



รายงานการวิจัย

**การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วย DVR สำหรับระบบจำหน่าย
กำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์
(Reactive power compensation with DVR for 22-kV
power distribution systems)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัฒย์ กุลวรรวนิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายทศพล รัตน์นิยมชัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2550

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ และขอขอบคุณ คุณเกษม ขอบุณกลาง วิศวกรไฟฟ้า แผนกควบคุมการจ่ายไฟ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบจำหน่าย 22 kV ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ เมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม หน้าหลักของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต คือ ช่วยป้องกันกลุ่มโหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือบัสที่อ่อนแอที่สุดในทางระบบไฟฟ้ากำลังบัสที่อ่อนแอที่สุด คือ บัสที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดอย่างต่อเนื่องมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการทำงานในสภาวะคงตัว สามารถทำได้โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ วิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ไม่สมดุล โดยพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใหม่ ได้แก่ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวิธีการเกาส์-ไซเคลและนิวตัน-ราฟสัน เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัว แบบจำลองการฉีดกระแส การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดจากการประเมินด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดัน ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม เมื่อหาตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตได้แล้ว ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมดำเนินการ โดยการแก้ปัญหา ค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ โดยใช้การโปรแกรมลำดับควอดราติก จากผลการทดสอบ จะพบว่าการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพ ความเชื่อถือได้ และเสถียรภาพแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้ทันสมัย สำหรับระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบต้องอาศัยการประสานสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ซึ่งได้อธิบายไว้ในงานวิจัยนี้

ABSTRACT

This research proposes study and development of reactive power compensation with DVR for 22-kV power distribution systems. 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 research, 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 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 research. 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.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความนำ.....	3
2.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	3
2.3 สรุป.....	14
บทที่ 3 การวิเคราะห์ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	
3.1 ความนำ.....	15
3.2 แบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	15
3.3 การทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด.....	26
3.4 ผลการทดสอบ.....	27
3.5 สรุป.....	37
บทที่ 4 การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต	
4.1 ความนำ.....	38
4.2 การระบุตำแหน่งบัสอ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า.....	38
4.3 การกำหนดขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม.....	43
4.4 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	46
4.5 ผลการทดสอบ.....	47
4.6 สรุป.....	65

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ.....	ก-1
ภาคผนวก ข ผลผลิตจากงานวิจัย.....	ข-1
- การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28) ณ โรงแรมเฟิร์ล วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต วันที่ 20-21 ตุลาคม 2548.....	ข-2
- The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE' 06), Prague, Czech Republic, 12-14 March 2006.....	ข-7
- The WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 5, Vol 5, March 2006.....	ข-11
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย.....	ค-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4	28
ตารางที่ 3.2 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส	28
ตารางที่ 3.3 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15	30
ตารางที่ 3.4 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส	30
ตารางที่ 3.5 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20	32
ตารางที่ 3.6 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส	32
ตารางที่ 3.7 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79	34
ตารางที่ 3.8 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส	34
ตารางที่ 3.9 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60	36
ตารางที่ 3.10 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	36
ตารางที่ 4.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส	48
ตารางที่ 4.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส	49
ตารางที่ 4.3 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส	50
ตารางที่ 4.4 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส	50
ตารางที่ 4.5 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส	52
ตารางที่ 4.6 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส b และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.7 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บิต เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต 12 เฟส <i>a</i> และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	53
ตารางที่ 4.8 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บิต เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต 30 เฟส <i>b</i> และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	54
ตารางที่ 4.9 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บิต เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต 118 เฟส <i>a</i> และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	55
ตารางที่ 4.10 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บิต เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต 158 เฟส <i>c</i> และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ.....	55
ตารางที่ 4.11 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บิต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต <i>4b</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บิต <i>10b</i>	56
ตารางที่ 4.12 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บิต.....	56
ตารางที่ 4.13 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บิต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต <i>14a</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บิต <i>12a</i>	58
ตารางที่ 4.14 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บิต.....	58
ตารางที่ 4.15 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บิต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต <i>18b</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บิต <i>30b</i>	60
ตารางที่ 4.16 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บิต.....	60
ตารางที่ 4.17 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บิต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต <i>79a</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บิต <i>118a</i>	61
ตารางที่ 4.18 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บิต.....	61
ตารางที่ 4.19 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บิต ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บิต <i>126c</i> และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บิต <i>158c</i>	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.20 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวพันฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบ ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส.....	63

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่อกับบัสอื่น.....	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล.....	7
รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	14
รูปที่ 3.1 แขนงระบบไฟฟ้าบัส k และ บัส j เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	15
รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด.....	27
รูปที่ 3.3 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 2 และ 4.....	29
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจรการชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	29
รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 14 และ 15.....	30
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	31
รูปที่ 3.7 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 19 และ 20.....	32
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจรการชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	33
รูปที่ 3.9 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 75 และ 79.....	34
รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	35
รูปที่ 3.11 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจร ที่บัส 70 และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 60.....	36

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	37
รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส.....	39
รูปที่ 4.2 แผนภาพของระบบส่งจ่ายแบบเส้นเดียว.....	41
รูปที่ 4.3 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว.....	43
รูปที่ 4.4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า.....	45
รูปที่ 4.5 แผนภาพการทำงานของการทำงานหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	45
รูปที่ 4.6 ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ไต ๆ.....	46
รูปที่ 4.7 ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าซัสเซปแดนซ์คงที่ B_c	47
รูปที่ 4.8 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 10 เฟส b	57
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	57
รูปที่ 4.10 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 12 เฟส a	58
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	59
รูปที่ 4.12 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 30 เฟส b	60
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	60
รูปที่ 4.14 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 118 เฟส a	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส <i>a</i> ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	62
รูปที่ 4.16 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจร ที่บัส 126 เฟส <i>c</i> และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 158 เฟส <i>c</i>	64
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส <i>c</i> ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต.....	64
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 10 บัส.....	ก-1
รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 25 บัส.....	ก-1
รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส.....	ก-2
รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	ก-2
รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 บัส.....	ก-3

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศไทยเกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ภายใต้การแปรรูปกิจการไฟฟ้า (privatization of electric utilities) ส่งผลให้เกิดตลาดซื้อขายไฟแบบเสรีหรือแบบกึ่งเสรีขึ้น การทำงานของระบบไฟฟ้าจะเป็นแบบเปิดที่มีการแข่งขัน โดยเน้นไปที่การลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มผลกำไรจากการขายไฟ เมื่อระบบผลิตและการขายไฟให้กลุ่มโพลคเกิดการแข่งขันกันอย่างอิสระภายใต้เงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ ย่อมทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาเสถียรภาพแรงดัน ไฟฟ้า เนื่องจากจุดทำงานที่ให้ต้นทุนการผลิตต่ำสุดหรือผลกำไรจากการขายไฟสูงสุด อาจจะไม่สอดคล้องกับควมมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟเป็นหลัก ซึ่งอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปัจจุบันปัญหาที่สำคัญของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า คือ ปัญหาแรงดันตก (voltage drop) ที่ปลายทางหรือจุด โหลด อันเนื่องมาจากความยาวของสายป้อน ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ นอกจากนี้ เมื่อมีการใช้โหลดเพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลให้แรงดันในระบบลดต่ำลง ถ้าขนาดแรงดันลดลงจนถึงจุดพังทลาย (collapsing point) จะทำให้แรงดันในระบบขาดเสถียรภาพ เกิดไฟดับตามมาได้หรือในกรณีที่เลวร้ายที่สุด จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความล่มสลายทั้งระบบ ปัจจุบันได้มีการแสวงหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อรักษาระดับแรงดันคร่อมโหลดให้อาจจะเป็นคงที่หรือเกือบคงที่ในทุกสภาวะการจ่ายโหลด โดยการติดตั้งตัวชดเชยเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า อาจจะเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor bank) หม้อแปลงชนิดเปลี่ยนค่าแท็ปได้ (tap-changing transformer) ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิต (static var compensator) หรือตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Restorer: DVR) เป็นต้น DVR ได้ถูกพัฒนาขึ้น อาจจะถูกกล่าวได้ว่างานวิจัยทางการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่เน้นไปที่ DVR [1] DVR เป็นตัวชดเชยอนุกรม (series compensator) ที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ช่วยป้องกันโพลคจากแรงดันตก และทำหน้าที่ฟื้นฟูแรงดันโพลคให้คงที่ เมื่อเกิดแรงดันตกหรือแรงดันเกินชั่วขณะ (voltage sag and voltage swells) [2],[3],[4] ถึงแม้ว่า การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบจำหน่ายสามารถทำได้หลายวิธี งานวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้อุปกรณ์สำหรับระบบจำหน่ายตัวใหม่ที่มีชื่อว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม ปัญหาที่สำคัญสำหรับการใช้อุปกรณ์ชดเชยดังกล่าว ได้แก่ การเลือกตำแหน่งติดตั้งและการกำหนดพิกัดของอุปกรณ์ที่เหมาะสม (optimal location and sizing) งานวิจัยนี้จะนำเสนอการค้นหาลำดับตำแหน่งติดตั้ง DVR ที่เหมาะสมโดยใช้การประเมินดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว

(fast voltage stability index: FVSI) [5] บัสดีกี่ตามที่ทำให้ค่าดัชนีดังกล่าวเท่ากับหรือใกล้เคียง 1.0 และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดต่ำที่สุด หมายถึง การมีโอกาสหรือความเสี่ยงสูงต่อการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า (voltage collapse) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดไฟดับทั้งระบบ (system blackout) DVR จะถูกติดตั้งโดยต่ออนุกรมเข้ากับสายป้อนจำหน่ายเส้นที่ได้รับผลประโยชน์ว่าบัสที่ต่อปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด ผลการดำเนินงานดังกล่าว จะช่วยให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าทำงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย มีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า และช่วยลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้มีค่าน้อยที่สุด
2. เพื่อรักษาระดับแรงดันที่โหลด เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งของ DVR ที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. จำลองผลการทำงานของ DVR ในสภาวะคงตัว เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
2. ศึกษาวิเคราะห์และจำลองผล โดยเน้นไปที่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. พัฒนาการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV
2. พัฒนาแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
3. พัฒนาการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
4. ปรับปรุงการทำงานร่วมกันระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่เมื่อเกิดภาวะแรงดันตก
2. ช่วยทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV มีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้สูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

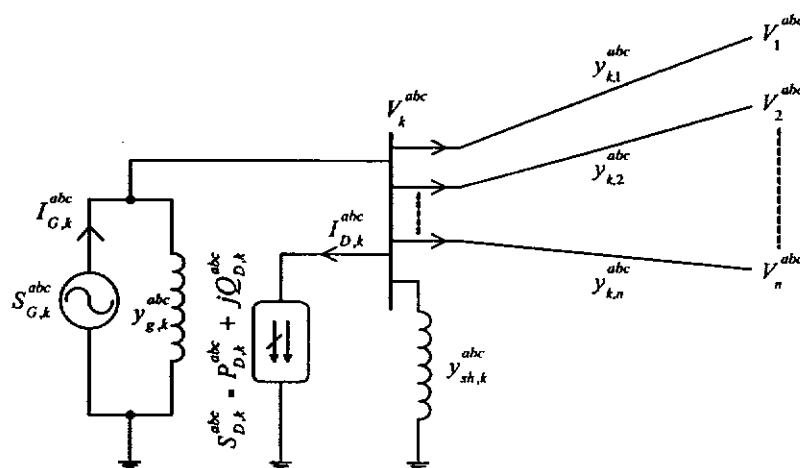
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีของระบบส่งจ่าย จะถือว่าระบบส่งจ่ายมีความสมดุล มากจึงสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยใช้ระบบต่อเฟสได้ ผลที่ได้จากการคำนวณจะถือว่า มีค่าเท่ากันทุกเฟส ซึ่งแตกต่างจากระบบสายป้อนที่ความต้านทานสายส่งจะมีผลของความต้านทาน ระหว่างเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากระบบสายป้อนบางช่วงอาจมีการเดินสายไปแค่สองเฟสหรือ อาจเพียงเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งปริมาณโหลดที่ใช้ในแต่ละเฟส อาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผล ให้กระแสที่ไหลในสายแต่ละเฟสไม่สมดุล แรงดันในแต่ละเฟสของบัสเดียวกันมีค่าไม่เท่ากันทำให้ ไม่สามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ด้วยระบบต่อเฟส ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้การคำนวณ การไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสถูกนำมาใช้แทนระบบต่อเฟส [6]

2.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคล

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัสหนึ่งบัส มี ขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัส อ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อบัสสลัค (slack bus)



รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ โหนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โหนด 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

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

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-ไซเคล 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) นั่นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุงแรงดันด้วยวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลดังนี้

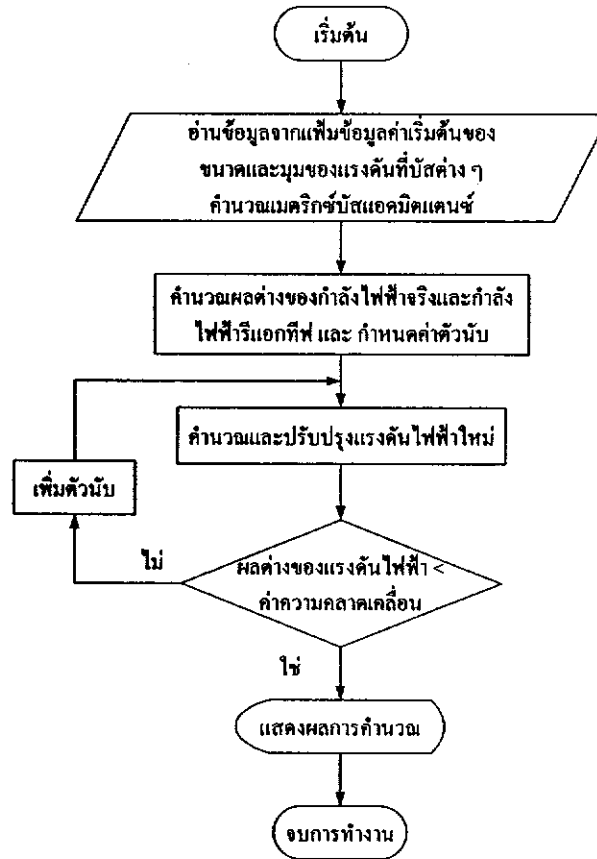
$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{\left(V_k^{abc^{(h)}}\right)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} \right\} \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.10) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีกำหนดค่าบัสเล็ก เพื่อให้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบซึ่งที่บัสนี้ มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วย โดยปกติแล้วกำหนดให้เฟส a มีมุมเฟสเป็น 0 องศา เฟส b มีมุมเฟสเป็น -120 องศา และเฟส c มีมุมเฟสเป็น 120 องศา สำหรับบัสเล็ก และไม่ต้องคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาค่าตอบเพียง $n-1$ เท่านั้น

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเคล

- 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 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

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

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

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

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

แอดมิตแตนซ์ 3 เฟส

จากสมการที่ (2.11) เมื่อพิจารณาในรูปพีทักเชิงขั้ว 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 อย่างไรก็ตามในกระบวนการวนรอบต้องดำเนินการกำหนดค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดันบัสซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเริ่มต้นโดยการกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นทุกบัสมีค่าเป็น $1.0 \angle 0^\circ$ p.u. สำหรับเฟส a , $1.0 \angle -120^\circ$ สำหรับเฟส b และ $1.0 \angle 120^\circ$ สำหรับเฟส c หรืออาจจะใช้ผลเฉลยแรงดันของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ทำงาน ณ จุดทำงานก่อนหน้าที่จะพิจารณา ถ้าค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่ใช่ผลเฉลยแรงดันของระบบจะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นศูนย์ เกิดความคลาดเคลื่อนของผลรวมกำลังงาน ไฟฟ้าที่บัสขึ้นมา เรียกว่า ความไม่สอดคล้องของกำลังไฟฟ้า (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 $k+1$ ใดๆ 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 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-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 & J3 & \vdots & \vdots & \vdots & J4 & \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 (2.20)$$

ถ้าให้ บัสที่ m เป็นบัสสแล็ก จากสมการที่ (2.20) หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ได้ดังนี้

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

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

จากสมการที่ (2.16) จะได้

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

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (2.21)$$

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

$$= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (2.22)$$

เมตริกซ์ย่อย $J2^{abc}$: จากสมการที่ (2.16) จะได้

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

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

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (2.23)

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

$$= |V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)$$

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (2.24)

เมตริกซ์ย่อย $J3^{abc}$: จากสมการที่ (2.17) จะได้

$$J3_{kk}^{pp} = \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_k^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_k^p}$$

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

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (2.25)

$$J3_{ki}^{p\phi} = \frac{\partial Q_k^p}{\partial \delta_i^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)}{\partial \delta_i^p}$$

$$= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi)$$

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (2.26)

เมตริกซ์ย่อย $J4^{abc}$: จากสมการที่ (2.17) จะได้

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

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

ถ้า $i = k, p \neq \phi$ (2.27)

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

$$= -|V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (2.28)$$

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

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 $\Delta \delta^{abc}$

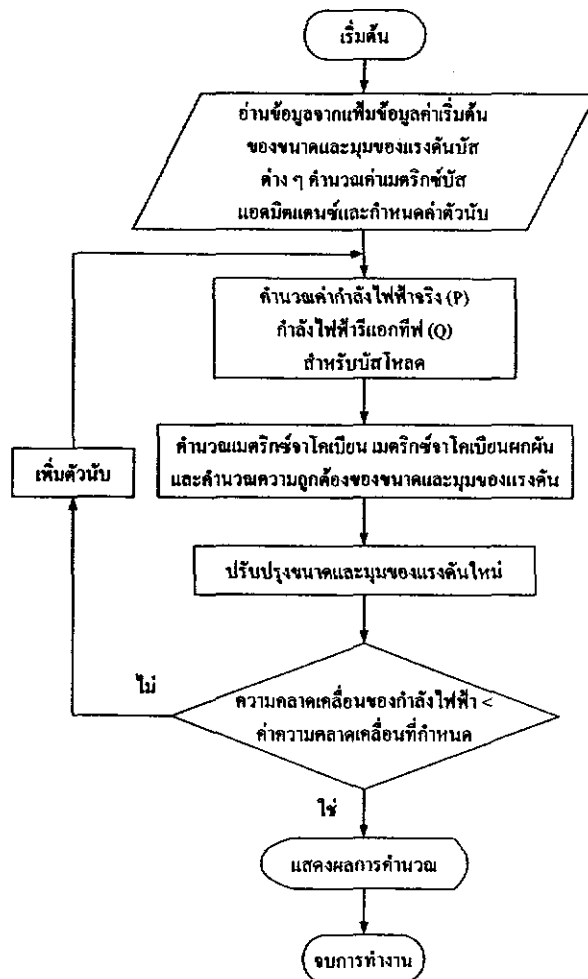
และ $\Delta |V^{abc}|$ ทุกบัส

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 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.3 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดลและนิวตัน-ราฟสันซึ่งเป็นการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบสามเฟสไม่สมดุล ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยการพิจารณาตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสถานะคงตัวที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การวิเคราะห์ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

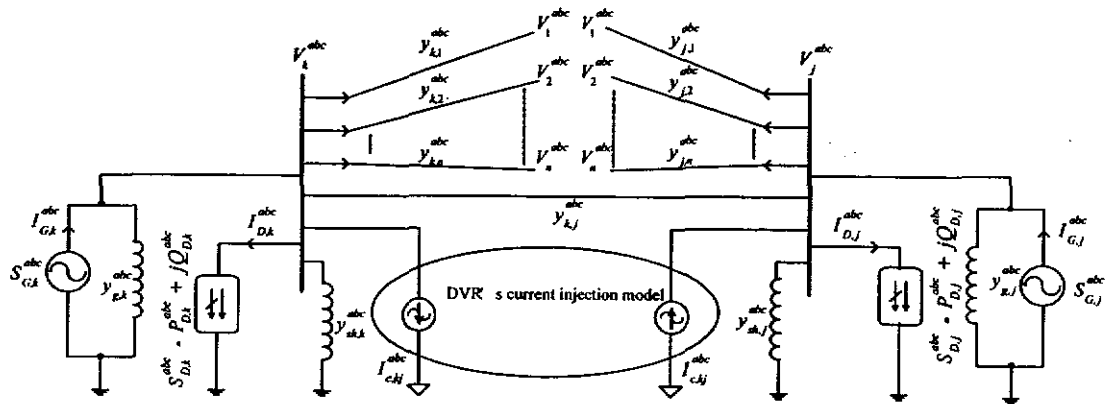
3.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะต้องปรับปรุงสมการการคำนวณ เพื่อให้ได้ผลเฉลยแรงดันที่ได้รับการชดเชยจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ลำดับต่อมากล่าวถึง การควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับระบบไฟฟ้าทำให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กำลังงานสูญเสียจะมีค่าลดลง เนื่องจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตช่วยยกระดับแรงดันบัสให้สูงขึ้นได้ แม้ในขณะที่เกิดลัดวงจร ขอมให้ระบบทำงานต่อไปได้ เรียกการทำงานนี้ว่า การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉิน โดยทั่วไปการจ่ายโหลดภายใต้เงื่อนไขนี้มีกำลังงานสูญเสียมากกว่าการจ่ายโหลดในสภาวะปกติหลายเท่าด้วยเทคโนโลยีของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต การจ่ายโหลดในสภาวะฉุกเฉินสามารถทำได้ด้วยกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด แต่ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม

3.2 แบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

ในหัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการหาผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล และวิธีนิวตัน-ราฟสัน [7] ดังนี้

1 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบไฟฟ้าบัส k และ บัส j เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้การวิเคราะห์แบบโนด จะได้สมการสมดุลกระแสที่บัส k ใด ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} & y_{k,1}^{abc} (V_k^{abc} - V_1^{abc}) + y_{k,2}^{abc} (V_k^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{k,n}^{abc} (V_k^{abc} - V_n^{abc}) + I_{c,kj}^{abc} \\ & = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} \end{aligned} \quad (3.1ก)$$

สำหรับบัส j จะได้

$$\begin{aligned} & y_{j,1}^{abc} (V_j^{abc} - V_1^{abc}) + y_{j,2}^{abc} (V_j^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{j,n}^{abc} (V_j^{abc} - V_n^{abc}) + I_{c,kj}^{abc} \\ & = I_{G,j}^{abc} - I_{D,j}^{abc} \end{aligned} \quad (3.1ข)$$

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

$$I_k^{abc} = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n I_{k,i}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3.2)$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ว่า

$$\left(\frac{S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3.3)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส k ใด ๆ เป็น

$$(S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc})^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3.4)$$

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

$I_{c,kj}^{abc}$ 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

$$(S_{sch,k}^{abc})^* = (S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc})^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n y_{k,i}^{abc} (V_k^{abc} - V_i^{abc}) \quad (3.5)$$

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

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

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = Y_{k,k}^{abc} V_k^{abc} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3.6)$$

$$\frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3.7)$$

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

จากสมการที่ (3.6) จะได้สมการปรับปรุงแรงดันที่บัส k ใด ๆ ดังนี้

$$V_k^{abc} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3.8)$$

ด้วยกระบวนการวนรอบเมื่อต้องการคำนวณค่าเฟสเซอร์แรงดันปรับปรุ้งที่บัส k ใด ๆ ในรอบการคำนวณที่ h ใด ๆ จะได้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc^{(h)}})^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3.9)$$

สมการที่ (3.9) เป็นการปรับปรุ้งตามวิธีการวนรอบแบบเกาส์ ค่าเนนการปรับปรุ้งแรงดันไฟฟ้าจากบัสที่ 1 จนถึงบัสที่ n (ไม่รวมบัสอ้างอิง) โดยเรียงลำดับการปรับปรุ้งจาก 1 ไปถึง n ตามลำดับ ดังนั้นในการคำนวณในรอบที่ $h+1$ ใด ๆ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุ้งแรงดันที่บัส k จะพบว่าแรงดันบัสที่ 1 ถึงบัสที่ $k-1$ ได้รับการปรับปรุ้งเรียบร้อยแล้ว วิธีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่ได้รับการปรับปรุ้งของบัสที่ 1 ถึง $k-1$ (ใช้ค่าการคำนวณรอบที่ $h+1$) ในการคำนวณ ในขณะที่แรงดันบัสของบัสที่ k ถึง n ยังคงเป็นค่าที่ได้จากรอบการคำนวณก่อนหน้า (h) นั้นเอง ดังนั้นจะได้สมการการปรับปรุ้งแรงดันด้วยวิธีการวนรอบแบบเกาส์-ไซเคลสำหรับบัส k ดังนี้

$$V_k^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{k,k}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc^{(h)}})^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=k+1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3.10ก)$$

สำหรับบัส j จะได้

$$V_j^{abc^{(h+1)}} = \frac{1}{Y_{j,j}^{abc}} \left\{ \frac{P_{sch,j}^{abc} - jQ_{sch,j}^{abc}}{(V_j^{abc^{(h)}})^*} - \sum_{i=1}^{j-1} Y_{j,i}^{abc} V_i^{abc^{(h+1)}} - \sum_{i=j+1}^n Y_{j,i}^{abc} V_i^{abc^{(h)}} - I_{c,kj}^{abc} \right\} \quad (3.10ข)$$

สมการที่ (3.10ก) และ (3.10ข) เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนี้ จะต้องมีกำหนดบัสสแล็ค เพื่อใช้เป็นเฟสอ้างอิงของมุมเฟสแรงดันในระบบ ซึ่งที่บัสนี้มีการควบคุมขนาดแรงดันบัสด้วย โดยปกติแล้วกำหนดให้เฟส α มีมุมเฟสเป็น 0 องศา

เฟส b มีมุมเฟสเป็น -120 องศา และเฟส c มีมุมเฟสเป็น 120 องศา สำหรับบัสขนาดเล็ก และ ไม่ต้องทำการคำนวณหาแรงดันที่บัสนี้ ทำให้จำนวนบัสที่ต้องคำนวณลดลง 1 บัส ดังนั้น สำหรับระบบ n บัส จะมีสมการแรงดันที่ต้องหาคำตอบเพียง $n-1$ บัส เท่านั้น

2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\text{จากสมการที่ (3.7) ได้แก่ } \frac{P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc}}{(V_k^{abc})^*} - I_{c,kj}^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc}$$

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

$$(S_{sch,k}^{abc})^* - I_{c,kj}^{abc} (V_k^{abc})^* = (V_k^{abc})^* \sum_{i=1}^n Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \quad (3.11)$$

สมการที่ (3.11) เป็นสมการของกำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส k ใด ๆ และเป็นสมการเริ่มต้นในการในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V_k^{abc} &= |V_k^{abc}| \angle \delta_k^{abc} = |V_k^{abc}| e^{j\delta_k^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } k \\ V_i^{abc} &= |V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc} = |V_i^{abc}| e^{j\delta_i^{abc}} \quad \text{คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่บัส } i \\ I_{c,kj}^{abc} &= |I_{c,kj}^{abc}| \angle \alpha_{c,kj}^{abc} = |I_{c,kj}^{abc}| e^{j\alpha_{c,kj}^{abc}} \quad \text{คือ กระแสไฟฟ้า 3 เฟสของ DVR จากบัส } k \text{ ไปยังบัส } j \\ Y_{k,i}^{abc} &= |Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_k^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| e^{j\theta_k^{abc}} \quad \text{คือ สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของเมตริกซ์บัส} \\ &\quad \text{แอดมิตแตนซ์ 3 เฟส} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.11) เมื่อพิจารณาในรูปพีทักเชิงขั้ว จะได้ว่า

$$(S_{sch,k}^{abc})^* = \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \angle (\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \angle (\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \quad (3.12)$$

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

$$\begin{aligned} & (P_{G,k}^{abc} - P_{D,k}^{abc}) - j(Q_{G,k}^{abc} - Q_{D,k}^{abc}) \\ &= \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \angle (\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \angle (\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

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

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

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

โดยที่
$$P_{cal,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \cos(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) + |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \cos(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \quad (3.14)$$

$$Q_{cal,k}^{abc} = -\sum_{i=1}^n |V_k^{abc} V_i^{abc} Y_{k,i}^{abc}| \sin(\theta_{k,i}^{abc} - \delta_k^{abc} + \delta_i^{abc}) - |I_{c,kj}^{abc} V_k^{abc}| \sin(\alpha_{c,kj}^{abc} - \delta_k^{abc}) \quad (3.15)$$

หรือ

บัสดัชนี k :
$$P_{cal,k}^{abc} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3.16ก)$$

$$Q_{cal,k}^{abc} = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3.16ข)$$

บัสดัชนี j :
$$P_{cal,j}^{abc} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_j^p V_i^\phi Y_{j,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{j,i}^{p\phi} - \delta_j^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_j^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_j^p) \quad (3.17ก)$$

$$Q_{cal,j}^{abc} = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_j^p V_i^\phi Y_{j,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{j,i}^{p\phi} - \delta_j^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_j^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_j^p) \quad (3.17ข)$$

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

ใช้วิธีการวนรอบของนิเวศน์-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

$$\Delta P_k^{abc} = \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial P_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (3.18)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta Q_k^{abc} = \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial Q_{cal,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (3.19)$$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวิธีนิวตัน-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{array}{c} \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{array} = \begin{array}{c} \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial P_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \\ \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial P_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \\ \vdots \quad \vdots \quad J1 \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad J2 \quad \vdots \\ \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial P_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \\ \hline \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_1^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \\ \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_2^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \\ \vdots \quad \vdots \quad J3 \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad J4 \quad \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_1^{abc}} \quad \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_2^{abc}} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial \delta_n^{abc}} \quad \left| \quad \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_1^{abc}|} \quad \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_2^{abc}|} \quad \dots \quad \frac{\partial Q_n^{abc}}{\partial |V_n^{abc}|} \right. \end{array} \begin{array}{c} \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{array} \quad (3.20)$$

ถ้าให้ บัสที่ m เป็นบัสสมเล็ก จากสมการที่ 3.20 หลักที่ $k = m$ และแถวที่ $k = m$ จะถูกกำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน ได้ดังนี้

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

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

จากสมการที่ (3.16ก) จะได้

$$\begin{aligned}
 J1_{kk}^{pp} &= \frac{\partial P_k^{pp}}{\partial \delta_k^p} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_k^p} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \\
 &\quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.21ก)
 \end{aligned}$$

บัส k: $J1_{kk}^{pp(DVR)} = J1_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.21ข)

บัส j: $J1_{jj}^{pp(DVR)} = J1_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.21ค)

$$\begin{aligned}
 J1_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial P_k^{pp}}{\partial \delta_i^\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_i^\phi} \\
 &= -|V_k^p V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ย่อย $J2^{abc}$: จากสมการที่ (3.16ก) จะได้

$$\begin{aligned}
 J2_{kk}^{pp} &= \frac{\partial P_k^{pp}}{\partial |V_k^p|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_k^p|} \\
 &= 2|V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \cos(\theta_{k,k}^{pp}) + \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^\phi Y_{k,j}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \\
 &\quad + |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \\
 &\quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.23ก)
 \end{aligned}$$

บัส k: $J2_{kk}^{pp(DVR)} = J2_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.23ข)

บ้สจ: $J2_{jj}^{pp(DVR)} = J2_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.23ก)

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

$$= |V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^{\phi}) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.24)$$

เมตริกซ์ย่อย $J3^{abc}$: จากสมการที่ (3.16ข) จะได้

$$J3_{kk}^{pp} = \frac{\partial Q_k^{pp}}{\partial \delta_k^p} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^{\phi}) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_k^p}$$

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

ถ้า $i=k, p \neq \phi$ (3.25ก)

บ้สค: $J3_{kk}^{pp(DVR)} = J3_{kk}^{pp} + |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.25ข)

บ้สจ: $J3_{jj}^{pp(DVR)} = J3_{jj}^{pp} - |I_{c,kj}^p V_k^p| \cos(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)$ (3.25ค)

$$J3_{ki}^{p\phi} = \frac{\partial Q_k^{pp}}{\partial \delta_i^{\phi}} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^{\phi}) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial \delta_i^{\phi}}$$

$$= -\sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^{\phi}) \quad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.26)$$

เมตริกซ์ย่อย $J4^{abc}$: จากสมการที่ (3.16ข) จะได้

$$\begin{aligned}
J4_{kk}^{pp} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_k^p|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_k^p|} \\
&= 2 |V_k^p Y_{k,k}^{pp}| \sin(\theta_{k,k}^{pp}) - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \\
&\quad - |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \\
&\qquad\qquad\qquad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.27ก)
\end{aligned}$$

$$\text{บัส k: } J4_{kk}^{pp(DVR)} = J4_{kk}^{pp} - |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3.27ข)$$

$$\text{บัส j: } J4_{jj}^{pp(DVR)} = J4_{jj}^{pp} + |I_{c,kj}^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p) \quad (3.27ค)$$

$$\begin{aligned}
J4_{ki}^{p\phi} &= \frac{\partial Q_k^p}{\partial |V_i^\phi|} = \frac{-\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |V_k^p V_i^{\phi} Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) - |I_{c,kj}^p V_k^p| \sin(\alpha_{c,kj}^p - \delta_k^p)}{\partial |V_i^\phi|} \\
&= -|V_k^p Y_{k,i}^{p\phi}| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} - \delta_k^p + \delta_i^\phi) \qquad \text{ถ้า } i=k, p \neq \phi \quad (3.28)
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.20) สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ $h+1$ โดยการคำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน ผกผัน 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 $\max(|P_{mis,max}^{abc}|, |Q_{mis,max}^{abc}|) < \epsilon_{tol}$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรก และครั้งต่อไป

- 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

3.3 การทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

หัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคอย่างง่ายเพื่อควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันโหลดให้มีค่าคงที่ หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตลอดย่านการทำงานของโหลดที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และช่วยทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้น เทคนิคการควบคุมนี้จะช่วยลดกำลังงานสูญเสียในระบบให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะวิเคราะห์สมรรถนะในสภาวะคงตัว โดยเน้นที่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ทั้งก่อนและหลังติดตั้ง ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและขนาดแรงดัน โหลด ผลจากการทดสอบระบบตัวอย่างทำให้ได้สมการสำหรับควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อให้มีกำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุด ในขณะที่ยังคงรักษาระดับแรงดัน โหลดให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

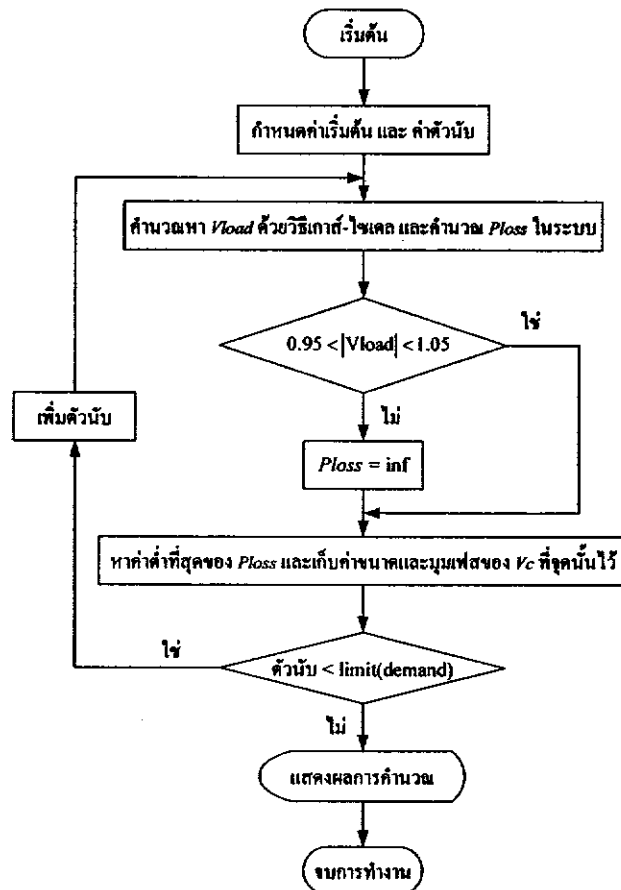
การรักษาระดับแรงดัน โหลดให้คงที่ทำได้โดยการควบคุมเฟสเซอร์ V_c ทั้งขนาดและมุมเฟส โดยการแก้สมการเพื่อค้นหาผลเฉลยแรงดัน ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีวนรอบเกาส์-ไซเคล สามารถแสดงการจำลองผลได้ตามแผนภาพรูปที่ 3.2 ภายใต้เงื่อนไขของการทำงาน ดังสมการที่ (3.29)

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

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

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

(3.29)



รูปที่ 3.2 แผนภาพทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

3.4 ผลการทดสอบ

ผลทดสอบการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีวิธีนิวตัน-ราฟสัน เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร ทดสอบกับระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล การทดสอบจะจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้า โดยเกิดลัดวงจร 3 เฟสสมดุลผ่าน Z_f ลงกราวด์ที่บัสที่กำหนด เมื่อเกิดลัดวงจรในระบบจะทำให้ระบบไฟฟ้า

มีแรงดันบัลดลง และจะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เพื่อยกระดับแรงดันที่ตกเนื่องมาจากการลัดวงจร สามารถแสดงผลทดสอบ ได้ดังนี้

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

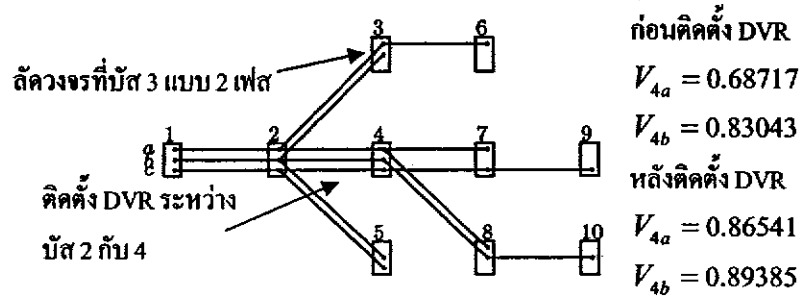
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 10 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสดทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 28.956 kW ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 3 แบบ 2 เฟสสมมูล ได้แก่ เฟส a และ b ผ่าน $Z_f = 0.020 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 3 ทั้ง 2 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a เป็น 0.55606 p.u. และเฟส b เป็น 0.70414 p.u. แรงดันที่บัส 4 ในเฟส a เป็น 0.68717 p.u. และเฟส b เป็น 0.83043 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1992.500 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4 ทั้ง 2 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากผลทดสอบ จะพบว่าบัส 4 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น 0.86541 p.u. และเฟส b เป็น 0.89385 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1449.100 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 3 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.3 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสดก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 4

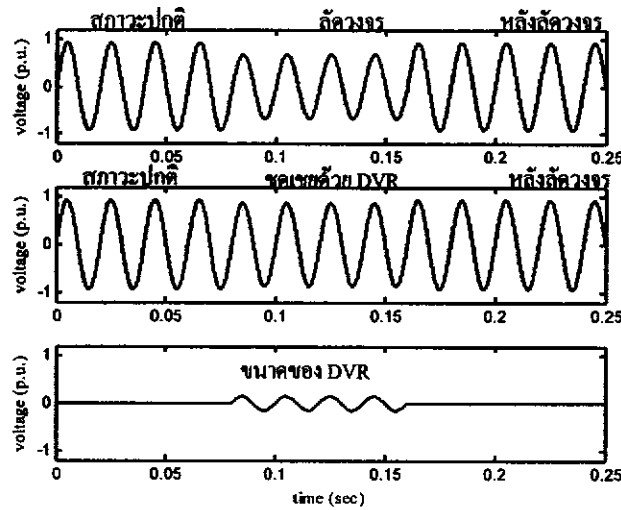
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 4
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	28.956	1992.500	1449.100

ตารางที่ 3.2 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 3.3 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 3 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 2 และ 4



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 25 บัส สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 37.919 kW ดังแสดงในตารางที่ 3.3 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 9 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.012 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 9 ทั้ง 3 เฟส มีขนาดลดลงในเฟส a 0.61070 p.u. เฟส b เป็น 0.61936 p.u. และเฟส c เป็น 0.65582 p.u. แรงดันที่บัส 15 ในเฟส a เป็น 0.69264 p.u. เฟส b เป็น 0.69954 p.u. และเฟส c เป็น 0.72365 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5246.200 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จะพบว่าแรงดันที่บัส 15 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหลดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มียค่าสูงขึ้น บัส 15 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น

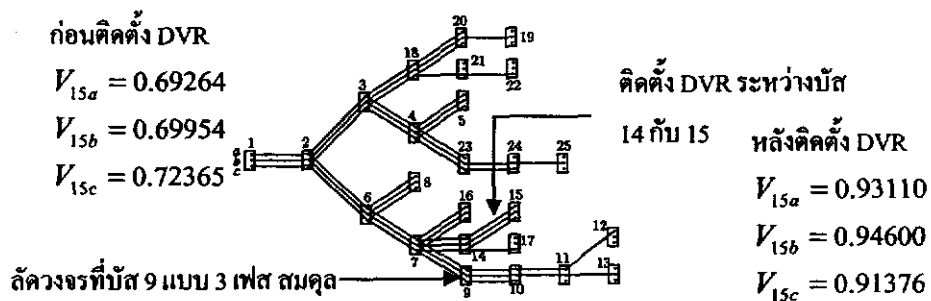
0.93110 p.u. เฟส *b* เป็น 0.94600 p.u. และเฟส *c* เป็น 0.91376 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 3495.700 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 9 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.5 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 15 เฟส *a* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 15

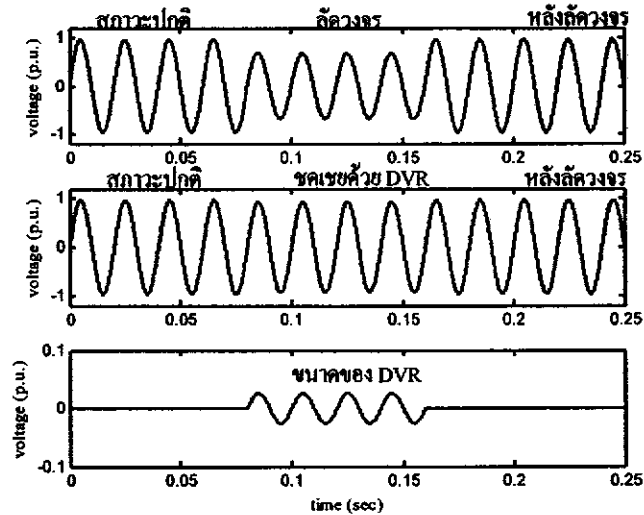
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 15
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	37.919	5246.200	3495.700

ตารางที่ 3.4 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส

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



รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 9 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 14 และ 15



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 15 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

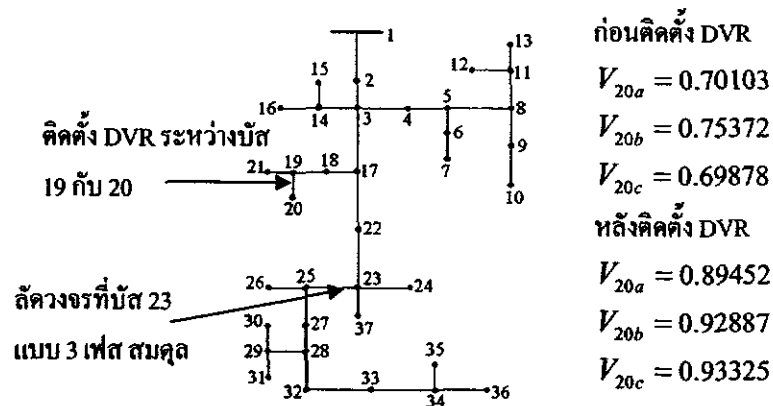
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 37 บัส สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบ ไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 135.300 kW ดังแสดงในตารางที่ 3.5 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 23 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.006 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 23 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a เป็น 0.54372 p.u. เฟส b เป็น 0.60362 p.u. และเฟส c เป็น 0.55586 p.u. แรงดันที่บัส 20 ในเฟส a เป็น 0.70103 p.u. เฟส b เป็น 0.75372 p.u. และเฟส c เป็น 0.69878 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11544.000 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.5 จะพบว่าแรงดันที่บัส 20 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 20 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น 0.89452 p.u. เฟส b เป็น 0.92887 p.u. และเฟส c เป็น 0.93325 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 9456.800 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนของที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 23 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 3.7 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.5 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 20

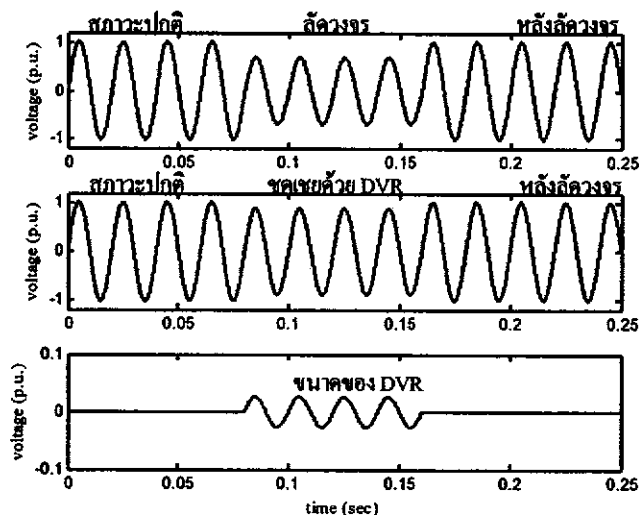
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 20
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	135.300	11544.000	9456.800

ตารางที่ 3.6 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส

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



รูปที่ 3.7 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 23 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 19 และ 20



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 20 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

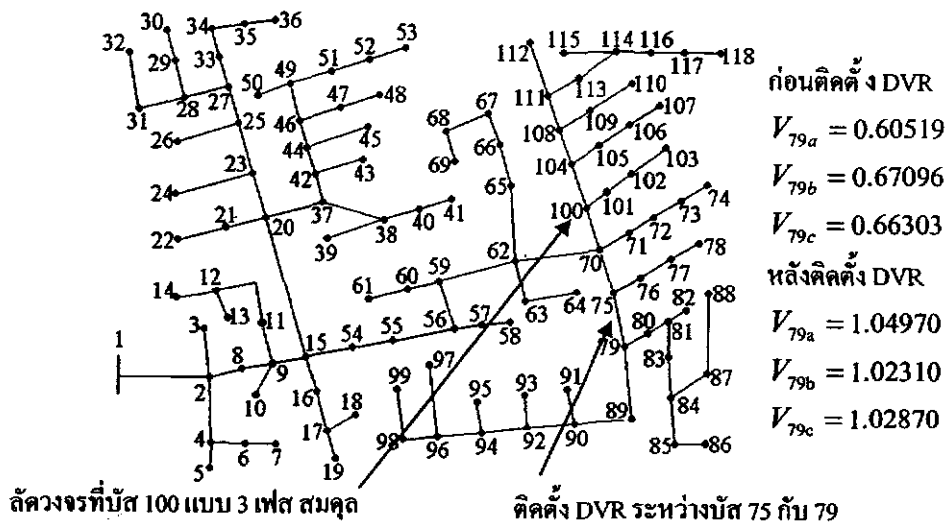
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 118 บัส สำหรับการทำงานในสถานะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 275.320 kW ดังแสดงในตารางที่ 3.7 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 100 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.011 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 100 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a เป็น 0.59630 p.u. เฟส b เป็น 0.65372 p.u. และเฟส c เป็น 0.65363 p.u. แรงดันที่บัส 79 ในเฟส a เป็น 0.60519 p.u. เฟส b เป็น 0.67096 p.u. และเฟส c เป็น 0.66303 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5197.500 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.8 จะพบว่าแรงดันที่บัส 79 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 79 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น 1.04970 p.u. เฟส b เป็น 1.02310 p.u. และเฟส c เป็น 1.02870 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1508.700 kW ส่วนที่บัส 23 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น แต่กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 3.9 แสดงระบบทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร และติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.7 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 79

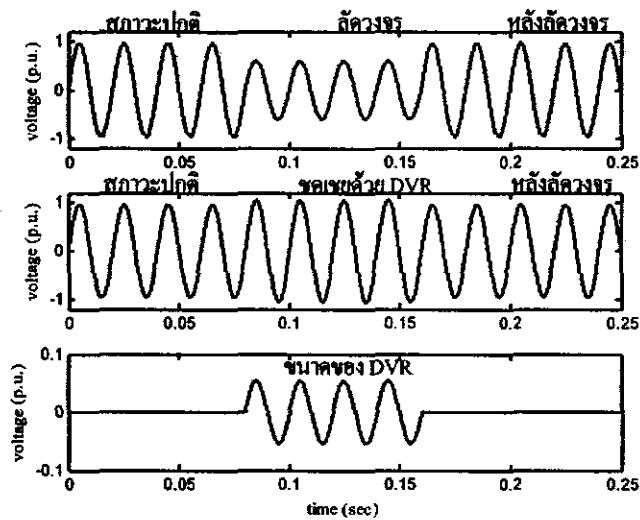
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 79
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	275.320	5197.500	1508.700

ตารางที่ 3.8 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 118 บัส

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



รูปที่ 3.9 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 100 และหลังติดตั้ง DVR ระหว่างบัส 75 และ 79



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 79 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า พบว่าแรงดันบัสทุกบัสมีขนาดค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับค่าฐานคือ 1.00 p.u. จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 2985.200 kW ดังแสดงในตารางที่ 3.9 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 70 แบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน $Z_f = 0.002 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 70 ทั้ง 3 เฟสมีขนาดลดลงในเฟส a เป็น 0.67469 p.u. เฟส b เป็น 0.67529 p.u. และเฟส c เป็น 0.67135 p.u. แรงดันที่บัส 60 ในเฟส a เป็น 0.68464 p.u. เฟส b เป็น 0.68508 p.u. และเฟส c เป็น 0.68134 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 31512.000 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60 ทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.10 จะพบว่าแรงดันที่บัส 60 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 60 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น 0.97720 p.u. เฟส b เป็น 0.89374 p.u. และเฟส c เป็น 0.82254 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 12095.000 kW ส่วนที่บัส 70 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน

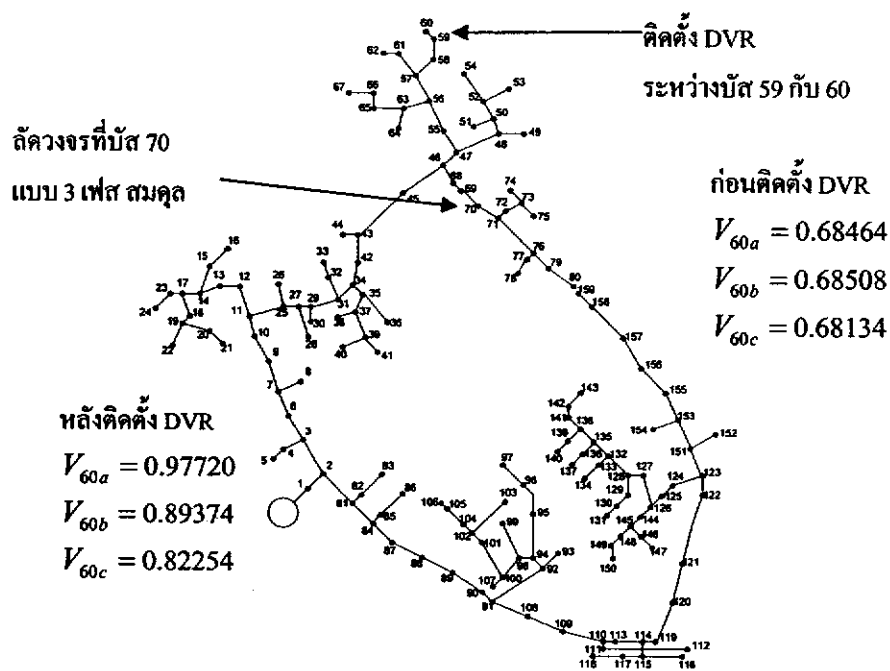
รูปที่ 3.11 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 60 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.9 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบ
ปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 60

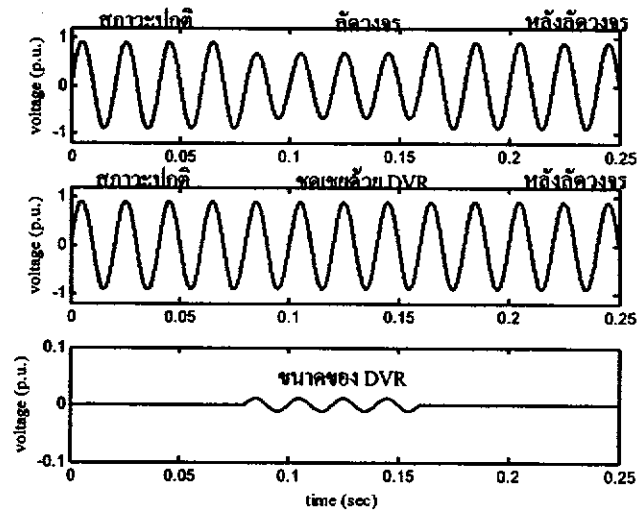
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 60
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)	2985.200	31512.000	12095.000

ตารางที่ 3.10 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 3.11 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 70 และหลัง
ติดตั้ง DVR ที่บัส 60



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 6 ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยวิธีเกาส์-ไซเคลและวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบ กำหนดให้เกิดลัดวงจรที่บัสใกล้เคียงกับบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จำลองสถานการณ์การลัดวงจรที่บัสแบบ 3 เฟสสมมูลผ่าน Z_f ลงกราวด์ ทำให้เกิดแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลัง และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต่อมาดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบไฟฟ้าลดลง หลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้ว ทำให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้ ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยการค้นหาตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การค้นหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม และการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4.1 ความนำ

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเหมือนกับปัญหาการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์ตัวอื่น เช่น ตัวเก็บประจุ SVC หรือ รีแอกเตอร์ เป็นต้น การดำเนินการวางแผนชดเชยระบบ โดยการ ไฟฟ้าฮีดหลักของประสิทธิภาพโดยรวมและประหยัด ดังนั้น การกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมและขนาดที่พอเหมาะ ช่วยให้โหลดส่วนใหญ่ของระบบได้รับการป้องกันและเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบในภาพรวม ปัญหาการกำหนดขนาดที่เหมาะสมเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดรูปแบบหนึ่ง การแก้ปัญหาที่มีกระบวนการที่แน่นอนและอัลกอริทึมที่ชัดเจน เช่น การโปรแกรมลำดับควอดราติก (SQP) เป็นต้น ในส่วนของการหาตำแหน่งติดตั้งเป็นประเด็นที่ละเอียดอ่อนและต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง งานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าตำแหน่งติดตั้งจากตำแหน่งของบัส โหลดที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพมากที่สุด ในรูปของการประเมินบัสอ่อนแอ (weak bus evaluation) ด้วยการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม สามารถระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดได้ (weakest bus) ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พิจารณาได้ดังนี้

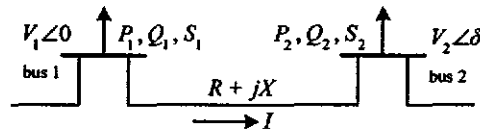
4.2 การระบุตำแหน่งบัสอ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

การเพิ่ม โหลดรีแอกทีฟอย่างช้า ๆ ที่จุดโหลดใด ๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้นลดต่ำลง เมื่อการเพิ่มขึ้นของโหลดรีแอกทีฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันบัสจะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อย่างไรก็ตามการลดลงของแรงดันมีค่าจำกัด เมื่อเกินค่าแรงดันพังทลายจะส่งผลให้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าไม่ลู่เข้า ขอบเขตสามารถวัดได้จากผลเฉลยค่าฐานมากที่สุดของจุดที่ลู่เข้าหาคำตอบในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่าโหลดมากที่สุดของแต่ละบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลเฉลยที่เป็นไปได้ของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ก่อนที่ระบบไฟฟ้ากำลังจะถึงจุดการพังทลายของแรงดัน (voltage collapse) สามารถหาค่าโหลดมากที่สุดได้จากลักษณะพื้นฐาน 2 ข้อ คือ เงื่อนไขบังคับสมการและอสมการ งานวิจัยส่วนใหญ่ยอมรับว่าค่าการจ่ายโหลดสูงสุดขึ้นอยู่กับ การลู่เข้าของผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้า โดยการตรวจสอบความเป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ของเมตริกซ์จาโคเบียน ทำให้ประเมินค่าการจ่ายโหลดสูงสุดที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันสามารถทำได้โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของดัชนีเสถียรภาพของสายจำหน่าย เพื่อระบุสายจำหน่ายที่มีความเครียดสูงที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง คำนี้นำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันบัสต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสนั้น ๆ อัตราส่วนดังกล่าว นำเสนอความไวของแรงดันบัสต่อการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งสัมพันธ์กับเสถียรภาพและการ

ทั้งหลายของแรงดันในระบบ บัสที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์สูง จะเรียกว่า บัสที่อ่อนแอ (weak bus) งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 3 ตัว คือ ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง FVSI L_{mn} และ LQP ดังนี้

1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว FVSI

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันแบบเร็ว (Fast Voltage Stability Index: FVSI) สามารถคำนวณได้จากสมการกระแสที่ไหลผ่านสายส่งระหว่างบัส 2 บัส ดังรูปที่ 4.1 (Musirin, and Abdul Rahman, 2002)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

V_1, V_2 คือ แรงดันที่บัสส่งและบัสรับ

P_1, Q_1 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสส่ง

P_2, Q_2 คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสรับ

S_1, S_2 คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของบัสส่งและบัสรับ

δ คือ $\delta_1 - \delta_2$ ความแตกต่างของมุมแรงดันระหว่างบัสส่งและบัสรับ

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

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \quad (4.1)$$

เมื่อ R เป็นความต้านทานของสายส่ง และ X เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่ง กำลังไฟฟ้าปรากฏที่บัสรับมีค่าเท่ากับ

$$S_2 = V_2 I^* \quad (4.2)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (4.3)$$

สมการที่ (4.1) และ (4.3) เท่ากันดังนี้

$$(V_1 V_2 \angle -\delta) - (V_2^2 \angle 0) = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (4.4)$$

แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R P_2 + X Q_2 \quad (4.5)$$

และ

$$-V_1 V_2 \sin \delta = X P_2 - R Q_2 \quad (4.6)$$

จัดรูปสมการที่ (4.6) เพื่อหาค่า P_2 จะได้

$$P_2 = \frac{R Q_2}{X} - \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (4.7)$$

แทนสมการที่ (4.7) ในสมการที่ (4.5) จะได้

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 V_2 + \left(\frac{R^2}{X} + X \right) Q_2 = 0 \quad (4.8)$$

คำตอบของสมการที่ (4.8) คือ

$$V_2 = \frac{\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2}}{2} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.9) คำตอบของ V_2 จะเป็นค่าจริงก็ต่อเมื่อพจน์ในรากที่สองจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

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

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (4.10)$$

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

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (4.11)$$

โดยที่ Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

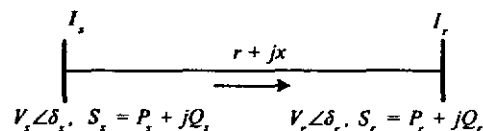
Q_j คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสรับ

V_i คือ แรงดันที่บัสส่ง

ค่าของดัชนี FVSI จะมีขอบเขตที่ 1.00 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความไม่มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ถ้า FVSI มีค่าเป็น 1.00 แรงดันที่บัสรับปลายสายส่งจะลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้ากำลังตามมา

2 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง L_{ms}

เกณฑ์การพิจารณาเสถียรภาพแรงดันอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว การต่อเชื่อมระบบจะถูกลดเป็นแบบเส้นเดียวเพื่อใช้ประเมินเสถียรภาพทั้งหมดของระบบ พิจารณาระบบไฟฟ้าแบบเส้นเดียวในรูปที่ 4.2 (Moghavemmi, and Omar, 1998)



รูปที่ 4.2 แผนภาพของระบบส่งจ่ายแบบเส้นเดียว

จากแนวความคิดของการไหลกำลังไฟฟ้าในสายส่งและการวิเคราะห์สายส่งแบบพาย การไหลกำลังไฟฟ้าที่ปลายส่งและปลายรับคำนวณได้ดังนี้

$$S_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \angle\theta \quad (4.12)$$

$$S_s = \frac{|V_s|^2}{Z} \angle\theta - \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle(\theta + \delta_s - \delta_r) \quad (4.13)$$

จากสมการกำลังไฟฟ้าปรากฏ สามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ดังนี้

$$P_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \cos(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \cos\theta \quad (4.14)$$

$$Q_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \sin(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \sin\theta \quad (4.15)$$

แทนค่า $\delta_s - \delta_r = \delta$ ในสมการที่ (4.15) และแก้สมการหา V_r จะได้

$$V_r = \frac{V_s \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2 - 4ZQ_r \sin\theta}}{2\sin\theta} \quad (4.16)$$

จาก $Z\sin\theta = x$ จะได้

$$V_r = \frac{V_s \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2 - 4xQ_r}}{2\sin\theta} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) จะได้ค่าจริงของ V_r ในรูปของ Q_r ก็ต่อเมื่อผลเฉลยของสมการในรากที่สองมีค่าเป็นจำนวนจริง จากเงื่อนไขนี้สามารถนำมาใช้กำหนดเกณฑ์เสถียรภาพแรงดันของระบบได้ ดังนี้

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

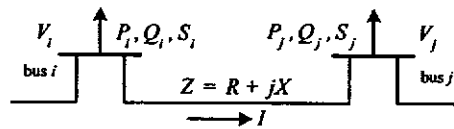
หรือ

$$\frac{4xQ_r}{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2} = L_{mn} \leq 1.00 \quad (4.18)$$

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

3 ดัชนีเสถียรภาพสายส่ง LQP

ดัชนี LQP ถูกพัฒนาโดย (Mohamed, Jasmon, and Yusoff, 1989) ซึ่งใช้แนวคิดแบบเดียวกันกับดัชนี FVSI และ L_{mn} สูตรการคำนวณเริ่มต้นจากสมการกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเส้นเดียว

LQP สามารถหาได้จาก

$$LQP = 4 \left(\frac{X}{V_i^2} \right) \left(\frac{X}{V_i^2} P_i^2 + Q_j \right) \quad (4.19)$$

โดยที่ X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

Q_j คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลไปสู่บัสรับ

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัสส่ง

V_i คือ แรงดันที่บัสส่ง

LQP จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1.00 เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

4.3 การกำหนดขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม

การค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการติดตั้งที่บัสที่อ่อนแอที่สุดจากการคำนวณดัชนีเสถียรภาพแรงดันในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด ดังนี้

1 การหาค่าแห่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดอย่างต่อเนื่อง ทำให้แรงดันที่บัสโหลดลดต่ำเช่นเดียวกันและดัชนีเสถียรภาพแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อดัชนีเสถียรภาพแรงดันตัวใดตัวหนึ่งมีค่ามากกว่า 1.00 แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟถึงขอบเขตเสถียรภาพแรงดัน ค่าสุดท้ายของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก่อนที่มีดัชนีเสถียรภาพแรงดันจะมากกว่า 1.00 จะเป็นค่าที่มากที่สุดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสโหลดนั้น ๆ บัสโหลดใดที่มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จุดพักหลายของแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุด บัสนั้นจะเป็นบัสโหลดที่อ่อนแอที่สุดเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก

2 การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

การหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดำเนินการ โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายป้อนร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้แก่ ขนาดแรงดัน มุมเฟส และ ค่ารีแอกแตนซ์สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (4.20)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & P_{loss} \\ \text{subject to} \quad & V_c^{\min} \leq V_c \leq V_c^{\max} \quad \text{p.u.} \\ & \phi_c^{\min} \leq \phi_c \leq \phi_c^{\max} \quad \text{degree} \\ & X_c^{\min} \leq X_c \leq X_c^{\max} \quad \Omega \end{aligned} \quad (4.20)$$

เมื่อ P_{loss} คือ ฟังก์ชันกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายป้อน

เมื่อกำลังงานสูญเสียในสายป้อนคำนวณได้จากค่าแรงดันบัสที่ได้จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า สามารถนำมาหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และคำนวณกำลังงานสูญเสียในสายส่ง พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างบัส i และ j ในรูปที่ 4.4 ใช้วิธีวิเคราะห์แบบโนดจะได้กระแสไฟฟ้าจากบัส $i \rightarrow j$ และจาก $j \rightarrow i$ ดังสมการที่ (4.21) และ (4.22) ตามลำดับ

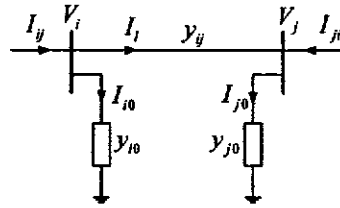
$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (4.21)$$

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (4.22)$$

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

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (4.23)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \tag{4.24}$$

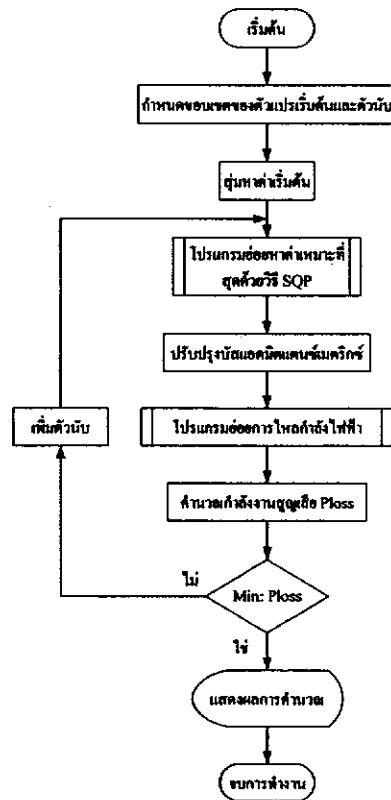


รูปที่ 4.4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายสำหรับคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า

กำลังงานสูญเสียในสายส่งจากบัส i ไป j หาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งดังสมการที่ (4.25)

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \tag{4.25}$$

กำลังงานสูญเสียในสายป้อนคือส่วนจริงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งในสมการที่ (4.25) สามารถแสดงแผนภาพการทำงานของการทำงานของการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพการทำงานของการทำงานของการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

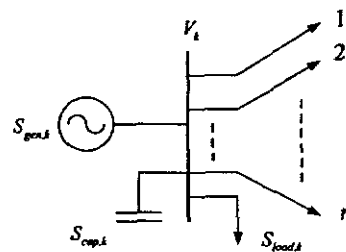
4.4 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีขนาดใหญ่และซับซ้อน การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการไฟฟ้าทุกแห่ง โดยเฉพาะการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การแก้ปัญหาแรงดันตกปลายสายส่วนใหญ่ใช้การติดตั้งตัวเก็บประจุที่โนดต่าง ๆ กระจายในสายป้อน ดังนั้น การวางแผนการทำงานตลอดจนการหาค่าแห่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงผลจากอุปกรณ์ชดเชยดังกล่าวด้วย งานวิจัยนี้จะพิจารณาสถานการณ์ที่ระบบจำหน่ายมีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่กระจายกันตามตำแหน่งต่าง ๆ การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุเป็นการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสอง จุดประสงค์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุ คือ ลดขนาดโหลดที่ต้องการมากที่สุดตามเงื่อนไขของพระราชบัญญัติของการไฟฟ้า ลดกำลังงานสูญเสีย และลดฮาร์มอนิก เป็นต้น ตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนาน โดยจะติดตั้งที่บัสหรือจุดโหนด การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar) ระดับของแรงดัน ชนิดของโหลด ธรรมชาติของโหลด ระดับฮาร์มอนิก ภูมิอากาศ ความปลอดภัยของระบบ และราคาของตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ตัวเก็บประจุจะช่วยให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความปลอดภัยจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า การพิจารณาตัวเก็บประจุ สามารถจำลองได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power model) และแบบจำลองซัสเซปแทนซ์ (susceptance model) มีรายละเอียดดังนี้

1 แบบจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

พิจารณาจากรูปที่ 4.6 ตัวเก็บประจุที่ถูกติดตั้งสามารถนำมาคำนวณ โดยการคิดแปลงสมการกำลังไฟฟ้าไม่สอดคล้อง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส (scheduled power) ดังนี้



รูปที่ 4.6 ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส k ไต ๆ

$$S_{sch,k} = S_{gen,k} - S_{load,k} + S_{cap,k} \quad (4.26)$$

โดยที่ $S_{sch,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดที่บัส k

$S_{gen,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัส k

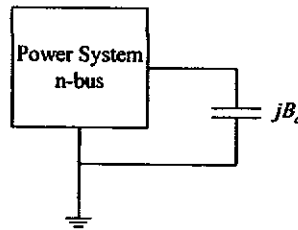
$S_{load,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดที่บัส k

$S_{cap,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุ

2 แบบจำลองชัสมหัพแดนซ์

จากรูปที่ 4.7 ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชัสมหัพแดนซ์คงที่ B_c ส่งผลให้เมตริกซ์บัสแอดมิตแดนซ์ต้องถูกดัดแปลง ในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมของ โหนดที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ ดังนี้

$$[Y_{bus}]_{k,k}^{(new)} = [Y_{bus}]_{k,k}^{(old)} + j[B_c] \quad (4.27)$$



รูปที่ 4.7 ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าชัสมหัพแดนซ์คงที่ B_c

4.5 ผลการทดสอบ

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

ส่วนที่ 1 การค้นหาค่าตำแหน่งบัสที่อ่อนแอและดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI, L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 10 บัส แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ โหลด ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า

1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.1 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 10 เฟส *b* ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 9 เฟส *b* มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 3.1950 p.u. FVSI เท่ากับ 0.7759 สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.9978 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 10 บัส และดัชนี LQP เท่ากับ 0.3857 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.6742 p.u.

ตารางที่ 4.1 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 10 บัส

ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	FVSI	L_{mn}	LQP	แรงดันบัส
1	10	<i>b</i>	3.1950	0.7759	0.9978	0.3857	0.6742
2	6	<i>a</i>	3.2500	0.8447	0.9971	0.4414	0.6066
3	9	<i>c</i>	3.4350	0.8123	0.9979	0.4117	0.6828
4	4	<i>a</i>	3.5300	0.7240	0.7651	0.5917	0.4891
5	8	<i>a</i>	4.5100	0.7121	0.7516	0.5808	0.4785
6	7	<i>a</i>	4.5200	0.7031	0.7414	0.5742	0.4893
7	3	<i>a</i>	5.0800	0.8763	0.9425	0.6317	0.4467
8	2	<i>a</i>	6.5700	0.8409	0.9004	0.6667	0.4658
9	7	<i>c</i>	9.2750	0.7889	0.9990	0.5402	0.5086
10	8	<i>b</i>	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 4.2 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 7 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.2 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 12 เฟส *a* ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 23 เฟส *a* มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 19.2000 p.u. FVSI เท่ากับ 0.6427 4 สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.7892 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 25 บัส 4 และดัชนี

LQP เท่ากับ 0.2913 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง 4 สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.5335 p.u.

ตารางที่ 4.2 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 25 บัส

ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	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

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 37 บัส แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 8 อันดับแรก ดัชนีเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้มาจากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น ดัชนีหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.3 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 30 เฟส b ค่อกับสายป้อนเส้นที่ 30 เฟส b มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 7.8100 p.u. FVSI เท่ากับ 0.6804 4 สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.9960 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบ 37 บัส และดัชนี LQP เท่ากับ 0.0623 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี LQP ของระบบทดสอบ 37 บัส สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.9545 p.u.

ตารางที่ 4.3 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 37 บัส

ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	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
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

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบ 118 บัส แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 10 อันดับแรก คำนวณเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น คำนวณได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้านอกที่ฟีดที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่านี้นับใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้านอกที่ฟีดมากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.4 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 118 เฟส a ต่อกับสายป้อนเส้นที่ 117 เฟส a มีค่ากำลังไฟฟ้านอกที่ฟีดสูงสุดเท่ากับ 8.1000 p.u. FVSI เท่ากับ 0.3192 สำหรับค่านี้น L_{mn} เท่ากับ 0.3449 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าค่านี้น L_{mn} ของระบบทดสอบ 118 บัส และค่านี้น LQP เท่ากับ 0.1619 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าค่านี้นสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนค่านี้นสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง สำหรับค่าแรงดันที่บัสไหลมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.6481 p.u. พิจารณาการลดลงของค่าแรงดันที่บัสไหลของระบบทดสอบ 118 บัส

ตารางที่ 4.4 คำนวณเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบ 118 บัส

ลำดับ	บัส	เฟส	Qlimit	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 4.4 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
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

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ FVSI, L_{mn} และ LQP สำหรับระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงเฉพาะลำดับบัสที่อ่อนแอ 8 อันดับแรก คำนวณเสถียรภาพแรงดันคำนวณได้จากความเสี่ยงของสายป้อนแต่ละเส้นแล้วอ้างอิงไปยังบัสและเฟสนั้น คำนวณหาได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งดัชนีตัวใดตัวหนึ่งมีขนาดมากกว่า 1.00 ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มากที่สุด กำหนดให้เป็นค่า Qlimit บัสใดที่มีค่า Qlimit น้อยที่สุดแสดงว่าเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด ส่งผลให้บัสปลายทางเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วย จากตารางที่ 4.5 บัสที่อ่อนแอที่สุดคือ บัส 158 เฟส c ค่อกับสายป้อนเส้นที่ 157 เฟส c มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดเท่ากับ 61.1900 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟค่อนข้างสูง เนื่องจากระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เป็นระบบที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 22 kV และ โหลดมีขนาดไม่สูงมากนัก สามารถดูข้อมูลระบบทดสอบได้ที่ภาคผนวก ก. FVSI เท่ากับ 0.4525 สำหรับดัชนี L_{mn} เท่ากับ 0.4754 พิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี L_{mn} ของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส และดัชนี LQP เท่ากับ 0.4379 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าดัชนีสองตัวแรก เนื่องจากในสมการการคำนวณจะถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสี่ ส่วนดัชนีสองตัวแรกถูกหารด้วยแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง สำหรับค่าแรงดันที่บัสโหลดมีค่าลดลงก่อนระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันเท่ากับ 0.3818 p.u.

ตารางที่ 4.5 ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของบัสที่อ่อนแอของระบบทดสอบมหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี 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

ส่วนที่ 2 การประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 10 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนที่ 1 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่ เฟส *b* ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 10 และ 8 และที่บัส 8 เฟส *a* การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข 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 4.6 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.6 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 เฟส *b* และเมื่อ
ประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 10 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)	287.320	79.350	77.089

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 25 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนที่ 1 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่ เฟส *a* ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15 และ 16 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดจากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.40000 p.u. มุมเฟส 359.99000° รีแอกแตนซ์ 0.94602 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 1.66400 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียน้อยลงจาก 85.425 kW เป็น 84.794 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.7 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.7 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 เฟส *a* และเมื่อ
ประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 12 <i>a</i>	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)	1130.200	85.425	84.794

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 37 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนที่ 1 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่ เฟส *b* ซึ่ง

เป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 28 ถึง 36 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.12210 p.u. มุมเฟส 26.15800° รีแอกแตนซ์ 0.10000 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริง ได้เท่ากับ 0.58610 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นจาก 221.610 kW เป็น 227.810 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.8 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.8 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 เฟส *b* และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 30 <i>b</i>	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	839.970	221.610	227.810

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 118 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนของ 1 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่เฟส *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 1.38980 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริง ได้เท่ากับ 1.66400 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 124.900 kW เป็น 116.270 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.9 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.9 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118 เฟส a และเมื่อ
ประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ

	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 118a	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)	768.140	124.900	116.270

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

สำหรับการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตกับตัวเก็บประจุในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส นี้ จะติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไว้ที่บัสอ่อนแอในส่วนที่ 1 เหมือนเดิม และติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 0.5 p.u. เข้าไปที่บัสและเฟสที่มีขนาดแรงดันลดลง สำหรับระบบทดสอบนี้ ติดตั้งที่ เฟส c ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดลัดวงจร บัสที่ 150 ถึง 159 การหาขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุด จากการหาค่าเหมาะที่สุดของขนาด มุมเฟส และรีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ได้ค่าเท่ากับ 0.00263 p.u. มุมเฟส 292.01000° รีแอกแตนซ์ 0.01000 Ω แปลงแรงดันเป็นค่าจริงได้เท่ากับ 0.05790 kV ซึ่งมีขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเท่ากับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย แสดงว่าการทำงานร่วมกันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุไม่ได้ช่วยให้ขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตน้อยลง แต่กำลังงานสูญเสียลดลงจาก 3185.000 kW เป็น 2911.900 kW แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.10 ปัญหานี้เป็นเพราะตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุเป็นตัวชดเชยแบบขนาน ซึ่งการทำงานร่วมกันจะเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.10 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิด
ลัดวงจรที่บัส 158 เฟส c และเมื่อประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและ
ตัวเก็บประจุ

	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 158c	เมื่อติดตั้ง DVR	เมื่อติดตั้ง DVR และ C
กำลังงานสูญเสีย ทั้งหมดของระบบ (kW)	6033.000	3185.000	2911.900

ส่วนที่ 3 เป็นการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดซึ่งใกล้กับจุดที่เกิดลัดวงจร

1) ระบบทดสอบ 10 บัส

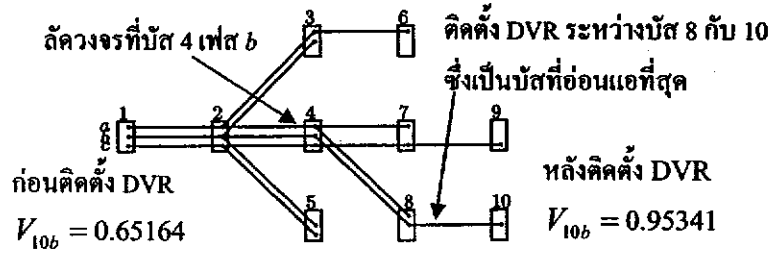
จากทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 10 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 28.956 kW ดังแสดงในตารางที่ 4.11 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 4 เฟส b ผ่าน $Z_f = 0.025 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 4 เฟส b มีขนาดลดลงเป็น 0.66754 p.u. แรงดันที่บัส 10 เฟส b เป็น 0.65164 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 687.720 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 10 เฟส b ดังแสดงในตารางที่ 4.12 จะพบว่าแรงดันที่บัส 10 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 10 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส b เป็น 0.95341 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 503.490 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 4 เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 4.8 แสดงระบบทดสอบ 10 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 10 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.11 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 10 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 10b

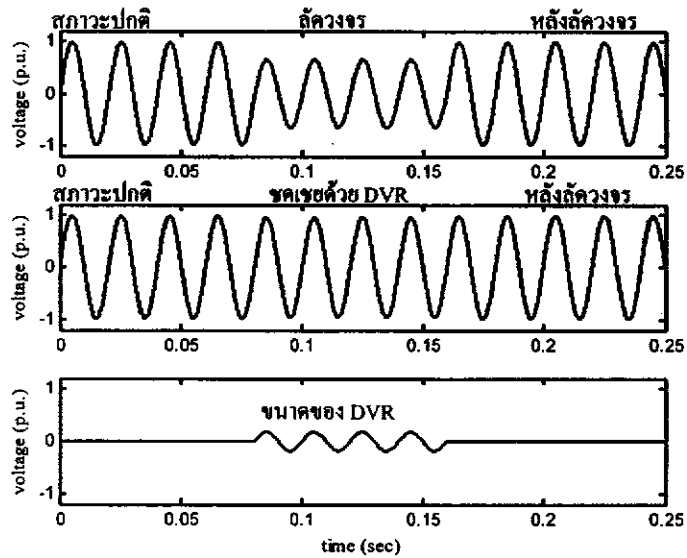
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4b	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 10b
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	28.956	687.720	503.490

ตารางที่ 4.12 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 10 บัส

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



รูปที่ 4.8 ระบบทดสอบ 10 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 4 เฟส *b* และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 10 เฟส *b*



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 4 เฟส *b* ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

2) ระบบทดสอบ 25 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟของระบบทดสอบ 25 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 37.919 kW ดังแสดงในตารางที่ 4.13 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 14 เฟส *a* ผ่าน $Z_f = 0.011\Omega$ ลกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 14 เฟส *a* มีขนาดลดลงเป็น 0.57390 p.u. แรงดันที่บัส 12 ในเฟส *a* เป็น 0.65158 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1963.700 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 12 เฟส *a* ดังแสดงในตารางที่ 4.14 จะพบว่าแรงดันที่บัส 12 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 12 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส *a* เป็น 0.95751 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 1590.700 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 14 เฟส *a* เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดัน ไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชย

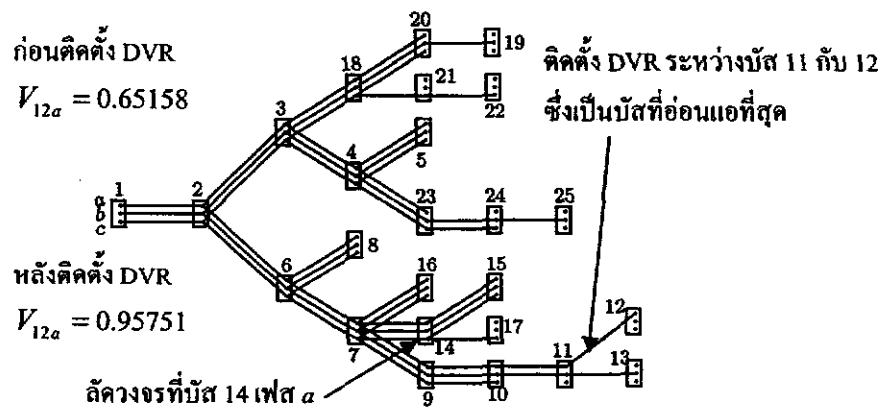
แรงดัน รูปที่ 4.10 แสดงระบบทดสอบ 25 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.13 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 25 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 a และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 12 a

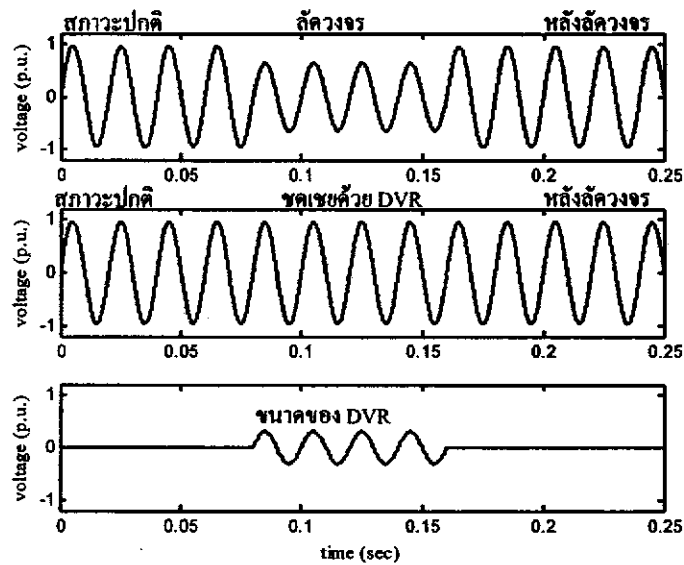
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 12 a
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	37.919	1963.700	1590.700

ตารางที่ 4.14 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 25 บัส

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



รูปที่ 4.10 ระบบทดสอบ 25 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 14 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 12 เฟส a



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 12 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

3) ระบบทดสอบ 37 บัส

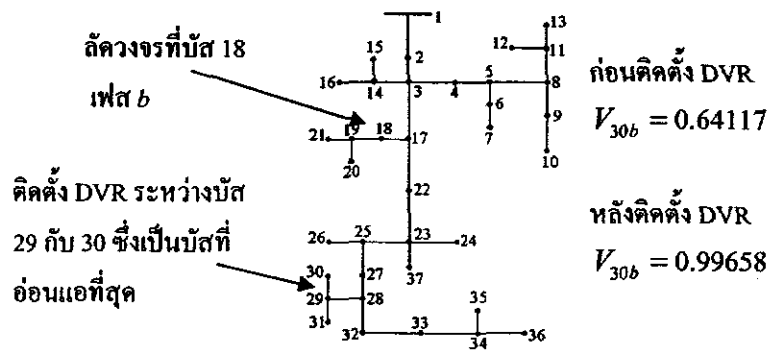
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 37 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 135.300 kW จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 18 เฟส b ผ่าน $Z_f = 0.010 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 18 เฟส b มีขนาดลดลงเป็น 0.67740 p.u. แรงดันที่บัส 30 ในเฟส b เป็น 0.75882 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2505.500 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 30 เฟส b ดังแสดงในตารางที่ 4.15 จะพบว่าแรงดันที่บัส 30 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น บัส 30 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ใน เฟส b เป็น 0.93028 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 2287.300 kW มีขนาดลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยังมีบางส่วนที่เกิดลัดวงจรยังไม่ถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่บัส 18 เฟส b เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 4.12 แสดงระบบทดสอบ 37 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.15 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 37 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18b และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 30b

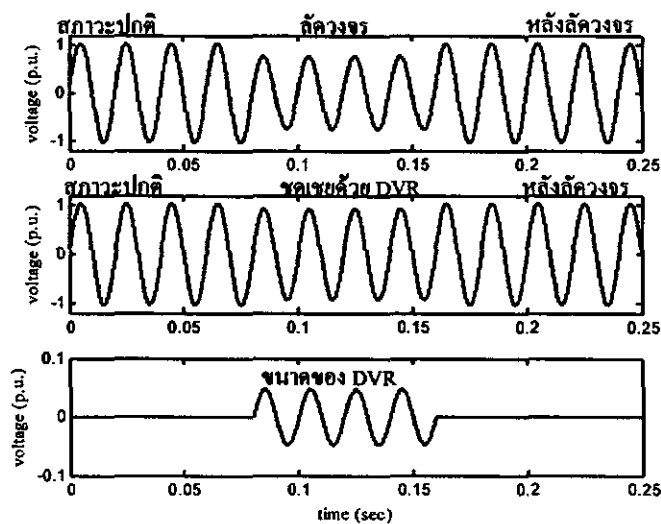
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18b	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 30b
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	135.300	2505.500	2287.300

ตารางที่ 4.16 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบ 37 บัส

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



รูปที่ 4.12 ระบบทดสอบ 37 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 18 เฟส b และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 30 เฟส b



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 30 เฟส b ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4) ระบบทดสอบ 118 บัส

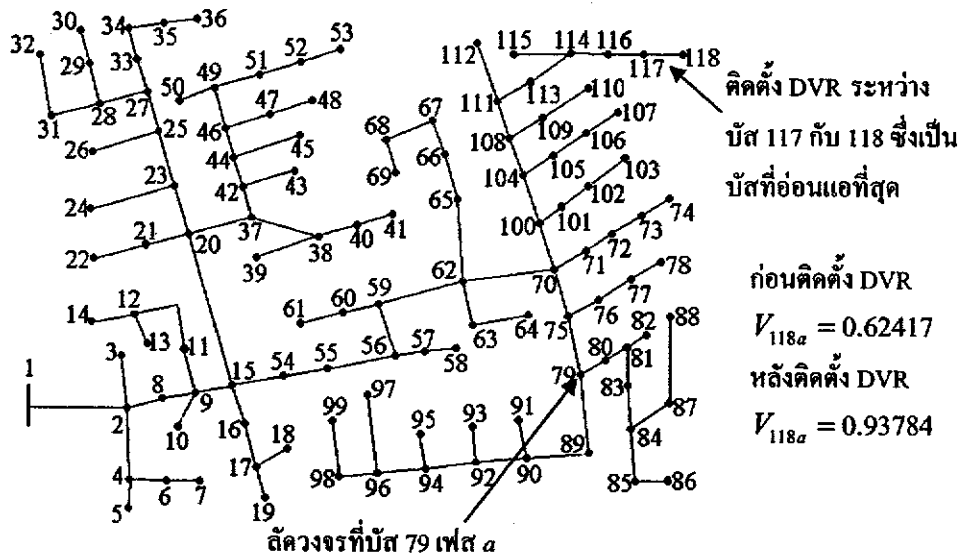
จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 118 บัส สำหรับการ
ทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 275.320 kW
ดังแสดงในตารางที่ 4.17 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 79 เฟส a ผ่าน $Z_f = 0.020 \Omega$ ลง
กราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 79 เฟส a มีขนาดลดลงเป็น 0.62042 p.u. แรงดันที่บัส 118 ในเฟส a เป็น
0.62417 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1080.400 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118
เฟส a ดังแสดงในตารางที่ 4.18 จะพบว่าแรงดันที่บัส 118 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่
ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 118 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส a เป็น
0.93784 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 837.810 kW ส่วนที่บัส 79 เฟส a เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟู
แรงดัน ขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น แต่กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 4.14 แสดงระบบ
ทดสอบ 118 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต
แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 118
เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาด
แรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.17 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 118 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a
และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 118a

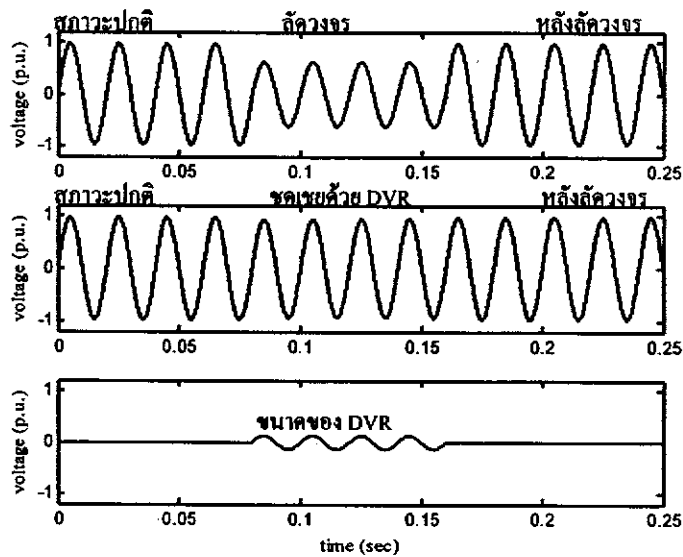
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79a	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 118a
กำลังงานสูญเสียทั้งหมด ของระบบ (kW)	275.320	1080.400	837.810

ตารางที่ 4.18 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบ
ทดสอบ 118 บัส

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



รูปที่ 4.14 ระบบทดสอบ 118 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 79 เฟส a และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 118 เฟส a



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 118 เฟส a ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

5) ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

จากผลทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส สำหรับการทำงานในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้า จะได้กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบเท่ากับ 2985.200 kW ดังแสดงในตารางที่ 4.19 จำลองสถานการณ์การลัดวงจรขึ้นที่บัส 126 เฟส c ผ่าน $Z_f = 0.005 \Omega$ ลงกราวด์ ทำให้แรงดันที่บัส 126 เฟส c มีขนาดลดลงเป็น 0.71018 p.u.

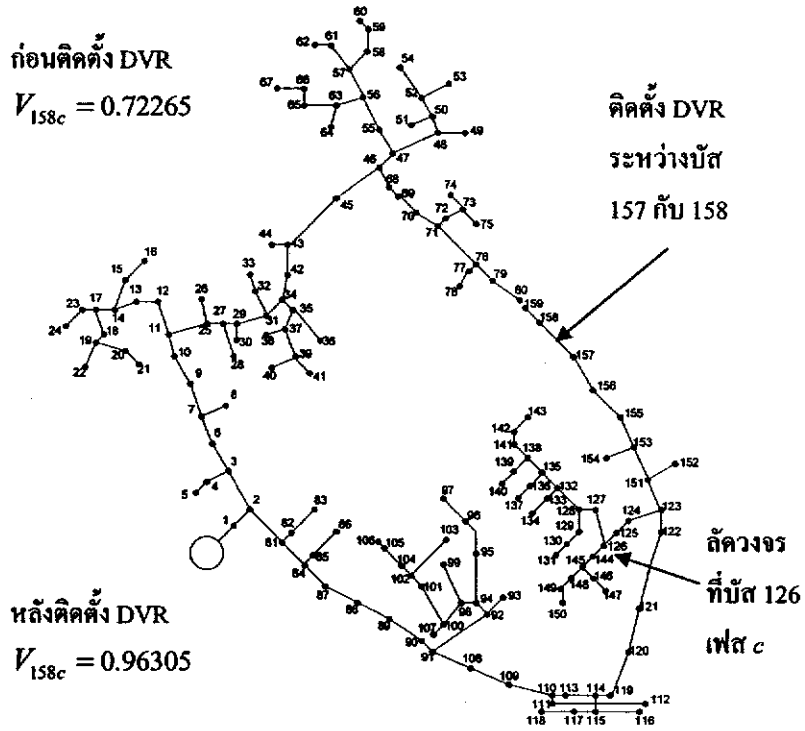
แรงดันที่บัส 158 ในเฟส c เป็น 0.72265 p.u. กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5458.100 kW เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158 เฟส c ดังแสดงในตารางที่ 4.20 จะพบว่าแรงดันที่บัส 158 มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้มีความสูงขึ้น บัส 158 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น ในเฟส c เป็น 0.96305 p.u. กำลังงานสูญเสียมีขนาดลดลงเหลือ 3673.600 kW ส่วนที่บัส 126 เฟส c เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดัน ขนาดแรงดันไม่เพิ่มมากนัก เพราะไม่ได้เป็นกลุ่มโหนดที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดัน รูปที่ 4.16 แสดงระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ตำแหน่งบัสที่เกิดลัดวงจร บัสที่อ่อนแอที่สุดและติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต แรงดันบัสก่อนและหลังติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต สามารถแสดงลักษณะแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสถานะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตดังรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.19 กำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ของระบบปกติ เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126c และเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัส 158c

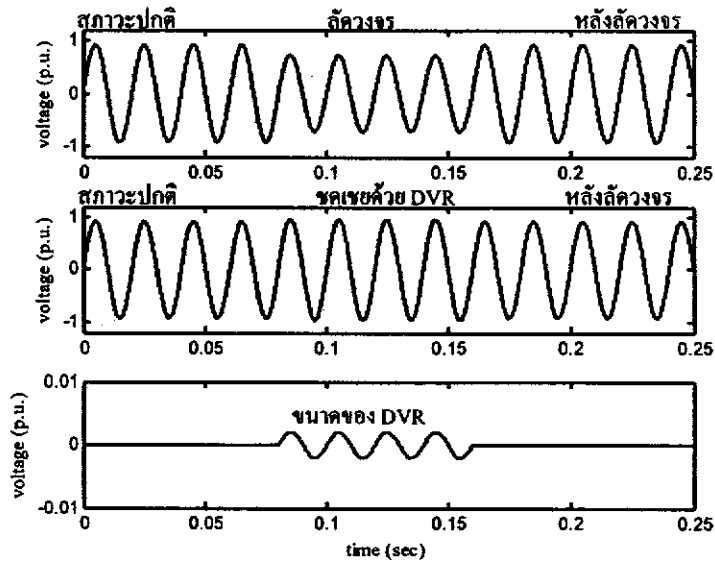
	ระบบปกติ	เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126c	เมื่อติดตั้ง DVR ที่บัส 158c
กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ (kW)	2985.200	5458.100	3673.600

ตารางที่ 4.20 ขนาด มุมเฟส และ รีแอกแตนซ์ของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต เมื่อติดตั้งในระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส

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



รูปที่ 4.16 ระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส เมื่อเกิดลัดวงจรที่บัส 126 เฟส c และหลังติดตั้ง DVR ที่บัส 158 เฟส c



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบขนาดแรงดันที่บัส 158 เฟส c ในสภาวะปกติ เมื่อเกิดลัดวงจร หลังลัดวงจร การชดเชยด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และขนาดแรงดันของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต

4.5 สรุป

การวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ คำนึงเสถียรภาพแรงดันสามารถระบุตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดสำหรับติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต พิจารณาจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้น้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดหลังจากเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวผ่าน Z_f ลงกราวด์ที่บัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสใกล้เคียงที่มีผลทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเกิดแรงดันตก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง ส่วนบัสที่เกิดลัดวงจรในกรณีเกิดลัดวงจรบริเวณใกล้เคียงกับบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ไม่สามารถช่วยชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับมาสู่สภาวะปกติได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงาน โหลดที่เกิดลัดวงจรนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเวลาต่อมา ส่วนโหลดที่อยู่ในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานจะสามารถทำงานได้ตามปกติ ส่วนต่อมาเป็นการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานอยู่ไม่มีผลกระทบเกี่ยวข้องกัน กล่าวคือ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่ลดลงจากระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเฉียว แต่กำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้ง 2 ตัว สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยที่มีผลกระทบต่อกันไม่มากนัก

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษา และพัฒนาการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า โดยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบอนุกรม การติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะติดตั้งอนุกรมกับสายป้อนเพื่อยกระดับแรงดันโวลต์ปลายทางให้มีขนาดสูงขึ้น หน้าที่หลักของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต คือ ช่วยป้องกันกลุ่มโวลต์ที่มีความเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือบัสที่มีความอ่อนแอที่สุดในทางระบบไฟฟ้ากำลังบัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โวลต์อย่างต่อเนื่องมีค่าน้อยที่สุด ก่อนที่ระบบจะขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าหรือก่อนที่ค่าดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า $FVSI L_{min}$ หรือ LQP เกิน 1.00 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะการทำงานในสภาวะคงตัว สามารถทำได้โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ วิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส โวลต์ไม่สมดุล พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใหม่ ได้แก่ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวด้วยวิธีการเกาส์-ไซเคิลและนิวตัน-ราฟสัน การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตภายใต้กำลังงานสูญเสีย้อยที่สุด นอกจากนี้ประยุกต์ใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้หาค่าแห่งติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด การหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต และการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและตัวเก็บประจุ ซึ่งทั้งสองเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟต่างชนิดกัน ดังต่อไปนี้

1) พัฒนาแบบจำลองการไหลกำลังของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัว ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยวิธีการเกาส์-ไซเคิลและนิวตัน-ราฟสัน รวมทั้งพัฒนาโปรแกรม MATLAB ขึ้นสำหรับจำลองสถานการณ์การลัดวงจรที่บัสแบบ 3 เฟส ผ่าน Z_r ลงกราวด์ โดยทดสอบกับระบบทดสอบ 5 ระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส 37 บัส 118 บัส และระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อเกิดลัดวงจรแล้วดำเนินการติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่เกิดลัดวงจร จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นส่วนกรณีเกิดลัดวงจรที่บัสใกล้เคียงกับบัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยบัสที่เกิดลัดวงจรจะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนกลุ่มโวลต์ที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะสามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้กลับมาสู่สภาวะปกติ นอกจากนี้กำลังงานส่วนกรณีเกิดลัดวงจรที่บัสใกล้เคียงกับบัสติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยบัสที่เกิดลัดวงจรจะถูกอุปกรณ์

ป้องกันตัดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนกลุ่มโหลดที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะสามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตชดเชยแรงดันให้กลับมาสู่สภาวะปกติ นอกจากนี้กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบลดลง หลังจากติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตแล้วทำให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้

2) นำเสนอการทำงานของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทำการควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในสภาวะคงตัวภายใต้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด และปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีเสถียรภาพแรงดันสูงขึ้น ช่วยขยายย่านการจ่ายโหลด ทำให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้น เพราะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การควบคุมการทำงานของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่เหมาะสมสามารถลดกำลังงานสูญเสียในสายป้อนได้อีกด้วย

3) นำเสนอการวางแผนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต โดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพื่อกำหนดตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดสำหรับติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตพิจารณาจากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหลดมีค่าการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้น้อยที่สุด บัสที่อ่อนแอที่สุดเป็นบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตที่บัสที่อ่อนแอที่สุดหลังจากเกิดลัดวงจรแบบเฟสเดียวผ่าน Z_f ลงกราวด์ ที่บัสที่อ่อนแอที่สุดและบัสใกล้เคียงที่มีผลทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเกิดแรงดันตก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้บัสปลายทางมีขนาดแรงดันสูงขึ้นและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลง ส่วนบัสที่เกิดลัดวงจรในกรณีเกิดลัดวงจรบริเวณใกล้กับบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่สามารถช่วยชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับมาสู่สภาวะปกติได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นกลุ่มโหลดในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงาน โหลดที่เกิดลัดวงจรนี้จะถูกอุปกรณ์ป้องกันตัดออกจากระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเวลาต่อมา ส่วนโหลดที่อยู่ในบริเวณที่ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานจะสามารถทำงานได้ตามปกติ

4) ศึกษาการประสานสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนานและอนุกรมตามลำดับ จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตทำงานอยู่ไม่มีผลกระทบเกี่ยวข้องกัน กล่าวคือ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วขนาดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตไม่ลดลงจากระบบที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตอย่างเดียวและกำลังงานสูญเสียในสายป้อนทั้งหมดมีค่าลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้ง 2 ตัว สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยที่มีผลกระทบต่อกันไม่มาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การหาค่าแห่งบัสที่อ่อนแอที่สุดด้วยดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI L_{mm} หรือ LQP กับระบบทดสอบที่มีขนาดใหญ่ เช่น ระบบทดสอบ 118 บัสและระบบทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก เพราะระบบทดสอบสามารถจ่ายโหลดได้มาก สำหรับโหลดที่ต้นทาง ดังนั้น เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอย่างต่อเนื่องด้วยค่าลำดับชั้นน้อยประมาณ 0.1-0.2 p.u. ต้องใช้การวนรอบหลายครั้ง ซึ่งควรใช้ค่าลำดับชั้นที่มากกว่านี้ ส่วนโหลดปลายทางกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่รับได้มีขนาดไม่สูงมากนัก อาจจะใช้ค่าลำดับชั้นที่ค่าน้อยได้

2) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตด้วยลำดับควอคราติก จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตที่เหมาะสมในการค้นหาค่าตอบ ค่าเริ่มต้นที่กำหนดได้จากการสุ่มค่าระหว่างขอบเขตที่กำหนด สำหรับระบบทดสอบขนาดเล็ก สามารถทดสอบได้ง่ายเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก ส่วนระบบทดสอบขนาดใหญ่ ต้องใช้เวลาในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามาก ถ้าค่าเริ่มต้น ไม่อยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะไม่ลู่อเข้าหาค่าตอบ ดังนั้น ควรกำหนดขอบเขตของค่าตอบให้มีขนาดเล็กมากพอและครอบคลุมค่าตอบ เพื่อให้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตใช้เวลาไม่มาก

3) การเกิดลัดวงจรที่บัสผ่าน Z_f ลงกราวด์ ค่า Z_f ที่กำหนดจะต้องทำให้ขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตลดลงไม่มากนัก ไม่ควรต่ำกว่า 0.5 p.u. เพราะถ้ามีขนาดต่ำกว่านี้ ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะไม่สามารถชดเชยแรงดันให้มีขนาดกลับสู่สภาวะการทำงานปกติได้และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะไม่ลู่อเข้าหาค่าตอบ ในความเป็นจริงตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตจะมีตัวตรวจวัดระดับแรงดันของกลุ่มโหลดที่อ่อนแอที่สุด และใช้เวลาในการชดเชยแรงดันไม่ถึง 1 วินาทีระบบจะกลับคืนสู่สภาวะการทำงานปกติ

บรรณานุกรม

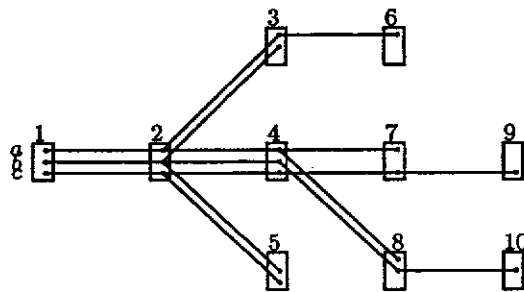
- [1] Vilathgamuwa, D.M., Perera, A.A.D.R., and Choi.S.S. (2003), "Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer", IEEE Power Delivery, Vol 18, Issue 3, pp. 928-936
- [2] Jung, H.-J, Suh, I.-Y., Kim, B.-S., Kim, R.-Y., Choi, S.-Y., and Song, J.-H. (2002), "A Study on DVR Control for Unbalanced Voltage Compensation", IEEE Annual Applied Power Electronics Conf. and Exposition, Vol 2, pp. 1068-1073
- [3] Fitzer, C., Barnes, M., and Geen, P. (2004), "Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer", IEEE Trans. Industry Applications, Vol 40, Issue 1, pp. 203-212
- [4] 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, Vol 19, Issue 3, pp. 1511-1518
- [5] 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, Vol 2, pp. 1118 – 1123
- [6] นราวุธ พูลสวัสดิ์ และ อุดมศักดิ์ ทองกระจาย (2548), "การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุล", โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 5-24
- [7] Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2006), "Modeling of a DVR for Newton-Raphson Power Flows", WSEAS Trans. Systems, Vol 5, Issue 5, pp. 913-918

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

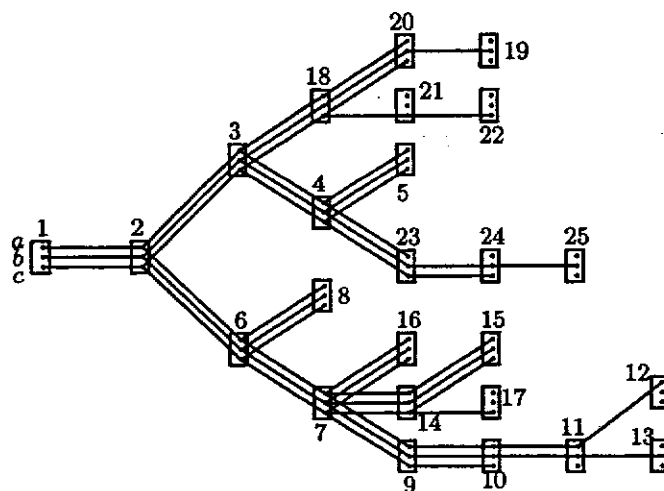
ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 5 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 10 บัส 25 บัส คัดแปลงระบบทดสอบ IEEE 37 บัส และ 118 บัส และ ระบบทดสอบสายป้อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 159 บัส ระบบทดสอบทุกระบบมีค่าฐานเท่ากับ 100 kVA รายละเอียดของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

1. ระบบทดสอบ 10 บัส



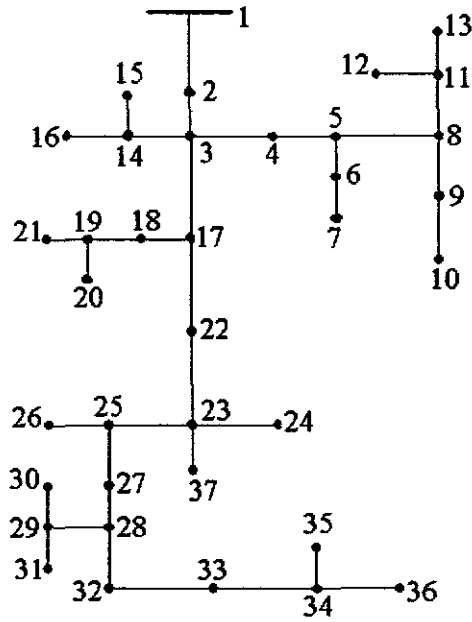
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 10 บัส

2. ระบบทดสอบ 25 บัส



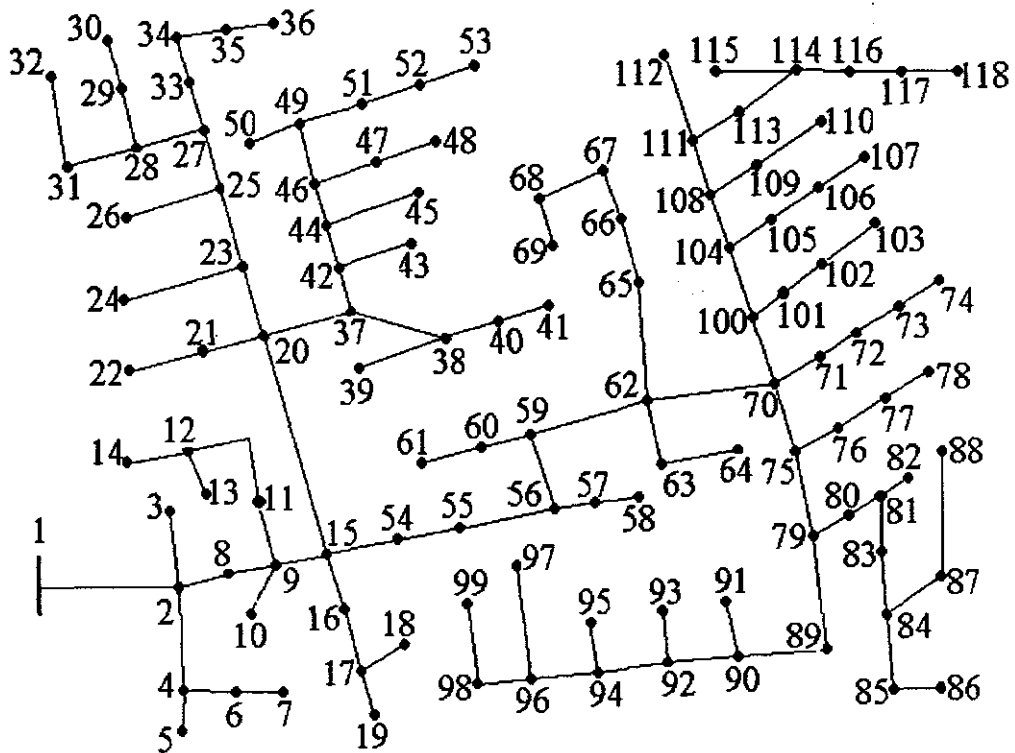
รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 25 บัส

3. ระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด



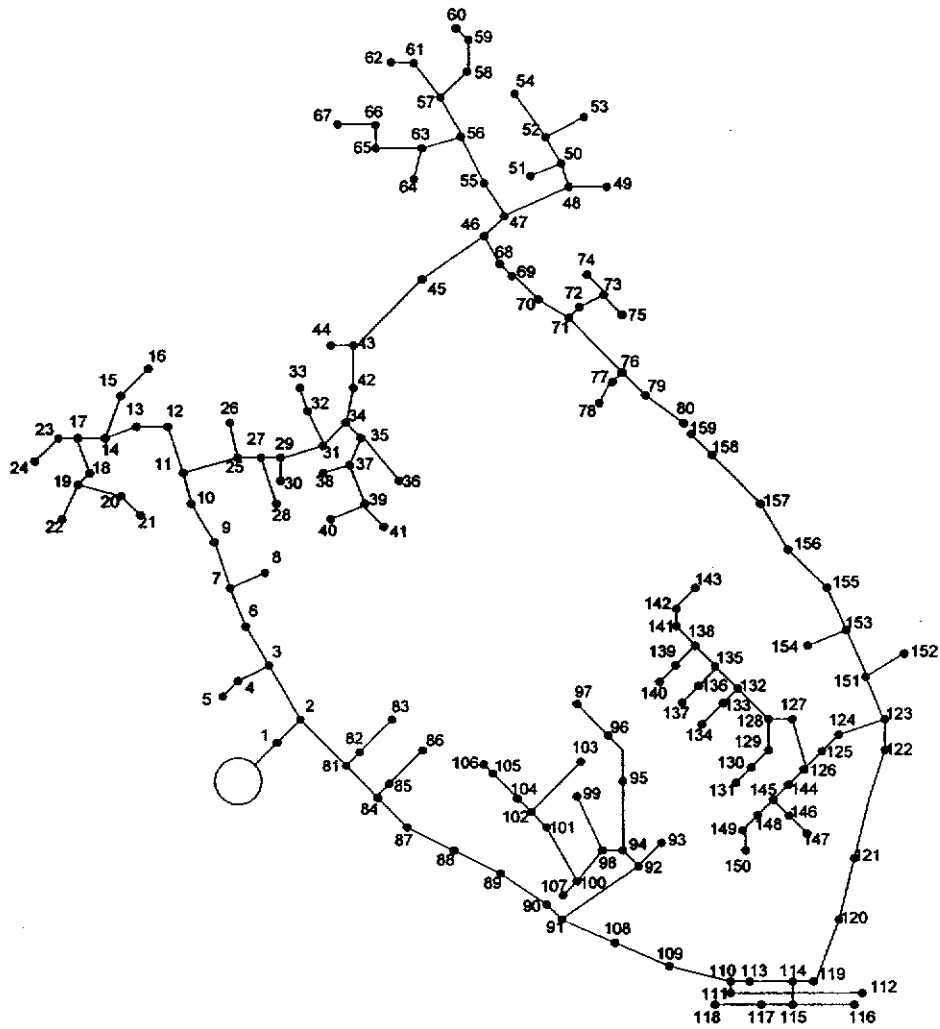
รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส

4. ระบบทดสอบ IEEE 118 โหนด



รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ 118 บัส

5. ระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 โหนด



รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 โหนด

ภาคผนวก ข
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลิตผล ดังต่อไปนี้

1. บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

1.1 ประชุมวิชาการระดับชาติ

- ทศพล รัตน์นิยมชัย และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2548). “กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในระบบจำหน่าย 22-kV ด้วยการควบคุมตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28) ณ โรงแรมเฟิร์ด วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต วันที่ 20-21 ตุลาคม 2548: หน้า 257-260.

1.2 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong (2006), “Steady-State Power Flow Modeling for a Dynamic Voltage Restorer”, The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE’ 06), Prague, Czech Republic, 12-14 March 2006

1.3 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong (2006), “Modeling of a DVR for Newton-Raphson Power Flows”, The WSEAS Transactions on Systems, Issue 5, Vol 5, pp. 913-918

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

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