

การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการชดเชยรีแอกทีฟ

LINE LOADABILITY IMPROVEMENT USING REACTIVE
COMPENSATION TECHNIQUES

นายนิพัทธ์ แซ่ลี รหัส 50381062
นายวีรฐ นาระติ รหัส 50382922

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
ยี่ห้อรับ..... 4 S. A. 2555.....
เลขทะเบียน..... 16109512.....
เลขเรียกหนังสือ..... 45.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร 46189

2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการชดเชย
รีแอกทีฟ

ผู้ดำเนินโครงการ นายนิพัทธ์ แซ่ลี รหัส 50381062
 นายวีรยุทธ นาระถิ รหัส 50382922


ที่ปรึกษาโครงการ ดร.แคทรียา สุวรรณศรี


สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

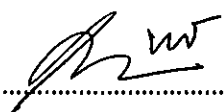
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.แคทรียา สุวรรณศรี)


.....กรรมการ
(ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)


.....กรรมการ
(ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการชดเชยรีแอกทีฟ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายนิพัทธ์ แซ่ลี	รหัส	50381062
	นายวีรยุทธ นาระถิ	รหัส	50382922
ที่ปรึกษาโครงการ	คร.แคทรียา สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เสนอการเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าใช้เทคนิคการชดเชยรีแอกทีฟของระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PowerWorld ระบบศึกษาที่ใช้คือระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ซึ่งพิจารณาผลการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบขนานที่บัสต่างๆ การวิเคราะห์การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าของระบบศึกษาจะพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัสนั้นๆ โดยจะเปรียบเทียบผลของระบบเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน ในสถานะที่มีโหลดมากการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่บัสศึกษาให้ถึงค่าวิกฤตจนระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพจะทำให้แรงดันตกอย่างมาก เมื่อต่อตัวเก็บประจุที่บัสจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้มากขึ้นและเสถียรภาพของระบบดีขึ้น ในสถานะโหลดน้อยจะทำให้เกิดแรงดันเกินที่ปลายสายเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนานจะทำให้แรงดันเกินที่ปลายสายลดลงสู่สภาวะปกติ การต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำขนานจะสามารถควบคุมความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันที่ปลายสายเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบได้

Project title Line Loadability Improvement Using Reactive Compensation Techniques

Name Mr. Nipat Sealee ID. 50381062
Mr. Veerawut Naratee ID. 50382922

Project advisor Mrs. Cattareeya Suwanasri, D.Eng.

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2011

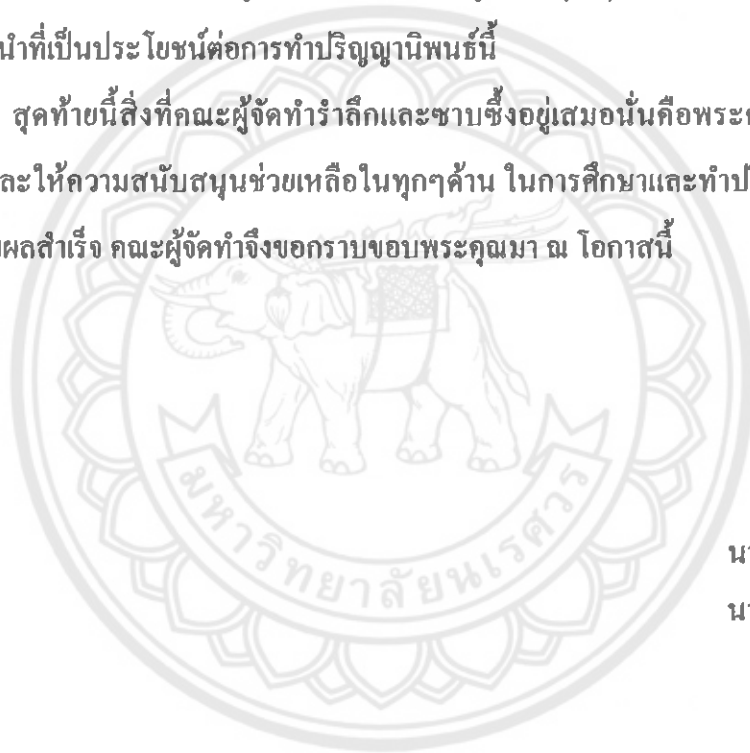
Abstract

This project presents line loadability Improvement in power system by using reactive compensation techniques and PowerWorld program. The IEEE 14 bus is used as studied system by considering capacitor and inductor connected in parallel at different buses. The analysis of the increasing line loadability will consider the bus voltage when the active load at each bus is increased with and without capacitor and inductor. In case of heavy load, if the load is increased upto the critical point that the system is unstable, the bus voltage is reduced immediately. When the capacitor is connected, the voltage will be increased, which results in the higher load capability and the better system stability. In case of light load, there will be over voltage at the end of the line. When the inductor is connected, the voltage will be reduced to normal operating point. Therefore, capacitor and inductor can control line loadability and the system voltage in order to maintain the system stability.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.แคลทรีชา สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความกรุณา แนะนำความคิด ความรู้ แนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้โอกาสในการจัดทำปฏิญานิพนธ์ รวมไปถึงการเอื้อเพื่อเอกสารแหล่งข้อมูลในการค้นคว้าเพิ่มเติมและอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการวิเคราะห์ช่วยให้ปฏิญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณะกรรมการการสอบปฏิญานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบเพื่อให้ปฏิญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปฏิญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้สิ่งที่คณะผู้จัดทำรำลึกและซาบซึ้งอยู่เสมอ นั่นคือพระคุณของบิดา มารดา ซึ่งเข้าใจและให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้าน ในการศึกษาและทำปฏิญานิพนธ์จนกระทั่งประสบผลสำเร็จ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้



นายนิพัทธ์ แซ่ลี

นายวีรยุทธ นาระถิ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	1
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	3
1.6 งบประมาณที่ใช้.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 นิยามปัญหาของโหลด.....	4
2.1.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า.....	7
2.1.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสายส่ง.....	9
2.2.1 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น.....	11
2.2.2 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะปานกลาง.....	13
2.2.3 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกล.....	17
2.3 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	19
2.4 เทคนิคการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ.....	20
2.4.1 การใช้สามเหลี่ยมมุมฉากแทนกำลังไฟฟ้า.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	22
2.4.3 การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟโดยการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	23
2.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	25
2.4.5 การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของสายส่ง.....	27
2.5 โปรแกรม PowerWorld.....	32
บทที่ 3 การปรับปรุงแรงดัน โดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ	36
3.1 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งระยะปานกลาง	36
3.2 วงจรสมมูลแบบ T ของสายส่งระยะสั้น	38
3.3 วงจรสมมูลแบบ π เมื่อต่อตัวเก็บประจุ.....	39
3.4 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ	40
3.5 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	43
3.6 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน	45
บทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า.....	47
4.1 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส.....	47
4.2 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส เมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาน	48
4.2.1 การต่อตัวเก็บประจุขนานที่บัส 2.....	48
4.2.2 การต่อตัวเก็บประจุขนานที่บัส 4.....	51
4.2.3 การต่อตัวเก็บประจุขนานที่บัส 5.....	54
4.2.4 การต่อตัวเก็บประจุขนานที่บัส 6.....	57
4.2.5 การต่อตัวเก็บประจุขนานที่บัส 12.....	59
4.3 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำขนาน.....	61
4.3.1 การต่อตัวเหนี่ยวนำขนานที่บัส 5.....	61
4.3.2 การต่อตัวเหนี่ยวนำขนานที่บัส 13.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	67
5.1 การใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส.....	67
5.3 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก วิธีติดตั้งโปรแกรม PowerWorld	71
ภาคผนวก ข ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส.....	85
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	88



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแจกแจงค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ.....	7
2.2 ค่าพารามิเตอร์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละประเภท.....	10
2.3 ประเภทสายส่งกำลังไฟฟ้าตามระยะทาง.....	11
3.1 ผลการคำนวณค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อตัวเก็บประจุ.....	45
3.2 ผลการคำนวณค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ.....	46
4.1 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ.....	49
4.2 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 2 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR.....	50
4.3 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 4 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ.....	52
4.4 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 4 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR.....	52
4.5 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 5 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ.....	55
4.6 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 5 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR.....	55
4.7 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 6 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ.....	57
4.8 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 6 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR.....	58
4.9 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 12 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ.....	60
4.10 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 12 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR.....	60
4.11 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 5 เมื่อไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ.....	62
4.12 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 5 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR.....	63
4.13 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 13 เมื่อไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ.....	65
4.14 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าบัสที่ 13 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บัณฑิตต่างๆ โดยกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสถือว่าเป็นบวก [1].....	5
2.2 วงจรเทียบเคียงของสายส่งกำลังไฟฟ้า [1].....	10
2.3 วงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะสั้นส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าให้แก่โหลดแบบสตาร์ [3].....	11
2.4 วงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะสั้นต่อเฟส มีค่าพารามิเตอร์ R และ L [2].....	12
2.5 แผนภาพเฟสเซอร์ของสายส่งระยะสั้น [2].....	12
2.6 วงจรสมมูลแบบ T [1].....	13
2.7 วงจรสมมูลแบบ π [1].....	15
2.8 วงจรแทนค่าต่อเฟสของสายส่งสามเฟสระยะไกล [2].....	18
2.9 รูปสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า [1].....	21
2.10 รูปสามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า [1].....	23
2.11 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบ [2].....	24
2.12 การต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ [2].....	26
2.13 การเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการต่อและไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม [2].....	29
2.14 การเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการต่อและไม่ต่อตัวเก็บประจุขนาน [2].....	30
2.15 การต่อตัวเก็บประจุแบบคงที่ในสายส่ง [2].....	31
2.16 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ 100,000 บัส [4].....	32
2.17 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์ข้อมูลขาดแคลน [4].....	34
2.18 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [4].....	34
2.19 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์แบบ 3 มิติ [4].....	35
3.1 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งขนาดกลาง.....	36
3.2 วงจรสมมูลแบบ T ของสายส่งขนาดสั้น.....	38
3.3 วงจรสมมูลแบบ π เมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาน.....	39
3.4 สายส่งที่มีการต่อขนาน.....	39
3.5 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ.....	40
3.6 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาน.....	43
3.7 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ.....	46
4.1 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส.....	47
4.2 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR ที่บัส 2.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR ที่บัส 2.....	50
4.4 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR ที่บัส 4.....	51
4.5 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR ที่บัส 4.....	53
4.6 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR ที่บัส 5.....	54
4.7 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR ที่บัส 5.....	56
4.8 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR ที่บัส 6.....	57
4.9 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR ที่บัส 6.....	58
4.10 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR ที่บัส 12.....	59
4.11 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR ที่บัส 12.....	60
4.12 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR ที่บัส 5.....	62
4.13 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR ที่บัส 5.....	63
4.14 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR ที่บัส 13.....	64
4.15 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR ที่บัส 13.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการชดเชยรีแอกทีฟและโปรแกรม PowerWorld Simulator (Line-loadability improvement using reactive compensation technique and PowerWorld simulator) ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะถูกใช้ในสายส่งระยะปานกลางและระยะไกลเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า (Line loadability) และรักษาแรงดันบัสให้ใกล้เคียงกับค่าแรงดันพิกัด (Rated value) ตัวเหนี่ยวนำต่อขนาน (Shunt reactor) จะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งในสายส่งแรงสูงของแต่ละเฟสเพื่อรับค่าส่งกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และลดค่าแรงดันเกิน (Over voltage) ขณะสายส่งมีโหลดน้อย อีกทั้งยังช่วยลดค่าแรงดันเกินชั่วคราว (Transient overvoltage) และช่วยลดแรงดันเกินเนื่องจากเกิดฟ้าผ่าและการสวิตชิงส่วนตัวเก็บประจุต่ออนุกรมจะใช้ในสายส่งระยะไกลเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าและตัวเก็บประจุต่อขนานจะใช้ในสายส่งทำการต่อแต่ละเฟสของสายส่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมลดลงส่งผลให้แรงดันตกลดลงเพิ่มขอบเขตจำกัดของเสถียรภาพคั้งนั้น โครงการนี้เป็นการเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมเข้าในระบบไฟฟ้าที่จำลองขึ้นในโปรแกรม PowerWorld

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาการปรับปรุงความสามารถการส่งกำลังไฟฟ้าของระบบศึกษาโดยใช้เทคนิคการชดเชยรีแอกทีฟและโปรแกรม PowerWorld

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาและใช้โปรแกรม PowerWorld ในวิเคราะห์ระบบศึกษา
2. วิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน
3. ใช้โปรแกรม PowerWorld จำลองและวิเคราะห์ระบบศึกษา IEEE 14 บัส
4. วิเคราะห์ความสามารถการส่งกำลังไฟฟ้าโดยการต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำต่อแบบขนาน

1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2554									
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม PowerWorld	←————→									
2. ศึกษาระบบไฟฟ้า 5 บัส เปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องคำนวณกับผลที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld	←————→									
3. ศึกษาผลของแรงดันเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่อขนานในระบบ				←————→						
4. เขียนระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส โดยใช้โปรแกรม PowerWorld					←————→					
5. วิเคราะห์ความสามารถส่งกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัสเมื่อต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำขนานในระบบ						←————→				
6. เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย เมื่อเมื่อต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำขนานในระบบ							←————→			
7. สรุปผลและจัดทำรายงาน								←————→		

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

สามารถใช้โปรแกรม PowerWorld มาวิเคราะห์และปรับปรุงความสามารถในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยใช้การต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำเข้าในระบบ

1.6 งบประมาณที่ใช้

- | | |
|---|------------------|
| 1. ค่าเอกสารประกอบการดำเนิน โครงการ | 700 บาท |
| 2. ค่าถ่ายเอกสารและจัดทำรูปเล่มปริญญาบัตร | 1,300 บาท |
| รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาทถ้วน) | <u>2,000 บาท</u> |

หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วประกอบกับการลงทุนจากต่างชาติที่เพิ่มมากขึ้นเหตุผลหนึ่งในการเลือกลงทุนของชาวต่างชาติคือความเพียงพอของทรัพยากรที่มีความจำเป็นต่อการผลิต พลังงานไฟฟ้านับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการตัดสินใจดังนั้นการมีระบบไฟฟ้าที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าได้จึงนับได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญ การได้มาซึ่งระบบไฟฟ้าที่ดีนั้นต้องผ่านกระบวนการอยู่หลายขั้นตอนไม่ว่าจะเป็นการวางแผนการวิเคราะห์การดำเนินการและการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละขั้นตอนล้วนแล้วแต่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่งการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่บอกได้ว่าระบบไฟฟ้านั้นมีความสามารถในการผลิตส่งจ่ายและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดการวิเคราะห์จะพิจารณาตั้งแต่เรื่องของความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าและความสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะการทำงานปกติตลอดจนการพิจารณาถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อระบบเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไม่ว่าสิ่งปกตินั้นจะมีลักษณะสมมาตรหรือไม่ก็ตาม ส่วนหนึ่งที่ได้การพิจารณาคงกล่าวจะนำไปสู่การเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งในระบบและอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าเพื่อให้สามารถป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังอื่นเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมมากที่สุด

การศึกษาการไหลของโหลดเป็นอีกขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังไม่ว่างานทางด้านปฏิบัติการควบคุมและวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการประเมินสมรรถนะของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบและศึกษาผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุปกรณ์ในระบบเช่น เมื่อระบบไฟฟ้าโหลดเพิ่มขึ้นก็จะเกิดการเชื่อมต่อโหลดใหม่หรือติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าขึ้นใหม่เข้ากับระบบเดิมจึงทำให้มีผลกระทบต่อแรงดันและกระแสของระบบ อีกทั้งยังมีผลต่อการไหลของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟด้วย ซึ่งผลกระทบเหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาก่อนเพื่อจะได้ดำเนินการดังกล่าวให้มีความถูกต้อง

2.1.1 นิยามปัญหาของโหลด

นิยามปัญหาของโหลด (Definition of the load flow problem) ในบทนี้จะศึกษาระบบ 3 เฟสสมมูลและการคำนวณเป็นระบบเฟสเดียว ผลการศึกษาที่สมบูรณ์มีความต้องการที่ทราบถึงตัวแปร 4 ตัว ที่แต่ละบัส k ใดๆในระบบคือ

1. กำลังจริงที่บัส (P_k)
2. กำลังรีแอกทีฟที่บัส (Q_k)
3. ขนาดแรงดันที่บัส (V_k)
4. มุมเฟสของแรงดันที่บัส (δ_k)

ก่อนการแก้ปัญหาจะต้องทราบค่าตัวแปรที่แต่ละบัส 2 ค่าก่อนและหลังจากได้แก้ปัญหาการไหลโหลดจะมีผลทำให้ทราบค่าตัวแปร 2 ค่าที่เหลือ

โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดโหลดหรือบัสไว้ 3 ชนิดดังนี้

1. บัสอ้างอิง (Swing bus or slack bus)

บัสนี้เป็นบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะใช้ในการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดและกำลังสูญเสียของระบบ บัสสวิงจะกำหนดค่าขนาดแรงดัน (V_k) และมุมเฟส (δ_k) เพื่อความสะดวกจะเลือกค่า $V \angle \delta_k = 1.0 \angle 0$ ซึ่งถือว่าเป็นเฟสอ้างอิงของระบบ

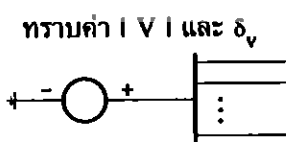
2. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator bus or voltage controlled bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P) และขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส (V_k) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) และมุมเฟสแรงดัน (δ_k) จะต้องคำนวณหา

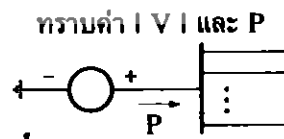
3. บัสโหลด (Load bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริง (P_L) และกำลังรีแอกทีฟ (Q_L) ซึ่งเป็นกำลังตามความต้องการของโหลดโดยต้องคำนวณหาขนาดแรงดัน (V_k) และมุมเฟสแรงดัน (δ_k) ของบัสสำหรับบัสใดที่ไม่มีทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสนี้จะพิจารณาเป็นบัสโหลดเช่นเดียวกัน

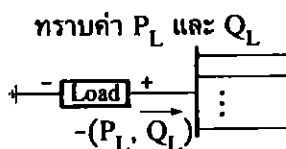
จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในบัสแต่ละชนิดจะมีตัวแปรที่ทราบค่าเพียง 2 ตัว ส่วนตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัวจะต้องคำนวณหาโดยรูปที่ 2.1 ได้แสดงตัวแปรที่กำหนดในบัสแต่ละชนิด



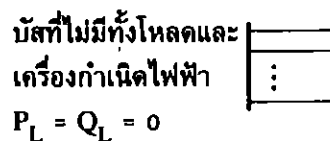
(ก) บัสสวิง



(ข) บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



(ค) บัสโหลด



(ง) บัสโหลดที่ $P_L = Q_L = 0$

รูปที่ 2.1 บัสชนิดต่างๆ โดยกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสถือว่าเป็นบวก [1]

ในการตั้งปัญหาการไหลของไหลนั้นจะต้องมีสมการของระบบซึ่งจะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับวิธีการแก้ปัญหาโดยมีความเป็นไปได้ที่สามารถแนะนำได้ 3 วิธี ดังนี้

1. สมการกระแสสามารถเขียนสมการที่บัส k ใดๆในเทอมของแรงดันที่ไม่ทราบค่า รูปแบบของสมการนี้คือ

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n \quad (2.1)$$

วิธีนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายและจะได้สมการที่เป็นกลุ่มของสมการที่เป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้นแหล่งจ่ายกระแสที่ทราบค่า I_k สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ P_k , Q_k และ V_k ได้ถ้ามีความจำเป็นสมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์โดยการใช้อยู่ในสมการเมทริกซ์

2. สมการแรงดันสามารถเขียนสมการที่บัส k ใดๆในเทอมของกระแสที่ไม่ทราบค่า รูปแบบทั่วไปของสมการนี้คือ

$$E_k = Z_{k1}I_1 + Z_{k2}I_2 + \dots + Z_{kn}I_n \quad (2.2)$$

สมการที่ได้จะเป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้นเช่นเดียวกันสมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ค่อยจะเหมาะสมกับการแก้ปัญหการไหลของไหล

3. การเขียนสมการของบัสในเทอมของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในกรณีนี้สมการของกำลังที่ไหลเข้าหรือออกจากบัส k ใดๆจะอยู่ในรูปแบบของสมการไม่เชิงเส้นคือ

$$P_k + jQ_k = |Y_{k1}| |E_1| |E_k| \angle(\delta_k - \delta_1 - \theta_{k1}) + \\ |Y_{k2}| |E_2| |E_k| \angle(\delta_k - \delta_2 - \theta_{k2}) + \dots + \\ |Y_{kn}| |E_n| |E_k| \angle(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad (2.3)$$

จากตัวแปร 4 ตัวที่บัส k ใดๆ (P_k, Q_k, E_k และ δ_k) จะมีตัวแปรที่ทราบค่า 2 ตัวและไม่ทราบค่า 2 ตัวการแก้ปัญหามักใช้วิธีนิวตัน - ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่ได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสำหรับแก้ปัญหากลุ่มของสมการที่ (2.3)

2.1.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า (Power flow analysis) จะต้องทราบข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบก่อนเพื่อใช้ในการหากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบ

ข้อมูลสำหรับการศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้า (Information for power flow studying)

1. เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ (Y) หรือเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ [Z] ของระบบ
2. บัสอ้างอิง (Swing bus, slack bus, reference bus) คือบัสอ้างอิงของระบบ (Reference Bus) ที่บัสนี้จะกำหนดค่าแรงดันและมุมของแรงดันไว้
3. บัสภาระไฟฟ้า (Load bus) คือบัสที่มีภาระไฟฟ้าต่อบัสนี้จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (P, Q)
4. บัสที่มีแรงดันคงที่ (Voltage magnitude constant bus, generator bus) คือบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดัน (P, V)
5. อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานของสายส่งเวลาเพิ่มอุปกรณ์เข้ามาในระบบ
6. ข้อมูลอื่นๆ เช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงพิกัดตัวเก็บประจุขนานและการตั้งแท๊ปของหม้อแปลง

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) ขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V) และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า (δ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่ามาให้หรือต้องคำนวณ ณ บัสต่างๆ ได้แก่บัสอ้างอิง บัสภาระไฟฟ้า และบัสที่มีแรงดันคงที่ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแจกแจงค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ

บัส	ค่าที่กำหนดมาให้	ค่าที่ต้องคำนวณ
บัสอ้างอิง (Swing bus)	V δ	P Q
บัสภาระไฟฟ้า (Load bus)	P Q	V δ
บัสมีแรงดันคงที่ (Gen. bus)	P V	Q δ

2.1.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

วิธีนิวตัน-ราฟสันสามารถสมการเขียนอยู่ในรูปแบบโพลาร์ได้ดังนี้

1. หาค่า P_k และ Q_k ที่ไหลเข้าไปในระบบที่ทุกๆบัส (ยกเว้นบัสอ้างอิง) โดยการสมมติค่าเริ่มต้นของแรงดันทั้งขนาดและมุมสำหรับโหนดเรชันที่ 1 ส่วนโหนดเรชันต่อไปให้นำค่าแรงดันที่ได้จากโหนดเรชันก่อนหน้ามาแทนค่าในสมการที่ (2.4) และ (2.5)
2. คำนวณหา ΔP_k และ ΔQ_k (ยกเว้นบัสอ้างอิง)
3. คำนวณหาค่าอีลิเมนต์ในจาโคเบียนเมทริกซ์โดยการแทนค่าแรงดันทั้งขนาดและมุมลงในสมการที่จะทำอนุพันธ์บางส่วน
4. ทำการลดรูปหรือหาส่วนกลับจาโคเบียนเมทริกซ์และคำนวณหาค่า $\Delta \delta_k$ และ $\Delta |V_k|$ ที่ทุกๆบัส
5. คำนวณค่าใหม่ของ δ_k และ V_k โดยการรวม $\Delta \delta_k$ และ ΔV_k เข้ากับค่า δ_k และ V_k ของโหนดเรชันก่อนหน้า
6. กลับสู่ขั้นตอนที่ 1 และทำกระบวนการ โหนดเรชันนี้ซ้ำ โดยอีลิเมนต์ใดที่ต้องหาค่าซึ่งต้องเกี่ยวข้องกับแรงดันก็ให้ใช้แรงดันทั้งขนาดและมุมจากโหนดเรชันล่าสุดสำหรับกระบวนการโหนดเรชันจะต้องดำเนินการจนกระทั่งทุกค่าของ ΔP และ ΔQ หรือทุกค่าของ $\Delta \delta_k$ และ ΔV_k มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด

ขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดพลั้วด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

1. ที่บัสโหลดบัสนี้จะทราบค่ากำลังจริง P_i^{sch} และกำลังรีแอกทีฟ Q_i^{sch} ซึ่งเป็นกำลังโดยความต้องการของโหลด
2. กำหนดค่าแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่ากับบัสอ้างอิง

$$P_i^k = -\sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \quad (2.4)$$

$$Q_i^k = -\sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \quad (2.5)$$

3. หาค่า $\Delta Q_i^{(k)}$, $\Delta P_i^{(k)}$ จากสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.6)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.7)$$

4. ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส
5. ทราบค่า P_i^{sch} กำหนดค่ามุมเฟสของแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่าของบัสอ้างอิงหรือกำหนด $\delta_i^{(0)} = 0$
6. เมทริกซ์จาโคเบียน $[J]$

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยแทนค่า $|V_i^{(k)}| \angle \delta_i^{(k)}$, $|V_j^{(k)}| \angle \delta_j^{(k)}$, $Y_{ij}^{(k)} \angle \theta_{ij}^{(k)}$

7. หาค่า $\Delta \delta_i^k$, $\Delta |V_i^k|$ จากสมการที่ (2.8)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i^k \\ \Delta |V_i^k| \end{bmatrix} = [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i^k \\ \Delta Q_i^k \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

8. หาค่า $\delta_i^{(k+1)}$, $|V_i^{(k+1)}|$ จากสมการที่ (2.9)

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.10)$$

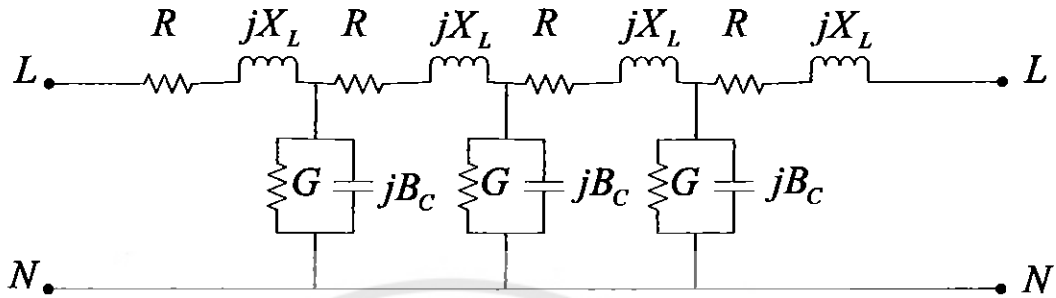
$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.11)$$

9. กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่โดยใช้ $\delta_i^{(k+1)}$, $|V_i^{(k+1)}|$ ไปเรื่อยๆจนกระทั่ง $\Delta P_i^k \leq \varepsilon$ และ $|\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon$ เมื่อ ε มีค่าน้อยมากโดยทั่วไปแล้วกำหนดให้ $\varepsilon = 2.5 \times 10^{-4}$

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสายส่ง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างปลายสายทั้ง 2 ข้างของสายส่งสามารถกระทำได้โดยใช้วงจรเทียบเคียงของสายส่งต่อเฟสในการวิเคราะห์หาค่าดังกล่าวโดยวงจรเทียบเคียงจะใช้แทนสายส่งที่ระยะต่างๆกัน 3 ระยะคือ สายส่งระยะสั้น, สายส่งระยะปานกลาง

และสายส่งระยะไกล ซึ่งประกอบด้วย พารามิเตอร์ตัวนำ (G), ตัวต้านทาน (R), ตัวเก็บประจุ (C) และ ตัวเหนี่ยวนำ (L) โดยเฉพาะค่าตัวเก็บประจุนั้นจะวิเคราะห์ในรูปชัศเชปแดนซ์ (jB_C) ส่วนตัวเหนี่ยวนำจะวิเคราะห์ในรูปรีแอกแตนซ์ (jX_L) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเคียงของสายส่งกำลังไฟฟ้า [1]

วงจรเทียบเคียงตามรูปที่ 2.2 อาจเรียกว่าวงจรเทียบเคียงพารามิเตอร์แบบกระจายและพึงตระหนักไว้ว่าการวิเคราะห์วงจรสายส่งทั้ง 3 ระยะจะใช้วงจรเทียบเคียงต่างกัน ไปด้วยอักษรและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนเพื่อสื่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าดังตารางที่ 2.2 สายส่งกำลังไฟฟ้ายังสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามระยะทางของสายส่งดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละประเภท

ประเภทสายส่งกำลัง	ค่าพารามิเตอร์ในสายส่งกำลังไฟฟ้า
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น (Short transmission line)	$A = 1, B = Z, C = 0, D = 1$
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะปานกลาง (Medium-length transmission line)	$A = 1 + \frac{ZY}{2}, B = Z, C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right), D = A$
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกล (Long transmission line)	$A = \cosh \gamma l, B = \sinh \gamma l, C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C}, D = \cosh \gamma l$

ตารางที่ 2.3 ประเภทสายส่งกำลังไฟฟ้าตามระยะทาง

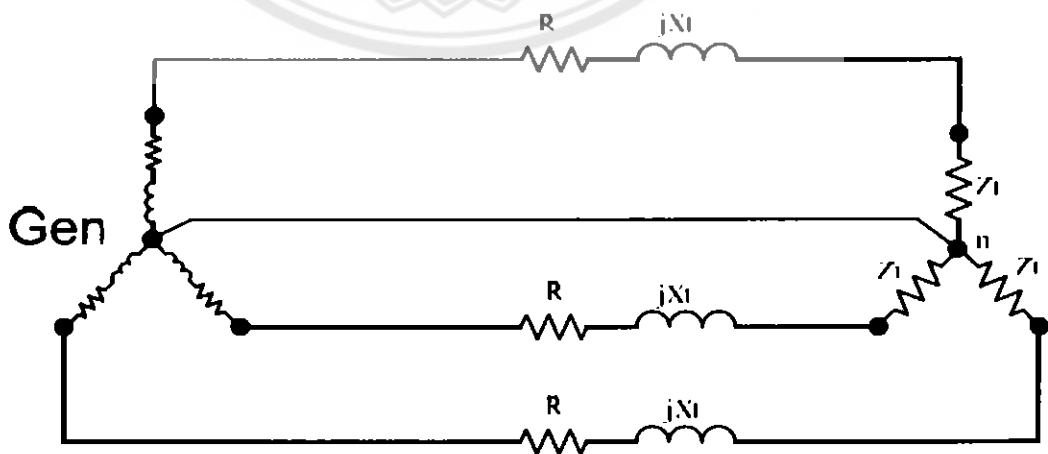
ประเภทสายส่งกำลัง	ระยะทางสายส่ง
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น (Short transmission line)	ไม่เกิน 80 km
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะปานกลาง (Medium-length transmission line)	ในช่วง 80 km ถึง 240 km
สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกล (Long transmission line)	มากกว่า 240 km

2.2.1 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น

สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น (Short transmission line) จะมีค่าตัวเก็บประจุต่อประจุไปถึงจุดนิวทรัลระหว่างสายต่ำมาก จึงทำให้ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ($-jX_c$) มีค่าสูงดังนั้นกระแสลัดประจุที่ผ่านค่าคาปาซิแตนซ์มีค่าเล็กน้อยทำให้มีผลต่อระบบน้อยมากซึ่งสามารถไม่นำมาคิดได้สามารถเขียนวงจรเทียบเคียงของสายระยะสั้นที่ส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าให้แก่โหลดแบบสตาร์ได้ดังรูปที่ 2.3

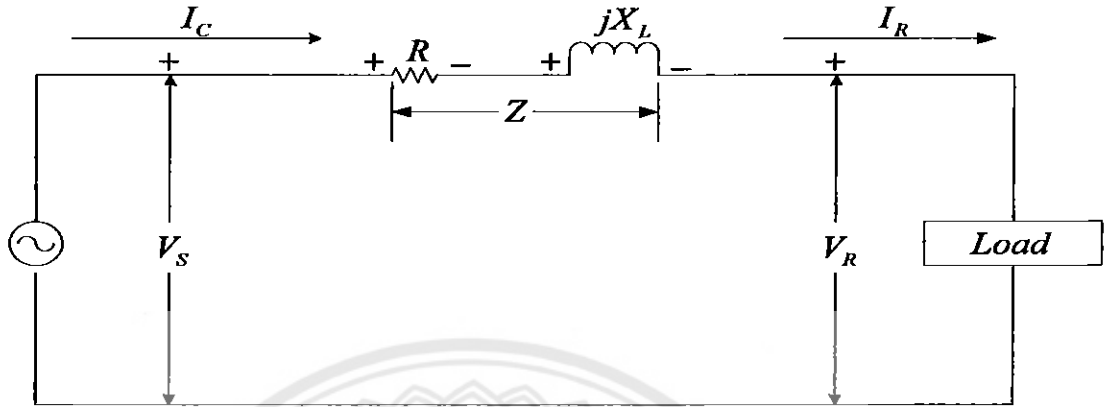
$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega c} \quad (2.12)$$

$$I_{ch} = \frac{V_n}{X_c} \quad (2.13)$$

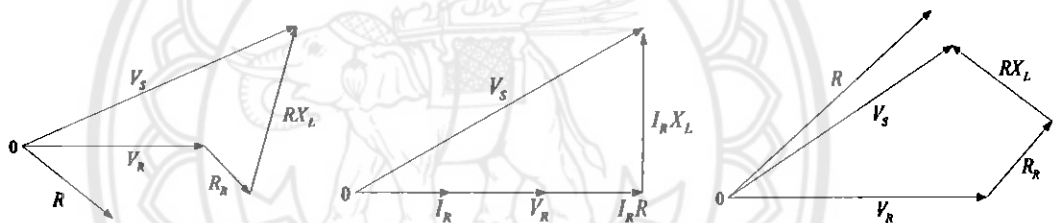


รูปที่ 2.3 วงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะสั้นส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าให้แก่โหลดแบบสตาร์ [3]

สำหรับการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าในวงจรสายส่งระยะสั้นจะใช้วงจรเทียบเคียงต่อเฟส ซึ่งสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.4 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพเฟสเซอร์ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะสั้นต่อเฟสมีค่าพารามิเตอร์ R และ L [2]



(ก) Pf โหลด 0.7 ด้าหลัง

(ข) Pf โหลดเป็น 1

(ค) Pf โหลด 0.7 นำหน้า

รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสเซอร์ของสายส่งระยะสั้น [2]

จากรูปที่ 2.4 อาศัยหลักการของ KVL จะ ได้ค่าของสมการเป็นดังนี้

$$V_s = V_R + I_R Z \tag{2.14}$$

$$I_S = I_R \tag{2.15}$$

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 เขียนเมทริกซ์ได้ตามสมการที่ (2.16)

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

และค่าคงที่ A B C และ D ได้ตามสมการที่ (2.16)

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ได้ค่าคงที่ $A = 1$

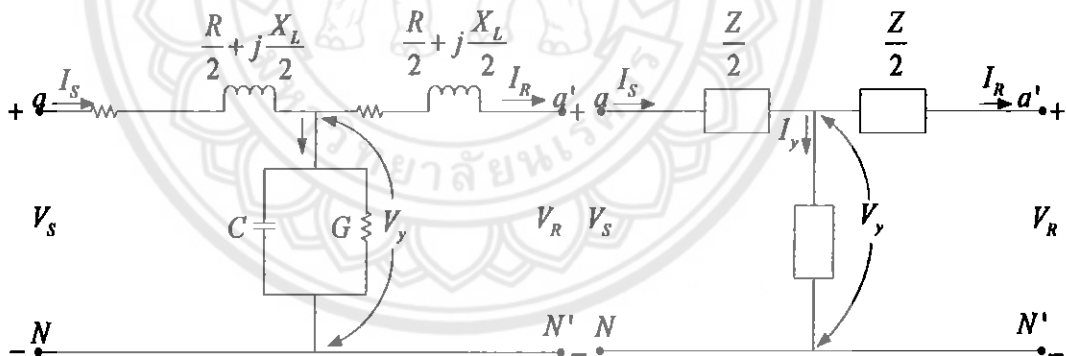
$B = Z$

$C = 0$

และ $D = 1$ ตามลำดับ

2.2.2 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะปานกลาง

สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะปานกลาง (Medium-length transmissionline) จะเกิดมีกระแสอัดประจุ (Charging current) ไหลผ่านแอดมิตแตนซ์ต่อขนาน (Y) เกิดขึ้นมากจนไม่สามารถที่จะละเลยหรือตัดแอดมิตแตนซ์ต่อขนานออกไปได้สามารถเขียนวงจรสมมูลแบบ T ได้ดังรูปที่ 2.6 และวงจรสมมูลแบบ π ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลแบบ T [1]

$$V_S = \left[I_S \times \frac{Z}{2} \right] + \left[I_R \times \frac{Z}{2} \right] + V_R \quad (2.18)$$

$$I_S = I_R + I_y = I_R + V_y Y$$

$$I_S = I_R + \left[V_R + \left(I_R \times \frac{Z}{2} \right) \right] Y \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ (2.19) ในสมการที่ (2.17) จะได้

$$\begin{aligned} V_S &= \left[I_R + \left(V_R + I_R \times \frac{Z}{2} \right) \times Y \right] \times \frac{Z}{2} + \left(I_R \times \frac{Z}{2} \right) + V_R \\ &= \underbrace{\left[1 + \frac{YZ}{2} \right]}_A \times V_R + \underbrace{\left[Z + \frac{YZ^2}{4} \right]}_B \times I_R \end{aligned} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$I_S = \underbrace{Y \times V_R}_C + \underbrace{\left[1 + \frac{YZ}{2} \right]}_D \times I_R \quad (2.21)$$

และเมื่อถือว่าค่าตัวนำ (G) ตัดทิ้งได้ นั่นคือ $I_C = I_Y$ และ $V_C = V_Y$ ในวงจรสมมูลแบบ T จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) เราสามารถจัดให้อยู่ในรูปของแบบต่างๆไปได้

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.22)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.23)$$

เมื่อค่า A B C และ D ของวงจรสมมูลแบบ T เป็น

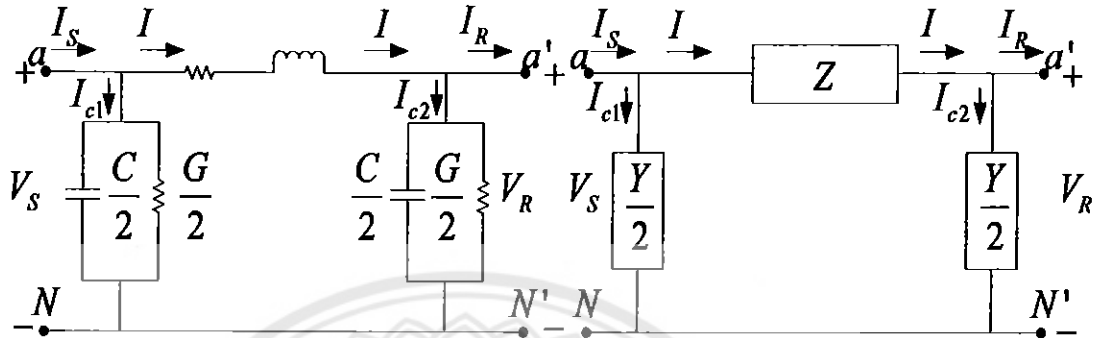
$$A = 1 + \frac{YZ}{2}, B = Z + \frac{YZ^2}{4}, C = Y, D = 1 + \frac{YZ}{2}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z + \frac{YZ^2}{4} \\ Y & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

ดังนั้น เมื่อรู้ค่า V_R และ I_R เราสามารถหาค่า V_S และ I_S สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$AD - BC = 1 \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z + \frac{YZ^2}{4} \\ Y & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลแบบ π [1]

กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็น

$$I_{C1} = V_S \times \frac{Y}{2}, I_{C2} = V_R \times \frac{Y}{2} \quad (2.27)$$

กระแสไหลผ่านความต้านทานอนุกรม I เป็น

$$I = I_{C2} + I_R = V_R \times \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.28)$$

นั่นคือวงจรสมมูลแบบ π

$$V_S = \left[V_R \times \frac{Y}{2} + I_R \right] \times Z + V_R$$

$$V_S = \underbrace{\left[1 + \frac{YZ}{2} \right]}_A \times V_R + \underbrace{Z}_{B} \times I_R \quad (2.29)$$

$$I_S = I_{C1} + I \quad (2.30)$$

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.31)$$

รูปแบบของเมทริกซ์จะเป็น

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y + \frac{Y^2Z}{4} & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเมื่อรู้ค่า V_R และ I_R เราสามารถหาค่า V_S และ I_S ได้โดย

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y + \frac{Y^2Z}{4} & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.23) และ (2.24) เราสามารถหาค่า V_R และ I_R ได้เมื่อรู้ค่า V_S และ I_S (หาส่วนกลับของเมทริกซ์ $A B C D$) โดยจากสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$I_R = \frac{I_S}{D} - \frac{C}{D} V_R \quad (2.33)$$

แทนสมการที่ (2.33) ลงในสมการที่ (2.22) ได้

$$V_S = A V_R + \frac{B}{D} I_S - \frac{BC}{D} V_R \quad (2.34)$$

หรือ

$$V_R = \frac{D V_S - B I_S}{AD - BC} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$V_R = \frac{V_S}{A} - \frac{B}{A} I_R \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.23)

$$I_S = \frac{C}{A} V_S - \frac{BC}{A} I_R + DI_R$$

หรือ
$$I_R = \frac{-CV_S + AI_S}{AD - BC} \tag{2.37}$$

จากสมการที่ (2.26); $AD - BC = 1$ หากำ V_R และ I_R เมื่อรู้ค่า V_S และ I_S ได้เป็น

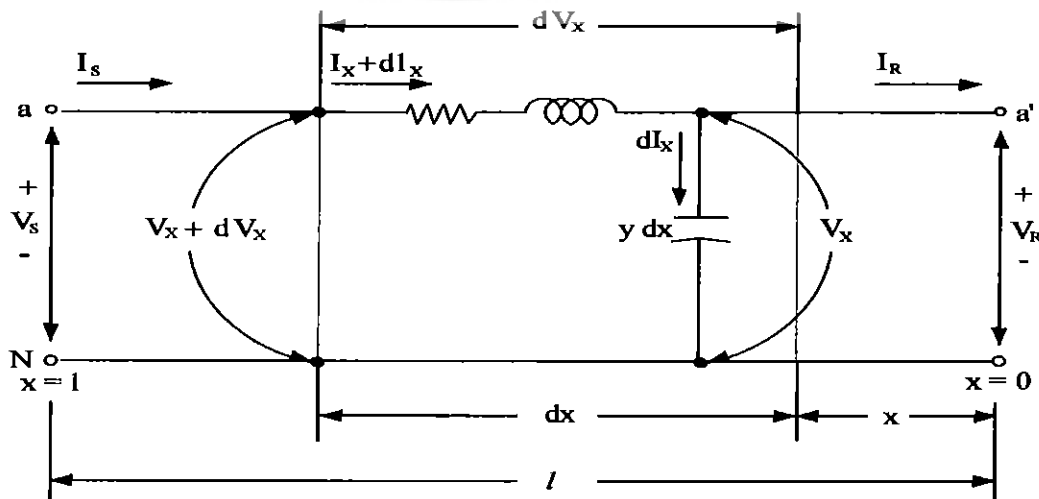
$$V_R = DV_S - BI_S \tag{2.38}$$

และ
$$I_R = CV_S - AI_S \tag{2.39}$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

2.2.3 สายส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกล (Long transmission line)

ในการคำนวณสายส่งที่มีความยาวมาก ๆ ต้องมีความละเอียดในการคำนวณมากกว่าในสายส่งที่มีความยาวปานกลาง กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ความต้านทาน (Y) นั้นจะถูกจับเป็นก้อนเหมือนแบบก่อนไม่ได้แต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้จะถูกทำให้กระจายสม่ำเสมอตามความยาวของสายส่งสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรแทนค่าต่อเฟสของสายส่งสามเฟสระยะไกล [2]

เมื่อให้ $Z =$ อิมพีแดนซ์ (ohm)

$Y =$ แอดมิตแตนซ์ (mho)

$X =$ ระยะทางที่คิดเพิ่มจากจุดรับขึ้นไปหาจุดส่ง

ดังนั้น ในช่วงความยาวสาย dx จะมีค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมเป็น zdx และแอดมิตแตนซ์ขนานเป็น ydx นั่นคือแรงดันตกบนช่วงสาย dx เป็น

$$dV = (I + dI)zdx$$

หรือ $dV = Izdx$ (2.41)

กระแสอัดประจุที่เพิ่มขึ้นเป็น

$$dI = Vydx$$
 (2.42)

เขียนฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลได้ดังนี้

$$\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}$$
 (2.43)

$$\cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}$$
 (2.44)

จัดสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกได้คือ

$$V_S = \left[\frac{V_R + I_R Z_C}{2} \right] e^{\gamma l} + \left[\frac{V_R - I_R Z_C}{2} \right] e^{-\gamma l}$$
 (2.45)

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l$$
 (2.46)

$$I_S = \left[\frac{\frac{V_R}{Z_C} + I_R}{2} \right] e^{\gamma l} - \left[\frac{\frac{V_R}{Z_C} - I_R}{2} \right] e^{-\gamma l}$$
 (2.47)

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma l \quad (2.48)$$

2.3 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในทางปฏิบัติการเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดสภาวะผิดปกติขึ้นระบบจะพยายามแก้ไขให้คืนสู่สภาวะปกติเพื่อป้องกันความเสียหายอันอาจเกิดกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทำให้การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญมากการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะคำนึงส่วนประกอบที่จำเป็นในระบบไฟฟ้าในช่วงเวลานานๆ ในภาวะการดำเนินงานปัจจุบันมีการเชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าหลายระบบเข้าด้วยกันซึ่งจะทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบดีขึ้นเพราะมีการสำรองการจ่ายกำลังไฟในภาวะฉุกเฉินซึ่งกันและกัน

เสถียรภาพ (Stability) เมื่อใช้ในระบบไฟฟ้าจะหมายถึงการที่ส่วนประกอบบางส่วนในระบบไฟฟ้าให้กำลังแรงซึ่งมีค่าเท่ากันหรือมากกว่ากำลังแรงที่มารบกวนระบบแล้วทำให้ระบบคืนสู่สภาวะสมดุล

เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system stability) มักจะใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะหมายถึงสภาวะที่เครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรตารีต่างๆ ในระบบไฟฟ้ายังคงซิงโครนิซึมซึ่งกันและกันตรงกันข้ามกับอินสตาบิลิตี (Instability) เป็นภาวะที่ระบบสูญเสียซิงโครนิซึม

เสถียรภาพลิมิต (Stability limit) หมายถึงกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ไหลผ่านจุดบางจุดในระบบไฟฟ้าเมื่อระบบรวมปฏิบัติงานด้วยเสถียรภาพ

โดยปกติเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเป็นคุณสมบัติความสามารถที่จะคงอยู่ในภาวะสมดุลถึงแม้จะมีภาวะปกติหรือภาวะไม่ปกติเกิดขึ้นก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้ในสภาวะการทำงานต่างๆ ชนิดของสภาวะการทำงานเมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สภาวะอยู่ตัว (Steady state condition) หมายถึงสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีคุณสมบัติค่อยๆ เปลี่ยนแปลงทีละน้อยหรือการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เช่น การเพิ่มโหลดทีละน้อยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ เมื่อเทียบกับความถี่ธรรมชาติของการออสซิลเลท (Oscillation) ของส่วนหลักในระบบหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์สนามในเครื่องจักรโรเตอร์ในการกระตุ้นต่อการเปลี่ยนแปลงในโหลด
2. สภาวะชั่วคราว (Transient state) เป็นสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงโดยฉับพลันในโหลดเป็นกำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดในระบบโดยปราศจากการสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง 3 อย่างคือ การเพิ่มหรือลดโหลดโดยฉับพลัน การทำงานแบบสวิตชิงและเกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง

2.4 เทคนิคการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้ากระแสสลับมีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟ และกำลังปรากฏ

1. กำลังจริง (Real power)

กำลังจริง (P) คือกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นมุมกำลังงานรูปแบบต่างๆที่ไหลคเช่นเตา หลอมโลหะเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นความร้อนหรือมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลและหลอดไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง เป็นต้น กำลังชนิดนี้คือกำลังเฉลี่ย (Average power) ที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์มีหน่วยเป็น (W) ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kW และ MW

องค์ประกอบทางไฟฟ้า (Element) ที่ทำให้เกิดกำลังจริงนั้นสามารถเขียนแทนด้วยความต้านทาน (R) ได้และค่าของกำลังจริงจะหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแส (I) และความต้านทานดังสมการ

$$P = I^2 R \quad (2.49)$$

2. กำลังรีแอกทีฟ (Reactive power)

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) คือกำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานรูปอื่นๆชั่วคราวโดยจะถูกเก็บรักษาไว้ภายในตัวเก็บพลังงานเพียงครึ่งวัฏจักร (Half cycle) และจะส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายพร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งในครึ่งวัฏจักรต่อไปทำให้กำลังเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเป็นศูนย์หรืออาจกล่าวได้ว่ากำลังรีแอกทีฟไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าแต่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมัน ตัวเก็บพลังงานดังกล่าวได้แก่ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) กล่าวคือตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กแต่ตัวเก็บประจุจะเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าเนื่องจากกำลังรีแอกทีฟที่เก็บรักษาไว้ในตัวเหนี่ยวนำ (Q_L) และเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ (Q_C) นั้นเกิดต่างเฟสกัน 180 องศา ดังนั้นกำลังรีแอกทีฟ จึงไม่จำเป็นต้องรับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงก็ได้เพียงแต่ให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังส่วนนี้แทนและทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายกำลังสำรองให้กับตัวเหนี่ยวนำในทำนองกลับกันถ้าไหลคต้องการกำลังรีแอกทีฟก็ให้ตัวเหนี่ยวนำจ่ายกำลังส่วนนี้แทนได้เช่นกันหรืออาจกล่าวได้ว่าตัวเก็บพลังงานทั้งสองชนิดนี้สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้แก่กันและกันได้โดยไม่ต้องพึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งหลักการนี้ได้นำไปใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของวงจรนั่นเองดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในภายหลัง กำลังชนิดนี้วัดได้จากวาร์มิเตอร์ มีหน่วยเป็น (Var) ซึ่งย่อมาจาก Volt ampere reactive ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kVAR และ MVAR

องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังรีแอกทีฟนั้นสามารถเขียนแทนด้วยรีแอกแตนซ์ (X) ซึ่งอาจจะเป็น X_L หรือ X_C ก็ได้และค่าของกำลังรีแอกทีฟจะหาได้จากความสัมพันธ์ของ กระแส (I) และรีแอกแตนซ์ได้ดังสมการ

$$Q = I^2 X \quad (2.50)$$

3. กำลังปรากฏ (Apparent power)

กำลังปรากฏ (S) คือกำลังไฟฟ้ารวมตามปกติใช้เป็นค่าบอกความสามารถในการรับกำลังงานของโหลดหรือการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังชนิดนี้หาได้จากผลคูณของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์นั้นๆ จึงมีหน่วยเป็น (VA) ถ้าหน่วยใหญ่จะเป็น kVA และ MVA

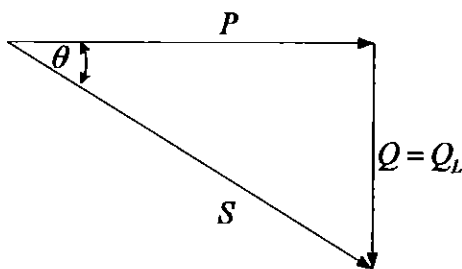
องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังปรากฏนั้นสามารถเขียนแทนด้วยอิมพีแดนซ์ได้ และค่ากำลังปรากฏจะหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.51) ความสัมพันธ์ของกำลังจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเป็นดังสมการที่ (2.52)

$$S = I^2 Z \quad (2.51)$$

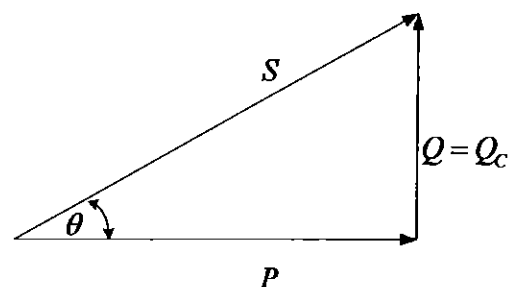
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.52)$$

2.4.1 การใช้สามเหลี่ยมมุมฉากแทนกำลังไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.52) แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าทั้งสามชนิดจะประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากพอดี และเรียกสามเหลี่ยมนี้ว่า รูปสามเหลี่ยมกำลัง (Power triangle) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



(ก) สามเหลี่ยมกำลังชนิดล้าหลัง



(ข) สามเหลี่ยมกำลังชนิดนำหน้า

รูปที่ 2.9 รูปสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า [1]

สามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสล้าหลังเกิดจากการแตกแรงของกระแสล้าหลังตามรูปที่ 2.9 (ก) และใช้แรงดันคูณทุกด้านของสามเหลี่ยมกระแสก็จะกลายเป็นสามเหลี่ยมกำลังซึ่งในกรณีนี้กำลังรีแอกทีฟของวงจรก็คือ กำลังรีแอกทีฟชนิดเหนี่ยวนำนั่นเองสำหรับสามเหลี่ยมกำลังชนิดกระแสนำหน้าจะเกิดจากวงจรชนิดความจุไฟฟ้าที่แสดงก็คือกำลังรีแอกทีฟชนิดความจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 (ข) จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่างๆดังนี้

$$P = S \cos \theta = VI \cos \theta \quad (2.53)$$

$$Q = S \sin \theta = VI \sin \theta \quad (2.54)$$

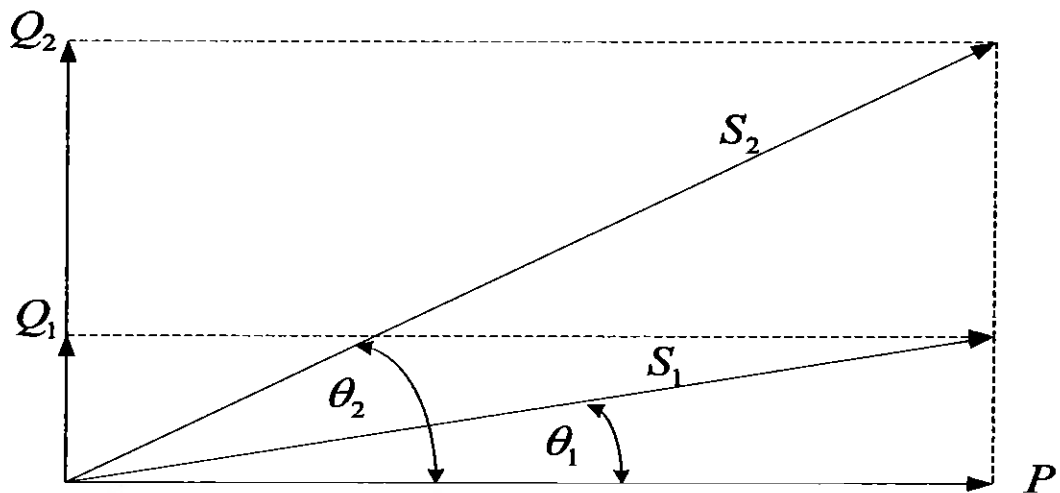
2.4.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ตัวประกอบกำลัง (Power factor) คือค่าคงที่เฉพาะของภาวะไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งหรือค่าคงที่ของกลุ่มภาวะไฟฟ้าที่บอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนไปเป็นกำลังจริงจากรูปสามเหลี่ยมกำลัง อาจหาค่าตัวประกอบกำลังได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังจริง (P) ต่อกำลังปรากฏ (S) และแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.55)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{VI \cos \theta}{VI} = \cos \theta = \frac{R}{Z} \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.55) แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบกำลังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนขององค์ประกอบทางไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของโหลดนั่นเอง โดยทั่วไปตัวประกอบกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่การบอกค่าของตัวประกอบกำลังส่วนมากมักจะบอกเป็นคำร้อยละ ตัวประกอบกำลังอาจแบ่งตามองค์ประกอบทางไฟฟ้าได้เป็น 3 ชนิดคือ ตัวประกอบกำลังชนิดยูนิต์ตัวประกอบกำลังชนิดล้าหลัง และตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้า

ผลเสียที่เกิดจากตัวประกอบกำลังต่ำดังรูปที่ 2.10 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นกำลังปรากฏ 2 ค่าที่จ่ายกำลังจริงได้เท่ากัน ถ้าเขียนสมการของกำลังปรากฏให้อยู่ในรูปของเลขเชิงซ้อนจะได้ดังนี้คือ $S_1 = P + jQ_1$ และ $S_2 = P + jQ_2$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อแตกแรงออกเป็น 2 แนวจะได้กำลังจริงเท่ากันแต่กำลังรีแอกทีฟจะแตกต่างกันตัวที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟมากกว่าจะมีตัวประกอบกำลัง (PF) ต่ำกว่าและมุมกว้างกว่า



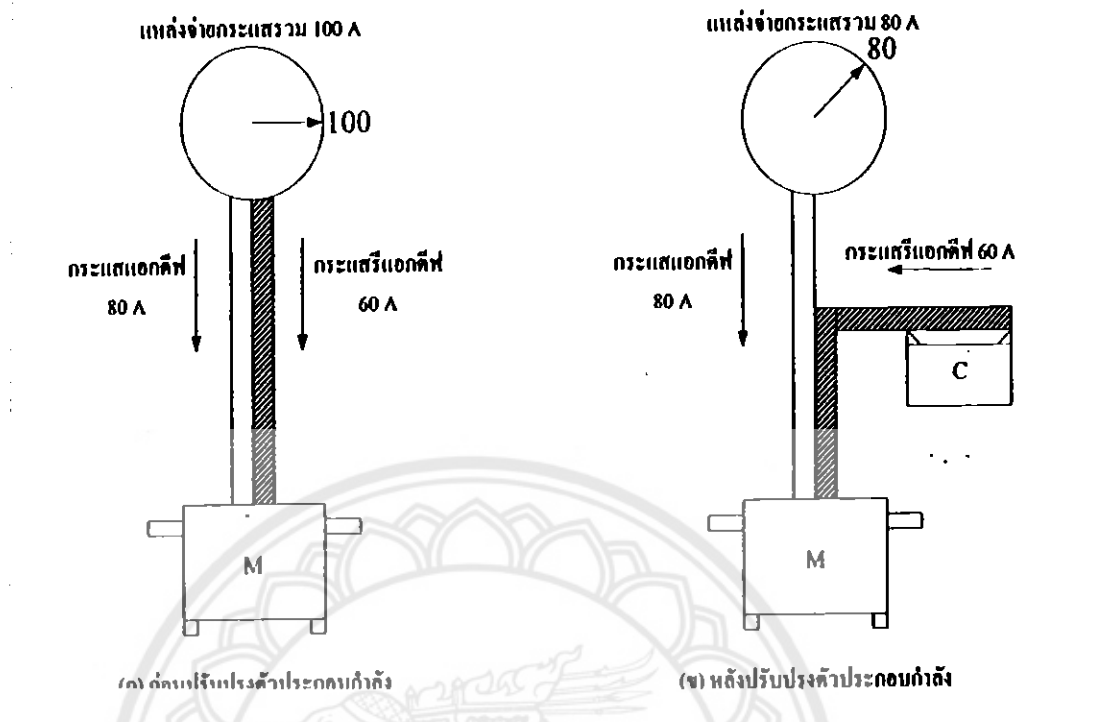
รูปที่ 2.10 รูปสามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า [1]

เนื่องจากกำลังปรากฏเป็นผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสถ้าดูรูปจะเห็นว่าขนาด S_2 ยาวกว่า S_1 ดังนั้นกระแสโหลด I_2 จึงมีค่ามากกว่ากระแสโหลด I_1 หรืออาจสรุปได้ว่าโหลดที่มีตัวประกอบกำลังต่ำจะใช้กระแสสูงแต่ได้กำลังจริงต่ำ และการที่ใช้กระแสสูงนี้เองจะก่อให้เกิดผลตามมาดังนี้คือ

1. เกิดแรงดันตกในสาย
2. เกิดกำลังสูญเสียในสาย
3. หม้อแปลงจ่ายกำลังจริงได้น้อยกว่าที่ควร
4. เกิดแรงดันตกในหม้อแปลงมากกว่าที่ควร
5. เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลงมากกว่าที่ควร

2.4.3 การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เนื่องจากระบบที่มีตัวประกอบกำลังต่ำมีผลเสียต่อระบบหลายประการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นแต่เนื่องจากโหลด โดยทั่วไปมีตัวประกอบกำลังเป็นชนิดล้าหลังเกือบทั้งหมด ดังนั้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงต้องใช้อุปกรณ์ที่ตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้ามาช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับโหลด โดยไม่ต้องดึงกำลังส่วนนี้ออกมาจากแหล่งจ่าย (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง) ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายสามารถจ่ายกำลังจริงให้แก่โหลดได้สูงขึ้นดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบ [2]

จากรูปที่ 2.11 (ก) เป็นรูปก่อนปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะเห็นว่ามอเตอร์ต้องการกระแส 2 ส่วนคือกระแสรีแอกทีฟ 80 A ไปเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานกลและกระแสรีแอกทีฟ 60 A ไปสร้างสนามแม่เหล็กรวมเป็นกระแสทั้งหมดเท่ากับ $\sqrt{80^2 + 60^2}$ หรือ 100 A ซึ่งกระแสจำนวนนี้และแหล่งจ่ายจะต้องจ่ายให้กับมอเตอร์

รูปที่ 2.11 (ข) เป็นรูปการปรับปรุงตัวประกอบกำลังแล้ว โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวจ่ายกระแสรีแอกทีฟให้กับมอเตอร์ทั้งหมดเรียกว่าปรับปรุงตัวประกอบกำลังเป็น 100 % ในกรณีนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายเฉพาะกระแสจริง 80 A เท่านั้นทำให้ลดการจ่ายกระแสลงไปถึง 20 % กระแสส่วนที่ลดไปนี้แหล่งจ่ายสามารถนำไปจ่ายให้กับโหลดอื่นได้

2.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะต้องใช้อุปกรณ์ช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้ากับวงจรนั้นแต่จะใช้อุปกรณ์ชนิดใดช่วยจ่ายกำลังดังกล่าวจะต้องทราบว่าตัวประกอบกำลังของระบบนั้นเป็นชนิดใดเสียก่อนเช่นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีโหลดปลายสายต่างๆจะทำให้กระแสอัดประจุของสาย ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังของสายกลายเป็นชนิดนำหน้าและแรงดันปลายสายจะสูงมากในกรณีนี้จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบขนานต่อคร่อมที่ปลายสายจึงจะช่วยลดแรงดันลงได้แต่โดยทั่วไปแล้วตัวประกอบกำลังของโหลดเกือบทั้งหมดจะเป็นชนิดล่าหลัง ดังนั้นการปรับปรุงตัว

ประกอบกำลังจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุ หรืออุปกรณ์อื่นที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุเช่นชิง โคน์สมอเตอร์เป็นตัวช่วยจ่ายกระแสรีแอกทีฟ

ตามปกติการปรับปรุงตัวประกอบกำลังนิยมใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้ากับวงจรมากที่สุดเพราะมีราคาต่อหน่วยสูงและเก็บจะไม่ต้องบำรุงรักษาเลยเพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหวและประการสำคัญคือมีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมากในปัจจุบันสามารถผลิตตัวเก็บประจุให้มีกำลังสูญเสียต่ำกว่า 0.5 W/kVAR อย่างไรก็ตามบางกรณีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยใช้ชิง โคน์สมอเตอร์ช่วยก็อาจเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ดำเนินการอยู่ ดังนั้นการตัดสินใจเลือกซื้ออุปกรณ์ชนิดใดเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจึงควรศึกษาให้รอบครอบเสียก่อน

1. ตัวเก็บประจุ

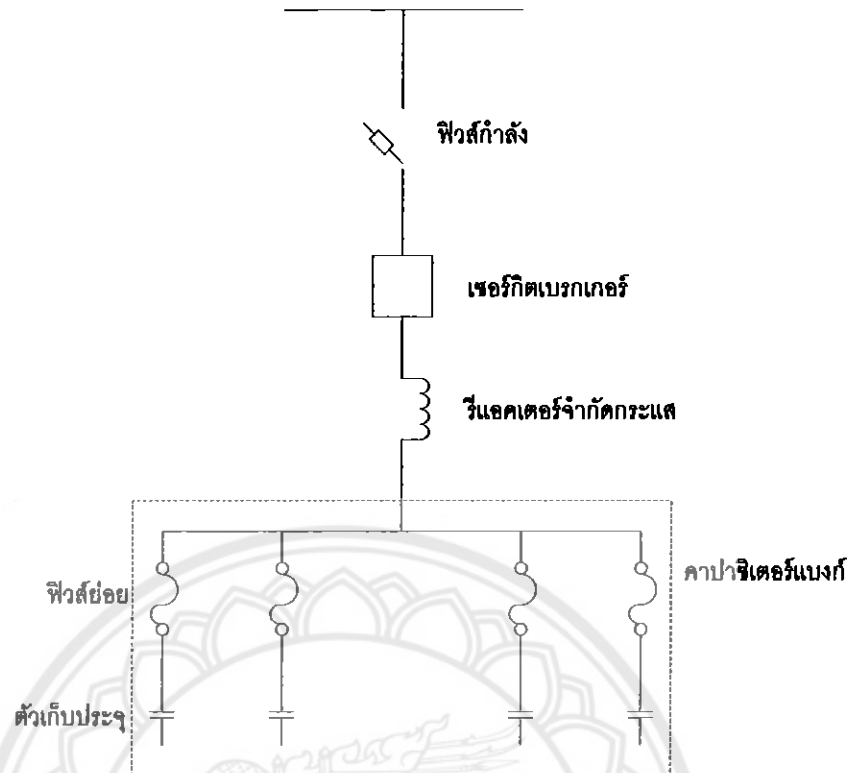
ตัวเก็บประจุคืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลังชนิดล้าหลังให้มีค่าสูงขึ้น โดยตัวของมันเอง ตัวเก็บประจุมีหลายชนิดส่วนใหญ่จะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นฉนวนตัวเก็บประจุมีหลายขนาดถ้าเป็นขนาดเล็กจะบอกพิกัดเป็น μF แต่ถ้าเป็นขนาดใหญ่จะบอกพิกัดเป็น kVAR และกำกับด้วยขนาดแรงดันใช้งาน ตามปกติผู้ผลิตนิยมผลิตเพื่อใช้กับแรงดัน 400 V มีขนาดตั้งแต่ 10, 15, 20, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200 จนถึง 300 kVAR

ในกรณีที่ต้องการขนาดสูงกว่าพิกัดที่ผลิตได้จะใช้วิธีการนำเอาตัวเก็บประจุหลายๆตัวมาต่อขนานกันและบรรจุอยู่ในภาชนะเดียวกัน โดยเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่ากลุ่มตัวเก็บประจุ (Capacitor bank) นอกจากนี้เมื่อต้องการต่อใช้งานที่แรงดันสูงจะต่อกันหลายๆตัวจนสามารถทนแรงดันนั้น ได้เหตุที่ไม่นิยมผลิตตัวเก็บประจุขนาดใหญ่หลายๆและทนแรงดันสูงๆได้เป็นเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมประกอบกัน

ในการต่อตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานกลุ่มตัวเก็บประจุรูปที่ 2.12 จะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันและตัดตอนร่วมอยู่ด้วยเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุและเพื่อความสะดวกในการทำงาน อุปกรณ์ที่จะต้องคิดตั้งดังกล่าวได้แก่

1. ฟิวส์กำลัง (Power fuse) ใช้เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นภายในกลุ่มตัวเก็บประจุทั้งหมด
2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) ใช้เป็นตัวป้องกันกระแสไหลเกินพิกัดกระแสลัดวงจรแรงดันเกินและไม่สมดุลของกลุ่มตัวเก็บประจุ โดยมีรีเลย์เป็นตัวสั่งตัด (Trip) นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวสับหรือปลดกลุ่มตัวเก็บประจุเข้าหรือออกจากการใช้งานอีกด้วย
3. รีแอกเตอร์จำกัดกระแส (Current limiting reactor) ใช้จำกัดกระแสกระชอก (Inrush current) ในขณะที่สับสวิทช์เพื่อต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร
4. ฟิวส์ย่อย (Unit fuse) ใช้เป็นตัวป้องกันกระแสลัดวงจรภายในตัวเก็บประจุย่อย

1610 9512
ป.ร.
ณ 618 9



รูปที่ 2.12 การต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ [2]

รูปที่ 2.12 เป็นตัวอย่างการต่อกลุ่มตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ 22 kV ถ้าเป็นตัวเก็บประจุชนิดเดี่ยวที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำจะมีอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดคอนเฉพาะฟิวส์และสวิตช์ปลดวงจรเท่านั้น

2. ซิงโครนัสมอเตอร์

ถ้าทำงานตามปกติก็จะมีคุณสมบัติเหมือนโหลดที่มีตัวประกอบกำลังชนิดล่าหลังแต่ซิงโครนัสมอเตอร์มีคุณสมบัติพิเศษประจำตัวคือถ้าปรับให้กระแสกระตุ้นไหลเกินปกติ (Over excited) ก็จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้าหรือตัวเก็บประจุได้จึงเรียกมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์

ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์มีข้อได้เปรียบตัวเก็บประจุอยู่บ้างเหมือนกันคือ สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ต่อเนื่องโดยการปรับกระแสกระตุ้นถ้าจะใช้ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบมักจะให้มันหมุนตัวเปล่านั้นมากกว่าหมุนขั้วโหลดทั้งนี้เพื่อให้จ่ายกระแสรีแอกทีฟได้สูงแต่ในกรณีที่จำเป็นจะให้มันช่วยขั้วโหลดพร้อมกับปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไปด้วยก็ได้แต่จะให้ผลน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ก็มีข้อเสียเปรียบตัวเก็บประจุเช่นเดียวพอสรุปได้ดังนี้คือ

1. มีราคาแพงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขดจ่ายกำลังรีแอกทีฟเท่าๆกัน

2. ถ้าแหล่งจ่ายถูกตัดกระแสชั่วคราวซึ่ง โครนีสคอนเดนเซอร์จะหลุดออกจากสภาพ
ซึ่งโครไนซ์และจะต้องเริ่มเดินเครื่องใหม่
3. ถ้าเกิดการลัดวงจร (Fault) ในระบบซึ่ง โครนีสคอนเดนเซอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแส
ลัดวงจรให้กับระบบด้วยทำให้กระแสลัดวงจรรุนแรงขึ้น

เนื่องจากซึ่ง โครนีสคอนเดนเซอร์มีข้อเสียเปรียบมากกว่าตัวเก็บประจุคังนั้นจึงไม่น่าสงสัยเลยว่า
ทำไมการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงนิยมใช้เฉพาะตัวเก็บประจุเท่านั้น

2.4.5 การแก้ค่าตัวประกอบกำลังของสายส่ง

ระบบสายส่งระยะปานกลาง (Medium length) และระบบสายส่งระยะไกล (Long length) สามารถที่จะทำการปรับค่ากำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าได้โดยวิธีการชดเชยค่า
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การชดเชยค่ากำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้สามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรมและ
รูปแบบขนานการชดเชยค่ากำลัง ไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series compensation) จะทำได้โดยการนำเอา
ชุดของตัวเก็บประจุเข้าไปต่ออนุกรมอยู่ในสายส่งตัวนำในแต่ละเฟสของระบบสายส่ง ส่วนการ
ชดเชยค่ากำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนานทำได้โดยการนำตัวเหนี่ยวนำไปต่ออยู่ระหว่างสายส่งกับ
นิวทรัลเพื่อที่จะใช้ลดค่าซัสเซปแตนซ์ (B_C) บางส่วนหรือลดค่าซัสเซปแตนซ์ของสายส่งไฟฟ้าให้
หมดไปซึ่งค่าซัสเซปแตนซ์นี้จะเกิดขึ้นมากในระบบสายส่งแรงสูงซึ่งการทำเช่นนี้เป็นสิ่งจำเป็นใน
ระบบสายส่งแรงสูง

การชดเชยค่ากำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรมจะเป็นตัวที่ช่วยลดค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อ
อนุกรมอยู่ในสายส่งลงเพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในสายส่งเหล่านี้จะเป็นต้นเหตุของการ
เกิดแรงดันตกคร่อม ในสายส่งและค่านี้จะเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญมากที่จะยินยอมให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่
มีค่ามากที่สุด (Maximum power) ไหลผ่านระบบสายส่งนั้นๆ

$$P_{R,max} = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} - \frac{|V_S| |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.56) จะเห็นว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะสามารถส่งผ่านระบบสายส่งไฟฟ้านั้นๆ
นั้นๆไปได้จะขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าคงที่ของวงจร (B) ซึ่งค่า B นี้จะเท่ากับค่า Z ถ้าหากว่า
วงจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้านั้นๆเป็นแบบ π จะมีค่าเท่ากับ $Z (\sinh \gamma l) / \gamma l$

ในการคำนวณหาขนาดของรีแอกแตนซ์ชุดตัวเก็บประจุ (X_C) ที่จะนำมาใช้ในการต่อ
อนุกรมอยู่ในวงจรนี้จะขึ้นอยู่กับค่าของอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) ทั้งหมดที่มีอยู่ในสายส่งไฟฟ้านั้นๆ
ซึ่งเราจะใช้คำว่าคอมเพนเซชันแฟกเตอร์ซึ่งค่านี้ถูกนิยามดังนี้

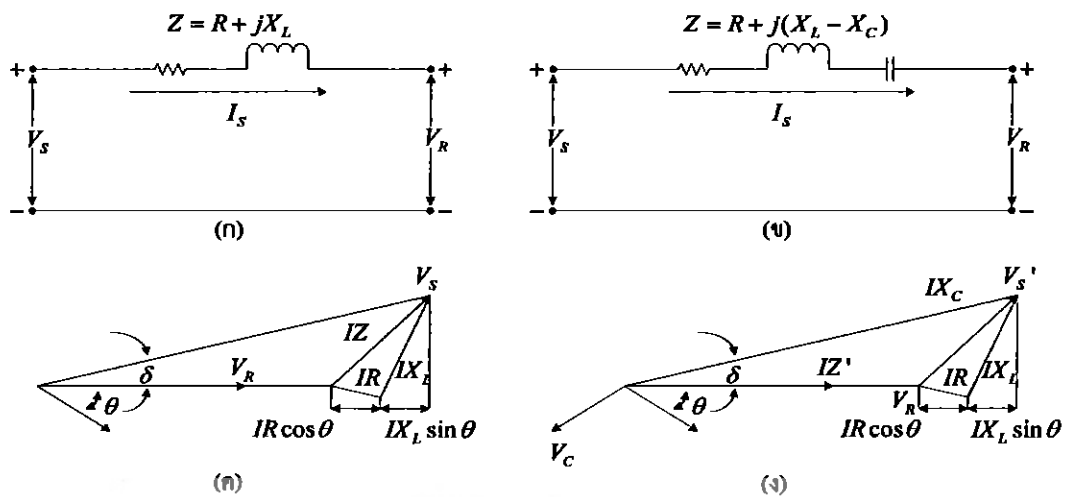
$$\text{คอมเพนเซชันแฟกเตอร์} = \frac{X_C}{X_L} \quad (2.57)$$

เมื่อ X_C คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของชุดตัวเก็บประจุที่จะนำมาต่ออนุกรมต่อเฟส
 X_L คือ ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้าต่อเฟส

1. การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Series capacitor)

ตัวเก็บประจุแบบอนุกรม คือตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อชดเชยคอมเพนเซชันค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งนั้นๆซึ่งมีลักษณะการต่อและค่ามุมเฟส (Phase diagram) แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะให้ข้อดีดังต่อไปนี้

- 1.1 ในกรณีที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำและวงจรสายส่งมีค่า X_L สูงจะทำให้ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งมีมาก ดังนั้นการลดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่มีอยู่ในสายส่งสามารถทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพราะตัวเก็บประจุจะไปชดเชย X_L ของสายส่งดังนั้นสภาวะดังกล่าวการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Series capacitor) จะให้ผลดีกว่าต่อแบบขนาน
- 1.2 ตัวเก็บประจุที่ต่อแบบอนุกรมจะสามารถลดแรงเคลื่อนตกคร่อมภายในสายได้โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังที่ปลายสายส่งและวงจรอื่นๆการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมนี้จะไม่ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียแต่จะลดผลของกำลังสูญเสียในสายส่งเท่านั้น
- 1.3 องค์กรประกอบของค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมจะถูกกำจัดโดยอัตโนมัติเนื่องมาจากค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมในตัวตัวเก็บประจุแบบอนุกรม



รูปที่ 2.13 การเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการต่อและไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม (ก) และ (ค) ไม่ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม ส่วน (ข) และ (ง) ต่อตัวเก็บประจุอนุกรม [2]

เมื่อสายส่งที่มีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรมหรือไม่มีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งไปยังภาระไฟฟ้าตามที่ต้องการข้อควรระวังก็คือ สภาพการทำงานของสายส่งในขณะที่มีโหลดน้อย หรือตอนที่ไม่มีภาระไฟฟ้า (No-load) ค่ากระแสไฟฟ้าประจุ ที่เกิดขึ้นจะเป็นแฟกเตอร์สำคัญในการนำมาพิจารณาจะได้ว่า

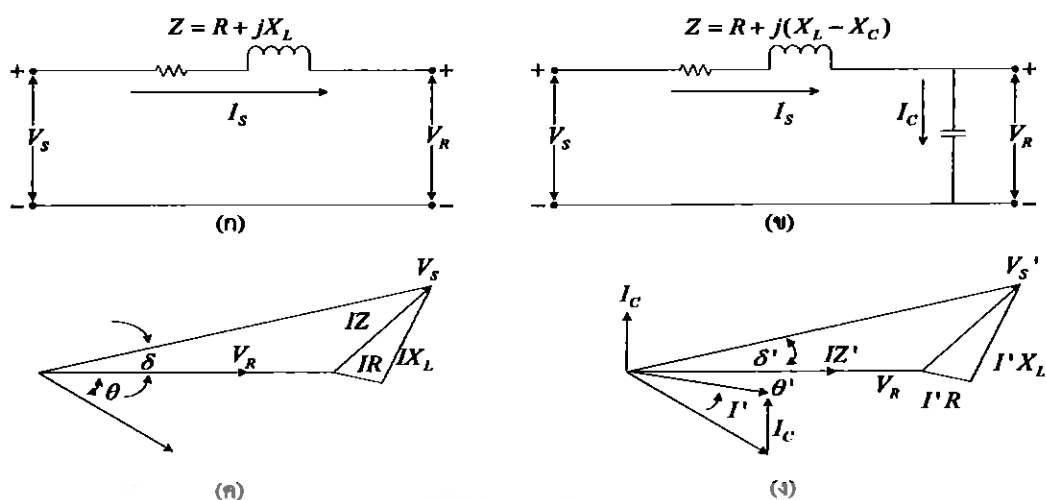
$$I_{chg} = B_c V \tag{2.58}$$

ในที่นี้ B_c = ค่าชดเชยแดนซ์ขนานทั้งหมดของสายส่ง
 V = ค่าแรงเคลื่อนที่ทำงานปกติกับนิวท์ล

แต่การหาค่ากระแสประจุด้วยการคำนวณจะได้ค่าไม่เที่ยงตรงนักเพราะว่าค่าแรงเคลื่อน $|V|$ มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดความยาวของสายส่งนั่นเอง

2. การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt capacitor)

การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน คือตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับสายซึ่งใช้มากในระบบไฟฟ้า โดยโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานนี้จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้แก่โหลดพวก L หรือความเหนี่ยวนำของโหลด ซึ่งมีการทำงานคล้ายกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคเน็ล โดยลักษณะการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานดังรูปที่ 2.14

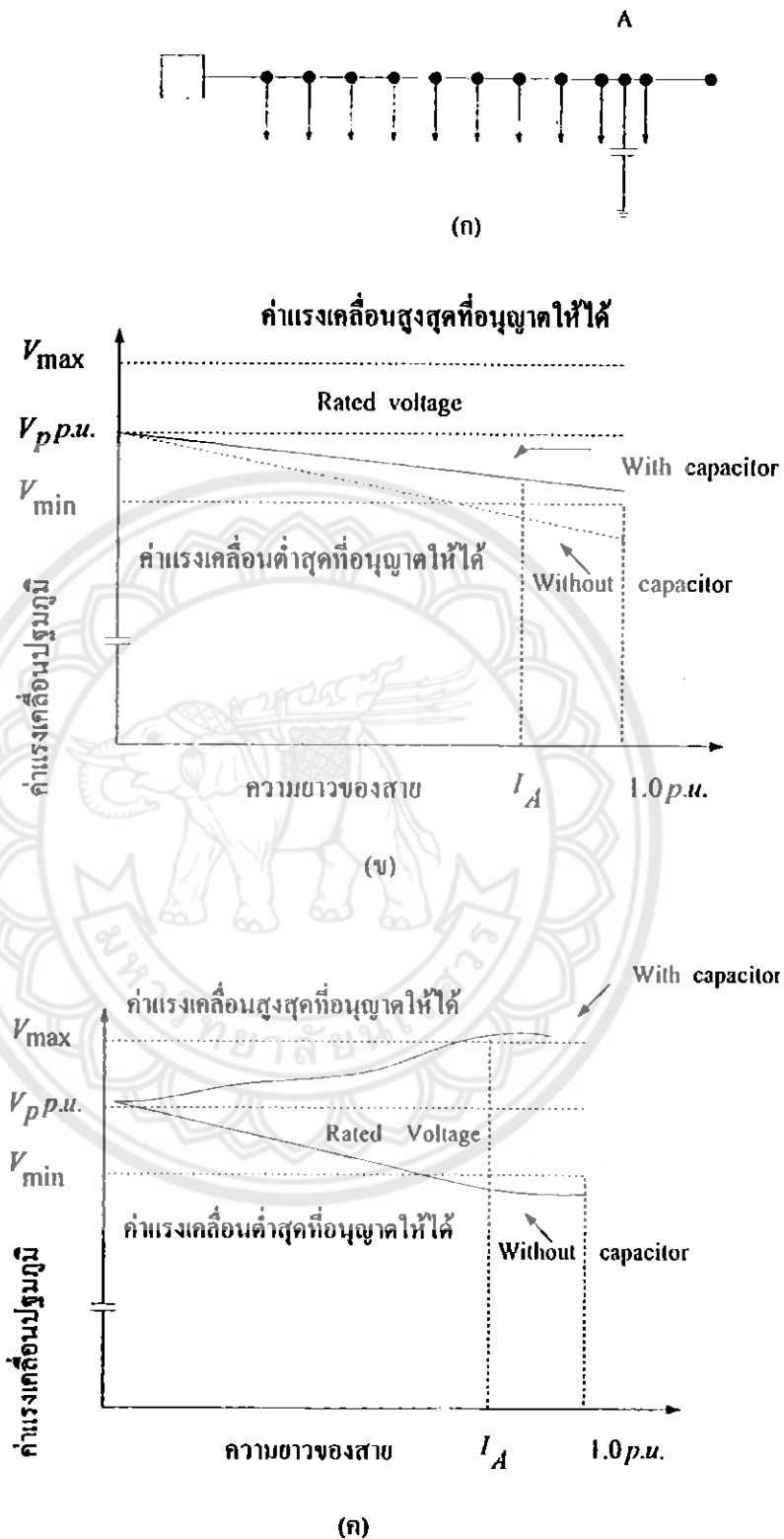


รูปที่ 2.14 การเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการต่อและไม่ต่อตัวเก็บประจุขนาน โดย (ก) และ (ค) ไม่ต่อตัวเก็บประจุขนาน ส่วน (ข) และ (ง) ต่อตัวเก็บประจุขนาน [2]

การต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าในระบบไฟฟ้าให้ผลดีดังนี้

- 2.1 ความมั่นใจได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAR) ไปยังโหลดจะต้องมีค่าไม่เกินความสามารถของแหล่งกำเนิดที่จะจ่ายได้
- 2.2 ความสามารถลดกำลังสำรองของระบบไฟฟ้าที่ต้องมีตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆที่สำรองไว้ให้มีขนาดลดลงได้
- 2.3 ลดขนาดของกระแสที่จ่ายให้โหลดให้มีขนาดเล็กลงซึ่งเป็ผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power losses) ที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลง
- 2.4 ทำให้การรักษาแรงดันดีขึ้น

การชดเชยแบบขนานอีกประการหนึ่งก็คือการลดลงของค่าแรงเคลื่อนที่ปลายทางของสายส่งซึ่งในสายส่งแรงเคลื่อนสูงที่มีความยาวมากๆนั้นค่าแรงเคลื่อนที่ปลายสายนั้นมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงมากกว่าเมื่อตอนไม่มีภาระไฟฟ้าดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การต่อตัวเก็บประจุแบบคงที่ในสายส่ง (ก) สายส่งที่มีการกระจายภาระไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (ข) ในกรณีที่มีการไฟฟ้ามีค่ามาก (ค) กรณีที่มีการไฟฟ้ามีน้อย [2]

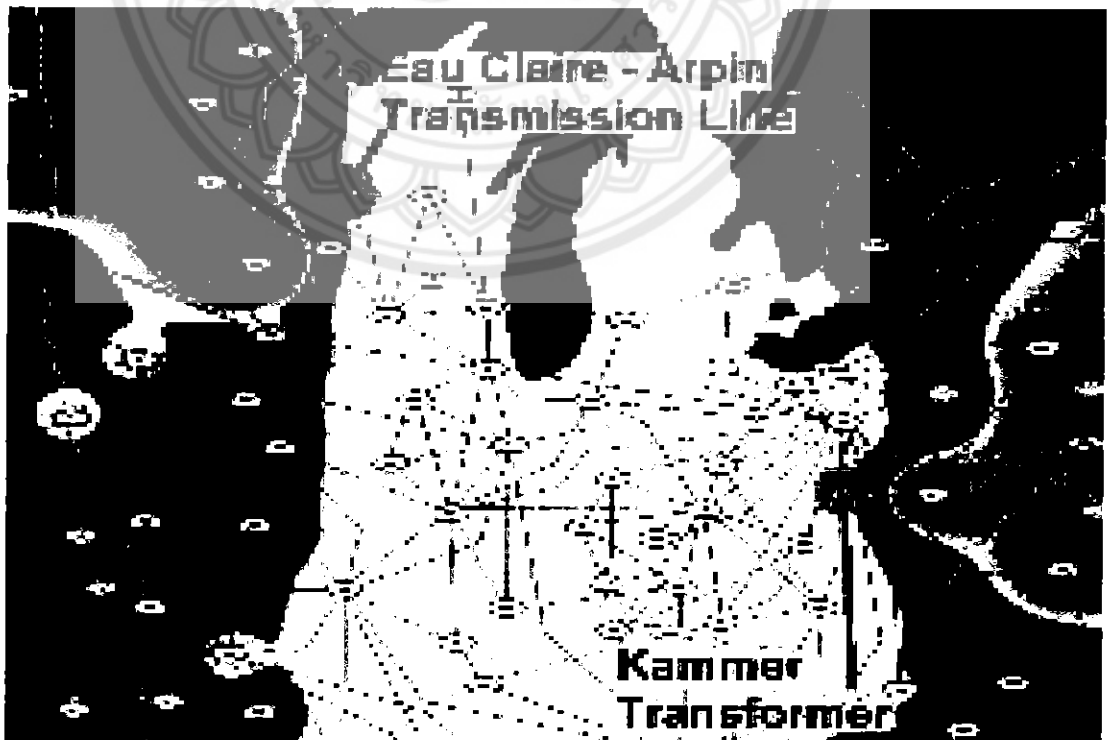
2.5 โปรแกรม PowerWorld

โปรแกรม PowerWorld คือ โปรแกรมจำลองการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถจำลองลักษณะของการเกิดลัดวงจรแบบต่างๆสามารถวิเคราะห์การไหลของกำลังและคำนวณการไหลของกำลังได้ด้วยวิธีนิวตัน – ราฟสัน โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆให้ครบทำให้เราสามารถวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงมุม โรเตอร์ และปรับค่าของระบบเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความเฉื่อยเพื่อให้เกิดเสถียรภาพได้เร็วขึ้น

โปรแกรม PowerWorld เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการมองเห็นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับนักวางแผนนักการตลาดด้านกำลังผู้ประกอบการ นักศึกษาและบุคคลอื่นที่ต้องการเข้าถึงข้อมูลระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ใช้งานง่าย

การสร้างระบบไฟฟ้าของเราจะแสดงการโต้ตอบและเครื่องมือการนำเสนอที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยให้องค์กรของคุณที่มีความต้องการที่หลากหลายจากงานนำเสนอและการศึกษาเพื่อการตลาดให้กับลูกค้าและเตรียมการสำหรับการพิจารณาให้ถูกต้อง

โปรแกรม PowerWorld สามารถสร้างระบบการจำลองระบบไฟฟ้าแรงดันสูงและการวิเคราะห์หลักของซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาทางพลังที่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การไหลของพลังงานในระบบที่มีมากถึง 100,000 บัสด้วยรูปที่ 2.16



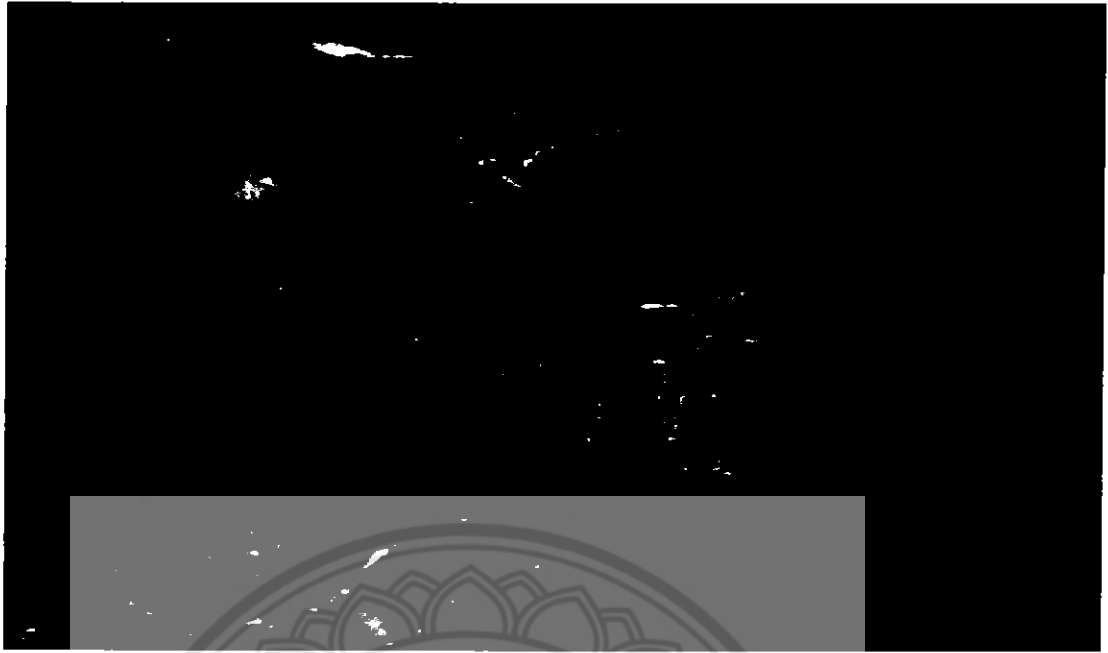
รูปที่ 2.16 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ 100,000 บัส [4]

การจำลองประกอบด้วย

1. ตัวเลือกการแก้ปัญหาการไหลของกำลังจำนวนมาก
2. การไหลแรงดันไฟฟ้าและการคำนวณการสูญเสีย
3. การวิเคราะห์ความผิดปกติแบบสมดุลและไม่สมดุล
4. เครื่องมือในการวิเคราะห์อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพและหลากหลายกรณี
5. และตัวเลือกเครื่องมืออื่นๆอีกมากมายเพื่อให้ตรงกับการวิเคราะห์ระบบกำลังที่ต้องการ
6. การรักษาการไหลของพลังงานที่เหมาะสม (Optimal power flow; OPF)
7. การรักษาความปลอดภัยที่จำกัด (Security constrained OPF; SCOPF)
8. การสำรอง (Reserves; OPF)
9. ความสามารถในการโอน (Transfer capability; ATC)
10. การประมวลผลโครงสร้างแบบบูรณาการ (Integrated topology processing)
11. เครื่องมือการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเปรียบเทียบกับแรงดัน (Realand reactive power)
12. เสถียรภาพชั่วคราว (Transient stability)
13. การคำนวณการกระจาย (Distributed computing)
14. เซอร์เวอร์อัตโนมัติ (Automation server simauto)

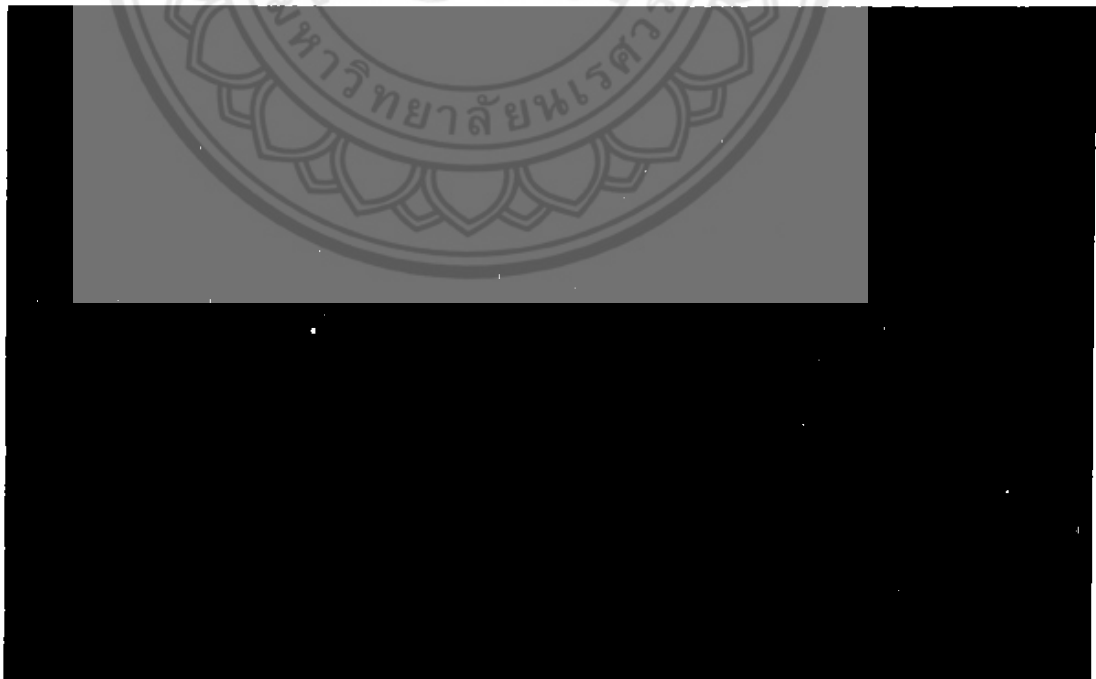
รีทรีฟเวอร์และซอฟต์แวร์ OPS-X (Retriever and OPS-X software)

รีทรีฟเวอร์และซอฟต์แวร์ OPS-X เป็นเครื่องมือแสดงข้อมูลเรียลไทม์ใช้สำหรับการดำเนินการระบบ, นักวิเคราะห์ระบบและนักการตลาดด้านไฟฟ้าเพื่อการรับและวิเคราะห์ข้อมูล ผู้ใช้สามารถนำเข้าข้อมูลเรียลไทม์เช่น Geographic information system (GIS) ใช้ในการแสดงข้อมูลสภาพอากาศที่ทันสมัยซึ่ง GIS นำมาใช้สนับสนุนข้อมูลเช่น ห้องสมุดที่สมบูรณ์และข้อมูลชายแดนโดยเครื่องมือการสร้างแผนภาพแบบอัตโนมัติดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์ข้อมูลชายแดน [4]

โปรแกรม PowerWorld เป็นเครื่องจำลองขั้นตอนของเวลา (รวมทั้งพื้นฐานของโปรแกรมจำลองและรีทริฟเวอร์) ช่วยให้สามารถระบุเงื่อนไขการดำเนินงานและการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับ ณ ตำแหน่งของเวลาดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [4]

โปรแกรม PowerWorld ใช้กราฟฟิกความละเอียดสูงแผนภาพบรรทัดเดียวทางภูมิศาสตร์ที่มีการสำรวจได้อย่างง่ายดายและมีการเชื่อมโยง 3 มิติรูปทรงแผนภูมิวงกลมขนาดแบบไดนามิกและการสร้างภาพแผนภาพการไหลของระบบที่เหมือนจริงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์แบบ 3 มิติ [4]

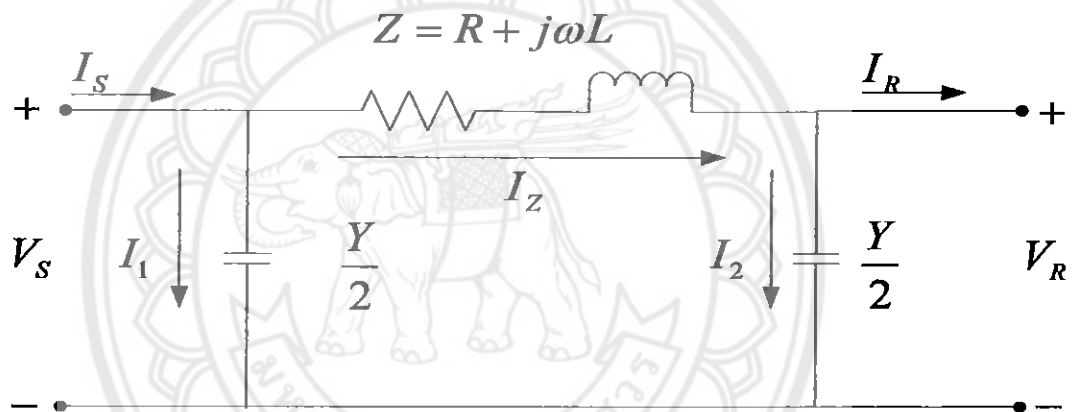
บทที่ 3

การปรับปรุงแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการปรับปรุง โดยนำตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่อขนานเข้าในระบบไฟฟ้าเพื่อทำการปรับปรุงระดับแรงดันให้เหมาะสม

3.1 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งระยะปานกลาง

สายส่งระยะปานกลางมีความยาวระหว่าง 80 – 240 km สามารถเขียนวงจรสมมูลแบบ π ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งขนาดกลาง

ค่าตัวเก็บประจุ (C) แบ่งไปที่ต้นสายและปลายสายด้านละครึ่งหนึ่งดังนั้นค่าแอดมิตแตนซ์เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้า จึงมีค่า $Y/2$ (S) จากรูปที่ 3.6 หาความสัมพันธ์ของ V_R, I_R, V_S และ I_S ได้เป็น

$$\begin{aligned}V_S &= (I_2 + I_R)Z + V_R \\ &= \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \\ &= V_R \frac{Y}{2} + ZI_R + V_R\end{aligned}$$

$$= \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \quad (3.1)$$

$$I_S = I_1 + I_2 + I_R$$

$$= V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R$$

$$= Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (3.2)$$

จากสมการ

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R$$

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y + \frac{Y^2 Z}{4} & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z + \frac{YZ^2}{4} \\ Y & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix}$$

จาก $V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R$ กรณีไม่มีภาระโหลดที่ปลายสาย (No load) แทน $I_R = 0$

จะได้

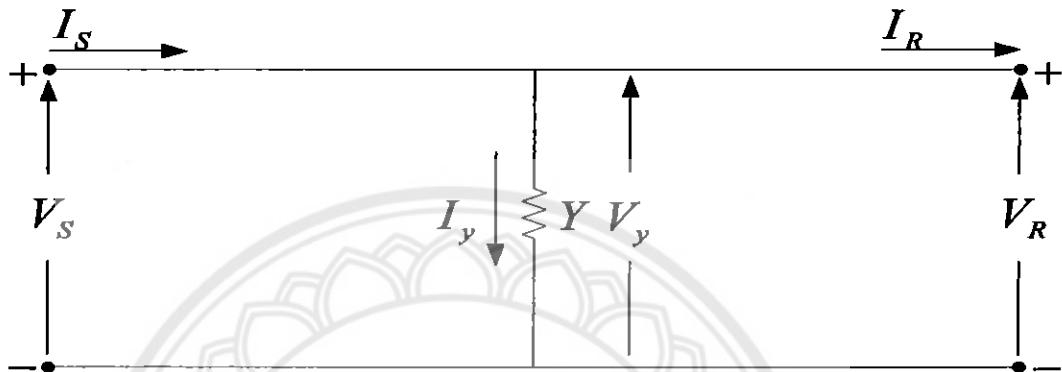
$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R$$

$$V_{R,NL} = \frac{V_S}{\frac{ZY}{2} + 1}$$

หรือ
$$V_{R,NL} = \frac{V_S}{A} \quad (3.4)$$

3.2 วงจรสมมูลแบบ T ของสายส่งระยะสั้น

สายส่งระยะสั้นมีความยาวไม่เกิน 80 km สามารถเขียนวงจรสมมูลแบบ T ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลแบบ T ของสายส่งขนาดสั้น

จากรูปที่ 3.2 เขียนเป็นสมการจะได้ว่า

$$V_S = V_Y = V_R \quad (3.5)$$

$$I_S = I_Y = I_R \quad (3.6)$$

$$I_S = V_S Y = I_R \quad (3.7)$$

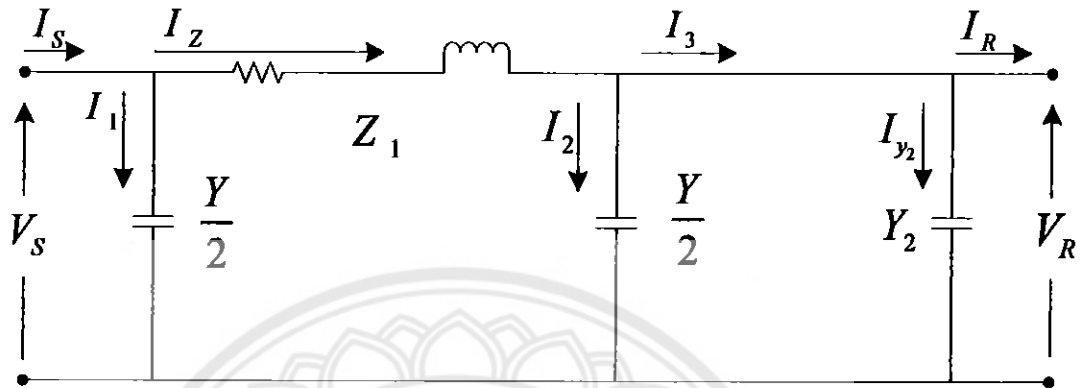
$$I_S = V_R Y = I_R \quad (3.8)$$

จัดอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะได้

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

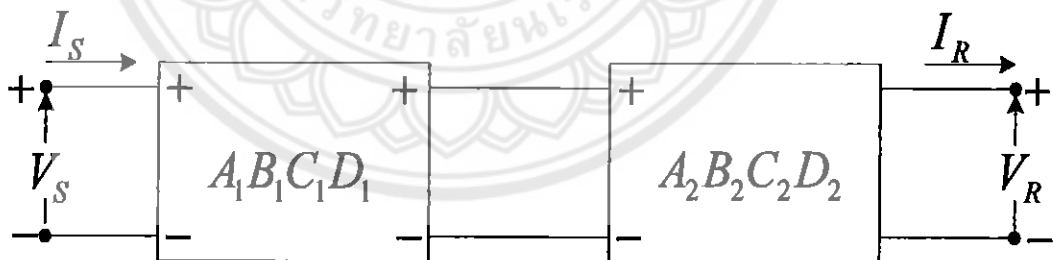
3.3 วงจรสมมูลแบบ π เมื่อต่อตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.1 เมื่อนำมาต่อตัวเก็บประจุแบบขนานที่ปลายสายมีค่าแอดมิตแตนซ์ Y_2 สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลแบบ π เมื่อต่อตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.1 วงจรสมมูลแบบ π ต่ออนุกรมกับรูปที่ 3.2 วงจรสมมูลแบบ T เมื่อแอดมิตแตนซ์ของวงจรสมมูลแบบ T คือตัวเก็บประจุซึ่งมีค่าแอดมิตแตนซ์เท่ากับ Y จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.3 และผลคูณของแอดมิตแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 3.4 ซึ่ง A, B, C, D เป็นเมทริกซ์ของวงจรสมมูลแบบ π และ A, B, C, D_2 เป็นเมทริกซ์ของวงจรสมมูลแบบ T



รูปที่ 3.4 สายส่งที่มีการต่อขนาน

ดังนั้นสมการที่ (3.3) และ (3.9) จะได้ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสต้นทางและปลายทาง

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_1 Z_1}{2} & Z_1 \\ Y_1 + \frac{Y_1^2 Z_1}{4} & 1 + \frac{Y_1 Z_1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$A = A_1 A_2 + B_1 C_2 = 1 + \frac{Y_1 Z_1}{2} + Z_1 (Y_2)$$

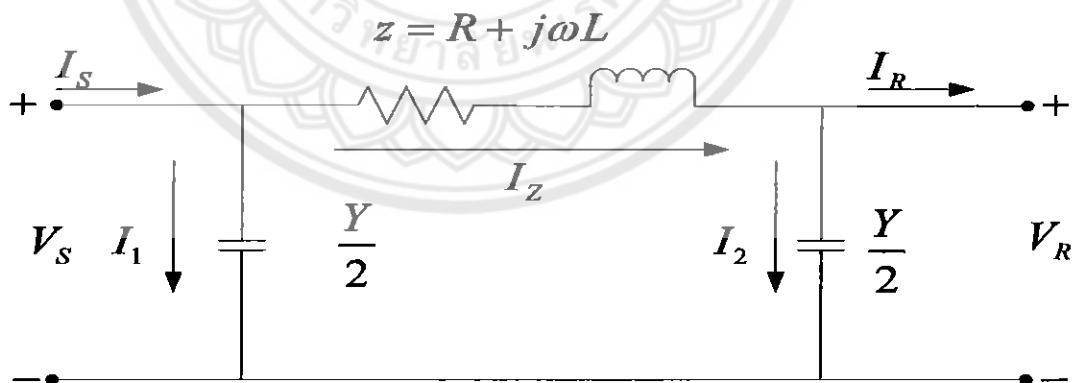
$$B = A_1 B_2 + B_1 D_2 = Z_1$$

$$C = C_1 A_2 + D_1 C_2 = Y_1 + \frac{Y_1^2 Z_1}{4} + \left(1 + \frac{Y_1 Z_1}{2}\right) Y_2$$

$$D = C_1 B_2 + D_1 D_2 = \left(1 + \frac{Y_1 Z_1}{2}\right)$$

3.4 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ

ระบบสายส่ง 3 เฟส 50 Hz แรงดัน 230 kV ยาว 200 km มีพารามิเตอร์สายส่งเป็น $z = 0.032 + j0.53 \Omega/\text{km}$, $y = j 4.2 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ทางด้านขาออกมีค่าโหลดเต็มพิกัดคือ 400 MW ต่ออยู่มีตัวประกอบกำลัง 0.99 แบบนำหน้าที่แรงดัน 95% ของแรงดันพิกัดดังรูปที่ 3.5 ดังนั้นเราจะทำการหาค่า พารามิเตอร์ ABCD ของวงจรแบบ π แรงดัน กระแสและกำลังฝั่งขาเข้า เปอร์เซ็นต์การควบคุมแรงดัน (%Voltage regulation) และ กำลังไฟฟ้าโหลดสูงสุด ($P_{L\max}$)



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ

1. พารามิเตอร์ ABCD ของวงจรแบบ π

อิมพีแดนซ์อนุกรม

$$Z = zl = (0.032 + j0.530)200 = 6.4 + j70 = 70.29 \angle 80.78^\circ \Omega$$

แอดมิตแตนซ์ต่อขนาน

$$Y = y_l = (j4.2 \times 10^{-6})200 = 8.4 \times 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

จากสมการที่ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned} A = D &= 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{1}{2}(8.4 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)(70.29 \angle 80.78^\circ) \\ &= 1 + 0.02952 \angle 174.78^\circ = 0.9706 + j0.00269 = 0.9706 \angle 0.159^\circ \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned} B = Z &= 70.29 \angle 80.78^\circ \Omega, C = 1 + \frac{ZY}{2} \\ &= (8.4 \times 10^{-4} \angle 90^\circ) \left(1 + \frac{1}{4}(8.4 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)\right) (70.29 \angle 80.78^\circ) \\ &= (8.4 \times 10^{-4} \angle 90^\circ) (1 + 0.01476 \angle 147.78^\circ) (70.29 \angle 80.78^\circ) \\ &= 8.277 \times 10^{-4} \angle 90.08^\circ \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9706 \angle 0.159^\circ & 70.29 \angle 80.78^\circ \\ 8.277 \times 10^{-4} \angle 90.08^\circ & 0.9706 \angle 0.159^\circ \end{bmatrix}$$

2. แรงดันและกระแสด้านขาออกเมื่อโหลดเต็มพิกัด

จากโจทย์แรงดันขาออก $|V_R| = 0.95 \times 230 \text{ kV} = 218.5 \text{ kV}$

แรงดันเฟส $V_{R,p} = \frac{218.5}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 126.15 \angle 0^\circ \text{ kV}$

กระแสเฟส
$$I_R = \frac{P}{3V_{R,p} \cos\theta} \angle +\theta = \frac{400}{3 \times 126.15 \times 0.99} \angle \cos^{-1} 0.99$$

$$= 1.068 \angle 8.11^\circ \text{ kA}$$

ดังนั้นขนาดแรงดันเฟสทางด้านส่งสามารถหาค่าได้จาก $V_S = AV_R + BI_R$

$$V_S = (0.9706 \angle 0.159^\circ)(126.15 \angle 0^\circ) + (70.29 \angle 84.78^\circ)(1.068 \angle 8.11^\circ)$$

$$= 122.44 \angle 0.159^\circ + 75.04 \angle 92.89^\circ = 118.66 + j75.2 = 140.53 \angle 32.39^\circ \text{ kV}_p$$

ขนาดแรงดันระหว่างสายทางด้านส่งแบบสามเฟส มีค่าเท่ากับ

$$|V_{SL-L}| = \sqrt{3} \times 140.53 = 243.4 \text{ kV}_{L-L}$$

ขนาดแรงดันในสถานะที่มีโหลดและไม่มีโหลด

$$|V_{R,FL}| = |V_R| = 218.5 \text{ kV}$$

$$|V_{R,NL}| = \frac{V_S}{A} = \frac{243.4}{0.9706} = 250.77 \text{ kV}$$

3. การควบคุมแรงดัน (Voltage regulation) เมื่อมีโหลดและไม่มีโหลด

จากสมการ
$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{|V_R| / |A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100$$

$$|V_{R,FL}| = |V_R| = 218.5 \text{ kV}$$

$$|V_{R,NL}| = \frac{V_S}{A} = \frac{243.4}{0.9706} = 250.77 \text{ kV}$$

ดังนั้น
$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{|V_s|/|A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100$$

$$= \frac{250.77 - 218.5}{218.5} \times 100 = 14.77\%$$

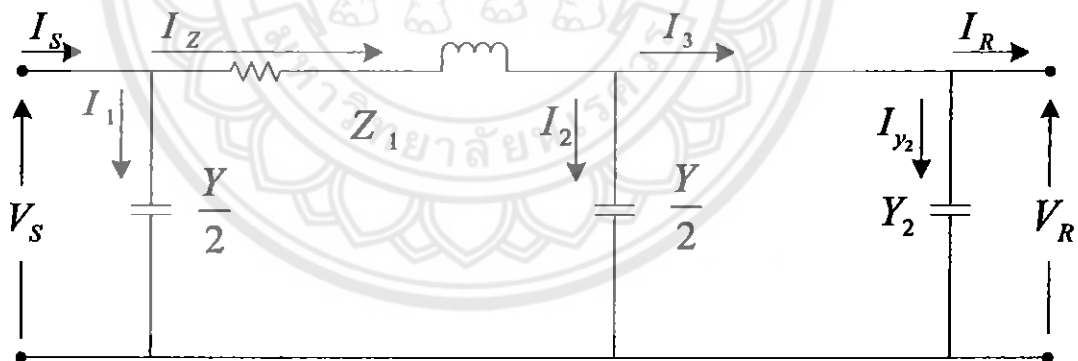
4. ทาค่า $P_{L,MAX}$

$$P_{L,MAX} = \frac{140.53 \times 126.15}{70.29} - \frac{0.9760 \times 126.15^2}{70.29}$$

$$= 32.464 \text{ MW}$$

3.5 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

จากตัวอย่างศึกษาในข้อ 3.4 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุเข้าในระบบและกำหนดค่าตัวประกอบชดเชยขนาน $110\% \frac{B_{C1}}{B_C} = 1.1$ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อต่อตัวเก็บประจุ

ดังนั้น $B_{C1} = 1.1B_C = 1.1(8.4 \times 10^{-5})$ เมื่อนำ B_{C1} มาต่อขนานที่ด้านปลายสายส่งจะได้ R_{eq} ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุ

จาก $A_1 = D_1 = 0.9706 \angle 0.159^\circ, B_1 = 70.29 \angle 80.78^\circ, C_1 = 8.277 \times 10^{-4} \angle 90.08^\circ,$
 $A_2 = D_2 = 1, B_2 = 0, C_2 = B_{C1} = 92.4 \times 10^{-5} \angle 90^\circ$

เนื่องจากต้องการหาค่า V_R ที่ปลายสายส่งเมื่อต่อตัวเก็บประจุแล้วดังนั้นจึงสนใจเฉพาะ A_{eq}

$$V_R = \frac{V_S}{A} = A_{eq} = A = A_1 A_2 + B_1 C_2$$

แทนค่า $A_1 = 0.9706 \angle 0.159^\circ, B_1 = 70.29 \angle 80.78^\circ, C_2 = 92.4 \times 10^{-5} \angle 90^\circ$

$$\begin{aligned} A_{eq} &= 0.9706 \angle 0.159^\circ + (70.29 \angle 80.78^\circ)(92.4 \times 10^{-5} \angle 90^\circ) \\ &= 0.906 \angle 0.828^\circ \end{aligned}$$

ดังนั้นขนาดแรงดันเฟสทางด้านส่งสามารถหาค่าได้จาก $V_S = AV_R + BI_R$

$$\begin{aligned} V_S &= (0.906 \angle 0.828^\circ)(126.15 \angle 0^\circ) + (70.29 \times 80.78^\circ)(1.068 \times 8.11^\circ) \\ &= 114.292 \angle 0.828^\circ + 75.04 \angle 92.89^\circ = 138.846 \angle 33.356^\circ \text{ kV}_p \end{aligned}$$

ขนาดแรงดันระหว่างสายทางด้านส่งแบบสามเฟสมีค่าเท่ากับ

$$|V_{SL-L}| = \sqrt{3} \times 138.846 \angle 33.356^\circ = 240.490 \angle 33.356^\circ \text{ kV}_{L-L}$$

เมื่อมีการชดเชยขนานแล้ว จะได้ $|V_{R,NL}|$ เป็น

$$|V_{R,NL}| = \frac{V_S}{A} = \frac{243.4}{0.906 \angle 0.828^\circ} = 268.653 \angle -0.828^\circ$$

$$\begin{aligned} \% \text{Voltage regulation} &= \frac{|V_S|/|A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 = \frac{268.653 - 218.5}{218.5} \times 100 \\ &= 22.953\% \end{aligned}$$

หาค่า $P_{L,MAX}$ หลังมีการชดเชยจะได้

$$P_{L,MAX} = \frac{|140.53 + 7528||126.5|}{|70.29|} - \frac{|0.906||126.15|^2}{|70.29|} = 46.467 \text{ MW}$$

จะได้ว่าค่า $P_{L,MAX}$ ที่ไม่มีการชดเชยจะมีน้อยกว่าค่า $P_{L,MAX}$ ของค่าที่มีการนำตัวเก็บประจุ มาต่อขนานที่ปลายสายส่งของระบบ

สรุป ผลการคำนวณเมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุและมีการต่อตัวเก็บประจุได้ค่าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อตัวเก็บประจุ

ตัวแปร	เมื่อ ไม่ต่อตัวเก็บประจุ	เมื่อต่อตัวเก็บประจุ
$V_S \angle \delta_S$	243.400 \angle 32.390°	240.490 \angle 33.536°
$V_{R,FL} \angle \delta_R$	218.500 \angle 0°	218.500 \angle 0°
$V_{R,NL} \angle \delta_R$	250.770 \angle 0°	268.653 \angle -0.828°
% Voltage regulation	14.770%	22.953%
$P_{L,MAX}$ (MW)	32.464	46.467

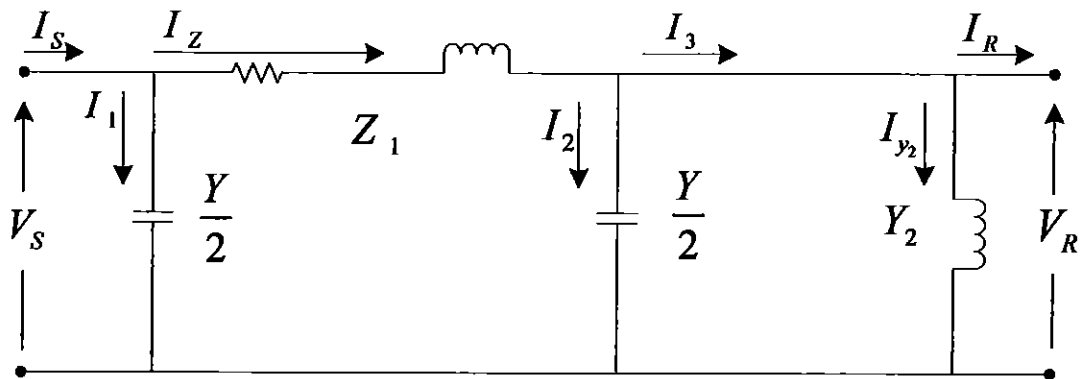
ในกรณีเรากำหนดค่าแรงดันที่ปลายสาย ($V_{R,FL}$) คงที่กล่าวคือเมื่อ ไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ และเมื่อต่อตัวเก็บประจุจากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า

1. เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุแรงดันด้านต้นสาย (V_S) จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ ไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บประจุช่วยให้ปลายสายมีแรงดันเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันตกที่ปลายสายมีค่าลดลงส่งผลให้กำลังสูญเสียมีค่าลดลง
2. เมื่อต่อตัวเก็บประจุทำให้เปอร์เซ็นต์การควบคุมแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 14.770% เป็น 22.953% ส่งผลให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ามากขึ้นจาก 32.464 MW เป็น 46.467 MW
3. แต่ในกรณีไม่มีโหลดการต่อตัวเก็บประจุที่ปลายสายทำให้แรงดันที่ปลายสายของสายส่งมีค่าสูงมากถ้าเกิน 268.653 V ซึ่งมากกว่าค่าพิกัดอาจทำให้เกิดผลเสียต่อระบบไฟฟ้าได้ดังนั้นในกรณีไม่มีโหลดควรปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันสภาวะแรงดันเกินเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การควบคุมแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าสามารถส่งได้เพิ่มขึ้น

3.6 ระบบไฟฟ้า 2 บัส เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน

ขั้นตอนการคำนวณเหมือนการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานทุกประการดังนั้นเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าในระบบไฟฟ้ากำหนดค่าตัวประกอบชดเชยขนาน 10% ของ $\frac{B_l}{B_c} = 0.1$ ดังรูปที่ 3.7

และได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ

ตัวแปร	เมื่อไม่ได้ต่อตัวเหนี่ยวนำ	เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ
$V_S \angle \delta_S$	$243.400 \angle 32.390^\circ$	$250.225 \angle 31.514^\circ$
$V_{R,FL} \angle \delta_R$	$218.500 \angle 0^\circ$	$218.500 \angle 0^\circ$
$V_{R,NL} \angle \delta_R$	$250.770 \angle 0^\circ$	$252.489 \angle -0.216^\circ$
% Voltage regulation	14.770%	15.556%
$P_{L,MAX}$ (MW)	32.464	34.658

ในกรณีเรากำหนดค่าแรงดันที่ปลายสาย ($V_{R,FL}$) คงที่กล่าวคือเมื่อไม่ได้ต่อตัวเหนี่ยวนำ และเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำจากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า

1. เมื่อมีการต่อตัวเหนี่ยวนำแรงดันด้านต้นสาย (V_S) จะมีค่า 250.225 V ซึ่งมากกว่ากรณีที่ไม่ได้ต่อตัวเหนี่ยวนำแสดงให้เห็นว่าในกรณีโหลดน้อยตัวเหนี่ยวนำช่วยให้ปลายสายมีแรงดันลดลงเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่เสมือน โหลดจึงส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวเหนี่ยวนำแรงดันจึงมีค่าลดลง
2. เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำทำให้ %regulation เพิ่มขึ้นจาก 14.770% เป็น 15.556% ซึ่งหมายถึงสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 32.464 MW เป็น 34.658 MW
3. สำหรับกรณีไม่มีโหลดการต่อตัวเหนี่ยวนำจะช่วยลดแรงดันที่ปลายสายไม่ให้สูงเกินได้ สังเกตได้จากแรงดันปลายสายมีค่า 252.489 V ค่าใกล้เคียงกับแรงดันต้นสาย 250.770 V แต่ในกรณีที่ต่อโหลดเต็มที่ควรปลดตัวเหนี่ยวนำออกจากระบบเพื่อป้องกันแรงดันตกมากเกินไปเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนภาระโหลดของระบบไฟฟ้าเช่นกัน

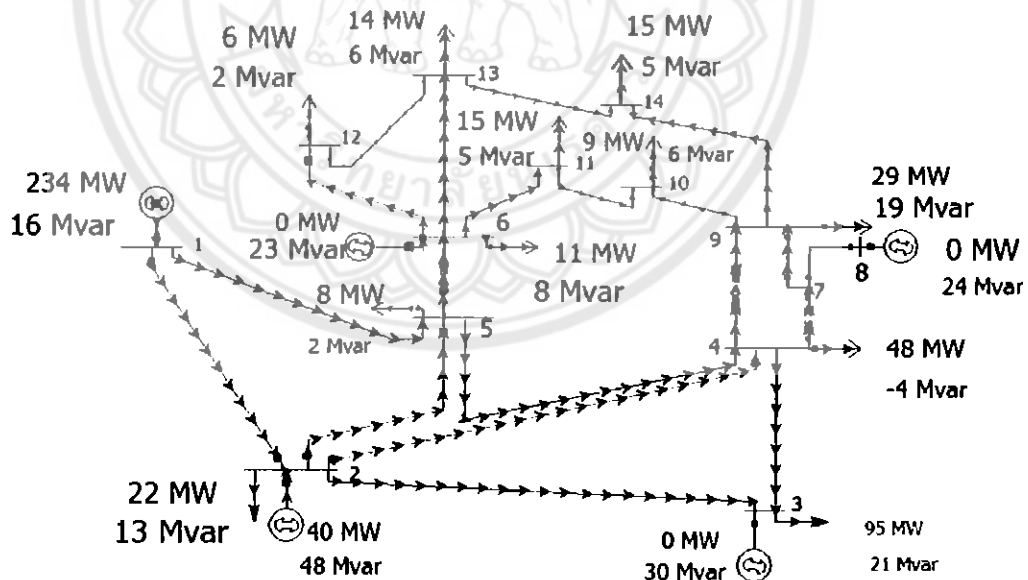
บทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า

ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำในบัสที่ศึกษาโดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่บัสศึกษาให้ถึงค่าวิกฤตซึ่งหมายถึงการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่บัสจนแรงดันตกลงทำให้ระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพโดยได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

4.1 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส

ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ดังรูปที่ 4.1 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เครื่องสายส่งไฟฟ้า 15 เส้นผ่านไปยังโหนด 10 จุดมีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการกำหนดตัวแปรเทียบกับปริมาณอ้างอิงของระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ายละเอียดระบบไฟฟ้าแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส

จากรูปที่ 4.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะถูกวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และแรงดันไฟฟ้า (V) ของบัสที่ศึกษาโดยพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าก่อนและหลังการ

ต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าบัสที่ศึกษาว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

การจำลองการต่อตัวเก็บประจุจะต่อเข้าในระบบไฟฟ้าแบ่งเป็น 5 บัส คือที่บัส 2, ที่บัส 4, ที่บัส 5, ที่บัส 6 และ ที่บัส 12 ส่วนการจำลองการต่อตัวเหนี่ยวนำจะต่อเข้าในระบบไฟฟ้าที่บัส 5 และที่บัส 13 เท่านั้น

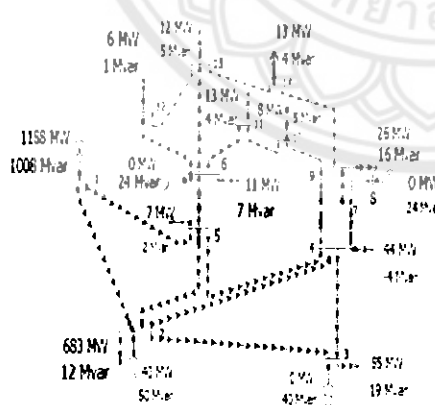
4.2 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส เมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาด

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากการประมวลผลโดย โปรแกรม PowerWorld และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุขนาด 80 MVAR กับ โหลดที่บัส 2, ที่บัส 4, ที่บัส 5, ที่บัส 6 และ ที่บัส 12

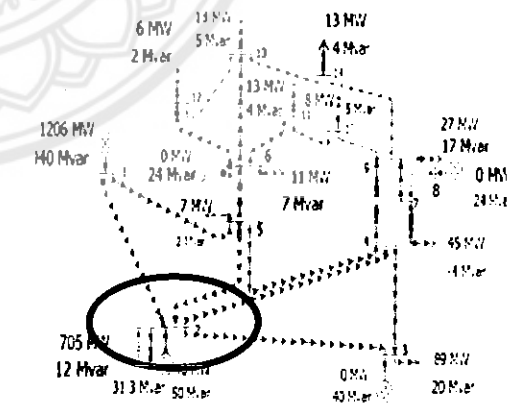
4.2.1 การต่อตัวเก็บประจุขนาดที่บัส 2

การเลือกค่าตัวเก็บประจุจะเลือกจากการประมวลผลจากโปรแกรมโดยเลือกค่าที่มีผลกระทบต่อแรงดันที่เห็นชัดเจน โดยบัสนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุขนาด 80 MVAR

เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_2 ที่บัส 2 พิจารณาแรงดัน V_2 ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR ได้ดังรูปที่ 4.2



(ก) ที่บัส 2 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ



(ข) ที่บัส 2 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR

รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR ที่บัส 2

รูปที่ 4.2 (ก) และรูปที่ 4.2 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรม PowerWorld ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุขนาด 80 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_2 และแรงดันไฟฟ้า V_2 ที่บัส 2 ได้ดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

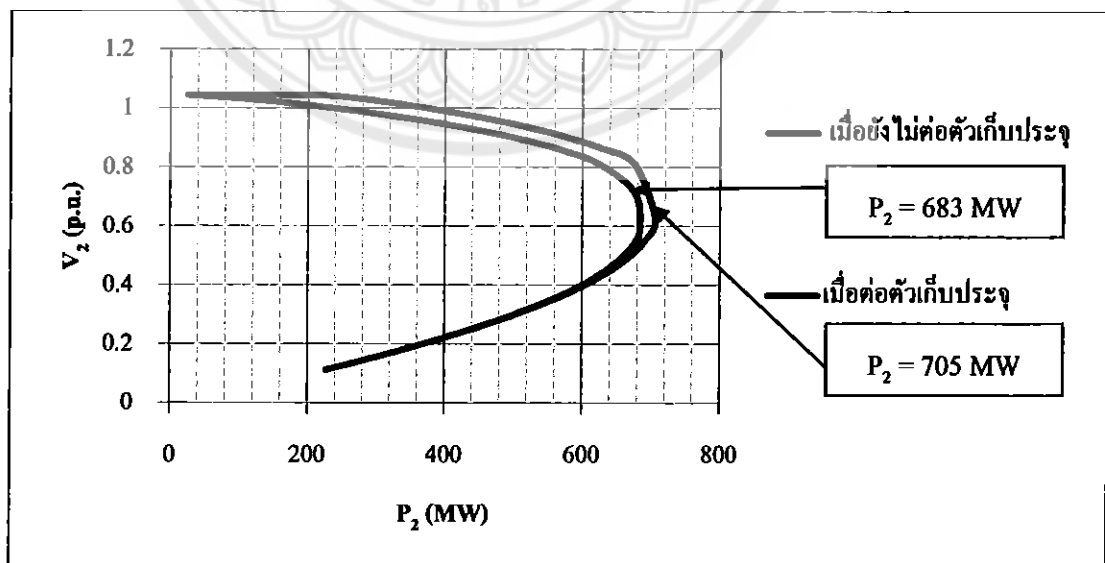
ตารางที่ 4.1 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดหรือกำลังไฟฟ้า P_2 ที่บัส 2 เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ โดยเริ่มต้นที่ 25 MW เมื่อนำผลจากตารางมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_2 และแรงดันไฟฟ้า V_2 ได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 2 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)
25	1.0450	618	0.4267	387	0.2132	284	0.1465
75	1.0382	600	0.4020	379	0.2078	280	0.1440
125	1.0291	582	0.3804	371	0.2027	276	0.1417
175	1.0172	565	0.3613	364	0.1978	272	0.1394
225	1.0041	548	0.3444	357	0.1932	269	0.1372
275	0.9898	532	0.3291	351	0.1888	265	0.1351
325	0.9740	517	0.3153	344	0.1846	261	0.1330
375	0.9565	503	0.3028	338	0.1806	258	0.1310
425	0.9367	490	0.2913	332	0.1768	255	0.1291
475	0.9141	477	0.2807	327	0.1732	252	0.1272
525	0.8876	465	0.2709	321	0.1697	249	0.1254
575	0.8550	453	0.2619	316	0.1664	245	0.1236
625	0.8109	442	0.2535	311	0.1632	243	0.1219
675	0.7161	432	0.2457	306	0.1602	240	0.1212
683	0.5924	422	0.2383	301	0.1572	237	0.1186
672	0.5337	413	0.2315	297	0.1544	234	0.1170
655	0.4904	404	0.2250	291	0.1516	231	0.1155
637	0.4557	395	0.2189	288	0.1490	229	0.1140

ตารางที่ 4.2 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 2 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR

P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)	P_2 (MW)	V_2 (p.u.)
25	1.0450	669	0.4995	404	0.2252	297	0.1543
75	1.0450	648	0.4619	396	0.2191	292	0.1516
125	1.0450	669	0.4995	396	0.2191	288	0.1490
175	1.0450	648	0.4619	387	0.2133	284	0.1464
225	1.0439	627	0.4312	379	0.2079	280	0.1440
275	1.0335	607	0.4053	372	0.2028	276	0.1416
325	1.0179	588	0.383	364	0.1979	272	0.1393
375	1.0006	570	0.3634	357	0.1932	268	0.1371
425	0.9813	552	0.3460	351	0.1888	265	0.1350
475	0.9595	536	0.3305	344	0.1847	261	0.1329
525	0.9345	520	0.3164	338	0.1807	258	0.1309
575	0.9046	506	0.3037	332	0.1768	255	0.1290
625	0.8669	492	0.2920	327	0.1732	251	0.1271
675	0.8118	479	0.2813	321	0.1697	248	0.1253
705	0.6260	466	0.2715	316	0.1664	245	0.1235
689	0.5485	455	0.2623	311	0.1632	242	0.1218



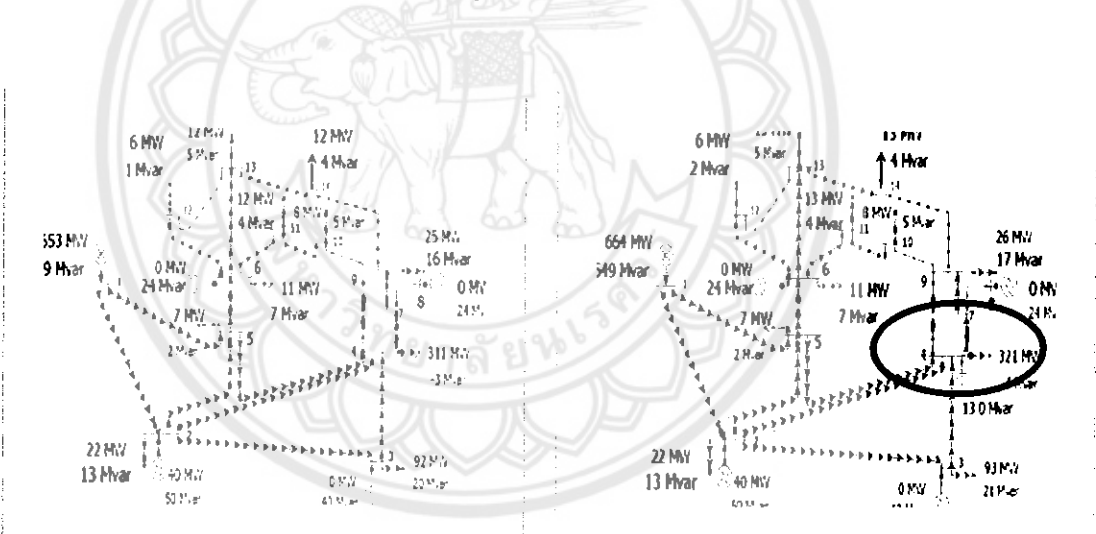
รูปที่ 4.3 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 80 MVAR ที่บัส 2

จากกราฟในรูปที่ 4.3 เส้นสีแดงแสดงสภาวะเมื่อยังไม่ต่อตัวเก็บประจุที่บัส 2 เมื่อทำการเพิ่มโหลดจะทำให้แรงดัน V_2 ที่บัส 2 ลดลงเนื่องจากโหลดทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อโหลดวิกฤตมีค่าเท่ากับ 683 MW เมื่อมีการเพิ่มโหลดให้สูงกว่านี้จะทำให้ระบบไฟฟ้าไม่เสถียรภาพสังเกตได้จากค่าแรงดัน V_2 จะต่ำลงทำให้กำลังไฟฟ้า P_2 ที่บัส 2 ลดลงด้วยทันที

จากตารางที่ 4.2 แสดงการปรับเพิ่มแรงดัน V_2 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุขนาด 80 MVAR ที่บัส 2 ขนาด 80 MVAR ตัวเก็บประจุจะทำให้แรงดัน V_2 ที่บัส 2 เพิ่มขึ้นดังกราฟเส้นสีน้ำเงินรูปที่ 4.3 ทำให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้า P_2 สูงสุดได้มากขึ้นคือจากเดิม 683 MW ไปเป็น 705 MW ซึ่งก็เป็นค่าโหลดวิกฤตของระบบไฟฟ้าโดยไม่สามารถเพิ่มโหลดมากกว่านี้เช่นเดียวกันเนื่องจากจะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกทันทีทันใด

4.2.2 การต่อตัวเก็บประจุขนาดที่บัส 4

บัสนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุขนาด 40 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_4 ที่บัส 4 พิจารณาแรงดัน V_4 ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 4.4



(ก) ที่บัส 4 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ (ข) ที่บัส 4 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR
รูปที่ 4.4 ระบบไฟฟ้า IEEB 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR ที่บัส 4

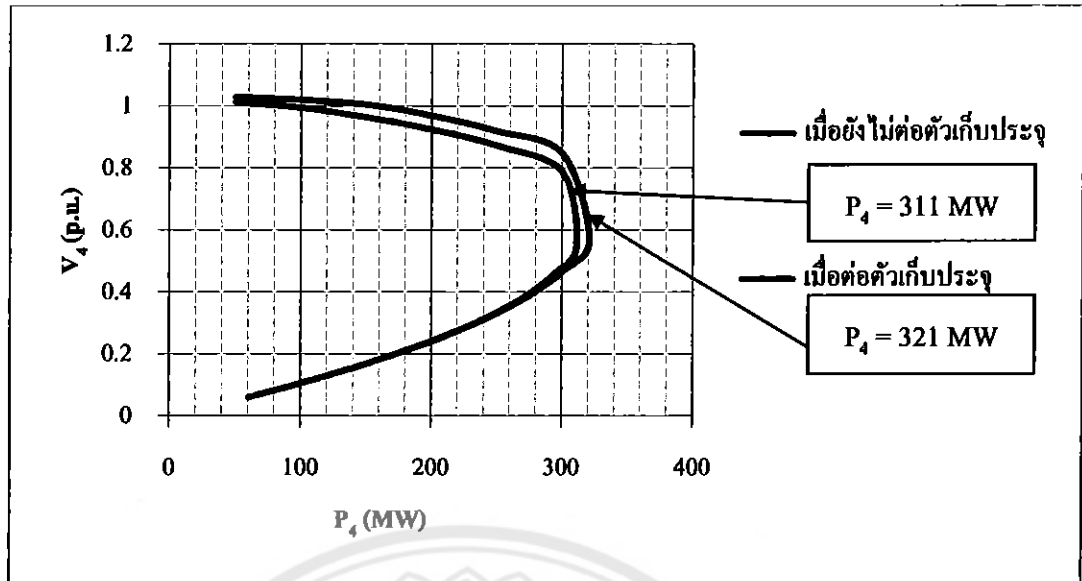
รูปที่ 4.4 (ก) และรูปที่ 4.4 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุขนาด 40 MVAR ดังตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังไฟฟ้า P_4 และแรงดันไฟฟ้า V_4 เมื่อมีการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 4 เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุโดยเริ่มต้นที่ 50 MW เมื่อนำผลจากตารางมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_4 และแรงดันไฟฟ้า V_4 ได้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

P_4 (MW)	V_4 (p.u.)	P_4 (MW)	V_4 (p.u.)	P_4 (MW)	V_4 (p.u.)	P_4 (MW)	V_4 (p.u.)
50	1.0142	220	0.2770	134	0.1487	112	0.1216
100	0.9957	209	0.2578	130	0.1433	110	0.1180
150	0.9645	199	0.2412	126	0.1383	107	0.1146
200	0.9257	190	0.2268	122	0.1337	104	0.1114
250	0.8738	181	0.2140	119	0.1293	102	0.1084
300	0.7884	174	0.2027	115	0.1253	99	0.1056
311	0.5487	167	0.1926	134	0.1487	97	0.1029
294	0.4594	160	0.1835	130	0.1433	95	0.1003
277	0.4023	154	0.1752	126	0.1383	93	0.0979
261	0.3594	149	0.1677	122	0.1337	91	0.0956
246	0.3266	143	0.1608	119	0.1293	89	0.0934
233	0.2996	139	0.1545	115	0.1253	87	0.0913

ตารางที่ 4.4 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR

C_4 (MVAR)	P_4 (MW)	V_4 (p.u.)	C_4 (MVAR)	P_4 (MW)	V_4 (p.u.)	C_4 (MVAR)	P_4 (MW)
42.5	50	1.0304	3.1	221	0.2778	0.9	134
41.7	100	1.0215	2.7	210	0.2584	0.8	130
40.5	150	1.0060	2.3	200	0.2417	0.8	126
37.6	200	0.9696	2.1	190	0.2272	0.7	122
33.9	250	0.9204	1.8	182	0.2144	0.7	119
28.7	300	0.8473	1.6	174	0.2000	0.6	115
13.0	321	0.5700	1.5	167	0.1928	0.6	113
8.7	300	0.4666	1.3	160	0.1837	0.6	110
6.6	281	0.4061	1.2	154	0.1754	0.5	107
5.3	264	0.3623	1.1	149	0.1678	0.5	104
4.3	248	0.3283	1.0	144	0.1609	0.5	102
3.6	234	0.3007	1.0	139	0.1546	0.4	99



รูปที่ 4.5 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 40 MVAR ที่บัส 4

จากกราฟเส้นสีแดงรูปที่ 4.5 แสดงสถานะเมื่อยังไม่ต่อตัวเก็บประจุที่บัส 4 เมื่อทำการเพิ่มโหลดจะทำให้แรงดัน V_4 ที่บัส 4 ลดลงจนกระทั่งเมื่อโหลดวิกฤตมีค่าเท่ากับ 311 MW เมื่อมีการเพิ่มโหลดให้สูงกว่านี้จะทำให้ระบบไฟฟ้าไม่เสถียรภาพสังเกตได้จากค่าแรงดัน V_4 จะต่ำลงทำให้กำลังไฟฟ้า V_4 ที่บัส 4 ลดลงด้วยทันที

จากตารางที่ 4.4 แสดงการปรับเพิ่มแรงดัน V_4 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุ C_4 ขนาดกับโหลดที่บัส 4 ขนาด 40 MVAR ตัวเก็บประจุ C_4 จะทำให้แรงดัน V_4 ที่บัส 4 เพิ่มขึ้นแสดงดังกราฟเส้นสีน้ำเงินรูปที่ 4.5 ผลทำให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้า P_4 สูงสุดได้มากขึ้นเช่นจาก 311 MW เป็น 321 MW ซึ่งก็เป็นค่าโหลดวิกฤตของระบบไฟฟ้าโดยไม่สามารถเพิ่มโหลดมากกว่านี้เช่นเดียวกันเนื่องจากจะทำให้แรงดัน V_4 ไฟฟ้าตกทันที

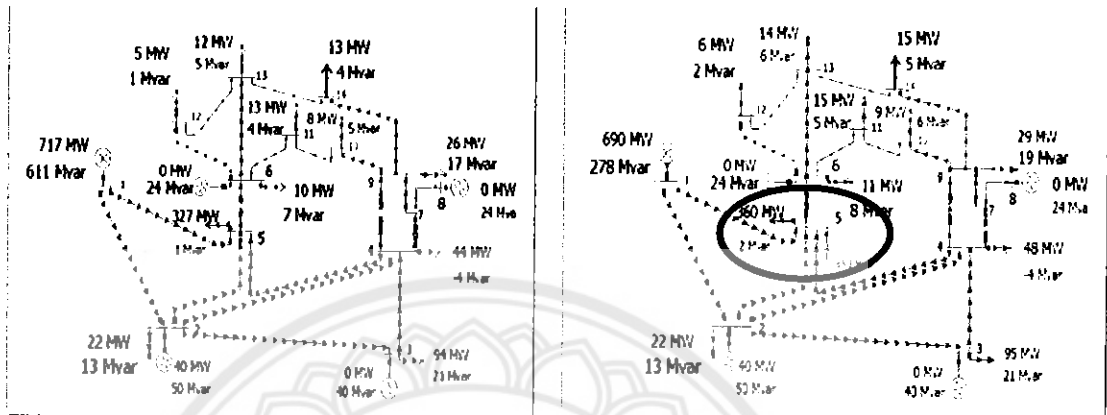
จากตารางที่ 4.4 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุ C_4 โดยกำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 40 MVAR โดยใช้โปรแกรม PowerWorld จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับค่ากำลังไฟฟ้า P_4 เพิ่มขึ้นค่าตัวเก็บประจุ C_4 จะมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการปรับลดลงซึ่งเกิดขึ้นจากการปรับโดยอัตโนมัติของโปรแกรมเพื่อรักษาเสถียรภาพของแรงดันและระบบเอาไว้ดังในรูปที่ 4.5 ส่งผลให้เห็นค่าความแตกต่างของแรงดัน V_4 ไม่มากเท่ากับการรักษาค่าตัวเก็บประจุ C_4 ให้คงที่ซึ่งเมื่อกำลังไฟฟ้า P_4 มีค่าเท่ากันจากกรณีหลังการต่อตัวเก็บประจุ C_4 จะเห็นค่าความแตกต่างของแรงดัน V_4 อย่างชัดเจน

รูปที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าในขณะที่ภาระโหลดมากใกล้เคียงค่าวิกฤตการต่อตัวเก็บประจุ C_4 ก็ไม่สามารถช่วยป้องกันการลดลงโดยทันทีทันใดของแรงดัน V_4 ได้จึงเป็นข้อจำกัดของการต่อตัวเก็บประจุ

การแก้ไขปัญหาคือควรระวังไม่ให้ภาระโหลดแต่ละบัสมีค่ามากเกินไปเกินกว่าค่าวิกฤตของบัสนั้น

4.2.3 การต่อตัวเก็บประจุขนาดที่บัส 5

บัสนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุขนาด 100 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_5 ที่บัส 5 พิจารณาแรงดัน V_5 ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 4.6



(ก) ที่บัส 5 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ (ข) ที่บัส 5 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR
รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR ที่บัส 5

รูปที่ 4.6 (ก) และรูปที่ 4.6 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุขนาด 100 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_5 และแรงดันไฟฟ้า V_5 ได้ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 5 สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า V_5 ที่บัส 5 เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุแสดงดังเส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 4.7

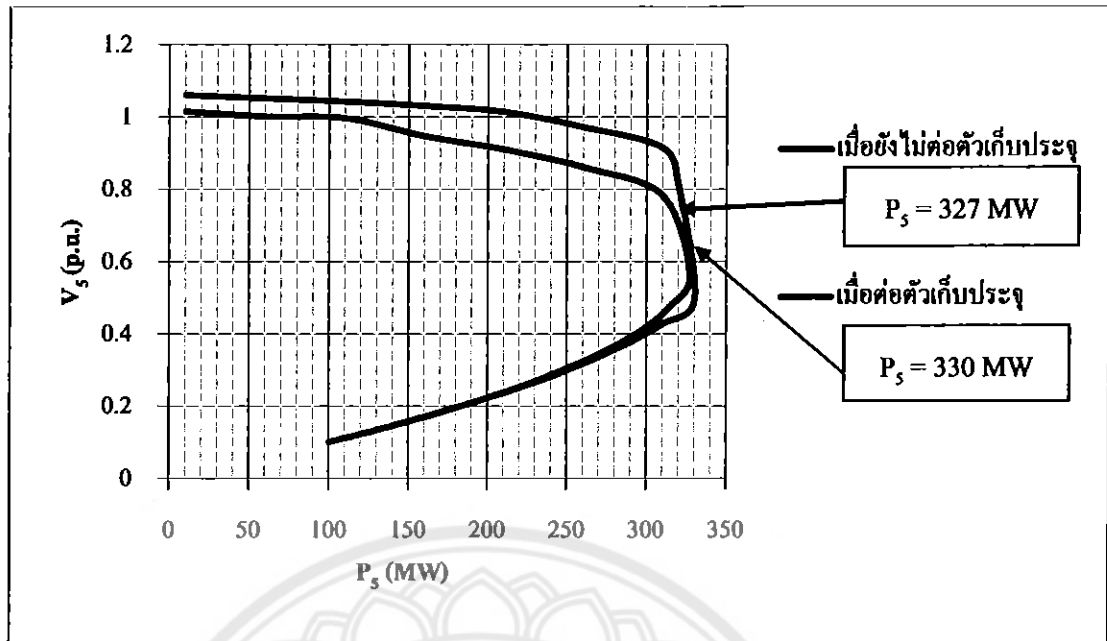
ในทำนองเดียวกันตารางที่ 4.6 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดบัสที่ 5 สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า V_5 ที่บัส 5 เมื่อต่อตัวเก็บประจุแสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)
10	1.0164	283	0.3747	183	0.2016	133	0.1393
60	1.0023	268	0.3408	176	0.1920	129	0.1347
110	0.9977	254	0.3129	169	0.1833	126	0.1304
160	0.9479	241	0.2896	163	0.1753	122	0.1261
210	0.9110	230	0.2697	157	0.1681	119	0.1227
260	0.8620	219	0.2525	152	0.1614	116	0.1191
310	0.7823	209	0.2374	147	0.1552	113	0.1152
327	0.5632	200	0.2241	142	0.1495	110	0.1125
314	0.4749	191	0.2122	138	0.1442	107	0.1095

ตารางที่ 4.6 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR

P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)	P_s (MW)	V_s (p.u.)
10	1.0611	211	0.2386	116	0.1192	81	0.0812
60	1.0527	201	0.2251	113	0.1158	79	0.0797
110	1.0434	192	0.213	110	0.1126	78	0.0781
160	1.0316	184	0.2022	107	0.1096	76	0.0767
210	1.0153	177	0.1925	105	0.1067	75	0.0752
260	0.9730	170	0.1838	102	0.1040	74	0.0739
310	0.9149	164	0.1757	100	0.1014	73	0.0726
320	0.8076	158	0.1684	97	0.0990	71	0.0713
330	0.4966	152	0.1617	95	0.0966	70	0.0701
310	0.4291	147	0.1555	93	0.0944	69	0.0689
291	0.3818	138	0.1444	91	0.0923	68	0.0677
274	0.3455	134	0.1395	89	0.0902	67	0.0666
259	0.3164	130	0.1349	87	0.0883	66	0.0656
245	0.2921	126	0.1305	86	0.0864	65	0.0645
233	0.2716	122	0.1265	84	0.0846	64	0.0635
221	0.2540	119	0.1228	82	0.0829	63	0.0625

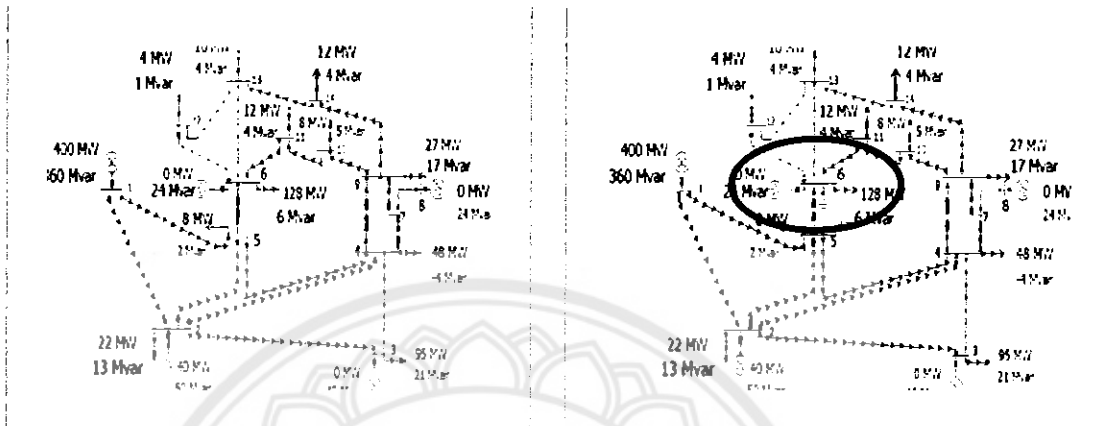


รูปที่ 4.7 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 100 MVAR ที่บัส 5

ที่บัส 5 เป็นบัสประเภท โหลดบัสและมีการเพิ่ม โหลดมากถึง 330 MW ดังตารางที่ 4.6 ทำให้เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนานขนาด 100 MVAR มีผลต่อแรงดัน V_s ที่บัส 5 อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสถานะที่ไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ นั่นคือ เมื่อต่อตัวเก็บประจุจะทำให้แรงดัน V_s ของบัสสูงขึ้นอย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.7 คือแรงดัน V_s ที่ 0.9 p.u. ก่อนต่อตัวเก็บประจุจะได้กำลังไฟฟ้า P_s เท่ากับ 200 MW หลังต่อตัวเก็บประจุจะได้กำลังไฟฟ้า P_s เท่ากับ 300 MW ในทำนองเดียวกันที่ กำลังไฟฟ้า P_s เท่ากัน เช่น 200 MW ก่อนต่อตัวเก็บประจุจะได้แรงดันไฟฟ้า V_s เท่ากับ 0.9 p.u. และหลังต่อตัวเก็บประจุจะได้แรงดันไฟฟ้า V_s เท่ากับ 1.02 p.u. ดังนั้นในขณะที่แรงดัน V_s เท่ากันจะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุ

4.2.4 การต่อตัวเก็บประจุขนาดที่บัส 6

บัสนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุขนาด 0.1 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_6 ที่บัส 6 พิจารณาแรงดัน V_6 ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 4.8



(ก) บัสที่ 6 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

(ข) บัสที่ 6 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR

รูปที่ 4.8 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR ที่บัส 6

รูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.8 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุขนาด 0.1 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_6 และแรงดันไฟฟ้า V_6 ได้ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

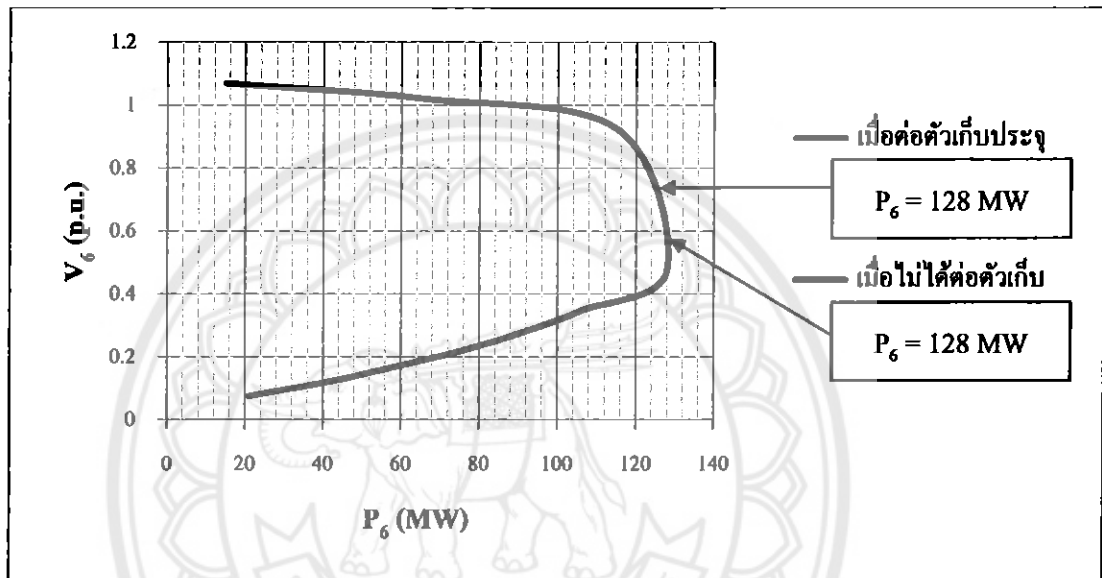
ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 6 เมื่อก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุแสดงดังเส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 6 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)
15	1.0700	106	0.3476	60	0.1743	35	0.1071
65	1.0225	91	0.2788	53	0.1536	28	0.0924
115	0.9257	79	0.2332	47	0.1363	21	0.0763
128	0.4782	69	0.2000	41	0.1211	Black out	

ตารางที่ 4.8 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 6 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR

P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)	P_6 (MW)	V_6 (p.u.)
15	1.0700	106	0.3476	60	0.1743	35	0.1071
65	1.0225	91	0.2788	53	0.1536	28	0.0924
115	0.9257	79	0.2332	47	0.1363	21	0.0763
128	0.4782	69	0.2000	41	0.1211	Black out	



รูปที่ 4.9 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 0.1 MVAR ที่บัส 6

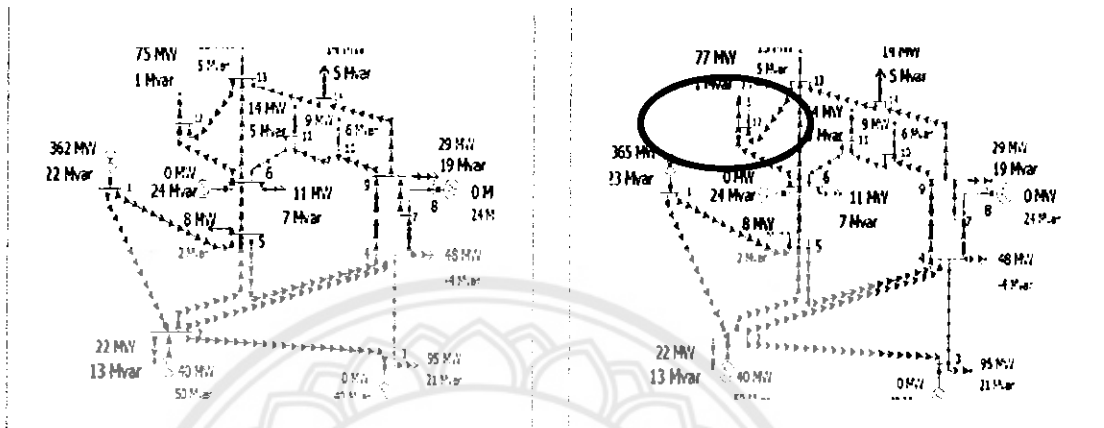
จากตารางที่ 4.8 เมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาด 0.1 MVAR ที่บัส 6 แรงดัน V_6 ไม่เปลี่ยนแปลง เพราะตัวเก็บประจุมีค่าน้อยมากเนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าตัวเก็บประจุมากกว่า 0.1 MVAR จะทำให้โปรแกรมไม่สามารถประมวลผลได้ (Black out)

การต่อตัวเก็บประจุที่บัส 6 ไม่มีความจำเป็น เนื่องจากที่บัส 6 มีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVAR) อยู่แล้วจำนวน 24 MVAR

เมื่อนำค่าแรงดัน V_6 และกำลังไฟฟ้า P_6 ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 มาเขียนกราฟจะเห็นว่ากราฟทั้งสองทับกันเมื่อต่อตัวเก็บประจุเพียง 0.1 MVAR

4.2.5 การต่อตัวเก็บประจุขนาดที่บัส 12

บัสนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุขนาด 15 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_{12} ที่บัส 12 พิจารณาแรงดัน V_{12} ก่อนและหลังการต่อตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 4.10



(ก) ที่บัส 12 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ (ข) ที่บัส 12 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR
รูปที่ 4.10 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR ที่บัส 12

รูปที่ 4.10 (ก) และรูปที่ 4.10 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุขนาด 15 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_{12} และแรงดันไฟฟ้า V_{12} ได้ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 12 เมื่อไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุแสดงคังเส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 4.11

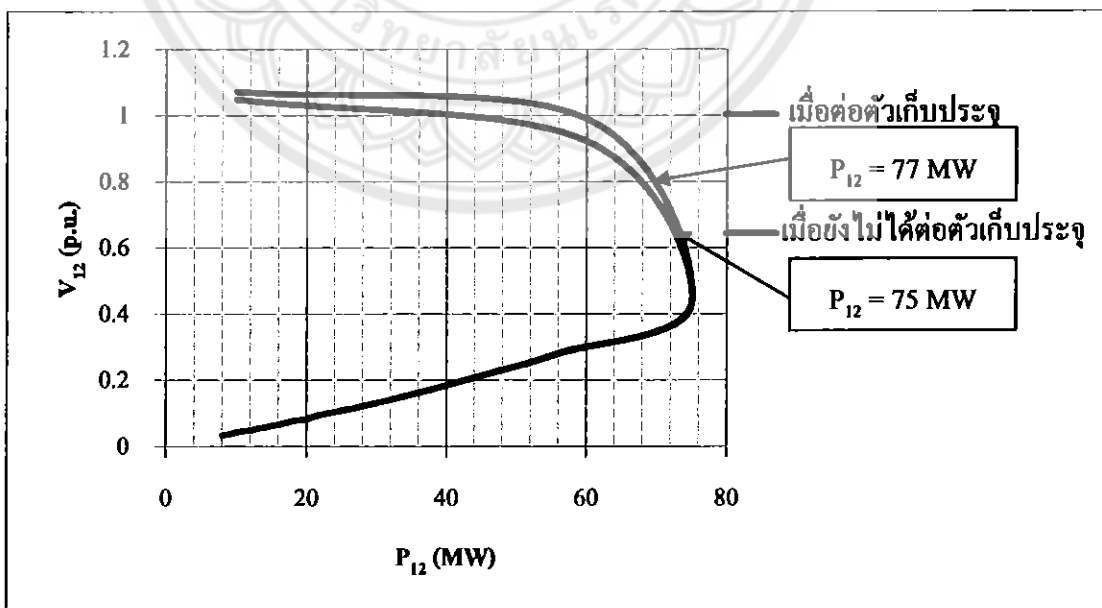
ตารางที่ 4.6 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 12 เมื่อต่อตัวเก็บประจุแสดงคังเส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.9 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 12 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุ

P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)
10	1.0494	33	0.1475	18	0.0772	12	0.0499
60	0.9232	29	0.1278	17	0.0719	11	0.0475
75	0.4319	26	0.1129	16	0.0670	10	0.0433
56	0.2809	23	0.1012	15	0.0629	9	0.0382
45	0.2145	21	0.0916	14	0.0586	8	0.0343
38	0.1745	20	0.0838	13	0.0556	Black out	

ตารางที่ 4.10 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 12 เมื่อต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR

P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)	P_{12} (MW)	V_{12} (p.u.)
10	1.0731	33	0.1476	18	0.0772	12	0.0499
60	0.9912	29	0.1280	17	0.0719	11	0.0475
77	0.4396	26	0.1130	16	0.0670	10	0.0433
56	0.2824	23	0.1012	15	0.0629	9	0.0382
45	0.2151	21	0.0916	14	0.0586	8	0.0343
38	0.1748	20	0.0838	13	0.0556	Black out	



รูปที่ 4.11 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุ 15 MVAR ที่บัส 12

รูปที่ 4.11 จากกราฟเส้นสีแดงสถานะเมื่อยังไม่ต่อตัวเก็บประจุที่บัส 12 เมื่อทำการเพิ่มโหลดจะทำให้แรงดัน V_{12} ที่บัส 12 ลดลงจนกระทั่งเมื่อโหลดวิกฤตมีค่าเท่ากับ 75 MW เมื่อมีการเพิ่มโหลดให้สูงกว่านี้จะทำให้ระบบไฟฟ้าไม่เสถียรภาพสังเกตได้จากค่าแรงดัน V_{12} จะต่ำลงทำให้กำลังไฟฟ้า P_{12} ที่บัส 12 ลดลงด้วยทันที

กราฟเส้นสีน้ำเงินรูปที่ 4.11 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุขนาดบัส 12 ขนาด 15 MVAR ตัวเก็บประจุจะทำให้แรงดัน V_{12} ที่บัส 12 เพิ่มขึ้นทำให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้า P_{12} ได้มากขึ้นจาก 75 MW เป็น 77 MW ซึ่งก็เป็นค่าโหลดวิกฤตของระบบไฟฟ้าซึ่งก็ไม่สามารถเพิ่มโหลดมากกว่านี้เช่นเดียวกันกับที่บัส 4 และที่บัส 5

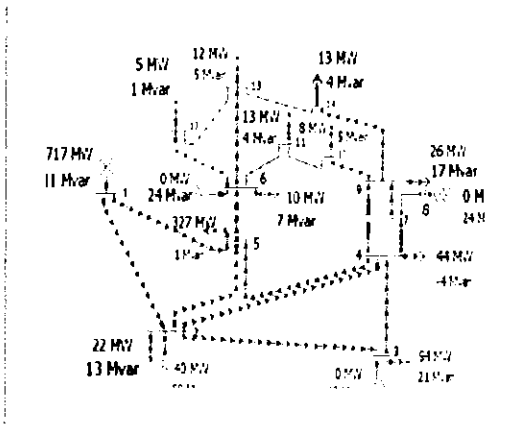
4.3 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำขนาน

ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เครื่องและสายส่งไฟฟ้า 15 เส้นผ่านไปยังโหลด 10 จุดเช่นเดียวกันกับการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานระบบไฟฟ้าจะถูกระบุวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส โดยพิจารณาก่อนและหลังการต่อตัวเหนี่ยวนำแล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

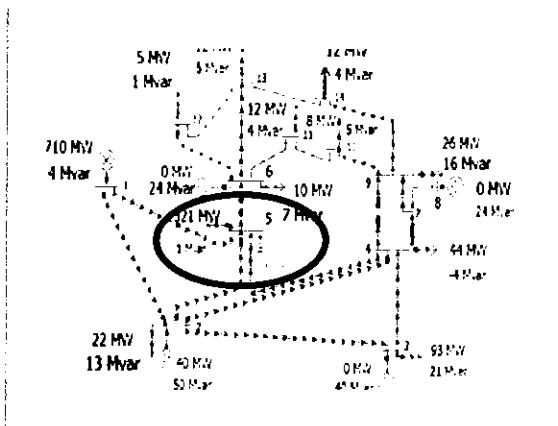
4.3.1 การต่อตัวเหนี่ยวนำขนานที่บัส 5

การเลือกตัวเหนี่ยวนำจะเลือกจากการประมวลผลจาก โปรแกรม โดยเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีผลทำให้แรงดันมีค่า 1 p.u. เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสถานะก่อนและหลังการต่อตัวเหนี่ยวนำ

โดยบัสนี้ได้เลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 26 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_5 ที่บัส 5 พิจารณาแรงดัน V_5 ก่อนและหลังการต่อตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.12



(ก) ที่บัส 5 ไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ



(ข) ที่บัส 5 ต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR

รูปที่ 4.12 ระบบไฟฟ้า IBEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR ที่บัส 5

รูปที่ 4.12 (ก) และรูปที่ 4.12 (ข) แสดงการประมวลผลจาก โปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 26 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_5 และแรงดันไฟฟ้า V_5 ได้ดังตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12

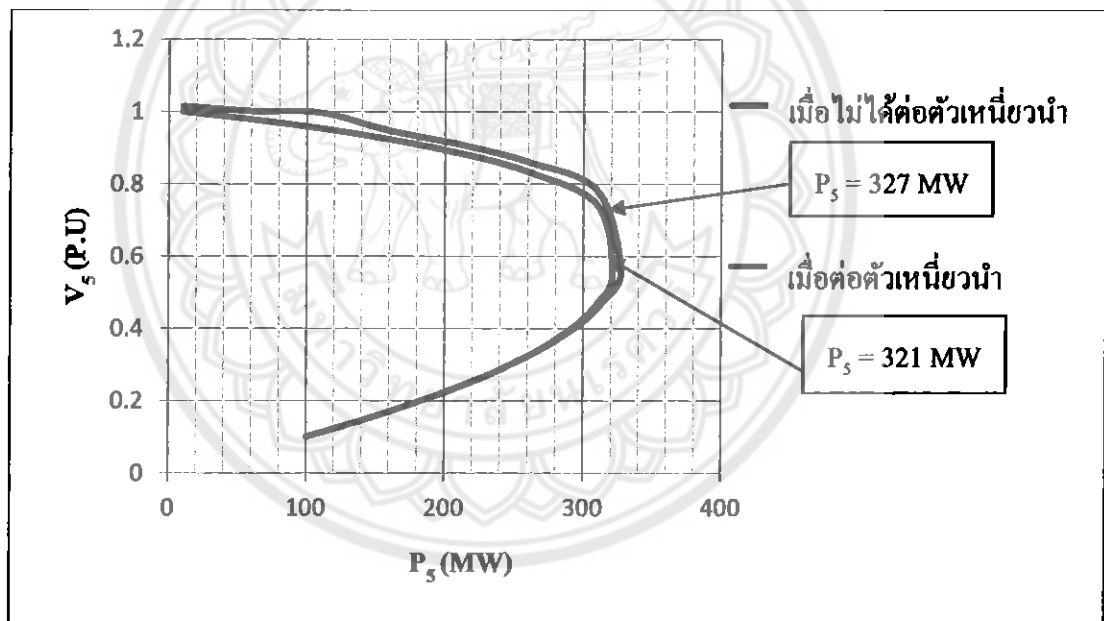
จากตารางที่ 4.11 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 5 โดยไม่ได้ต่อตัวเหนี่ยวนำ เมื่อนำผลจากตารางมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า P_5 และแรงดันไฟฟ้า V_5 จะได้ดังเส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 4.13 จากตารางที่ 4.12 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 5 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำเมื่อนำผลจากตารางมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า P_5 และแรงดันไฟฟ้า V_5 ดังเส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.11 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ

P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)
10	1.0164	283	0.3747	183	0.2016	133	0.1393
60	1.0023	268	0.3408	176	0.1920	129	0.1347
110	0.9977	254	0.3129	169	0.1833	126	0.1304
160	0.9479	241	0.2896	163	0.1753	122	0.1261
210	0.9110	230	0.2697	157	0.1681	119	0.1227
260	0.8620	219	0.2525	152	0.1614	116	0.1191
310	0.7823	209	0.2374	147	0.1552	113	0.1152
327	0.5632	200	0.2241	142	0.1495	110	0.1125
314	0.4749	191	0.2122	138	0.1442	107	0.1095

ตารางที่ 4.12 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR

P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)	P_5 (MW)	V_5 (p.u.)
10	1.0000	296	0.4147	191	0.2120	138	0.1442
60	0.9791	281	0.3728	183	0.2014	133	0.1393
110	0.9542	267	0.3394	176	0.1918	129	0.1347
160	0.9241	253	0.3120	169	0.1832	126	0.1304
210	0.8864	241	0.2889	163	0.1753	122	0.1264
260	0.8350	229	0.2691	157	0.1680	119	0.1227
310	0.7427	218	0.2520	152	0.1613	116	0.1191
321	0.5508	208	0.2371	147	0.1552	113	0.1157
310	0.4698	199	0.2238	142	0.1495	110	0.1125



รูปที่ 4.13 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR ที่บัส 5

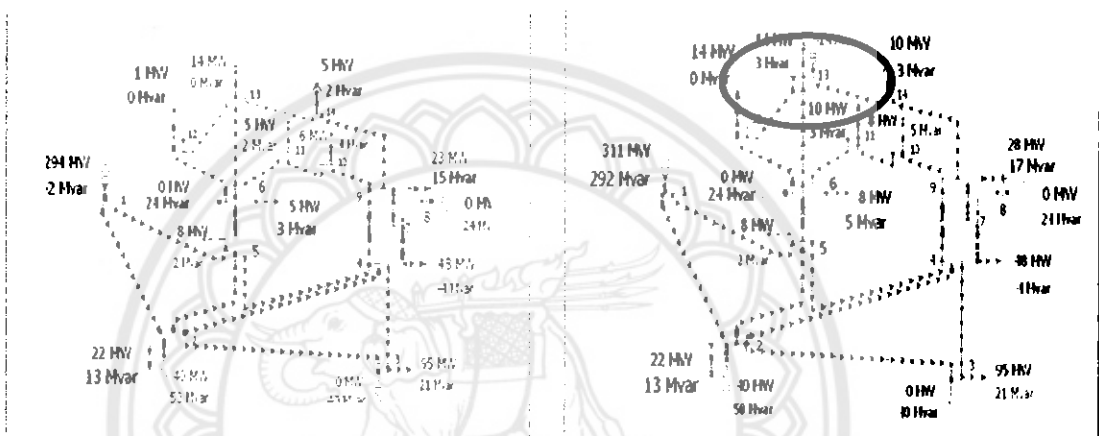
จากรูปที่ 4.13 ในสถานะเมื่อยังไม่ต่อตัวเหนี่ยวนำที่บัส 5 เมื่อมีโหลดน้อย เช่น 10 MW ทำให้มีแรงดันไฟฟ้า V_5 สูงกว่าค่าพิกัด (1.0 p.u.) จากกราฟเส้นสีแดงรูปที่ 4.13 ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อแรงดันเกินพิกัดจะทำให้อุปกรณ์ในระบบเกิดความเสียหาย

จากตารางที่ 4.12 เมื่อมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับโหลดที่บัส 5 ขนาด 26 MVAR ขณะที่ มีโหลดน้อยเช่น 10 MW เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟเส้นสีน้ำเงินรูปที่ 4.13 การต่อตัวเหนี่ยวนำจะช่วยให้แรงดัน V_5 ที่บัส 5 ลดลงทำให้แรงดันปลายสายลดลงด้วย

แต่เมื่อโหลดมีค่ามากขึ้น เช่น 310 MW การต่อตัวเหนี่ยวนำจะเป็นภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดัน V_s ลดลงมากเกินไป ซึ่งมีค่าเพียง 0.7427 p.u. ดังนั้นในการต่อตัวเหนี่ยวนำจึงต้องระมัดระวังเมื่อระบบมีโหลดสูง

4.3.2 การต่อตัวเหนี่ยวนำขนาดที่บัส 13

บัสนี้ได้เลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 13.4 MVAR เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า P_{13} ที่บัส 13 พิจารณาแรงดัน V_{13} ก่อนและหลังการต่อตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.14



(ก) ที่บัส 13 ไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ (ข) ที่บัส 13 ต่อตัวเหนี่ยวนำ 26 MVAR
รูปที่ 4.14 ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR ที่บัส 13

รูปที่ 4.14 (ก) และรูปที่ 4.14 (ข) แสดงการประมวลผลจากโปรแกรมก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 26 MVAR และวัดค่ากำลังไฟฟ้า P_{13} และแรงดันไฟฟ้า V_{13} ได้ดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 13 เมื่อไม่ได้ต่อตัวเหนี่ยวนำ ดังเส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 4.15

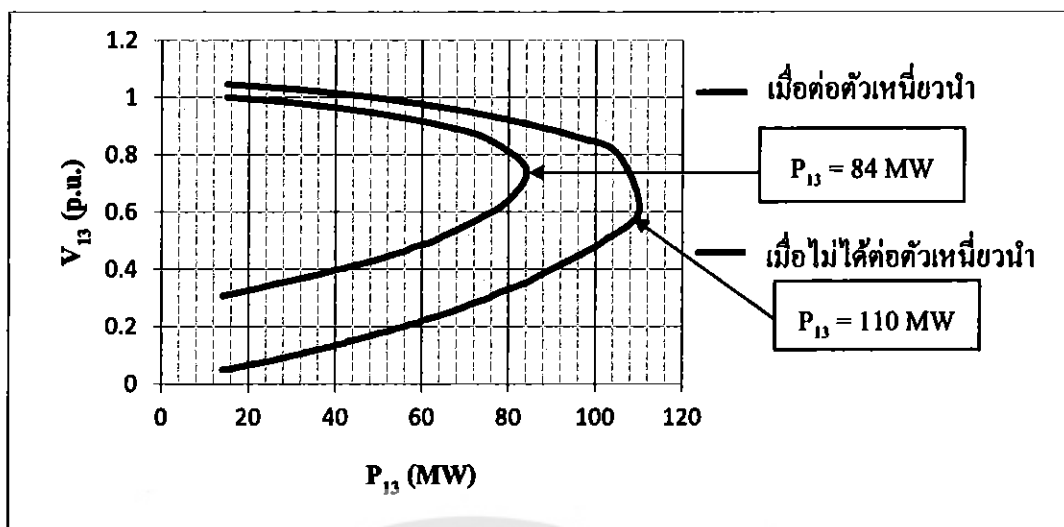
ตารางที่ 4.14 แสดงการปรับเพิ่มขนาดของโหลดที่บัส 13 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำดังเส้นกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.13 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 13 เมื่อไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ

P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)
15	1.0459	77	0.3137	48	0.1683	87	0.3786
25	1.0356	75	0.2975	35	0.1167	84	0.3534
35	1.0224	72	0.2834	34	0.1127	80	0.3321
45	1.0075	70	0.2705	33	0.1090	52	0.1827
55	0.9875	68	0.2588	32	0.1055	50	0.1776
65	0.9647	66	0.2482	31	0.1022	49	0.1728
75	0.9380	64	0.2385	30	0.0991	22	0.0719
85	0.9058	62	0.2296	29	0.0948	21	0.0689
95	0.8647	60	0.2214	28	0.0922	20	0.0659
105	0.8044	59	0.2138	27	0.0884	19	0.0629
110	0.6047	57	0.2067	26	0.0839	18	0.0599
102	0.5013	56	0.2001	25	0.0809	17	0.0569
96	0.4478	54	0.1939	24	0.0779	16	0.0539
91	0.4090	53	0.1882	23	0.0749	15	0.0509

ตารางที่ 4.14 ผลของแรงดันจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส 13 เมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR

P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)	P_{13} (MW)	V_{13} (p.u.)
15	1.0005	62	0.4954	38	0.3899	26	0.3480
25	0.9889	58	0.4779	37	0.3860	25	0.3445
35	0.9734	56	0.4633	36	0.3824	24	0.3411
45	0.9546	53	0.4510	35	0.3791	23	0.3376
55	0.9312	51	0.4407	34	0.3756	22	0.3342
65	0.9007	49	0.4315	33	0.3721	21	0.3307
75	0.8561	47	0.4234	32	0.3687	20	0.3273
84	0.7514	45	0.4162	31	0.3652	19	0.3238
80	0.6415	43	0.4098	30	0.3618	18	0.3204
74	0.5835	42	0.4041	29	0.3583	17	0.3169
69	0.5452	40	0.3989	28	0.3549	16	0.3135
65	0.5172	39	0.3942	27	0.3514	15	0.3100



รูปที่ 4.15 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำ 13.4 MVAR ที่บัส 13

จากรูปที่ 4.15 ในสภาวะเมื่อยังไม่ต่อตัวเหนี่ยวนำที่บัส 13 เมื่อมีโหลดน้อยเช่น 15 MW ทำให้มีแรงดันไฟฟ้า V_{13} สูงกว่าค่าปกติคือ 1.0 p.u. ดังกราฟเส้นสีแดงรูปที่ 4.15 ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อแรงดัน V_{13} เกินจะทำให้อุปกรณ์ในระบบเกิดความเสียหาย

จากตารางที่ 4.13 เมื่อมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับโหลดที่บัส 13 ขนาด 13.4 MVAR ขณะที่มิโหลดน้อย 15 MW เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟเส้นสีน้ำเงินรูปที่ 4.15 การต่อตัวเหนี่ยวนำจะช่วยให้แรงดัน V_{13} ที่บัส 13 ลดลงทำให้แรงดัน V_{13} ปลายสายลดลง

แต่เมื่อโหลดมีค่ามากขึ้น เช่น 84 MW การต่อตัวเหนี่ยวนำจะเป็นภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดัน V_{13} ลดลงมากเกินไปซึ่งมีค่าเพียง 0.7514 p.u. ดังนั้นในการต่อตัวเหนี่ยวนำจึงต้องระมัดระวังเมื่อระบบมีโหลดสูง

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 การใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส

การต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส โดยใช้โปรแกรม PowerWorld จากนั้นพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน โดยทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัสนั้นๆและนำค่าผลการประมวลจากโปรแกรมมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า การประมวลผลจากโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

สำหรับกรณีที่ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสคอนเดนเซอร์จะไม่ช่วยในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟอยู่แล้วจึงไม่ส่งผลในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดให้ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อยังไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

ในสถานะที่มีโหลดมากจะทำให้แรงดันที่บัสลดลงอย่างมากส่งผลให้ระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสนั้นๆจะส่งผลให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นระบบไฟฟ้าก็มีเสถียรภาพมากขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อสถานะที่มีโหลดน้อยลงจะทำให้มีแรงดันสูงที่บัสจึงควรปลดตัวเก็บประจุออกเพื่อไม่ให้แรงดันที่บัสสูงกว่าแรงดันพิกัด

5.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส

การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนานเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส โดยใช้โปรแกรม PowerWorld จากนั้นพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน โดยทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัสนั้นๆและนำค่าผลการประมวลจากโปรแกรมมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า การประมวลผลจากโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนานสามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเพื่อไม่ให้มีแรงดันไฟฟ้าเกินพิกัดเมื่อเทียบกับเมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

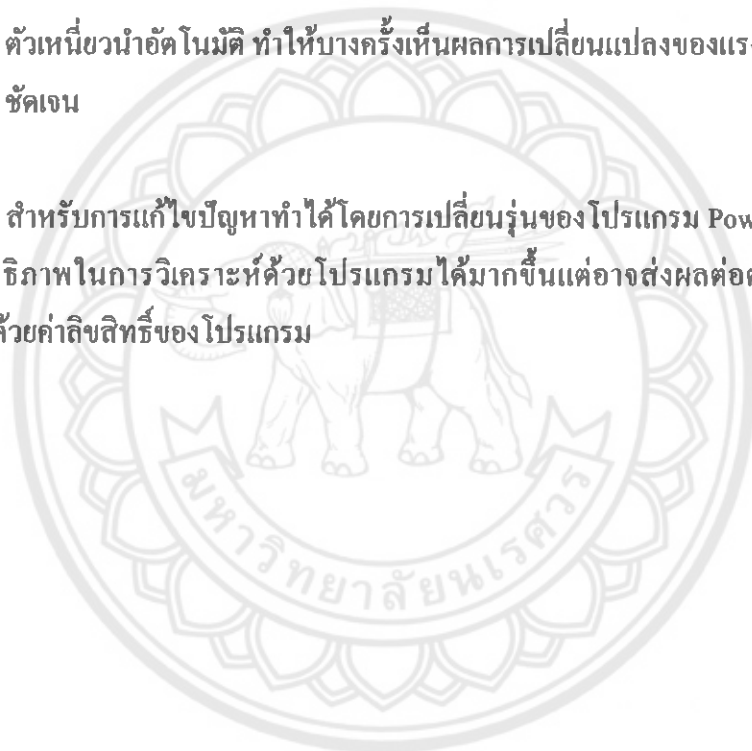
สำหรับกรณีมีโหลดน้อยจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเกินที่ปลายซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าควรนำตัวเหนี่ยวนำมาต่อแบบขนานเพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายหรือบัสนั้นๆลดลงอยู่ในสภาวะปกติ

สำหรับกรณีมีโหลดมากขึ้นควรปลดตัวเหนี่ยวนำออกทันทีเพราะตัวเหนี่ยวนำเปรียบเสมือน โหลดชนิดหนึ่งซึ่งทำให้แรงดันตก

5.3 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. โปรแกรม PowerWorld นั้นเป็นรุ่นสำหรับนักศึกษามีการแสดงรายละเอียดของโปรแกรมจำกัด จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาและออกแบบวงจรงาน
2. การต่อตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมไม่สามารถทำได้เนื่องจากโปรแกรม PowerWorld ไม่มี เครื่องมือการต่อแบบอนุกรมจึงไม่สามารถศึกษาแบบต่ออนุกรมได้
3. เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้น โปรแกรม PowerWorld จะปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอัตโนมัติ ทำให้บางครั้งเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกำลังไฟฟ้าไม่ชัดเจน

สำหรับการแก้ไขปัญหาทำได้โดยการเปลี่ยนรุ่นของโปรแกรม PowerWorld ให้เป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมได้มากขึ้นแต่อาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการทำวิจัยที่เพิ่มขึ้นด้วยค่าลิขสิทธิ์ของ โปรแกรม



เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชัย อารีย์ (2552) การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system analysis) สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ชนิตา รอดอินทร์และเนตรทราย สุสัมฤทธิ์, (2540) Advanced engineering group. ระบบกำลังไฟฟ้า. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [3] J. Duncan glover, mulukutla S. sarma and thomas J. Overbye, (2545) Power system analysis and design.
- [4] <http://www.PowerWorld.com/>

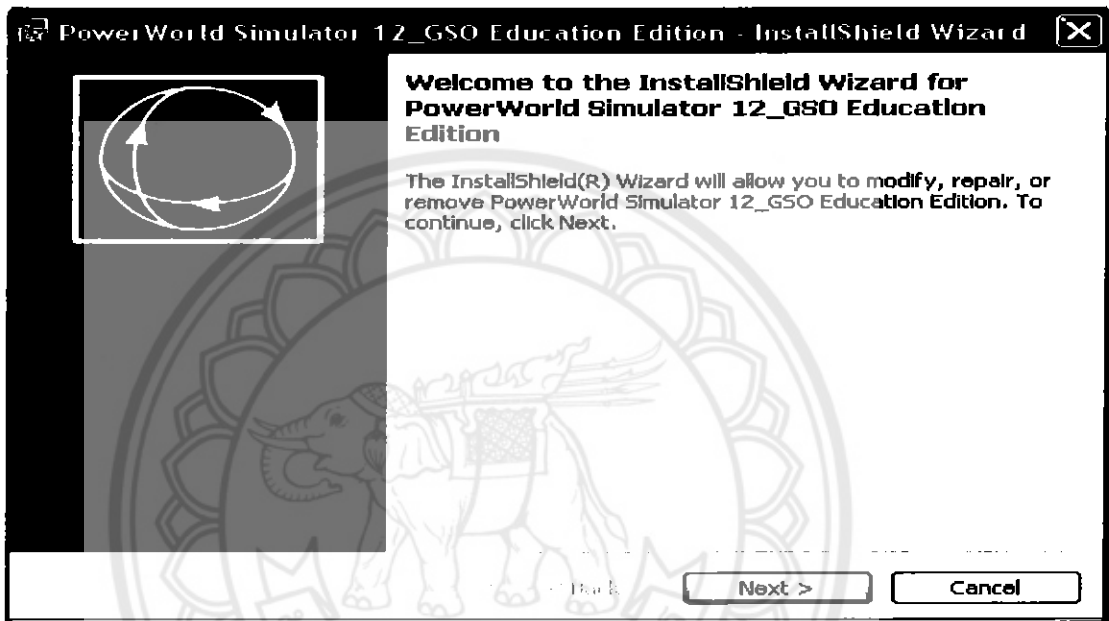




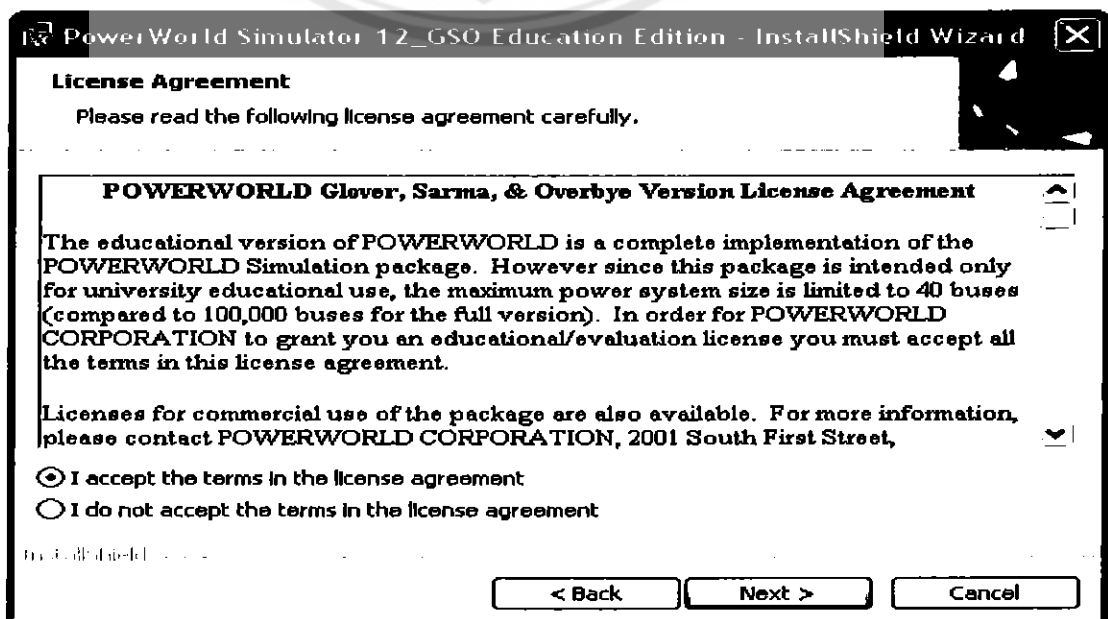


วิธีติดตั้งโปรแกรม PowerWorld

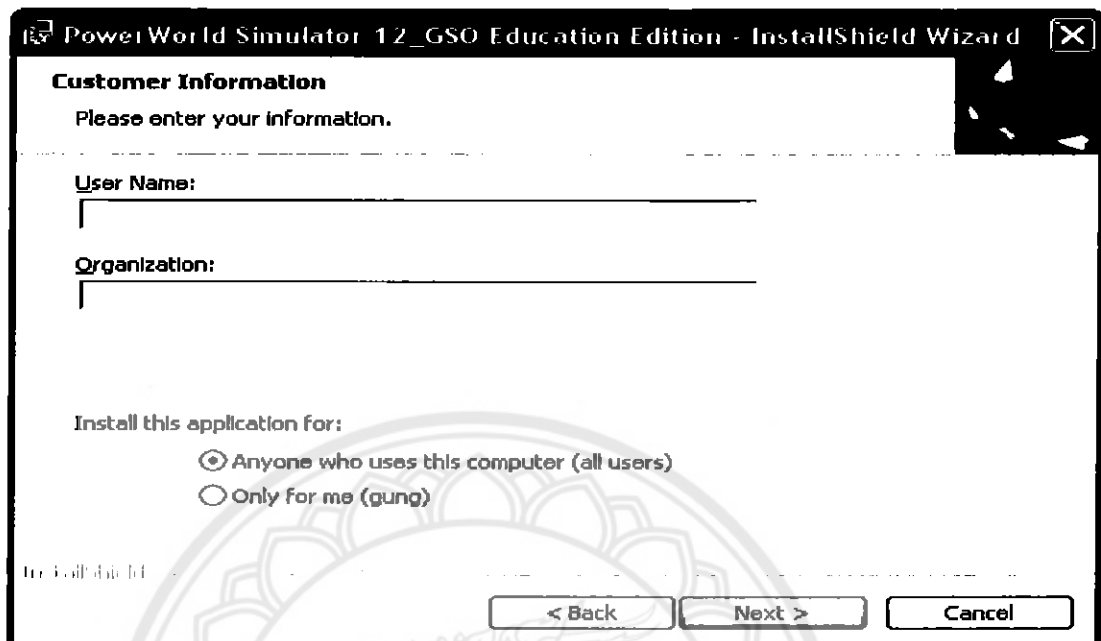
1. ใส่แผ่น โปรแกรม PowerWorld ที่ต้องการติดตั้งลงในเครื่องรอสักครู่โปรแกรมรันโดยอัตโนมัติจากนั้นจะมีหน้าต่างขึ้นมาถ้าหากใส่แผ่นโปรแกรมลงไปแล้วไม่รันอัตโนมัติให้กดเข้าไปที่ My computer ค้างไว้คลิกตรง Disk ที่แผ่น โปรแกรมอยู่ จากนั้นให้กด Next



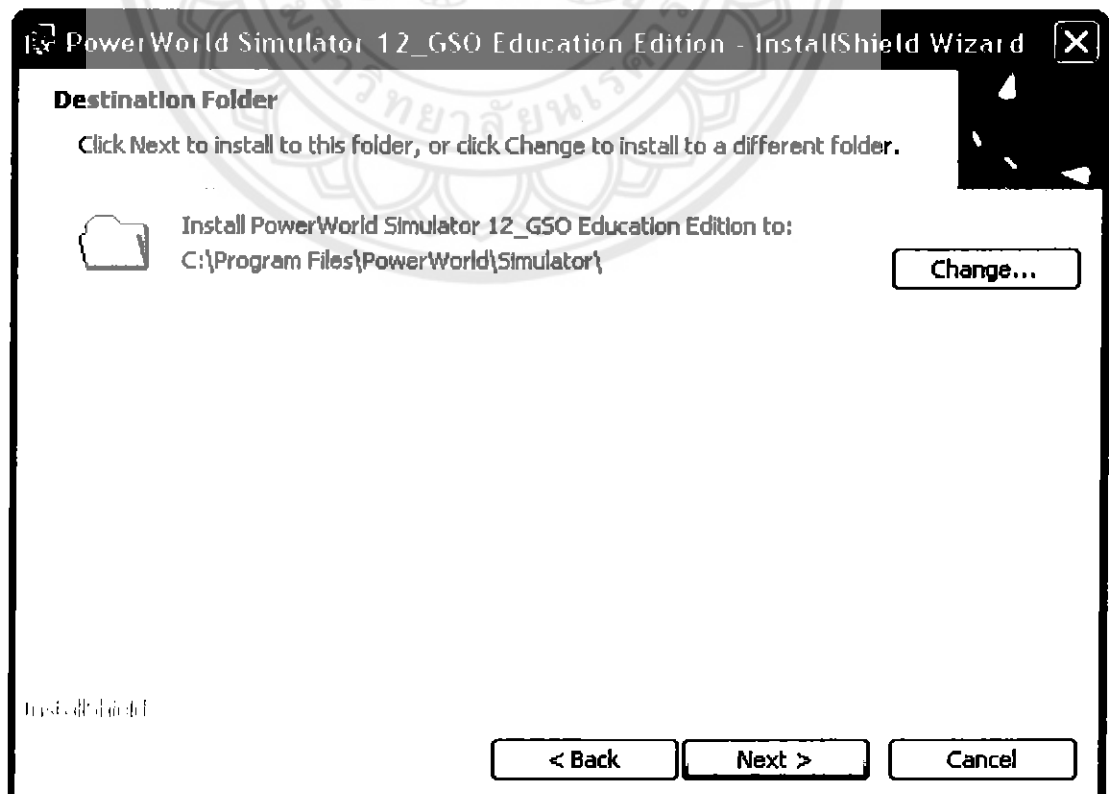
2. จะมีเงื่อนไขในการใช้โปรแกรม PowerWorld ให้กดเลือก I Accept the terms in the license agreement แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



3. จากนั้นให้ใส่ User Name แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



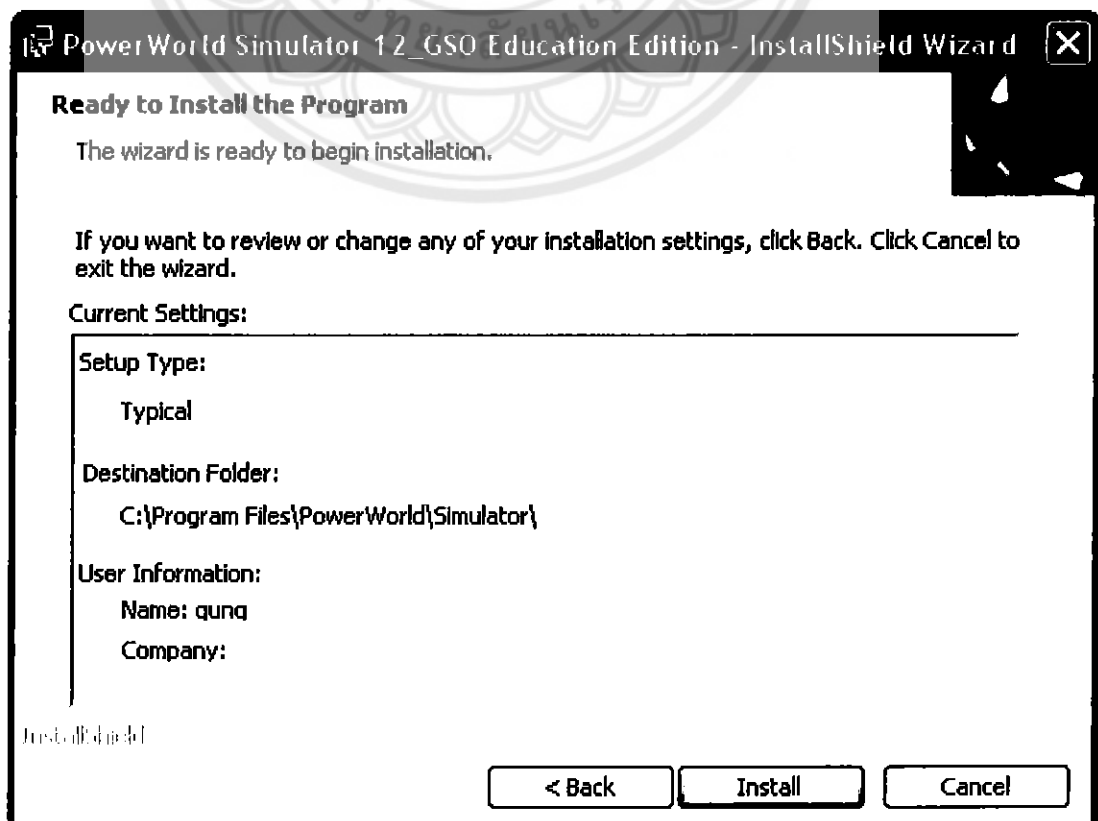
4. จากนั้นให้เลือกไฟล์ โปรแกรม PowerWorld ไปเก็บไว้ที่เราต้องการจะเก็บแล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป

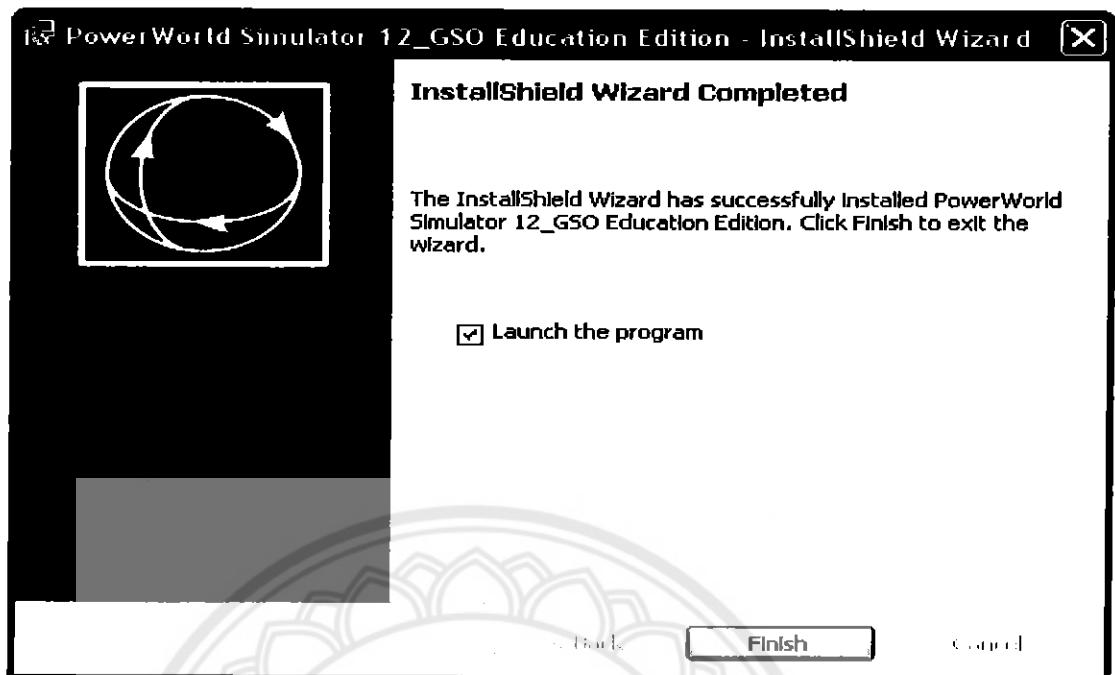


5. จากนั้นให้เลือกวิธีติดตั้งแบบ Typical แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



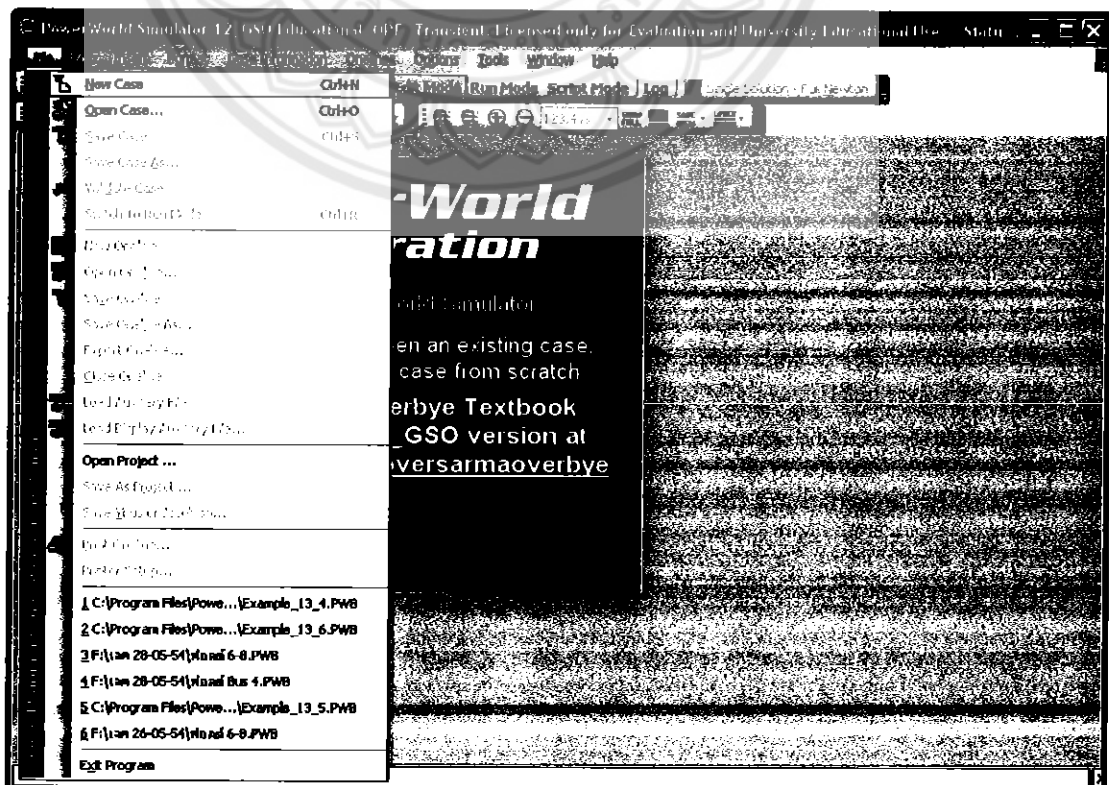
6. จากนั้นกด Install เพื่อติดตั้ง โปรแกรม PowerWorld หลังจากนั้นให้รอนจนกระทั่ง โปรแกรมลงเสร็จให้กด Finish เท่านั้นก็สามารถใช้โปรแกรม PowerWorld ได้ตามที่เรากำลังต้องการ



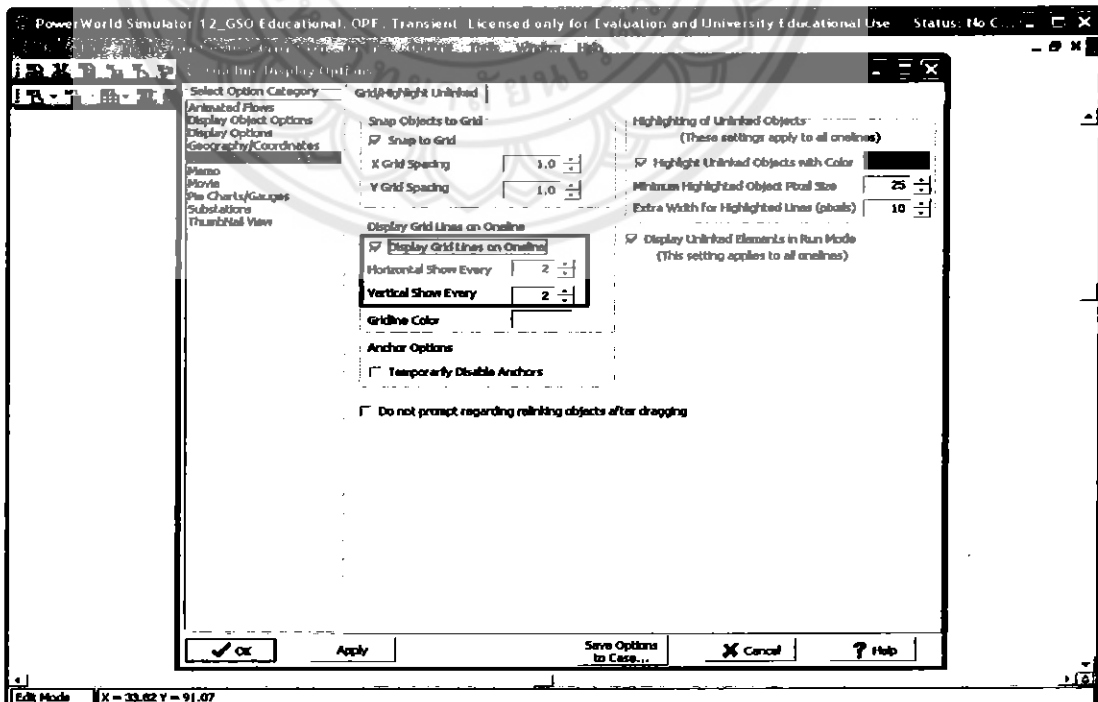
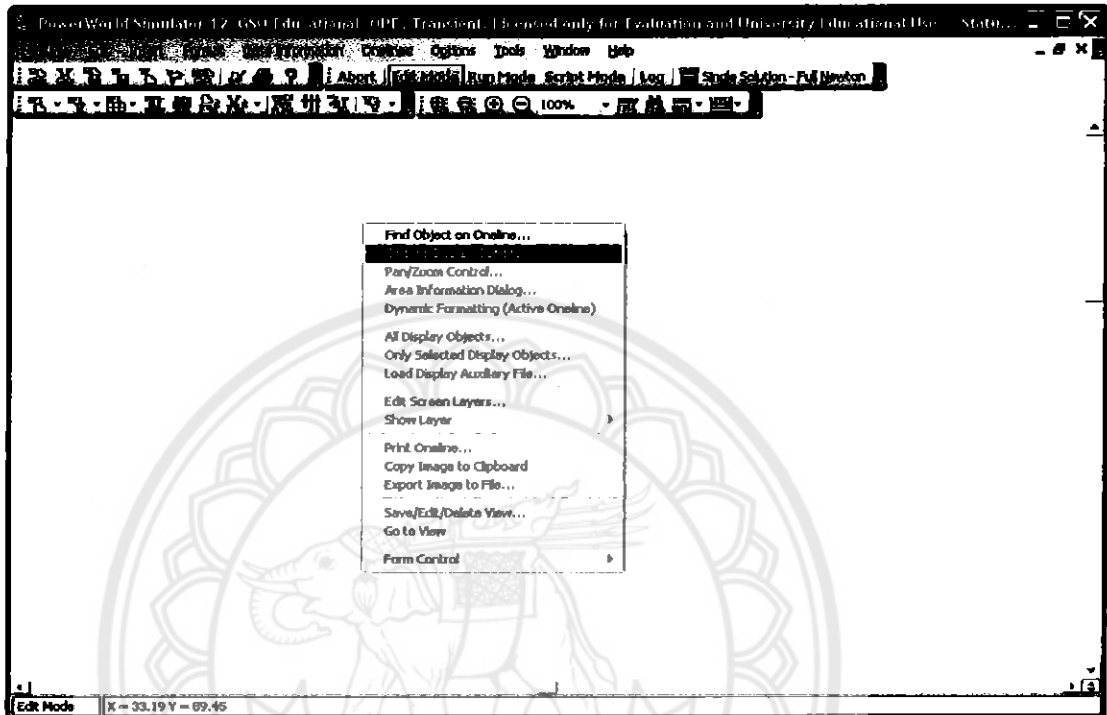


วิธีการออกแบบระบบไฟฟ้าในโปรแกรม PowerWorld

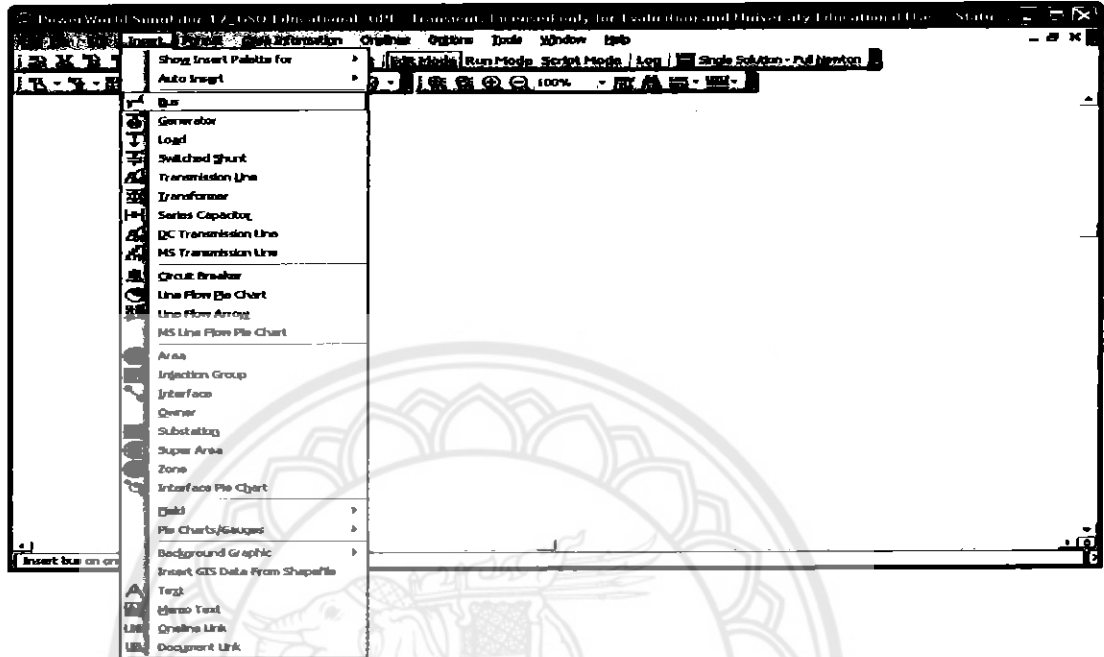
1. เปิดโปรแกรม PowerWorld ออกมาแล้วทำการสร้าง File ใหม่โดยการไปที่ File → New case ดังรูป



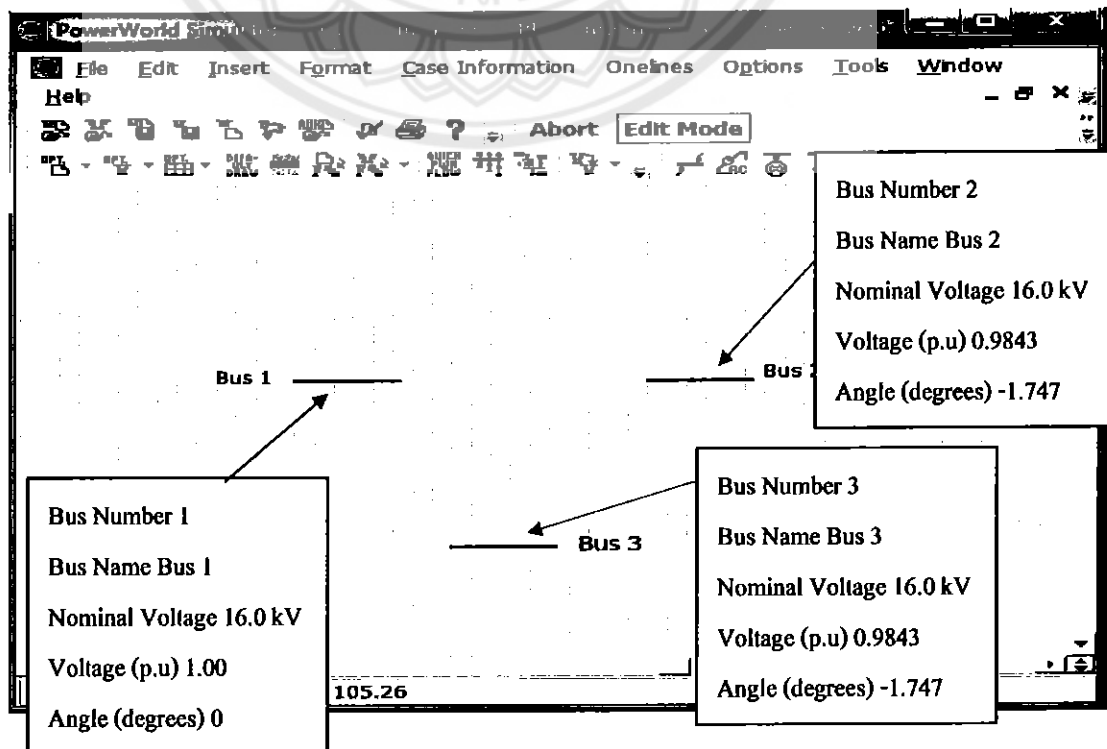
2. จากนั้นคลิกขวากลางหน้ากระดาษ เพื่อสร้างตารางที่ทำให้ง่ายต่อการออกแบบโดยคลิกขวาด
Online display options → Grid/highlight unlinked จากนั้นทำการคลิกค่าตรง Display grid
lines ดังรูป



- จากนั้น ไปคลิกที่ Insert แล้วจะมีอุปกรณ์ต่างๆออกมาให้เราเลือกใช้อุปกรณ์มาสร้างระบบตามที่ต้องการออกแบบผังรูป



- จากนั้นทำการวาดระบบ โดยการวาดบัสขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรกเมื่อวาดบัสเสร็จให้วาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง และ โหลด ขณะเดียวกันกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าไปด้วยเมื่อทำกาออกแบบเสร็จจะได้วงจรที่ต้องการ การกำหนดค่าบัสต้องกำหนดให้ค่าที่ระบบเหมาะสมเพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ



5. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง

Parameters Line 12
 Series Resistance (R) 0.300
 Series Resistance (X) 0.600
MVA Limits
 Limit A 20.000
 Limit A 10.000
 Limit A 10.000

Parameters Line 13
 Series Resistance (R) 0.300
 Series Resistance (X) 0.600
MVA Limits
 Limit A 20.000

Parameters Line 23
 Series Resistance (R) 0.300
 Series Resistance (X) 0.600
MVA Limits
 Limit A 20.000

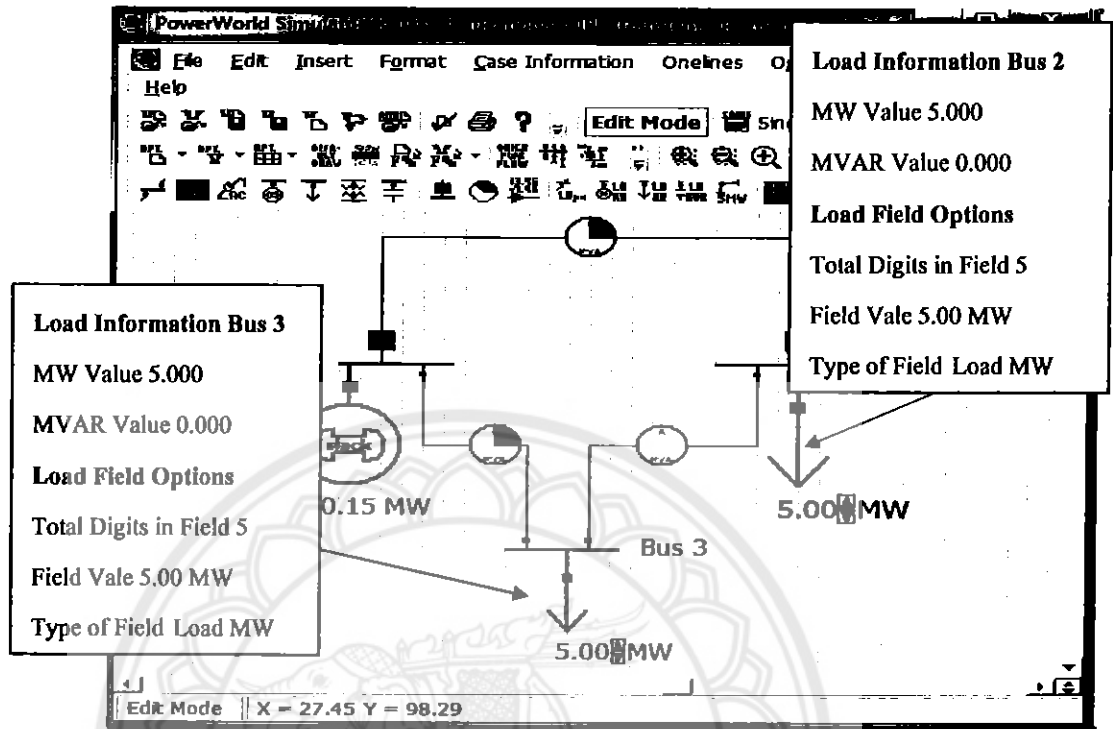
The diagram shows a network with Bus 2, Bus 3, and a generator connected to Bus 3. A value of 1.15 is indicated near Bus 3.

6. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

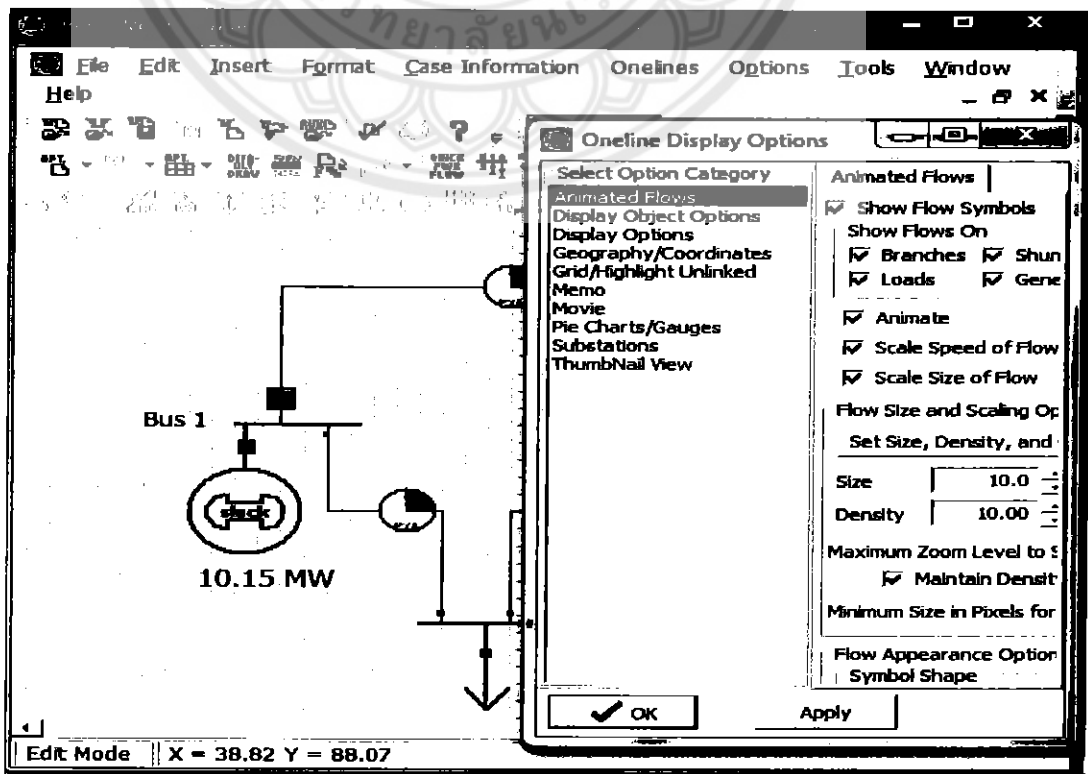
Power and Voltage Control
 MW Output 10.15
 Max MW Output 40
Voltage Control
 MVAR Output 0.310
 Min MVARs -99998
 Max MVAR 99998

The diagram shows a network with Bus 1, Bus 2, and Bus 3. A generator is connected to Bus 1 with a MW output of 0.00 MW. The status bar at the bottom indicates 'Edit Mode X = 87.58 Y = 76.72'.

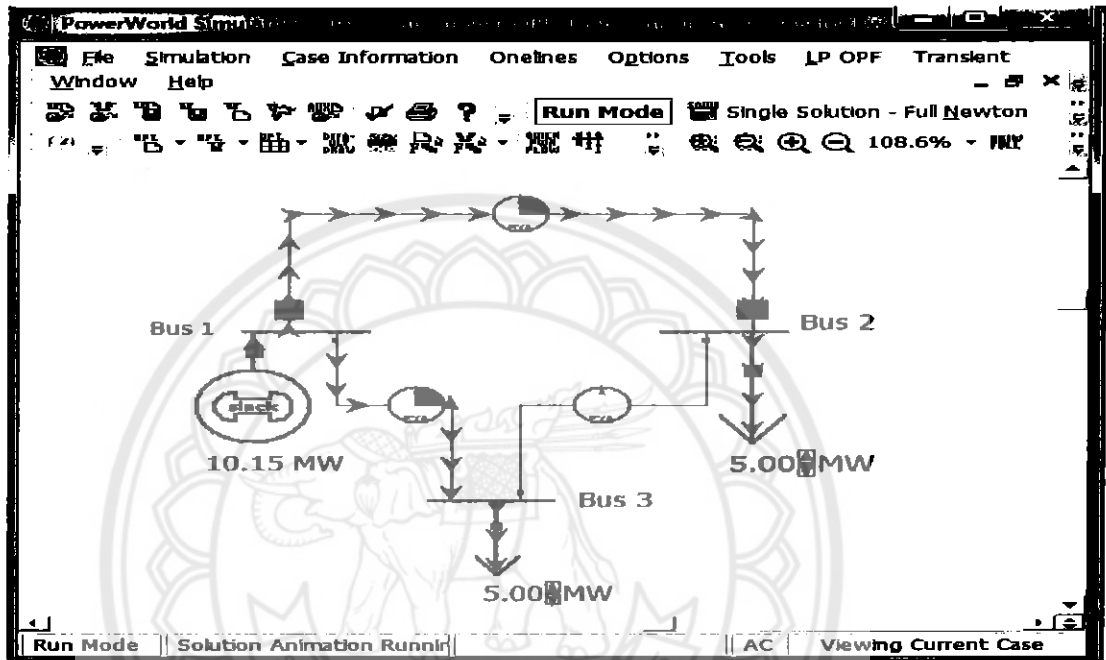
7. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโหลดบัสดังรูป



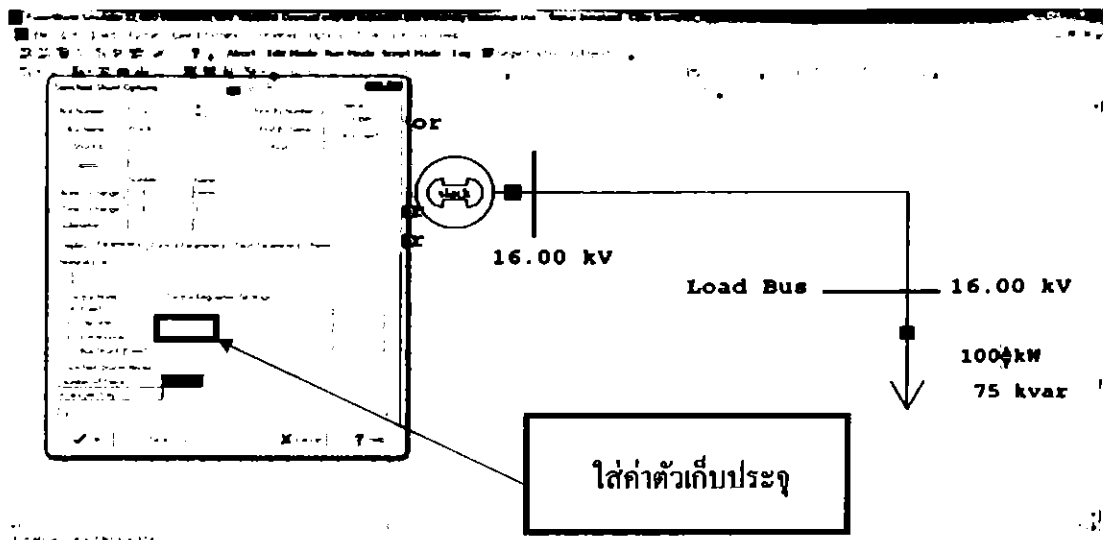
8. ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเสร็จแล้วทำการ Run Mode แล้วคลิกตรงที่ Simulation จากนั้นทำการ Solve and Animate ดังรูป



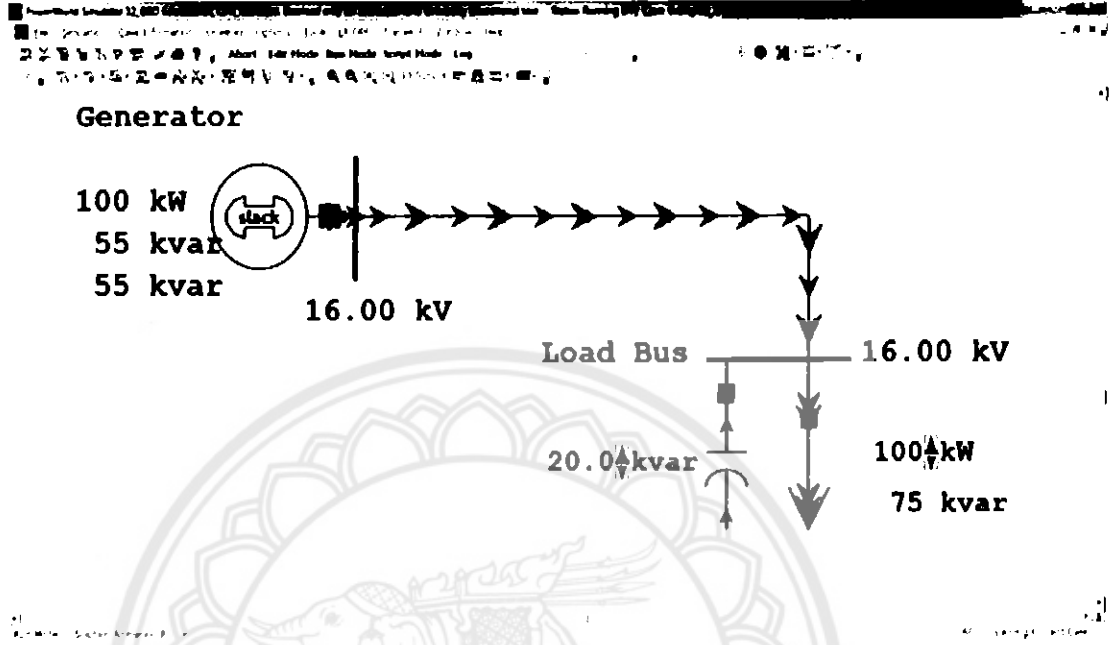
9. เมื่อทำการ Solve and Simulation จะเห็นว่าลูกศรกำลังมีขนาดเล็ก หากต้องการให้มีขนาดใหญ่ ให้ไปที่คลิกขวา Online Display Options แล้วไปที่ Animated Flows .ให้ไปเปลี่ยนค่าตรงที่ Max Line Flows, Max Load Value, Max Generator ให้มีค่าเป็น 1 ทั้งหมด ก็จะได้ลูกศรกำลังกำลังไฟฟ้ามีขนาดตามต้องการดังรูป



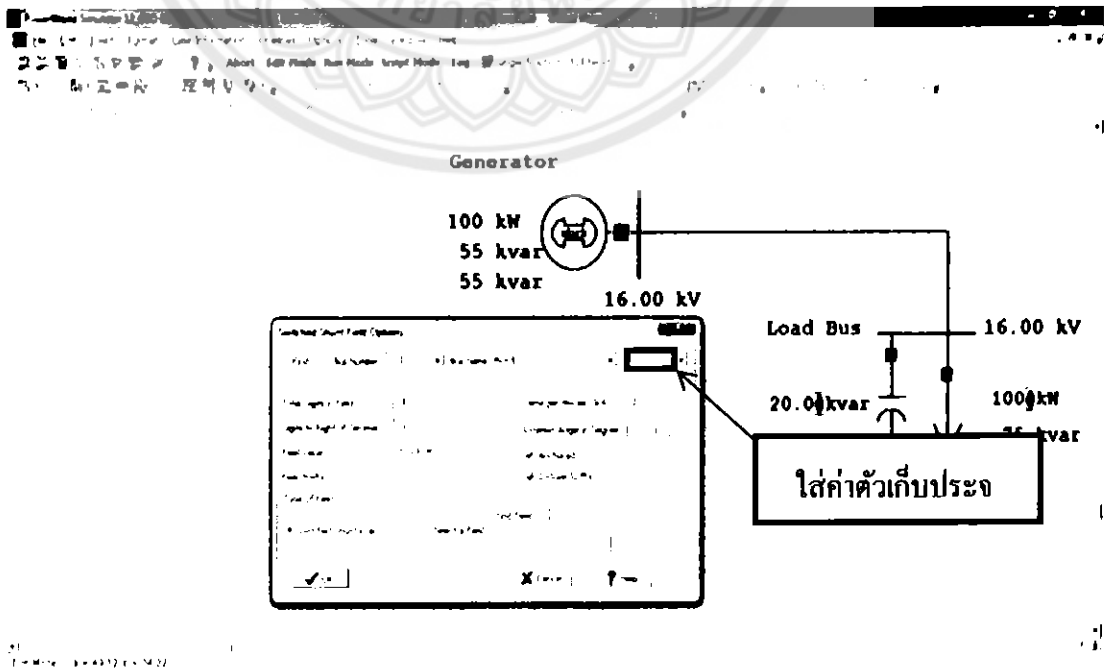
10. วิธีการต่อตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าคลิกซ้ายที่สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแล้วมาคลิกซ้ายบัสที่ต้องการใส่ตัวเก็บประจุแล้วทำการป้อนค่าตัวเก็บประจุในช่อง Nominal kVAR ของข้อมูลตัวเก็บประจุ



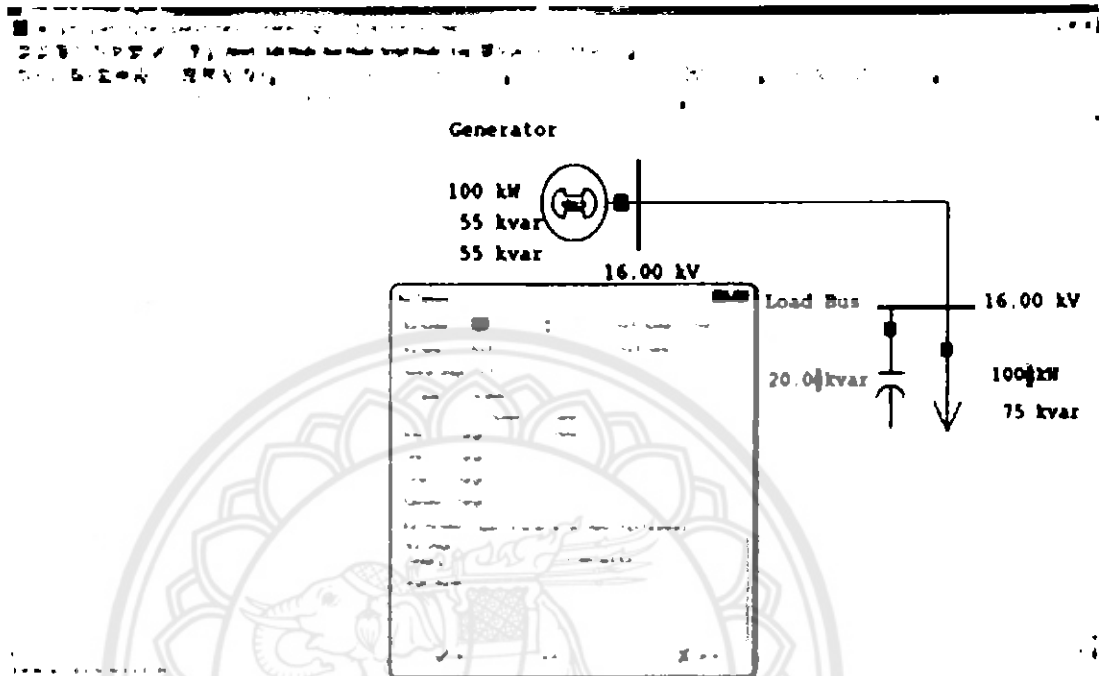
11. จะได้ว่าตัวเก็บประจุต่อบัสแล้วคลิกที่ซ้าย Run mode กดลูกศรสีเขียวเพื่อให้โปรแกรมประมวลผล



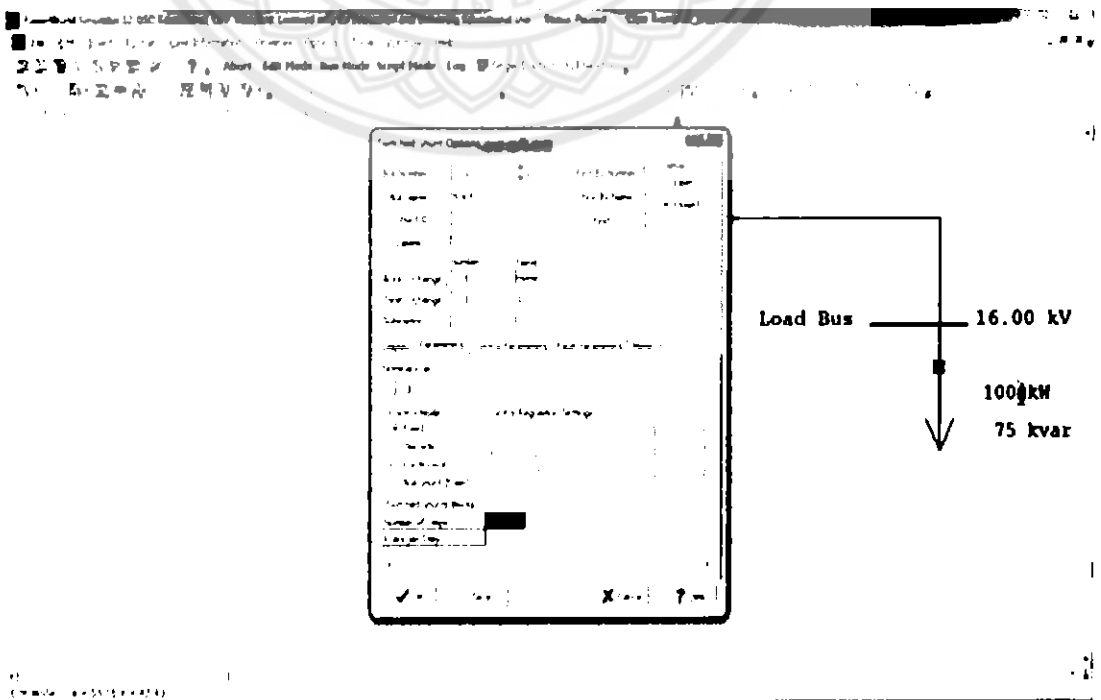
12. การปรับค่าตัวเก็บประจุให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงในโปรแกรมโดยคลิกขวาที่ค่าของตัวเก็บประจุจะมีตารางข้อมูลขึ้นมาให้ใส่ค่าที่ Delta per mouse click จะสามารถปรับค่าตัวเก็บประจุโดยที่โปรแกรมยังประมวลผลอยู่



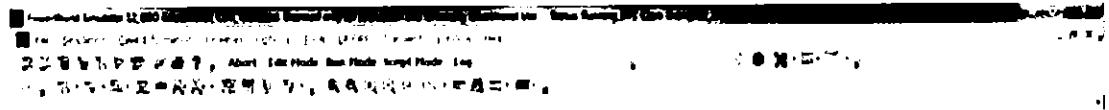
13. ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อต่อตัวเก็บประจุ คลิกขวาที่บัสเลือก Bus information dialog ดูค่าแรงดันที่ช่อง Bus voltage



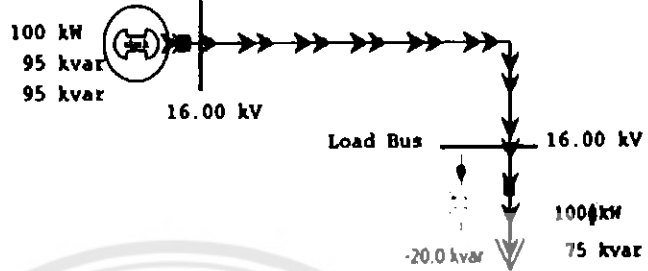
14. วิธีการต่อตัวเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้าคลิกซ้ายที่สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแล้วมาคลิกซ้ายบัสที่ต้องการใส่ค่าตัวเหนี่ยวนำเป็นค่าลบทำในช่อง Nominal kVAR ของข้อมูลตัวเหนี่ยวนำ



15. จะได้ว่าตัวเหนี่ยวนำค่อที่บัสคลิกที่ซ้าย Run mode กดลูกศรสีเขียวเพื่อให้โปรแกรมประมวลผล



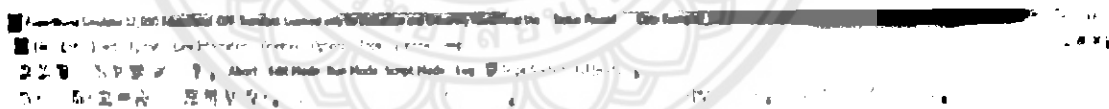
Generator



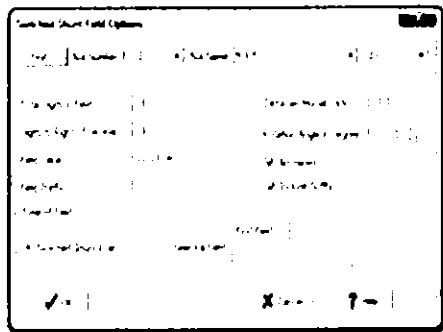
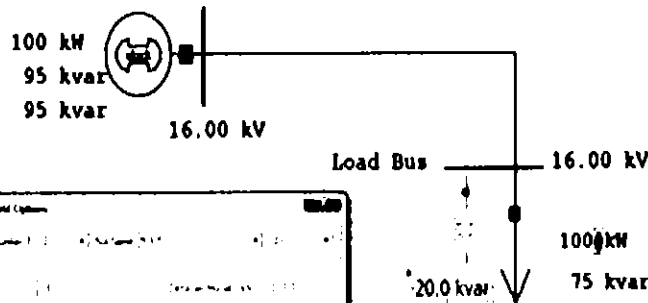
File Edit Run Help

File Edit Run Help

16. การปรับค่าตัวเหนี่ยวนำให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงในโปรแกรมโดยคลิกขวาที่ค่าของตัวเหนี่ยวนำจะมีตารางข้อมูลขึ้นมาให้ป้อนค่าที่ Delta per mouse click จะสามารถปรับค่าตัวเก็บประจุโดยที่โปรแกรมยังประมวลผลอยู่



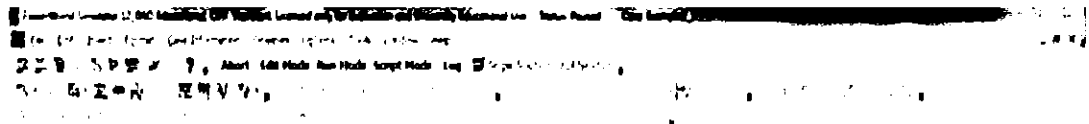
Generator



File Edit Run Help

File Edit Run Help

17. ดูค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อต่อตัวเหนี่ยวนำคลิกขวาที่บัส เลือก Bus information dialog ดูค่าแรงดันที่ช่อง Bus voltage



Generator

100 kW
95 kvar
95 kvar



16.00 kV

Load Bus

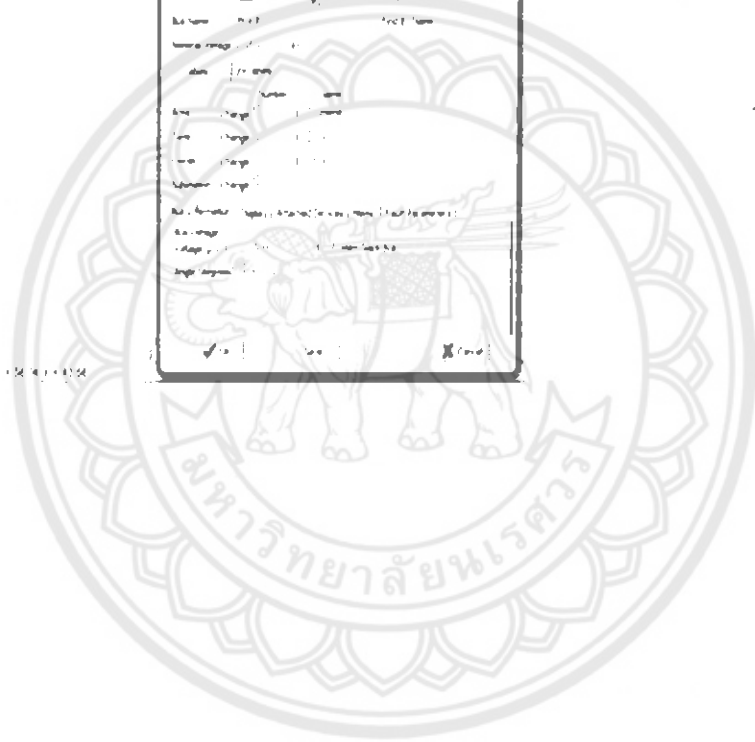
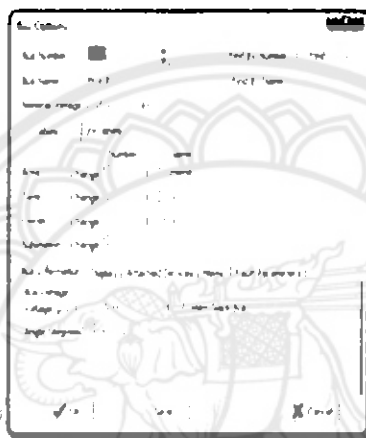
16.00 kV

100 kW

-20.0 kvar



75 kvar



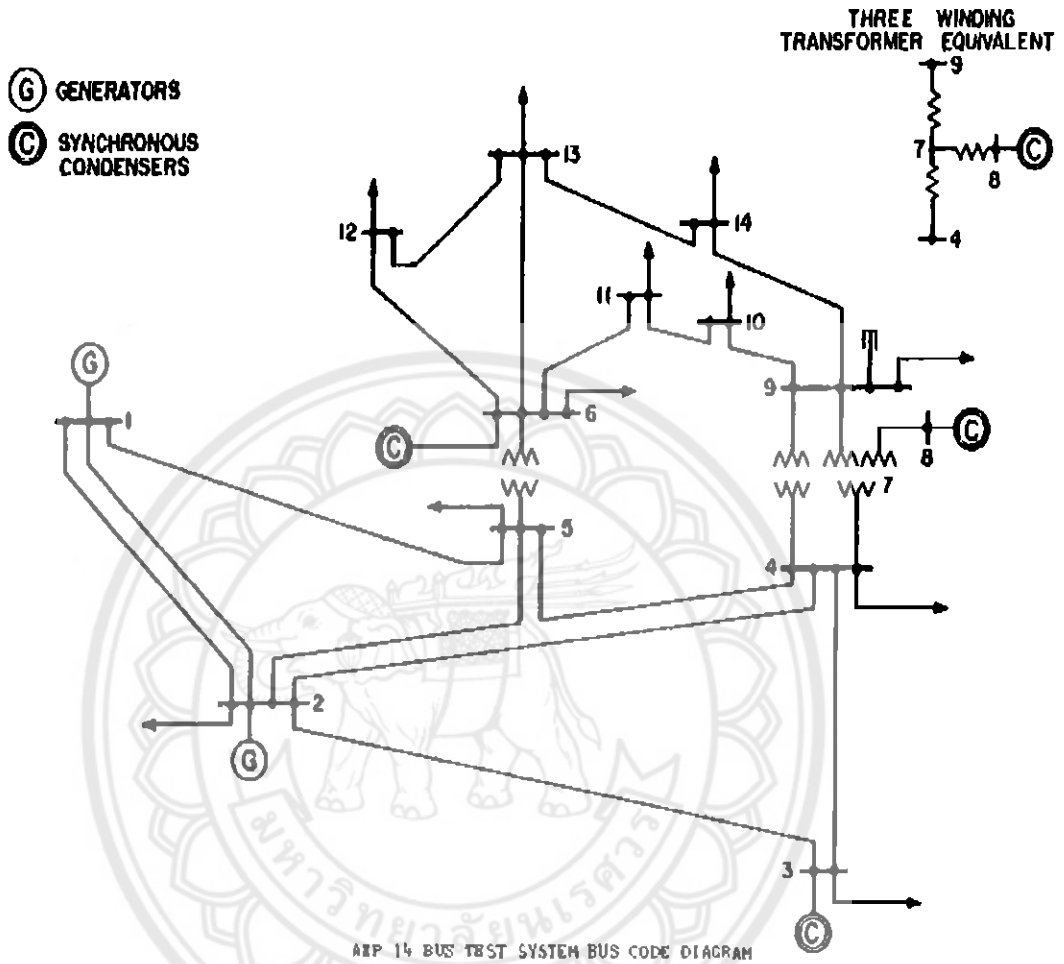


ภาคผนวก ข

ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส



ตารางข้อมูลที่บัสต่างๆ

08/19/93 UW ARCHIVE		100.0 1962 W IEEE 14 Bus Test Case																
BUS DATA FOLLOWS		14 ITERS																
1	Bus 1	HV	1	1	3	1.060	0.0	0.0	0.0	232.4	-16.9	0.0	1.060	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	Bus 2	HV	1	1	2	1.045	-4.98	21.7	12.7	40.0	42.4	0.0	1.045	50.0	-40.0	0.0	0.0	0
3	Bus 3	HV	1	1	2	1.010	-12.72	94.2	19.0	0.0	23.4	0.0	1.010	40.0	0.0	0.0	0.0	0
4	Bus 4	HV	1	1	0	1.019	-10.33	47.8	-3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
5	Bus 5	HV	1	1	0	1.020	-8.78	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
6	Bus 6	LV	1	1	2	1.070	-14.22	11.2	7.5	0.0	12.2	0.0	1.070	24.0	-6.0	0.0	0.0	0
7	Bus 7	ZV	1	1	0	1.062	-13.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
8	Bus 8	TV	1	1	2	1.090	-13.36	0.0	0.0	0.0	17.4	0.0	1.090	24.0	-6.0	0.0	0.0	0
9	Bus 9	LV	1	1	0	1.056	-14.94	29.5	16.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.19	0
10	Bus 10	LV	1	1	0	1.051	-15.10	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
11	Bus 11	LV	1	1	0	1.057	-14.79	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
12	Bus 12	LV	1	1	0	1.055	-15.07	6.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
13	Bus 13	LV	1	1	0	1.050	-15.16	13.5	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
14	Bus 14	LV	1	1	0	1.036	-16.04	14.9	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-999																		
BRANCH DATA FOLLOWS		20 ITERS																
1	2	1	1	1	0	0.01938	0.05917	0.0528	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	1	1	1	0	0.05403	0.22304	0.0492	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	1	1	1	0	0.04699	0.19797	0.0438	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	1	1	0	0.05811	0.17632	0.0340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	1	1	1	0	0.05695	0.17388	0.0346	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	1	1	1	0	0.06701	0.17103	0.0128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	1	1	1	0	0.01335	0.04211	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	7	1	1	1	0	0.0	0.20912	0.0	0	0	0	0	0	0	0.978	0.0	0.0	0.0
4	9	1	1	1	0	0.0	0.55618	0.0	0	0	0	0	0	0	0.969	0.0	0.0	0.0
5	6	1	1	1	0	0.0	0.25202	0.0	0	0	0	0	0	0	0.932	0.0	0.0	0.0
6	11	1	1	1	0	0.09498	0.19890	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	12	1	1	1	0	0.12291	0.25581	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	13	1	1	1	0	0.06615	0.13027	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	8	1	1	1	0	0.0	0.17615	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	9	1	1	1	0	0.0	0.11001	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	1	1	1	0	0.03181	0.08450	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	14	1	1	1	0	0.12711	0.27038	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	11	1	1	1	0	0.08205	0.19207	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	13	1	1	1	0	0.22092	0.19988	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	14	1	1	1	0	0.17093	0.34802	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-999																		
LOSS ZONES FOLLOWS		1 ITERS																
1 IEEE 14 BUS																		
-99																		
INTERCHANGE DATA FOLLOWS		1 ITERS																
1 2 Bus 2 HV		0.0 999.99 IEEE14 IEEE 14 Bus Test Case																
-9																		
TIE LINES FOLLOWS		0 ITERS																
-999																		
END OF DATA																		