93320	88.47300	100.95420
	<i>b</i>	1.35940	92.66090	104.07250
	<i>c</i>	4.23530	90.49540	104.73920
20	<i>a</i>	0.46170	0.66980	23.50250
	<i>b</i>	0.45270	0.62300	22.95200
	<i>c</i>	0.46290	0.67200	24.61590
22	<i>a</i>	3.93320	88.47300	100.95420
	<i>b</i>	1.35940	92.66090	104.07250
	<i>c</i>	3.30410	89.01320	103.49340

ตารางที่ 3.24 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.02644	7.52000	0.01000
<i>b</i>	0.02591	117.72000	0.01000
<i>c</i>	0.02817	161.16000	0.01000



รูปที่ 3.34 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 19 และ 20



รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 118 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.25 สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบ

ทดสอบเท่ากับ 275.320 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 100 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.011 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.25 ทำให้แรงดันที่บัส 100 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส *a* จาก 0.96206 เป็น 0.59630 p.u. เฟส *b* จาก 1.01350 เป็น 0.65372 p.u. และเฟส *c* จาก 0.97988 เป็น 0.65363 p.u. แรงดันที่บัส 79 ในเฟส *a* จาก 0.96001 เป็น 0.60519 p.u. เฟส *b* จาก 1.01060 เป็น 0.67096 p.u. และเฟส *c* จาก 0.97860 เป็น 0.66303 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5197.500 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.26 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 72 เชื่อมต่อระหว่างบัส 70 และบัส 100 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 16.58780 เป็น 75.49210 p.u. เฟส *b* จาก 10.31980 เป็น 71.95280 p.u. และเฟส *c* จาก 13.32420 เป็น 75.51050 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 72 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 2.11110 เป็น 56.76480 p.u. เฟส *b* จาก 1.32620 เป็น 60.68260 p.u. และเฟส *c* จาก 1.60280 เป็น 60.99160 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.27 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.25 จะพบว่าแรงดันที่บัส 79 รวมทั้งบัสที่เชื่อมต่อกับบัส 79 ไปยังโหนดปลายทาง ได้แก่ บัส 80 ถึง 99 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 79 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *a* จาก 0.60519 เป็น 1.04970 p.u. เฟส *b* จาก 0.67096 เป็น 1.02310 p.u. และเฟส *c* จาก 0.66303 เป็น 1.02870 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1508.700 kW ส่วนที่บัส 23 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น แต่กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 3.36 แสดงระบบทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส *a* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.37 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *a* จาก 75.49210 เป็น 23.52040 p.u. เฟส *b* จาก 71.95280 เป็น 17.37550 p.u. และเฟส *c* จาก 75.51050 เป็น 21.02280 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 72 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 56.76480 เป็น 90.45700 p.u. เฟส *b* จาก 60.68260 เป็น 87.44280 p.u. และเฟส *c* จาก 60.99160 เป็น 89.28750 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหนดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 77 ต่อกับบัส 79 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 5.13510 เป็น 41.81930 p.u. เฟส *b* จาก 4.96260 เป็น 40.86820 p.u. และเฟส *c* จาก 3.33150 เป็น 41.54490 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 79 เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100

ตารางที่ 3.25 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79

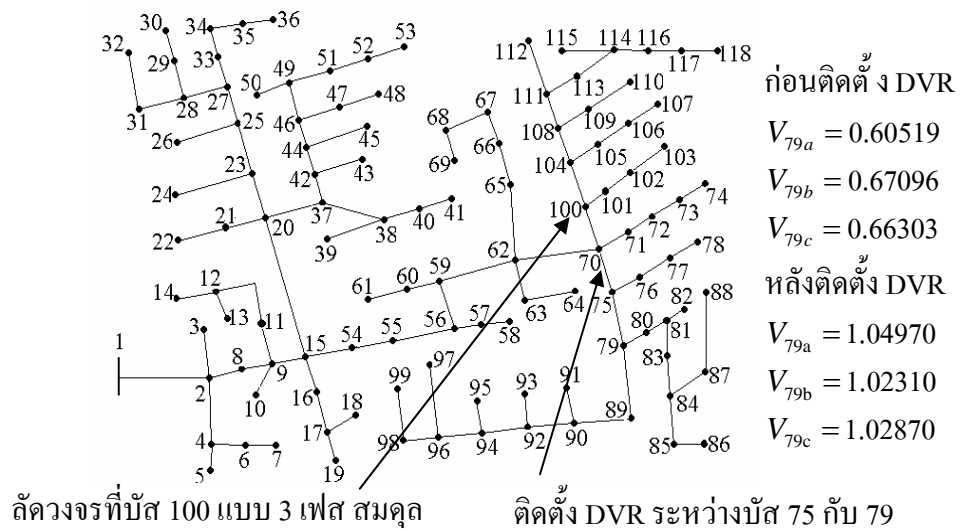
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 79
70	a	0.96314	0.61037	1.00810
	b	1.01400	0.67586	0.98556
	c	0.98065	0.66613	0.99617
79	a	0.96001	0.60519	1.04970
	b	1.01060	0.67096	1.02310
	c	0.97860	0.66303	1.02870
98	a	0.95635	0.59933	1.04620
	b	1.00550	0.66338	1.01790
	c	0.97938	0.66416	1.02950
100	a	0.96206	0.59630	0.98458
	b	1.01350	0.65372	0.95762
	c	0.97988	0.65363	0.97607
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		275.320	5197.500	1508.700

ตารางที่ 3.26 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79

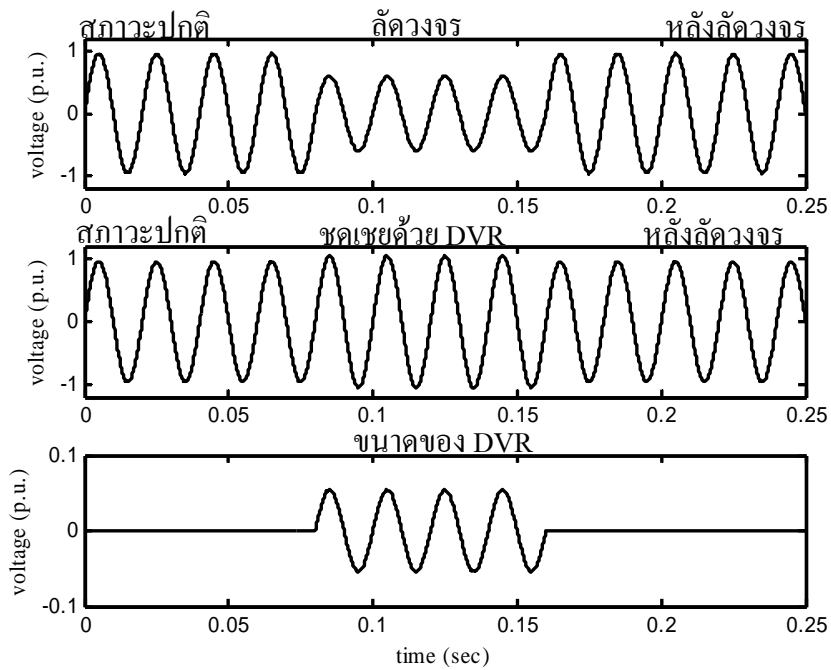
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 79
1	<i>a</i>	16.58780	75.49210	23.52040
	<i>b</i>	10.31980	71.95280	17.37550
	<i>c</i>	13.32420	75.51050	21.02280
57	<i>a</i>	7.86960	65.11600	16.35120
	<i>b</i>	6.28400	67.42370	13.71040
	<i>c</i>	7.40610	68.78770	16.15660
60	<i>a</i>	7.86960	65.11600	16.35120
	<i>b</i>	5.84740	66.87050	13.31110
	<i>c</i>	7.40610	68.78770	16.15660
64	<i>a</i>	6.73430	63.46840	15.62270
	<i>b</i>	4.61050	65.18310	12.22140
	<i>c</i>	5.22580	65.87690	14.70910
72	<i>a</i>	2.11110	56.76480	90.45700
	<i>b</i>	1.32620	60.68260	87.44280
	<i>c</i>	1.60280	60.99160	89.28750
77	<i>a</i>	3.22940	5.13510	41.81930
	<i>b</i>	3.28510	4.96260	40.86820
	<i>c</i>	2.24960	3.33150	41.84490

ตารางที่ 3.27 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.05396	227.28000	0.01000
<i>b</i>	0.05319	183.52000	0.01000
<i>c</i>	0.05426	79.134000	0.01000



รูปที่ 3.36 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 75 และ 79



รูปที่ 3.37 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.28 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 2985.200 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 70 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.002 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.28 ทำให้แรงดันที่บัส 70 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส *a* จาก 0.91341 เป็น 0.67469 p.u. เฟส *b* จาก 0.90999 เป็น 0.67529 p.u. และเฟส *c* จาก 0.90766 เป็น 0.67135 p.u. แรงดันที่บัส 60 ในเฟส *a* จาก 0.90907 เป็น 0.68464 p.u. เฟส *b* จาก 0.90584 เป็น 0.68508 p.u. และเฟส *c* จาก 0.90361 เป็น 0.68134 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 31512.000 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 3.29 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 69 เชื่อมต่อระหว่างบัส 69 และบัส 70 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 250.61780 เป็น 620.46260 p.u. เฟส *b* จาก 251.53280 เป็น 621.12780 p.u. และเฟส *c* จาก 259.38230 เป็น 628.12020 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 69 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *a* จาก 13.80290 เป็น 354.26480 p.u. เฟส *b* จาก 13.85580 เป็น 354.54930 p.u. และเฟส *c* จาก 15.35390 เป็น 354.48100 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60 ทั้ง 3 เฟสดังแสดงในตารางที่ 3.30 จากผลทดสอบในตารางที่ 3.28 จะพบว่าแรงดันที่บัส 60 มีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 60 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *a* จาก 0.68464 เป็น 0.97720 p.u. เฟส *b* จาก 0.68508 เป็น 0.89374 p.u. และเฟส *c* จาก 0.68134 เป็น 0.82254 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 12095.000 kW ส่วนที่บัส 70 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.38 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 60 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจรการชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.39 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *a* จาก 620.46260 เป็น 281.86800 p.u. เฟส *b* จาก 621.12780 เป็น 305.20300 p.u. และเฟส *c* จาก 628.12020 เป็น 307.88980 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 69 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *a* จาก 354.26480 เป็น 455.68840 p.u. เฟส *b* จาก 354.54930 เป็น 438.40740 p.u. และเฟส *c* จาก 354.48100 เป็น

410.26240 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 59 ต่อกับบัส 60 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 8.07170 เป็น 204.29860 p.u. เฟส b จาก 8.06650 เป็น 203.85600 p.u. และเฟส c จาก 8.11080 เป็น 203.71950 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับเข้าสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟิวส์แรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 60 เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟิวส์แรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70

ตารางที่ 3.28 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟิวส์แรงดันพลวัตที่บัส 60

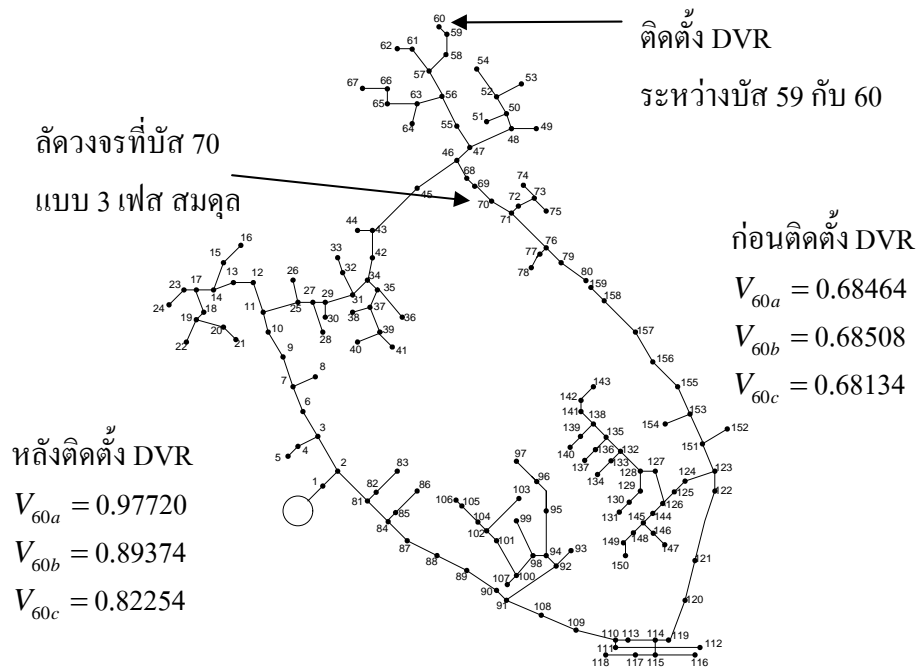
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 60
60	a	0.90907	0.68464	0.97720
	b	0.90584	0.68508	0.89374
	c	0.90361	0.68134	0.82254
69	a	0.91369	0.67977	0.89288
	b	0.91034	0.68033	0.85446
	c	0.90804	0.67647	0.79405
70	a	0.91341	0.67469	0.88443
	b	0.90999	0.67529	0.85002
	c	0.90766	0.67135	0.78857
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		2985.200	31512.000	12095.000

ตารางที่ 3.29 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบ
ปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60

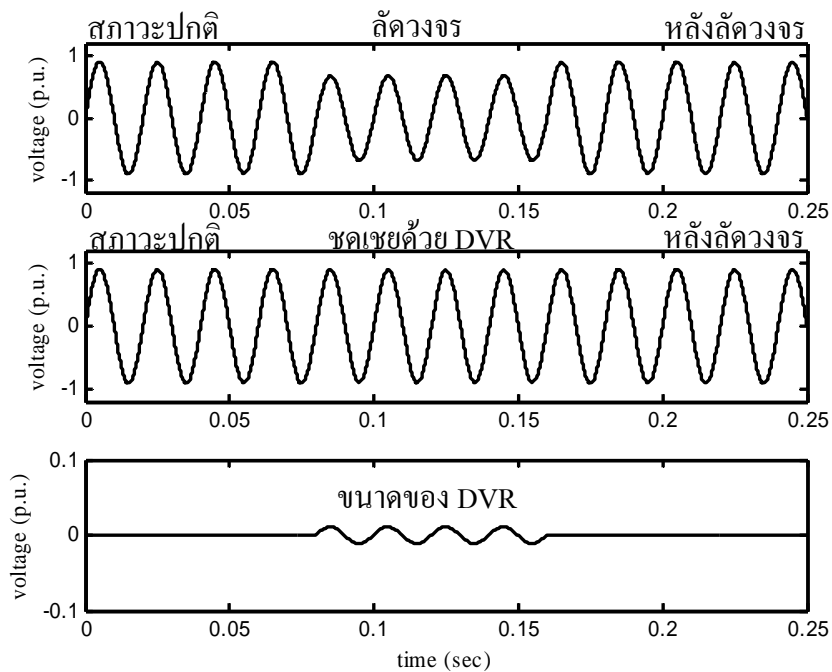
ลำดับของ สายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 60
1	a	250.61780	620.46260	281.86800
	b	251.53280	621.12780	305.20300
	c	259.38230	628.12020	307.88980
45	a	75.74790	431.43020	107.37640
	b	76.02140	431.65840	134.13080
	c	77.67250	432.08360	136.19560
59	a	6.07890	8.07170	204.29860
	b	6.10060	8.06650	203.85600
	c	6.11570	8.11080	203.71950
67	a	15.01210	355.75150	456.21460
	b	15.06940	356.03470	439.58890
	c	16.57040	355.97640	411.53050
68	a	13.80280	354.26480	455.08840
	b	13.85570	354.54930	438.40740
	c	15.35380	354.48100	410.26240
69	a	13.80290	354.26480	455.08840
	b	13.85580	354.54930	438.40740
	c	15.35390	354.48100	410.26240

ตารางที่ 3.30 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
a	0.01091	228.50000	0.00100
b	0.01094	211.17000	0.00100
c	0.01098	157.45000	0.00100



รูปที่ 3.38 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 60



รูปที่ 3.39 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองในสภาวะคงตัวของตัวพื้นฟูแรงดันพลวัต การพัฒนาแบบจำลองการฉีดกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บั๊สแอดมิตแตนซ์ และผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบ กำหนดให้เกิดลัดวงจรที่บั๊สที่ติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตและบั๊สอื่นที่มีผลทำให้บั๊สที่ติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตเกิดสภาวะแรงดันตก จำลองสถานการณ์การลัดวงจรที่บั๊สแบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน Z_f ลงกราวด์ ทำให้เกิดแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลัง และกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะสายป้อนที่ต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และสายป้อนที่ต่อกับบั๊สที่เกิดลัดวงจร และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต่อมาดำเนินการติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวพื้นฟูแรงดันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น กระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงใกล้เคียงกับระบบปกติแต่กระแสลัดวงจรในสายป้อนของบั๊สที่เกิดลัดวงจรมีขนาดลดลงไม่มากนัก ส่งผลให้ตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ ดังนั้น ตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องสามารถจ่ายกระแสลัดวงจรนี้ได้และสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงนี้ได้ ในกรณีการเกิดลัดวงจรที่บั๊สที่ติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัต ส่วนกรณีเกิดลัดวงจรที่บั๊สอื่นนั้นบั๊สที่เกิดลัดวงจรจะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนกลุ่มโหลดที่ติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตจะสามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้กลับมาสู่สภาวะปกตินอกจากนี้กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบลดลง หลังจากติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้ ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้น โค้งกำลัง-แรงดันและกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

4.1 บทนำ

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบไฟฟ้าที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวกลางที่จ่ายไฟให้กับผู้บริโภค โหลดในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันตอบสนองได้อย่างรวดเร็วต่อความผิดปกติของระบบ เช่น แรงดันตก แรงดันเกิน ความไม่สมดุลของระบบ หรือฮาร์มอนิก เป็นต้น สำหรับปัญหาแรงดันตกและแรงดันเกิน อาจเกิดจากขนาดของโหลดที่เพิ่มขึ้นและลดลงของกลุ่มโหลดหรือตามสถานะการใช้งาน ทำให้แรงดันที่ปลายทางหรือจุดโหลดแตกต่างจากค่าที่กำหนด ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมา คือ ความเสียหายของอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

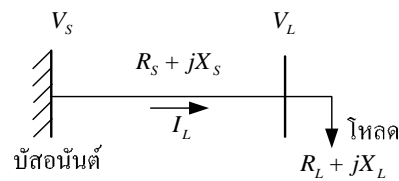
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยการควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้นโค้งกำลัง-แรงดันซึ่งมีความสัมพันธ์กับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังโดยตรง ลำดับต่อมา กล่าวถึงการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับระบบไฟฟ้าทำให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กำลังงานสูญเสียจะมีค่าลดลง เนื่องจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตช่วยยกระดับแรงดันบัสให้สูงขึ้นได้ แม้ในขณะที่เกิดลัดวงจร ขอมให้ระบบทำงานต่อไปได้ เรียกการทำงานนี้ว่า การจ่ายโหลดในสถานะฉุกเฉิน โดยทั่วไปการจ่ายโหลดภายใต้เงื่อนไขนี้มีกำลังงานสูญเสียมากกว่าการจ่ายโหลดในสถานะปกติหลายเท่าด้วยเทคโนโลยีของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต การจ่ายโหลดในสถานะฉุกเฉินสามารถทำได้ด้วยกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด แต่ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม ดังนั้นในส่วนท้ายของบทนี้ได้นำเสนอปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งดำเนินการจำลองสถานการณ์และการควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด

4.2 การควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างไม่มีจำกัด ทำให้ระบบมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพ เงื่อนไขดังกล่าวอยู่ที่ตำแหน่งปลายสุดของเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน (PV curve) จุดนี้มีประโยชน์อย่างมากและเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังรูปแบบหนึ่ง

ข้อมูลจากเส้นโค้งนี้ จะเป็นตัวบ่งชี้การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ซึ่งได้มาจากปัญหาเฉพาะของผลเฉลยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า จุดปลายของเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน มีความสัมพันธ์กับขนาดแรงดันทำงานในสถานะคงตัวที่ค่าไหลมากที่สุดก่อนที่แรงดันของระบบจะพังทลาย

เส้นโค้งกำลัง-แรงดัน เป็นเครื่องมือที่ใช้หาขอบเขตเสถียรภาพแรงดันในสถานะคงตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบ 2 บัส อย่างง่าย

ใช้หลักการ KVL คำนวณกระแส I_L ได้ดังนี้

$$I_L = \frac{V_s}{(R_s + R_L) + j(X_s + X_L)} \quad (4-1)$$

จากหลักการแบ่งแรงดันจะได้แรงดันที่บัสโหนด ดังสมการที่ (4-2)

$$V_L = \left[\frac{R_L + jX_L}{(R_s + R_L) + j(X_s + X_L)} \right] V_s \quad (4-2)$$

คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัสโหนด ได้ดังนี้

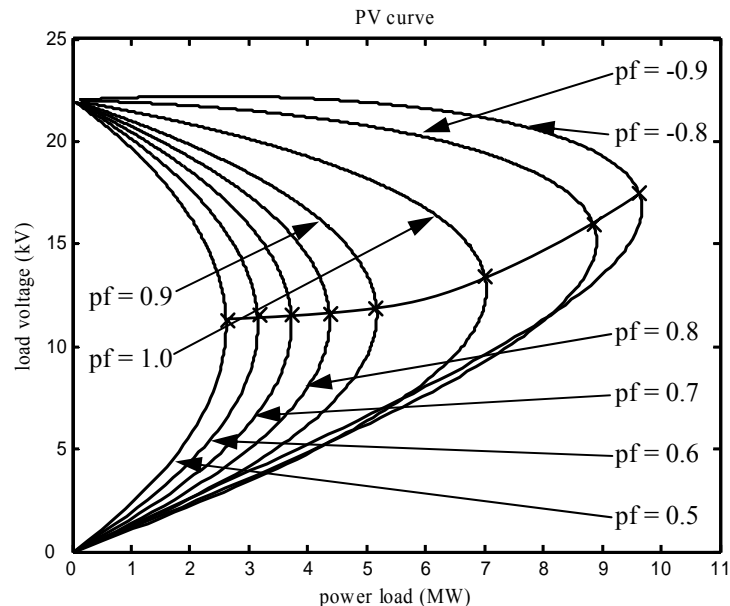
$$S_L = V_L I_L^* = P_L + jQ_L = \frac{R_L + jX_L}{(R_s + R_L)^2 + (X_s + X_L)^2} V_s^2 \quad (4-3)$$

ในกรณีการจ่ายโหนดที่ค่าตัวประกอบกำลังคงที่จะได้

$$\frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} = pf = \text{constant} \quad (4-4)$$

$$\text{นั่นคือ } X_L = \sqrt{\frac{R_L^2}{pf^2} - R_L^2} \quad (4-5)$$

จากสมการกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัสโหลดในสมการที่ (4-2) และ (4-3) สามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน ดังรูปที่ 4.2 เมื่อตัวประกอบกำลังของโหลดมีค่าเท่ากับ 0.8-0.9 แบบนำหน้า 0.5-0.9 แบบล่าหลัง และ 1.0



รูปที่ 4.2 เส้น โคงำลัง-แรงดัน

4.3 การควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

หัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคอย่างง่ายเพื่อควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันโหลดให้มีค่าที่ หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตลอดช่วงการทำงานของโหลดที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และช่วยทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้น เทคนิคการควบคุมนี้จะช่วยลดกำลังงานสูญเสียในระบบให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะวิเคราะห์สมรรถนะในสภาวะคงตัวโดยเน้นที่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ทั้งก่อนและหลังติดตั้ง

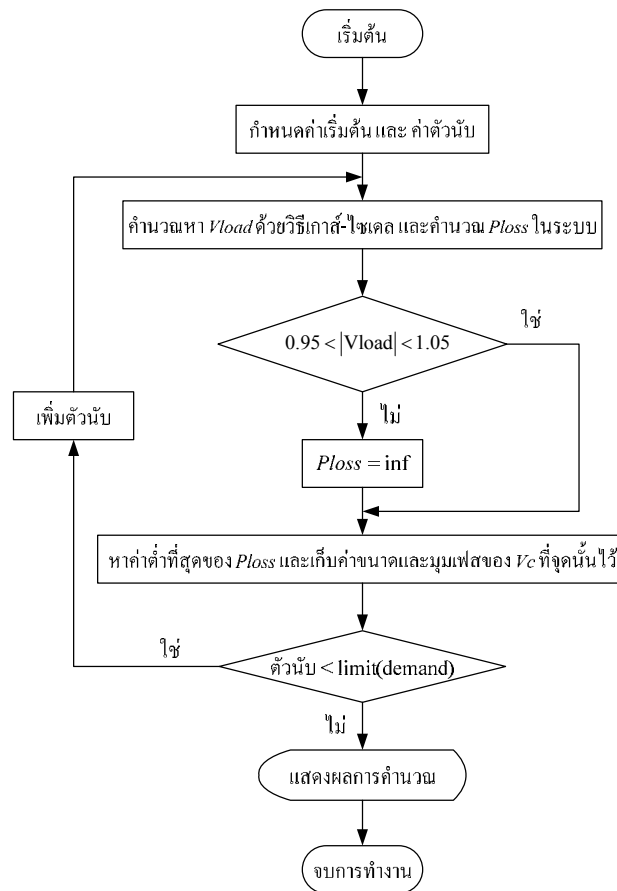
ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและขนาดแรงดัน โหลด ผลจากการทดสอบระบบตัวอย่างทำให้ได้สมการสำหรับควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อให้มีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ในขณะที่ยังคงรักษาระดับแรงดัน โหลดให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

จากสมการที่ (3-9) การรักษาระดับแรงดัน โหลดให้คงที่ทำได้โดยการควบคุมเฟสเซอร์ V_c ทั้งขนาดและมุมเฟส โดยการแก้สมการเพื่อค้นหาผลเฉลยแรงดัน ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีวนรอบเกาส์-ไซเดล สามารถแสดงการจำลองผลได้ตามแผนผังรูปที่ 4.3 ภายใต้เงื่อนไขของการทำงาน ดังสมการที่ (4-6)

$$\text{Minimize Power loss: } P_{loss} = |I_L|^2 R_s$$

$$\text{Subject to: } V_{load} = V_s + V_c - \frac{S_{load}^*}{V_{load}^*} \left\{ R_s + j(X_s + X_c) \right\} \quad (4-6)$$

$$0.95 \leq |V_{load}| \leq 1.05 \text{ p.u.}$$



รูปที่ 4.3 แผนผังขั้นตอนการจำลองผล

4.4 ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

การวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ผู้ออกแบบระบบต้องการให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟอย่างต่อเนื่อง มีความน่าเชื่อถือ ความมั่นคง เสถียรภาพในการทำงานสูงสุด ตลอดจนต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดด้วย การเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว (ชนัดชัย กุลวรรณิชพงษ์, 2542)

การไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (optimal power flow) เป็นการนำเอาวิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าด้วยกัน เพื่อให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบมีค่าต่ำที่สุด

ปัญหาการหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดมีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้น จึงมีการนำเอาเทคนิคการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear programming) มาใช้ แต่เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ในอดีตจึงนิยมแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาย่อย คือ การจัดสรรกำลังจริง (P-problem) และการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ (Q-problem) โดยจะทำการแก้ปัญหาทั้งสองปัญหาลับกันไป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริง (P-problem)

เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใช้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรควบคุม (controlled variables) แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าเทปหม้อแปลงเป็นตัวแปรคงที่ (fixed variables) เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง n บัส และมีจำนวนโรงจักรไฟฟ้าในระบบ N_G เครื่อง

1. ระบบไฟฟ้ามีจำนวนบัสควบคุมแรงดันจำนวน N_{PV} บัส
2. ระบบไฟฟ้ามี ULTC จำนวน N_T
3. ระบบไฟฟ้ามีบัสอ้างอิง 1 บัส

กำหนดให้ u เป็นตัวแปรควบคุม และ p เป็นตัวแปรคงที่

$$u = [P_{Gi}] \text{ และ } p = [V_j \ V_{ref} \ T_k]^T \quad (4-17)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } P_{Gi} &\sim [P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}] && ; i = 1, 2, \dots, N_G - 1 \\ V_j &\sim [V_j^{min}, V_j^{max}] && ; i = 1, 2, \dots, N_{PV} \\ T_k &\sim [T_k^{min}, T_k^{max}] && ; i = 1, 2, \dots, N_T \\ V_{ref} &\sim [V_{ref}^{min}, V_{ref}^{max}] \end{aligned}$$

โดยที่ $P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 V_j^{min}, V_j^{max} คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสควบคุม
 T_k^{min}, T_k^{max} คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแท็ปหม้อแปลง
 $V_{ref}^{min}, V_{ref}^{max}$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสอ้างอิง
 โดยมีรูปแบบของปัญหาดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) && (4-18) \\ &\text{subject to} && \text{power flow equations} \\ &&& \text{ขอบเขตของตัวแปรควบคุม ตัวแปรคงที่ และตัวแปรสถานะ} \end{aligned}$$

2) การจัดสรรกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q-problem)

เป็นการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้การสูญเสียของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าแท็ปหม้อแปลง เป็นตัวควบคุม กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรคงที่ เพื่อให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียต่ำสุดดังนี้

$$u = [V_j \ V_{ref} \ T_k]^T \text{ และ } p = [P_{Gi}] \quad (4-19)$$

โดยมีรูปแบบปัญหาเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \sum_{i=1}^{N_L} I_i^2 R_i && (4-20) \\ &\text{subject to} && \text{power flow equations} \\ &&& \text{ขอบเขตของตัวแปรควบคุม ตัวแปรคงที่ และตัวแปรสถานะ} \end{aligned}$$

3) การไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดโดยวิธีรวมการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าด้วยกัน

ปัจจุบันความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้การนำกระบวนการค้นหาจุดคำตอบที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีชาญฉลาด (intelligent methods) เช่น การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ กลยุทธ์วิวัฒนาการและเจเนติกอัลกอริทึมหรือการค้นหาแบบตาบอดเป็นต้น นอกจากนี้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีชาญฉลาดนี้ ไม่ต้องการสมมติฐาน

ทางคณิตศาสตร์ของปัญหามากนัก ต้องการเพียงค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่านั้น การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ดังนี้

ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการรวมการแก้ปัญหา P และ Q เข้าด้วยกัน มีดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} P_{Gi} \\ V_j \\ T_k \\ V_{ref} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

รูปแบบของการแก้ปัญหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสามารถพิจารณาได้ดังนี้

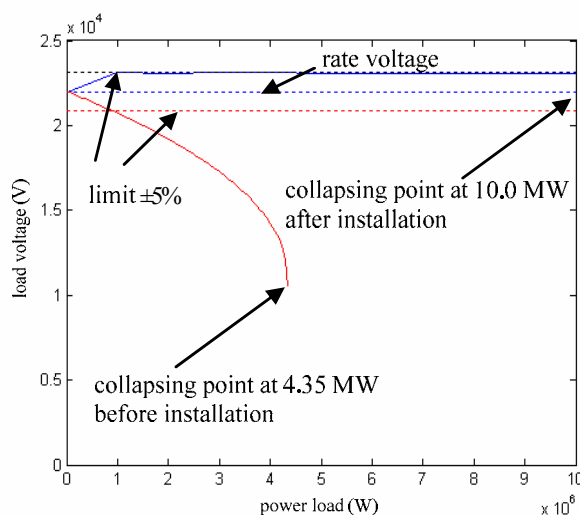
$$\begin{aligned} \text{Minimize} & \quad \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \\ \text{subject to} & \quad P_{calc} - P_{sch} = 0 \\ & \quad Q_{calc} - Q_{sch} = 0 \\ & \quad P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \\ & \quad Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \\ & \quad V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max} \\ & \quad T_k^{min} \leq T_k \leq T_k^{max} \\ & \quad V_{ref}^{min} \leq V_{ref} \leq V_{ref}^{max} \end{aligned} \quad (4-22)$$

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้การแก้ปัญหาค่าการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีลำดับควอดรติก (SQP) ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 5

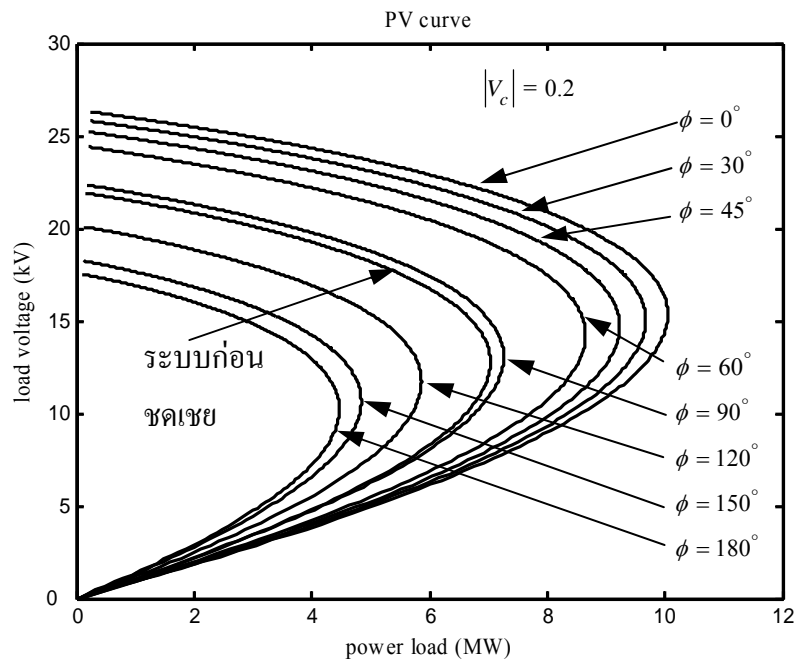
4.5 ผลทดสอบ

กำหนดระบบทดสอบในรูปที่ 4.4 เป็นระบบสายป้อน 3 เฟส 22 kV มีพารามิเตอร์ดังนี้ $V_s = 22 \text{ kV}$, $R_s = 3.75 \Omega$, $X_s = 6.75 \Omega$, $X_c = 0.1 \Omega$ ขนาดและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็น $|V_c| = 0 - 0.4 \text{ p.u.}$, $\phi = 0^\circ - 360^\circ$ จากการจำลองผล จะได้เส้นโค้งกำลัง-แรงดัน (PV curve) ของระบบก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ดังรูปที่ 4.4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าโหลด (P_{load}) กับขนาดแรงดันโหลด ($|V_{load}|$) ของระบบก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟู

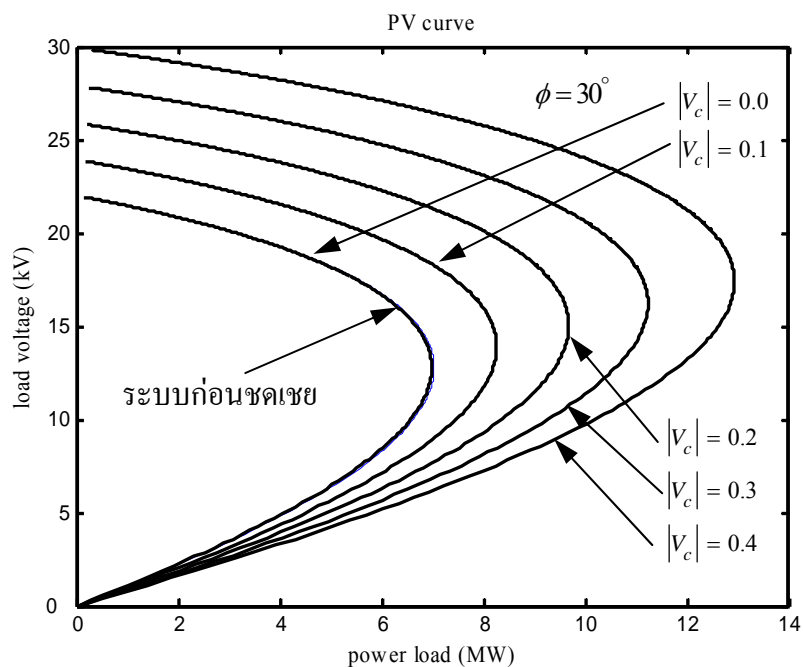
แรงดันพลวัต การจำลองผลแปรค่ากำลังไฟฟ้าโหลดให้มีขนาดมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งแรงดันโหลดมีขนาดลดลงถึงจุดพังทลายแรงดัน จากรูปที่ 4.4 เส้นกราฟของระบบก่อนติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตมีขนาดแรงดันโหลดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อกำลังไฟฟ้าโหลดมีขนาดมากขึ้นจนถึงจุดพังทลายที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.35 MW หลังจากนั้นระบบจะขาดเสถียรภาพทันที จะสังเกตเห็นว่าตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะรักษาระดับแรงดันโหลดให้มีขนาดอยู่ในแถบ $\pm 5\%$ ของ ขนาดแรงดันพิกัด ตลอดย่านกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดพังทลายที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 10 MW หลังจากนั้นระบบจะขาดเสถียรภาพทันทีเช่นกัน จะสังเกตเห็นว่าจุดพังทลายของระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต มีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตประมาณ 130 % และการรักษาระดับแรงดันโหลดให้คงที่ดีกว่า รูปที่ 4.5-4.6 แสดงเส้น โคง์กำลัง-แรงดันของระบบทดสอบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าระบบก่อนชดเชยจะมีค่าจุดพังทลายที่น้อยกว่าระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เช่น รูปที่ 4.5 ที่ค่ามุมเฟส $0^\circ - 90^\circ$ เส้นกราฟจะมีจุดพังทลายมากกว่าระบบก่อนชดเชย เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเข้าไปในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพสูงขึ้น จากรูปที่ 4.5-4.6 สามารถสรุปผลของการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อค่าขนาดและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางจะเห็นได้ว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะช่วยให้จุดพังทลายของระบบสูงขึ้นทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย เมื่อเลือกค่าขนาดและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม



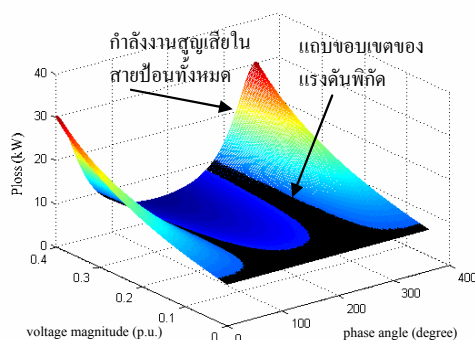
รูปที่ 4.4 PV curve ของระบบก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต



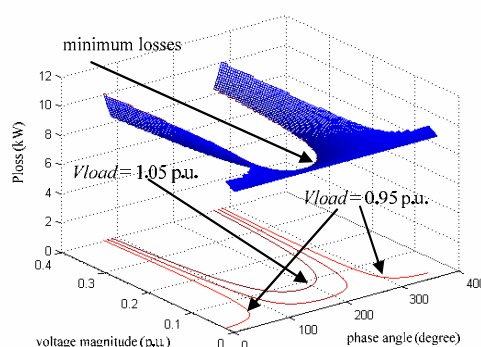
รูปที่ 4.5 PV curve โดยให้ขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตคงที่ที่ 0.2 p.u. และเปลี่ยนค่ามุมเฟสจาก 0 ถึง 180 องศา



รูปที่ 4.6 PV curve โดยให้มุมเฟสของแรงดันคงที่ที่ 30 องศา และเปลี่ยนค่าขนาดแรงดันจาก 0 ถึง 0.4 p.u.



รูปที่ 4.7 กำลังงานสูญเสียในสายป้อนในทุกช่วงของแรงดันโหลด



รูปที่ 4.8 กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในช่วงแรงดันโหลด $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันพิกัด

ตารางที่ 4.1 จุดพึ่งทลายแรงดันไฟฟ้าเมื่อเลือกค่าขนาดและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม

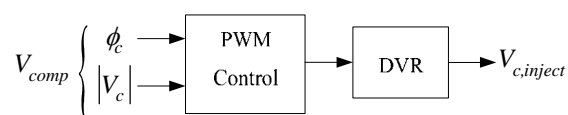
$ V_c $ (p.u.)	ϕ (องศา)								ระบบก่อนชดเชย
	0	30	45	60	90	120	150	180	
จุดพึ่งทลาย (MW)	10.1	9.7	9.1	8.6	7.3	5.8	4.9	4.4	7.0
ϕ (องศา)	$ V_c $ (p.u.)					ระบบก่อนชดเชย			
30	0	0.1	0.2	0.3	0.4				
จุดพึ่งทลาย (MW)	7.0	8.0	9.7	11.2	12.9	7.0			

จากรูปที่ 4.7–4.8 เป็นความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียในสายป้อนกับขนาดแรงดันและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จากรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่า กำลังงานสูญเสียมักจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและมุมเฟสของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งค่าที่แสดงเป็นกำลังงานสูญเสียนั้นยังไม่

พิจารณาขนาดแรงดันโวลต์ให้อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันพิกัด และถ้าพิจารณากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วง $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันพิกัด จะได้แถบของกำลังงานสูญเสียที่อยู่ในขอบเขตแรงดันพิกัดในรูปที่ 4.7 และ 4.8 สำหรับรูปที่ 4.8 แถบแรงเงาจะเป็นกำลังงานสูญเสียในสายส่ง ซึ่งจะอยู่ในขอบเขตของ $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันพิกัด ขอบด้านในของแถบแรงเงา เป็นผลลัพธ์ของค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากเส้นโค้งของผลลัพธ์สามารถหาสมการความสัมพันธ์ของมุมเฟสและขนาดแรงดันตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตได้ตามสมการที่ (4-23)

$$|V_c| = 0.0520\phi^4 - 0.6351\phi^3 + 2.9719\phi^2 - 6.2300\phi + 5.0159 \quad (4-23)$$

จากความสัมพันธ์ของเส้นโค้งจะเป็นเงื่อนไขในการควบคุมชุด PWM Control เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันชดเชยของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เข้าสู่ระบบไฟฟ้าสามารถแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพของชุดควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

โดยที่ $V_{c,inject}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

4.6 สรุป

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจำหน่ายไฟฟ้าของระบบ ก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พบว่าตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถชดเชยแรงดันตก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตมาก และตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีเสถียรภาพแรงดันสูงขึ้น ช่วยขยายย่านการจ่ายโหลด ทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้น เพราะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมสามารถลดกำลังงานสูญเสียในสายป้อนได้อีกด้วย ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยการค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม และการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5.1 บทนำ

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเหมือนกับปัญหาการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์ตัวอื่น เช่น ตัวเก็บประจุ SVC หรือ รีแอกเตอร์ เป็นต้น การดำเนินวางแผนชดเชยระบบโดยการไฟฟ้ายึดหลักของประสิทธิภาพโดยรวมและประหยัด ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมและขนาดที่พอเหมาะ ช่วยให้โหนดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม ปัญหาการกำหนดขนาดที่เหมาะสมเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดรูปแบบหนึ่ง การแก้ปัญหาที่มีกระบวนการที่แน่นอนและอัลกอริทึมที่ชัดเจน เช่น การโปรแกรมลำดับควอดราติก (SQP) ในส่วนของการหาตำแหน่งติดตั้งเป็นประเด็นที่ละเอียดอ่อนและต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง งานวิจัยนี้จะพิจารณาตำแหน่งติดตั้งจากตำแหน่งของบัสโหนดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ (weak bus evaluation) ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม สามารถระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดได้ (weakest bus) ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พิจารณาได้ดังนี้

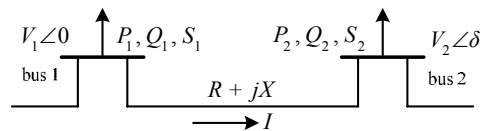
5.2 การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

การเพิ่มโหนดรีแอกทีฟอย่างช้า ๆ ที่จุดโหนดใด ๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้นลดต่ำลง เมื่อการเพิ่มขึ้นของโหนดรีแอกทีฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันบัสจะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อย่างไรก็ตามการลดลงของแรงดันมีค่าจำกัด เมื่อเกินค่าแรงดันพังทลายจะส่งผลให้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าไม่ลู่เข้า ขอบเขตสามารถวัดได้จากผลเฉลยค่าฐานมากที่สุดของจุดที่ลู่เข้าหาคำตอบในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่าโหนดมากที่สุดของแต่ละบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลเฉลยที่เป็นไปได้ของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ก่อนที่ระบบไฟฟ้ากำลังจะถึงจุดการพังทลายของแรงดัน (voltage collapse) สามารถหาค่าโหนดมากที่สุดได้จากลักษณะพื้นฐาน 2 ข้อ คือ เงื่อนไขบังคับสมการและอสมการ งานวิจัยส่วนใหญ่ยอมรับว่าค่าการจ่ายโหนดสูงสุดขึ้นอยู่กับกรู่เข้าของผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้า โดยการตรวจสอบความเป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ของเมตริกซ์จาโคเบียน ทำให้ประเมินค่าการจ่ายโหนดสูงสุดที่ทำให้ระบบ

มีเสถียรภาพได้การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันสามารถทำได้โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของดัชนีเสถียรภาพของสายจำหน่าย เพื่อระบุสายจำหน่ายที่มีความเครียดสูงที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง ดัชนีเหล่านี้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันบัสต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสนั้น ๆ อัตราส่วนดังกล่าวนำเสนอความไวของแรงดันบัสต่อการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งสัมพันธ์กับเสถียรภาพและการพังทลายของแรงดันในระบบ บัสที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์สูง จะเรียกว่า บัสที่อ่อนแอ (weak bus) งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 ตัว คือ ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง FVSI L_{mn} และ LQP ดังนี้

5.2.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว (Fast Voltage Stability Index: FVSI) สามารถคำนวณได้จากสมการกระแสที่ไหลผ่านสายส่งระหว่างบัส 2 บัส ดังรูปที่ 5.1 (Musirin, and Abdul Rahman, 2002)



รูปที่ 5.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 5.1 กำหนดให้

V_1, V_2 คือ แรงดันที่บัสส่งและบัสรับ

P_1, Q_1 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสส่ง

P_2, Q_2 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสรับ

S_1, S_2 คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของบัสส่งและบัสรับ

δ คือ $\delta_1 - \delta_2$ ความแตกต่างของมุมแรงดันระหว่างบัสส่งและบัสรับ

โดยกำหนดให้บัสส่งเป็นบัสอ้างอิง ($\delta_1 = 0$ และ $\delta_2 = \delta$) แล้วจะได้สมการกระแสทั่วไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \quad (5-1)$$

เมื่อ R เป็นความต้านทานของสายส่ง และ X เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่ง กำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัสรับมีค่าเท่ากับ

$$S_2 = V_2 I^* \quad (5-2)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (5-3)$$

สมการที่ (5-1) และ (5-3) เท่ากันดังนี้

$$\frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta}$$

$$(V_1 V_2 \angle -\delta) - (V_2^2 \angle 0) = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (5-4)$$

แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของสมการที่ (5-4) ได้ดังนี้

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R P_2 + X Q_2 \quad (5-5)$$

และ

$$-V_1 V_2 \sin \delta = X P_2 - R Q_2 \quad (5-6)$$

จัดรูปสมการที่ (5-6) เพื่อหาค่า P_2 จะได้

$$P_2 = \frac{R Q_2}{X} - \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (5-7)$$

แทนสมการที่ (5-7) ในสมการที่ (5-5) จะได้

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R \left(\frac{R Q_2}{X} - \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \right) + X Q_2$$

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 V_2 + \left(\frac{R^2}{X} + X \right) Q_2 = 0 \quad (5-8)$$

คำตอบของสมการที่ (5-8) คือ

$$V_2 = \frac{\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2}}{2} \quad (5-9)$$

จากสมการที่ (5-9) คำตอบของ V_2 จะเป็นค่าจริงก็ต่อเมื่อพจน์ในรากที่สองจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2 \geq 0$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (5-10)$$

กำหนดให้ δ มีค่าน้อยมากจะได้

$$\delta \approx 0, R \sin \delta \approx 0 \text{ และ } X \sin \delta \approx X$$

กำหนดให้ i เป็นบัสส่งกำลังไฟฟ้าและ j เป็นบัสรับกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ FVSI ดังนี้

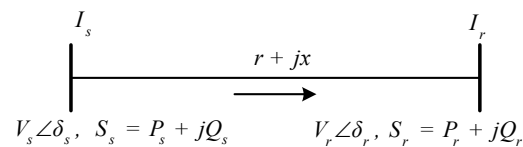
$$\text{FVSI}_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (5-11)$$

- โดยที่ Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง
 X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง
 Q_j คือ กำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่บัสรับ
 V_i คือ แรงดันที่บัสส่ง

ค่าของดัชนี FVSI จะมีขอบเขตที่ 1.00 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความไม่มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ถ้า FVSI มีค่าเป็น 1.00 แรงดันที่บัสรับปลายสายส่งจะลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้ากำลังตามมา

5.2.2 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง L_{mn}

เกณฑ์การพิจารณาเสถียรภาพแรงดันอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว การต่อเชื่อมระบบจะถูกลดเป็นแบบเส้นเดียวเพื่อใช้ประเมินเสถียรภาพทั้งหมดของระบบ พิจารณาระบบไฟฟ้าแบบเส้นเดียวในรูปที่ 5.2 (Moghavemmi, and Omar, 1998)



รูปที่ 5.2 แผนภาพของระบบส่งจ่ายแบบเส้นเดียว

จากแนวความคิดของการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งและการวิเคราะห์สายส่งแบบพาย การไหลกำลังไฟฟ้าที่ปลายส่งและปลายรับคำนวณได้ดังนี้

$$S_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \angle\theta \quad (5-12)$$

$$S_s = \frac{|V_s|^2}{Z} \angle\theta - \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle(\theta + \delta_s - \delta_r) \quad (5-13)$$

จากสมการกำลังไฟฟ้าปรากฏ สามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟัรีแอกทีฟได้ดังนี้

$$P_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \cos(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \cos\theta \quad (5-14)$$

$$Q_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \sin(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \sin\theta \quad (5-15)$$

แทนค่า $\delta_s - \delta_r = \delta$ ในสมการที่ (5-15) และแก้สมการหา V_r จะได้

$$V_r = \frac{V_s \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2 - 4xQ_r \sin\theta}}{2\sin\theta} \quad (5-16)$$

จาก $Z\sin\theta = x$ จะได้

$$V_r = \frac{V_s \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2 - 4xQ_r}}{2\sin\theta} \quad (5-17)$$

จากสมการที่ (5-17) จะได้ค่าจริงของ V_r ในรูปของ Q_r ก็ต่อเมื่อผลเฉลยของสมการในรากที่สองมีค่าเป็นจำนวนจริง จากเงื่อนไขนี้สามารถนำมาใช้กำหนดเกณฑ์เสถียรภาพแรงดันของระบบได้ ดังนี้

$$[V_s \sin(\theta - \delta)]^2 - 4xQ_r \geq 0$$

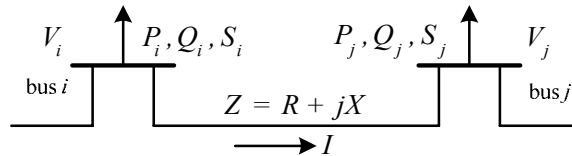
หรือ

$$\frac{4xQ_r}{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2} = L_{mn} \leq 1.00 \quad (5-18)$$

L_{mn} เป็นดัชนีเสถียรภาพของสายส่ง การพังทลายของแรงดันสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำบนพื้นฐานของดัชนีสายส่ง L_{mn} ที่มีค่าน้อยกว่า 1.00 ระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพ แต่เมื่อ L_{mn} มีค่ามากกว่า 1.00 ระบบไฟฟ้าจะขาดเสถียรภาพ และการพังทลายของแรงดันจะเกิดขึ้น

5.2.3 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง LQP

ดัชนี LQP ถูกพัฒนาโดย (Mohamed, Jasmon, and Yusoff, 1989) ซึ่งใช้แนวคิดแบบเดียวกันกับดัชนี FVSI และ L_{mm} สูตรการคำนวณเริ่มต้นจากสมการกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว

LQP สามารถหาได้จาก

$$LQP = 4 \left(\frac{X}{V_i^2} \right) \left(\frac{X}{V_i^2} P_i^2 + Q_j \right) \quad (5-19)$$

โดยที่ X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

Q_j คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลไปสู่บัสรับ

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัสส่ง

V_i คือ แรงดันที่บัสส่ง

LQP จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1.00 เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

5.3 การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม

การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการติดตั้งที่บัสที่อ่อนแอที่สุดจากการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนการค้นหาขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด ดังนี้

5.3.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลดอย่างต่อเนื่อง ทำให้แรงดันที่บัสโหลดลดต่ำเช่นเดียวกันและดัชนีเสถียรภาพแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อดัชนีเสถียรภาพแรงดันตัวใดตัวหนึ่งมีค่ามากกว่า 1.00 แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟถึง

ขอบเขตเสถียรภาพแรงดัน ค่าสุดท้ายของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก่อนที่มีดัชนีเสถียรภาพแรงดันจะมากกว่า 1.00 จะเป็นค่าที่มากที่สุดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสโหลดนั้น ๆ บัสโหลดใดที่มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จุดพังทลายของแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด บัสนั้นจะเป็นบัสโหลดที่อ่อนแอที่สุดเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก

5.3.2 การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดำเนินการโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายป้อนร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้แก่ ขนาดแรงดัน มุมเฟส และ ค่ารีแอกแตนซ์สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5-20)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & P_{loss} \\ \text{subject to} \quad & V_c^{\min} \leq V_c \leq V_c^{\max} \quad \text{p.u.} \\ & \phi_c^{\min} \leq \phi_c \leq \phi_c^{\max} \quad \text{degree} \\ & X_c^{\min} \leq X_c \leq X_c^{\max} \quad \Omega \end{aligned} \quad (5-20)$$

เมื่อ P_{loss} คือ ฟังก์ชันกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายป้อน

เมื่อกำลังงานสูญเสียในสายป้อนคำนวณได้จากค่าแรงดันบัสที่ได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า สามารถนำมาหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และคำนวณกำลังงานสูญเสียในสายส่ง พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างบัส i และ j ในรูปที่ 5.4 ใช้วิธีวิเคราะห์แบบโนดจะได้กระแสไฟฟ้าจากบัส $i \rightarrow j$ และจาก $j \rightarrow i$ ดังสมการที่ (5-21) และ (5-22) ตามลำดับ

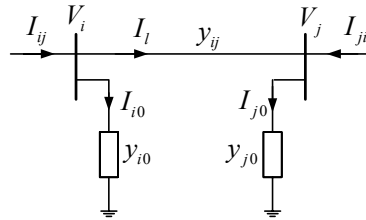
$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (5-21)$$

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (5-22)$$

กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนจากบัส i ไป j (S_{ij}) และจากบัส j และ i (S_{ji}) เป็นดังสมการ

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (5-23)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (5-24)$$

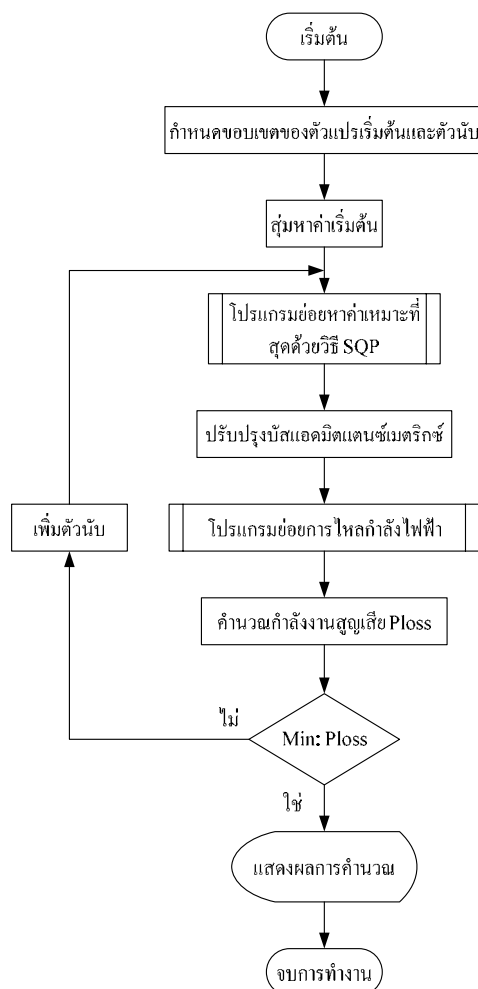


รูปที่ 5.4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำลังงานสูญเสียในสายส่งจากบัส i ไป j หาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งดังสมการที่ (5-25)

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (5-25)$$

กำลังงานสูญเสียในสายป้อนคือส่วนจริงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งในสมการที่ (5-25) สามารถแสดงแผนภาพการทำงานของการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนภาพการทำงานของการทำงานหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5.3.3 การโปรแกรมลำดับควอดราติก (sequential quadratic programming)

ระเบียบวิธีการโปรแกรมลำดับควอดราติก (Sequential Quadratic Programming: SQP) (ชนิดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2548) เป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับหลังสุด แต่อาจจะเรียกได้ว่าเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่นักคณิตศาสตร์สามารถคิดค้นขึ้นมาได้จนถึงปัจจุบัน ถึงแม้จะมีเทคนิคอื่น ๆ เช่น ระเบียบวิธีการปรับโทษ (penalty method) ที่ทำให้แก้ปัญหาได้ง่ายกว่า แต่ผลเสียก็คือการเลือกพารามิเตอร์การปรับโทษที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้การลู่เข้าช้า และในบางกรณีไม่ลู่เข้าเลย เนื่องจากการสร้างกำแพงกั้นระหว่างเซตที่เป็นไปได้กับเซตที่เป็นไปไม่ได้ของคำตอบนั้น ทำให้การคำนวณค่าเกรเดียนต์ บริเวณขอบเขตของเซตดังกล่าวมีปัญหาในตัวเอง การพัฒนาระเบียบวิธี SQP นี้มีหลายรูปแบบ เพื่อให้ง่ายในการพิจารณา จะนำเสนอรูปแบบที่ง่ายที่สุด ถึงแม้จะไม่มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ SQP บางวิธีที่

ถูกพัฒนาขึ้นก็ตาม แต่ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอเหมาะสำหรับการศึกษาขั้นต้น อัลกอริทึมไม่มีความซับซ้อนมากนัก สามารถนำไปเขียนเป็นชุดคำสั่งสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ไม่ยากนัก อย่างไรก็ตาม นอกจากชื่อดังกล่าวแล้ว SQP อาจจะเรียกได้อีกหลายชื่อ เช่น Successive Quadratic Programming (SQP), Iterative Quadratic Programming (IQP), Constrained Variable Metric และ Projected Lagrangian method เป็นต้นพิจารณาปัญหาต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) \\ \text{subject to} \quad & g(x) = 0 \end{aligned} \quad (5-26)$$

จากฟังก์ชันลากรองจ์

$$L(x, \lambda) = f(x) - \lambda^T g(x) \quad (5-27)$$

โดยใช้การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีนิวตัน ถ้าเริ่มต้นที่จุดคำตอบ $[x_k, \lambda_k]^T$ ใด ๆ สามารถปรับปรุงจุดคำตอบได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ \lambda_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ \lambda_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (5-28)$$

ทิศทางการค้นหาคำตอบได้จากการแก้สมการเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k) & -\nabla g(x_k, \lambda_k)^T \\ -\nabla g(x_k, \lambda_k) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_x L(x_k, \lambda_k) \\ g(x_k, \lambda_k) \end{bmatrix} \quad (5-29)$$

กระบวนการวนรอบจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่า $\max \|p_k\| < \varepsilon$ ซึ่งปัญหาในรูปแบบดังกล่าว สอดคล้องกับการประมาณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยฟังก์ชันควอดราติก และการประมาณค่าเงื่อนไขบังคับในรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(x) &\Rightarrow \text{Minimize } \nabla_x^T L(x_k, \lambda_k) p_k + \frac{1}{2} p_k^T [\nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k)] \\ \text{subject to } g(x) = 0 &\quad \text{subject to } \nabla g(x_k, \lambda_k)^T p_k = 0 \end{aligned} \quad (5-30)$$

อย่างไรก็ตาม ปัญหาการปรับปรุงจุดคำตอบด้วยเมตริกซ์เฮสเซียนของลากรองจ์ฟังก์ชันทำให้ไม่สามารถรับประกันการลู่เข้าของคำตอบได้ ดังนั้น ต้องแทนเมตริกซ์เฮสเซียนด้วยสูตรการคำนวณเมตริกซ์ B ด้วยสมการควอไซนิวตัน เช่น สมการ BFGS ดังนี้

$$B_{k+1} = B_k - \frac{(B_k s_k)(B_k s_k)^T}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} \quad (5-31)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } s_k &= x_{k+1} - x_k \\ y_k &= \nabla_x L(x_{k+1}, \lambda_{k+1}) - \nabla_x L(x_k, \lambda_k) \end{aligned}$$

จะได้สมการคำนวณเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} B_k & -\nabla g(x_k, \lambda_k)^T \\ -\nabla g(x_k, \lambda_k) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_x L(x_k, \lambda_k) \\ g(x_k, \lambda_k) \end{bmatrix} \quad (5-32)$$

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีจุดเป็นไปไม่ได้ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ระเบียบวิธีเกรเดียนต์ลดทอน ระเบียบวิธีเกรเดียนต์โปรเจกชันหรือระเบียบวิธีการโปรแกรมลำดับควอดราติก อาศัยหลักการสร้างจุดคำตอบภายใต้เงื่อนไขของความสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ในหลาย ๆ กรณี การหาจุดที่เป็นไปได้ในเวลาเดียวกันกับการทำให้ค่าฟังก์ชันมีค่าต่ำที่สุดในทิศทางที่ค้นหาที่กำหนด เป็นไปได้อย่างยากหรืออาจจะเป็นไปได้เลย กระบวนการวนรอบเพื่อหาช่วงก้าวที่เหมาะสมอาจจะเสี่ยงต่อการไม่ลู่เข้า หรือใช้เวลาคำนวณช่วงก้าวที่เหมาะสมนานเกินไป ทำให้ข้อดีของระเบียบวิธีที่ใช้หลักการดังกล่าวไม่คงทน (lack of robustness) เพื่อให้การแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคงทนเพื่อรับประกันว่ากระบวนการค้นหาต้องรับประกันคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นอย่างน้อยที่สุด 1 คำตอบ

การแก้ปัญหาโดยไม่ใช้การหาคำตอบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับจะทำให้ลดความยุ่งยากและการแก้ปัญหามีความคงทนขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อกระบวนการค้นหาที่ใช้สร้างจุด

คำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ถึงแม้คำตอบนั้นจะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นที่น่าพอใจ ก็ต้องไม่นำคำตอบดังกล่าวมาใช้ งาน การจะทำเช่นนี้ได้ นั้น จะต้องมี การกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพิ่มเติมในกรณี ที่คำตอบไม่สอดคล้องกับสมการ อาจอยู่ในรูปของการบวกค่าปรับโทษ (penalty term) ที่กำหนดขึ้นมาเป็นการเฉพาะกิจ ทำให้เมื่อคำตอบที่ได้ ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับจะทำให้ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูง และจุดนี้จะโดนกำจัดออกไปในกระบวนการค้นหา ช่วงก้าวที่เหมาะสม ดังนั้น ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับจะถูกลดรูปไปเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ ทำให้วิธีการแก้ปัญหาอาจจะใช้ ระเบียบวิธีขั้นที่สุดหรือ ระเบียบวิธีควอไซนิวตัน

พิจารณาปัญหาค่าเหมาะที่สุดจากสมการที่ (5-26) ปัญหานี้จะแบ่งคำตอบ ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ และกลุ่มที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยกำหนดพจน์การปรับโทษ (penalty term) $\Omega(x)$ ดังนี้

$$\Omega(x) = \begin{cases} 0 & ; x \in S \\ +\infty & ; x \notin S \end{cases} \quad (5-33)$$

ทำให้ได้ปัญหาในรูปฟังก์ชันการปรับโทษ (penalty function) $P(x)$ ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (5-34)$$

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว เมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ที่ได้มีค่าเป็นอนันต์ ในกรณี ที่คำตอบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ จะทำให้การคำนวณค่าเกรเดียนต์หรือข้อมูลอื่น ๆ ทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีนิยามการคำนวณค่า ∞ ในการคำนวณเชิงตัวเลข นอกจากนี้ฟังก์ชันที่ได้ยัง ไม่มีความต่อเนื่องอีกด้วย ดังนั้น การใช้ฟังก์ชันต่อเนื่องที่ให้ค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อคำตอบ เคลื่อนตัวเข้าหาจุดขอบ (boundary) ของเซตคำตอบที่เป็นไปได้ โดยจะใช้พจน์การปรับโทษที่เขียน ในรูปของฟังก์ชันของเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\Omega(x, \rho) = \rho \times \gamma \{g(x), h(x)\} \quad (5-35)$$

พจน์การปรับโทษอาจจะใช้ฟังก์ชันดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันพาราโบลารือควอดราติก

$$\Omega(x, \rho) = \rho \times [g(x)]^2, \quad \Omega(x, \rho) = \rho \times [h(x)]^2 \quad (5-36)$$

ฟังก์ชันลอการิทึม

$$\Omega(x, \rho) = -\rho \times \ln\{g(x)\}, \quad \Omega(x, \rho) = -\rho \times \ln\{h(x)\} \quad (5-37)$$

ฟังก์ชันส่วนกลับ

$$\Omega(x, \rho) = \rho \times \left[\frac{1}{g(x)} \right], \quad \Omega(x, \rho) = \rho \times \left[\frac{1}{h(x)} \right] \quad (5-38)$$

ปัญหาสำคัญที่ทำให้เงื่อนไขบังคับอสมการมีความยุ่งยากก็คือ ถ้า $h(x) < 0$ ค่าของพจน์การปรับโทษต้องมีค่าสูง คล้ายการสร้างกำแพงขึ้นกันไม่ให้จุดคำตอบข้ามไปนฝั่งของเขตคำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ดังนั้น การกำหนดค่าพจน์การปรับโทษในกรณีนี้ต้องพิจารณาสถานการณ์ดังกล่าวด้วยนั่นเอง ซึ่งอาจจะทำได้ดังนี้

$$\Omega(x, \rho) = \rho \times [\min\{h(x), 0\}]^2 \quad (5-39)$$

5.4 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

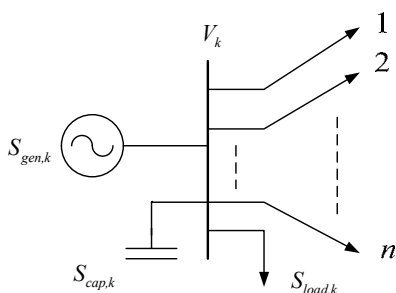
ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีขนาดใหญ่และซับซ้อน การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการไฟฟ้าทุกแห่ง โดยเฉพาะการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การแก้ปัญหาแรงดันตกปลายสายส่วนใหญ่ใช้การติดตั้งตัวเก็บประจุที่โนดต่าง ๆ กระจายในสายป้อน ดังนั้น การวางแผนการทำงานตลอดจนการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงผลจากอุปกรณ์ชดเชยดังกล่าวด้วย งานวิจัยนี้จะพิจารณาสถานการณ์ที่ระบบจำหน่ายมีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่กระจายกันตามตำแหน่งต่าง ๆ การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุเป็นการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสอง จุดประสงค์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ คือ ลดขนาดโหลดที่ต้องการมากที่สุดตามเงื่อนไขของพระราชบัญญัติของการไฟฟ้า ลดกำลังงานสูญเสีย

และลดฮาร์มอนิก เป็นต้น ตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนานโดยจะติดตั้งที่ บัสหรือจุดโหลด การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น ความต้องการ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar) ระดับของแรงดัน ชนิดของโหลด ธรรมชาติของโหลด ระดับฮาร์มอนิก ภูมิอากาศ ความปลอดภัยของระบบ และราคาของตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ตัวเก็บประจุจะช่วยให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความปลอดภัยจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า การพิจารณาตัวเก็บประจุ สามารถจำลองได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power model) และแบบจำลองซัสเซปแตนซ์ (susceptance model) มีรายละเอียด ดังนี้

5.4.1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

พิจารณาจากรูปที่ 5.6 ตัวเก็บประจุที่ถูกติดตั้งสามารถนำมาคำนวณโดยการตัดแปลง สมการกำลังไฟฟ้าไม่สอดคล้อง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส (scheduled power) ดังนี้



รูปที่ 5.6 ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ใด ๆ

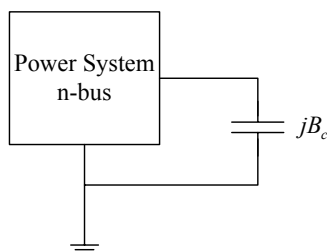
$$S_{sch,k} = S_{gen,k} - S_{load,k} + S_{cap,k} \quad (5-40)$$

- โดยที่ $S_{sch,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k
 $S_{gen,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัส k
 $S_{load,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k
 $S_{cap,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุ

5.4.2 แบบจำลองซัสเซปแตนซ์

จากรูปที่ 5.7 ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าซัสเซปแตนซ์คงที่ B_c ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ต้องถูกตัดแปลง ในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมของ โหนดที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ ดังนี้

$$[\mathbf{Y}_{\text{bus}}]_{k,k}^{(\text{new})} = [\mathbf{Y}_{\text{bus}}]_{k,k}^{(\text{old})} + j[\mathbf{B}_c] \quad (5-41)$$



รูปที่ 5.7 ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชั้สเซปแดนซ์คงที่ B_c

5.5 ผลทดสอบ

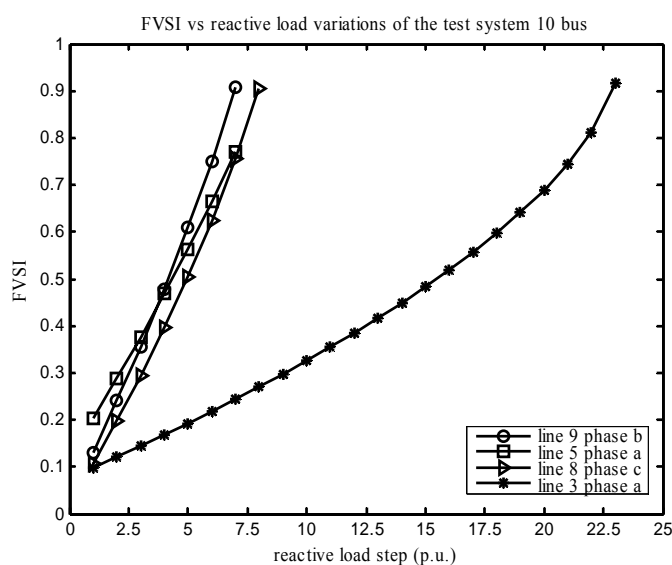
การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว ได้แก่ FVSI, L_{mn} และ LQP ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม ส่วนที่ 3 เป็นการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ และส่วนสุดท้ายเป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร โดยทั้ง 3 ส่วนทดสอบกับระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสจ่ายโหลดไม่สมดุล ข้อมูลระบบทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. เมื่อค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอได้ จะจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้าชนิดลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอที่สุดเพื่อให้มีขนาดแรงดันที่ลดลง ขั้นตอนต่อมาในส่วนที่สองจะค้นหาขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ในส่วนสุดท้าย นำเสนอการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุซึ่งเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

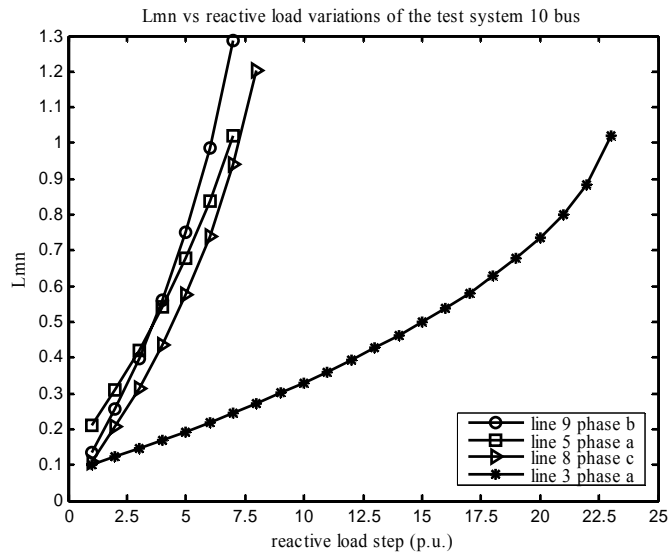
1) ระบบทดสอบ 10 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 10 บัส แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จาก การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ที่รีแอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ที่รีแอกทีฟที่มากที่สุด

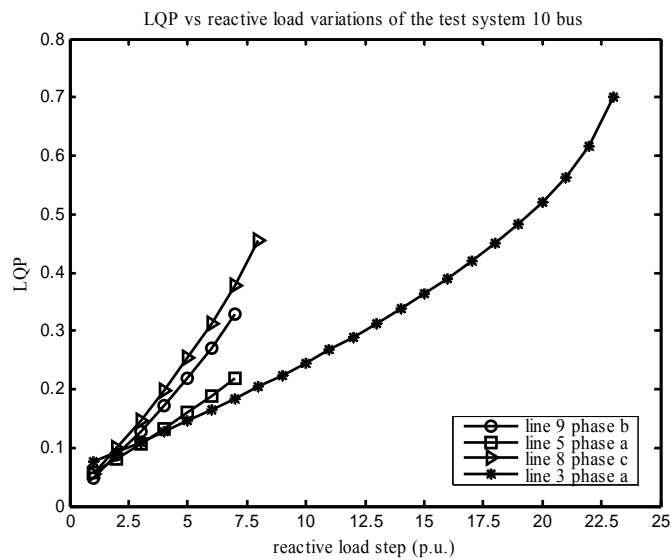
กำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 5.1 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 10 เฟส b ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 9 เฟส b มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 3.1950 p.u. FVSI เท่ากับ 0.7759 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 10 บัส ในรูปที่ 5.8 สายป้อนเส้นที่ 9, 5, 8 และ 3 อ้างอิงถึงบัส 10, 6, 9 และ 4 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 9 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.9978 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 10 บัส ในรูปที่ 5.9 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี L_{mn} มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 9 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี L_{mn} มากที่สุด และดัชนี LQP เท่ากับ 0.3857 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบทดสอบ 10 บัส ในรูปที่ 5.10 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี LQP มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 9 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี LQP มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.6742 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหลดของระบบทดสอบ 10 บัส ในรูปที่ 5.11 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสโหลดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ บัส 10 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 10 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด



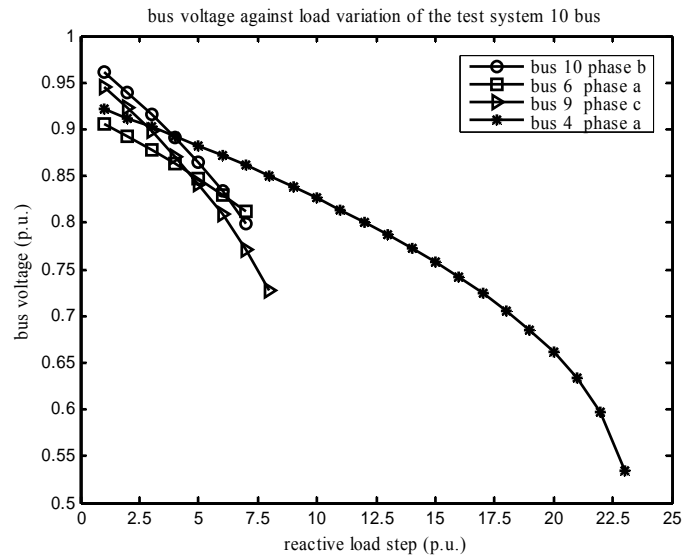
รูปที่ 5.8 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส



รูปที่ 5.9 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส



รูปที่ 5.10 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส



รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส

ตารางที่ 5.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส

ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	10	b	3.1950	0.7759	0.9978	0.3857	0.6742
2	6	a	3.2500	0.8447	0.9971	0.4414	0.6066
3	9	c	3.4350	0.8123	0.9979	0.4117	0.6828
4	4	a	3.5300	0.7240	0.7651	0.5917	0.4891
5	8	a	4.5100	0.7121	0.7516	0.5808	0.4785
6	7	a	4.5200	0.7031	0.7414	0.5742	0.4893
7	3	a	5.0800	0.8763	0.9425	0.6317	0.4467
8	2	a	6.5700	0.8409	0.9004	0.6667	0.4658
9	7	c	9.2750	0.7889	0.9990	0.5402	0.5086
10	8	b	10.5050	0.8015	0.9957	0.5689	0.5429

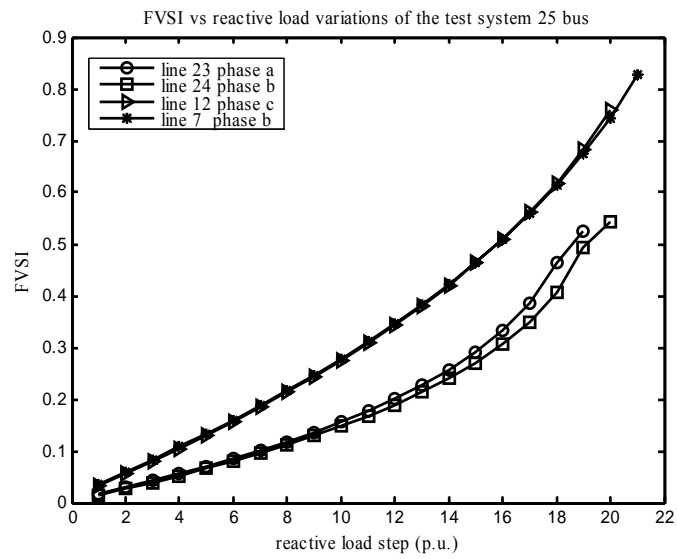
2) ระบบทดสอบ 25 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 25 บัส แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 7 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จาก

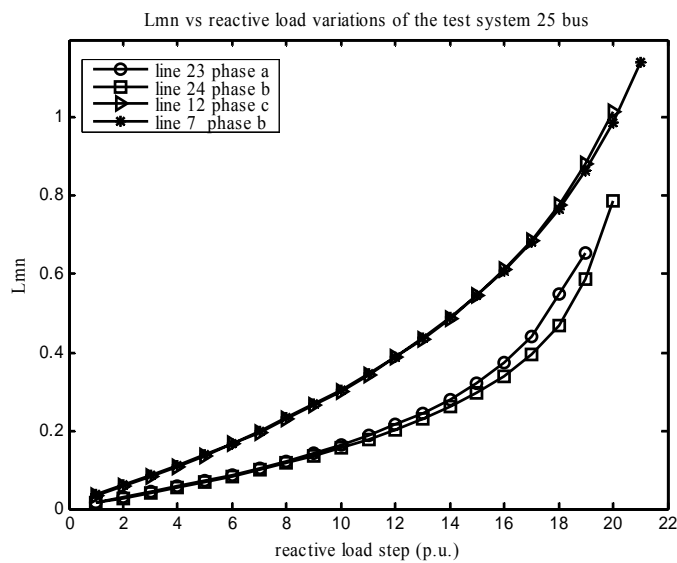
การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 5.2 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 12 เฟส a ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 23 เฟส a มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 19.2000 p.u. FVSI เท่ากับ 0.6427 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 25 บัส ในรูปที่ 5.12 สายป้อนเส้นที่ 23, 24, 12 และ 7 อ้างอิงถึงบัส 12, 13, 22 และ 25 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 23 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุดสำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.7892 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 25 บัส ในรูปที่ 5.13 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี L_{mn} มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 23 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี L_{mn} มากที่สุด และดัชนี LQP เท่ากับ 0.2913 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบทดสอบ 25 บัส ในรูปที่ 5.14 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี LQP มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 23 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี LQP มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสไหลคมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.5335 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสไหลคของระบบทดสอบ 12 บัส ในรูปที่ 5.15 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสไหลคมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบัส 12 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 12 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด

ตารางที่ 5.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส

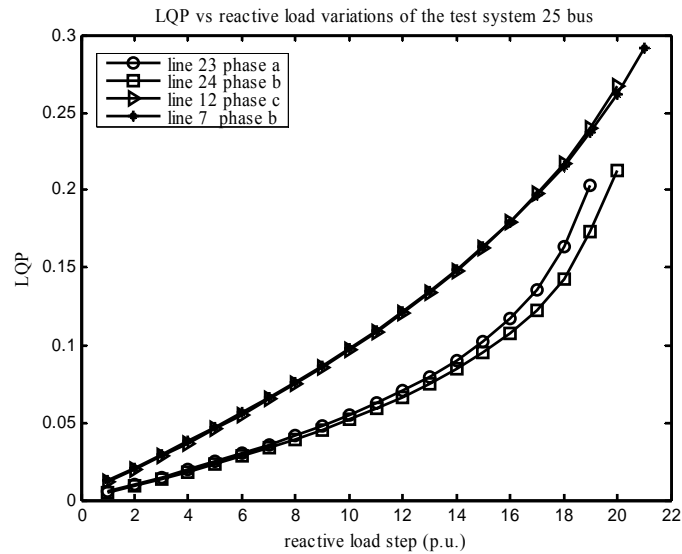
ลำดับ	บัส	เฟส	Q_{limit}	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	12	a	19.2000	0.6427	0.7892	0.2913	0.5335
2	13	b	19.8800	0.6838	0.8386	0.2739	0.5350
3	22	c	20.3500	0.7502	0.9997	0.264	0.6987
4	25	b	20.6900	0.7510	0.9992	0.2643	0.7034
5	11	a	21.2800	0.7489	0.9505	0.3200	0.5310
6	8	b	21.3000	0.7625	0.9999	0.2997	0.7925
7	19	b	21.3100	0.7502	0.9999	0.2640	0.7152



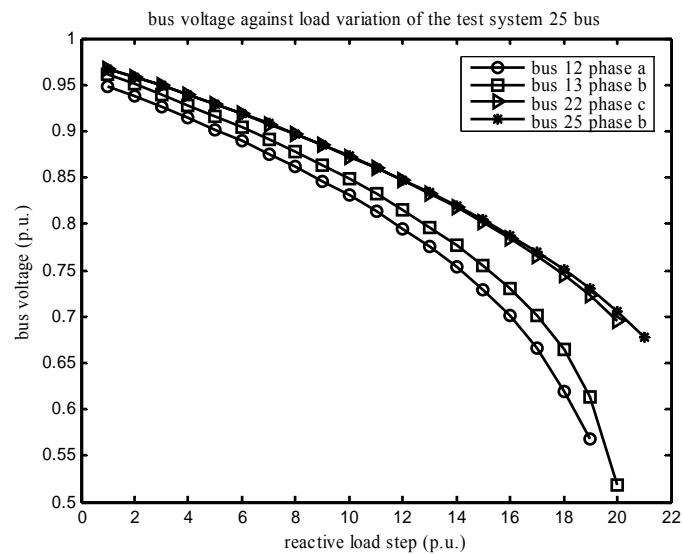
รูปที่ 5.12 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส



รูปที่ 5.13 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส



รูปที่ 5.14 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส



รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mm} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 37 บัส แสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 8 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟรีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อยๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า

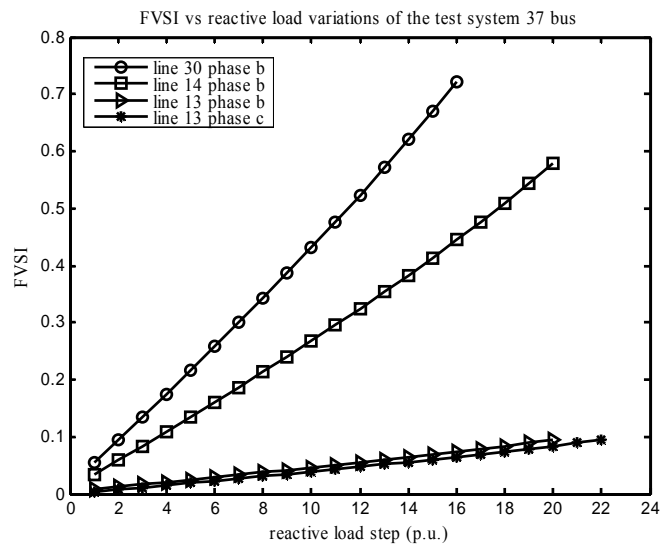
1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 5.3 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 30 เฟส b ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 30 เฟส b มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 7.8100 p.u. FVSI เท่ากับ 0.6804 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 37 บัส ในรูปที่ 5.16 สายป้อนเส้นที่ 30, 14, 13 เฟส b และ 13 เฟส c อ้างอิงถึงบัส 30, 13, 12 เฟส b และ 12 เฟส c ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 30 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.9960 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 37 บัส ในรูปที่ 5.17 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี L_{mn} มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 30 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี L_{mn} มากที่สุด และดัชนี LQP เท่ากับ 0.0623 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบทดสอบ 37 บัส ในรูปที่ 5.18 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี LQP มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 30 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี LQP มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหนดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.9545 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหนดของระบบทดสอบ 30 บัส ในรูปที่ 5.19 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสโหนดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟบัส 30 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 30 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด จะสังเกตเห็นว่าการลดลงของแรงดันไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของดัชนีค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงเนื่องจากโหนดในระบบทดสอบ 37 บัส มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าจริงมาก ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหนดมีค่าสูงกว่าระบบทดสอบอื่น ๆ

ตารางที่ 5.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส

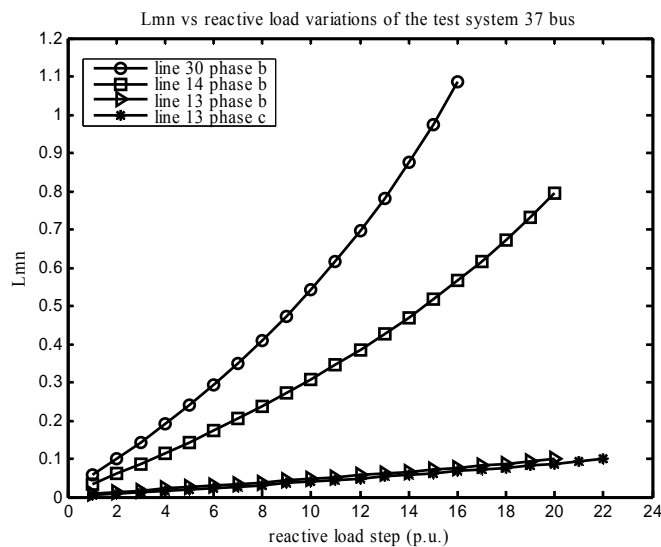
ลำดับ	บัส	เฟส	Q_{limit}	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	30	b	7.8100	0.6804	0.9960	0.0623	0.9545
2	13	b	9.9100	0.6856	0.9888	0.0628	0.9202
3	12	b	10.6000	0.6858	0.9938	0.0628	0.9393
4	12	c	11.0000	0.6842	0.9855	0.0700	0.9304
5	31	c	15.4000	0.6839	0.9937	0.0910	0.8207

ตารางที่ 5.3 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส (ต่อ)

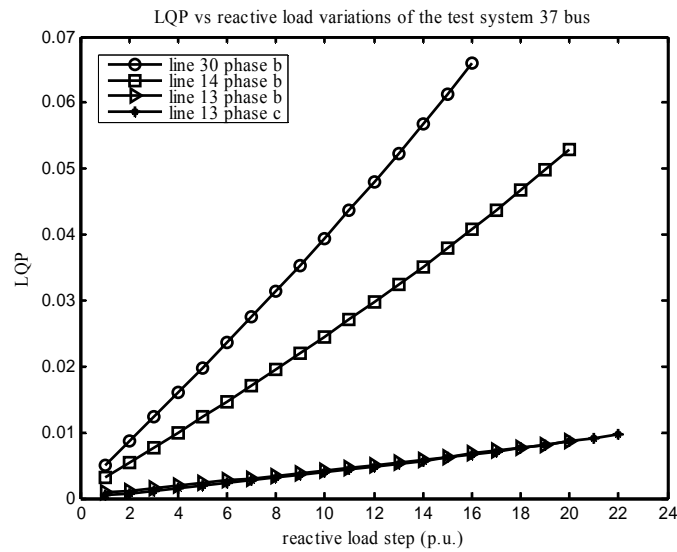
ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
6	36	c	17.3100	0.5608	0.7371	0.1380	0.6139
7	35	c	17.9000	0.5854	0.7803	0.1440	0.6081
8	7	a	19.2000	0.6827	0.9984	0.0878	0.9244



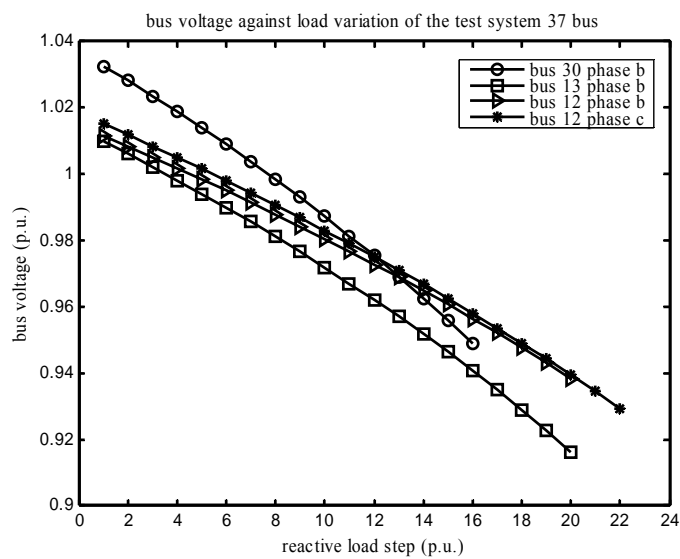
รูปที่ 5.16 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส



รูปที่ 5.17 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส



รูปที่ 5.18 คณิตศาสตร์ภาพแรงดัน ไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส



รูปที่ 5.19 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

คณิตศาสตร์ภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mm} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 118 บัส แสดงในตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก คณิตศาสตร์ภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น คณิตหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าริเอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งคณิตตัวใดตัวหนึ่งมีขนาด

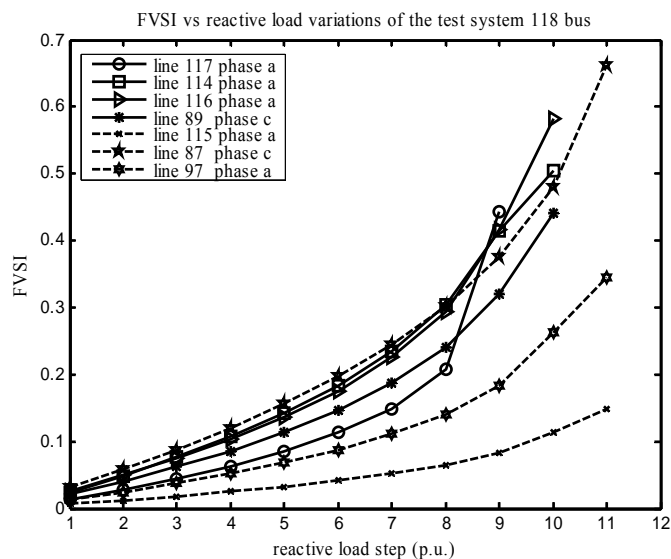
มากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัส ปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 5.4 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 118 เฟส a ต่อกับ สายป้อนเส้นที่ 117 เฟส a มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 8.1000 p.u. FVSI เท่ากับ 0.3192 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบ 118 บัส ในรูปที่ 5.20 สายป้อนเส้นที่ 117, 114, 116, 89, 115, 87 และ 97 อ้างอิงถึงบัส 118, 115, 117, 88, 116, 87 และ 97 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 117 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.3449 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 118 บัส ในรูปที่ 5.21 จะเห็นว่า เมื่อ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี L_{mn} มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 117 จะมีค่า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี L_{mn} มากที่สุด และดัชนี LQP เท่ากับ 0.1619 ซึ่งจะมีค่าน้อย กว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนี สองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบ ทดสอบ 118 บัส ในรูปที่ 5.22 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี LQP มีค่าเพิ่มขึ้น ตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 117 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี LQP มากที่สุด จะสังเกตเห็นว่าดัชนีทั้งสามตัวมีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในลำดับต่อไปทำให้ ระบบขาดเสถียรภาพแบบทันทีทันใด ดัชนีจะมีค่าสูงอย่างรวดเร็ว ค่าก่อนที่จะขาดเสถียรภาพจึงมี ค่าน้อย สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหนดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.6481 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหนดของระบบทดสอบ 118 บัส ในรูปที่ 5.23 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสโหนดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบัส 118 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาด เสถียรภาพ ทำให้บัส 118 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด จะสังเกตเห็นว่าการลดลงของแรงดันไฟฟ้าและ การเพิ่มขึ้นของดัชนีค่อนข้างจะเป็นเส้นโค้งค่อนข้างมากเนื่องจากโหนดในระบบทดสอบ 118 บัส มีค่าตัวประกอบกำลังของโหนดน้อย

ตารางที่ 5.4 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส

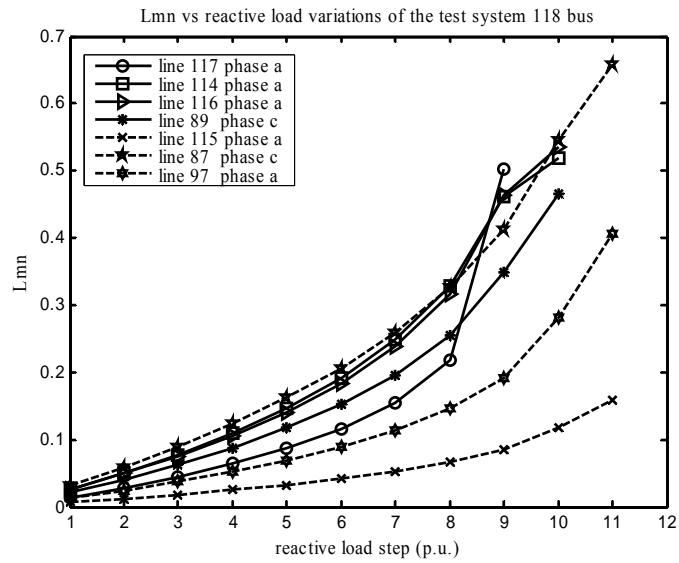
ลำดับ	บัส	เฟส	Q_{limit}	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	118	a	8.1000	0.3192	0.3449	0.1619	0.6481
2	115	a	9.1000	0.4136	0.4625	0.2097	0.6260
3	117	a	9.2000	0.4166	0.4641	0.2113	0.5999

ตารางที่ 5.4 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

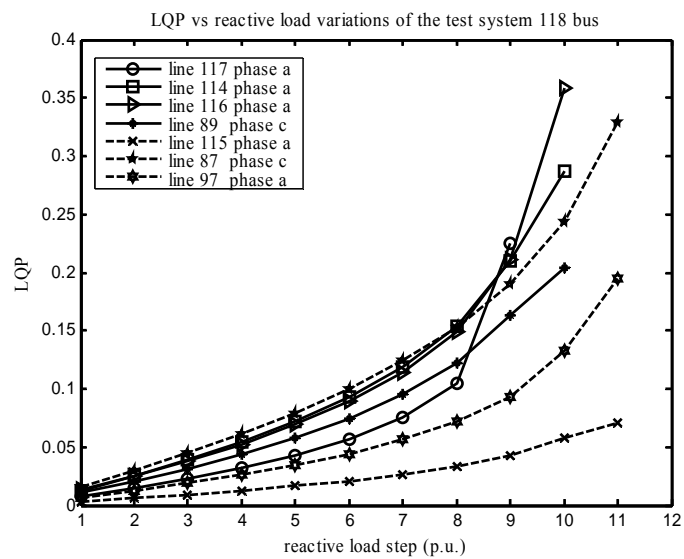
ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
3	88	c	9.2000	0.4216	0.4681	0.2140	0.6584
4	116	a	10.1000	0.3641	0.3952	0.1850	0.6169
4	87	c	10.1000	0.4802	0.5456	0.2436	0.6586
5	97	a	10.2000	0.2627	0.2808	0.1747	0.5885
6	99	b	11.1000	0.2073	0.2160	0.1685	0.5980
6	98	b	11.1000	0.1848	0.1875	0.1502	0.6552
7	107	c	11.2000	0.5844	0.6890	0.2965	0.6250
7	113	a	11.2000	0.3974	0.4374	0.2017	0.6308
8	86	c	12.1000	0.2209	0.2224	0.1760	0.5798
9	91	a	12.2000	0.2950	0.3030	0.2459	0.5346
9	78	c	12.2000	0.3713	0.4095	0.1883	0.6420
10	73	a	13.1000	0.3601	0.3954	0.2224	0.6131



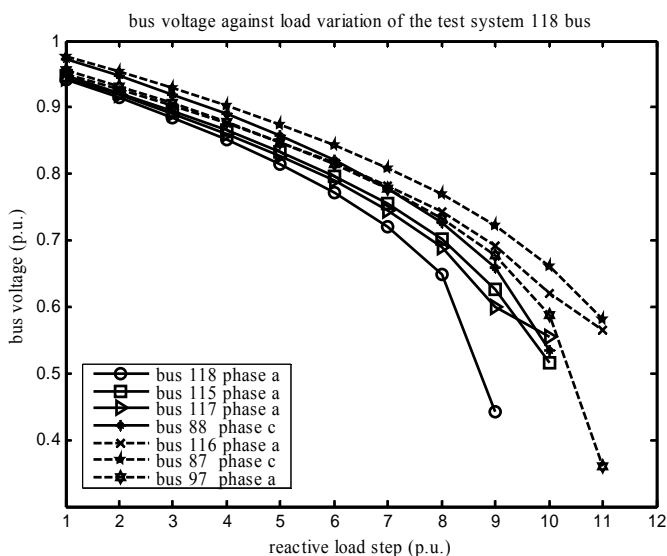
รูปที่ 5.20 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส



รูปที่ 5.21 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส



รูปที่ 5.22 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส



รูปที่ 5.23 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส

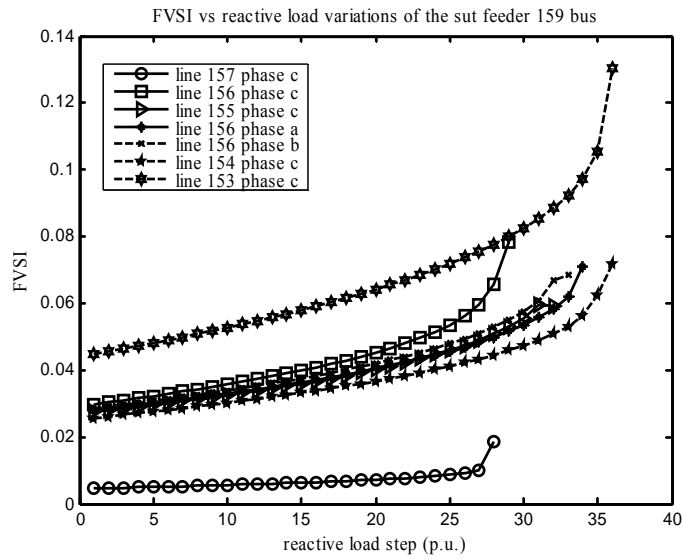
5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI, L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส แสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 8 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Q_{limit} บัสใดที่มีค่า Q_{limit} น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 5.5 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 158 เฟส c ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 157 เฟส c มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 61.1900 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟค่อนข้างสูง เนื่องจากระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เป็นระบบที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 22 kV และโหลดมีขนาดไม่สูงมากนัก สามารถดูข้อมูลระบบทดสอบได้ที่ภาคผนวก ก. FVSI เท่ากับ 0.4525 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี FVSI ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ในรูปที่ 5.24 สายป้อนเส้นที่ 157, 156c, 155, 156a, 156b, 154 และ 153 อ้างอิงถึงบัส 158, 157c, 156, 157a, 157b, 155 และ 154 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี FVSI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 157 จะมีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี FVSI มากที่สุด สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.4754 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ในรูปที่ 5.25 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี L_{mn} มีค่าเพิ่มขึ้นตาม

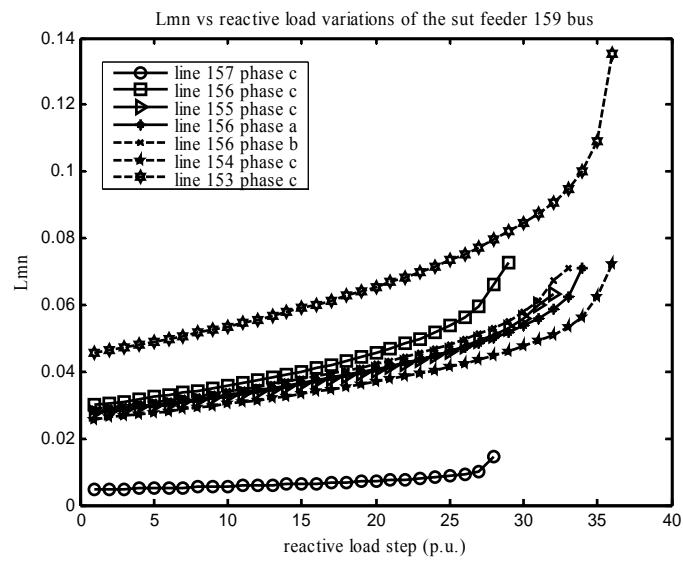
ไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 157 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี L_{mn} มากที่สุด และดัชนี LQP เท่ากับ 0.4379 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ในรูปที่ 5.26 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนี LQP มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สายป้อนเส้นที่ 157 จะมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดที่ดัชนี LQP มากที่สุด สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.3818 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสโหลดของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ในรูปที่ 5.27 จะเห็นว่า เมื่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันที่บัสโหลดมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบัส 158 จะมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยที่สุดก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพ ทำให้บัส 158 เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด จะสังเกตเห็นว่าการลดลงของแรงดันไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของดัชนีค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง และมีอัตราการเพิ่มขึ้นและการลดลงไม่มากนัก เนื่องจากโหลดในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าจริงมาก และมีขนาดน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของระบบไฟฟ้า ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดมีค่าสูง

ตารางที่ 5.5 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

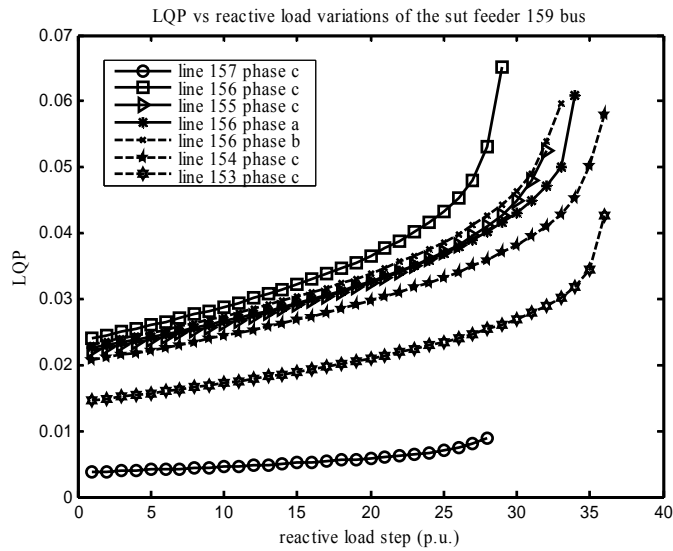
ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	158	c	61.1900	0.4525	0.4754	0.4379	0.3818
2	157	c	63.5400	0.4772	0.5001	0.4600	0.3631
3	156	c	65.1900	0.4671	0.4896	0.4500	0.3891
4	157	a	65.5400	0.4607	0.4830	0.4427	0.3819
4	157	b	65.5400	0.4591	0.4811	0.4413	0.3839
5	155	c	69.1900	0.4896	0.5115	0.4692	0.3884
6	154	c	70.5400	0.4873	0.5096	0.4679	0.3921
7	60	c	72.4100	0.2260	0.2395	0.2215	0.5768
7	54	b	72.4100	0.2241	0.2374	0.2195	0.5798
7	54	c	72.4100	0.2260	0.2395	0.2215	0.5767
8	154	a	73.5400	0.5035	0.5251	0.4799	0.3844



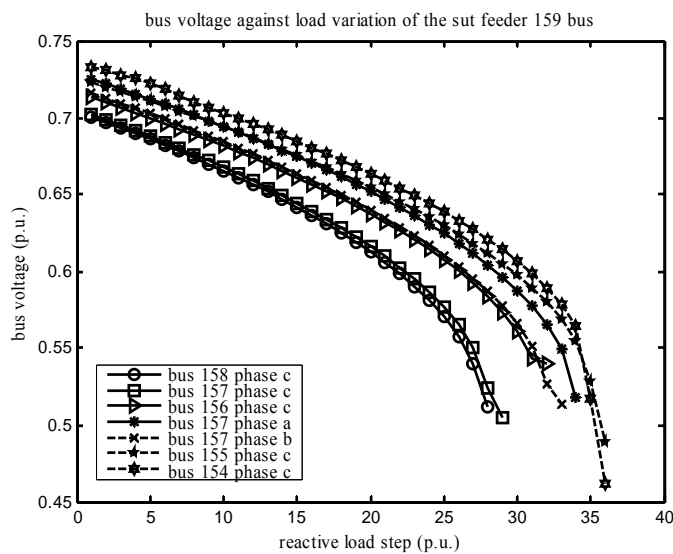
รูปที่ 5.24 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส



รูปที่ 5.25 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า L_{mn} ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส



รูปที่ 5.26 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า LQP ของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส



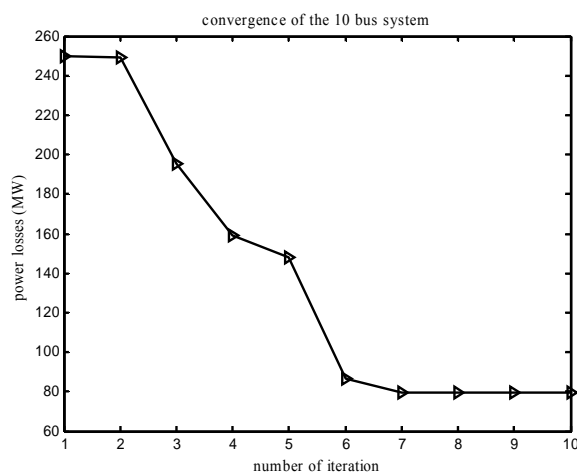
รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ส่วนที่ 2 การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

ระบบทดสอบ 10 บัส เป็นระบบทดสอบ 8.66 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม หาได้จากใน ส่วนที่ 1 คือ เลือกติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่

อ่อนแอที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์การลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอด้วย $Z_f = 0.067 \Omega$ ลงกราวด์ เพื่อให้แรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยลง สำหรับระบบทดสอบ 10 บัส บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 10 เฟส b เมื่อเกิดลัดวงจรแรงดันมีขนาดเท่ากับ 0.64565 p.u. กำลังงานสูญเสียเท่ากับ 287.320 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.6 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันในเฟส b ของบัสใกล้เคียงมีขนาดลดลงด้วย เนื่องจากเกิดลัดวงจรที่เฟส b เฟสเดียว ส่วนการหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอคแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังแสดงในตารางที่ 5.7 แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 2.20830 kV การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.28 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าหาคำตอบจะเร็วมากในช่วงแรก และจะช้าลงในช่วงที่ใกล้จะเจอคำตอบ 79.350 kW เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แล้วทำการติดตั้งเข้าไปที่ บัส 10 เฟส b ได้ผลทดสอบดังในตารางที่ 5.6 จะเห็นว่า ขนาดแรงดันที่ บัส 10 เฟส b มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.93813 p.u. และกำลังงานสูญเสีย 79.350 kW ส่วนแรงดันที่บัสอื่น ๆ ที่ลดลงเนื่องมาจากผลกระทบของการลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว รูปที่ 5.29 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและเกิดลัดวงจร ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 10 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.30 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.8 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 9 เชื่อมต่อระหว่างบัส 8 และบัส 10 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส b จาก 2.25710 เป็น 11.38660 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 9 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส b จาก 0.28480 เป็น 9.26540 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 9 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส b จาก 11.38660 เป็น 2.21770 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 9 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากนักในเฟส b จาก 9.26540 เป็น 5.81370 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมารู้ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียน้อยลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้



รูปที่ 5.28 การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 10 บัส

ตารางที่ 5.6 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส *b* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

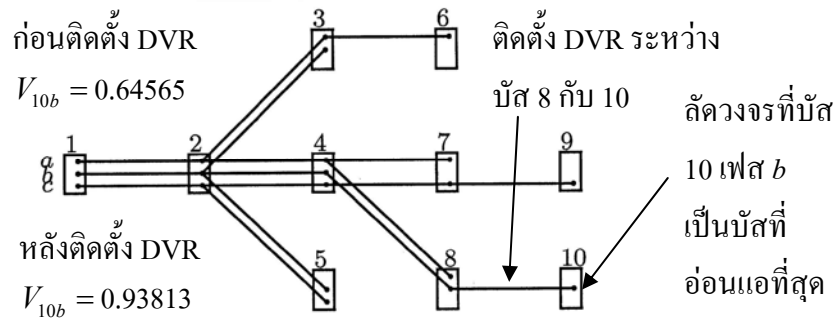
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
7	a	0.92359	0.90170	0.94100
	b	-	-	-
	c	0.97486	1.00630	0.96029
8	a	0.92268	0.89564	0.94420
	b	0.98995	0.85620	1.03710
	c	-	-	-
10	a	-	-	-
	b	0.98154	0.64565	0.93813
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		28.956	287.320	79.350

ตารางที่ 5.7 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส

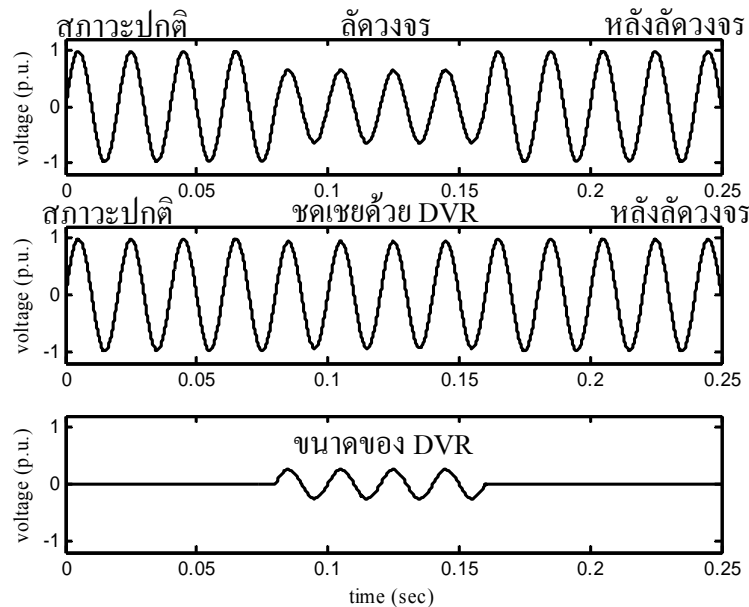
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>b</i>	0.25500	308.10260	1.00000

ตารางที่ 5.8 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส *b* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	5.82480	5.95400	5.75750
	<i>b</i>	2.25710	11.38660	2.21770
	<i>c</i>	1.94340	1.89230	1.95390
2	<i>a</i>	1.94550	1.97110	1.93170
	<i>b</i>	0.39810	0.42380	0.39700
	<i>c</i>	-	-	-
3	<i>a</i>	3.30090	3.39600	3.25130
	<i>b</i>	0.91250	9.94300	2.59280
	<i>c</i>	0.92570	0.89240	0.93310
4	<i>a</i>	-	-	-
	<i>b</i>	0.39900	0.42480	0.39790
	<i>c</i>	0.52360	0.51410	0.52570
6	<i>a</i>	1.35340	1.38880	1.33480
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	0.57570	0.55490	0.58040
7	<i>a</i>	1.35470	1.39890	1.33180
	<i>b</i>	0.56710	9.59200	2.67360
	<i>c</i>	-	-	-
9	<i>a</i>	-	-	-
	<i>b</i>	0.28480	9.26540	5.81370
	<i>c</i>	-	-	-



รูปที่ 5.29 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR

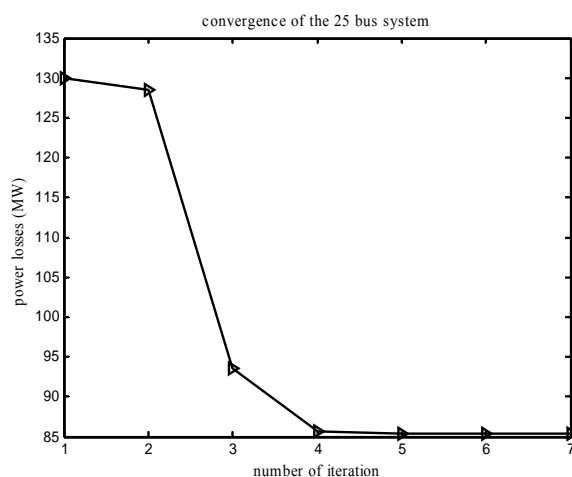


รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 10 เฟส b ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

ระบบทดสอบ 25 บัส เป็นระบบทดสอบ 4.16 kV 100 kVA การค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม หาได้จากในส่วนของที่ 1 คือ เลือกติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์การลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอด้วย $Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ เพื่อให้แรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยลง สำหรับระบบทดสอบ 25 บัส บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 12 เฟส a เมื่อเกิดลัดวงจรแรงดันมีขนาดเท่ากับ 0.60071 p.u. กำลังงานสูญเสียเท่ากับ 1130.200 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันในเฟส a ของบัสใกล้เคียงมีขนาดลดลงด้วย

เนื่องจากเกิดลัดวงจรที่เฟส a เฟสเดียว ส่วนการหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังแสดงในตารางที่ 5.10 แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 1.66400 kV การลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.31 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าหาค่าตอบจะเร็วมากในช่วงแรก และจะช้าลงในช่วงที่ใกล้จะเจอคำตอบ 84.425 kW เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำการติดตั้งเข้าไปที่บัส 12 เฟส a ได้ผลทดสอบดังในตารางที่ 5.9 จะเห็นว่า ขนาดแรงดันที่ บัส 12 เฟส a มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.89353 p.u. และกำลังงานสูญเสีย 85.425 kW ส่วนแรงดันที่บัสอื่น ๆ ที่ลดลงเนื่องมาจากผลกระทบของการลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว แรงดันที่บัสเกิดลัดวงจรมีขนาดหลังการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วมีขนาดไม่ถึง 0.9 p.u. เนื่องจากพิกัดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกำหนดให้มีค่าได้มากที่สุดเท่ากับ 0.4 p.u. เท่านั้น รูปที่ 5.32 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและเกิดลัดวงจร ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.33 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.11 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 23 เชื่อมต่อระหว่างบัส 11 และบัส 12 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 6.61510 เป็น 37.44770 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 23 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.78200 เป็น 31.04320 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 23 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 37.44770 เป็น 3.71520 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 23 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากนักในเฟส a จาก 31.04320 เป็น 21.48710 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียน้อยลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้นตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้



รูปที่ 5.31 การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 25 บัส

ตารางที่ 5.9 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส *a* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

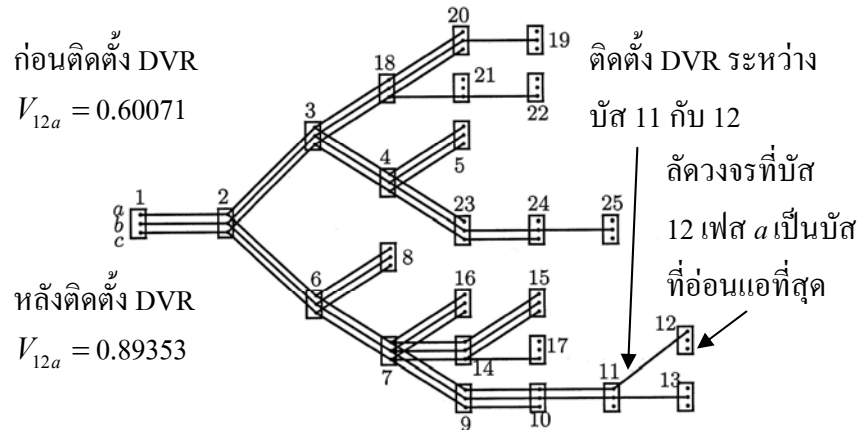
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 <i>a</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
11	<i>a</i>	0.96027	0.64131	0.99505
	<i>b</i>	0.97248	1.02720	0.96684
	<i>c</i>	-	-	-
12	<i>a</i>	0.95904	0.60071	0.89353
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	-	-	-
14	<i>a</i>	0.96614	0.78834	0.98482
	<i>b</i>	0.97291	1.00670	0.96943
	<i>c</i>	0.97062	0.95743	0.97209
15	<i>a</i>	0.96404	0.78571	0.98276
	<i>b</i>	0.97086	1.00470	0.96737
	<i>c</i>	0.96873	0.95552	0.97020
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		37.919	1130.200	85.425

ตารางที่ 5.10 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส

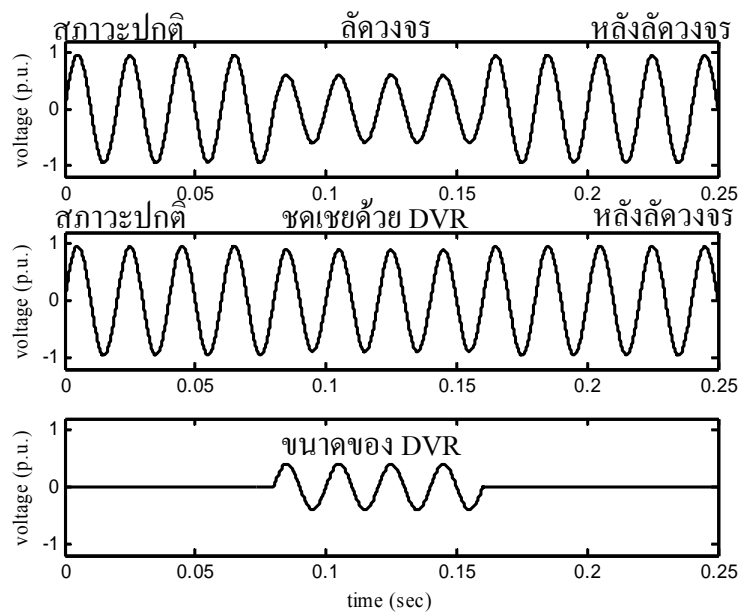
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.40000	305.81310	0.91030

ตารางที่ 5.11 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12a	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	6.61510	37.44770	3.71520
	<i>b</i>	6.06400	5.89540	6.08210
	<i>c</i>	6.32220	6.38610	6.31520
13	<i>a</i>	4.32170	35.11870	1.65100
	<i>b</i>	3.25550	3.13210	3.26890
	<i>c</i>	3.51900	3.56560	3.51390
15	<i>a</i>	3.80890	34.56960	1.29600
	<i>b</i>	2.74520	2.63430	2.75710
	<i>c</i>	3.00900	3.05050	3.00440
20	<i>a</i>	2.08010	32.61630	1.38550
	<i>b</i>	1.02850	0.97550	1.03430
	<i>c</i>	-	-	-
21	<i>a</i>	1.30270	31.70000	1.97240
	<i>b</i>	1.02850	0.97550	1.03430
	<i>c</i>	-	-	-
22	<i>a</i>	1.30270	31.70000	1.97240
	<i>b</i>	0.51460	0.48710	0.51760
	<i>c</i>	-	-	-
23	<i>a</i>	0.78200	31.04320	21.48710
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	-	-	-



รูปที่ 5.32 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR

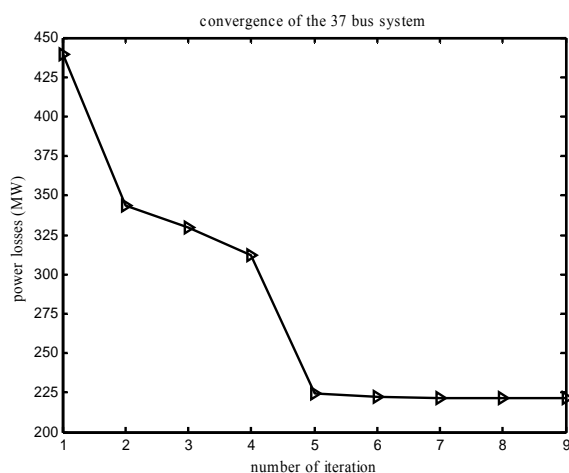


รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

ระบบทดสอบ 37 บัส เป็นระบบทดสอบ 4.80 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม หาได้จากในส่วนของ 1 คือ เลือกติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์การลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอนั้นด้วย $Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ เพื่อให้แรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยลง สำหรับระบบทดสอบ 37 บัส บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 30

เฟส *b* เมื่อเกิดลัดวงจรแรงดันมีขนาดเท่ากับ 0.64117 p.u. กำลังงานสูญเสียเท่ากับ 839.970 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.12 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันในเฟส *b* ของบัสใกล้เคียงมีขนาดลดลงด้วย เนื่องจากเกิดลัดวงจรที่เฟส *b* เฟสเดียว ส่วนการหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังแสดงในตารางที่ 5.13 แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 0.5826 kV การลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.34 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าหาค่าตอบจะเร็วมากในช่วงแรก และจะช้าลงในช่วงที่ใกล้จะเจอคำตอบ 221.610 kW เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำการติดตั้งเข้าไปที่ บัส 30 เฟส *b* ได้ผลทดสอบดังในตารางที่ 5.12 จะเห็นว่า ขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส *b* มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.99658 p.u. และกำลังงานสูญเสีย 221.610 kW ส่วนแรงดันที่บัสอื่น ๆ ที่ลดลง เนื่องจากผลกระทบของการลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว รูปที่ 5.35 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและเกิดลัดวงจร ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 30 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.36 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.14 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส *b* ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 30 เชื่อมต่อระหว่างบัส 29 และบัส 30 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 6.91030 เป็น 33.01720 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 30 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 0.45280 เป็น 26.18410 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 30 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *b* จาก 33.01720 เป็น 14.26160 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 30 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากนักในเฟส *b* จาก 26.18410 เป็น 25.76700 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียน้อยลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้นตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้



รูปที่ 5.34 การหาค่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 37 บัส

ตารางที่ 5.12 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส *b* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

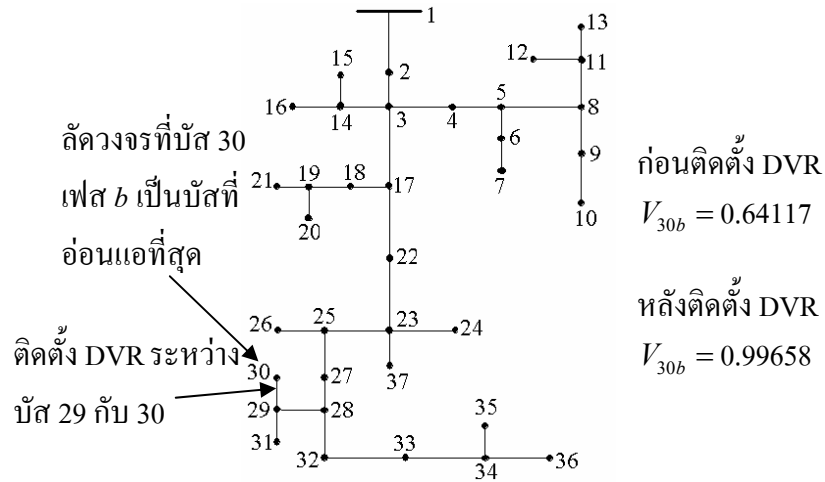
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
29	<i>a</i>	0.99867	1.04060	0.97738
	<i>b</i>	1.04010	0.77550	1.08760
	<i>c</i>	0.99536	1.04590	1.00620
30	<i>a</i>	0.99907	1.05150	0.97315
	<i>b</i>	1.03700	0.64117	0.99658
	<i>c</i>	0.99579	1.07500	1.03320
31	<i>a</i>	0.99882	1.04070	0.97753
	<i>b</i>	1.04030	0.77561	1.08770
	<i>c</i>	0.99432	1.04500	1.00520
32	<i>a</i>	0.99166	1.02990	0.97363
	<i>b</i>	1.04280	0.83230	1.08210
	<i>c</i>	0.99604	1.03490	1.00600
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		135.300	839.970	221.610

ตารางที่ 5.13 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพ่วงแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส

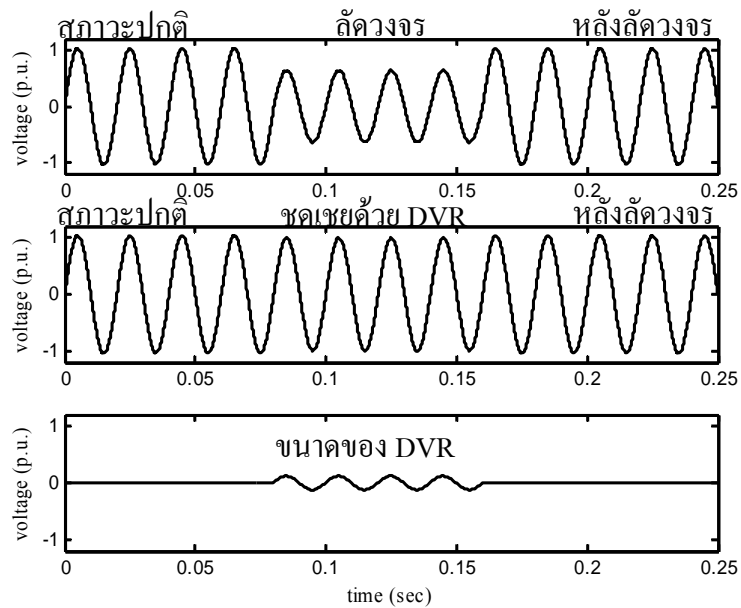
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>b</i>	0.12138	344.94000	0.10000

ตารางที่ 5.14 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส *b* และเมื่อติดตั้งตัวพ่วงแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	8.01230	7.73320	7.96910
	<i>b</i>	6.91030	33.01720	14.26160
	<i>c</i>	11.94530	11.78010	11.85200
2	<i>a</i>	6.50350	6.23900	6.46390
	<i>b</i>	5.40940	31.49250	12.83050
	<i>c</i>	8.15300	7.98160	8.06130
18	<i>a</i>	3.93320	3.73070	3.90740
	<i>b</i>	1.35940	27.24140	9.07130
	<i>c</i>	4.23530	4.06580	4.15280
22	<i>a</i>	3.93320	3.73070	3.90740
	<i>b</i>	1.35940	27.24140	9.07130
	<i>c</i>	3.30410	3.14890	3.23030
24	<i>a</i>	3.93320	3.73070	3.90740
	<i>b</i>	0.45280	26.18410	8.25910
	<i>c</i>	3.30410	3.14890	3.23030
26	<i>a</i>	3.93320	3.73070	3.90740
	<i>b</i>	0.45280	26.18410	8.25910
	<i>c</i>	2.83630	2.69330	2.76900
30	<i>a</i>	-	-	-
	<i>b</i>	0.45280	26.18410	25.76700
	<i>c</i>	-	-	-



รูปที่ 5.35 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR

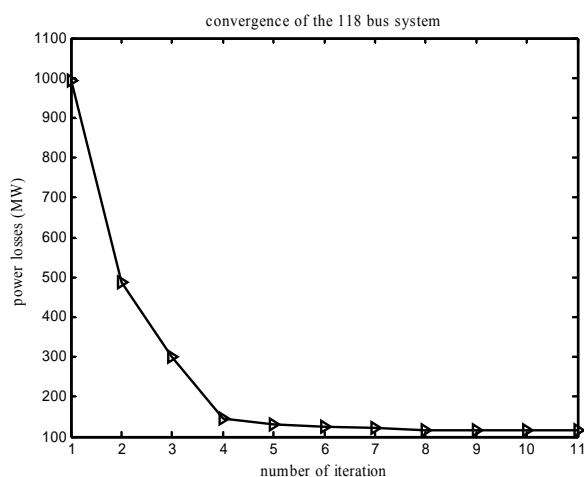


รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

ระบบทดสอบ 118 บัส เป็นระบบทดสอบ 4.16 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม หาได้จากในส่วนของ 1 คือ เลือกติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์การลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอขึ้นด้วย $Z_f = 0.033 \Omega$ ลงกราวด์

เพื่อให้แรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยลง สำหรับระบบทดสอบ 118 บัส บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 118 เฟส a เมื่อเกิดลัดวงจรแรงดันมีขนาดเท่ากับ 0.56304 p.u. กำลังงานสูญเสียเท่ากับ 768.140 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.15 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันในเฟส a ของบัสใกล้เคียงมีขนาดลดลงด้วย เนื่องจากเกิดลัดวงจรที่เฟส a เฟสเดียว ส่วนการหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังแสดงในตารางที่ 5.16 แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 1.6640 kV การลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.37 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าหาค่าตอบจะเร็วมากในช่วงแรก และจะช้าลงในช่วงที่ใกล้จะเจอคำตอบ 124.900 kW เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดัน พลวัตแล้วทำการติดตั้งเข้าไปที่บัส 118 เฟส a ได้ผลทดสอบดังในตารางที่ 5.15 จะเห็นว่า ขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.92164 p.u. และกำลังงานสูญเสีย 124.900 kW ส่วนแรงดันที่บัสอื่น ๆ ที่ลดลงเนื่องมาจากผลกระทบของการลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว รูปที่ 5.38 แสดงระบบทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและเกิดลัดวงจรติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.39 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.17 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 117 เชื่อมต่อระหว่างบัส 117 และบัส 118 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 16.58760 เป็น 36.38060 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 117 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.23580 เป็น 17.24790 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 117 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 36.38060 เป็น 12.53740 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 117 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากนักในเฟส a จาก 17.24790 เป็น 11.60170 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่ชดเชยแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสยลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้



รูปที่ 5.37 การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบ 118 บัส

ตารางที่ 5.15 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

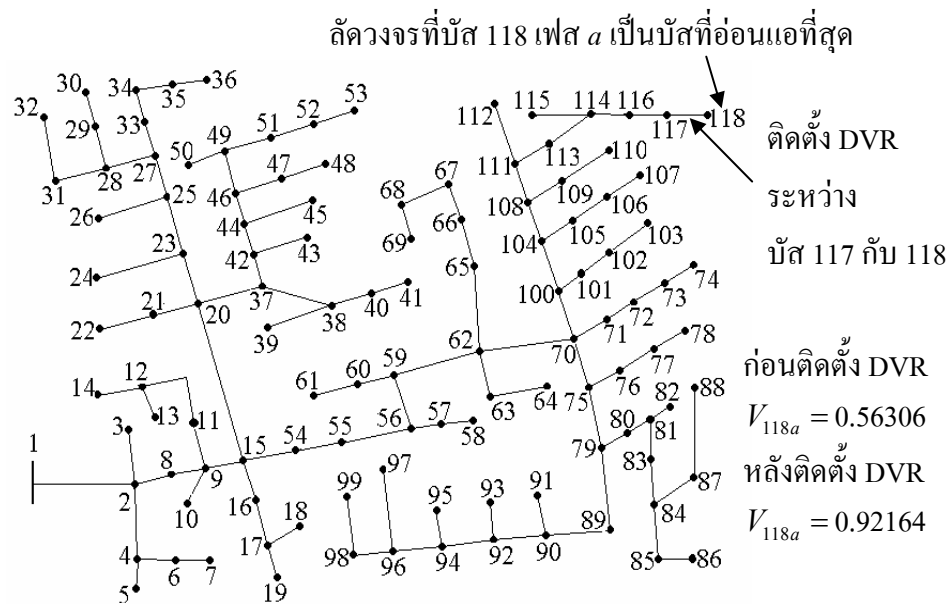
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 a	เมื่อติดตั้ง DVR
115	a	0.95099	0.64353	0.99374
	b	-	-	-
	c	-	-	-
116	a	0.95109	0.63339	0.99640
	b	-	-	-
	c	-	-	-
117	a	0.94890	0.58830	1.00520
	b	-	-	-
	c	-	-	-
118	a	0.94845	0.56306	0.92164
	b	-	-	-
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		275.320	768.140	124.900

ตารางที่ 5.16 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพินฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส

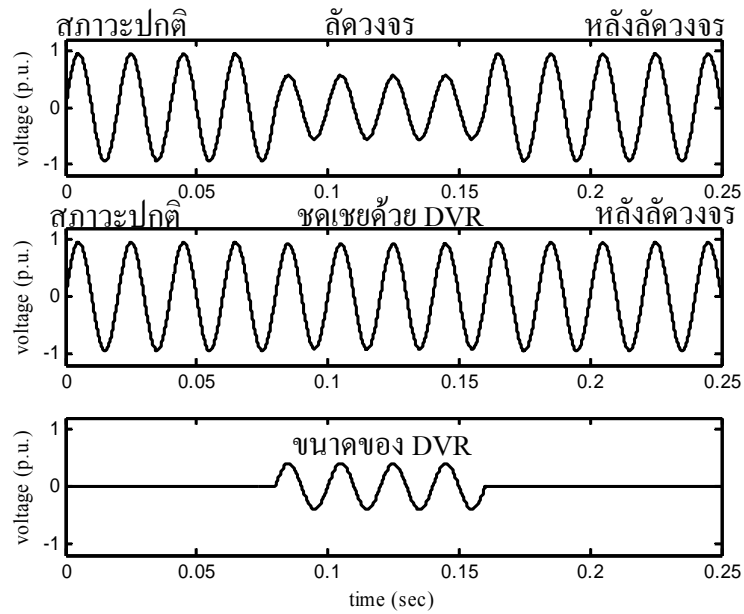
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>a</i>	0.40000	359.99000	1.32600

ตารางที่ 5.17 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส *a* และเมื่อติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 <i>a</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	16.58780	36.38060	12.53740
	<i>b</i>	10.31980	9.63800	10.54380
	<i>c</i>	13.32420	13.31550	13.15230
60	<i>a</i>	7.86960	26.93810	4.75360
	<i>b</i>	5.84740	5.33670	6.01840
	<i>c</i>	7.40610	7.40670	7.26560
64	<i>a</i>	6.73430	25.55890	4.00740
	<i>b</i>	4.61050	4.19730	4.74920
	<i>c</i>	5.22580	5.22780	5.12170
72	<i>a</i>	2.11110	19.83550	3.89870
	<i>b</i>	1.32620	1.19760	1.37010
	<i>c</i>	1.60280	1.60480	1.56790
109	<i>a</i>	1.64610	19.25200	4.18970
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	-	-	-
117	<i>a</i>	0.23580	17.24790	11.60170
	<i>b</i>	-	-	-
	<i>c</i>	-	-	-



รูปที่ 5.38 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR

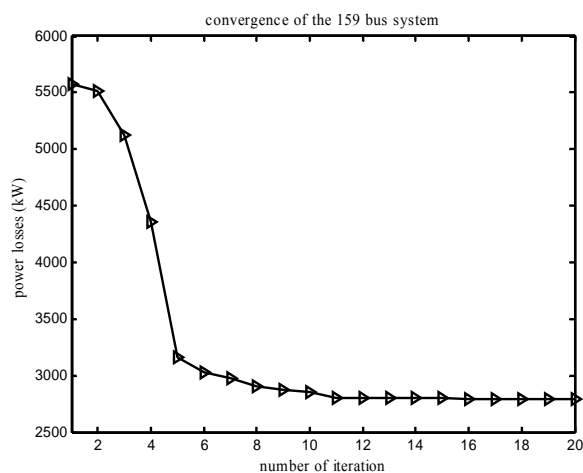


รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เป็นระบบทดสอบ 22 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม หาได้จากในส่วนของ 1 คือ เลือกติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุด จากนั้นจำลองสถานการณ์การลัดวงจร ณ บัสที่อ่อนแอด้วย $Z_f = 0.005 \Omega$ ลงกราวด์ เพื่อให้แรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยลง สำหรับระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 158 เฟส c เมื่อเกิดลัดวงจรแรงดันมีขนาดเท่ากับ 0.65726 p.u. กำลังงานสูญเสียเท่ากับ 6033.000 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.18 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันในเฟส c ของบัสใกล้เคียงมีขนาดลดลงด้วย เนื่องจากเกิดลัดวงจรที่เฟส c เฟสเดียว ส่วนการหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังแสดงในตารางที่ 5.19 แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 0.04185 kV การลู่เข้าหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.40 จะสังเกตเห็นว่าการลู่เข้าหาค่าตอบจะเร็วมากในช่วงแรก และจะช้าลงในช่วงที่ใกล้จะเจอคำตอบ 3185.000 kW เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำการติดตั้งเข้าไปที่บัส 158 เฟส c ได้ผลทดสอบดังในตารางที่ 5.18 จะเห็นว่า ขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.98511 p.u. และกำลังงานสูญเสีย 3185.000 kW ส่วนแรงดันที่บัสอื่น ๆ ที่ลดลงเนื่องมาจากผลกระทบของการลัดวงจร มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว รูปที่ 5.41 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดและเกิดลัดวงจรติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.42 พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.20 เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c ทำให้กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 157 เชื่อมต่อระหว่างบัส 157 และบัส 158 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส c จาก 259.38230 เป็น 413.70970 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 157 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส c จาก 0.47810 เป็น 132.05700 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสายป้อนเส้นที่ 157 ทำให้กระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส c จาก 413.70970 เป็น 269.02150 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 157 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงไม่มากนักในเฟส c จาก 132.05700 เป็น 155.03330 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่าย

กำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้



รูปที่ 5.40 การลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ตารางที่ 5.18 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส *c* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

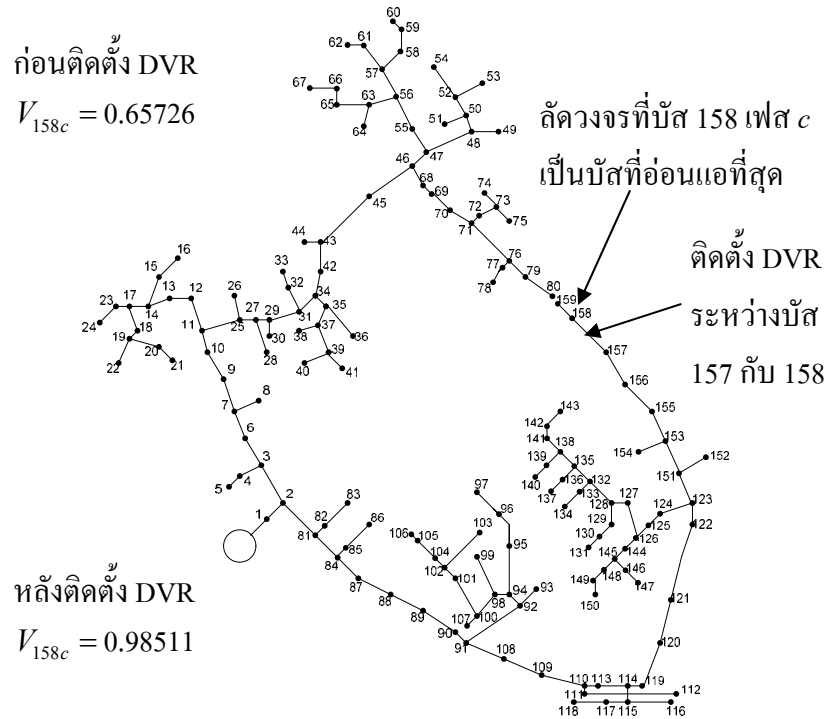
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 <i>c</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
158	<i>a</i>	0.93762	1.16280	0.96194
	<i>b</i>	0.93076	0.88577	0.86898
	<i>c</i>	0.92459	0.65726	0.98511
159	<i>a</i>	0.93762	1.16280	0.96194
	<i>b</i>	0.93076	0.88577	0.86898
	<i>c</i>	0.92459	0.65726	0.98511
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		2985.200	6033.000	3185.000

ตารางที่ 5.19 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพ่วงแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

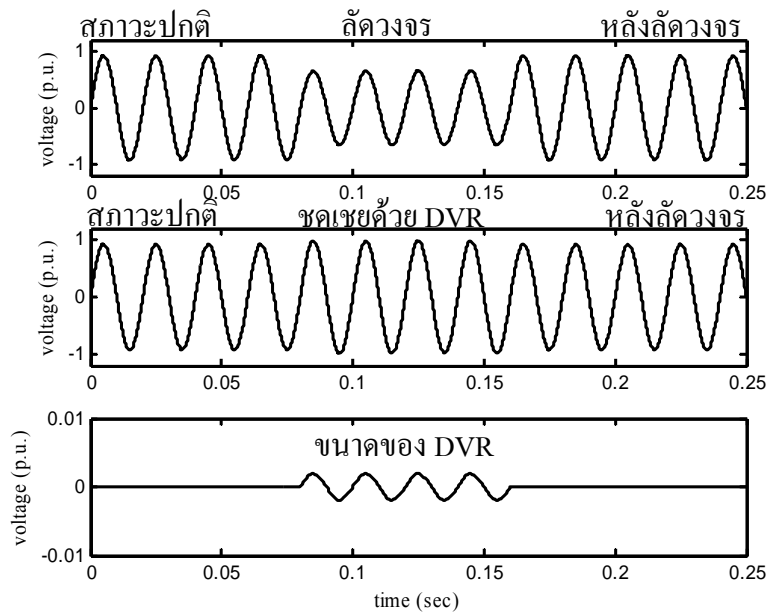
เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
<i>c</i>	0.001902	256.580000	0.010000

ตารางที่ 5.20 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส *c* และเมื่อติดตั้งตัวพ่วงแรงดันพลวัต

ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 <i>c</i>	เมื่อติดตั้ง DVR
1	<i>a</i>	250.6178	238.2172	249.1341
	<i>b</i>	251.5328	253.5499	255.6403
	<i>c</i>	259.3823	413.7097	269.0215
152	<i>a</i>	7.5431	6.1403	7.3699
	<i>b</i>	7.5978	7.9571	8.1007
	<i>c</i>	9.0821	143.0821	42.0646
154	<i>a</i>	3.7716	3.0438	3.6806
	<i>b</i>	3.7994	3.9912	4.0643
	<i>c</i>	5.2589	138.1536	40.7302
155	<i>a</i>	3.7717	3.0440	3.6808
	<i>b</i>	3.7995	3.9913	4.0644
	<i>c</i>	4.7811	137.5399	40.5843
156	<i>a</i>	3.7719	3.0442	3.6809
	<i>b</i>	3.7997	3.9914	4.0646
	<i>c</i>	4.3032	136.9273	40.4445
157	<i>a</i>	0.0002	0.0003	0.0002
	<i>b</i>	0.0002	0.0002	0.0002
	<i>c</i>	0.4781	132.0570	155.0333



รูปที่ 5.41 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และหลังติดตั้ง DVR



รูปที่ 5.42 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ส่วนที่ 3 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 10 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอใน ส่วนที่ 1 และ 2 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ติดตั้งที่ เฟส b ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 10 และ 8 และที่บัส 8 เฟส a การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.25540 p.u. มุมเฟส 76.00000° รีแอกแตนซ์ 1.00000Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 2.21180 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตมากกว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 79.350 kW เป็น 77.089 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.21 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน ขนาดแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวกับติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยมีขนาดไม่ต่างกันมากคือ 0.93813 p.u. และ 0.93554 p.u. ตามลำดับ

ตารางที่ 5.21 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10b	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
8	a	0.89564	0.94420	0.95549
	b	0.85620	1.03710	1.03450
	c	-	-	-
10	a	-	-	-
	b	0.64565	0.93813	0.93554
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		287.320	79.350	77.089

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 25 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนของ 1 และ 2 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ติดตั้งที่ เฟส a ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15 และ 16 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.40000 p.u. มุมเฟส 359.99000° รีแอกแตนซ์ 0.94602 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 1.66400 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้นขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 85.425 kW เป็น 84.794 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.22 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน ขนาดแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวกับติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยมีขนาดไม่ต่างกันมากนักคือ 0.89353 p.u. และ 0.87585 p.u. ตามลำดับ แรงดันที่บัสเกิดลัดวงจรมีขนาดหลังการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วมีขนาดไม่ถึง 0.9 p.u. เนื่องมาจากพิกัดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกำหนดให้มีความได้มากที่สุดเท่ากับ 0.4 p.u. เท่านั้น

ตารางที่ 5.22 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส a และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12a	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
11	a	0.64131	0.99505	0.99635
	b	1.02720	0.96684	0.96670
12	a	0.60071	0.89353	0.87585
	b	-	-	-
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		1130.200	85.425	84.794

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 37 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนของ 1 และ 2 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ติดตั้งที่ เฟส *b* ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 28 ถึง 36 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.12210 p.u. มุมเฟส 26.15800° รีแอกแตนซ์ 0.10000 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 0.58610 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นจาก 221.610 kW เป็น 227.810 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.23 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน ขนาดแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวกับติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยมีขนาดไม่ต่างกันมากคือ 0.99658 p.u. และ 0.94530 p.u. ตามลำดับ

ตารางที่ 5.23 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส *b* และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
29	<i>a</i>	1.04060	0.97738	0.99683
	<i>b</i>	0.77550	1.08760	1.07370
	<i>c</i>	1.04590	1.00620	0.98614
30	<i>a</i>	1.05150	0.97315	0.99722
	<i>b</i>	0.64117	0.99658	0.97530
	<i>c</i>	1.07500	1.03320	1.00980
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		839.970	221.610	227.810

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 118 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนของ 1 และ 2 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ติดตั้งที่ เฟส a ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 104, 108, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 และ 118 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.40000 p.u. มุมเฟส 359.99000° รีแอกแตนซ์ 1.38980Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 1.66400 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 124.900 kW เป็น 116.270 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.24 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน ขนาดแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวกับติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยมีขนาดไม่ต่างกันมากคือ 0.92164 p.u. และ 0.92550 p.u. ตามลำดับ

ตารางที่ 5.24 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118a	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
117	a	0.58830	1.00520	1.03260
	b	-	-	-
	c	-	-	-
118	a	0.56306	0.92164	0.92550
	b	-	-	-
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		768.140	124.900	116.270

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนที่ 1 และ 2 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่ เฟส c ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 150 ถึง 159 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขคือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.00263 p.u. มุมเฟส 292.01000° รีแอกแตนซ์ 0.01000Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 0.05790 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 3185.000 kW เป็น 2911.900 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.25 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน ขนาดแรงดันเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวกับติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยมีขนาดไม่ต่างกันมากคือ 0.98511 p.u. และ 0.93016 p.u. ตามลำดับ

ตารางที่ 5.25 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 c	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
153	a	1.14220	0.95877	0.87441
	b	0.89179	0.87636	1.00970
	c	0.67078	0.97950	0.93147
154	a	1.14210	0.95859	0.87419
	b	0.89166	0.87617	1.00950
	c	0.67044	0.97932	0.93134

ตารางที่ 5.25 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัสเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 เฟส *c* และเมื่อประสานสัมพันธระหว่างตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ (ต่อ)

บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158 <i>c</i>	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
155	<i>a</i>	1.14840	0.95943	0.87264
	<i>b</i>	0.88993	0.87436	1.01230
	<i>c</i>	0.66643	0.98130	0.93119
156	<i>a</i>	1.15490	0.96010	0.87078
	<i>b</i>	0.88803	0.87229	1.01500
	<i>c</i>	0.66213	0.98322	0.93092
157	<i>a</i>	1.16170	0.96079	0.86882
	<i>b</i>	0.88606	0.87010	1.01790
	<i>c</i>	0.65786	0.98529	0.93065
158	<i>a</i>	1.16280	0.96194	0.86945
	<i>b</i>	0.88577	0.86898	1.01730
	<i>c</i>	0.65726	0.98511	0.93016
159	<i>a</i>	1.16280	0.96194	0.86944
	<i>b</i>	0.88577	0.86898	1.01730
	<i>c</i>	0.65726	0.98511	0.93018
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		6033.000	3185.000	2911.900

ส่วนที่ 4 เป็นการติดตั้งตัวพื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

จากทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 10 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.26 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 28.956 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 4 เฟส *b* ผ่าน $Z_f = 0.025 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.26 ทำให้แรงดันที่บัส 4 เฟส *b* มีขนาด

ลดลงจาก 0.99165 เป็น 0.66754 p.u. แรงดันที่บัส 10 เฟส *b* จาก 0.98154 เป็น 0.65164 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 687.720 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.27 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 3 เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 และบัส 3 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 2.25710 เป็น 29.50550 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 3 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 0.91250 เป็น 27.84510 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 10 เฟส *b* ดังแสดงในตารางที่ 5.28 จากผลทดสอบในตารางที่ 5.26 จะพบว่าแรงดันที่บัส 10 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 10 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *b* จาก 0.65164 เป็น 0.95341 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 503.490 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 4 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 5.43 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 10 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.44 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *b* จาก 29.50550 เป็น 21.62620 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 3 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงในเฟส *b* จาก 27.84510 เป็น 20.09360 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหนดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 9 ต่อกับบัส 10 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *b* จาก 0.42890 เป็น 5.63740 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้นตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหนดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 10 เฟส *b* เนื่องจากกลุ่มโหนดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 เฟส *b*

ตารางที่ 5.26 แรงดันบั๊สและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บั๊ส ของระบบปกติ เมื่อเกิด
ลัดวงจรที่บั๊ส 4b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บั๊ส 10b

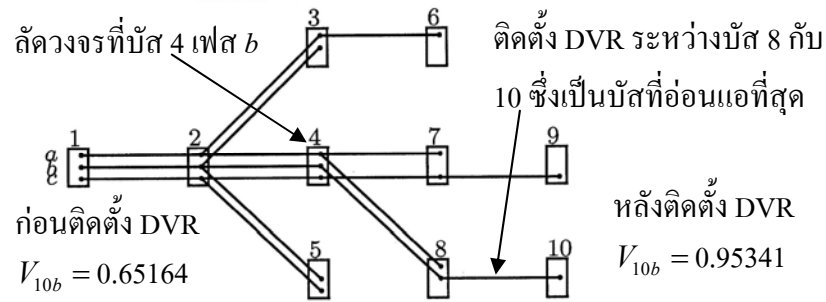
บั๊ส	เฟส	ขนาดแรงดันบั๊ส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บั๊ส 4b	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บั๊ส 10b
2	a	0.95564	0.92608	0.93077
	b	0.99303	0.80915	0.87191
	c	0.98638	1.04090	1.02490
3	a	0.94458	0.91468	0.91943
	b	0.99295	0.80866	0.87161
	c	-	-	-
4	a	0.93059	0.87251	0.88117
	b	0.99165	0.66754	0.77253
	c	0.97844	1.08680	1.05510
5	a	-	-	-
	b	0.99063	0.80625	0.86920
	c	0.98423	1.03900	1.02300
8	a	0.92268	0.86436	0.88134
	b	0.98995	0.66431	0.81573
	c	-	-	-
10	a	-	-	-
	b	0.98154	0.65164	0.95341
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)		28.956	687.720	503.490

ตารางที่ 5.27 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 10b

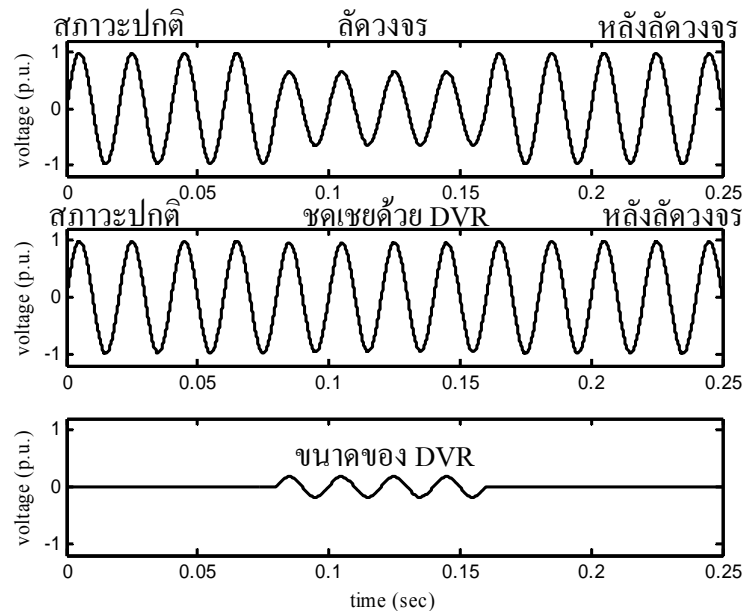
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4b	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 10b
1	a	5.82480	6.13510	6.07140
	b	2.25710	29.50550	21.62620
	c	1.94340	1.79810	1.83860
3	a	3.30090	3.52350	3.47450
	b	0.91250	27.84510	20.09360
	c	0.92570	0.83270	0.85790
4	a	-	-	-
	b	0.39900	0.49030	0.45480
	c	0.52360	0.49610	0.50380
7	a	1.35470	1.44620	1.41830
	b	0.56710	0.84970	11.23630
	c	-	-	-
9	a	-	-	-
	b	0.28480	0.42890	5.63740
	c	-	-	-

ตารางที่ 5.28 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
b	0.17732	293.84000	0.01000



รูปที่ 5.43 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 เฟส *b* และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 10 เฟส *b*



รูปที่ 5.44 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส *b* ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 25 บัส จะได้ผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.29 สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 37.919 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 14 เฟส *a* ผ่าน $Z_f = 0.011\Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.29 ทำให้แรงดันที่บัส 14 เฟส *a* มีขนาดลดลงจาก 0.96614 เป็น 0.57390 p.u. แรงดันที่บัส 12 ในเฟส *a* จาก 0.95904 เป็น 0.65158 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1963.700 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.30 กระแส

ลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 17 เชื่อมต่อระหว่างบัส 7 และบัส 14 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 6.61510 เป็น 59.74860 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 17 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 1.72880 เป็น 54.01740 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 12 เฟส a ดังแสดงในตารางที่ 5.31 จากผลทดสอบในตารางที่ 5.29 จะพบว่าแรงดันที่บัส 12 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 12 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a จาก 0.65158 เป็น 0.95751 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1590.700 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 14 เฟส a เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 5.45 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.46 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 59.7486 เป็น 43.00430 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 17 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 54.01740 เป็น 61.43790 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 23 ต่อกับบัส 12 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 1.15100 เป็น 11.04040 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 12 เฟส a เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 เฟส a

ตารางที่ 5.29 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิด
ลัดวงจรที่บัส 14a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 12a

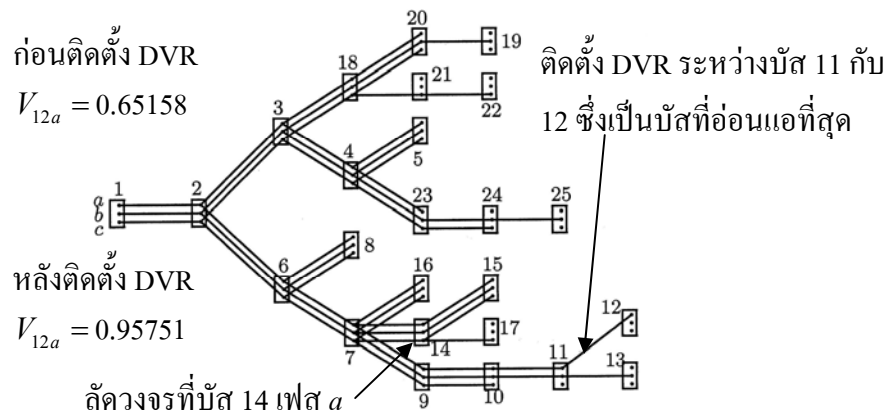
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 12a
10	a	0.96196	0.65588	0.83908
	b	0.97298	1.03110	0.99966
	c	0.97709	0.95657	0.96734
11	a	0.96027	0.65339	0.86273
	b	0.97248	1.03070	0.99627
	c	-	-	-
12	a	0.95904	0.65158	0.95751
	b	-	-	-
	c	-	-	-
13	a	-	-	-
	b	0.97167	1.02990	0.99548
	c	-	-	-
14	a	0.96614	0.57390	0.65987
	b	0.97291	1.04530	1.02910
	c	0.97062	0.94441	0.94730
15	a	0.96404	0.57019	0.65668
	b	0.97086	1.04350	1.02730
	c	0.96873	0.94253	0.94540
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)		37.919	1963.700	1590.700

ตารางที่ 5.30 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 12a

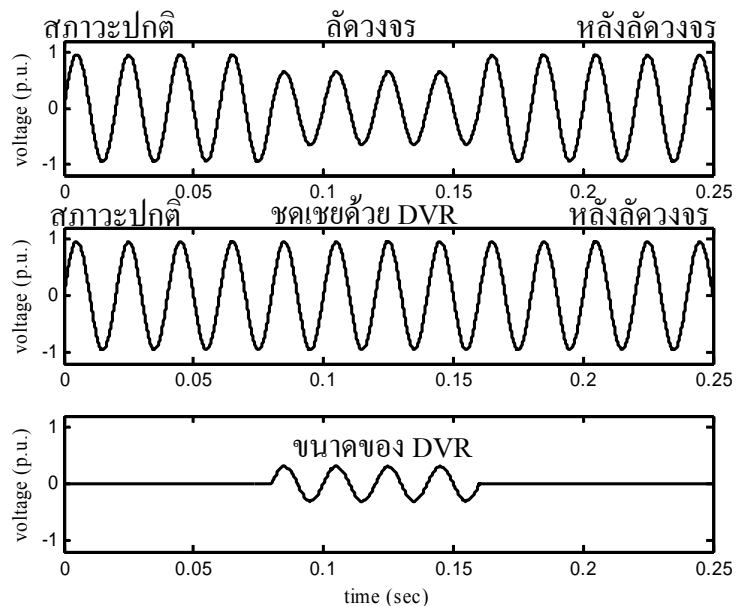
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 12a
1	a	6.61510	59.74860	43.00430
	b	6.06400	5.78860	5.87590
	c	6.32220	6.44070	6.42320
13	a	4.32170	57.31520	40.67750
	b	3.25550	3.05670	3.12050
	c	3.51900	3.61050	3.59930
15	a	3.80890	56.71430	40.12520
	b	2.74520	2.56760	2.62480
	c	3.00900	3.09260	3.08320
17	a	1.72880	54.01740	61.43790
	b	1.71670	1.59720	1.62240
	c	3.00900	3.09260	3.08320
23	a	0.78200	1.15100	11.04040
	b	-	-	-
	c	-	-	-
24	a	-	-	-
	b	0.51460	0.48550	0.50230
	c	-	-	-

ตารางที่ 5.31 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
a	0.30578	353.19000	1.43830



รูปที่ 5.45 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 12 เฟส a



รูปที่ 5.46 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 37 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.32 สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 135.300 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 18 เฟส b ผ่าน $Z_f = 0.010 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.32 ทำให้แรงดันที่บัส 18 เฟส b มีขนาด

ลดลงจาก 1.03770 เป็น 0.67740 p.u. แรงดันที่บัส 30 ในเฟส *b* จาก 1.03700 เป็น 0.75882 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2505.500 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.33 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 17 เชื่อมต่อระหว่างบัส 17 และบัส 18 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 6.91030 เป็น 75.76900 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 17 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส *b* จาก 0.45270 เป็น 68.36190 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 30 เฟส *b* ดังแสดงในตารางที่ 5.34 จากผลทดสอบในตารางที่ 5.32 จะพบว่าแรงดันที่บัส 30 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 30 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *b* จาก 0.75882 เป็น 0.93028 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 2287.300 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 18 เฟส *b* เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 5.47 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 30 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.48 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส *b* จาก 75.76900 เป็น 66.38190 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 17 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *b* จาก 68.36190 เป็น 71.10460 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหนดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 30 ต่อกับบัส 30 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส *b* จาก 0.61880 เป็น 6.34700 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหนดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 30 เฟส *b* เนื่องจากกลุ่มโหนดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 เฟส *b*

ตารางที่ 5.32 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิด
 ลัดวงจรที่บัส 18*b* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 30*b*

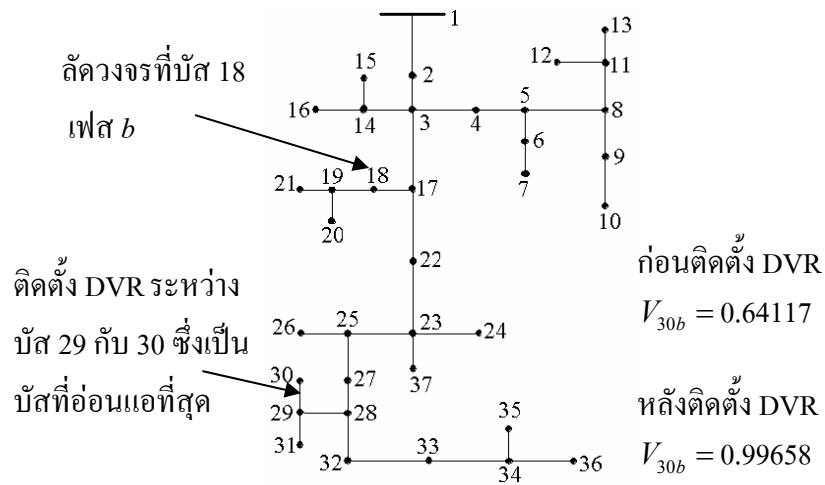
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 30 <i>b</i>
17	<i>a</i>	1.02020	1.09650	1.08770
	<i>b</i>	1.03790	0.76293	0.79404
	<i>c</i>	1.01570	1.02310	1.01740
18	<i>a</i>	1.01860	1.10150	1.09180
	<i>b</i>	1.03770	0.67740	0.70508
	<i>c</i>	1.01480	1.04090	1.03640
29	<i>a</i>	0.99867	1.07680	1.07470
	<i>b</i>	1.04010	0.76315	0.89476
	<i>c</i>	0.99536	1.00190	0.95240
30	<i>a</i>	0.99907	1.07760	1.07840
	<i>b</i>	1.03700	0.75882	0.93028
	<i>c</i>	0.99579	1.00240	0.94080
31	<i>a</i>	0.99882	1.07690	1.07490
	<i>b</i>	1.04030	0.76326	0.89490
	<i>c</i>	0.99432	1.00090	0.95132
32	<i>a</i>	0.99166	1.07010	1.06580
	<i>b</i>	1.04280	0.76659	0.86629
	<i>c</i>	0.99604	1.00220	0.96263
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)		135.300	2505.500	2287.300

ตารางที่ 5.33 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 30b

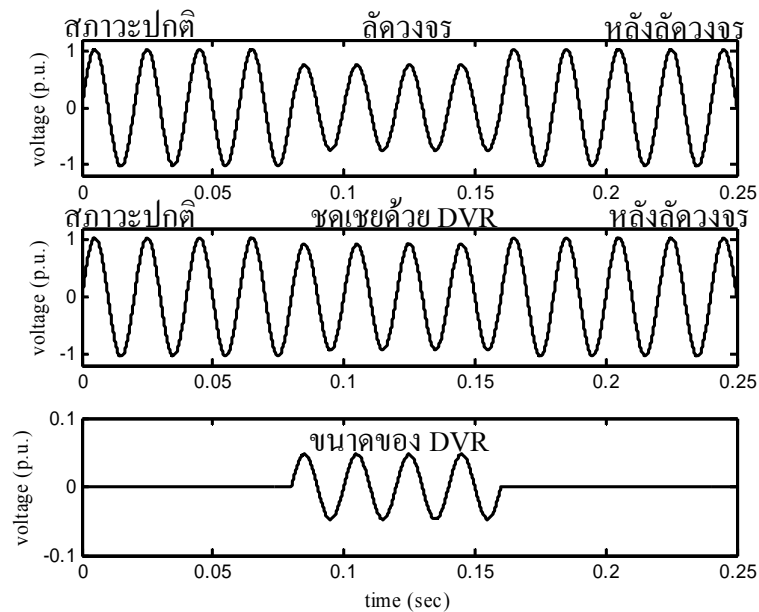
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18b	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 30b
1	a	8.01230	7.53460	7.57110
	b	6.91030	75.76900	66.38190
	c	11.94530	11.90620	12.07460
2	a	6.50350	6.06020	6.09190
	b	5.40940	74.18720	64.79530
	c	8.15300	8.09960	8.26480
5	a	5.31830	4.92620	4.95230
	b	1.81210	70.07290	60.69750
	c	5.16080	5.10980	5.26630
17	a	1.38510	1.28050	1.29190
	b	0.45270	68.36190	71.10460
	c	0.92560	0.90250	0.90640
30	a	-	-	-
	b	0.45280	0.61880	6.34700
	c	-	-	-

ตารางที่ 5.34 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
b	0.04743	359.97000	0.01000



รูปที่ 5.47 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 เฟส *b* และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 30 เฟส *b*



รูปที่ 5.48 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 118 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.35 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 275.320 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 79 เฟส *a* ผ่าน

$Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.35 ทำให้แรงดันที่บัส 79 เฟส a มีขนาดลดลงจาก 0.98200 เป็น 0.62042 p.u. แรงดันที่บัส 118 ในเฟส a จาก 0.96800 เป็น 0.62417 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1080.400 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.36 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 77 เชื่อมต่อระหว่างบัส 75 และบัส 79 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 16.58780 เป็น 51.60500 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 77 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 3.22940 เป็น 34.73770 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118 เฟส a ดังแสดงในตารางที่ 5.37 จากผลทดสอบในตารางที่ 5.35 จะพบว่าแรงดันที่บัส 118 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 118 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นในเฟส a จาก 0.62417 เป็น 0.93784 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 837.810 kW ส่วนที่บัส 79 เฟส a เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น แต่กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 5.49 แสดงระบบทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.50 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีค่าลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส a จาก 51.60500 เป็น 40.15810 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 77 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 34.73770 เป็น 39.99870 p.u. จะพบว่าที่บัสที่เกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 117 ต่อกับบัส 118 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส a จาก 0.3654 เป็น 7.20960 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่ บัส 118 เฟส a เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 เฟส a

ตารางที่ 5.35 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิด
 ลัดวงจรที่บัส 79a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118a

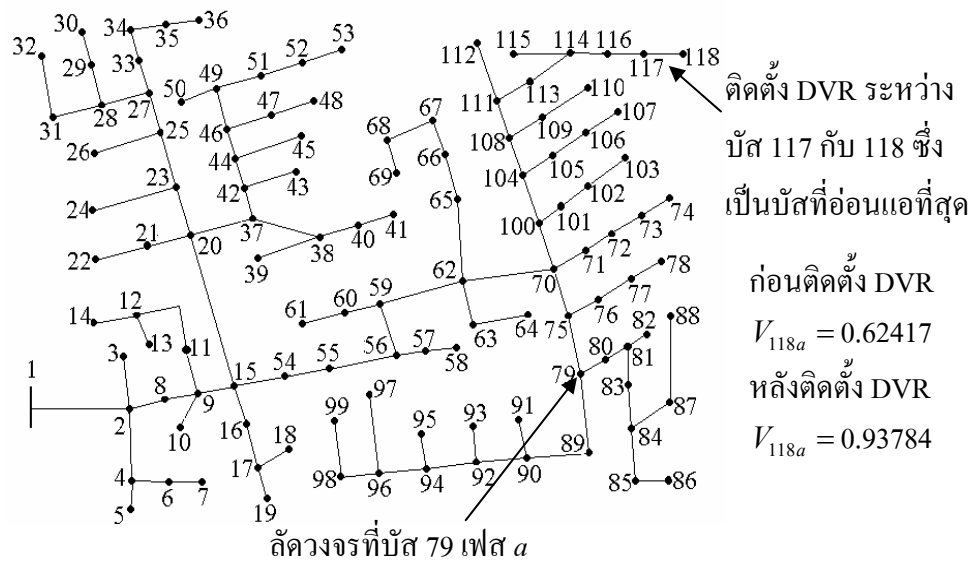
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 118a
74	a	0.97687	0.63869	0.76128
	b	-	-	-
	c	-	-	-
75	a	0.98238	0.63126	0.75015
	b	1.02960	1.21420	1.16640
	c	0.99829	1.00980	0.98536
79	a	0.98200	0.62042	0.73768
	b	1.02930	1.22250	1.17620
	c	0.99884	1.01070	0.98410
115	a	0.97049	0.62802	0.83830
	b	-	-	-
	c	-	-	-
116	a	0.97059	0.62817	0.84774
	b	-	-	-
	c	-	-	-
117	a	0.96845	0.62485	0.88499
	b	-	-	-
	c	-	-	-
118	a	0.96800	0.62417	0.93784
	b	-	-	-
	c	-	-	-
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)		275.320	1080.400	837.810

ตารางที่ 5.36 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118a

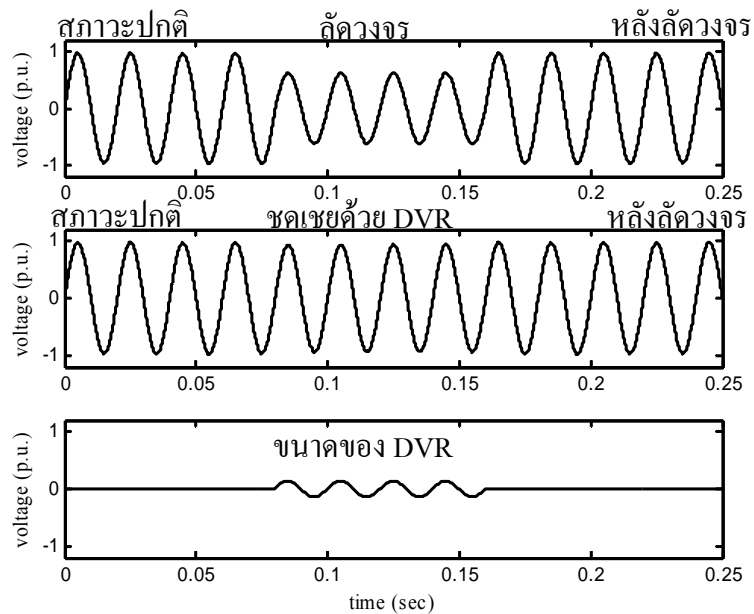
ลำดับของสายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 118a
1	a	16.58780	51.60500	40.15810
	b	10.31980	9.16810	9.46000
	c	13.32420	13.19700	13.42700
57	a	7.86960	41.49580	30.65070
	b	6.28400	5.37680	5.60020
	c	7.40610	7.32100	7.50270
60	a	7.86960	41.49580	30.65070
	b	5.84740	4.98650	5.19740
	c	7.40610	7.32100	7.50270
71	a	3.22940	34.73770	39.99870
	b	3.28510	2.77320	2.88020
	c	3.62390	3.58160	3.68350
77	a	3.22940	34.73770	39.99870
	b	3.28510	2.77320	2.88020
	c	2.24960	2.22220	2.28760
117	a	0.23580	0.36540	7.20960
	b	-	-	-
	c	-	-	-

ตารางที่ 5.37 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
a	0.14004	359.99000	0.99850



รูปที่ 5.49 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 118 เฟส a



รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.38 สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 2985.200 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 126 เฟส c ผ่าน $Z_f = 0.005 \Omega$ ลงกราวด์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.38 ทำให้แรงดันที่บัส 126 เฟส c มีขนาดลดลงจาก 0.92205 เป็น 0.71018 p.u. แรงดันที่บัส 158 ในเฟส c จาก 0.92459 เป็น 0.72265 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5458.100 kW พิจารณากระแสลัดวงจรในตารางที่ 5.39 กระแสลัดวงจรที่สายป้อนเส้นที่ 1 เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและบัส 2 และสายป้อนเส้นที่ 125 เชื่อมต่อระหว่างบัส 125 และบัส 126 ซึ่งเป็นบัสที่เกิดลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระบบปกติมาก สายป้อนเส้นที่ 1 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส c จาก 259.38230 เป็น 396.71940 p.u. จะพบว่ากระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าสูงมาก สายป้อนเส้นที่ 125 กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นในเฟส c จาก 45.85130 เป็น 176.29780 p.u. เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158 เฟส c ดังแสดงในตารางที่ 5.40 จากผลทดสอบในตารางที่ 5.38 จะพบว่าแรงดันที่บัส 158 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 158 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส c จาก 0.72265 เป็น 0.96305 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 3673.600 kW ส่วนที่บัส 126 เฟส c เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 5.51 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 5.52 พิจารณากระแสลัดวงจรในสายป้อนมีขนาดลดลง โดยเฉพาะกระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงในเฟส c จาก 396.71940 เป็น 226.20320 p.u. ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายกระแสลัดวงจรลดลง ส่วนสายป้อนเส้นที่ 125 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส c จาก 176.29780 เป็น 203.65710 p.u. จะพบว่าที่บัสเกิดลัดวงจรจะมีกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งกลุ่มโหลดนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์หรือรีเลย์ป้องกันกระแสเกินตัดออกจากระบบในเวลาต่อมา ส่วนสายป้อนเส้นที่ 157 ต่อกับบัส 158 ขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มในเฟส c จาก 0.61170 เป็น 132.55190 p.u. กระแสลัดวงจรในส่วนนี้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ของระบบกลับมาสู่ระบบปกติและมีกำลังงานสูญเสียลดลง สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีความสามารถและคงทนต่อการจ่ายกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ได้ ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหลือกลุ่มโหลดที่ยังทำงานได้ตามปกติ ได้แก่

บัส 158 เฟส *c* เนื่องจากกลุ่มโหลดนี้ได้รับการฟื้นฟูแรงดันจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้กลับมาสู่สภาวะการทำงานปกติเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126 เฟส *c*

ตารางที่ 5.38 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126*c* และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158*c*

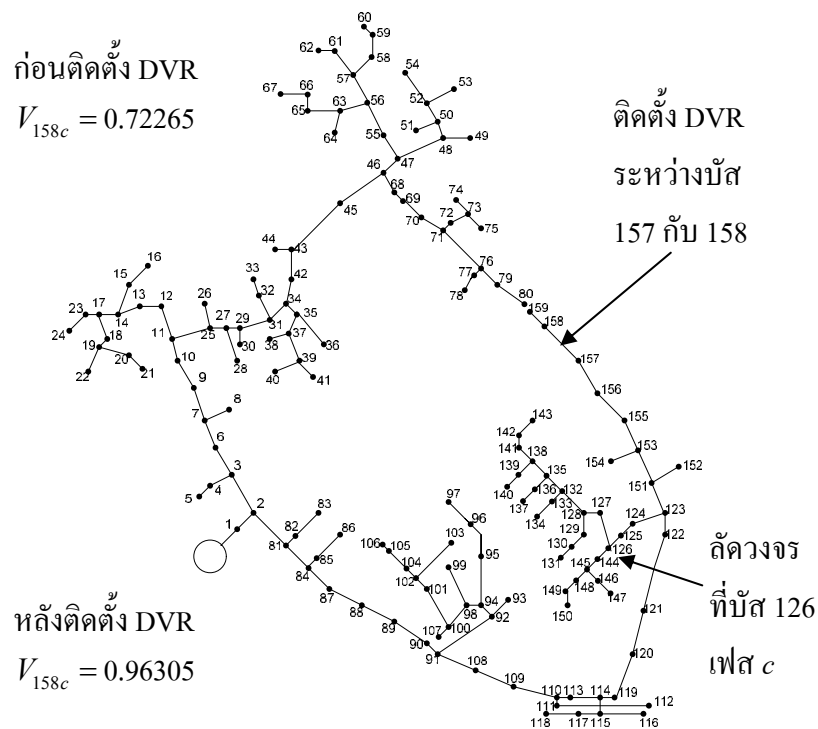
บัส	เฟส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126 <i>c</i>	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 158 <i>c</i>
125	<i>a</i>	0.93570	1.11870	0.93806
	<i>b</i>	0.92914	0.87753	0.92810
	<i>c</i>	0.92314	0.71425	0.92000
126	<i>a</i>	0.93464	1.12180	0.94243
	<i>b</i>	0.92807	0.87529	0.92248
	<i>c</i>	0.92205	0.71018	0.91564
127	<i>a</i>	0.93389	1.12130	0.94169
	<i>b</i>	0.92730	0.87478	0.92172
	<i>c</i>	0.92128	0.70880	0.91485
157	<i>a</i>	0.93761	1.11080	0.88360
	<i>b</i>	0.93076	0.88238	0.97812
	<i>c</i>	0.92460	0.72265	0.96237
158	<i>a</i>	0.93762	1.11080	0.88263
	<i>b</i>	0.93076	0.88238	0.97906
	<i>c</i>	0.92459	0.72265	0.96305
159	<i>a</i>	0.93762	1.11080	0.88263
	<i>b</i>	0.93076	0.88238	0.97906
	<i>c</i>	0.92459	0.72265	0.96305
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)		2985.200	5458.100	3673.600

ตารางที่ 5.39 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบ
ปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126c และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158c

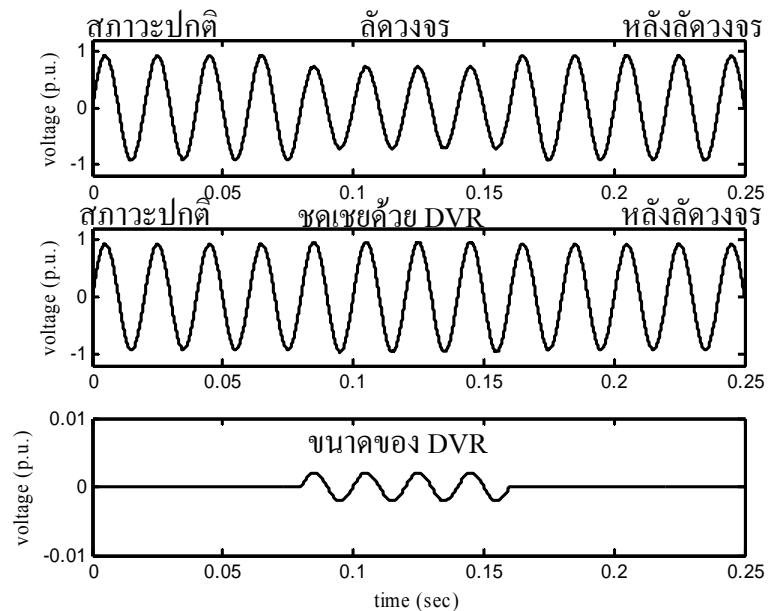
ลำดับของ สายป้อน	เฟส	กระแสลัดวงจร (p.u.)		
		ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126c	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 158c
1	a	250.61780	238.94320	253.47610
	b	251.53280	254.95480	250.22980
	c	259.38230	396.71940	226.20320
122	a	60.32320	50.377200	62.72560
	b	60.75280	64.33260	59.67850
	c	63.30320	197.94320	30.86970
123	a	49.00970	40.82680	50.54390
	b	49.35800	52.31170	48.80700
	c	50.39950	181.93480	207.76330
124	a	45.23110	37.66320	46.62440
	b	45.55280	48.28410	45.06370
	c	46.56960	177.18740	204.30490
125	a	45.23110	37.66330	46.62450
	b	45.55280	48.28410	45.06380
	c	45.85130	176.2978	203.65710
157	a	0.00020	0.00020	0.00020
	b	0.00020	0.00020	0.00020
	c	0.47810	0.61170	132.55190

ตารางที่ 5.40 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

เฟส	ขนาดแรงดัน (p.u.)	มุมเฟส (องศา)	รีแอกแตนซ์ (Ω)
c	0.002080	219.08000	0.01000



รูปที่ 5.51 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126 เฟส c และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 158 เฟส c



รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5.6 สรุป

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ คำนึงเสถียรภาพแรงดันสามารถระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดสำหรับติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พิจารณาจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้น้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดหลังจากเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวผ่าน Z_f ลงกราวด์ที่บัสที่อ่อนแอที่สุด และบัสใกล้เคียงที่มีผลทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเกิดแรงดันตก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้น และกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง กระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดลัดวงจรมีค่าลดลง ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานต่อไปได้ ส่วนบัสที่เกิดลัดวงจรในกรณีเกิดลัดวงจรบริเวณใกล้กับบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่สามารถช่วยชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับมาสู่ภาวะปกติได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงาน โหลดที่เกิดลัดวงจรนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเวลาต่อมา ส่วนโหลดที่อยู่ในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานจะสามารถทำงานได้ตามปกติ แต่กระแสลัดวงจรที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตมีค่าสูงขึ้นกว่าระบบการทำงานปกติ ทำให้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีขนาดและพิกัดในการทนกระแสมากกว่าที่จะทำงานได้ ส่วนต่อมาเป็นการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานอยู่ไม่มีผลกระทบเกี่ยวข้องกัน กล่าวคือ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่ลดลงจากระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียว แต่กำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้ง 2 ตัว สามารถทำงานร่วมกันได้โดยที่มีผลกระทบต่อกันไม่มากนัก

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา และพัฒนาการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม การติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะติดตั้งอนุกรมกับสายป้อนเพื่อยกระดับแรงดันโหลดปลายทางให้มีขนาดสูงขึ้น หน้าที่หลักของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต คือ ช่วยป้องกันกลุ่มโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือบัสที่มีความอ่อนแอที่สุดในทางระบบไฟฟ้ากำลังบัสที่อ่อนแอที่สุด คือ บัสที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดอย่างต่อเนื่องมีค่าน้อยที่สุด ก่อนที่ระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือก่อนที่ค่าดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า $FVSI L_{min}$ หรือ LQP เกิน 1.00 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการทำงานในสภาวะคงตัว สามารถทำได้โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ วิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส โหลดไม่สมดุล พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใหม่ ได้แก่ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวด้วยแบบจำลองการนิโคกระแสและการปรับปรุงบัสแอดมิตแตนซ์ ด้วยวิธีการเกาส์-ไซเคลและนิวตัน-ราฟสัน การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้การพิจารณาเส้นโค้งกำลัง-แรงดันและกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ ประยุกต์ใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้หาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด การหาขนาดเหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยการ โปรแกรมลำดับควอดราติก และการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ซึ่งทั้งสองเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่างชนิดกัน ดังต่อไปนี้

1) พัฒนาแบบจำลองการไหลกำลังของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัว แบบจำลองการนิโคกระแสและการปรับปรุงเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและนิวตัน-ราฟสัน รวมทั้งพัฒนาโปรแกรม MATLAB ขึ้นสำหรับจำลองสถานการณ์การลัดวงจรที่บัสแบบ 3 เฟส ผ่าน Z_f ลงกราวด์ โดยทดสอบกับระบบทดสอบ 5 ระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบ

ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อเกิดลัดวงจรแล้วดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่เกิดลัดวงจร จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น กระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายมีค่าลดลงใกล้เคียงกับระบบปกติแต่กระแสลัดวงจรในสายป้อนของบัสที่เกิดลัดวงจรมีขนาดลดลงไม่มากนัก ส่งผลให้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำหน้าที่จ่ายกระแสลัดวงจรแทนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูงนี้ ดังนั้น ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะต้องสามารถจ่ายกระแสลัดวงจรนี้ได้และสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงนี้ได้ ส่วนกรณีเกิดลัดวงจรที่บัสใกล้เคียงกับบัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยบัสที่เกิดลัดวงจรจะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนกลุ่มโหลดที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะสามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้กลับมาสู่สภาวะปกตินอกจากนี้กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบลดลง หลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้

2) นำเสนอการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทำการควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวภายใต้เส้นโค้งกำลัง-แรงดันและกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีเสถียรภาพแรงดันสูงขึ้น ช่วยขยายย่านการจ่ายโหลด ทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้น เพราะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมสามารถลดกำลังงานสูญเสียในสายป้อนได้อีกด้วย

3) นำเสนอการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพื่อกำหนดตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดสำหรับติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พิจารณาจากกำลังไฟฟ้ที่โหลดมีค่าการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้น้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดหลังจากเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวผ่าน Z_f ลงกราวด์ ที่บัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสใกล้เคียงที่มีผลทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเกิดแรงดันตก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง กระแสลัดวงจรที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดลัดวงจรมีค่าลดลง ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานต่อไปได้ ส่วนบัสที่เกิดลัดวงจรในกรณีเกิดลัดวงจรบริเวณใกล้เคียงกับบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่สามารถช่วยชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับมาสู่สภาวะปกติได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงาน โหลดที่เกิดลัดวงจรนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออก

จากระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเวลาต่อมา ส่วนโหลดที่อยู่ในบริเวณที่ตัวพินฟูแรงดันพลวัตทำงานจะสามารถทำงานได้ตามปกติ แต่กระแสลัดวงจรที่ตัวพินฟูแรงดันพลวัตมีค่าสูงขึ้นกว่าระบบการทำงานปกติ ทำให้ตัวพินฟูแรงดันพลวัตจะต้องมีขนาดและพิถีพิถันในการทนกระแสรวมพอที่จะทำงานได้

4) ศึกษาการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวพินฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนานและอนุกรมตามลำดับ จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบที่ติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัตทำงานอยู่ไม่มีผลกระทบเกี่ยวข้องกัน กล่าวคือ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วขนาดของตัวพินฟูแรงดันพลวัตไม่ลดลงจากระบบที่ติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้ง 2 ตัว สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยที่มีผลกระทบต่อกันไม่มาก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) การหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI L_{mn} หรือ LQP กับระบบทดสอบที่มีขนาดใหญ่ เช่น ระบบทดสอบ 118 บัสและระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก เพราะระบบทดสอบสามารถจ่ายโหลดได้มาก สำหรับโหลดที่ต้นทาง ดังนั้น เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟอย่างต่อเนื่องด้วยค่าลำดับขั้นน้อยประมาณ 0.1-0.2 p.u. ต้องใช้การวนรอบหลายครั้ง ซึ่งควรใช้ค่าลำดับขั้นที่มากกว่านี้ ส่วนโหลดปลายทางค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่รับได้มีขนาดไม่สูงมากนัก อาจจะใช้ค่าลำดับขั้นที่ค่าน้อยได้

2) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวพินฟูแรงดันพลวัตด้วยลำดับควอดราติก จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ ค่าเริ่มต้นที่กำหนดได้จากการสุ่มค่าระหว่างขอบเขตที่กำหนด สำหรับระบบทดสอบขนาดเล็ก สามารถทดสอบได้ง่ายเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก ส่วนระบบทดสอบขนาดใหญ่ ต้องใช้เวลาในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามาก ถ้าค่าเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะไม่ลู่อุ้เข้าหาคำตอบ ดังนั้น ควรกำหนดขอบเขตของคำตอบให้มีขนาดเล็กมากพอและครอบคลุมคำตอบ เพื่อให้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวพินฟูแรงดันพลวัตใช้เวลาไม่มาก

3) การเกิดลัดวงจรที่บัสผ่าน Z_f ลงกราวด์ ค่า Z_f ที่กำหนดจะต้องทำให้ขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งตัวพินฟูแรงดันพลวัตลดลงไม่มากนัก ไม่ควรต่ำกว่า 0.5 p.u. เพราะถ้ามีขนาดต่ำกว่านี้ ตัวพินฟูแรงดันพลวัตจะไม่สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับสู่สภาวะการทำงานปกติได้และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะไม่ลู่อุ้เข้าหาคำตอบ ในความเป็นจริงตัวพินฟูแรงดันพลวัตจะมีตัวตรวจวัดระดับแรงดันของกลุ่มโหลดที่อ่อนแอที่สุด และใช้เวลาในการชดเชยแรงดันไม่ถึง 1 วินาที ระบบจะกลับคืนสู่สภาวะการทำงานปกติ

รายการอ้างอิง

- ทศพล รัตน์นิยมชัย และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2548). กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบจำหน่าย 22-kV ด้วยการควบคุมตัวฟลักซ์แรงดันพลวัต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28) ณ โรงแรมเฟิร์ส วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต วันที่ 20-21 ตุลาคม: 257-260.
- ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2542). การทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้การตัดสินใจแบบฟuzzy. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.: 26-29.
- ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2549). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 130-139.
- นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย (2548). การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุล. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 5-24
- Abdul Rahman, T.K., and Jasmon, G.B. (1995). A New Technique for Voltage Stability Analysis in a Power System and Improved Load flow Algorithm for Distribution Network. **Proc. EMPD'95 Int. Conf. Energy Management and Power Delivery. 2:** 714 – 719.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L., Favuzza, S., and Sanseverino, E.R. (1998). Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach. **IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution. 145(2):** 133 - 138.
- Brumsickle, W.E., Schneider, R.S., Luckjiff, G.A., Divan, D.M., and McGranaghan, M.F. (2001). Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning. **IEEE Trans. Industry Applications. 37(1):** 212 – 217.
- Coelho, A., Rodrigues, A.B., and Da Silva, M.G. (2004). Distribution network reconfiguration with reliability constraints. **PowerCon' 04. Int. Conf. 2:** 1600 – 1606.
- De Souza, J.C.S., Filho, M.B.D.C., Meza, E.M., and Schilling, M.Th. (2003). Planning metering systems for power distribution systems monitoring. **IEEE Proc. Conf. Power Technology. 2:** 6.

- El-Habrouk, M., Darwish, M.K., and Mehta, P. (2000). A survey of active filters and reactive power compensation techniques. **IEE Conf. Publ. 8th Int. Con. Power Electronics and Variable Speed Drives.** (475): 7 – 12.
- Fitzer, C., Barnes, M., and Geen, P. (2004). Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer. **IEEE Trans. Industry Applications.** 40: 203-212.
- Furong, L., Pilgrim, J.D., Dabeedin, C., Chebbo, A., and Aggarwal, R.K. (2005). Genetic algorithms for optimal reactive power compensation on the national grid system. **IEEE Trans. Power Systems.** 20(1): 493 – 500.
- Ghosh, A., Jindal, A.K., and Joshi, A. (2004). Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads. **IEEE Trans. Power Delivery.** 19: 405-413.
- Jerome, J. (2001). Distribution network reconfiguration and reactive power compensation. **Power Engineering, LESCOPE'01. Large Engineering Systems Conf.** 1: 177 – 183.
- Jia, H., Yu, X., and Yu, Y. (2004). An Improved Voltage Stability Index and Its Application. **IEEE Proc. MELECON'04. Electrotechnical Conf.** 3: 889 - 892.
- Jung, H.-J, Suh, I.-Y., Kim, B.-S., Kim, R.-Y., Choi, S.-Y., and Song, J.-H. (2002). A Study on DVR Control for Unbalanced Voltage Compensation. **IEEE Annual. Applied Power Electronics Conf. and Exposition.** 2: 1068-1073.
- Kashem, M.A., Ganapathy, V., Jasmon, G.B., and Buhari, M.I. (2000). A novel method for loss minimization in distribution networks. **Proc. Int. Conf. Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. DRPT' 00.** 1: 251 – 256.
- Ke, L. (1996). State estimation for power distribution system and measurement impacts. **IEEE Trans. Power Systems.** 11(2): 911 – 916.
- Lang, B.P., and Pahwa, A. (2000). Power distribution system reliability planning using a fuzzy knowledge-based approach. **IEEE Trans. Power Delivery.** 15(1): 279 – 284.
- Li, B.H., Choi, S.S., and Vilathgamuwa, D.W. (2001). Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer. **IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution.** 148(1): 1 – 7.
- Lukman, D., and Blackburn, T.R. (2001). Loss minimization in load flow simulation in power system. **IEEE Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems.** 1: 84 – 88.

- Moghavemmi, M., and Omar, F.M. (1998). Technique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction. **IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution**. 145: 634-640.
- Mohamed, A., Jasmon, G.B., and Yusoff, S. (1989). A Static Voltage Collapse Indicator Using Lind Stability Factor. **Jour. Industrial Technology**. 7(1): 73-85.
- Musirin, I., and Abdul Rahman, T.K. (2002). On-Line Voltage Stability Based Contingency Ranking Using Fast Voltage Stability Index (FVSI). . **IEEE/PES. Transmission and Distribution Conf. and Exhibition**. 2: 1118 – 1123.
- Ozay, N., Guven, A.N., Buyuksemerci, A., and Fettahlioglu, M. (1999). Design and implementation of a feeder automation system for distribution networks. **Int. Conf. PowerTech Budapest 99**. 1: 122.
- Praveen, J., Muni, B.P., Venkateshwarlu, S., and Makthal, H.V. (2004). Review of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality. **IEEE 30th Annual Conf. IECON'04**. 1: 749 – 754.
- Ramos, R., Vallejos, J., and Baran, B. (2004). Multiobjective reactive power compensation with voltage security. **IEEE/PES. Conf. Transmission and Distribution and Exposition 1**: 302 – 307.
- Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2006). Modeling of a DVR for Newton-Raphson Power Flows. **WSEAS Trans. Systems**. 5(5): 913-918.
- Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2006). Steady-State Power Flow Modeling for a Dynamic Voltage Restorer. **Proc. 5th WSEAS Int. Conf. Application of Electrical Engineering (AEE'06)**. 1: 6-11.
- Rider, M.J., Paucar, V.L., and Garcia, A.V. (2004). Enhanced higher-order interior-point method to minimise active power losses in electric energy systems. **IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution**, 151(4): 517 – 525.
- Sng, E.K.K., Choi, S.S., and Vilathgamuwa, D.M. (2004). Analysis of seriescompensation and DC-link voltage controls of a transformerlessself-charing dynamic voltage restorer. **IEEE Trans. Power Delivery**. 19: 1511-1518.
- Vilathgamuwa, D.M., Perera, A.A.D.R., and Choi.S.S. (2003). Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer. **IEEE Power Delivery**. 18: 928-936.
- Wang, B., Wilsun, X., and Zhencun, P. (2005). Voltage sag state estimation for power distribution systems. **IEEE Trans. Power Systems**. 20(2): 806 – 812.

- Welsh, M., Mehta, P., and Darwish, M.K. (2000). Genetic algorithm and extended analysis optimisation techniques for switched capacitor active filters-comparative study. **IEE Proc. Electric Power Applications**. 147(1): 21 – 26.
- Woodley, N.H. (2000). Field experience with Dynamic Voltage Restorer (DVRTM MV) systems. **IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting**. 4: 2864 – 2871.
- Ying, H., Youman, D., Jiansheng, L., and Boming, Z. (2000). A novel architecture of distribution management system. **IEEE. Summer Meeting Proc.** 1: 67 – 72.
- Zhan, C.-J., Wu, X.G., Kromlidis, S., Ramachandramurthy, V.K., Barnes, M., Jenkins, N., and Ruddell, A.J. (2003). Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer. **IEE Proc. Generation Transmission and Distribution**. 150(2): 175 – 182.

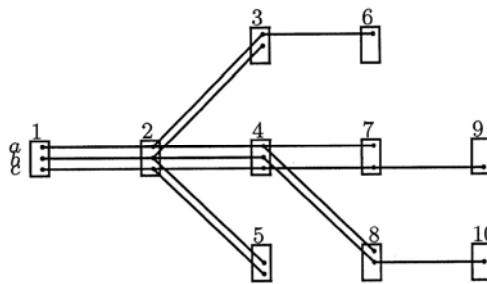
ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในโครงงานนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 5 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส คัดแปลงระบบทดสอบ IEEE 37 บัส และ 118 บัส และ ระบบทดสอบ สายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทุกระบบมีค่าฐานเท่ากับ 100 kVA 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

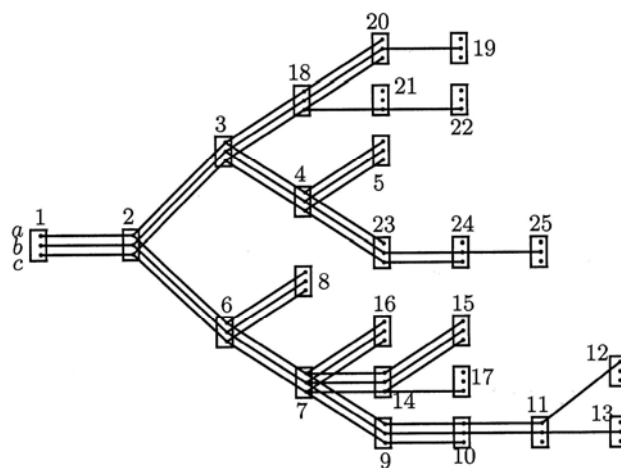
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 10 บัส

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

ตารางที่ ก.4 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 10 บัส

Line number	From bus	To bus	Line charging ($1/\Omega$)					
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc
1	1	2	0	0	0	0	0	0
2	2	3	0	0	0	0	0	0
3	2	4	0	0	0	0	0	0
4	2	5	0	0	0	0	0	0
5	3	6	0	0	0	0	0	0
6	4	7	0	0	0	0	0	0
7	4	8	0	0	0	0	0	0
8	7	9	0	0	0	0	0	0
9	8	10	0	0	0	0	0	0

ก.2 ระบบทดสอบ 25 บัส



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 25 บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 25 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	1.0	0	-120	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	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
6	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
7	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
8	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
9	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
10	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
11	1.0	1.0	-	0	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
12	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
13	-	1.0	-	-	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
14	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
15	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
16	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
17	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
18	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
19	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
20	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
21	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
22	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
23	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
24	-	1.0	1.0	-	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
25	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 25 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	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	40	30	40	30	40	30
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	40	30	40	30	40	30
9	60	45	0	0	0	0
10	0	0	40	30	0	0
11	40	30	0	0	0	0
12	60	45	0	0	0	0
13	0	0	40	30	0	0
14	0	0	0	0	60	45
15	133.3	100	133.3	100	133.3	100
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	40	30
18	40	30	40	30	40	30
19	0	0	60	45	0	0
20	40	30	0	0	0	0
21	0	0	0	0	40	30
22	0	0	0	0	60	45
23	60	45	0	0	0	0
24	0	0	0	0	40	30
25	0	0	80	60	0	0

Self impedance Ω /mile	Mutual impedance Ω /mile
AA1=0.368673+0.685228j	AB1=0.016979+0.151451j
BB1=0.375688+0.671464j	BC1=0.018826+0.207232j
CC1=0.372266+0.678178j	CA1=0.015451+0.109794j
AA2=0.977480+0.871668j	AB2=0.016740+0.169685j
BB2=0.984397+0.865438j	BC2=0.018561+0.227450j
CC2=0.981023+0.864779j	CA2=0.015233+0.126388j
Z11=0.977480+0.871668j	Z12=0.015233+0.126388j
Z22=0.981023+0.868477j	
Zss=1.9280+1.41939j	

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 25 บัส

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
1	1	2	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	1000
2	2	3	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	500
3	3	4	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	500
4	4	5	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
5	4	23	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	400
6	23	24	0	0	0	Z11	Z12	Z22	400
7	24	25	0	0	0	Zss	0	0	400
8	3	18	AB2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
9	18	20	AB2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
10	20	19	0	0	0	Zss	0	0	400
11	18	21	0	0	0	0	0	Zss	400

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 25 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
12	21	22	0	0	0	0	0	Zss	400
13	2	6	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
14	6	8	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	1000
15	6	7	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
16	7	16	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
17	7	14	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
18	14	15	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	300
19	14	17	0	0	0	0	Zss	0	300
20	7	9	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
21	9	10	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	500
22	10	11	Z11	Z12	0	Z22	0	0	300
23	11	12	Zss	0	0	0	0	0	200
24	11	13	0	0	0	Zss	0	0	200

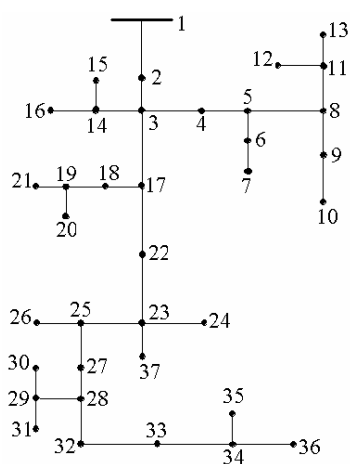
ตารางที่ ก.8 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 25 บัส

Line number	From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (ft)
			Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
1	1	2	0	0	0	0	0	0	1000
2	2	3	0	0	0	0	0	0	500
3	3	4	0	0	0	0	0	0	500
4	4	5	0	0	0	0	0	0	500
5	4	23	0	0	0	0	0	0	400
6	23	24	0	0	0	0	0	0	400
7	24	25	0	0	0	0	0	0	400
8	3	18	0	0	0	0	0	0	500
9	18	20	0	0	0	0	0	0	500
10	20	19	0	0	0	0	0	0	400

ตารางที่ ก.8 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 25 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Line charging ($\mu\text{S}/\text{mile}$)						length (ft)
			Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
11	18	21	0	0	0	0	0	0	400
12	21	22	0	0	0	0	0	0	400
13	2	6	0	0	0	0	0	0	500
14	6	8	0	0	0	0	0	0	1000
15	6	7	0	0	0	0	0	0	500
16	7	16	0	0	0	0	0	0	500
17	7	14	0	0	0	0	0	0	500
18	14	15	0	0	0	0	0	0	300
19	14	17	0	0	0	0	0	0	300
20	7	9	0	0	0	0	0	0	500
21	9	10	0	0	0	0	0	0	500
22	10	11	0	0	0	0	0	0	300
23	11	12	0	0	0	0	0	0	200
24	11	13	0	0	0	0	0	0	200

ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส



รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ 37 บัส

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 37 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	1.0	0	-120	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	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
6	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
7	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
8	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
9	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
10	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
11	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
12	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
13	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
14	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
15	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
16	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
17	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
18	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
19	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
20	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
21	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
22	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
23	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
24	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
25	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
26	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 37 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
27	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
28	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
29	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
30	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
31	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
32	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
33	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
34	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
35	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
36	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
37	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 37 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	140	70	140	70	350	175
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	85	40
5	0	0	0	0	0	0
6	17	8	21	10	0	0
7	85	40	0	0	0	0
8	0	0	0	0	85	40
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	42	21	0	0
11	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 37 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
12	0	0	140	70	21	10
13	0	0	42	21	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	85	40
16	8	4	85	40	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	42	21
19	42	21	0	0	0	0
20	42	21	42	21	42	21
21	42	21	0	0	0	0
22	0	0	0	0	85	40
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	85	40	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	42	21
27	85	40	0	0	0	0
28	0	0	0	0	42	21
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	42	21	0	0
31	0	0	0	0	85	40
32	140	70	0	0	0	0
33	126	62	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	85	40
36	0	0	0	0	42	21
37	0	0	0	0	0	0

Self impedance Ω /mile	Mutual impedance Ω /mile
AA1=0.2926+0.1973j	AB1=0.0673-0.0368j
BB1=0.2646+0.1900j	BC1=0.0673-0.0368j
CC1=0.2926+0.1973j	CA1=0.0337-0.0417j
AA2=0.4751+0.2973j	AB2=0.1629-0.0326j
BB2=0.4488+0.2678j	BC2=0.1629-0.0326j
CC2=0.4751+0.2973j	CA2=0.1234-0.0607j
AA3=1.2936+0.6713j	AB3=0.4871+0.2111j
BB3=1.3022+0.6326j	BC3=0.4871+0.2111j
CC3=1.2936+0.6713j	CA3=0.4585+0.1521j
AA4=2.0952+0.7758j	AB4=0.5204+0.2738j
BB4=2.1068+0.7398j	BC4=0.5204+0.2738j
CC4=2.0952+0.7758j	CA4=0.4926+0.2123j

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 37 บัส

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
1	1	2	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	1850
2	2	3	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	960
3	3	4	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	360
4	3	14	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	400
5	3	17	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	1320
6	4	5	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	520
7	5	6	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	80
8	5	8	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	800
9	6	7	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	520

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 37 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
10	8	9	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	600
11	8	11	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	920
12	9	10	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	280
13	11	12	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	120
14	11	13	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	760
15	14	15	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	240
16	14	16	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	320
17	17	18	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	240
18	17	22	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	600
19	18	19	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	280
20	19	20	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	200
21	19	21	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	280
22	22	23	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	200
23	23	24	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	600
24	23	25	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	320
25	25	26	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	320
26	25	27	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	320
27	27	28	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	560
28	28	29	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	520
29	28	32	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	640
30	29	30	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	1280
31	29	31	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	200
32	32	33	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	400
33	33	34	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	400
34	34	35	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	200
35	34	36	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	400
36	23	37	Zss	0	0	Zss	0	Zss	1

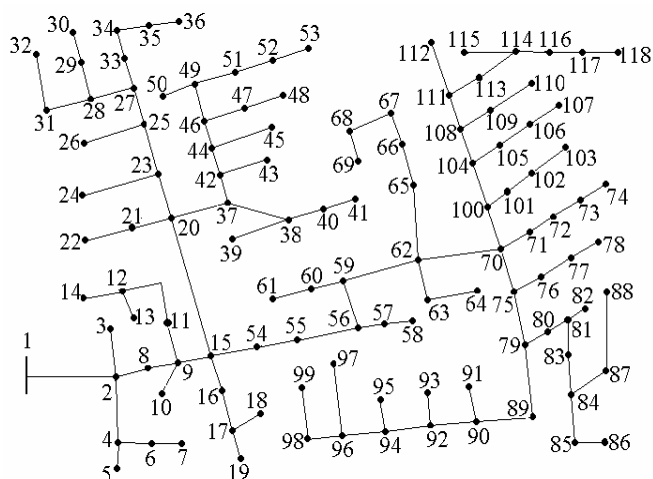
ตารางที่ ก.12 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 37 บัส

Line number	From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (ft)
			Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
1	1	2	159.7919	0	0	159.7919	0	159.7919	1850
2	2	3	127.8306	0	0	127.8306	0	127.8306	960
3	3	4	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	360
4	3	14	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	400
5	3	17	127.8306	0	0	127.8306	0	127.8306	1320
6	4	5	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	520
7	5	6	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	80
8	5	8	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	800
9	6	7	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	520
10	8	9	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	600
11	8	11	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	920
12	9	10	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	280
13	11	12	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	120
14	11	13	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	760
15	14	15	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	240
16	14	16	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	320
17	17	18	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	240
18	17	22	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	600
19	18	19	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	280
20	19	20	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	200
21	19	21	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	280
22	22	23	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	200
23	23	24	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	600
24	23	25	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	320
25	25	26	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	320
26	25	27	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	320
27	27	28	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	560

ตารางที่ ก.12 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบ 37 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Line charging (μS /mile)						length (ft)
			Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
28	28	29	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	520
29	28	32	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	640
30	29	30	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	1280
31	29	31	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	200
32	32	33	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	400
33	33	34	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	400
34	34	35	60.2483	0	0	60.2483	0	60.2483	200
35	34	36	74.8405	0	0	74.8405	0	74.8405	400
36	23	37	0	0	0	0	0	0	1

ก.4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส



รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ 118 บัส

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 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	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
4	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
5	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
6	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
7	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
8	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
9	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
10	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
11	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
12	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
13	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
14	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
15	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
16	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
17	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
18	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
19	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
20	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
21	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
22	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
23	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
24	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
25	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
26	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
27	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
28	1.0	-	1.0	0	-	120	0.0	0.0	PQ bus
29	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
30	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
31	1.0	-	1.0	0	-	120	0.0	0.0	PQ bus
32	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
33	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
34	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
35	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
36	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
37	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
38	1.0	1.0	-	0	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
39	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
40	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
41	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
42	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
43	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
44	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
45	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
46	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
47	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
48	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
49	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
50	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
51	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
52	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
53	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
54	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
55	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
56	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
57	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
58	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
59	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
60	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
61	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
62	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
63	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
64	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
65	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
66	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
67	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
68	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
69	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
70	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
71	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
72	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
73	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
74	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
75	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
76	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
77	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
78	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
79	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
80	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
81	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
82	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
83	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
84	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
85	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
86	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
87	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
88	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
89	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
90	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
91	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
92	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
93	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
94	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
95	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
96	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
97	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
98	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
99	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
100	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
101	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
102	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
103	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
104	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Magnitude voltage			Angle (Degree)			Generation		Bus type
	A	B	C	A	B	C	MW	MVar	
105	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
106	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
107	-	-	1.0	-	-	120	0.0	0.0	PQ bus
108	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
119	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
110	-	1.0	-	-	-120	-	0.0	0.0	PQ bus
111	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
112	1.0	1.0	1.0	0	-120	120	0.0	0.0	PQ bus
113	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
114	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
115	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
116	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
117	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus
118	1.0	-	-	0	-	-	0.0	0.0	PQ bus

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 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	40	20	0	0	0	0
3	0	0	20	10	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	40	20
6	0	0	0	0	20	10
7	0	0	0	0	40	20
8	20	10	0	0	0	0

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	20	10	0	0
11	40	20	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	20	10	0	0	0	0
14	40	20	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	40	20
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	20	10
19	0	0	0	0	40	20
20	0	0	0	0	0	0
21	40	20	0	0	0	0
22	40	20	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	40	20	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	40	20
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	20	10
30	0	0	0	0	20	10
31	0	0	0	0	0	0
32	40	20	0	0	0	0
33	40	20	0	0	0	0
34	40	20	0	0	0	0
35	0	0	0	0	40	20

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
36	0	0	0	0	0	0
37	40	20	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
39	40	20	0	0	0	0
40	0	0	20	10	0	0
41	0	0	20	10	0	0
42	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	20	10
44	20	10	0	0	0	0
45	0	0	40	20	0	0
46	0	0	0	0	0	0
47	20	10	0	0	0	0
48	20	10	0	0	0	0
49	35	25	35	25	35	25
50	70	50	70	50	70	50
51	35	25	70	50	35	25
52	0	0	0	0	40	20
53	20	10	0	0	0	0
54	40	20	0	0	0	0
55	40	20	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
57	20	10	0	0	0	0
58	0	0	20	10	0	0
59	0	0	0	0	0	0
60	0	0	20	10	0	0
61	0	0	20	10	0	0
62	20	10	0	0	0	0

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
63	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	40	20
66	40	20	0	0	0	0
67	0	0	75	35	0	0
68	35	25	35	25	70	50
69	0	0	0	0	75	35
70	0	0	0	0	0	0
71	20	10	0	0	0	0
72	40	20	0	0	0	0
73	20	10	0	0	0	0
74	40	20	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	40	20
77	0	0	0	0	40	20
78	0	0	0	0	40	20
79	105	80	70	50	70	50
80	0	0	40	20	0	0
81	0	0	0	0	0	0
82	40	20	0	0	0	0
83	0	0	40	20	0	0
84	0	0	0	0	0	0
85	40	20	0	0	0	0
86	0	0	0	0	20	10
87	0	0	0	0	20	10
88	0	0	0	0	40	20
89	0	0	20	10	0	0

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
90	0	0	40	20	0	0
91	40	20	0	0	0	0
92	0	0	0	0	0	0
93	0	0	40	20	0	0
94	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	40	20
96	0	0	0	0	0	0
97	40	20	0	0	0	0
98	0	0	20	10	0	0
99	0	0	20	10	0	0
100	0	0	0	0	0	0
101	40	20	0	0	0	0
102	0	0	40	20	0	0
103	0	0	0	0	40	20
104	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	20	10
106	0	0	0	0	40	20
107	0	0	0	0	40	20
108	0	0	0	0	0	0
109	0	0	40	20	0	0
110	0	0	40	20	0	0
111	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
113	40	20	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
115	20	10	0	0	0	0
116	20	10	0	0	0	0

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
117	40	20	0	0	0	0
118	20	10	0	0	0	0

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการติดตั้งตัวเก็บประจุ

Bus code	Capacitor (kVar)		
	Phase A	Phase B	Phase C
86	200	200	200
91	50	0	0
93	0	50	0
95	0	0	50

Self impedance Ω /mile Mutual impedance Ω /mile Line Charging (B)

AA1=0.4576+1.0780j AB1=0.1560+0.5017j aa1=5.6765
 ab1= -1.8319

BB1=0.4666+1.0482j BC1=0.1580+0.4236j bb1=5.9809
 bc1= -1.1645

CC1=0.4615+1.0651j CA1=0.1535+0.3849j cc1=5.3971
 ca1= -0.6982

AA2=0.4666+1.0482j AB2=0.1580+0.4236j aa2=5.9809
 ab2= -1.1645

BB2=0.4615+1.0651j BC2=0.1535+0.3845j bb2=5.3971
 bc2= -0.6982

CC2=0.4576+1.0780j CA2=0.1560+0.5017j cc2=5.6765
 ca2= -1.8319

AA3=0.4615+1.0651j	AB3=0.1535+0.3849j	aa3=5.3971
ab3= -0.6982		
BB3=0.4576+1.0780j	BC3=0.1560+0.5017j	bb3=5.6765
bc3= -1.8319		
CC3=0.4666+1.0482j	CA3=0.1580+0.4236j	cc3=5.9809
ca3= -1.1645		
AA4=0.4615+1.0651j	AB4=0.1535+0.3849j	aa4=5.3971
ab4= -1.1645		
BB4=0.4666+1.0482j	BC4=0.1560+0.5017j	bb4=5.9809
bc4= -1.8319		
CC4=0.4576+1.0780j	CA4=0.1580+0.4236j	cc4=5.6765
ca4= -0.6982		
AA5=0.4666+1.0482j	AB5=0.1560+0.5017j	aa5=5.9809
ab5= -1.8319		
BB5=0.4576+1.0780j	BC5=0.1535+0.3849j	bb5=5.6765
bc5= -0.6982		
CC5=0.4615+1.0651j	CA5=0.1580+0.4236j	cc5=5.3971
ca5= -1.1645		
AA6=0.4576+1.0780j	AB6=0.1535+0.3849j	aa6=5.6765
ab6=-0.6982		
BB6=0.4615+1.0651j	BC6=0.1580+0.4236j	bb6=5.3971
bc6=-1.1645		
CC6=0.4666+1.0482j	CA6=0.1560+0.5017j	cc6=5.9809
ca6=-1.8319		
AA7=0.4576+1.0780j	AB7=0.0000+0.0000j	aa7=5.1154
ab7=0.0000		

BB7=0.0000+0.0000j bc7=0.0000	BC7=0.0000+0.0000j	bb7=0.0000
CC7=0.4615+1.0651j ca7= -1.0549	CA7=0.1535+0.3849j	cc7=5.1704
AA8=0.4576+1.0780j ab8= -1.0549	AB8=0.1535+0.3849j	aa8=5.1154
BB8=0.4615+1.0651j bc8=0.0000	BC8=0.0000+0.0000j	bb8=5.1704
CC8=0.0000+0.0000j ca8=0.0000	CA8=0.0000+0.0000j	cc8=0.0000
AA9=1.3292+1.3475j ab9=0.0000	AB9=0.0000+0.0000j	aa9=4.5193
BB9=0.0000+0.0000j bc9=0.0000	BC9=0.0000+0.0000j	bb9=0.0000
CC9=0.0000+0.0000j ca9=0.0000	CA9=0.0000+0.0000j	cc9=0.0000
AA10=0.0000+0.0000j ab10=0.0000	AB10=0.0000+0.0000j	aa10=0.0000
BB10=1.3292+1.3475j bc10=0.0000	BC10=0.0000+0.0000j	bb10=4.5193
CC10=0.0000+0.0000j ca10=0.0000	CA10=0.0000+0.0000j	cc10=0.0000
AA11=0.0000+0.0000j ab11=0.0000	AB11=0.0000+0.0000j	a11=0.0000
BB11=0.0000+0.0000j bc11=0.0000	BC11=0.0000+0.0000j	bb11=0.0000

$$\begin{aligned} CC11 &= 1.3292 + 1.3475j & CA11 &= 0.0000 + 0.0000j & cc11 &= 4.5193 \\ ca11 &= 0.0000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} AA12 &= 1.5209 + 0.7521j & AB12 &= 0.5198 + 0.2775j & aa12 &= 67.2242 \\ ab12 &= 0.0000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BB12 &= 1.5329 + 0.7162j & BC12 &= 0.5198 + 0.2775j & bb12 &= 67.2242 \\ bc12 &= 0.0000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CC12 &= 1.5209 + 0.7521j & CA12 &= 0.4924 + 0.2157j & cc12 &= 67.2242 \\ ca12 &= 0.0000 \end{aligned}$$

$$tr1 = 4.3956224 + 9.414246j$$

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
1	1	2	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	400
2	2	3	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	175
3	2	4	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	250
4	2	8	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	300
5	4	5	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	200
6	4	6	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	325
7	6	7	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	250
8	8	9	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	200
9	9	10	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	255
10	9	11	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	255
11	9	15	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	300
12	11	12	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	425
13	12	13	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	250
14	12	14	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	250
15	15	16	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	150

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
16	15	20	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	825
17	15	54	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	400
18	16	17	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	100
19	17	18	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	350
20	17	19	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	375
21	20	21	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	250
22	20	23	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	300
23	20	37	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	375
24	21	22	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	325
25	23	24	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	525
26	23	25	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	250
27	25	26	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	550
28	25	27	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	275
29	27	28	AA7	AB7	CA7	BB7	BC7	CC7	350
30	27	33	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	200
31	28	29	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	225
32	28	31	AA7	AB7	CA7	BB7	BC7	CC7	275
33	29	30	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	300
34	31	32	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	500
35	33	34	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	300
36	34	35	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	350
37	35	36	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	200
38	37	38	AA8	AB8	CA8	BB8	BC8	CC8	650
39	37	42	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	250
40	38	39	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	300
41	38	40	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	250
42	40	41	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	325

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
43	42	43	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	325
44	42	44	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	250
45	44	45	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	500
46	44	46	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	200
47	46	47	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	200
48	46	49	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	250
49	47	48	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	300
50	49	50	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	150
51	49	51	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	250
52	51	52	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	250
53	52	53	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	250
54	54	55	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	200
55	55	56	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	125
56	56	57	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	275
57	56	59	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	350
58	57	58	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	275
59	59	60	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	250
60	59	62	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	750
61	60	61	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	250
62	62	63	AA5	AB5	CA5	BB5	BC5	CC5	550
63	62	65	AA12	AB12	CA12	BB12	BC12	CC12	250
64	62	70	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	350
65	63	64	tr1	0	0	tr1	0	tr1	1
66	65	66	AA12	AB12	CA12	BB12	BC12	CC12	175
67	66	67	AA12	AB12	CA12	BB12	BC12	CC12	350
68	67	68	AA12	AB12	CA12	BB12	BC12	CC12	425
69	68	69	AA12	AB12	CA12	BB12	BC12	CC12	325

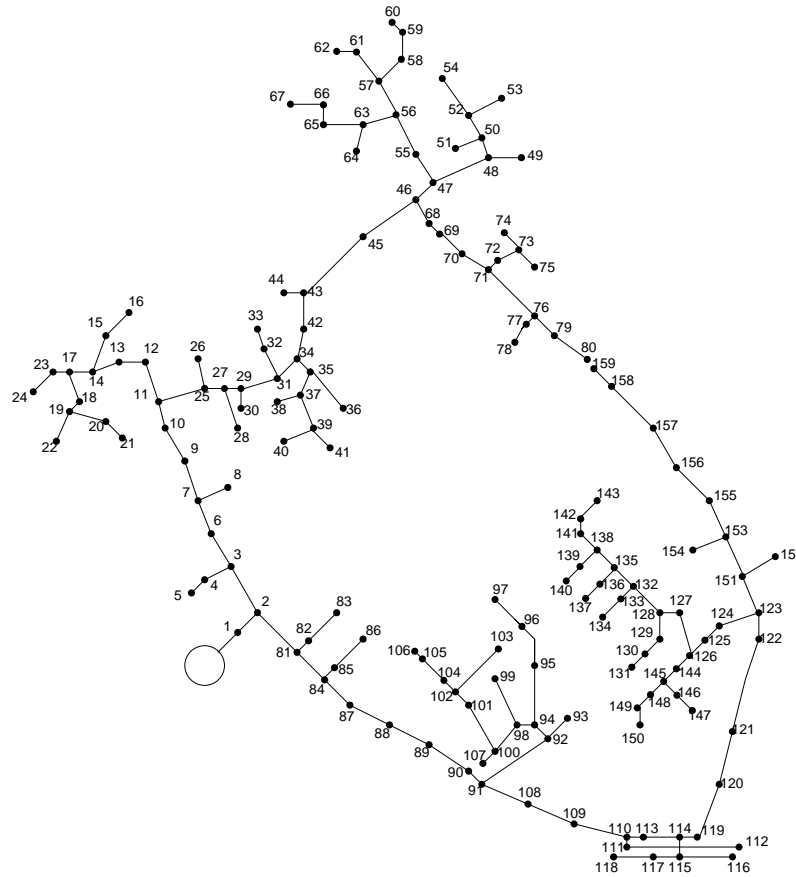
ตารางที่ ก.16 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
70	70	71	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	200
71	70	75	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	275
72	70	100	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	250
73	71	72	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	275
74	72	73	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	325
75	73	74	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	275
76	75	76	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	275
77	75	79	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	200
78	76	77	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	350
79	77	78	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	400
80	79	80	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	400
81	79	89	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	700
82	80	81	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	100
83	81	82	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	225
84	81	83	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	475
85	83	84	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	475
86	84	85	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	250
87	84	87	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	675
88	85	86	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	250
89	87	88	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	475
90	89	90	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	450
91	90	91	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	175
92	90	92	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	275
93	92	93	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	225
94	92	94	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	225
95	94	95	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	300
96	94	96	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	225

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 118 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (ft)
			Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
97	96	97	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	275
98	96	98	AA6	AB6	CA6	BB6	BC6	CC6	300
99	98	99	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	200
100	100	101	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	275
101	100	104	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	250
102	101	102	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	550
103	102	103	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	300
104	104	105	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	225
105	104	108	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	275
106	105	106	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	325
107	106	107	AA11	AB11	CA11	BB11	BC11	CC11	700
108	108	109	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	225
109	108	111	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	325
110	109	110	AA10	AB10	CA10	BB10	BC10	CC10	575
111	111	112	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	1000
112	111	113	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	450
113	113	114	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	300
114	114	115	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	575
115	114	116	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	125
116	116	117	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	525
117	117	118	AA9	AB9	CA9	BB9	BC9	CC9	325

ก.5 ระบบทดสอบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส



รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

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

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
9	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
12	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
13	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
15	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
16	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
18	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
20	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
22	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
23	41.778	20.234	41.778	20.234	41.778	20.234
24	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
30	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
32	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
36	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
38	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
40	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
41	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
42	-	-	-	-	7.958	3.854
44	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
45	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
49	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
51	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
52	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
54	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
58	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
59	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
60	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
61	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
64	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
66	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
69	6.631	3.212	6.631	3.212	6.631	3.212
70	-	-	-	-	11.937	5.781
74	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
75	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
78	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
79	-	-	-	-	11.937	5.781
83	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
86	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
87	-	-	-	-	7.958	3.854
90	-	-	7.958	3.854	-	-
96	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
101	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
105	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
108	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
109	-	-	-	-	7.958	3.854
117	-	-	-	-	7.958	3.854
119	-	-	-	-	7.958	3.854
120	-	-	-	-	7.958	3.854
121	-	-	-	-	7.958	3.854
122	7.958	3.854	-	-	-	-
123	-	-	-	-	-	-
124	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
125	-	-	-	-	11.937	5.781
134	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
137	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

Bus code	Phase A		Phase B		Phase C	
	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)	P(kW)	Q(kVar)
140	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
143	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
144	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
147	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
150	33.157	16.059	33.157	16.059	33.157	16.059
152	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
154	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
155	-	-	-	-	7.958	3.854
156	-	-	-	-	7.958	3.854
157	21.221	10.278	21.221	10.278	21.221	10.278
158	-	-	-	-	7.958	3.854

Self impedance Ω /kmMutual impedance Ω /kmLine Charging $\mu\text{S}/\text{km}$

AA1=0.225043+0.743377j

AB1=0.049333+0.408937j

aa1=2.806333

ab1=-0.578667

BB1=0.225038+0.743367j

BC1=0.049338+0.408946j

bb1=2.806234

bc1=-0.578567

CC1=0.225038+0.743367j

CA1=0.049333+0.408937j

cc1=2.806234

ca1=-0.578667

AA2=0.765347+1.171133j

AB2=0.098667+0.779793j

aa2=2.517033

ab2=-0.664867

BB2=0.765327+1.171122j

BC2=0.098686+0.779805j

bb2=2.516940

bc2=-0.664773

CC2=0.765327+1.171122j

CA2=0.098667+0.779793j

cc2=2.516940

ca2=-0.664867

AA3=0.689483+0.788790j

AB3=0.049333+0.408940j

aa3=0

ab3=0

BB3=0.689465+0.788779j BC3=0.049352+0.408951j bb3=0

bc3=0

CC3=0.689465+0.788779j CA3=0.049333+0.408940j cc3=0

ca3=0

AA4=0.327577+0.753580j AB4=0.061147+0.392110j aa4=2.806333

ab4=-0.578667

BB4=0.327569+0.753569j BC4=0.061154+0.392121j bb4=2.806234

bc4=-0.578567

CC4=0.327569+0.753569j CA4=0.061147+0.392110j cc4=2.806234

ca4=-0.578667

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
1	2	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1000
2	3	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3500
3	4	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0435
4	5	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0810
3	6	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1223
6	7	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3235
7	8	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0998
7	9	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4002
9	10	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1757
10	11	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3112
11	12	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.5143
12	13	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1605
13	14	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0626
14	15	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.2433
15	16	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.2638

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
14	17	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1460
17	18	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.1240
18	19	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0119
19	20	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.1860
20	21	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0012
19	22	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.4113
17	23	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0552
23	24	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.7672
11	25	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1681
25	26	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1896
25	27	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0902
27	28	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1810
27	29	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0289
29	30	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0365
29	31	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1272
31	32	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0541
32	33	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1334
31	34	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0705
34	35	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0232
35	36	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1077
35	37	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0459
37	38	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0551
37	39	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1394
39	40	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0625
39	41	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1419
34	42	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4292
42	43	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0855

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
43	44	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1018
43	45	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4807
45	46	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4116
46	47	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0270
47	48	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1737
48	49	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0483
48	50	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.1456
50	51	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0531
50	52	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0725
52	53	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0479
52	54	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.2214
47	55	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0526
55	56	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.5069
56	57	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0631
57	58	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.0840
58	59	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.1064
59	60	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.1017
57	61	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3292
61	62	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0021
56	63	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.2451
63	64	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0800
63	65	AA4	AB4	CA4	BB4	BC4	CC4	0.1288
65	66	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0427
66	67	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0010
46	68	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1902
68	69	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0888
69	70	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1245

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
70	71	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0483
71	72	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC3	0.0170
72	73	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC3	0.0563
73	74	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0708
73	75	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC2	0.0951
71	76	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3789
76	77	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0198
77	78	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0945
76	79	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1027
79	80	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.5026
2	81	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3622
81	82	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0083
82	83	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.1132
81	84	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0645
84	85	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0145
85	86	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.1115
84	87	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0431
87	88	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0822
88	89	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1297
89	90	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3542
90	91	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0596
91	92	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3402
92	93	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0608
92	94	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0299
94	95	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3353
95	96	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0497
96	97	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1720

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
94	98	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0277
98	99	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.2576
98	100	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1952
100	101	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.9244
101	102	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1445
102	103	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3990
102	104	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0103
104	105	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1530
105	106	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0030
100	107	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1204
91	108	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.9245
108	109	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.3587
109	110	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4395
110	111	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0301
111	112	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4066
110	113	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0292
113	114	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1608
114	115	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0405
115	116	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.2201
115	117	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0871
117	118	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1004
114	119	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0433
119	120	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4306
120	121	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.8999
121	122	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.4003
122	123	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1184
123	124	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.2714

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
124	125	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0318
125	126	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1247
126	127	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1359
127	128	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0285
128	129	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0337
129	130	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0084
130	131	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0619
128	132	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0678
132	133	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0118
133	134	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0587
132	135	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0834
135	136	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0134
136	137	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0758
135	138	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0535
138	139	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0126
138	141	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.2102
141	142	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0112
142	143	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.1197
126	144	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0395
144	145	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0337
145	146	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0124
146	147	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0814
145	148	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0132
148	149	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0150
149	150	AA3	AB3	CA3	BB3	BC3	CC3	0.0882
123	151	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1892
151	152	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC3	0.1016

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Impedance (Ω /mile)						length (km)
		Zaa	Zab	Zac	Zbb	Zbc	Zcc	
151	153	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1788
153	154	AA2	AB2	CA2	BB2	BC2	CC3	0.1009
153	155	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1854
155	156	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1935
156	157	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.2050
157	158	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.0325
158	159	AA1	AB1	CA1	BB1	BC1	CC1	0.1027

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
1	2	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1000
2	3	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3500
3	4	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0435
4	5	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0810
3	6	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1223
6	7	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3235
7	8	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0998
7	9	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4002
9	10	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1757
10	11	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3112
11	12	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.5143
12	13	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1605
13	14	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0626
14	15	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.2433
15	16	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.2638
14	17	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1460

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
17	18	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.1240
18	19	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0119
19	20	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.1860
20	21	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0012
19	22	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.4113
17	23	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0552
23	24	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.7672
11	25	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1681
25	26	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1896
25	27	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0902
27	28	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1810
27	29	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0289
29	30	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0365
29	31	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1272
31	32	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0541
32	33	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1334
31	34	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0705
34	35	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0232
35	36	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1077
35	37	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0459
37	38	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0551
37	39	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1394
39	40	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0625
39	41	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1419
34	42	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4292
42	43	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0855
43	44	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1018

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
43	45	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4807
45	46	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4116
46	47	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0270
47	48	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1737
48	49	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0483
48	50	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1456
50	51	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0531
50	52	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0725
52	53	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0479
52	54	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.2214
47	55	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0526
55	56	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.5069
56	57	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0631
57	58	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.0840
58	59	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.1064
59	60	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.1017
57	61	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3292
61	62	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0021
56	63	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.2451
63	64	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0800
63	65	aa4	ab4	ca4	bb4	bc4	cc4	0.1288
65	66	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0427
66	67	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0010
46	68	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1902
68	69	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0888
69	70	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1245
70	71	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0483

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
71	72	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0170
72	73	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0563
73	74	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0708
73	75	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.0951
71	76	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3789
76	77	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0198
77	78	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0945
76	79	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1027
79	80	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.5026
2	81	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3622
81	82	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0083
82	83	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.1132
81	84	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0645
84	85	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0145
85	86	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.1115
84	87	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0431
87	88	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0822
88	89	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1297
89	90	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3542
90	91	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0596
91	92	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3402
92	93	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0608
92	94	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0299
94	95	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3353
95	96	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0497
96	97	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1720
94	98	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0277

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
98	99	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.2576
98	100	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1952
100	101	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.9244
101	102	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1445
102	103	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3990
102	104	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0103
104	105	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1530
105	106	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0030
100	107	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1204
91	108	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.9245
108	109	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.3587
109	110	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4395
110	111	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0301
111	112	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4066
110	113	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0292
113	114	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1608
114	115	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0405
115	116	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.2201
115	117	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0871
117	118	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1004
114	119	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0433
119	120	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4306
120	121	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.8999
121	122	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.4003
122	123	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1184
123	124	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.2714
124	125	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0318

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μ S /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
125	126	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1247
126	127	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1359
127	128	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0285
128	129	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0337
129	130	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0084
130	131	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0619
128	132	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0678
132	133	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0118
133	134	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0587
132	135	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0834
135	136	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0134
136	137	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0758
135	138	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0535
138	139	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0126
138	141	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.2102
141	142	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0112
142	143	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.1197
126	144	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0395
144	145	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0337
145	146	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0124
146	147	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0814
145	148	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0132
148	149	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0150
149	150	aa3	ab3	ca3	bb3	bc3	cc3	0.0882
123	151	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1892
151	152	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1016
151	153	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1788

ตารางที่ ก.20 ข้อมูล line charging ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส (ต่อ)

From bus	To bus	Line charging (μS /mile)						length (km)
		Baa	Bab	Bac	Bbb	Bbc	Bcc	
153	154	aa2	ab2	ca2	bb2	bc2	cc2	0.1009
153	155	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1854
155	156	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1935
156	157	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.2050
157	158	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.0325
158	159	aa1	ab1	ca1	bb1	bc1	cc1	0.1027

ภาคผนวก ข

ผลทดสอบ

ผลทดสอบ

ผลทดสอบที่แสดงในภาพผนวก ข. เป็นผลทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แสดงผลทดสอบของบทที่ 3 และส่วนที่ 2 แสดงผลทดสอบของบทที่ 5 ในส่วนที่ 1 นั้น แสดงผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรของการทดสอบ เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่บัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และเกิดลัดวงจรที่บัสที่มีผลกระทบกับบัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ส่วนที่ 2 แสดงผลการหาบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดัน FVSI L_{min} และ LQP ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรของการทดสอบ เมื่อเกิดลัดวงจรแบบ 1 เฟสที่บัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และเกิดลัดวงจรที่บัสที่มีผลกระทบกับบัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และผลเฉลยแรงดันเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุ ผลทดสอบทั้งหมดสามารถดูได้ในแผ่นซีดี ดังหัวข้อต่อไป

ส่วนที่ 1 แสดงผลทดสอบของบทที่ 3

- 1) ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.1 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.2 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.4 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.5 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 60 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
- 2) กระแสลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรที่บัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.6 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.7 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 15 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
 - ตารางที่ ข.8 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 20 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ตารางที่ ข.49 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a
และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118a

ตารางที่ ข.50 กระแสลัดวงจรของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบ
ปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126c และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158c

ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับจำลองผล

 โปรแกรมสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส โหลดไม่สมดุล
 โดย นายทศพล รัตนนิมชัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2549

โปรแกรม Gauss.m

```
function [Ybus,Va,Vb,Vc,Voltage,Los2] = Gauss(name01,err); % โปรแกรมหลักรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ข้อมูลระบบทดสอบ
% และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ แรงดัน
% เฟส a b และ c ขนาดแรงดันและมุมเฟสทั้ง 3 เฟส และกำลัง
% งานสูญเสียทั้งหมดในสายป้อน
```

โปรแกรม newton_power.m

```
function [Ybus,Va,Vb,Vc,Voltage,Los2] = newton_power(name01,err_tol); % โปรแกรมหลักรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ข้อมูลระบบทดสอบ
% และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ แรงดัน
% เฟส a b และ c ขนาดแรงดันและมุมเฟสทั้ง 3 เฟส และกำลัง
% งานสูญเสียทั้งหมดในสายป้อน
```

% โปรแกรมย่อยในโปรแกรม newton_power.m

```
function [Ybus] = Ybus_3P(linedata,gendata,Zbase,Bc,Zc); % โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 5 ค่า จากข้อมูลระบบทดสอบ ได้แก่
% ข้อมูลสายส่ง ข้อมูลแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ค่าฐาน
% แอดมิตแดนซ์ต่อไมล์ และอิมพีแดนซ์ต่อไมล์
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์
```

```
function [J1] = Jacob1_power(magV,angV,magY,angY,lengV,m); % โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 1
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 6 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด และตัวนับ
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 1
```

```
function [J2] = Jacob2_power(magV,angV,magY,angY,lengV,m); % โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 2
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 6 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด และตัวนับ
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 2
```

```
function [J3]=Jacob3_power(magV,angV,magY,angY,lengV,m) % โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 3
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 6 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด และตัวนับ
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 3

function [J4]=Jacob4_power(magV,angV,magY,angY,lengV,m): % โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 4
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 6 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด และตัวนับ
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 4
```

โปรแกรมสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส โหลดไม่สมดุล
เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

โดย นายทศพล รัตนนิมิตต์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2549

โปรแกรม Gauss_AddDVR.m

```
function [Ybus,Va1,Vb1,Vc1,Voltage,Los2] = Gauss_AddDVR(name01,err);
% โปรแกรมหลักรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ข้อมูลระบบทดสอบ
% และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ แรงดัน
% เฟส a b และ c ขนาดแรงดันและมุมเฟสทั้ง 3 เฟส และกำลัง
% งานสูญเสียทั้งหมดในสายป้อน
```

โปรแกรม newton_powerAddDVR.m

```
function [Ybus,Va1,Vb1,Vc1,Voltage,Los2] = newton_powerAddDVR(name01,err_tol);
% โปรแกรมหลักรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ข้อมูลระบบทดสอบ
% และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ แรงดัน
% เฟส a b และ c ขนาดแรงดันและมุมเฟสทั้ง 3 เฟส และกำลัง
% งานสูญเสียทั้งหมดในสายป้อน
```

% โปรแกรมย่อยในโปรแกรม newton_powerAddDVR.m

```
function [Ybus] = Ybus_3PAddDVR(linedata,gendata,Zbase,Bc,Zc,dvr);
% โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 6 ค่า จากข้อมูลระบบทดสอบ ได้แก่
% ข้อมูลสายส่ง ข้อมูลแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ค่าฐาน
% แอดมิตแดนซ์ต่อไมล์ อิมพีแดนซ์ต่อไมล์ และข้อมูลของ DVR
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์
```

```
function [J1] = Jacob1_powerAddDVR(magV,angV,magY,angY,lengV,m,Ic,sendBus,reciveBus,VA);
% โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 1
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 10 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด ตัวนับ
% กระแสที่จ่ายโดย DVR บัสส่ง บัสรับ และข้อมูลบัส
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 1
```

```
function [J2] = Jacob2_powerAddDVR(magV,angV,magY,angY,lengV,m,Ic,sendBus,reciveBus,VA);
% โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 2
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 10 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
```

```

% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด ตัวนับ
% กระแสที่จ่ายโดย DVR บัสส่ง บัสรับ และข้อมูลบัส
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 2

```

```

function [J3] = Jacob3_powerAddDVR(magV,angV,magY,angY,lengV,m,Ic,sendBus,reciveBus,VA);
% โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 3
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 10 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด ตัวนับ
% กระแสที่จ่ายโดย DVR บัสส่ง บัสรับ และข้อมูลบัส
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 3

```

```

function [J4] = Jacob4_powerAddDVR(magV,angV,magY,angY,lengV,m,Ic,sendBus,reciveBus,VA);
% โปรแกรมสำหรับคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน 4
% โปรแกรมย่อยรับอินพุต 10 ค่า ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของ
% แรงดันในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ขนาดและมุมเฟสของ
% เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ จำนวนบัสทั้งหมด ตัวนับ
% กระแสที่จ่ายโดย DVR บัสส่ง บัสรับ และข้อมูลบัส
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เมตริกซ์จาโคเบียน 4

```

โปรแกรมสำหรับคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดัน FVSI L_{mm} และ LQP

โดย นายทศพล รัตน์นิยมชัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2549

โปรแกรม FVSI.m

[FVSI_m,L_{Mm},L_{QPm},V_{BUSm},Q_{limit},Voltage]=FVSI(name01,err_tol);

% โปรแกรมหลักรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ข้อมูลระบบทดสอบ

% และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้

% เอาส์พุตของโปรแกรม คือ ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน FVSI

% L_{mm} และ LQP แรงดันบัสน้อยที่สุด กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่

% โหลดมากที่สุด และขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดในระบบจำหน่าย 22-kV ด้วยการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28) ณ โรงแรมเฟิร์ด วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต 20-21 ตุลาคม 2548 หน้า 257-260.
2. “Modeling of a DVR for Newton-Raphson Power Flows”. WSEAS Trans. Systems. Issue 5. Volume 5. pp.913-918, May 2006.
3. “Steady-State Power Flow Modeling for a Dynamic Voltage Restorer”. Proc. 5th WSEAS Int. Conf. Application of Electrical Engineering (AEE'06). pp.6-11, 12-14 March 2006.

ประวัติผู้เขียน

นายทศพล รัตน์นิยมชัย เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่อำเภออุทุมพร จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอุทุมพร จังหวัดสุพรรณบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงาน ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 รวมทั้งปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะศึกษา:

1. กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบจำหน่าย 22-kV ด้วยการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
2. Modeling of a DVR for Newton-Raphson Power Flows.
3. Steady-State Power Flow Modeling for a Dynamic Voltage Restorer.