


การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เส้นโค้ง P-Q



นายรณภา เฝ้าเสถียรพันธ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

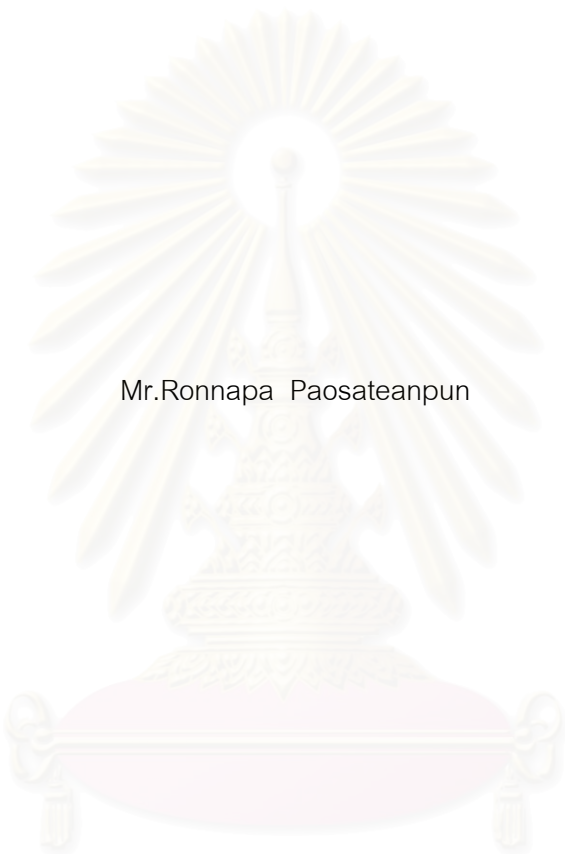
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6941-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ANALYSIS OF POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY USING P-Q CURVE



Mr.Ronnapa Paosateanpun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6941-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เส้นโค้ง P-Q
โดย	นายรณนภา เผ่าเสถียรพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(นายวุฒิชัย พึ่งประเสริฐ)

รณนภา เฝ่าเสถียรพันธ์ : การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เส้นโค้ง P-Q.
(AN ANALYSIS OF POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY USING P-Q CURVE)

อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์,
117 หน้า. ISBN 974-17-6941-5.

ปัญหาเสถียรภาพแรงดันเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจในด้านปฏิบัติการ เนื่องจากความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงต้องพัฒนาศักยภาพของระบบส่งที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายของบัสและสายส่งจากเส้นโค้ง P-Q โดยมีวัตถุประสงค์ใช้ตรวจจับตำแหน่งของบัสและสายส่งที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ เพื่อที่ป้องกันหรือแก้ไข การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายของบัสประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์สำหรับบัสอ้างอิงและเจเนเรเตอร์บัส และวิธีวิเคราะห์สำหรับโหลดบัส ซึ่งวิธีวิเคราะห์สำหรับโหลดบัสจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งจะถูกนำมาใช้กับวิธีวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายของสายส่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายทั้งสองค่ามีวิธีคำนวณที่แตกต่างกัน นอกจากการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายของบัสและสายส่งแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังเสนอวิธีการคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งในระบบอีกด้วย ระบบทดสอบขนาด 9 บัส และระบบทดสอบ 14 บัส ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายและการคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิติ _____
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2547 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4470480521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : POWER SYSTEM / VOLTAGE STABILITY / VOLTAGE COLLAPSE / SADDLE-NOSE BIFURCATION / P-Q CURVE

RONNAPA PAOSATEANPUN : AN ANALYSIS OF POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY USING P-Q CURVE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKUMVIT PHOOMVUTHISARN, Ph.D., THESIS COADVISOR : SONGSAK CHUSANAPIPUTT, Ph.D., 117 pp. ISBN 974-17-6941-5.

Voltage stability problem are now receiving special attention in power system operation because of a greater need for improving efficiency of usage of transmission capacity. This thesis proposes the bus and transmission line voltage collapse analysis approach, based on P-Q curve, for monitoring weak buses and transmission lines which may result in the voltage collapse. Before the voltage collapse will occur, an operating team is able to protect or fix the power system. The bus voltage collapse analysis approach can be sorted into 2 types, i.e. reference and generator bus type and load bus type. The load bus type is analyzed by using the bus voltage collapse coefficient. For the transmission line voltage collapse analysis approach, it is analyzed by using the line voltage collapse coefficient as well, but both of the voltage collapse coefficient calculations are absolutely different. In addition to the voltage collapse analysis approaches, the optimum installed capacitor in power system is also proposed. The proposed approaches are tested with the 9 bus and 14 bus test system.

Department Electrical Engineering Student's signature _____

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____

Academic year 2004 Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทรงศักดิ์ ชุมนพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไข เนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และ คุณวุฒิชัย พิงประเสริฐ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้ คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.9 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
2. เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.1.1 เสถียรภาพของระบบในสภาวะชั่วคราว (Transient stability).....	8
2.1.2 เสถียรภาพของระบบในสภาวะอยู่ตัว (Steady state stability).....	9
2.2 เสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability).....	10
2.3 สภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse).....	10
2.3.1 สาเหตุของการเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย.....	11
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการพังทลายของแรงดัน.....	11
2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve) เส้นโค้ง V-Q (V-Q curve) และเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve).....	13
2.4.1 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve).....	14
2.4.2 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง V-Q (V-Q curve).....	16

บทที่	หน้า
2.4.3 วิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve).....	17
2.4.4 ผิว (Surface) และผิวเกิน (Hypersurface) ของเส้นโค้ง P-Q.....	18
2.5 Saddle-node bifurcation.....	19
2.5.1 ตัวแปรและฟังก์ชัน.....	19
2.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Saddle-node bifurcation กับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	21
3. หลักการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัส.....	23
3.1 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลาย.....	23
3.1.1 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายไปตามทิศทางที่กำหนด.....	24
3.1.2 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีละเลยการพิจารณา ค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	24
3.1.2.1 วิธีคำนวณเวกเตอร์แนวฉาก.....	25
3.1.2.2 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด.....	26
3.1.3 วิธีคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีพิจารณา ค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	29
3.2 วิธีพิจารณาบัสอ่อนแอจากเส้นโค้ง P-Q.....	33
3.2.1 หลักการพิจารณาบัสอ่อนแอ กรณีบัสที่พิจารณาเป็นเจนเรเตอร์บัสหรือบัสอ้างอิง.....	33
3.2.2 หลักการพิจารณาบัสอ่อนแอ กรณีบัสที่พิจารณาเป็นโหลดบัส.....	33
3.2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส.....	34
3.3 ความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง.....	34
4. สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง.....	36
4.1 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง.....	36
4.2 ระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลาย.....	44
4.3 วิธีคำนวณกำลังจริงสูงสุดและกำลังรีแอกทีฟสูงสุดจากจุดทำงานเริ่มต้น.....	47
4.4 ความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันพังทลายในสายส่ง.....	50
4.5 สรุปขั้นตอนการคำนวณตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมา.....	52

บทที่	หน้า
4.6 ขั้นตอนระบุสายส่งอ่อนแอโดยใช้เส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง.....	54
5. การคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม.....	55
5.1 วิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สำหรับติดตั้งที่บัสหรือสายส่ง.....	55
5.2 วิธีวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายที่นำเสนอ.....	57
6. ผลการทดสอบ.....	61
6.1 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบ 9 บัส.....	62
6.1.1 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น.....	63
6.1.2 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด.....	64
6.1.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส.....	66
6.1.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง.....	67
6.1.5 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส.....	72
6.1.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง.....	74
6.2 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบ 14 บัส.....	75
6.2.1 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น.....	76
6.2.2 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด.....	77
6.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส.....	78
6.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง.....	79
6.2.5 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส.....	87
6.2.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง.....	89
6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างระบบ 9 บัสและ 14 บัส....	90
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	93
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 สรุปขั้นตอนการคำนวณเส้นโค้ง P-Q ในสายส่ง.....	53
6.1 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้นสำหรับระบบ 9 บัส.....	63
6.2 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังกหลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 9 บัส โดยละเอียดการพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	64
6.3 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังกหลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 9 บัส เมื่อพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	65
6.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังกหลายของบัส สำหรับระบบ 9 บัส.....	66
6.5 จัดลำดับความเสี่ยงบัส (เฉพาะโหลดบัส) สำหรับระบบ 9 บัส.....	66
6.6 พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย สำหรับระบบ 9 บัส.....	67
6.7 กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย สำหรับระบบ 9 บัส.....	68
6.8 ค่ามุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบ 9 บัส.....	68
6.9 ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส.....	69
6.10 ความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส.....	69
6.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังกหลายของสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส.....	70
6.12 จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส.....	71
6.13 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส สำหรับระบบ 9 บัส.....	72
6.14 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส.....	74
6.15 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้นสำหรับระบบ 14 บัส.....	76
6.16 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังกหลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 14 บัส โดยละเอียดการพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	77
6.17 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังกหลายของบัส สำหรับระบบ 14 บัส.....	78
6.18 จัดลำดับความเสี่ยงบัส (เฉพาะโหลดบัส) สำหรับระบบ 14 บัส.....	79
6.19 พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย สำหรับระบบ 14 บัส.....	80
6.20 กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย สำหรับระบบ 14 บัส.....	81
6.21 ค่ามุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบ 14 บัส.....	82
6.22 ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส.....	83
6.23 ความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส.....	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฉ

ตาราง	หน้า
6.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส.....	85
6.25 จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส.....	86
6.26 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส สำหรับระบบ 14 บัส.....	87
6.27 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส.....	89
6.28 ข้อมูลสถิติของระยะทางที่ใกล้ที่สุด สำหรับระบบ 9 บัสและ 14 บัส.....	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงผลการเกิดข้อผิดพลาดในระบบในแง่ของกระแสเทียบกับเวลา.....	9
2.2 วงจรสมมูลของระบบสองบัส.....	13
2.3 เส้นโค้ง P-V แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์.....	15
2.4 เส้นโค้ง V-Q แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์.....	16
2.5 เส้นโค้ง P-Q แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์.....	17
2.6 ระบบสายส่งความยาวแบบกลาง ขนาด 3 บัส.....	18
2.7 ระบบสายส่งความยาวแบบกลาง ขนาด 5 บัส.....	20
3.1 การคำนวณจุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดในเส้นโค้ง P-Q บนระนาบ 2 มิติ.....	26
3.2 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น.....	28
3.3 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	32
3.4 ขั้นตอนการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัสจากเส้นโค้ง P-Q.....	35
4.1 วงจรสมมูลสายส่งความยาวแบบกลางในรูปแบบ π	36
4.2 รูปสามเหลี่ยมตรีโกณมิติ มุม 2θ เรเดียน.....	41
4.3 เส้นโค้ง P-Q ของสายส่งภายหลังการหมุนแกนแล้ว โดยที่ $k = 1$	43
4.4 กำลังไฟฟ้า ณ แรงดันพังทลาย 3 จุดบนเส้นโค้ง P-Q.....	47
4.5 การหมุนแกนของเส้นโค้ง P-Q จากแกน P-Q มายังแกน P'-Q'.....	49
4.6 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งซึ่งวาดอยู่บนแกนพิกัด P-Q.....	50
4.7 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งซึ่งวาดอยู่บนแกนพิกัด P'-Q'.....	51
5.1 ระบบสองบัส เชื่อมต่อกันด้วยสายส่งแบบสั้น.....	55
5.2 ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์สภาวะพังทลาย โดยใช้เส้นโค้ง P-Q.....	60
6.1 ระบบทดสอบขนาด 9 บัส.....	62
6.2 ระบบทดสอบขนาด 14 บัส.....	75

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ข้อตกลงเบื้องต้น ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ นอกจากนี้เพื่อความเข้าใจในการเรียงลำดับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในหัวข้อย่อยสุดท้ายในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ส่งผลให้การจัดสรรพลังงานไฟฟ้าเพื่อตอบสนองกับความต้องการได้รับความสนใจมากขึ้น การจัดสรรพลังงานไฟฟ้าต้องพิจารณาทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์และความเชื่อถือได้ของระบบ โดยทางเทคนิคต้องจัดสรรพลังงานให้ได้ตามความต้องการพลังงานที่มีอยู่จริง ทางเศรษฐศาสตร์นั้นจะต้องทำการผลิตไฟฟ้าโดยมีต้นทุนต่ำเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าในราคาที่เหมาะสม ส่วนเป้าหมายทางด้านความเชื่อถือได้ของระบบนั้นอยู่ที่การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าให้มีคุณภาพและมีความพอเพียง โดยทางด้านคุณภาพคือระดับแรงดันมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ส่วนทางด้านความเพียงพอคือระบบต้องพลังงานไฟฟ้าได้ตามความต้องการจนไม่ก่อให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับขึ้น อย่างไรก็ตามจุดมุ่งหมายทางเศรษฐศาสตร์กับด้านความน่าเชื่อถือได้นี้มักจะสวนทางกัน กล่าวคือ ระบบที่มีความน่าเชื่อถือได้สูงเป็นระบบที่มีการลงทุนสูง ส่วนระบบที่มีการลงทุนในส่วนของผู้บริโภคต่างๆ ต่ำมักจะมีความน่าเชื่อถือได้ต่ำกว่าตามไปด้วย

ในขั้นตอนการปฏิบัติการจริงในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้น ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องพยายามพิจารณาหาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์และทางด้านเทคนิคควบคู่กันไป ทั้งในส่วนของ การวางแผนและการทำงาน ปัญหาหนึ่งในการดำเนินงานคือสภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse) ซึ่งเป็นปัญหาด้านเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ต้องให้ความสนใจ สภาวะแรงดันพังทลายจะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างหนัก อาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับทั้งระบบหรือแค่บางส่วน

เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะแรงดันพังทลาย ทั้งนี้เนื่องจากคุณภาพของไฟฟ้าที่ดีและเป็นที่ยอมรับของผู้ใช้นั้นอย่างน้อยที่สุดต้องมีระดับแรงดันสม่ำเสมอซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์

ไฟฟ้าต่าง ๆ บัสไหนที่เหลือค่าเพื่อโหลด (Load margin) ก่อนถึงสถานะแรงดันพังทลายยิ่งน้อย บัสนั้นก็ยิ่งมีความเสี่ยงสูงที่จะนำพาระบบไปสู่สถานะแรงดันพังทลายหรือเป็นบัสอ่อนแอ (Weak bus) ของระบบ สำหรับสายส่งก็เช่นเดียวกัน สายส่งเส้นไหนที่เหลือค่ากำลังถ่ายโอน (Load transfer margin) ยิ่งน้อย สายส่งเส้นนั้นก็ยิ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสถานะแรงดันพังทลายมากเท่า นั้นหรือเป็นสายส่งอ่อนแอ (Weak transmission) ของระบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สังเกตเห็น ความสำคัญของปัญหานี้จึงทำการศึกษาถึงสถานะแรงดันพังทลายในระบบโดยเน้นกรณีที่มีผลมาจาก Saddle-node bifurcation [1, 2] โดยนำเสนอหลักการวิเคราะห์ระบบบัสอ่อนแอ และวิธีคำนวณสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (The line voltage collapse coefficient) จากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า (P-Q curve) ของบัสและสายส่ง ตามลำดับ พร้อมทั้งนำเสนอวิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบนขานหรืออนุกรมที่บัสหรือสายส่ง ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน ในด้านการปฏิบัติการนั้นสามารถนำผลการคำนวณจากวิธีการที่นำเสนอนี้ ไปคำนวณหาบัสอ่อนแอ (Weak bus) และสายส่งอ่อนแอ (Weak transmission) ไว้ล่วงหน้าเพื่อเตือนผู้ปฏิบัติการ ให้ดำเนินการแก้ไขในกรณีที่โหลดของระบบเพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งส่งผลให้เกิดสถานะแรงดันพังทลายขึ้น นอกจากนั้นผลของการคำนวณดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจในช่วงเวลาของการวางแผน และการออกแบบระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีคำนวณสถานะแรงดันพังทลาย แบ่งได้เป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบหลายชั้น (Multiple load power flow) [3, 4] และวิธีการหาค่าเหมาะสม (Optimization method) [5-8] โดยยึดหลักพิจารณาความเป็นเอกฐานของจาโคเบียนเมทริกซ์ (Singularity criterion of the Jacobian matrix) วิธีแรกมีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่าวิธีที่สอง แต่วิธีที่สองมีความแม่นยำของคำตอบมากกว่าวิธีแรก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีที่สองในการคำนวณหาสถานะพังทลายของแรงดัน เนื่องจากให้ความสำคัญในความแม่นยำของคำตอบมากกว่าความเร็วในการคำนวณ

วิธีคำนวณสถานะแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น โดยยึดหลักวิธีการหาค่าเหมาะสมเป็นพื้นฐานสามารถแบ่งวิธีคำนวณได้เป็น 2 วิธี [7] คือ วิธีแบบตรง (Direct method) และวิธีทำซ้ำ (Iterative Method) วิธีแรกต้องใช้ค่าเส้นโค้งของผิวเกิน (Curvature of hypersurface) ณ จุดทำงานที่เกิดสถานะแรงดันพังทลาย เป็นตัวยืนยันว่าคำตอบที่ได้เป็นสถานะแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดจริง ๆ ซึ่งทำได้ยากในการคำนวณหาค่าเส้นโค้งของผิวเกินแบบโดยตรง

ส่วนวิธีที่สองจะถูกยืนยันด้วยตัวมันเองว่า ถ้าสามารถหาคำตอบออกมาได้ คำตอบที่ได้จะเป็นสถานะแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดจริง ๆ โดยไม่ต้องใช้ค่าเส้นโค้งของผิวเกินมายืนยัน ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีที่สองในการคำนวณหาสถานะพังทลายของแรงดันที่ใกล้ที่สุด

งานวิจัยที่นำเสนอการวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q ส่วนใหญ่ถูกนำเสนออยู่ในรูประบบสองบัส [9] โดยยึดหลักวิเคราะห์จากความเป็นเอกฐานของจาโคเบียนเมทริกซ์ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบหลายบัสได้ ส่วนงานวิจัยที่นำเสนอวิธีวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบหลายบัส [10] ก็ใช้หลักการแปลงระบบหลายบัสเป็นระบบสองบัสแล้วแก้สมการหาเส้นโค้ง P-Q ออกมา ซึ่งคำตอบที่ได้ยังมีความผิดพลาดมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงนำเสนอวิธีวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบหลายบัสอีกวิธีหนึ่ง โดยเริ่มต้นคำนวณหาจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้นเพื่อนำมาวิเคราะห์หาบัสอ่อนแอ แล้วจึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (The line voltage collapse coefficient) เพื่อใช้ระบุสายส่งอ่อนแอ สุดท้ายแสดงวิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุแบบขนานและแบบอนุกรมที่เหมาะสม [11, 12] สำหรับติดตั้ง ณ บัสและสายส่ง ตามลำดับ

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาค่าขอบเขตของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ บัส ๆ หนึ่ง ซึ่งยังคงทำให้แรงดันเสถียรภาพ
- 2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้
- 3) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณหาค่ากำลังจริงและค่ากำลังรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นค่าขอบเขตของเสถียรภาพแรงดัน
- 4) เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงสำหรับการวิจัยระดับสูงต่อไป

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาสถานะแรงดันพังทลายที่มีผลมาจาก Saddle-node bifurcation เท่านั้น

- 2) ระบบที่ใช้ทดสอบมาตรฐานเป็นระบบส่ง (Transmission system) ขนาด 9 บัสและ 14 บัส
- 3) รายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและประเภทของโหลด พิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบและกำลังไฟฟ้าที่โหลดบริโภคเข้าไป ตามลำดับ

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ขณะวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลาย กำหนดให้แทป (Tap) ของหม้อแปลงมีค่าคงที่ และไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันในระบบ
- 2) ไม่พิจารณาข้อจำกัดกำลังปรากฏไหล (Apparent power flow limit) ในสายส่ง และข้อจำกัดแรงดันบัส (Bus voltage limit) ณ บัส โดยข้อจำกัดกำลังปรากฏไหลคือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถไหลผ่านสายส่งได้ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของสายส่ง

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

- 1) การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายถูกจำลองขึ้นบนคอมพิวเตอร์ (Simulation)
- 2) ค่าอุปกรณ์ต่างๆในระบบที่เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) เช่นค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัสและที่ต่ออนุกรมกับสายส่ง เป็นต้น ต้องสมมติให้เป็นค่าต่อเนื่อง (Continuous data) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์
- 3) จุดทำงานเริ่มต้น (Initial operation) ของระบบต้องอยู่ใกล้กับสภาวะที่จะเกิดแรงดันพังทลาย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายโดยรวมข้อจำกัดกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Real power generator limit) และข้อจำกัดกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Reactive power generator limit)
- 2) สามารถใช้เป็นผลที่ได้จากงานวิจัยเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระดับที่สูงขึ้นได้

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการของสภาวะแรงดันพังทลายที่มีผลมาจาก Saddle-node bifurcation
- 3) ศึกษาการใช้เส้นโค้ง P-Q เพื่อระบุสภาวะแรงดันพังทลาย
- 4) ออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์
- 5) พัฒนาและทดสอบโปรแกรม
- 6) วิเคราะห์ระบบตัวอย่าง
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 8) เรียบเรียงและพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.9 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วย เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability) สภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse) วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve) เส้นโค้ง V-Q (V-Q curve) และเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve) ตามลำดับ และสุดท้ายกล่าวถึงหลักการ Saddle-node bifurcation

บทที่ 3 หลักการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัส กล่าวถึง วิธีคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น เพื่อใช้เป็นมาตรฐานร่วมกันสำหรับพิจารณาระบบ โดยแยกบัสพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เจเนเรเตอร์บัสกับบัสอ้างอิง และกลุ่มที่ 2 โหลดบัส พร้อมทั้งนำเสนอหลักการพิจารณาความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่งด้วย

บทที่ 4 สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง ซึ่งประกอบด้วย สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง ระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลายเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น วิธีคำนวณกำลังจริงสูงสุดและกำลังรีแอกทีฟสูงสุดจากจุดทำงานเริ่มต้น ความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันพังทลายในสายส่ง และสุดท้ายกล่าวถึงขั้นตอนระบุสายส่งอ่อนแอโดยใช้เส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง

บทที่ 5 การคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม กล่าวถึง วิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุแบบขนานที่เหมาะสมซึ่งจะติดตั้งเข้าที่บัส และ วิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่เหมาะสมซึ่งจะติดตั้งเข้าที่สายส่ง พร้อมทั้งกล่าวภาพรวมของวิธีวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายที่นำเสนอ

บทที่ 6 ผลการทดสอบ แสดงการวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q โดยระบบทดสอบที่นำมาใช้คือ ระบบขนาด 9 บัส และระบบขนาด 14 บัส ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ของแต่ละระบบจะทดสอบทั้งบัสอ่อนแอและสายส่งอ่อนแอ ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาดำเนินการของทั้งบัสและสายส่งที่มีผลต่อการเกิดแรงดันพังทลายในระบบ นอกจากนี้ยังแสดงการคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งที่บัสและสายส่งด้วย

บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึง บทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัจจุบันระบบสายส่งต้องรองรับภาระโหลดมากขึ้นกว่าเดิม อันเนื่องมาจากความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อเพิ่มศักยภาพของระบบสายส่งไล่ตามกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นไม่ทัน ส่งผลให้เกิดปัญหาทางเทคนิคหลายประการขึ้นในระบบไฟฟ้า ปัญหาหนึ่งในนั้นคือ สภาวะแรงดันพังทลายหรือแรงดันเกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น หลายๆ ครั้งที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับเกิดมาจากสภาวะแรงดันพังทลาย [4] ดังนั้นการทราบว่ามีบัสหรือสายส่งไหนอ่อนแอในระบบไฟฟ้ากำลังจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะแรงดันพังทลายขึ้น

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ แบ่งเป็นหัวข้อได้ ดังนี้

- 1) เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) เสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability)
- 3) สภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse)
- 4) วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve) เส้นโค้ง V-Q (V-Q curve) และเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve)
- 5) Saddle-node bifurcation

2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง ระดับความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถทำการจ่ายโหลดได้ในกรณีที่เกิดการขัดข้องต่าง ๆ เกิดขึ้นกับระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพที่ดีย่อมสามารถจะทนทานต่อผลกระทบต่าง ๆ ได้มาก

ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรุนแรง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดขัดข้องและหยุดการทำงาน อันเนื่องมาจากการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันหรือในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับสายไฟฟ้าแรงสูง

2) ผลกระทบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่น การส่งผ่านพลังงานเข้าสู่ระบบจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือการจ่ายโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดเวลา

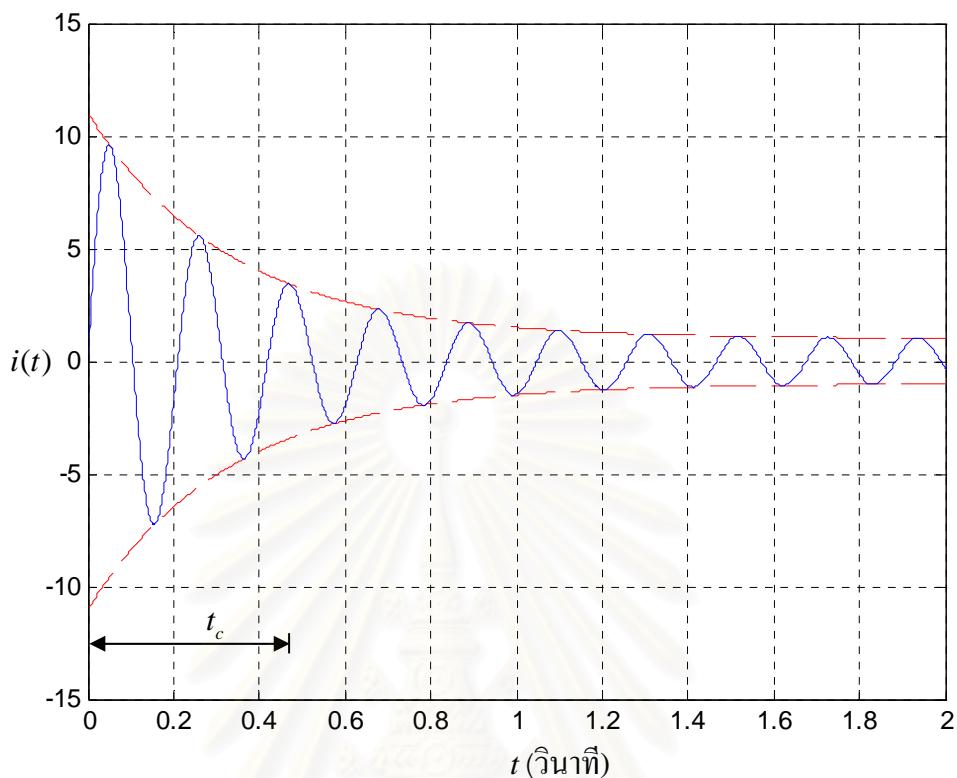
โดยปกติประเภทของเสถียรภาพของระบบจะแบ่งตามช่วงเวลาหลังจากเกิดผลกระทบ (Disturbance) ขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

2.1.1 เสถียรภาพของระบบในสถานะชั่วคราว (Transient stability)

หมายถึงความมั่นคงหรือความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะสามารถทำงานต่อไปได้ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ หลังจากที่เกิดเหตุขัดข้องที่รุนแรงขึ้นกับระบบ การพิจารณาเสถียรภาพในสถานะทรานเซียนท์ มักจะพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรแบบซิงโครนัส

ในกรณีของเครื่องจักรซิงโครนัสที่สถานะอยู่ตัว หากเครื่องจักรดังกล่าวได้รับผลกระทบจากภายนอก เช่น มีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นทำให้มุมโรเตอร์ของเครื่องจักรกลเครื่องนี้เบี่ยงเบนออกไปจากแกนอ้างอิง (Reference axis) การที่จะสรุปว่าเครื่องจักรดังกล่าวมีเสถียรภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่า โรเตอร์จะสามารถเข้าสู่จุดสมดุลใหม่ในการปฏิบัติงานได้หรือไม่ ถ้าหลังจากระบบปรับตัวต่อเหตุการณ์ดังกล่าวได้แล้ว โรเตอร์ไปทำงานอยู่ ณ จุดสมดุลยังถือว่าระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ แต่ถ้าโรเตอร์มีการแกว่งตัวและไม่สามารถทำงาน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่แน่นอนก็ย่อมส่งผลทำให้เครื่องดังกล่าวเสียเสถียรภาพ

โดยปกติผลกระทบต่าง ๆ ที่เข้ามาสู่ระบบภายใต้เงื่อนไขของการศึกษาเสถียรภาพของระบบในสถานะทรานเซียนท์ มักจะเป็นผลกระทบที่รุนแรงและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น การลัดวงจรของสายส่ง บัส หรือขั้วของหม้อแปลง รวมไปถึงข้อผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การเกิดข้อผิดพลาดทั้งสามเฟส (Three phase fault) การเกิดข้อผิดพลาดเฟสใดเฟสหนึ่งกับดิน (Single line to ground fault) ฯลฯ ซึ่งการศึกษาเสถียรภาพของระบบเมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือ ระยะเวลาที่ระบบยังคงสามารถทนทานต่อจุดผิดปกติที่เกิดขึ้นและยังสามารถทำงานได้ตามปกติ นั่นคือ ต้องหาเวลาที่ช้าที่สุดที่จะต้องกำจัดข้อผิดพลาดออกไป ก่อนที่จะทำให้ระบบเสียเสถียรภาพหรือ Critical clearing time (t_c) [4] โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าเวลาที่ช้าที่สุดที่จะต้องกำจัดข้อผิดพลาดออกไปคือ 0.47 วินาที



รูปที่ 2.1 แสดงผลการเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบในแง่ของกระแสเทียบกับเวลา

2.1.2 เสถียรภาพของระบบในสภาวะอยู่ตัว (Steady state stability)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายหลังจากเกิดผลกระทบขึ้นกับระบบไฟฟ้าไปเป็นระยะเวลานานหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ นั้นจะถือว่าเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัว (Steady state stability)

โดยปกติค่าต่าง ๆ ที่นิยมนำมาพิจารณาเสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัวของระบบ คือมุมเฟสของโรเตอร์ (Rotor angle) ความถี่ของระบบ (System Frequency) Governor output และ excitation voltage ดังนั้นเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัวนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ในสภาวะอยู่ตัวของระบบเอง เช่น ถ้าในระบบที่มีความยืดหยุ่นสูงก็สามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้ดี เสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะอยู่ตัวก็จะสูงตามไปด้วย นั่นคือระบบมี Steady state limit สูง

2.2 เสถียรภาพแรงดัน (Voltage stability)

เสถียรภาพแรงดัน หมายถึง ความสามารถของระบบที่จะรักษาระดับแรงดันอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เช่น ระดับแรงดันของสายส่งจะต้องไม่แตกต่างจากระดับแรงดันมาตรฐานเกิน 5% ระบบที่มีเสถียรภาพแรงดันที่ดีคือ ระบบที่มีความยืดหยุ่นต่อโหลดสูงและสามารถจะแจ้งเตือนหรือแก้ไขปัญหาการเพิ่มของโหลดที่มากเกินไปได้โดยไม่กระทบกระเทือนต่อการทำงานโดยรวม

ในปัจจุบันเสถียรภาพแรงดันกับสถานะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse) ต่างได้รับความสนใจ โดยในบางครั้งอาจจะสามารถใช้แทนกันได้ [4] ทั้งนี้เพราะปรากฏการณ์ทั้ง 2 อย่างนี้ต่างหมายถึงเรื่องเดียวกัน มีองค์ประกอบในการเกิดและการพิจารณาที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยปรากฏการณ์แรงดันพังทลายเป็นหลักในการวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันของระบบ

2.3 สถานะแรงดันพังทลาย (Voltage collapse)

สถานะแรงดันพังทลายเป็นปรากฏการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ แต่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (Dynamic process) โดยแรงดันของระบบจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด เช่นจะค่อย ๆ ลดลงในกรณีที่โหลดเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดวิกฤติ (Critical point) ซึ่ง ณ ขณะนั้นหากมีการเพิ่มขึ้นของโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันของระบบตกลงอย่างมาก อันมีสาเหตุเนื่องมาจากความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานให้กับโหลดไม่เพียงพอ

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะเป็นไปอย่างช้า ๆ และค่อยเป็นค่อยไป ในเหตุการณ์จริง ผู้ปฏิบัติการที่อยู่ ณ ศูนย์ควบคุมสามารถสังเกตได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงมาก ในกรณีดังกล่าวการแก้ไขให้แรงดันระบบกลับมาสู่ระดับเดิมอาจจะสายเกินไป ผลที่ตามมาคือการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Blackouts) ดังตัวอย่างเหตุการณ์ [4] ที่เกิดที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม ปี 1987 ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดที่สูงมากขึ้น (อัตราการเพิ่มขึ้นของโหลดประมาณ 400 MW/min) ทำให้แรงดันของระบบลดลงเรื่อย ๆ แม้จะมีการพยายามชดเชยพลังงานรีแอกทีฟด้วยการเพิ่มตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor bank) แล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่สามารถชดเชยอัตราการเพิ่มขึ้นของโหลดได้ ในที่สุดทำให้เกิดการพังทลายของแรงดันเนื่องจากการจ่ายพลังงานรีแอกทีฟไม่เพียงพอ เป็นผลให้ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง หรืออีกเหตุการณ์หนึ่งที่เกิดที่สวีเดนเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม ปี 1987 ซึ่งเกิดจากการที่สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) แห่งหนึ่งเกิด

เหตุขัดข้องและไม่สามารถส่งจ่ายพลังงานได้ ทำให้สายส่งขนาด 220 kV จ่ายพลังงานเกินพิกัด (Overload) และในที่สุดอุปกรณ์ป้องกันได้สั่งตัด (Trip) สายส่งเส้นนี้ออกจากระบบ เป็นผลให้ระดับแรงดันทางตอนใต้ของประเทศลดต่ำลง ณ จุดนี้เอง หม้อแปลงชนิดปรับแทปแบบอัตโนมัติ (Automatic load tap changing transformer) ได้พยายามจะรักษาระดับแรงดันเอาไว้ แต่เนื่องจากการแก้ปัญหาที่ไม่เหมาะสม จึงกลับกลายเป็นการทำให้สายส่งทางภาคเหนือจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกินพิกัด และในที่สุดอุปกรณ์ป้องกันได้ตัดสายส่งชุดนี้ออกจากระบบเช่นกัน ผลที่ตามมาก็คือ การลดลงของระดับแรงดันทั้งระบบอย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีนี้ทางศูนย์ควบคุมได้แก้ไขปัญหาคือ โดยการตัดโหลดออก (Load shedding) ก่อนที่จะเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งการตัดโหลดครั้งนี้ประมาณไว้ว่ามีปริมาณถึง 11,400 MW

2.3.1 สาเหตุของการเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย

จากเหตุการณ์ที่ยกตัวอย่างมาข้างต้นพอจะสรุปสาเหตุของการเกิดสภาวะแรงดันพังทลายได้ดังต่อไปนี้

1) การที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือสายส่งชุดใดชุดหนึ่งถูกตัดออกจากระบบในทันทีทันใด ทำให้สายส่งหรืออุปกรณ์ต้องจ่ายโหลดเกินค่าพิกัด ซึ่ง ณ จุดนี้เห็นได้จากตัวอย่างที่เกิดขึ้นที่สวีเดน โดยการเกิดการพังทลายของแรงดันอันเนื่องมาจากสาเหตุนี้มักจะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของอุปกรณ์ที่หลุดออกจากระบบ การทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน และวิธีการชดเชยแรงดันของระบบด้วย

2) การเพิ่มขึ้นของโหลดและไม่สามารถจ่ายพลังงานรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอทั้งนี้เพราะสาเหตุหนึ่งก็คือ การส่งผ่านพลังงานรีแอกทีฟส่วนมากมักจะสูญเสียไปกับสายส่งระหว่างตำแหน่งของแหล่งจ่ายพลังงานกับตำแหน่งของโหลด ดังนั้นในทางปฏิบัติ การจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบมักจะมาจากการใช้อุปกรณ์ชดเชยต่าง ๆ เช่น ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมหรือตัวเก็บประจุแบบขนาน หม้อแปลงแรงดันแบบอัตโนมัติ แต่ถึงอย่างไรอุปกรณ์ชดเชยเหล่านี้ก็จะไม่สามารถจะช่วยอะไรได้มากถ้าการเพิ่มขึ้นของโหลดอยู่ในอัตราที่สูงมากๆ

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการพังทลายของแรงดัน

เสถียรภาพแรงดันของระบบจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยพลังงานรีแอกทีฟด้วยสาเหตุที่ว่า พลังงานรีแอกทีฟจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลดเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่ายพลังงานไฟฟ้า การชดเชยพลังงานรีแอกทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยรีแอกทีฟซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียง และอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันพังทลาย (เพราะถึงแม้ว่าจะมีปริมาณที่พอเพียงแต่ถ้าอยู่ห่างออกไปมาก ๆ การส่งผ่านพลังงานรีแอกทีฟมา ณ จุดที่ต้องการก็จะสูญเสียไปกับสายส่งจนน้อยกว่าค่าที่ต้องการอยู่ดี)

2) การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ จากตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นพบว่าการเกิดแรงดันพังทลายมีสาเหตุมาจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรจะพิจารณาการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถการชดเชยพลังงานรีแอกทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป ตัวอย่างเช่น กรณีการเพิ่มขึ้นของโหลดในปริมาณที่สูง ณ จุด ๆ หนึ่ง อุปกรณ์ป้องกันควรจะรับรู้ความสามารถในการชดเชยพลังงานรีแอกทีฟให้กับระบบ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโหลดมีมากกว่าความสามารถในการชดเชยแล้วควรแยกแยะและเลือกตัดส่วนที่มีความสำคัญน้อยกว่า เช่น ตัดโหลดทิ้งแทนที่จะตัดสายส่งออกจากระบบ

3) กรณีการเกิดข้อผิดพลาด (Fault) ขึ้นในระบบ ถ้าเวลาในการตัดข้อผิดพลาดสูงเกินไป จะทำให้แรงดันของระบบลดลง จนอาจทำให้เกิดสถานะแรงดันพังทลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบและการตั้งค่าเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสถานะแรงดันพังทลายเอาไว้ด้วย

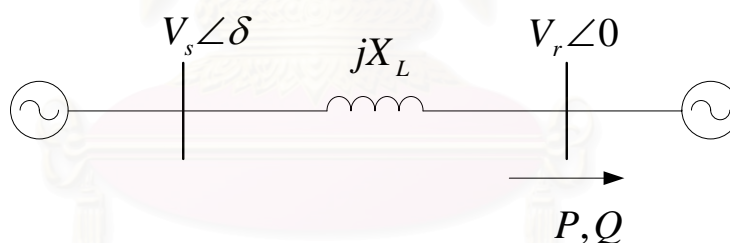
4) ปัจจัยอันเนื่องมาจากระบบเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสถานะแรงดันพังทลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่อยู่ในสถานะเครียด (Stress condition) นั่นคือ ระบบมีความยืดหยุ่น (พลังงานไฟฟ้าสำรอง) ต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ ตัวอย่าง [4] เช่น ในสหรัฐอเมริกา ปริมาณการใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างจะอึดตัว มีอัตราการเพิ่มของผู้ใช้เพียง 1.3 ถึง 1.9 % ต่อปีโดยเฉลี่ย และมีกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมาก ทำให้รัฐบาลออกกฎหมายมาควบคุมให้โรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยลดมลพิษที่เรียกว่า Scrubbers ซึ่งมีราคาแพงมาก

จากสถานะดังกล่าวและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่าง ๆ จำเป็นต้องปิดโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินบางโรงงานลง อันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุน (ซึ่งตามความเป็นจริงในช่วงเวลาดังกล่าวต้องมีโรงไฟฟ้าบางโรงต้องปิดตัวเองอยู่แล้ว เนื่องจากหมดอายุการใช้งาน ทำให้กำลังการผลิตลดลงไปอีก) การสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ต้องใช้การลงทุนอย่างมหาศาล และโรงไฟฟ้าหลายประเภทก็ได้รับการต่อต้าน เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ทำให้ผู้ผลิตไฟฟ้า

ต้องหันมาใช้การซื้อขายไฟระหว่างกันมากขึ้น ผลที่ตามมาในแง่ของเสถียรภาพของระบบก็คือ ปัญหาการพังทลายของแรงดันจะมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น เพราะพลังงานรีแอกทีฟถูกส่งออกจากแหล่งกำเนิดได้ไม่ไถลนัก อีกทั้งการออกแบบระบบสายส่งทำมาก่อนหน้านี้นานแล้ว ไม่ได้มีการคิดคำนึงถึงการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ อย่างปัจจุบัน ทำให้อาจจะเกิดข้อผิดพลาด อันจะส่งผลให้เกิดสภาวะแรงดันพังทลายขึ้นมาได้

2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve) เส้นโค้ง V-Q (V-Q curve) และเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve)

เส้นโค้งที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ อันได้แก่ เส้นโค้ง P-V เส้นโค้ง V-Q และเส้นโค้ง P-Q เพื่อความเข้าใจหลักการวิเคราะห์จึงได้ยกตัวอย่างระบบเทวินิน (Thevenin system) ของสายส่ง [13] ดังรูป 2.2 โดยมีเครื่องจักรซิงโครนัส (Synchronous machine) ต่ออยู่ทางด้านต้นสาย (Sending end) และทางด้านปลายสาย (Receiving end) ด้านละตัว ส่วนสายส่งนั้นละเลยค่าความต้านทานสมมูล มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์สมมูลเท่านั้น



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของระบบสองบัส

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าไหล (Power flow equation) ได้ตามข้างล่าง

$$P = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{V_s V_r \cos \delta}{X_L} - \frac{V_r^2}{X_L} \quad (2.2)$$

ทำบรรทัดฐาน (Normalize) ตัวแปรในสมการ (2.1) และ (2.2) ด้วยค่ากำลังลัดวงจร (The short circuit power: V_s^2 / X_L) จะได้ $p = \frac{PX_L}{V_s^2}$ $q = \frac{QX_L}{V_s^2}$ และ $v = \frac{V_r}{V_s}$ หรือเขียนสมการ (2.1) และ (2.2) ได้ใหม่ตามสมการข้างล่างนี้

$$p = v \sin \delta \quad (2.3)$$

$$q = v \cos \delta - v^2 \quad (2.4)$$

จากนิยามตรีโกณมิติ $v^2 \sin^2 \delta + v^2 \cos^2 \delta = v^2$ (เมื่อ $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$) จะได้

$$p = \sqrt{v^2 - v^2 \cos^2 \delta} \quad (2.5)$$

หรือ

$$p = \sqrt{v^2 - (q + v^2)^2} \quad (2.6)$$

สมการ (2.5) และสมการ (2.6) ใช้สำหรับวาดเส้นโค้ง P-V และเส้นโค้ง V-Q ตามลำดับ ส่วนเส้นโค้ง P-Q ได้จากนำค่าจุดยอด (nose) หรือจุดวิกฤติ (Critical point) ของเส้นโค้ง P-V หรือเส้นโค้ง V-Q มาวาดเรียงต่อกัน โดยแสดงเส้นโค้ง P-V เส้นโค้ง V-Q และเส้นโค้ง P-Q ดังในรูปที่ 2.3 รูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ

2.4.1 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V (P-V curve) [13]

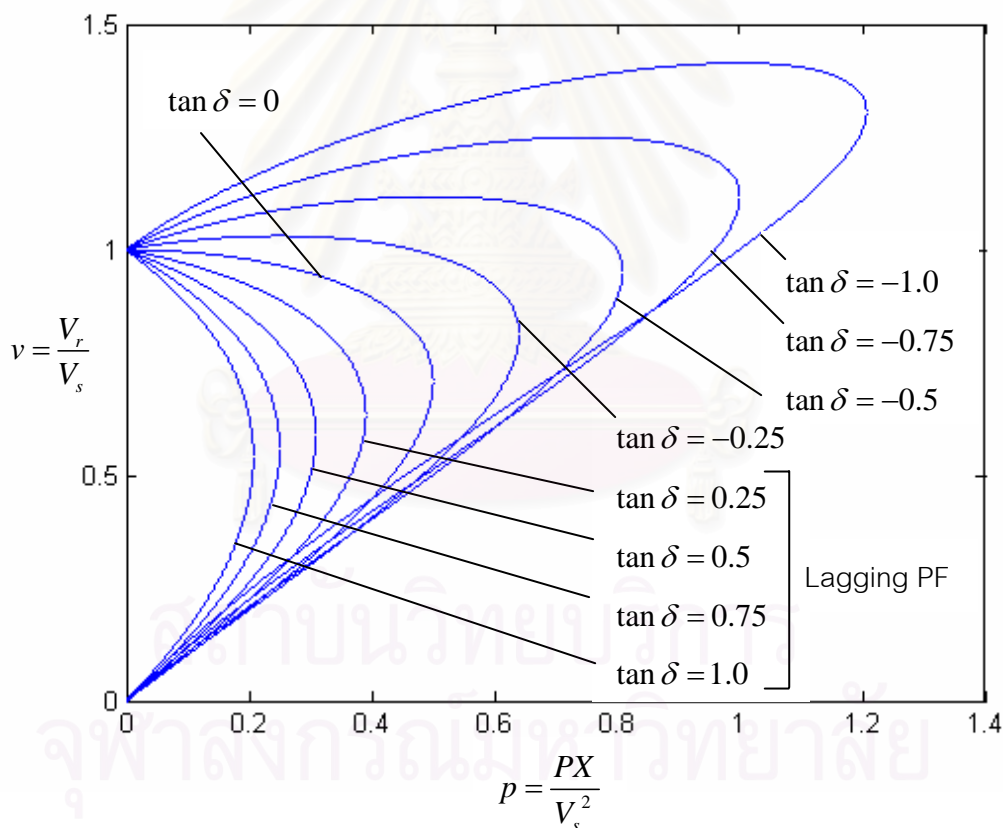
เส้นโค้ง P-V เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ระบบยังคงจ่ายโหลดได้อย่างมีเสถียรภาพแรงดัน (Steady-state loadability limit) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) เส้นโค้ง P-V มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและการศึกษาระบบไฟฟ้าแบบรัศมี (Radial system) อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กับระบบไฟฟ้าที่ถูกตัดยกขึ้นมาพิจารณาจากระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ โดยกำหนดให้ P เป็นโหลรวมของบริเวณที่พิจารณาและ V เป็นแรงดัน ณ บัสวิกฤติ (Critical bus) หรือบัสที่ต้องการพิจารณาในขณะนั้น บางครั้งค่า P อาจถูกใช้แทนกำลังจริงที่ถ่ายโอนกันระหว่างระบบก็ได้ด้วย ข้อเสียของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V มีดังนี้

1) การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow simulation) จะถู้ออกเมื่อคำนวณใกล้จุดยอด (nose) หรือจุดวิกฤติ (Critical point) ของเส้นโค้ง

2) การคำนวณทุกครั้งจะต้องจัดสรรกำลังไฟฟ้าใหม่ทุกครั้งเพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้น

3) การวิเคราะห์เส้นโค้ง P-V ทางด้านทฤษฎีจะมีความสะดวกก็ต่อเมื่อพฤติกรรมของโหลด (Load characteristic) สามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของแรงดันได้

เส้นโค้ง P-V ในรูปที่ 2.3 แต่ละเส้นโค้งมีค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ที่แตกต่างกันหลาย ๆ ค่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังยิ่ง leading เท่าไร ค่ากำลังจริงสูงสุดก็ยังมีค่าสูงขึ้นไปตามนั้น โดยค่าตัวประกอบกำลังแบบ leading เกิดขึ้นจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานเข้าที่บัส เส้นโค้ง P-Q ส่วนด้านบนเหนือจุดวิกฤตเป็นบริเวณที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

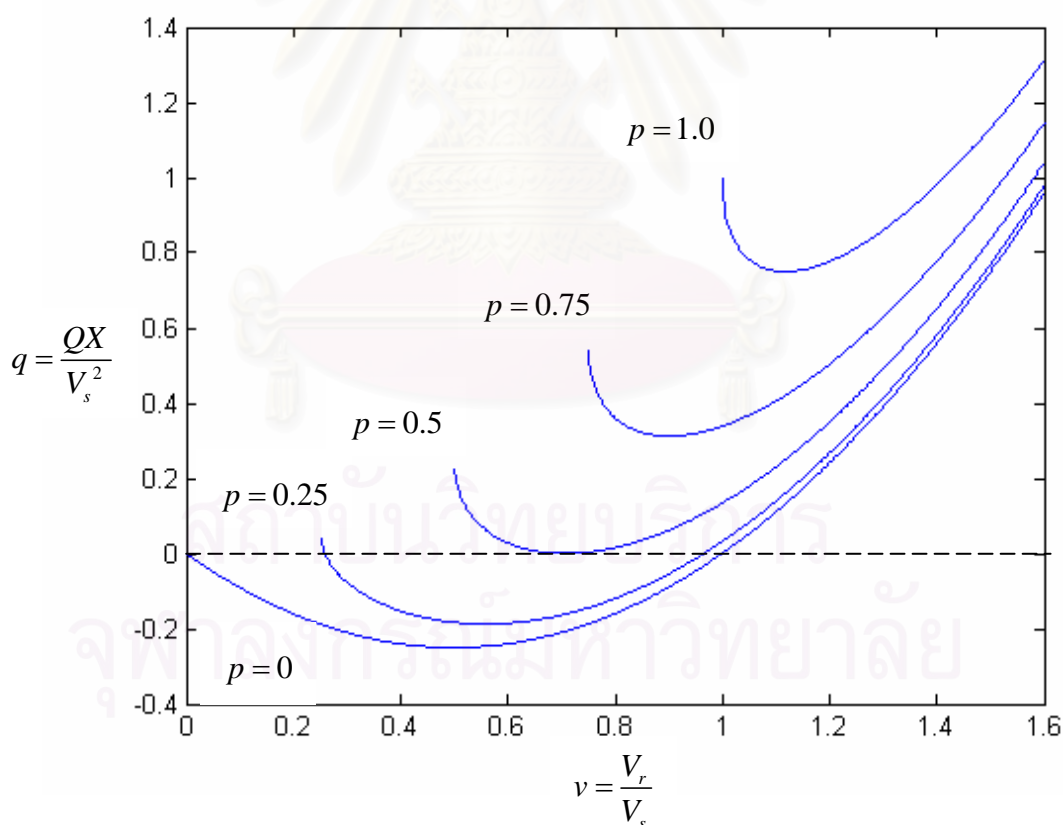


รูปที่ 2.3 เส้นโค้ง P-V แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์ เส้นโค้งแต่ละเส้นมีค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) เท่ากับ 0.707, 0.8, 0.864, 0.97 และ 1.0 ซึ่งสอดคล้องกับ $\tan \delta = 1.0, 0.75, 0.5, 0.25$ และ 0 ตามลำดับ

2.4.2 วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง V-Q (V-Q curve) [13]

เส้นโค้ง V-Q เป็นอีกหนึ่งในวิธีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ระบบยังคงจ่ายโหลดได้อย่างมีเสถียรภาพแรงดัน (Steady-state loadability limit) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) หรือหาจากเส้นโค้ง P-V โดยกำหนดให้ค่ากำลังจริงคงที่แล้วเก็บค่าคู่ระหว่างแรงดัน (V) กับกำลังรีแอกทีฟ (Q) จากเส้นโค้ง P-V นำมาวาดเส้นโค้ง V-Q ส่วนข้อดีและข้อเสียก็มีเหมือนกับวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V

เส้นโค้ง V-Q ในรูปที่ 2.4 แต่ละเส้นโค้งมีค่ากำลังจริงที่แตกต่างกันหลาย ๆ ค่า ซึ่งเห็นได้ว่าค่ากำลังจริงยังมีค่ามากเท่าไร ค่าแรงดันวิกฤต (Critical voltage) ก็ยังมีค่าสูงขึ้นไปตามนั้นด้วย โดยค่าแรงดันวิกฤตจะมีค่าเท่ากับ 1 p.u. เมื่อ $P = 1$ p.u. เส้นโค้ง V-Q ส่วนด้านขวามือจากจุดวิกฤตเป็นบริเวณที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

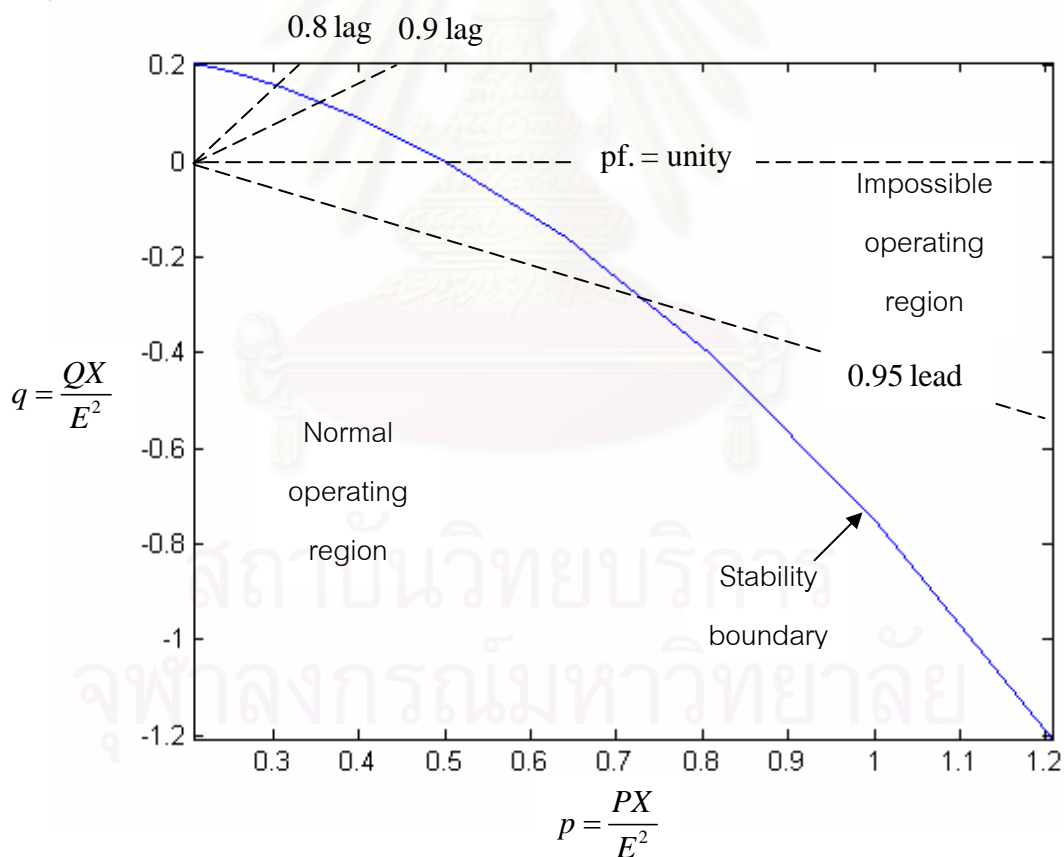


รูปที่ 2.4 เส้นโค้ง V-Q แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์ ส่วนโหลดเป็นแบบกำลังจริงคงที่ (Constant power)

2.4.3 วิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q (P-Q curve) [9, 13]

เส้นโค้ง P-Q เป็นวิธีที่ใช้กำหนดที่ขอบเขตแรงดันเสถียรภาพ (Voltage Stability boundary) ในระนาบของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ค่าบนเส้นโค้ง P-Q ทั้งหมดเป็นจุดวิกฤตหรือจุดยอด (nose) ของแต่ละเส้นโค้ง P-V หรือ V-Q ที่ถูกนำเรียงต่อกันบนระนาบ P-Q สถานะแรงดันพังทลายจะเกิดขึ้นเมื่อโหลดของระบบมีค่าเกินออกไปจากเส้นโค้ง P-Q การวาดเส้นโค้ง P-Q ไม่ต้องกำหนดค่าใดค่าหนึ่งให้คงที่ถึงจะวาดได้ ซึ่งแตกต่างจากเส้นโค้ง P-V หรือ V-Q ที่ต้องกำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังหรือค่ากำลังจริงมีค่าคงที่ ตามลำดับ

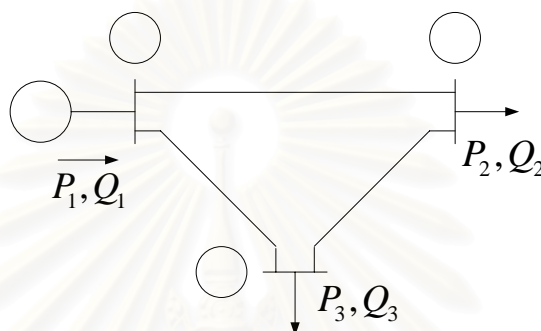
เส้นโค้ง P-Q ในรูปที่ 2.5 บริเวณที่อยู่ภายใต้เส้นโค้ง P-Q ทั้งหมด แรงดันจะมีเสถียรภาพ ส่วนบริเวณที่อยู่ภายนอกเส้นโค้งจะเกิดสถานะแรงดันพังทลายขึ้น ดังนั้นระบบจะปฏิบัติงานจริงอยู่ภายใต้เส้นโค้ง P-Q เท่านั้น



รูปที่ 2.5 เส้นโค้ง P-Q แบบบรรทัดฐาน (Normalize) สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่ และสายส่งที่มีเพียงค่ารีแอกแตนซ์

2.4.4 ผิว (Surface) และผิวเกิน (Hypersurface) ของเส้นโค้ง P-Q

ระบบสายส่งขนาดตั้งแต่สองบัสขึ้นไป สามารถวาดเส้นโค้ง P-Q อยู่ในลักษณะผิว (Surface) ขนาด 2 มิติบนระนาบ 3 มิติ หรือในลักษณะผิวเกิน (Hypersurface) ขนาด $n-1$ มิติบนระนาบเกิน (Hyperplane) n มิติได้ ขึ้นอยู่กับตัวแปรกำลังไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ n คือจำนวนตัวแปรกำลังไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q



รูปที่ 2.6 ระบบสายส่งความยาวแบบกลาง ขนาด 3 บัส

ยกตัวอย่างระบบ 3 บัส ดังรูปที่ 2.6 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่บัสที่ 1 และมีโหลดต่ออยู่บัสที่ 2 และบัสที่ 3 กรณีพิจารณากำลังไฟฟ้า P_2 Q_2 และ P_3 สำหรับวาดเส้นโค้ง P-Q จะสามารถวาดเส้นโค้ง P-Q อยู่ในลักษณะผิวขนาด 2 มิติบนระนาบ 3 มิติ ส่วนกรณีพิจารณากำลังไฟฟ้า P_2 Q_2 P_3 และ Q_3 สำหรับวาดเส้นโค้ง P-Q จะสามารถวาดเส้นโค้ง P-Q อยู่ในลักษณะผิวเกินขนาด 3 มิติบนระนาบเกิน 4 มิติ เขียนสมการเส้นโค้ง P-Q ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$h(a_1, \dots, a_n) = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อ a คือ ตัวแปรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่พิจารณา
 n คือ จำนวนตัวแปรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่พิจารณา

เหตุผลที่ผิวเกินมีขนาด $n-1$ มิติ (ในขณะที่สมการเส้นโค้ง P-Q มีตัวแปรกำลังไฟฟ้าอยู่ n ตัว) เนื่องจากเวลาคำนวณสมการเส้นโค้ง P-Q จะแทนค่าตัวแปร $n-1$ ตัวเพื่อหาค่าตัวแปรอีกตัวที่เหลืออยู่ หรือก็คือปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรแค่ $n-1$ ตัวสำหรับคำนวณสมการเส้นโค้ง P-Q ซึ่งเส้นโค้ง P-Q ในสมการ (2.7) จะวาดอยู่บนระนาบเกิน n มิติ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมมติให้ผิวเกินรอบๆจุดแรงดันพังทลายที่พิจารณามีค่าสม่ำเสมอ หรือเป็นผิวเกินปรับเรียบ (Smooth hypersurface) บริเวณที่อยู่ภายใต้ผิวเกินของเส้นโค้ง P-Q ทั้งหมดแรงดันจะมีเสถียรภาพ ส่วนบริเวณที่อยู่ภายนอกผิวเกินจะเกิดสถานะแรงดันพังทลายขึ้น

2.5 Saddle-node bifurcation

ค่าจุดยอด (Nose) ที่อยู่บนเส้นโค้ง P-V และเส้นโค้ง V-Q หรือค่าจุดทุกจุดบนเส้นโค้ง P-Q ค่าเหล่านั้นก็คือค่าจุดแรงดันพังทลาย (Voltage collapse point) หรือที่รู้จักทั่วไปในชื่อค่าจุด Saddle-node bifurcation ดังนั้นสามารถนำนิยามของ Saddle-node bifurcation มาประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาเส้นโค้ง P-Q ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดย Saddle-node bifurcation มีนิยามดังนี้

นิยาม [14] จุด (x_*, λ_*) เป็น turning point (หรือ fold bifurcation, limit point หรือ saddle-node bifurcation) ของจุดนิ่ง (stationary point) ถ้าเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อข้างล่างนี้เป็นจริง

- 1) $f(x_*, \lambda_*) = 0$
- 2) $\text{rank } f_x(x_*, \lambda_*) = n - 1$
- 3) $f_\lambda(x_*, \lambda_*) \notin \text{range } f_x(x_*, \lambda_*)$ หรือคือ $\text{rank}(f_x(x_*, \lambda_*) | f_\lambda(x_*, \lambda_*)) = n$
- 4) มีค่าตัวแปร $x(\sigma), \lambda(\sigma)$ ซึ่ง $x(\sigma_*) = x_*, \lambda(\sigma_*) = \lambda_*$ และ $\frac{d^2\lambda(\sigma_*)}{d\sigma^2} \neq 0$

2.5.1 ตัวแปรและฟังก์ชัน

นิยามข้างบนเขียนอยู่ในรูปสมการทั่วไปที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบใด ๆ ก็ได้ เพื่อความเข้าใจจึงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการในนิยามกับสมการกำลังไฟฟ้า ดังนี้

- 1) ฟังก์ชัน $f(x, \lambda)$ เป็นฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสุทธิแบบเชิงขั้ว ณ บัสซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.1) สมการกำลังจริงสุทธิของเจเนอเรเตอร์บัส (Generator bus)

1.2) สมการกำลังจริงสุทธิและสมการกำลังรีแอกทีฟสุทธิของโหลดบัส (Load bus)

- 2) ตัวแปรสถานะ x ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

2.1) ขนาดแรงดันและมุมของบัสอ้างอิง (Reference bus)

2.2) ขนาดแรงดันและกำลังจริงของเจเนอเรเตอร์บัส (Generator bus)

2.3) กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดบัส (Load bus)

3) ตัวแปร λ เป็นค่าสเกลาร์ (Scalar) ซึ่งใช้คูณเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยที่

$$f(x, \lambda) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} - \rho(\lambda) = \vec{0} \quad (2.8)$$

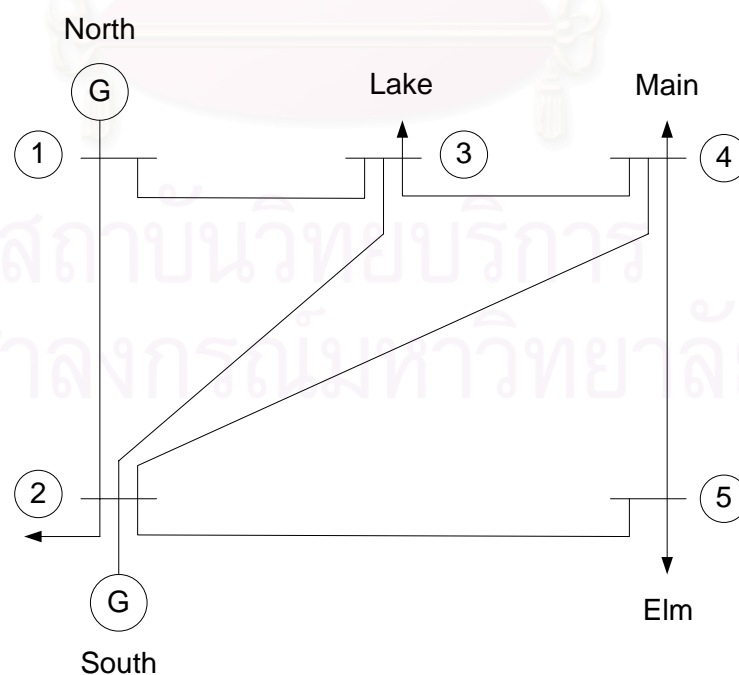
เมื่อ
$$\rho(\lambda) = \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} + \lambda n_i \quad (2.9)$$

โดยที่ P_0, Q_0 คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเริ่มต้น
 n_i คือ เวกเตอร์ทิศทางที่ i ใดๆ ในการเพิ่มกำลังไฟฟ้า
 $P(x), Q(x)$ คือ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าแบบเชิงขั้ว ณ เจเนเรเตอร์บัสและโหลดบัส
 ρ คือ เวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้า

สำหรับตัวแปร ρ แทนค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลดซึ่งต่อเข้าที่บัส ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

3.1) กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ที่เจเนเรเตอร์บัส

3.2) กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดที่ต่ออยู่ที่โหลดบัส



รูปที่ 2.7 ระบบสายส่งความยาวแบบกลาง ขนาด 5 บัส

ยกตัวอย่างระบบ 5 บัส [15] ดังรูปที่ 2.7 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัว ต่ออยู่ ณ บัสที่ 1 กับบัสที่ 2 กำหนดให้บัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง และบัสที่ 2 เป็นเจนเรเตอร์บัส ส่วน 3 บัสที่เหลือให้เป็นโหลดบัส จำนวนตัวแปรสถานะและจำนวนสมการกำลังไฟฟ้าจะเท่ากันคือเท่ากับเจ็ด เขียนแจกแจงได้ตามข้างล่างดังนี้

สำหรับตัวแปรสถานะ x และตัวแปร ρ

$$x = [\delta_2 \quad \delta_3 \quad \delta_4 \quad \delta_5 \quad |V_3| \quad |V_4| \quad |V_5|]^T \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad \rho(\lambda) &= [P_2(\lambda) \quad P_3(\lambda) \quad P_4(\lambda) \quad P_5(\lambda) \quad Q_3(\lambda) \quad Q_4(\lambda) \quad Q_5(\lambda)]^T \\ &= [P_{2,\text{int}} \quad P_{3,\text{int}} \quad P_{4,\text{int}} \quad P_{5,\text{int}} \quad Q_{3,\text{int}} \quad Q_{4,\text{int}} \quad Q_{5,\text{int}}]^T + \lambda n_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

จะได้

$$f(x, \lambda) = f(x) - \rho(\lambda) = \bar{0} \quad (2.12)$$

$$\text{เมื่อ} \quad f(x) = [P_2(x) \quad P_3(x) \quad P_4(x) \quad P_5(x) \quad Q_3(x) \quad Q_4(x) \quad Q_5(x)]^T \quad (2.13)$$

ส่วน $f_x(x, \lambda)$ ก็คือค่าจาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian matrix: J_x) แบบเชิงขั้วที่ใช้สำหรับคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ (Power flow analysis) นั่นเอง สำหรับ $f_\lambda(x, \lambda)$ เป็นเวกเตอร์ที่ได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบ λ ซึ่งได้ออกมาเป็นเวกเตอร์ $-n_i$

$$f_\lambda(x, \lambda) = -n_i \quad (2.14)$$

สำหรับตัวอย่างระบบ 5 บัสนี้จะได้นิยามของเวกเตอร์ n_i เท่ากับเจ็ด และมีระนาบเกินของเส้นโค้ง P-Q ขนาด 6 มิติบนระนาบเกิน 7 มิติ ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4.4

2.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Saddle-node bifurcation กับระบบไฟฟ้ากำลัง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดแต่ละเงื่อนไขของนิยาม Saddle-node bifurcation ที่สอดคล้องกับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อความเข้าใจเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง โดยแยกอธิบายออกเป็นแต่ละเงื่อนไข ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 บ่งบอกว่าสมการกำลังไฟฟ้าสามารถแก้หาคำตอบได้ หรือสามารถหาขนาดแรงดันและมุมที่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นจริงตามสมการกำลังไฟฟ้า

เงื่อนไขที่ 2 แสดงให้เห็นว่าจาโคเบียนเมทริกซ์ของระบบเป็นเมทริกซ์เอกฐานซึ่งมีค่าเฉพาะ (eigenvalue) เท่ากับศูนย์หนึ่งค่า ดังนั้นระบบจะแกว่งกวัด (Oscillate) เมื่อถูกรบกวนเล็กน้อย (Small disturbance) จึงไม่สามารถระบุได้ว่าระบบเสถียรภาพ หรือไม่เสถียรภาพ

เงื่อนไขที่ 3 ต้องพิจารณาร่วมกันกับเงื่อนไขที่ 1 และเงื่อนไขที่ 2 เพื่อบ่งบอกว่าระนาบสัมผัสเส้นโค้งที่จุดนี้จะตั้งฉากกับแกนของ λ

เงื่อนไขที่ 4 เป็นการรับประกันว่าจุดที่คำนวณหาได้เป็นจุดวกกลับ หรือก็คือเป็นจุดต่ำสุด ไม่ใช่จุดสูงสุดเมื่อเทียบกับ λ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสมการกำลังไฟฟ้าไม่สามารถแก้หาคำตอบได้ เมื่อค่า λ ต่ำกว่าหรือสูงกว่า λ ค่าจุดต่ำสุดหรือจุดสูงสุด ตามลำดับ

การคำนวณหาจุดแรงดันพังทลายในระบบไฟฟ้า [16] ใช้เพียงสองเงื่อนไขแรก ก็เพียงพอสำหรับการแก้ปัญหา ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกใช้เพียงสองเงื่อนไขแรกเป็นหลักสำหรับคำนวณหาเส้นโค้ง P-Q ในระบบไฟฟ้า ดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

หลักการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัส

สภาวะแรงดันพังทลายในระบบไฟฟ้าสามารถแยกพิจารณาออกได้ 2 ส่วนคือบัสและสายส่ง กำลังไฟฟ้าที่ส่งเข้าหรือดึงออกจากระบบเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อการเกิดแรงดันพังทลายทั้งสิ้น ดังนั้นบัสจึงเป็นส่วนที่ไม่อาจละเลยได้เลยจากการพิจารณา ส่วนสภาวะแรงดันพังทลายในสายส่งเกิดขึ้นตามมาหลังจากเกิดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารองรับความต้องการไม่เพียงพอ หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าไปในทิศทางซึ่งก่อให้เกิดสภาวะแรงดันพังทลายขึ้น บัสหรือสายส่งสามารถเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายในระบบได้ทั้งคู่และมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัสในระบบพร้อมจำแนกว่าบัสไหนควรจัดเป็นบัสอ่อนแอ (หรือก็คือบัสที่มีอัตราเสี่ยงส่งผลให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ) ส่วนหลักการพิจารณาแรงดันพังทลายในสายส่งจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 4

วิธีการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายทั้งหมดที่กล่าวในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ยึดหลักการอยู่บนทฤษฎีเส้นโค้ง P-Q ทั้งสิ้น สำหรับการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัสนั้น เริ่มจากคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น แล้วจึงพิจารณาบัสอ่อนแอแยกตามประเภทของแต่ละบัส โดยหลักเกณฑ์พิจารณาบัสอ่อนแอแยกตามประเภทได้ดังนี้

- 1) บัสที่เป็นเจนเรเตอร์บัสหรือบัสอ้างอิง ระบุว่าเป็นบัสอ่อนแอหรือไม่ พิจารณาจากค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ ค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [10, 17]
- 2) บัสที่เป็นโหลดบัส ระบุว่าเป็นบัสอ่อนแอหรือไม่ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส (The bus voltage collapse coefficient) [17]

ส่วนการคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ได้เริ่มอธิบายตั้งแต่พื้นฐานจนถึงการคำนวณทั้งแบบไม่พิจารณาและพิจารณากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับสุดท้ายเป็นการกำหนดค่าความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง (p_{bus}) สำหรับบัสอ่อนแอและบัสแข็งแรง

3.1 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลาย

จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายในระบบไฟฟ้ามีมากกว่าหนึ่งจุดซึ่งกระจายแบบต่อเนื่องอยู่ในรูปของระนาบเกิน (Hyperplane) วิธีที่นำเสนอในหัวข้อ 3.1.1 [5-8] เป็นการคำนวณจุดทำงาน

ที่เกิดแรงดันพังทลายบนระนาบเกินไปตามแนวทิศทางที่พุ่งออกจากจุดทำงานเริ่มต้น (Initial operating point) วิธีนี้มีประโยชน์สำหรับการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายจุดใดก็ได้บนระนาบเกินตามทิศทางที่กำหนด

3.1.1 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายไปตามทิศทางที่กำหนด

สมมติทิศทางเพิ่มโหลดจากจุดทำงานเริ่มต้น (ρ_0) ขึ้นมาทิศทางหนึ่งแทนด้วย n_0 โดยให้มีขนาดเท่ากับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย เพิ่มโหลดไปตามทิศที่กำหนดดังสมการข้างล่าง

$$\rho_1 = \rho_0 + k_1 n_0 \quad (3.1)$$

เมื่อ k_1 แทนจำนวนจริงบวก เพิ่มโหลดไปจนกระทั่งเกิดสถานะแรงดันพังทลายขึ้นคำนวณค่า k_1 ซึ่งทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดสถานะแรงดันพังทลายได้จากสมการข้างล่าง

$$f(x_1, \rho_0 + k_1 n_0) = 0 \quad (3.2)$$

$$w_1 f_{x(x_1, \rho_0 + k_1 n_0)} = 0 \quad (3.3)$$

$$w_1 c - 1 = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อ w_1 แทนเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะซ้าย (Left eigenvector) ของ $f_{x(x_1, \rho_0 + k_1 n_0)}$ และ c แทนเวกเตอร์ตรึง (Fixed vector) ซึ่งจะเป็นเวกเตอร์ใด ๆ ก็ได้ยกเว้นเวกเตอร์ศูนย์ (Zero vector) เพื่อเป็นการยืนยันว่า w_1 จะไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ในขณะคำนวณ จากสมการ (3.2) ถึงสมการ (3.4) จะเห็นได้ว่ามีจำนวนตัวแปรเท่ากับจำนวนสมการ ดังนั้นสามารถใช้วิธีนิวตัน (Newton's method) [18, 19] สำหรับการแก้สมการ

3.1.2 วิธีคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีละเลยการพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [5-8]

จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายบนระนาบเกินมีมากมายหลายจุด แต่จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายซึ่งเหมาะสมที่สุดก็คือจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดของระบบ เพราะหากวิเคราะห์ข้ออ่อนแอออกมาแล้วระบบปลอดภัย หมายความว่าระบบโดยรวมปลอดภัย ตรงกันข้ามถ้าใช้จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายจุดอื่นที่ไกลออกไปเป็นจุดเริ่มต้น การวิเคราะห์ข้ออ่อนแอที่ได้ไม่สามารถหมายความถึงระบบโดยรวมได้ ยกตัวอย่างเช่น ใช้จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายจุดอื่นที่ไม่ใช่จุดที่ใกล้ที่สุด วิเคราะห์ข้ออ่อนแอออกมาบ่งบอกว่าระบบปลอดภัย

หมายความว่าปลอดภัยเฉพาะ ณ จุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใช้เท่านั้น เพราะระบบยังมีจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายจุดอื่นที่อยู่ใกล้กว่าจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใช้วิเคราะห์ตอนแรก ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ข้ออ่อนแอออกมาแล้วอาจบ่งบอกว่าระบบไม่ปลอดภัยก็ได้ เป็นต้น ดังนั้นจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด จึงเป็นจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้วิเคราะห์ข้ออ่อนแอ

ขั้นตอนวิธีทำซ้ำ (Iterative method) สำหรับคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

- 1) วิธีคำนวณจุดแรงดันพังทลายไปตามทิศทางที่กำหนด ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ

3.1.1

- 2) วิธีคำนวณเวกเตอร์แนวฉาก (Normal vector) กับผิวเกินของเส้นโค้ง P-Q

3.1.2.1 วิธีคำนวณเวกเตอร์แนวฉาก

แบบจำลองสถิต (Static model) สำหรับระบบไฟฟ้ามีรูปสมการดังนี้

$$f(x, \rho) = 0 \quad (3.5)$$

โดยที่ $f(x, \rho)$ คือ สมการกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว (Steady state)

x คือ เวกเตอร์สถานะ (State vector) ขนาด n มิติ

โดยมีสมาชิกเป็นเฟสเซอร์แรงดัน

ρ คือ เวกเตอร์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่มีขนาด m มิติ

ภายใต้สมมติฐานกำหนดให้ Σ เป็นผิวเกินปรับเรียบ (Smooth hypersurface) รอบ ๆ ค่า ρ_1 จะได้ว่าเวกเตอร์แนวฉากกับผิวเกิน [1] ณ ค่า ρ_1 คือ

$$N(\rho_1) = w_1 \times f_\rho \quad (3.6)$$

โดยที่ $N(\rho_1)$ คือ เวกเตอร์แนวฉากกับผิวเกิน ณ ค่า ρ_1

f_ρ คือ จาคอเบียนเมทริกซ์เทียบกับค่า ρ มีขนาด $n \times m$ มิติ

w_1 คือ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะซ้าย (Left eigenvector) สำหรับ

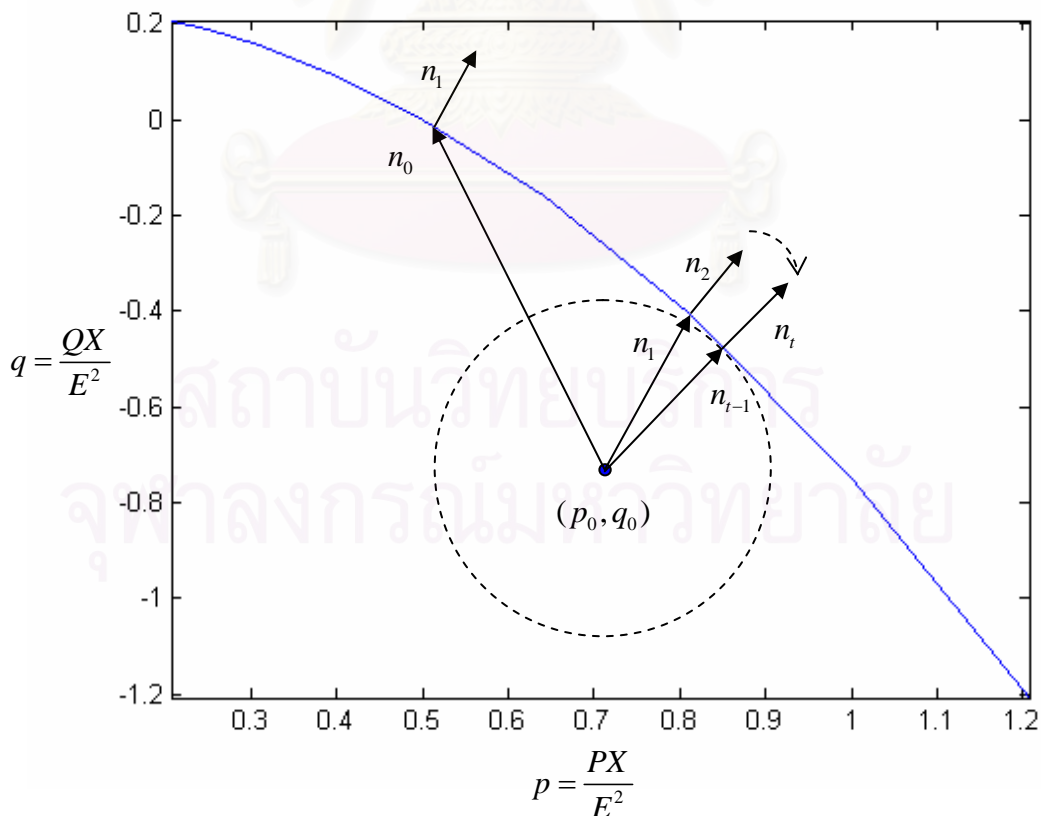
ค่าลักษณะเฉพาะศูนย์ (Zero eigenvalue) ของ

f_x จาคอเบียนเมทริกซ์เทียบกับค่า x

3.1.2.2 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด

เราสามารถแบ่งขั้นตอนคำนวณออกได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) กำหนดทิศทางเริ่มต้น n_0 โดย $|n_0|=1$
- 2) เค้นระบบไฟฟ้าโดยเพิ่มโหลด ρ ไปตามทิศทาง n_{i-1} จนกระทั่งจาโคเบียนเมทริกซ์ f_x กลายเป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular matrix) นั่นก็คือคำนวณค่า k_i , ρ_i และ x_i ซึ่ง $\rho_i = \rho_0 + k_i n_{i-1}$
- 3) คำนวณเวกเตอร์แนวฉาก $n_i = w_i J_\rho$ โดย $|n_i|=1$
- 4) กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 4 ใหม่จนกว่า $n_i \rightarrow n_*$ (เมื่อ n_* คือค่าทิศทางที่เหมาะสม หรือทิศทางที่ให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดในการเกิดแรงดันพังทลายขึ้น) นั่นก็คือ $n_i \rightarrow n_i // n_{i-1}$ (หรือ n_i ขนานกับ n_{i-1})

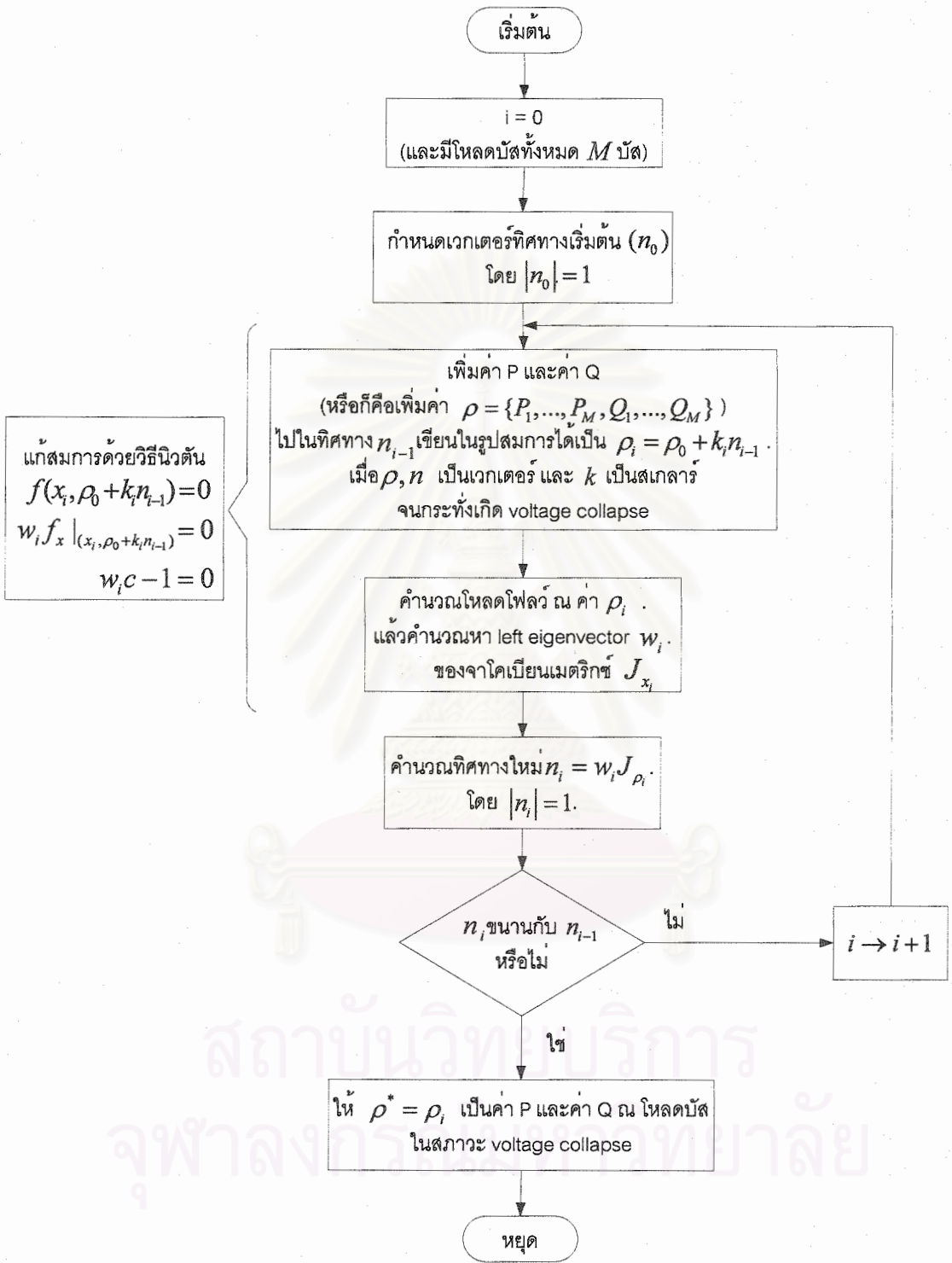


รูปที่ 3.1 การคำนวณจุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดในเส้นโค้ง P-Q บนระนาบ 2 มิติ

ยกตัวอย่างเส้นโค้ง P-Q ในหัวข้อที่ 2.4.3 ดังรูปที่ 3.1 กำหนดทิศทางเริ่มต้น n_0 เพิ่มโหนดจากจุดทำงานเริ่มต้น (p_0, q_0) ไปตามทิศทาง n_0 จนกระทั่งเกิดแรงดันพังทลายขึ้น จำนวนเวกเตอร์ตั้งฉาก n_1 บนเส้นโค้ง P-Q ออกมา นำทิศทาง n_1 มาเป็นทิศทางเพิ่มโหนดใหม่จากจุดทำงานเริ่มต้น เพิ่มโหนดไปตามทิศทาง n_1 จนกระทั่งเกิดแรงดันพังทลายขึ้น จำนวนเวกเตอร์ตั้งฉาก n_2 บนเส้นโค้ง P-Q ออกมาอีกครั้ง ทำขั้นตอนแบบนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ทิศทาง n_t ขนานกับทิศทาง n_{t-1} เมื่อ t แทนจำนวนเต็มบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทิศทาง n_t เป็นทิศทางเพิ่มโหนดไปยังจุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด โดยละเอียดการพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถสรุปเป็นโพลีชาร์ตได้ ดังรูปที่ 3.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น

3.1.3 วิธีคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วิธีที่นำเสนอในหัวข้อ 3.1.2 เป็นการคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด โดยละเอียดการพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ที่คำนวณได้ต้องนำกลับมาพิจารณาก่อนว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินค่าขีดจำกัดหรือไม่ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวจ่ายไม่เกินค่าขีดจำกัดแสดงว่าจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.1.2 เป็นจุดคำตอบสำหรับกรณีพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

ในทางตรงข้าม หากพิจารณาแล้วมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวจ่ายกำลังเกินหรือต่ำกว่าค่าขีดจำกัด (Power limit) ที่ระบุไว้ ต้องทำการคำนวณใหม่เพื่อหาจุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตกำลังไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด โดยแยกหลักพิจารณาเป็น 2 แบบตาม巴士ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่จ่ายเกินหรือต่ำกว่าต่ออยู่ ดังนี้

1) กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่เจเนเรเตอร์巴士 (Generator bus) ให้เปลี่ยนสถานะ巴士จากเจเนเรเตอร์巴士เป็นโหลด巴士 (Load bus) พร้อมทั้งเปลี่ยนค่ากำลังที่จ่ายเกินหรือต่ำกว่าให้มีค่าเท่ากับค่าขีดจำกัดแล้วกลับไปคำนวณใหม่ตามวิธีที่นำเสนอในหัวข้อ 3.1.2

2) กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่巴士อ้างอิง (Reference bus) หากยังใช้วิธีที่นำเสนอในหัวข้อ 3.1.2 โดยเปลี่ยนสถานะ巴士จาก巴士อ้างอิงเป็นโหลด巴士 (Load bus) จะไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากการกระทำแบบนี้ทำให้ระบบไม่มี巴士อ้างอิงอยู่ เหลือเพียงเจเนเรเตอร์巴士และโหลด巴士เท่านั้นในระบบ ด้วยเหตุนี้จึงได้นำเสนอวิธีในการคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ 巴士อ้างอิงจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินหรือต่ำกว่าค่าขีดจำกัด ซึ่งวิธีนี้กำหนดให้กำลังจริงหรือกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ 巴士อ้างอิงมีค่าเท่ากับค่าขีดจำกัด แล้วแต่ค่าไหนมีค่าเกินหรือต่ำกว่าค่าขีดจำกัด มีรูปแบบสมการตามข้างล่างดังนี้

$$\min_{y \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} |\rho_{load} - \rho_{load,0}|^2 \quad (3.7)$$

$$\text{subject to } f(y) = 0 \quad (3.8)$$

$$(w f_x)^T = 0 \quad (3.9)$$

$$w f_\rho (w f_\rho)^T - 1 = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{2} (|\rho_{load,fix}|^2 - |\rho_{load}|^2) \leq 0 \quad (3.11)$$

$$\text{เมื่อ } y = [x, x_{add}, \rho, \rho_{add}]^T$$

$$x = [\delta_{gen}, \delta_{load}, |V_{load}|]^T$$

$$x_{add} = [|V_{ref}|, |V_{gen}|]^T$$

$$\rho = \rho_{load}$$

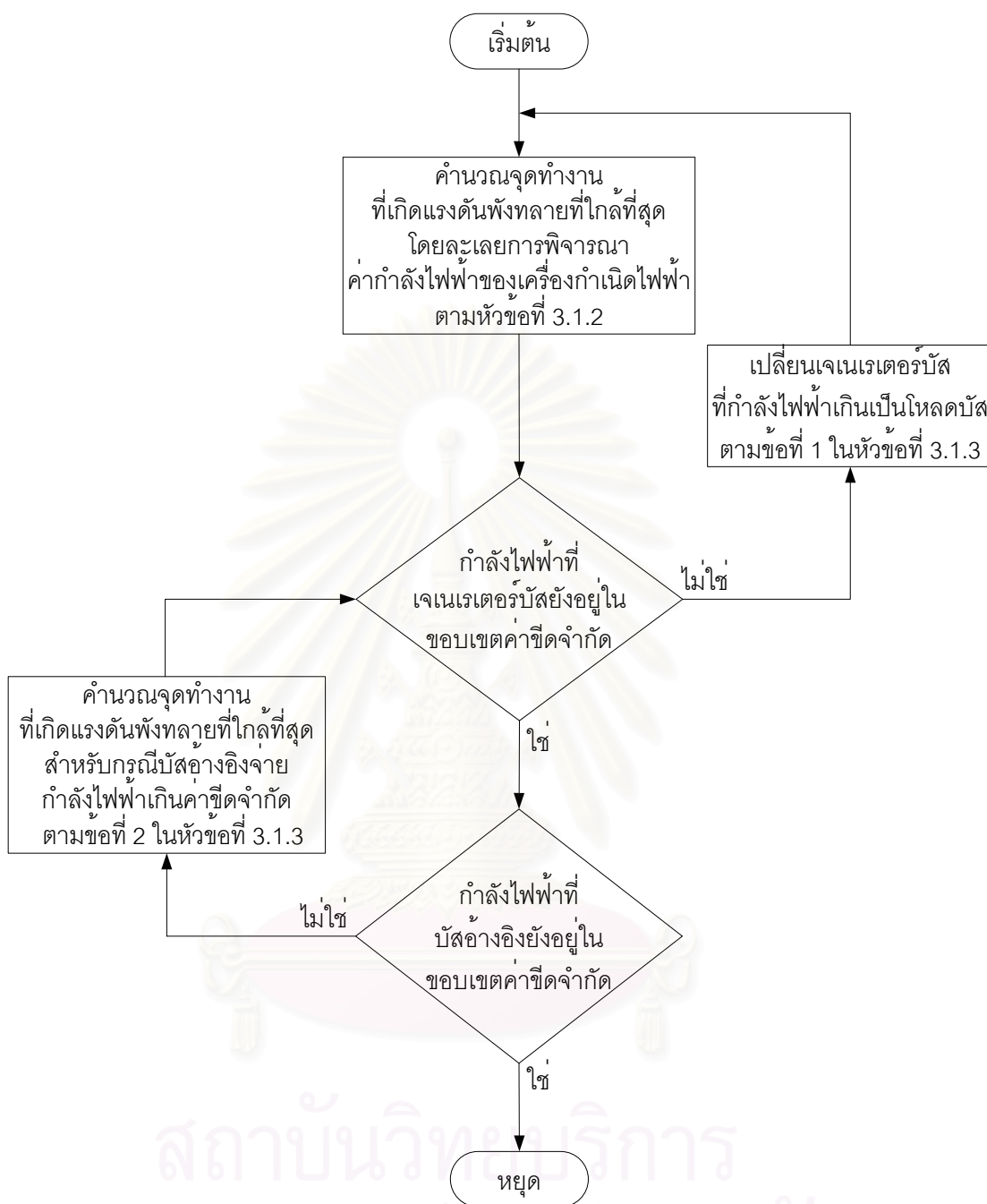
$$\rho_{add} = \rho_{gen}$$

- โดยที่ y คือ ตัวแปรสถานะ ซึ่งมีสมาชิกเป็น x x_{add} ρ และ ρ_{add}
- x คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นมุมของเจนเนอเรเตอร์บัส (δ_{gen}) กับโหลดบัส (δ_{load}) และขนาดแรงดันของโหลดบัส ($|V_{load}|$)
- x_{add} คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นขนาดแรงดันของบัสอ้างอิง ($|V_{ref}|$) กับเจนเนอเรเตอร์บัส ($|V_{gen}|$)
- ρ คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดบัส (ρ_{load})
- ρ_{add} คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเจนเนอเรเตอร์บัส (ρ_{gen})
- $\rho_{load,fix}$ คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดบัส ณ จุดแรงดันพังทลาย ซึ่งคำนวณได้จากวิธีในหัวข้อที่ 3.1.2
- $f(y)$ คือ สมการกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว (Steady state)
- f_x คือ จาคอบีียนเมทริกซ์เทียบกับค่า x
- f_ρ คือ จาคอบีียนเมทริกซ์เทียบกับค่า ρ
- w คือ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะซ้าย (Left eigenvector) สำหรับค่าลักษณะเฉพาะศูนย์ (Zero eigenvalue) ของ f_x

สมการ (3.7) เป็นสมการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization equation) ซึ่งได้นำเงื่อนไขจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายมาเป็นสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ดังสมการ (3.8) (3.9) และ (3.10) ส่วนสมการเงื่อนไขบังคับ (3.11) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าขอบกำลังไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum power boundary) ของโหลดบัสที่พิจารณา ทั้งนี้ก็เพื่อให้กำลังไฟฟารวมของโหลดทั้งระบบต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.1.2 ดังนั้นจึงต้องคำนวณด้วยวิธีในหัวข้อที่ 3.1.2 ก่อนจึงจะมาคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอในหัวข้อนี้ได้ สำหรับวิธีคำนวณในหัวข้อนี้ กำลังไฟฟ้าและมุมแรงดันที่บัสอ้างอิงถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยมีค่าเท่ากับค่าขอบเขตกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเท่ากับศูนย์ ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดัน และมุมแรงดันค่าอื่น ๆ ให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด กรณีพิจารณาค่ากำลังสูงสุด และต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถสรุปเป็นโพลีชาร์ตได้ ดังรูปที่ 3.3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เมื่อเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้น กรณีพิจารณาค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2 วิธีพิจารณาบัสอ่อนแอจากเส้นโค้ง P-Q

เมื่อทราบจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ทำให้ตอนนี้สามารถพิจารณาจำแนกว่าบัสไหนเป็นบัสแข็งแรงหรือบัสอ่อนแอ โดยแยกการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- 1) บัสที่พิจารณาเป็นเจนเนอเรเตอร์บัสหรือบัสอ้างอิง
- 2) บัสที่พิจารณาเป็นโหลดบัส

3.2.1 หลักการพิจารณาบัสอ่อนแอ กรณีบัสที่พิจารณาเป็นเจนเนอเรเตอร์บัสหรือบัสอ้างอิง

การพิจารณาทั้งเจนเนอเรเตอร์บัสและบัสอ้างอิงมีหลักการพิจารณาที่คล้ายกัน โดยพิจารณาจากจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากหัวข้อที่ 3.1 สำหรับเจนเนอเรเตอร์บัสจะดูจากค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับบัสว่ามีค่าและค่าขีดจำกัดหรือไม่ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวไหนจ่ายกำลังรีแอกทีฟและค่าขีดจำกัด ก็จัดให้เจนเนอเรเตอร์บัสนั้นเป็นบัสอ่อนแอ ส่วนกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังรีแอกทีฟอยู่ในขอบเขตกำลังรีแอกทีฟ ก็พิจารณาให้เป็นบัสแข็งแรง (หรือคือเป็นบัสที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ)

ส่วนบัสอ้างอิงก็เริ่มพิจารณาจากจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เช่นเดียวกัน แต่จะพิจารณาโดยดูจากทั้งค่ากำลังจริงและค่ากำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับบัสอ้างอิง ถ้ากำลังไฟฟ้าอันใดอันหนึ่งและค่าขีดจำกัด ก็จัดให้บัสอ้างอิงเป็นบัสอ่อนแอทันที ส่วนกรณีที่ค่ากำลังไฟฟ้าทั้งคู่อยู่ในขอบเขตกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ตามลำดับ ก็พิจารณาให้เป็นบัสแข็งแรง (หรือคือเป็นบัสที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ)

หลักการพิจารณาทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อระบุว่าเป็นบัสอ่อนแอหรือไม่ จะถูกนำมาใช้พิจารณาเจนเนอเรเตอร์บัสเฉพาะกรณีที่มีการปล่อยให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เจนเนอเรเตอร์บัสเปลี่ยนแปลงได้ หรือก็คือมีการคำนวณโดยใช้วิธีที่นำเสนอให้หัวข้อที่ 3.1.3

3.2.2 หลักการพิจารณาบัสอ่อนแอ กรณีบัสที่พิจารณาเป็นโหลดบัส

สำหรับการพิจารณาโหลดบัสนั้นจะดูจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส ซึ่งเป็นค่าที่สื่อถึงค่าเผื่อโหลด (Load margin) ของบัสที่มีต่อระบบ ดังนั้นถ้าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส [17] มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.20 ก็ให้ถือว่าเป็นบัสอ่อนแอ ด้วยเหตุผลที่ว่าบัส

นั้นมีค่าเพื่อ โหลดเหลืออยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าโหลดทั้งหมดของบัส ส่วนกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสมีค่ามากกว่า 0.20 ก็พิจารณาให้เป็นบัสแข็งแรง (หรือเป็นบัสที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ)

บัสที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อบัสต่าง ๆ โดยไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลดต่ออยู่ด้วยเลย ให้พิจารณาเป็นบัสแข็งแรงเสมอ แม้ว่าเมื่อคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลาย ณ บัสออกมาจะได้เท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้น

3.2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส : k_{cr}

เมื่อทราบจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส ของแต่ละบัสได้จากสมการ (3.12) ตามข้างล่างนี้

$$k_{cr,i} = \frac{\sqrt{(P_{cr,i} - P_{0,i})^2 + (Q_{cr,i} - Q_{0,i})^2}}{\sqrt{(P_{cr,i})^2 + (Q_{cr,i})^2}} \quad (3.12)$$

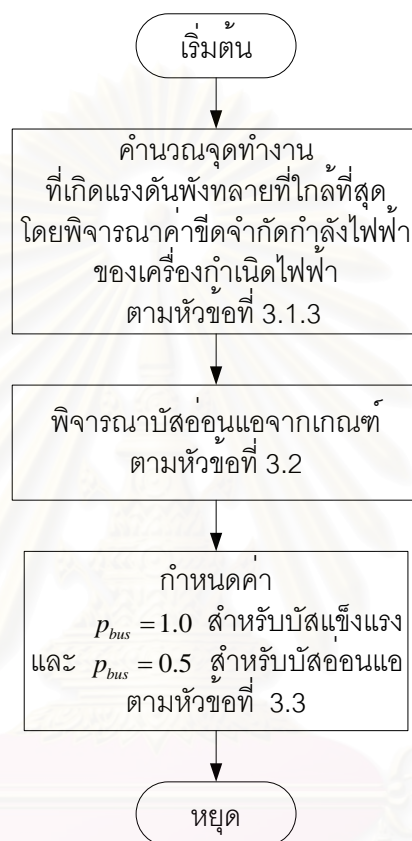
โดยที่ $P_{cr,i}, Q_{cr,i}$ คือ ค่ากำลังจริงและค่ากำลังรีแอกทีฟ ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด (Closest voltage collapse) ของโหลดบัสที่ i

$P_{0,i}, Q_{0,i}$ คือ ค่ากำลังจริงและค่ากำลังรีแอกทีฟ ณ จุดทำงานเริ่มต้น (Initiate operating power) ของโหลดบัสที่ i

3.3 ความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่ กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง : p_{bus}

ความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่ กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง [17] มีอยู่ด้วยกัน 2 ค่าคือ 1.0 กับ 0.5 โดยกำหนดให้บัสแข็งแรงมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 1.0 ส่วนบัสอ่อนแอมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 ค่าความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัสที่กำหนดไว้ในหัวข้อนี้จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งในบทที่ 4 ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งที่คำนวณได้ จะถูกใช้สำหรับจัดลำดับความเสี่ยงการเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายของสายส่งในระบบ พร้อมทั้งใช้สำหรับระบุว่าสายส่งเส้นไหนควรเป็นสายส่งอ่อนแอหรือสายส่งแข็งแรง โดยรายละเอียดทั้งหมดถูกกล่าวไว้ในบทที่ 4

จากขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็น โพลีชาร์ตแสดงขั้นตอนการพิจารณาแรงดันพังทลายที่บัส ได้ดังรูปที่ 3.4



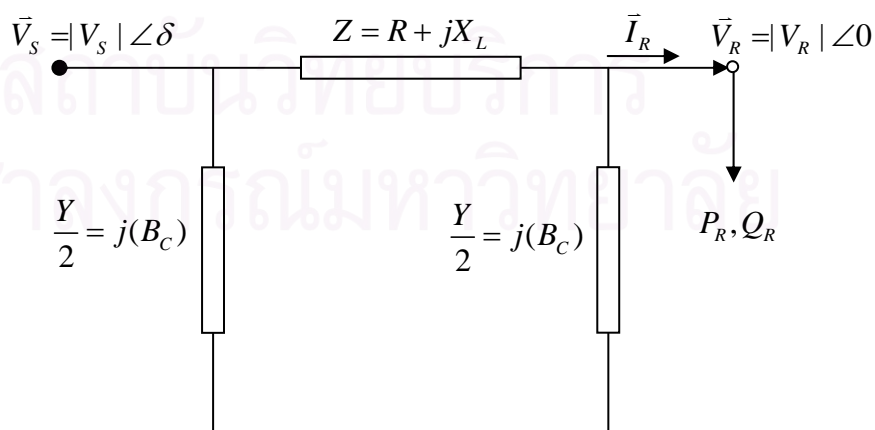
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการพิจารณาแรงดันฟังกหลายที่บัสจากเส้นโค้ง P-Q

บทที่ 4

สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง

การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในสายส่งด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (The line voltage collapse coefficient) จะยึดหลักพิจารณาจากระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงาน ณ สภาวะอยู่ตัวไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง และจากความน่าจะเป็นการเกิดแรงดันพังทลายในสายส่งเมื่อพิจารณาให้กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟกระจายสม่ำเสมอตลอดเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึง巴士ที่สายส่งนั้นต่ออยู่ด้วย เนื่องจากหาวิเคราะห์สายส่งอ่อนแอจากค่าตัวแปรบนสายส่งเพียงอย่างเดียว ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งซึ่งคำนวณได้จะมีความผิดพลาดมาก ยกตัวอย่างเช่น สายส่ง 2 เส้น เส้นแรกต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ระดับทำงานปกติ ส่วนอีกเส้นต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับค่าสูงสุดที่เครื่องจ่ายได้ แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งที่คำนวณจากระยะทางที่สั้นที่สุดและความน่าจะเป็นของสายส่งเท่านั้น มีค่าเท่ากัน ซึ่งยังสามารถไม่สรุปได้เลยว่าสายส่งทั้งสองเส้นนี้มีความเป็นสายส่งอ่อนแอที่เท่ากัน เพราะในความเป็นจริงแล้วสายส่งเส้นที่สองควรมีความเป็นสายส่งอ่อนแอกว่าสายส่งเส้นแรกเนื่องจากต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจนค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นวิธีที่นำเสนอนี้จึงได้นำ巴士ที่สายส่งต่ออยู่มาร่วมพิจารณาด้วย

4.1 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง [17]



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลสายส่งความยาวแบบกลางในรูปแบบ π

รูปที่ 4.1 แสดงวงจรสมมูลสายส่งความยาวแบบกลางในรูปแบบ π สมมติว่ารู้ขนาดแรงดัน ($|V_S|$) ณ ต้นสาย และค่ากำลังจริง (P_R) กับค่ากำลังรีแอกทีฟ (Q_R) ณ ปลายสาย กำลังโหลด P_R และ Q_R มีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดแรงดัน $|V_S|$ ขนาดแรงดัน $|V_R|$ และมุม δ จากหลักการค่าคงที่ของสายส่ง (The generalized circuit constant :ABCD) สามารถเขียนสมการแรงดันระบบได้ดังนี้

$$\vec{V}_S = \vec{A}\vec{V}_R + \vec{B}\vec{I}_R \quad (4.1)$$

ในรูปแบบเชิงตั้งฉาก (Rectangular form) สามารถเขียนค่าคงที่ของสายส่งได้ดังนี้

$$\vec{A} = a_1 + ja_2 = (1 - X_L B_C) + j(RB_C) \quad (4.2)$$

$$\vec{B} = b_1 + jb_2 = (R) + j(X_L) \quad (4.3)$$

กำหนดให้แรงดันปลายสาย (\vec{V}_R) เป็นแรงดันอ้างอิง (หรือก็คือ $\vec{V}_R = |V_R| \angle 0$) ดังนั้นกระแสปลายสาย (\vec{I}_R) สามารถเขียนออกมาเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{I}_R = (\vec{S} / \vec{V}_R)^* = (P_R - jQ_R) / |V_R| \quad (4.4)$$

พิจารณาสมการ (4.2) สมการ(4.3) และสมการ (4.4) แล้วเขียนสมการ (4.1) ใหม่ได้ดังนี้

$$\vec{V}_S = (a_1 + ja_2)|V_R| + (b_1 + jb_2)(P_R - jQ_R) / |V_R| \quad (4.5)$$

พิจารณากำลังโหลด (P_R, Q_R) และขนาดแรงดันต้นสาย ($|V_S|$) เป็นค่าคงที่ ส่วนขนาดแรงดันปลายสาย ($|V_R|$) พิจารณาให้เป็นตัวแปร ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (4.5) ได้ใหม่ดังนี้

$$c_1 |V_R|^4 + (c_2 P_R + c_3 Q_R - |V_S|^2) |V_R|^2 + c_4 (P_R^2 + Q_R^2) = 0 \quad (4.6)$$

เมื่อ

$$c_1 = a_1^2 + a_2^2 = (1 - X_L B_C)^2 + (R B_C)^2$$

$$c_2 = 2(a_1 b_1 + a_2 b_2) = 2R$$

$$c_3 = 2(a_1 b_2 - a_2 b_1) = 2[X_L - X_L^2 B_C - R^2 B_C]$$

$$c_4 = (b_1^2 + b_2^2) = (R)^2 + (X_L)^2$$

พิจารณาให้ $x = |V_R|^2$ ดังนั้นสมการ (4.6) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (4.7)$$

เมื่อ $a = c_1$

$$b = (c_2 P_R + c_3 Q_R - |V_S|^2)$$

$$c = c_4 (P_R^2 + Q_R^2)$$

ดังนั้นขนาดแรงดันปลายสาย ($|V_R|$) สามารถคำนวณได้จากสูตรข้างล่างนี้

$$|V_R| = \sqrt{x} = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (4.8)$$

เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังปฏิบัติงานอยู่ภายใต้ขอบเขตเสถียรภาพแรงดัน ค่าคำตอบของขนาดแรงดันปลายสาย ($|V_R|$) ทั้ง 2 ค่าจากสมการ (4.8) มีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและนำมาวาดเป็นเส้นโค้ง P-V สำหรับระบบได้ ค่าคำตอบที่คำนวณได้มีอยู่ 2 ค่า กำหนดให้ค่าคำตอบที่มีค่ามากกว่าอีกค่าเป็น $|V_R^H|$ ส่วนค่าคำตอบที่น้อยกว่าเป็น $|V_R^L|$ โดยที่ค่า $|V_R^H|$ เป็นค่าแรงดันเสถียรภาพและค่า $|V_R^L|$ เป็นค่าแรงดันไม่เสถียรภาพ เนื่องจากค่าความชันของเส้นโค้ง P-V ณ จุดขนาดแรงดัน $|V_R^H|$ มีค่าเป็นลบ สอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบในสภาวะจริงที่ถ้าโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าขนาดแรงดันต้องลดลง ส่วนค่าความชันของเส้นโค้ง P-V ณ จุดขนาดแรงดัน $|V_R^L|$ มีค่าเป็นบวก ซึ่งขัดแย้งกับพฤติกรรมของระบบในสภาวะจริง ในทางปฏิบัตินั้นค่าดิสคริมิแนนต์ (Discriminant : $\sqrt{b^2 - 4ac}$) ในสมการ (4.7) มีค่าเป็นบวก สำหรับค่า $|V_R^H|$ และค่า $|V_R^L|$ จะมีค่าเข้าใกล้กันและเท่ากัน ณ จุดแรงดันพังทลายเมื่อโหลดของระบบเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเข้าใกล้จุดแรงดันพังทลาย ($|V_R^{cr}|$) ค่าแรงดันพังทลายสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.8) เมื่อค่าดิสคริมิแนนต์ ($\sqrt{b^2 - 4ac}$) มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าโหลดเพิ่มมากกว่านี้ค่าดิสคริมิแนนต์จะมีค่าเป็นลบและไม่สามารถคำนวณค่า $|V_R|$ ที่เป็นจำนวนจริงได้ ซึ่งในทางทฤษฎีก็เป็นไปไม่ได้ที่จะควบคุมระบบภายใต้เงื่อนไขโหลดแบบนี้ ดังนั้นค่าโหลดของระบบ ณ จุดแรงดันพังทลายสามารถคำนวณได้จากเงื่อนไข $b^2 - 4ac = 0$ ได้รูปสมการออกมาดังข้างล่าง

$$(c_3^2 - 4c_1c_4)Q_R^2 + (2c_2c_3)Q_R P_R + (c_2^2 - 4c_1c_4)P_R^2 - (2c_3 |V_S|^2)Q_R - (2c_2 |V_S|^2)P_R + |V_S|^4 = 0 \quad (4.9)$$

สมการ (4.9) อยู่ในรูปสมการพหุนามกำลังสองแบบหมุนแกน [20] เมื่อกำหนดให้ $x = Q_R$ และ $y = P_R$ สามารถเขียนสมการ (4.9) ใหม่ได้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad A &= c_3^2 - 4c_1c_4 & B &= 2c_2c_3 \\ C &= c_2^2 - 4c_1c_4 & D &= -2c_3 |V_S|^2 \\ E &= -2c_2 |V_S|^2 & F &= |V_S|^4 \end{aligned}$$

สมการ (4.10) เป็นสมการพาราโบลาแบบหมุนแกน พิสูจน์ได้จากค่าดิสคริมิแนนต์ (Discriminant : $B^2 - 4AC$) ของสมการมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือก็คือ $B^2 - 4AC = 0$ ทำการหมุนแกนสมการไปเป็นมุม θ เพื่อให้เป็นสมการพาราโบลาแบบหมุนแกนกลายเป็นสมการพาราโบลาตามแนวแกน x หรือแกน y หรือก็คือแปลงสมการ (4.10) เป็นสมการ (4.11) ดังสมการข้างล่างนี้

$$A'x'^2 + B'x'y' + C'y'^2 + D'x' + E'y' + F' = 0 \quad (4.11)$$

$$\text{เมื่อ} \quad A' = A \cos^2(\theta) + B \sin(\theta) \cos(\theta) + C \sin^2(\theta) \quad (4.12)$$

$$B' = B \cos(2\theta) + (C - A) \sin(2\theta) \quad (4.13)$$

$$C' = A \sin^2(\theta) - B \sin(\theta) \cos(\theta) + C \cos^2(\theta) \quad (4.14)$$

$$D' = D \cos(\theta) + E \sin(\theta) \quad (4.15)$$

$$E' = E \cos(\theta) - D \sin(\theta) \quad (4.16)$$

$$F' = F \quad (4.17)$$

โดยที่ θ คือ มุมที่ใช้ในการหมุนแกน

$$(B')^2 - 4A'C' = B^2 - 4AC \quad (4.18)$$

$$A' + C' = A + C \quad (4.19)$$

ผลลัพธ์ที่มุ่งหวังได้ภายหลังจากการหมุนแกนมีดังนี้

- 1) พจน์ $B' = 0$ เพื่อกำจัดพจน์ $x'y'$ ออกจากสมการพหุนามกำลังสองแบบหมุนแกน
- 2) พจน์ $A' = 0$ หรือพจน์ $C' = 0$ แต่ต้องไม่เป็นศูนย์ทั้งสองพจน์เนื่องจากเป็นสมการพาราโบลาแบบหมุนแกน (ถ้าเป็นศูนย์ทั้งสองพจน์จะกลายเป็นสมการเส้นตรงแทน)

คำนวณมุม θ สำหรับหมุนแกนเพื่อให้พจน์ $B' = 0$ จากสูตรตามข้างล่างนี้

$$\cot(2\theta) = \frac{A-C}{B} \quad (4.20)$$

แทนค่า A B และ C จากสมการ (4.10) ลงในสมการ (4.20) จะได้

$$\cot(2\theta) = \frac{c_3^2 - c_2^2}{2c_2c_3} \quad (4.21)$$

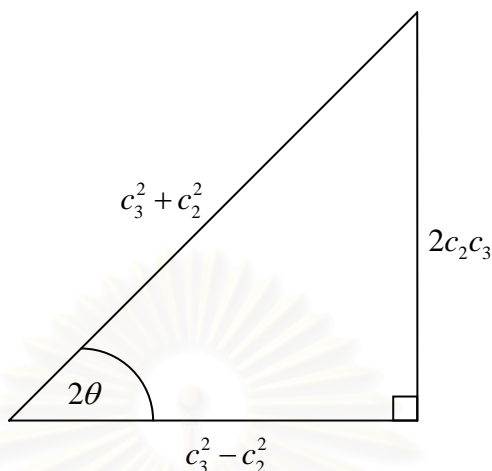
หรือ $(2\theta) = \arctan\left(\frac{2c_2c_3}{c_3^2 - c_2^2}\right) \quad (4.22)$

เมื่อ $c_2 = 2(a_1b_1 + a_2b_2) = 2R$

$$c_3 = 2(a_1b_2 - a_2b_1) = 2[X_L - X_L^2B_C - R^2B_C]$$

ค่า $c_1 \geq 0$ $c_2 \geq 0$ และ $c_4 \geq 0$ เสมอ ส่วนค่า c_3 มีค่าขึ้นอยู่กับค่า susceptance (Branch susceptance: B_C) โดยกรณีเป็นหม้อแปลง $B_C < 0$ และ $c_3 > 0$ กรณีละเลยค่า susceptance $B_C = 0$ และ $c_3 > 0$ และกรณีเป็นสายส่ง $B_C > 0$ และ $c_3 \in R$ แต่โดยปกติแล้ว $X_L > (X_L^2 + R^2)B_C$ (ซึ่งทำให้ $c_3 > 0$ ด้วยเช่นกัน) ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะ $c_3 \geq 0$ เท่านั้นสำหรับในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_3^2 และค่า c_2^2 นั้น ทั้งกรณีเป็นหม้อแปลงหรือกรณีละเลยค่า susceptance ค่า $c_3^2 \geq c_2^2$ เสมอ ส่วนกรณีสายส่งนั้นโดยปกติแล้ว $c_3^2 \geq c_2^2$ แต่ก็มีบางครั้งที่ $c_3^2 < c_2^2$ ซึ่งได้นำออกมาแยกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5 ดังนั้นจึงเหลือเพียงเฉพาะการพิจารณา $c_3^2 \geq c_2^2$ เท่านั้น จากข้อกำหนดที่กล่าวมาทั้งหลายทำให้สรุปได้ว่ามุม $(2\theta) \geq 0$ และวาดกราฟสามเหลี่ยมตรีโกณมิติได้ดังรูปที่ 4.2 คำนวณด้านตรงข้ามมุมฉากจากสูตรตรีโกณมิติได้เท่ากับ $\sqrt{(c_3^2 - c_2^2)^2 + (2c_2c_3)^2} = c_3^2 + c_2^2$



รูปที่ 4.2 รูปสามเหลี่ยมตรีโกณมิติ มุม 2θ เรเดียน

คำนวณค่า $\cos(\theta)$ และ $\sin(\theta)$ จากสูตร (4.23) และ (4.24) โดยที่ $\cos(2\theta) = \frac{c_3^2 - c_2^2}{c_3^2 + c_2^2}$ จะได้

$$\cos(\theta) = \sqrt{\frac{1 + \cos(2\theta)}{2}} \quad (4.23)$$

$$= \frac{|c_3|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$$

และ

$$\sin(\theta) = \sqrt{\frac{1 - \cos(2\theta)}{2}} \quad (4.24)$$

$$= \frac{|c_2|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$$

เมื่อทราบค่า $\cos(\theta)$ และ $\sin(\theta)$ แล้วสามารถคำนวณค่า A' B' C' D' และ E' ในสมการ (4.11) ได้ ส่วนค่า F' นั้นเท่ากับ F อยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณอีก เริ่มคำนวณค่า E' ก่อนดังนี้

$$E' = E \cos(\theta) - D \sin(\theta) \quad (4.16)$$

$$= [-2c_2 |V_s|^2 \cos(\theta)] - [-2c_3 |V_s|^2 \sin(\theta)]$$

$$= -2 |V_s|^2 [c_2 \cos(\theta) - c_3 \sin(\theta)]$$

$$= \frac{-2 |V_s|^2}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}} \times [(c_2 |c_3|) - (c_3 |c_2|)]$$

$$= 0$$

เมื่อ $E' = 0$ แสดงว่าพจน์ $A' = 0$ เพราะถ้าพจน์ $C' = 0$ จะทำให้สมการ (4.11) เหลือเพียงพจน์ x' ซึ่งไม่ใช่สมการพาราโบลาแบบหมุนแกนอย่างที่พิสูจน์ไว้ตอนแรก เมื่อพิสูจน์มาถึงขั้นตอนนี้สามารถคำนวณค่า C' ได้จากสูตร $A' + C' = A + C$ โดยที่ $A' = 0$ จะได้ว่า

$$C' = A + C \quad (4.19)$$

$$= (c_3^2 - 4c_1c_4) + (c_2^2 - 4c_1c_4)$$

$$= (c_3^2 + c_2^2) - 8c_1c_4$$

$$= -4c_1c_4 \quad \text{เมื่อ } c_3^2 + c_2^2 = 4c_1c_4$$

ส่วนค่า D' สามารถคำนวณได้จากสูตร (4.15) ดังนี้

$$D' = D \cos(\theta) + E \sin(\theta) \quad (4.15)$$

$$= -2 |V_s|^2 \sqrt{c_3^2 + c_2^2}$$

$$= -4 |V_s|^2 \sqrt{c_1c_4}$$

และสุดท้ายก็คือค่า F' โดยที่

$$F' = F \quad (4.17)$$

$$= |V_s|^4$$

แทนค่า A' B' C' D' E' และ F' ลงในสมการ (4.11) จะได้

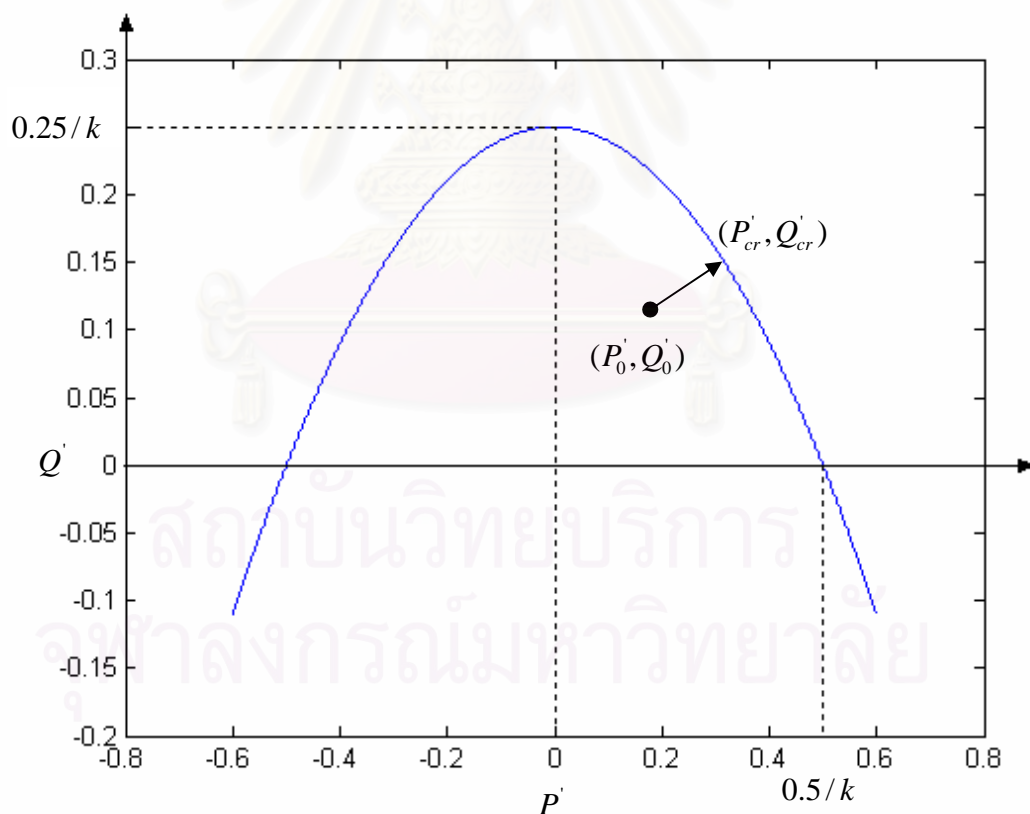
$$(-4c_1c_4)y'^2 + (-4|V_S|^2\sqrt{c_1c_4})x' + |V_S|^4 = 0 \quad (4.25)$$

แทนค่า $y' = P'_R$ และ $x' = Q'_R$ แล้วจัดพจน์ใหม่จะได้

$$Q'_R = -k(P'_R)^2 + \frac{0.25}{k} \quad \text{เมื่อ } k = \frac{\sqrt{c_1c_4}}{|V_S|^2} \quad (4.26)$$

ที่ผ่านมากำหนดให้แกน P'_R เป็นแกน y' และแกน Q'_R เป็นแกน x' ดังนั้นเพื่อการวาดเส้นโค้ง P-Q และคำนวณในขั้นต่อไปจึงให้แกน y' อยู่แนวนอนและแกน x' อยู่แนวตั้ง วาดรูปออกมาได้ดังรูปที่ 4.3 และเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันได้ดังสมการ (4.27) ตามลำดับ

$$f(P'_R) = -k(P'_R)^2 + \frac{0.25}{k} \quad (4.27)$$



รูปที่ 4.3 เส้นโค้ง P-Q ของสายส่งภายหลังการหมุนแกนแล้ว โดยที่ $k = 1$

4.2 ระยะเวลาที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลาย (Voltage collapse point)

จากรูปที่ 4.3 ระยะเวลาที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้น (P_0, Q_0) ไปยังจุดทำงาน (P_{cr}, Q_{cr}) บนเส้นโค้ง P-Q เป็นค่าๆ หนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความเสี่ยงของการเกิดแรงดันพังทลายขึ้นในสายส่ง หากระยะเวลาที่สั้นที่สุดนี้มีค่าน้อย ก็ย่อมบ่งบอกถึงอัตราการเกิดแรงดันพังทลายที่ยิ่งสูงตามไปด้วย ค่ากำลังไฟฟ้า (P_0, Q_0) สามารถคำนวณได้จากแรงดันต้นสาย $(|V_S| \angle \delta_S)$ และแรงดันปลายสาย $(|V_R| \angle \delta_R)$ ซึ่งทราบค่าจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) ณ จุดทำงานเริ่มต้น แทนค่าแรงดันทั้งสองลงในสมการ (4.5) และจัดพจน์ใหม่ได้ดังสมการข้างล่าง

$$P_0 - jQ_0 = \frac{|V_S| |V_R| \angle \delta - (a_1 + ja_2) |V_R|^2}{b_1 + jb_2} \quad (4.28)$$

เมื่อ $\delta = \delta_S - \delta_R$

จากสมการ (4.28) แยกส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพออกมาได้เป็น

$$P_0 = \frac{|V_R|}{b_1^2 + b_2^2} \times [(|V_S| \cos(\delta) - a_1 |V_R|) b_1 + (|V_S| \sin(\delta) - a_2 |V_R|) b_2] \quad (4.29)$$

$$Q_0 = \frac{-|V_R|}{b_1^2 + b_2^2} \times [(|V_S| \sin(\delta) - a_2 |V_R|) b_1 + (|V_S| \cos(\delta) - a_1 |V_R|) b_2] \quad (4.30)$$

สมการ (4.29) และสมการ (4.30) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ -Q_0 \end{pmatrix} = \frac{|V_R|}{b_1^2 + b_2^2} \times \left\{ \begin{pmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix} |V_S| - \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_1 \end{pmatrix} |V_R| \right\} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

เมื่อ $a_1 = 1 - X_L B_C$ $a_2 = RB_C$

และ $b_1 = R$ $b_2 = X_L$

ตอนนี้ค่า (P_0, Q_0) ที่คำนวณได้มีพิกัดอยู่บนแกน P-Q ดังนั้นจึงต้องทำการหมุนแกนเพื่อเปลี่ยนพิกัดให้มาอยู่บนแกน P'-Q' แทนโดยใช้สูตรตามข้างล่างนี้

$$x' = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (4.32)$$

$$y' = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \quad (4.33)$$

ซึ่งในตอนแรกได้กำหนดให้กำลังจริง (P) เป็นค่าบนแกน y และกำลังรีแอกทีฟ (Q) เป็นค่าบนแกน x ดังนั้นจึงใช้สมการ (4.32) สำหรับค่ากำลังรีแอกทีฟและใช้สมการ (4.33) สำหรับค่ากำลังจริง แทนค่า $P = P_0$ และ $Q = Q_0$ ลงในสมการได้ออกมาเป็น

$$Q'_0 = Q_0 \cos(\theta) + P_0 \sin(\theta) \quad (4.34)$$

$$P'_0 = -Q_0 \sin(\theta) + P_0 \cos(\theta) \quad (4.35)$$

เมื่อทราบค่าจุดทำงานเริ่มต้น (P'_0, Q'_0) แล้วสามารถคำนวณระยะทางใกล้ที่สุดไปยังจุด (P'_{cr}, Q'_{cr}) ในรูปที่ 4.3 ได้จากสมการเส้นตรงตั้งฉากกับเส้นโค้ง P-Q เขียนออกมาได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$Q' - Q'_{cr} = -\frac{1}{g(P'_{cr})} (P' - P'_{cr}) \quad (4.36)$$

โดยที่ $g(P'_{cr})$ คือ สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเส้นโค้ง P-Q ภายหลังจากหมุนแกนแล้ว (หรือก็คือสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการที่ (4.27))

สมการเชิงอนุพันธ์ของเส้นโค้ง P-Q ณ จุด (P'_{cr}, Q'_{cr}) มีสมการดังนี้

$$g(P'_{cr}) = \frac{df(P'_{cr})}{dP'_{cr}} = -2kP'_{cr} \quad (4.37)$$

สมการเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด (P'_0, Q'_0) กับ (P'_{cr}, Q'_{cr}) มีสมการดังนี้

$$Q' - Q'_{cr} = \frac{Q'_0 - Q'_{cr}}{P'_0 - P'_{cr}} (P' - P'_{cr}) \quad (4.38)$$

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (4.36) (4.37) และ (4.38) จะได้ว่า

$$2kP'_{cr}(Q'_0 - Q'_0) = (P'_{cr} - P'_0) \quad (4.39)$$

แทนค่า Q'_R จากสมการ (4.26) ลงในสมการ (4.39) จะได้

$$2kP'_{cr}(-k(P'_{cr})^2 + \frac{1}{4k} - Q'_0) = (P'_{cr} - P'_0) \quad (4.40)$$

$$2k^2(P'_{cr})^3 - 0.5P'_{cr} + P'_{cr} + 2kQ'_0P'_{cr} - P'_0 = 0 \quad (4.41)$$

$$(P'_{cr})^3 + \left(\frac{Q'_0}{k} + \frac{1}{4k^2}\right)P'_{cr} - \frac{P'_0}{2k^2} = 0 \quad (4.42)$$

สมการ (4.42) เมื่อมอง P'_{cr} ให้อยู่ในรูปของ y' สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้ ดังนี้

$$(y')^3 + ay' + b = 0 \quad (4.43)$$

เมื่อ
$$a = \frac{Q'_0}{k} + \frac{1}{4k^2} \quad (4.44)$$

$$b = -\frac{P'_0}{2k^2} \quad (4.45)$$

สูตรสำหรับหาคำตอบเฉพาะค่าจริง [21] ของสมการ (4.43) มีรูปแบบดังนี้

$$y'_1 = A + B \quad (4.46)$$

เมื่อ
$$A = \sqrt[3]{-\frac{b}{2} + \sqrt{C}} \quad (4.47)$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{b}{2} - \sqrt{C}} \quad (4.48)$$

$$C = \left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (4.49)$$

จากสมการ (4.46) สามารถคำนวณค่า P'_{cr} ได้เท่ากับ $A+B$ ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า Q'_{cr} ได้จากสมการข้างล่างนี้

$$Q'_{cr} = -k(P'_{cr})^2 + \frac{0.25}{k} \quad (4.50)$$

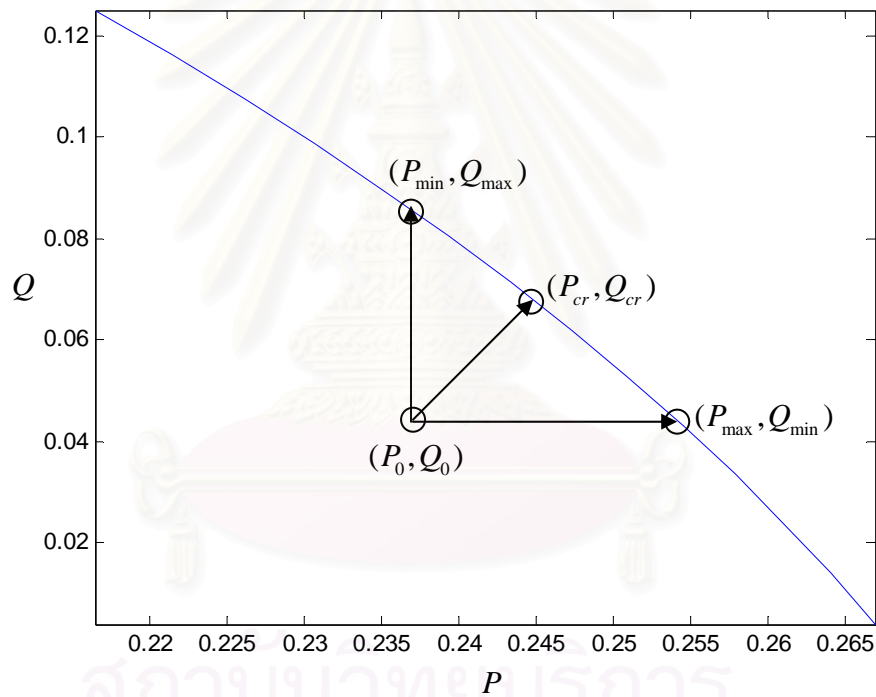
ระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลาย (d_{vc}) มีค่าเท่ากับ

$$d_{vc} = \sqrt{(P'_{cr} - P'_0)^2 + (Q'_{cr} - Q'_0)^2} \quad (4.51)$$

ถ้า $P'_0 = 0$ และ $Q'_0 = 0$ แล้วจะได้ $P'_{cr} = 0$ และ $Q'_{cr} = 0.25/k$ ดังนั้นค่าระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลาย มีค่ามากที่สุดเท่ากับ

$$d_{vc_max} = \sqrt{(0.25/k)^2} = 0.25/k \quad (4.52)$$

4.3 วิธีคำนวณกำลังจริงสูงสุดและกำลังรีแอกทีฟสูงสุดจากจุดทำงานเริ่มต้น



รูปที่ 4.4 กำลังไฟฟ้า ณ แรงดันพังทลาย 3 จุดบนเส้นโค้ง P-Q

จากรูปที่ 4.4 เราทราบค่าจุดทำงานเริ่มต้น (P_0 และ Q_0) ซึ่งเป็นค่ากำลังจริงน้อยสุด P_{min} และค่ากำลังรีแอกทีฟน้อยสุด Q_{min} ตามลำดับ ดังนี้

$$Q_{min} = Q_0 \quad (4.53)$$

$$P_{min} = P_0 \quad (4.54)$$

ส่วนค่ากำลังจริงสูงสุด P_{max} และค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุด Q_{max} สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีคำนวณกำลังรีแอกทีฟสูงสุด Q_{\max} จากสมการ (4.9) พิจารณาให้ Q_R เป็นตัวแปร และค่าที่เหลืออื่นๆ เป็นค่าคงที่ จัดพจน์สมการใหม่ได้ออกมาดังนี้

$$c_5 Q_R^2 + c_6 Q_R + c_7 = 0 \quad (4.55)$$

เมื่อ $c_5 = (c_3^2 - 4c_1c_4)$

$$c_6 = 2(c_2c_3P_R - c_3|V_S|^2)$$

$$c_7 = (c_2^2 - 4c_1c_4)P_R^2 - 2c_2|V_S|^2P_R + |V_S|^4$$

จากสูตรคำตอบพหุนามกำลังสอง ($ax^2 + bx + c = 0$) จะได้ว่า

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.56)$$

จากสมการ (4.55) และ (4.56) แทนค่า $Q_R = Q_{\max}$ และเลือกคำตอบที่มีค่ามากกว่าอีกค่าหนึ่ง ได้ออกมาเป็น

$$Q_{\max} = \frac{-c_6 + \sqrt{c_6^2 - 4c_5c_7}}{2c_5} \quad (4.57)$$

กรณีคำนวณกำลังจริงสูงสุด P_{\max} จากสมการ (4.9) พิจารณาให้ P_R เป็นตัวแปรและค่าที่เหลืออื่นๆ เป็นค่าคงที่ จัดพจน์สมการใหม่ได้ออกมาดังนี้

$$c_8 P_R^2 + c_9 P_R + c_{10} = 0 \quad (4.58)$$

เมื่อ $c_8 = (c_2^2 - 4c_1c_4)$

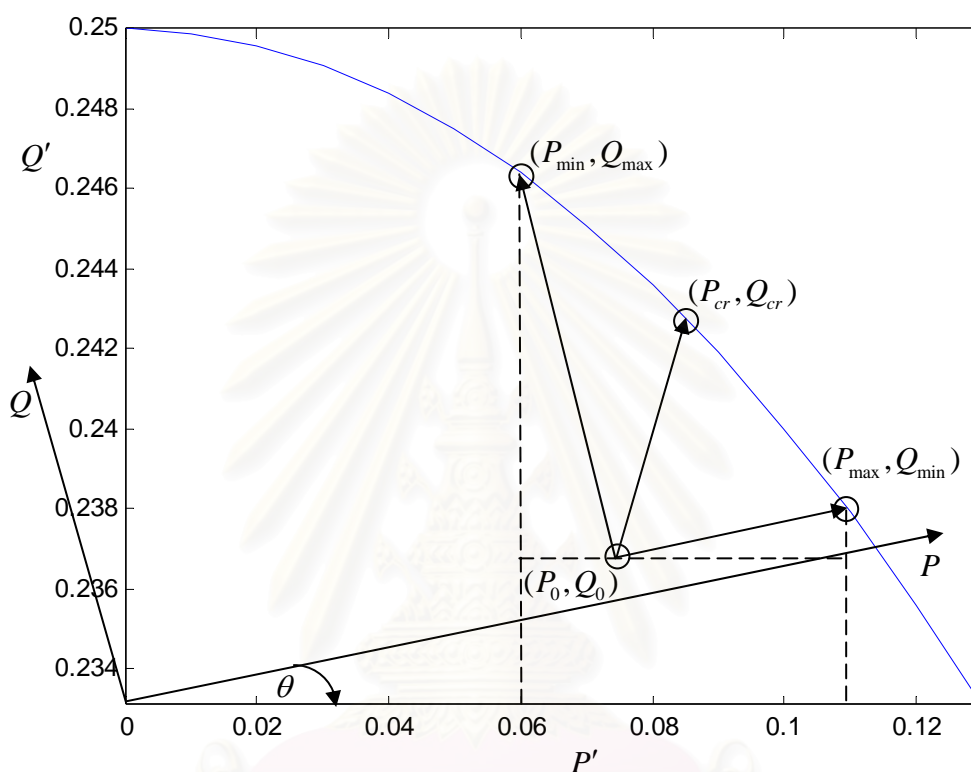
$$c_9 = 2(c_2c_3Q_R - c_2|V_S|^2)$$

$$c_{10} = (c_3^2 - 4c_1c_4)Q_R^2 - 2c_3|V_S|^2Q_R + |V_S|^4$$

คำนวณค่า P_{\max} เช่นเดียวกับการคำนวณ Q_{\max} ดังนั้นจะได้

$$P_{\max} = \frac{-c_9 + \sqrt{c_9^2 - 4c_8c_{10}}}{2c_8} \quad (4.59)$$

ถึงตอนนี้ทราบค่าจุดทำงาน 2 จุดบนเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งเรียบร้อยแล้ว ซึ่งก็คือ (Q_{\min}, P_{\max}) และ (Q_{\max}, P_{\min}) แต่ค่าที่คำนวณได้ยังคงอยู่บนแกนพิกัดปกติอยู่ ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนพิกัดให้เป็นค่าบนแกนพิกัดใหม่โดยการหมุนแกน ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การหมุนแกนของเส้นโค้ง P-Q จากแกน P-Q มายังแกน P'-Q'

โดยในตอนแรกได้กำหนดให้กำลังจริง (P) เป็นค่าบนแกน y และกำลังรีแอกทีฟ (Q) เป็นค่าบนแกน x ดังนั้นจึงใช้สมการ (4.32) สำหรับค่ากำลังรีแอกทีฟและใช้สมการ (4.33) สำหรับค่ากำลังจริง

สำหรับ (Q_{\min}, P_{\max}) แทนค่า $P = P_{\max}$ และ $Q = Q_{\min}$ ได้สมการออกมาดังนี้

$$Q'_{\min} = Q_{\min} \cos(\theta) + P_{\max} \sin(\theta) \quad (4.60)$$

$$P'_{\max} = -Q_{\min} \sin(\theta) + P_{\max} \cos(\theta) \quad (4.61)$$

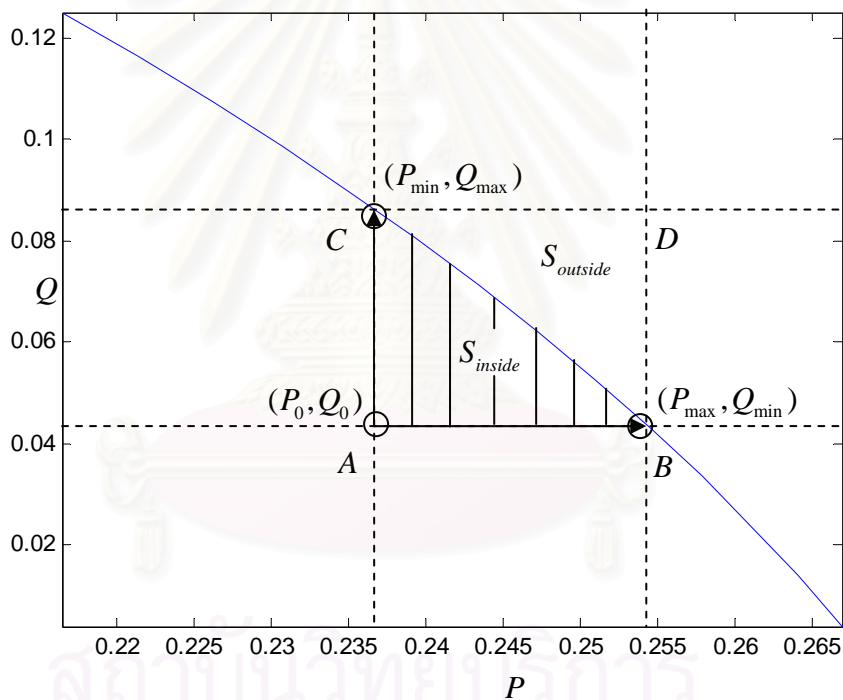
สำหรับ (Q_{max}, P_{min}) แทนค่า $P = P_{min}$ และ $Q = Q_{max}$ ได้สมการออกมาดังนี้

$$Q'_{max} = Q_{max} \cos(\theta) + P_{min} \sin(\theta) \tag{4.62}$$

$$P'_{min} = -Q_{max} \sin(\theta) + P_{min} \cos(\theta) \tag{4.63}$$

สุดท้ายก็ได้ทราบพิกัดจุดทำงาน 2 จุดบนแกนพิกัด P'-Q' อันได้แก่จุด (Q'_{min}, P'_{max}) และจุด (Q'_{max}, P'_{min}) ตามลำดับ

4.4 ความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันพังทลายในสายส่ง : p_{vc_br}



รูปที่ 4.6 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งซึ่งวาดอยู่บนแกนพิกัด P-Q

ให้ P และ Q เป็นค่าสุ่ม (Random variable) มีการกระจายสม่ำเสมอระหว่างค่ากำลังสูงสุดและต่ำสุดของทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟดังรูปที่ 4.6

$$P_{min} \leq P \leq P_{max} \tag{4.64}$$

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \tag{4.65}$$

สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันพังทลายในสายส่ง (Probability of the branch voltage collapse : p_{vc_br}) ได้จากนิยามความน่าจะเป็นทางเรขาคณิตดังสมการข้างล่าง

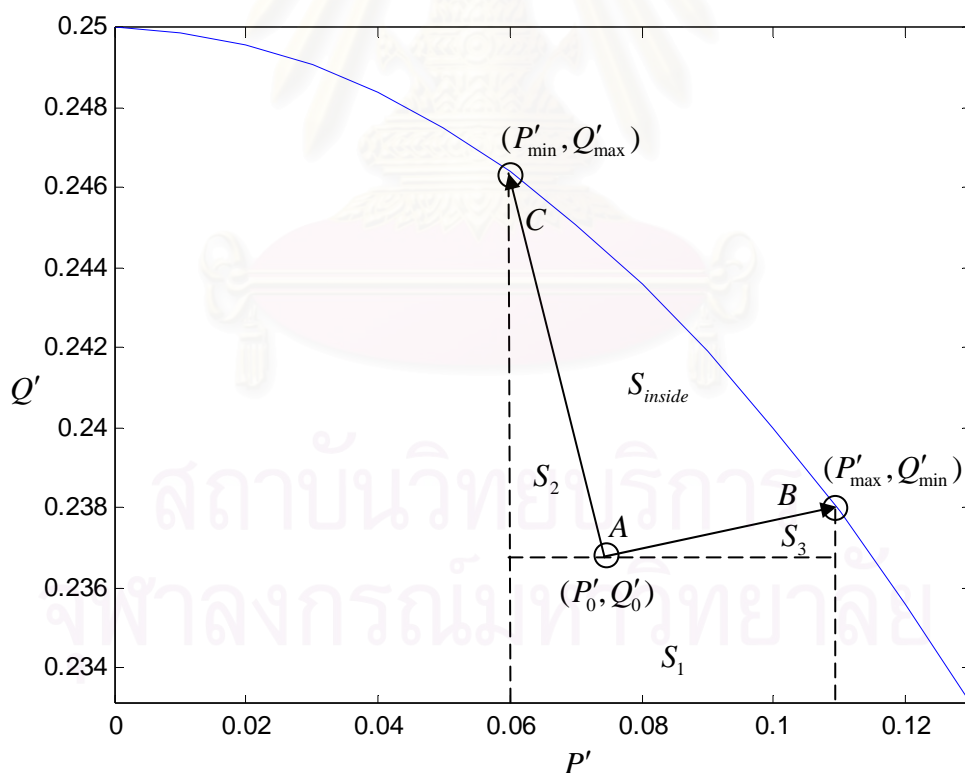
$$p_{vc_br} = S_{outside} / S = 1 - (S_{inside} / S) \quad (4.66)$$

เมื่อ S แทนพื้นที่ของสี่เหลี่ยม ABDC โดยที่

$$S = (P_{max} - P_{min})(Q_{max} - Q_{min}) \quad (4.67)$$

และ S_{inside} แทนพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง P-Q

คำตอบของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้เฉพาะภายในพื้นที่ ABC และไม่สามารถหาคำตอบได้สำหรับพื้นที่นอกเส้นโค้ง P-Q หรือก็คือภายใต้พื้นที่ BCD ซึ่งค่า S_{inside} สามารถคำนวณได้จากแกนพิกัด P'-Q' ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งซึ่งวาดอยู่บนแกนพิกัด P'-Q'

จากรูปที่ 4.7 และสมการ (4.26) สามารถคำนวณพื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q จาก P'_{\min} ไป P'_{\max} ได้โดยใช้สูตรปริพันธ์จำกัดเขต (Definite integral formula) ดังนี้

$$S_{total} = \int_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} \left[-k(P'_R)^2 + \frac{0.25}{k} \right] dP'_R \quad (4.68)$$

โดยที่ S_{total} แทนพื้นที่ใต้เส้นโค้งจาก P'_{\min} ไป P'_{\max}

ส่วนค่า S_{inside} สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned} S_{inside} &= S_{total} - S_1 - S_2 - S_3 \\ &= \int_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} \left[-k(P'_R)^2 + \frac{0.25}{k} \right] dP'_R - \int_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} (Q'_0) dP'_R \\ &\quad - \left[\frac{1}{2} (P'_0 - P'_{\min})(Q'_{\max} - Q'_0) \right] - \left[\frac{1}{2} (P'_{\max} - P'_0)(Q'_{\min} - Q'_0) \right] \\ &= \left[\frac{-k}{3} (P'_R)^3 + \frac{0.25}{k} P'_R \right]_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} - [Q'_0 P'_R]_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} \\ &\quad - \frac{1}{2} [(P'_0 - P'_{\min})(Q'_{\max} - Q'_0) + (P'_{\max} - P'_0)(Q'_{\min} - Q'_0)] \\ &= \frac{-k}{3} [(P'_{\max})^3 - (P'_{\min})^3] + \left[\frac{0.25}{k} - Q'_0 \right] [P'_{\max} - P'_{\min}] \\ &\quad - \frac{1}{2} [(P'_0 - P'_{\min})(Q'_{\max} - Q'_0) + (P'_{\max} - P'_0)(Q'_{\min} - Q'_0)] \end{aligned} \quad (4.69)$$

4.5 สรุปขั้นตอนการคำนวณตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมา

สำหรับกรณีที่ $c_3^2 < c_2^2$ หลักการพิสูจน์หาเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งยังคงเหมือนกับที่ทำมา ตั้งแต่ต้น เพียงกำหนดให้ค่า Q'_R เป็นค่าแกน y' และค่า P'_R เป็นค่าแกน x' ซึ่งตรงข้ามกับตอนแรก แสดงข้อแตกต่างระหว่างกรณี $c_3^2 \geq c_2^2$ และกรณี $c_3^2 < c_2^2$ โดยสังเขปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปขั้นตอนการคำนวณเส้นโค้ง P-Q ในสายส่ง

รายละเอียด	ค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับใช้วิเคราะห์แรงดันพังกภายในสายส่ง	
ขอบเขตพิจารณา	$c_1 \geq 0 \quad c_2 \geq 0 \quad c_3 \geq 0$ และ $c_4 \geq 0$	
กรณี	$c_3^2 \geq c_2^2$ หรือ $c_2 = 0$	$c_3^2 < c_2^2$ หรือ $c_3 = 0$
แกน x'	Q'_R	P'_R
แกน y'	P'_R	Q'_R
สมการจุดพิกัด หมุนแกน	$x' = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ $y' = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$	
สมการเส้นโค้ง P-Q	$Q'_R = -k(P'_R)^2 + \frac{0.25}{k}$	$P'_R = -k(Q'_R)^2 + \frac{0.25}{k}$
ค่าคงที่เส้นโค้ง P-Q	$k = \frac{\sqrt{c_1 c_4}}{ V_S ^2}$	
สมการกำลัง ไฟฟ้าปลายสาย	$\begin{pmatrix} P_0 \\ -Q_0 \end{pmatrix} = \frac{ V_R }{b_1^2 + b_2^2} \times \left\{ \begin{pmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix} V_S - \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_1 \end{pmatrix} V_R \right\} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$	
คำนวณ y'_{cr} จาก สมการ	$(P'_{cr})^3 + aP'_{cr} + b = 0$ โดยที่ $a = \frac{Q'_0}{k} + \frac{1}{4k^2}$ และ $b = -\frac{P'_0}{2k^2}$	$(Q'_{cr})^3 + aQ'_{cr} + b = 0$ โดยที่ $a = \frac{P'_0}{k} + \frac{1}{4k^2}$ และ $b = -\frac{Q'_0}{2k^2}$
คำนวณ x'_{cr} จาก สมการ	$Q'_{cr} = -k(P'_{cr})^2 + \frac{0.25}{k}$	$P'_{cr} = -k(Q'_{cr})^2 + \frac{0.25}{k}$
ระยะทางที่สั้น ที่สุด	$d_{vc} = \sqrt{(P'_{cr} - P'_0)^2 + (Q'_{cr} - Q'_0)^2}$	
คำนวณ Q_{max}	$Q_{max} = \frac{-c_6 + \sqrt{c_6^2 - 4c_5 c_7}}{2c_5}$	โดยที่ $c_5 = (c_3^2 - 4c_1 c_4)$, $c_6 = 2(c_2 c_3 P'_R - c_3 V_S ^2)$ และ $c_7 = (c_2^2 - 4c_1 c_4) P_R^2 - 2c_2 V_S ^2 P_R + V_S ^4$
คำนวณ P_{max}	$P_{max} = \frac{-c_9 + \sqrt{c_9^2 - 4c_8 c_{10}}}{2c_8}$	โดยที่ $c_8 = (c_2^2 - 4c_1 c_4)$, $c_9 = 2(c_2 c_3 Q'_R - c_2 V_S ^2)$ และ $c_{10} = (c_3^2 - 4c_1 c_4) Q_R^2 - 2c_3 V_S ^2 Q_R + V_S ^4$
พื้นที่ฐาน	$S = (P_{max} - P_{min})(Q_{max} - Q_{min})$	
พื้นที่ใต้ เส้นโค้ง P-Q	$S_{inside} = \frac{-k}{3} [(y'_{max})^3 - (y'_{min})^3] + [\frac{0.25}{k} - x'_0] [y'_{max} - y'_{min}]$ $- \frac{1}{2} [(y'_0 - y'_{min})(x'_{max} - x'_0) + (y'_{max} - y'_0)(x'_{min} - x'_0)]$	
ค่าความน่าจะเป็น ในสายส่ง	$p_{vc-br} = 1 - \frac{S_{inside}}{S}$	

4.6 ขั้นตอนระบุสายส่งอ่อนแอโดยใช้เส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง

เราสามารถระบุความอ่อนแอของสายส่งตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (Line voltage collapse coefficient : c_{vc_br}) ได้ตามสมการข้างล่าง โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งยังมีค่าน้อย สายส่งก็ยิ่งมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายมากตาม

$$c_{vc_br} = d_{vc} \times p_{area_br} \times p_{bus} \quad (4.70)$$

โดยที่ d_{vc} คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังจุดแรงดันพังทลายในสายส่ง
 p_{area_br} คือ ความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง
 โดยที่ $p_{area_br} = 1 - p_{vc_br}$
 p_{bus} คือ ความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง โดยค่า p_{bus} มีค่าอยู่ 2 ค่าคือ 0.5 สำหรับบัสอ่อนแอและ 1.0 สำหรับบัสแข็งแรง

ส่วนค่าขีดเริ่ม (Threshold value) ของ c_{vc_br} สามารถประเมินจากสายส่งที่ละเลยค่าซัสเซปแทนซ์ย่อย (Branch susceptance) [17] มีอิมพีแดนซ์สายส่งเท่ากับอิมพีแดนซ์ฐาน (Base impedance) และขนาดแรงดันต้นสาย ($|V_S|$) เท่ากับแรงดันฐาน (Base voltage) ดังนั้น $B_C = 0 \text{ p.u.}$ $\sqrt{R^2 + X_L^2} = 1 \text{ p.u.}$ และ $|V_S| = 1 \text{ p.u.}$ ตามลำดับ จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะได้ $k = 1$ ซึ่งทำให้ $d_{vc_max} = 0.25 \text{ p.u.}$ พร้อมทั้งกำหนดให้ $p_{area_br} = 0.5$ และ $p_{bus} = 1.0$ สุดท้ายคำนวณค่าขีดเริ่ม : c_{vc_cr} ได้ตามสมการข้างล่าง

$$c_{vc_cr} = d_{vc_max} \times p_{area_br} \times p_{bus} = 0.25 \times 0.5 \times 1.0 = 0.125 \quad (4.71)$$

ดังนั้นค่า c_{vc_br} ของสายส่งเส้นไหนต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.125 สายส่งเส้นนั้นเป็นสายส่งอ่อนแอ ส่วนค่า c_{vc_br} ของสายส่งเส้นไหนมากกว่า 0.125 ก็เป็นสายส่งแข็งแรง

บทที่ 5

การคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

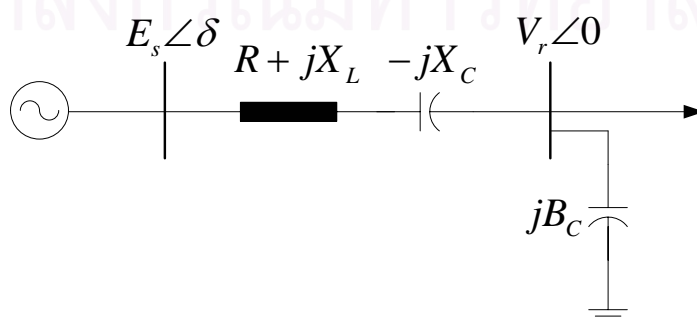
เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังเกิดปัญหาสถานะแรงดันพังทลายขึ้น ทางป้องกันทางหนึ่งก็คือการติดตั้งตัวเก็บประจุ ณ บัสหรือสายส่ง การติดตั้งตัวเก็บแบบขนานที่บัส เป็นการช่วยลดภาระการจ่ายกำลังรีแอกทีฟจากระบบไปยังบัสที่ติดตั้งตัวเก็บประจุอยู่ ส่วนการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง เป็นการช่วยเพิ่มศักยภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในสายส่งให้ดีขึ้น ซึ่งทำให้ระบบลดความตึงเครียดลง หลักพิจารณาติดตั้งตัวเก็บประจุมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ

- 1) ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ
- 2) ขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

ตัวเก็บประจุจะถูกติดตั้ง ณ บัสและสายส่ง เรียงตามลำดับความเสี่ยงการเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลาย ซึ่งคำนวณได้จากวิธีที่นำเสนอไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ ส่วนขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ยึดหลักติดตั้งขนาดที่ทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลาย มีขนาดมากที่สุด โดยใช้วิธีที่นำเสนอในบทนี้

5.1 วิธีคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สำหรับติดตั้งที่บัสหรือสายส่ง [11, 12]

ลำดับความเสี่ยงของบัสและสายส่งที่คำนวณได้ ทำให้ทราบถึงตำแหน่งของบัสและสายส่ง ที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ มากน้อยแตกต่างกันไปตามลำดับความเสี่ยง โดยบัสหรือสายส่งเส้นไหนมีลำดับความเสี่ยงอยู่ลำดับต้นๆ ก็ย่อมมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ มากกว่าพวกบัสหรือสายส่งที่อยู่ลำดับท้ายๆ ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุกับขนาดตัวเก็บประจุ ที่มีผลต่อการเพิ่มระยะทางที่สั้นที่สุด



รูป 5.1 ระบบสองบัส เชื่อมต่อกันด้วยสายส่งแบบสั้น

ตัวอย่างระบบสองบัส ในรูปที่ 5.1 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ด้านต้นสายและโหลดต่ออยู่ด้านปลายสายโดยเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งแบบสั้น (Short transmission line) แสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่งและแบบขนานเข้าที่บัสทางด้านปลายสาย สามารถเขียนสมการปัญหาหาค่าเหมาะสม (Optimization problem) ได้ดังสมการ (5.1)

$$\min_{z \in \mathbb{R}^n} -\frac{1}{2} |\rho_{load} - \rho_{load,0}|^2 \quad (5.1)$$

$$\text{subject to } f(z) = 0 \quad (5.2)$$

$$(w f_x)^T = 0 \quad (5.3)$$

$$(w f_\rho)^T - (\rho_{load} - \rho_{load,0}) = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{2} (|\rho_{load,0}|^2 - |\rho_{load}|^2) \leq 0 \quad (5.5)$$

$$\text{เมื่อ } z = [x, \rho, \rho_{add}, k]^T, \quad k = B_C \text{ หรือ } X_C,$$

$$x = [\delta_{gen}, \delta_{load}, |V_{load}|]^T,$$

$$\rho = \rho_{load}, \quad \rho_{add} = [\rho_{ref}, Q_{gen}]$$

โดยที่	z	คือ	ตัวแปรสถานะ ซึ่งมีสมาชิกเป็น x ρ ρ_{add} และ k
	x	คือ	เซตที่มีสมาชิกเป็นมุมของเจนเนเรเตอร์บัส (δ_{gen}) กับ โหลดบัส (δ_{load}) และขนาดแรงดันของโหลดบัส ($ V_{load} $)
	ρ	คือ	กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดบัส (ρ_{load})
	ρ_{add}	คือ	กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของบัสอ้างอิง (ρ_{ref}) และกำลังรีแอกทีฟของเจนเนเรเตอร์บัส (Q_{gen})
	$\rho_{load,0}$	คือ	กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดบัส ณ จุดทำงานเริ่มต้น
	k	คือ	ขนาดตัวเก็บประจุ (per unit :ต่อหน่วย) ซึ่งถูกต่อเพิ่มแบบขนานเข้าที่บัส (B_C) หรือแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง (X_C)
	$f(z)$	คือ	สมการกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว (Steady state)
	f_x	คือ	จาโคเบียนเมทริกซ์เทียบค่า x
	f_ρ	คือ	จาโคเบียนเมทริกซ์เทียบค่า ρ
	w	คือ	เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะซ้าย (Left eigenvector) สำหรับค่าลักษณะเฉพาะศูนย์ (Zero eigenvalue) ของ f_x

สมการ (5.1) เป็นสมการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization equation) ใช้สำหรับคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่กำหนดให้ เช่น การติดตั้งแบบขนานที่บัส และการติดตั้งแบบอนุกรมที่สายส่ง เป็นต้น ซึ่งได้นำเงื่อนไขจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายมาเป็นสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ได้แก่ สมการ (5.2) และ (5.3) สำหรับสมการ (5.4) เป็นสมการเงื่อนไขบังคับที่ใช้กำหนดให้คำตอบที่หาได้เป็นจุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ส่วนสมการเงื่อนไขบังคับ (5.5) ถูกนำมาใช้กำหนดค่าขอบกำลังไฟฟ้าต่ำสุดของโหลดบัสที่พิจารณา ทั้งนี้เพื่อไม่ให้กำลังไฟฟ้ารวมของโหลดทั้งระบบต่ำกว่าค่ากำลังโหลด ณ จุดทำงานเริ่มต้น สำหรับวิธีคำนวณในหัวข้อนี้ ขนาดแรงดันและมุมแรงดันของบัสอ้างอิง ขนาดแรงดันและกำลังจริงของเจเนอเรเตอร์บัส เป็นค่าคงที่ทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า ณ จุดทำงานเริ่มต้น ส่วนค่ากำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดัน และมุมแรงดันค่าอื่น ๆ ให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้

5.2 วิธีวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายที่นำเสนอ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีวิเคราะห์สถานะแรงดันพังทลายจากเส้นโค้ง P-Q เนื่องจากสามารถพิจารณาได้ทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับได้โดยไม่เสถียรภาพแรงดัน โดยมีสมมติฐานคือ

- 1) พิจารณาให้จุดทำงานเริ่มต้น (Initiate operating point) อยู่ใกล้กับสถานะที่จะเกิดแรงดันพังทลาย
- 2) พิจารณาเฉพาะปัญหาเสถียรภาพอันมีสาเหตุมาจากสถานะแรงดันพังทลายเท่านั้น โดยละเลยปัญหาทางด้านอื่น ๆ เช่น ความทนทานของสายส่งต่อความร้อน (Thermal limit) ขอบเขตระดับแรงดันต่ำสุดและสูงสุด ณ บัส (Voltage limit) เป็นต้น
- 3) พิจารณาให้ปัญหาแรงดันพังทลายมีสาเหตุมาจาก Saddle-node bifurcation เท่านั้น โดยละเลยสาเหตุจาก Bifurcation แบบอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น Hopf bifurcation และ Chaotic blue sky bifurcation

จากสมมติฐานข้างต้น จะได้ว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้า พิจารณาเฉพาะระบบที่ใกล้เกิดสถานะแรงดันพังทลายขึ้น และวิเคราะห์เฉพาะปัญหาอันมีสาเหตุเนื่องจาก Saddle-node bifurcation เท่านั้น

การเกิดสภาวะแรงดันพียงหลายสำหรับสถานะอยู่ตัว (Steady state) ปกติมีสาเหตุมาจากกำลังไฟฟ้าที่ส่งถ่ายในระบบไฟฟ้าไปยังโหลดไม่เพียงพอ ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้สองมุมมอง มุมมองแรกที่บัส เมื่อโหลดบัสดึงกำลังไฟฟ้าออกจากระบบมากเกินไปที่ระบบโดยรวมจะจัดการให้ได้ หรือบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบมากจนกระทั่งแต่ละค่าสูงสุดที่สามารถจ่ายได้ ส่วนมุมมองที่สองคือที่สายส่ง มีกำลังไฟฟ้าปริมาณมากต้องการไหลผ่านจากต้นสายไปยังอีกด้านหนึ่งที่ปลายสาย แต่ด้วยสมรรถภาพของสายส่งเองก็ไม่สามารถยอมให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าขนาดนั้นไหลผ่านได้ สุดท้ายผลลัพธ์ของทั้งสองมุมมองก็คือเกิดแรงดันพียงหลายขึ้นในระบบ

เพื่อที่จะระบุได้ว่าบัสไหนหรือสายส่งเส้นไหนมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพียงหลายขึ้นในระบบ จึงได้นำหลักการเส้นโค้ง P-Q มาวิเคราะห์บัสอ่อนแอและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของสายส่ง ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ เมื่อทราบตำแหน่งหรือบริเวณภายในระบบที่อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะแรงดันพียงหลายขึ้น การติดตั้งตัวเก็บประจุขนาดเหมาะสมเข้าไป ณ บริเวณนั้นก็เป็วิธีแก้ไขทางหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการเกิดสภาวะแรงดันพียงหลายในระบบได้ ดังที่แสดงในบทที่ 5 เนื่องจากตัวเก็บประจุจะไปชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่ต้องส่งถ่ายไปยังบัสหรือเพิ่มศักยภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ส่งผลให้ค่าขีดจำกัดกำลังจริงสูงสุดที่สามารถส่งถ่ายได้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งย่อมาหมายความว่าสามารถในการส่งถ่ายกำลังจริงที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

วิธีวิเคราะห์สภาวะแรงดันพียงหลายโดยอาศัยเส้นโค้ง P-Q สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : เก็บข้อมูลของระบบไฟฟ้า เช่น ค่าพารามิเตอร์ของบัสและสายส่ง

ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ทราบจุดทำงานเริ่มต้นของระบบ

ขั้นตอนที่ 3 : วิเคราะห์หาบัสอ่อนแอ

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณสัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของสายส่ง

ขั้นตอนที่ 5 : พิจารณาว่ามีสายส่งอ่อนแออยู่ในระบบหรือไม่

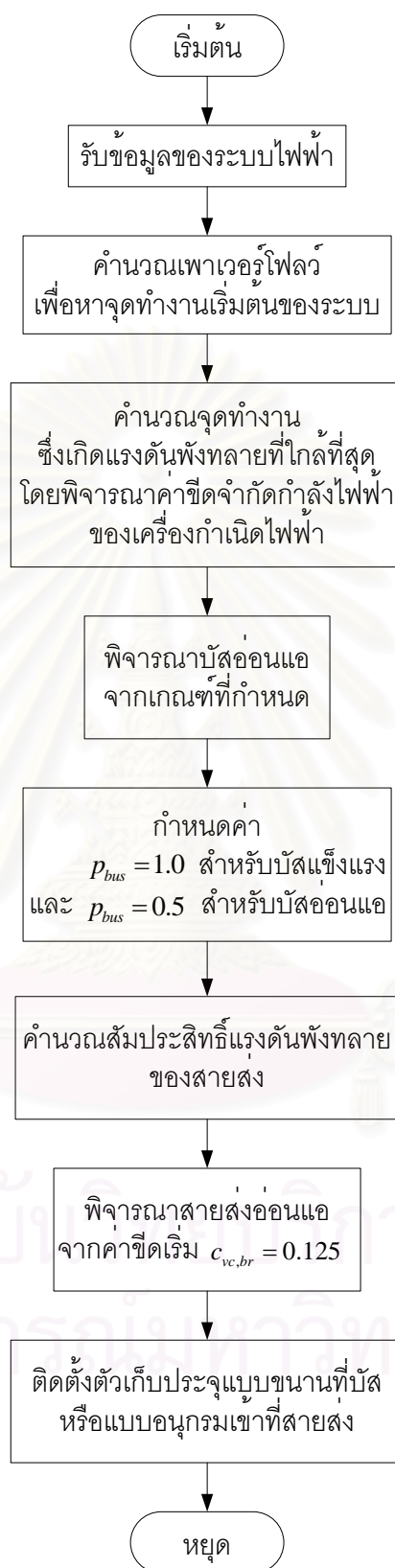
ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมซึ่งจะถูกติดตั้งที่บัสหรือสายส่ง

โดยใช้ค่าขีดเริ่ม (Threshold value) เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าโหลดบัสหรือสายส่งไหนควรจัดว่าอ่อนแอ โหลดบัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.20 บัสนั้นให้จัดว่าเป็นบัสอ่อนแอ เช่นเดียวกันสายส่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.125 สายส่งเส้นนั้นก็ให้จัดว่าเป็นสายส่งอ่อนแอด้วยเช่นกัน ซึ่งเหตุผลในการเลือกค่าขีดเริ่มสำหรับบัสและสายส่งให้มีค่าเท่านี้ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ

การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายโดยใช้เส้นโค้ง P-Q สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 5.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์สถานะพังทลายโดยใช้เส้นโค้ง P-Q

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยตอนต้นของบทจะเป็นการแสดงผลการทดสอบหาบัสอ่อนแอและสายส่งอ่อนแอ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสและสายส่งในระบบทดสอบ ระบบทดสอบที่นำมาใช้คือ ระบบ 9 บัส และระบบ 14 บัส ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาแนวโน้มของบัสและสายส่งที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายขึ้นในระบบ นอกจากนั้นยังศึกษาดำเน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสและสายส่งซึ่งทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลาย มีค่ามากที่สุด

เนื่องจากขั้นตอนการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบทดสอบมีหลายขั้นตอน ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ง่าย จึงแยกทดสอบระบบทดสอบ 9 บัสและ 14 บัสออกทีละระบบ โดยการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายประกอบด้วย 6 ขั้นตอนด้วยกัน ดังนี้

- 1) การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น
- 2) การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด
- 3) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส
- 4) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง
- 5) การคำนวณการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส
- 6) การคำนวณการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง

โดยผลทดสอบสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบทั้ง 6 ขั้นตอน คือ ตำแหน่งบัสอ่อนแอ ตำแหน่งสายส่งอ่อนแอ และผลจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสหรือสายส่ง ซึ่งในตอนท้ายจะได้แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบ 9 บัสและ 14 บัสร่วมกัน

หัวข้อการนำเสนอในบทนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

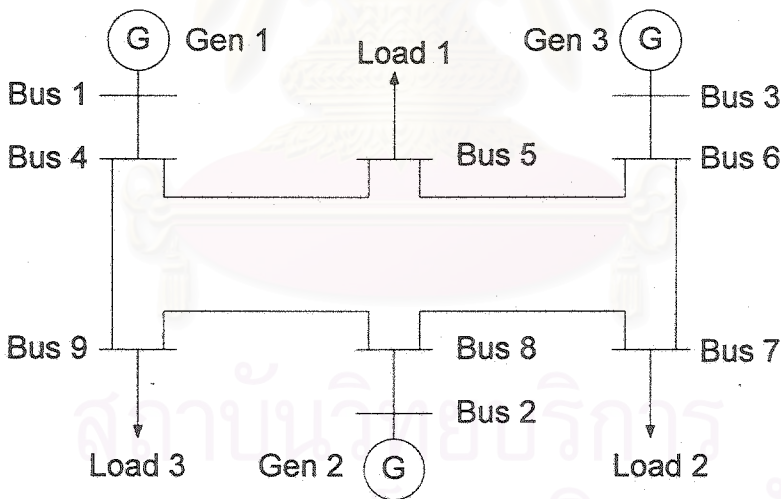
6.1 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบ 9 บัส

6.2 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบ 14 บัส

6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างระบบ 9 บัสและ 14 บัส

6.1 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในระบบ 9 บัส

ระบบทดสอบที่ใช้เป็นระบบ 9 บัส ซึ่งประกอบไปด้วย บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 บัส บัสที่มีโหลด 3 บัส และสายส่งจำนวน 9 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยข้อมูลของบัส ข้อมูลของระบบสายส่ง และข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นข้อมูลที่ได้จากระบบทดสอบเดิมดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น ดังแสดงในหัวข้อ 6.1.1



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบขนาด 9 บัส

6.1.1 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น

ตารางที่ 6.1 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้นสำหรับระบบ 9 บัส

ข้อมูลบัส							
หมายเลข บัส	ประเภท บัส	แรงดัน		เครื่องกำเนิดไฟฟ้า		โหลด	
		ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	บัสอ้างอิง	1.0000	0	71.95	24.07	-	-
2	บัสแรงดัน	1.0000	9.6687	163.00	14.46	-	-
3	บัสแรงดัน	1.0000	4.7711	85.00	-3.65	-	-
4	โหลดบัส	0.9870	-2.4066	-	-	-	-
5	โหลดบัส	0.9755	-4.0173	-	-	90.00	30.00
6	โหลดบัส	1.0034	1.9256	-	-	-	-
7	โหลดบัส	0.9856	0.6215	-	-	100.00	35.00
8	โหลดบัส	0.9962	3.7991	-	-	-	-
9	โหลดบัส	0.9576	-4.3499	-	-	125.00	50.00
รวม				319.95	34.88	315.00	115.00

จากตารางที่ 6.1 กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวมีค่าอยู่ภายในขอบเขตของค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า ส่วนขนาดแรงดัน มุมของแรงดัน และกำลังไฟฟ้า จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดและสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.1.2 และ 6.1.4 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.2 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด

1) กรณีละเลยค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.2 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 9 บัส โดย
ละเลยการพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลบัส							
หมายเลข บัส	ประเภท บัส	แรงดัน		เครื่องกำเนิดไฟฟ้า		โหลด	
		ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	บัสอ้างอิง	1.0000	0	277.61	375.82	-	-
2	บัสแรงดัน	1.0000	-10.1110	163.00	141.77	-	-
3	บัสแรงดัน	1.0000	-17.8092	85.00	188.76	-	-
4	โหลดบัส	0.7997	-11.5348	-	-	-	-
5	โหลดบัส	0.5314	-26.8053	-	-	193.28	218.86
6	โหลดบัส	0.8908	-21.0149	-	-	-	-
7	โหลดบัส	0.8751	-22.1666	-	-	130.96	57.28
8	โหลดบัส	0.9171	-16.4892	-	-	-	-
9	โหลดบัส	0.7507	-20.5394	-	-	156.73	102.71
รวม				525.61	706.35	480.97	378.85

จากตารางที่ 6.2 ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจ่ายทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเกินกว่าค่าขีดจำกัด จึงต้องทำการคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดใหม่ ด้วยวิธีที่นำค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ามาร่วมพิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 6.3

2) กรณีพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.3 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังกหลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 9 บัส เมื่อพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลบัส							
หมายเลขบัส	ประเภทบัส	แรงดัน		เครื่องกำเนิดไฟฟ้า		โหลด	
		ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	บัสอ้างอิง	0.9302	0	250.00	300.00	-	-
2	บัสแรงดัน	1.0390	-8.3914	171.85	199.20	-	-
3	บัสแรงดัน	1.0524	-16.9965	87.16	254.92	-	-
4	โหลดบัส	0.7603	-11.7476	-	-	-	-
5	โหลดบัส	0.5219	-27.4196	-	-	193.67	205.20
6	โหลดบัส	0.9118	-20.0474	-	-	-	-
7	โหลดบัส	0.8589	-20.1507	-	-	116.57	118.55
8	โหลดบัส	0.9250	-14.8082	-	-	-	-
9	โหลดบัส	0.7298	-20.2544	-	-	152.30	96.14
รวม				509.01	754.12	462.54	419.89

จากตารางที่ 6.3 ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังกหลายที่ใกล้ที่สุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตของค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นเลือกใช้จุดทำงานในตารางนี้สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์แรงดันพังกหลายของบัส (k_{cr})

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส

ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส สำหรับระบบ 9 บัส

บัส	ประเภทบัส	จุดทำงาน				สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส	
		เริ่มต้น		เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด		k_{cr}	p_{bus}
		P_0 (MW)	Q_0 (MVar)	P_{cr} (MW)	Q_{cr} (MVar)		
1	บัสอ้างอิง	71.95	24.07	250.00	300.00	-	0.5
2	บัสแรงดัน	163.00	14.46	171.85	199.20	-	1.0
3	บัสแรงดัน	85.00	-3.65	87.16	254.92	-	1.0
4	โหลดบัส	-	-	-	-	-	1.0
5	โหลดบัส	-90.00	-30.00	-193.67	-205.20	0.7215	1.0
6	โหลดบัส	-	-	-	-	-	1.0
7	โหลดบัส	-100.00	-35.00	-116.57	-118.55	0.5123	1.0
8	โหลดบัส	-	-	-	-	-	1.0
9	โหลดบัส	-125.00	-50.00	-152.30	-96.14	0.2977	1.0

จากตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส (k_{cr}) ที่คำนวณได้ ไม่มีค่าไหนเลยที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.20 ดังนั้นความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่ก้ำกึ่งจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง (p_{bus}) สำหรับบัสที่มีโหลดต่ออยู่จึงเท่ากับ 1.0 ส่วนบัสอ้างอิงมี p_{bus} เท่ากับ 0.5 เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่จ่ายกำลังไฟฟ้าและค่าขีดจำกัด แสดงการเรียงลำดับโหลดบัสตามค่า k_{cr} (จากน้อยไปมาก) ได้ดังในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 จัดลำดับความเสี่ยงบัส (เฉพาะโหลดบัส) สำหรับระบบ 9 บัส

ลำดับความเสี่ยง	หมายเลขบัส	k_{cr}	p_{bus}
1	9	0.2977	1.0
2	7	0.5123	1.0
3	5	0.7215	1.0

จากตารางที่ 6.5 เรียงลำดับความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันพังทลายจากบนลงล่าง โดยเรียงจากค่าน้อยไปค่ามาก ซึ่งบัสที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าบัสที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นบัสที่ 9 จึงมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าบัสที่ 7 และบัสที่ 5 เรียงตามลำดับ

6.1.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง

เริ่มต้นวิเคราะห์สายส่งทีละเส้นว่าด้านไหนของสายส่งควรเป็นต้นสายและปลายสาย เสร็จแล้วจึงคำนวณกำลังไฟฟ้า ณ ปลายสายส่ง พร้อมคำนวณมุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q ตามตารางที่ 6.6 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ

เมื่อทราบข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดจากตารางที่ 6.6 6.7 และ 6.8 แล้ว ทำการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง และคำนวณความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง ตามตารางที่ 6.9 และ 6.10 ในตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง พร้อมทั้งจัดลำดับความเสี่ยงของสายส่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.11 และ 6.12

1) พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย

ตารางที่ 6.6 พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย สำหรับระบบ 9 บัส

ข้อมูลสายส่ง								
หมายเลขสายส่ง	จากบัส (From bus)	ถึงบัส (To bus)	แรงดัน ณ From bus		แรงดัน ณ To bus		หมายเลขบัส	
			ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ต้นสาย	ปลายสาย
1	1	4	1.0000	0	0.9870	-2.4066	1	4
2	4	5	0.9870	-2.4066	0.9755	-4.0173	4	5
3	5	6	0.9755	-4.0173	1.0034	1.9256	6	5
4	3	6	1.0000	4.7711	1.0034	1.9256	3	6
5	6	7	1.0034	1.9256	0.9856	0.6215	6	7
6	7	8	0.9856	0.6215	0.9962	3.7991	8	7
7	8	2	0.9962	3.7991	1.0000	9.6687	2	8
8	8	9	0.9962	3.7991	0.9576	-4.3499	8	9
9	9	4	0.9576	-4.3499	0.9870	-2.4066	4	9

2) จำนวนกำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย

ตารางที่ 6.7 กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย สำหรับระบบ 9 บัส

หมายเลขสายส่ง	หมายเลขบัส		แรงดัน ณ ต้นสาย		แรงดัน ณ ปลายสาย		กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย	
	ต้นสาย	ปลายสาย	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	1	4	1.0000	0	0.9870	-2.4066	71.96	20.75
2	4	5	0.9870	-2.4066	0.9755	-4.0173	30.56	13.69
3	6	5	1.0034	1.9256	0.9755	-4.0173	59.45	16.31
4	3	6	1.0000	4.7711	1.0034	1.9256	85.00	-7.89
5	6	7	1.0034	1.9256	0.9856	0.6215	24.01	24.40
6	8	7	0.9962	3.7991	0.9856	0.6215	75.99	10.60
7	2	8	1.0000	9.6687	0.9962	3.7991	163.00	-2.28
8	8	9	0.9962	3.7991	0.9576	-4.3499	84.04	14.28
9	4	9	0.9870	-2.4066	0.9576	-4.3499	40.96	35.72

3) จำนวนมุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q

ตารางที่ 6.8 ค่ามุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบ 9 บัส

ข้อมูลสายส่ง									
สายส่ง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง				มุมแกน		ค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q		
	c_1	c_2	c_3	c_4	$\frac{2c_2c_3}{c_3^2 - c_2^2}$	มุม θ (deg)*	$\sqrt{c_1c_4}$	$ V_s ^2$	k^{**}
1	1.0000	0	0.1152	0.0033	0	0	0.0576	1.0000	0.0576
2	0.9855	0.0340	0.1826	0.0088	0.3857	10.5470	0.0929	0.9742	0.0953
3	0.9401	0.0780	0.3291	0.0304	0.5022	13.3330	0.1691	1.0068	0.1680
4	1.0000	0	0.1172	0.0034	0	0	0.0586	1.0000	0.0586
5	0.9791	0.0238	0.1995	0.0103	0.2421	6.8049	0.1004	1.0068	0.0998
6	0.9893	0.0170	0.1432	0.0053	0.2408	6.7694	0.0721	0.9924	0.0727
7	1.0000	0	0.1250	0.0039	0	0	0.0625	1.0000	0.0625
8	0.9514	0.0640	0.3138	0.0269	0.4257	11.5290	0.1601	0.9924	0.1613
9	0.9851	0.0200	0.1687	0.0073	0.2405	6.7606	0.0849	0.9742	0.0872

*โดยที่ $2\theta = \arctan\left(\frac{2c_2c_3}{c_3^2 - c_2^2}\right)$ และ** $k = \sqrt{c_1c_4} / |V_s|^2$

4) คำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง

ตารางที่ 6.9 ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส

ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q								
หมายเลขสายส่ง	มุมแกน		กำลังไฟฟ้าในสายส่ง ภายหลังการหมุนแกน				ระยะทาง : d_{vc} (p.u.)	
	มุม θ (deg)	k	ณ จุดทำงานเริ่มต้น		ณ จุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด			
			กำลังจริง : P'_0 (MW)	รีแอกทีฟ : Q'_0 (MVar)	กำลังจริง : P'_{cr} (MW)	รีแอกทีฟ : Q'_{cr} (MVar)		
1	0	0.0576	71.96	20.75	134.28	423.64	4.0768	
2	10.5470	0.0953	27.53	19.05	50.89	259.75	2.4183	
3	13.3330	0.1680	54.08	29.58	84.54	136.82	1.1148	
4	0	0.0586	85.00	-7.89	166.72	410.33	4.2613	
5	6.8049	0.0998	20.95	27.07	37.62	249.20	2.2275	
6	6.7694	0.0727	74.21	19.48	135.49	330.71	3.1720	
7	0	0.0625	163.00	-2.28	289.67	347.56	3.7206	
8	11.5290	0.1613	79.49	30.79	118.26	132.39	1.0875	
9	6.7606	0.0872	36.47	40.29	63.28	283.21	2.4440	

5) คำนวณความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง

ตารางที่ 6.10 ความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส

สายส่ง	เส้นโค้ง P-Q		กำลังไฟฟ้าในสายส่ง				พื้นที่		P_{area_br}
	θ (deg)	k	P'_{min} (MW)	Q'_{min} (MVar)	P'_{max} (MW)	Q'_{max} (MVar)	S_{inside} (p.u. ²)	S_{total} (p.u. ²)	
1	0	0.0576	71.96	20.75	847.05	431.05	20.37	31.80	0.6406
2	10.5470	0.0953	-17.69	92.48	421.95	261.92	6.31	9.91	0.6362
3	13.3330	0.1680	26.09	68.57	218.59	147.69	1.23	2.05	0.5973
4	0	0.0586	85.00	-7.89	861.10	422.39	21.26	33.39	0.6367
5	6.8049	0.0998	-5.72	74.69	419.95	250.58	5.80	9.04	0.6418
6	6.7694	0.0727	35.80	81.96	600.57	343.12	10.82	17.28	0.6263
7	0	0.0625	163.00	-2.28	802.27	383.39	15.05	24.66	0.6104
8	11.5290	0.1613	55.16	63.22	238.46	150.05	1.15	1.97	0.5839
9	6.7606	0.0872	7.27	91.99	472.55	286.66	6.91	10.90	0.6344

6) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง

ตารางที่ 6.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส

สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดแรงดันยกกำลังสอง		ผลต่างมุม δ (deg)	เส้นโค้ง P-Q		สัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง			
	ต้นสาย	ปลายสาย	ณ ต้นสาย	ณ ปลายสาย		θ (deg)	k	P_{bus}	d_{vc}	P_{area_br}	C_{vc_br}
			$ V_S ^2$ (p.u.)	$ V_R ^2$ (p.u.)							
1	1	4	1.0000	0.9742	2.4066	0	0.0576	1.0	4.0768	0.6406	2.6115
2	4	5	0.9742	0.9516	1.6106	10.5470	0.0953	1.0	2.4183	0.6362	1.5386
3	6	5	1.0068	0.9516	5.9429	13.3330	0.1680	1.0	1.1148	0.5973	0.6660
4	3	6	1.0000	1.0068	2.8455	0	0.0586	1.0	4.2613	0.6367	2.7133
5	6	7	1.0068	0.9715	1.3041	6.8049	0.0998	1.0	2.2275	0.6418	1.4296
6	8	7	0.9924	0.9715	3.1776	6.7694	0.0727	1.0	3.1720	0.6263	1.9866
7	2	8	1.0000	0.9924	5.8696	0	0.0625	1.0	3.7206	0.6104	2.2710
8	8	9	0.9924	0.9170	8.1491	11.5290	0.1613	1.0	1.0875	0.5839	0.6349
9	4	9	0.9742	0.9170	1.9433	6.7606	0.0872	1.0	2.4440	0.6344	1.5504

จากตารางที่ 6.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง (C_{vc_br}) ที่คำนวณได้ ไม่มีค่าไหนเลยที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.125 ดังนั้นสายส่งทุกเส้นจึงถูกจัดว่าเป็นสายส่งแข็งแรง (หรือเป็นสายส่งที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพียงทลายในระบบ) สำหรับค่ามุม θ สายส่งทุกเส้นมีมุม θ ค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าภายหลังการหมุนแกนของเส้นโค้ง P-Q แล้ว จะได้ค่ากำลังจริงเป็นแกน y และค่ากำลังรีแอกทีฟเป็นแกน x

7) จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง

ตารางที่ 6.12 จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส

ลำดับ	สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดแรงดันยกกำลังสอง		ผลต่างมุม δ (deg)	เส้นโค้ง P-Q		สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง			
		ต้นสาย	ปลายสาย	ณ ต้นสาย $ V_S ^2$ (p.u.)	ณ ปลายสาย $ V_R ^2$ (p.u.)		θ (deg)	k	p_{bus}	d_{vc}	P_{area_br}	c_{vc_br}
1	8	8	9	0.9924	0.9170	8.1491	11.5290	0.1613	1.0	1.0875	0.5839	0.6349
2	3	6	5	1.0068	0.9516	5.9429	13.3330	0.1680	1.0	1.1148	0.5973	0.6660
3	5	6	7	1.0068	0.9715	1.3041	6.8049	0.0998	1.0	2.2275	0.6418	1.4296
4	2	4	5	0.9742	0.9516	1.6106	10.5470	0.0953	1.0	2.4183	0.6362	1.5386
5	9	4	9	0.9742	0.9170	1.9433	6.7606	0.0872	1.0	2.4440	0.6344	1.5504
6	6	8	7	0.9924	0.9715	3.1776	6.7694	0.0727	1.0	3.1720	0.6263	1.9866
7	7	2	8	1.0000	0.9924	5.8696	0	0.0625	1.0	3.7206	0.6104	2.2710
8	1	1	4	1.0000	0.9742	2.4066	0	0.0576	1.0	4.0768	0.6406	2.6115
9	4	3	6	1.0000	1.0068	2.8455	0	0.0586	1.0	4.2613	0.6367	2.7133

จากตารางที่ 6.12 แสดงการเรียงลำดับสายส่งตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (c_{vc_br}) จากบนลงล่าง โดยเรียงจากค่าน้อยไปมาก ซึ่งสายส่งที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าสายส่งที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นสายส่งที่ 8 จึงมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายมากที่สุดในระบบ ส่วนสายส่งที่ 4 มีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายน้อยที่สุดในระบบ

6.1.5 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส

ตารางที่ 6.13 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส สำหรับระบบ 9 บัส

การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส (โดยมีกำลังฐานเท่ากับ 100 MVA)					
ลำดับ	บัส	k_{cr}	ขนาดตัวเก็บประจุ (MVar) ที่แรงดัน 1 p.u.	ระยะทางที่ใกล้ที่สุด (d_{vc}) (หน่วย p.u.)	อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. ที่แรงดัน 1 p.u.
1	9	0.2977	358.43	2.9300	0.1839
2	7	0.5123	281.70	2.5160	0.0870
3	5	0.7215	91.17	2.4981	0.2491

จากตารางที่ 6.13 แสดงขนาดตัวเก็บประจุซึ่งทำให้ได้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดเมื่อระยะทางที่ใกล้ที่สุดขณะยังไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2.2710 p.u. พร้อมทั้งแสดงอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. สำหรับลำดับบัสนั้น เรียงลำดับความเสี่ยงของบัสจากบนลงล่าง โดยเรียงตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส (k_{cr}) จากค่าน้อยไปค่ามาก ซึ่งบัสที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าบัสที่อยู่ด้านล่าง สามารถสรุปการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสได้ดังนี้

1) ผลของขนาดตัวเก็บประจุ

สำหรับระบบทดสอบ 9 บัสนั้น บัสยังมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายเท่าไร ขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดก็ยังมีค่ามากที่สุดนั้น แสดงให้เห็นว่าบัสยังอ่อนแอเท่าไร ปริมาณตัวเก็บประจุที่ติดตั้งเพื่อทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดก็ยิ่งต้องการปริมาณที่มากตาม

2) ผลของระยะทางที่ใกล้ที่สุด

สำหรับระบบทดสอบ 9 บัสนั้น บัสยังมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายเท่าไร ระยะทางที่ใกล้ที่สุดก็ยังมีค่ามากที่สุดนั้น แสดงให้เห็นว่าบัสยังมีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายเท่าไร ความสามารถในการทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดก็ยิ่งมากตาม แต่เมื่อมองระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละบัสโดยรวม เห็นได้ว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละบัสมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยระยะทางที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ 2.6480 p.u. และค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1880 p.u.

3) พิจารณาผลของขนาดตัวเก็บประจุร่วมกับผลของระยะทางที่ใกล้ที่สุด

สำหรับระบบทดสอบ 9 บัสนั้น เมื่อต้องการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวเข้าที่บัส ควรคำนึงถึงจุดมุ่งหมายที่ต้องการก่อนเป็นลำดับแรก ยกตัวอย่างเช่น กรณีต้องการระยะทางที่ใกล้ที่สุดของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 2.8000 p.u. ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 9 เท่านั้น เพราะบัสที่ 9 สามารถให้ค่าระยะที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.9300 p.u. ส่วนบัสที่ 7 และบัสที่ 5 สามารถให้ค่าระยะที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.5160 p.u. และ 2.4981 p.u. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่ต้องการ

ส่วนกรณีต้องการระยะทางที่ใกล้ที่สุดของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 2.3000 p.u. ด้วยเหตุนี้จะเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสไหนก็ได้ ก็สามารถทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่าตามที่ต้องการ แต่บัสดีที่สุดในการติดตั้งคือบัสที่ 5 เนื่องจากมีอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุมากกว่าบัสที่ 9 และบัสที่ 7

6.1.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง

ตารางที่ 6.14 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง สำหรับระบบ 9 บัส

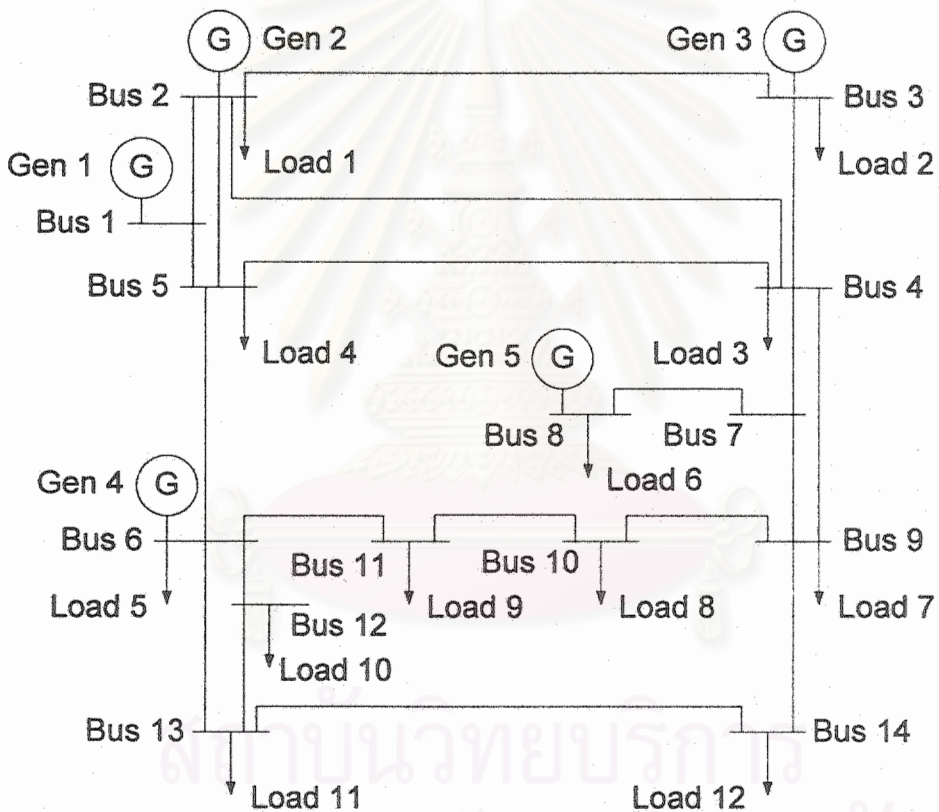
การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง (โดยมีกำลังฐานเท่ากับ 100 MVA)						
ลำดับ	สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดตัวเก็บประจุ (MVar) ที่แรงดัน 1 p.u.	ระยะทางที่ใกล้ที่สุด (d_{vc}) (หน่วย p.u.)	อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้น ต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. ที่แรงดัน 1 p.u.
		ต้น สาย	ปลาย สาย			
1	8	8	9	412.75	2.5327	0.0634
2	3	5	6	4915.75	2.3537	0.0017
3	5	6	7	324.45	2.2742	0.0010
4	2	4	5	10714.91	2.3597	0.0008
5	9	9	4	1428.53	2.2915	0.0014
6	6	7	8	545.92	2.3392	0.0125
7	7	8	2	1036.96	2.4734	0.0195
8	1	1	4	1798.97	4.3012	0.1129
9	4	3	6	3126.03	2.3964	0.0040

จากตารางที่ 6.14 แสดงขนาดตัวเก็บประจุซึ่งทำให้ได้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุด เมื่อระยะทางที่ใกล้ที่สุดขณะยังไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2.2710 p.u. พร้อมทั้งแสดงอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. ส่วนลำดับบัสนั้น เรียงลำดับความเสี่ยงของสายส่งจากบนลงล่าง ซึ่งสายส่งที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าสายส่งที่อยู่ด้านล่าง

สำหรับระบบทดสอบ 9 บัสนั้น สายส่งเส้นที่ 1 ซึ่งต่ออยู่กับบัสที่ 1 จะให้ทั้งระยะทางที่ใกล้ที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุมีค่ามากที่สุดในระบบทั้งสองค่า ดังนั้นสายส่งเส้นที่ 1 จึงเป็นสายส่งเส้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวในระบบ ส่วนสายส่งเส้นที่เหลือ เมื่อมองระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละสายส่งโดยรวม เห็นได้ว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละสายส่งมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยระยะทางที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ 2.3776 p.u. และค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0674 p.u. ซึ่งค่าสถิติทั้งสองค่านี้ไม่ได้นำสายส่งที่เหมาะสมที่สุดมารวมพิจารณาด้วย

6.2 การวิเคราะห์สภาวะแรงดันพียงทลายในระบบ 14 บัส

ระบบทดสอบที่ใช้นี้เป็นระบบ 14 บัส ซึ่งประกอบไปด้วย บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 บัส บัสที่มีโหลด 12 บัส และสายส่งจำนวน 20 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยข้อมูลของบัส ข้อมูลของระบบสายส่ง และข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นข้อมูลที่ได้จากระบบทดสอบเดิมดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น ดังแสดงในหัวข้อ 6.2.1



รูปที่ 6.2 ระบบทดสอบขนาด 14 บัส

6.2.1 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้น

ตารางที่ 6.15 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานเริ่มต้นสำหรับระบบ 14 บัส

ข้อมูลบัส							
หมายเลข บัส	ประเภท บัส	แรงดัน		เครื่องกำเนิดไฟฟ้า		โหลด	
		ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	บัสอ้างอิง	1.0600	0	187.58	-17.75	-	-
2	บัสแรงดัน	1.0520	-3.8632	83.10	49.57	21.70	12.70
3	บัสแรงดัน	1.0260	-11.8160	-	40.25	94.20	19.00
4	โหลดบัส	1.0137	-9.2437	-	-	47.80	-3.90
5	โหลดบัส	1.0166	-7.7665	-	-	7.60	1.60
6	โหลดบัส	0.9777	-13.3940	-	-2.40	11.20	7.50
7	โหลดบัส	1.0059	-12.6550	-	-	-	-
8	โหลดบัส	1.0234	-12.6550	-	10.20	0	0
9	โหลดบัส	0.9922	-14.5290	-	-	29.50	16.60
10	โหลดบัส	0.9817	-14.6780	-	-	9.00	5.80
11	โหลดบัส	0.9761	-14.2140	-	-	3.50	1.80
12	โหลดบัส	0.9636	-14.4150	-	-	6.10	1.60
13	โหลดบัส	0.9605	-14.5610	-	-	13.50	5.80
14	โหลดบัส	0.9590	-15.7120	-	-	14.90	5.00
รวม				270.68	79.87	259.00	73.50

จากตารางที่ 6.15 กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวมีค่าอยู่ในขอบเขตของค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า ส่วนขนาดแรงดัน มุมของแรงดัน และกำลังไฟฟ้า จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคำนวณจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดและสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.2.2 และ 6.2.4 ตามลำดับ

6.2.2 การคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด

ตารางที่ 6.16 ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้า ณ จุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดสำหรับระบบ 14 บัส โดย
 ละเอียดการพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลบัส							
หมายเลข บัส	ประเภท บัส	แรงดัน		เครื่องกำเนิดไฟฟ้า		โหลด	
		ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	บัสอ้างอิง	1.0600	0	258.42	23.11	-	-
2	บัสแรงดัน	1.0520	-5.6266	83.10	200.00	21.70	12.43
3	บัสแรงดัน	1.0260	-15.3980	-	60.00	94.20	-32.55
4	โหลดบัส	0.8964	-11.4370	-	-	48.72	-1.88
5	โหลดบัส	0.8977	-9.3780	-	-	8.41	3.71
6	โหลดบัส	0.6136	-24.8820	-	-2.40	15.30	17.66
7	โหลดบัส	0.7496	-19.9230	-	-	-	-
8	โหลดบัส	0.7607	-20.3080	-	4.81	2.18	0
9	โหลดบัส	0.6725	-25.7230	-	-	33.01	24.52
10	โหลดบัส	0.6307	-26.5140	-	-	13.24	14.87
11	โหลดบัส	0.5960	-26.1560	-	-	8.22	12.21
12	โหลดบัส	0.5158	-27.6880	-	-	13.72	15.78
13	โหลดบัส	0.5295	-28.2410	-	-	20.80	19.13
14	โหลดบัส	0.5227	-30.7460	-	-	23.45	18.31
รวม				341.52	285.52	302.95	104.19

จากตารางที่ 6.16 ถึงแม้วิธีที่ใช้คำนวณจะละเอียดการพิจารณาค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดซึ่งคำนวณได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตของค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงเลือกใช้จุดทำงานในตารางนี้สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส (k_{cr})

6.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของบัส

ตารางที่ 6.17 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของบัส สำหรับระบบ 14 บัส

บัส	ประเภทบัส	จุดทำงาน				สัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของบัส	
		เริ่มต้น		เกิดแรงดันพียงหลายที่ใกล้ที่สุด		k_{cr}	p_{bus}
		P_0 (MW)	Q_0 (MVar)	P_{cr} (MW)	Q_{cr} (MVar)		
1	บัสอ้างอิง	187.58	-17.75	258.42	23.11	-	1.0
2	บัสแรงดัน	61.40	36.87	61.40	187.57	-	0.5
3	บัสแรงดัน	-94.20	21.25	-94.20	92.55	-	0.5
4	โหลดบัส	-47.80	3.90	-48.72	1.88	0.0455	0.5
5	โหลดบัส	-7.60	-1.60	-8.41	-3.71	0.2459	1.0
6	โหลดบัส	-11.20	-9.90	-15.30	-20.06	0.4343	1.0
7	โหลดบัส	-	-	-	-	-	1.0
8	โหลดบัส	0	10.20	-2.18	4.81	1.1010	1.0
9	โหลดบัส	-29.50	-16.60	-33.01	-24.52	0.2107	1.0
10	โหลดบัส	-9.00	-5.80	-13.24	-14.87	0.5029	1.0
11	โหลดบัส	-3.50	-1.80	-8.22	-12.21	0.7766	1.0
12	โหลดบัส	-6.10	-1.60	-13.72	-15.78	0.7698	1.0
13	โหลดบัส	-13.50	-5.80	-20.80	-19.13	0.5378	1.0
14	โหลดบัส	-14.90	-5.00	-23.45	-18.31	0.5317	1.0

จากตารางที่ 6.17 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงหลายของบัส (k_{cr}) ที่คำนวณได้ บัสที่ 4 เป็นบัสเดียวเท่านั้นที่มีค่าน้อยกว่า 0.20 ดังนั้นความน่าจะเป็นของอิทธิพลจากบัส (ด้านที่กำลังจริงไหลเข้า) ที่มีต่อสายส่ง (p_{bus}) สำหรับบัสที่ 4 จึงเท่ากับ 0.5 และบัสที่มีโหลดต่ออยู่ที่เหลือมีค่าเท่ากับ 1.0 ส่วนบัสแรงดันที่ 2 และที่ 3 นั้นมี p_{bus} เท่ากับ 0.5 เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่จ่ายกำลังไฟฟ้าและค่าจำกัด แสดงการเรียงลำดับโหลดบัสตามค่า k_{cr} (จากน้อยไปมาก) ได้ดังในตารางที่ 6.18

ตารางที่ 6.18 จัดลำดับความเสี่ยงบัส (เฉพาะโหนดบัส) สำหรับระบบ 14 บัส

ลำดับความเสี่ยง	หมายเลขบัส	k_{cr}	P_{bus}
1	4	0.0455	0.5
2	9	0.2107	1.0
3	5	0.2459	1.0
4	6	0.4343	1.0
5	10	0.5029	1.0
6	14	0.5317	1.0
7	13	0.5378	1.0
8	12	0.7698	1.0
9	11	0.7766	1.0
10	8	1.1010	1.0

จากตารางที่ 6.18 เรียงลำดับความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันพังทลายจากบนลงล่าง โดยเรียงจากค่าน้อยไปค่ามาก ซึ่งบัสที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าบัสที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นบัสที่ 4 จึงมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากที่สุด ส่วนบัสที่ 10 มีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบน้อยที่สุด

6.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง

เริ่มต้นวิเคราะห์สายส่งทีละเส้นว่าด้านไหนของสายส่งควรเป็นต้นสายและปลายสาย เสร็จแล้วจึงคำนวณกำลังไฟฟ้า ณ ปลายสายส่ง พร้อมคำนวณมุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q ตามตารางที่ 6.19 6.20 และ 6.21 ตามลำดับ

เมื่อทราบข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดจากตารางที่ 6.19 6.20 และ 6.21 แล้ว ทำการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้น ไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง และคำนวณความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง ตามตารางที่ 6.22 และ 6.23 ในตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง พร้อมทั้งจัดลำดับความเสี่ยงของสายส่ง ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.24 และ 6.25

1) พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย

ตารางที่ 6.19 พิจารณาสายส่งว่าด้านไหนควรเป็นต้นสายหรือปลายสาย สำหรับระบบ 14 บัส

ข้อมูลสายส่ง								
หมายเลขสายส่ง	จากบัส (From bus)	ถึงบัส (To bus)	แรงดัน ณ From bus		แรงดัน ณ To bus		หมายเลขบัส	
			ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ต้นสาย	ปลายสาย
1	1	2	1.0600	0	1.0520	-3.8632	1	2
2	1	5	1.0600	0	1.0166	-7.7665	1	5
3	2	3	1.0520	-3.8632	1.0260	-11.8160	2	3
4	2	4	1.0520	-3.8632	1.0137	-9.2437	2	4
5	2	5	1.0520	-3.8632	1.0166	-7.7665	2	5
6	3	4	1.0260	-11.8160	1.0137	-9.2437	4	3
7	4	5	1.0137	-9.2437	1.0166	-7.7665	5	4
8	4	7	1.0137	-9.2437	1.0059	-12.6550	4	7
9	4	9	1.0137	-9.2437	0.9922	-14.5290	4	9
10	5	6	1.0166	-7.7665	0.9777	-13.3940	5	6
11	6	11	0.9777	-13.3940	0.9761	-14.2140	6	11
12	6	12	0.9777	-13.3940	0.9636	-14.4150	6	12
13	6	13	0.9777	-13.3940	0.9605	-14.5610	6	13
14	7	8	1.0059	-12.6550	1.0234	-12.6550	7	8
15	7	9	1.0059	-12.6550	0.9922	-14.5290	7	9
16	9	10	0.9922	-14.5290	0.9817	-14.6780	9	10
17	9	14	0.9922	-14.5290	0.9590	-15.7120	9	14
18	10	11	0.9817	-14.6780	0.9761	-14.2140	11	10
19	12	13	0.9636	-14.4150	0.9605	-14.5610	12	13
20	13	14	0.9605	-14.5610	0.9590	-15.7120	13	14

2) จำนวนกำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย

ตารางที่ 6.20 กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย สำหรับระบบ 14 บัส

หมายเลขสายส่ง	หมายเลขบัส		แรงดัน ณ ต้นสาย		แรงดัน ณ ปลายสาย		กำลังไฟฟ้า ณ ปลายสาย	
	ต้นสาย	ปลายสาย	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	ขนาด (p.u.)	มุม (deg)	กำลังจริง (MW)	รีแอกทีฟ (MVar)
1	1	2	1.0600	0	1.0520	-3.8632	117.61	-25.66
2	1	5	1.0600	0	1.0166	-7.7665	65.18	2.10
3	2	3	1.0520	-3.8632	1.0260	-11.8160	73.26	-6.85
4	2	4	1.0520	-3.8632	1.0137	-9.2437	56.92	0.62
5	2	5	1.0520	-3.8632	1.0166	-7.7665	43.51	6.77
6	4	3	1.0137	-9.2437	1.0260	-11.8160	20.94	-14.40
7	5	4	1.0166	-7.7665	1.0137	-9.2437	59.13	-11.81
8	4	7	1.0137	-9.2437	1.0059	-12.6550	29.67	2.95
9	4	9	1.0137	-9.2437	0.9922	-14.5290	17.19	3.16
10	5	6	1.0166	-7.7665	0.9777	-13.3940	41.49	14.17
11	6	11	0.9777	-13.3940	0.9761	-14.2140	5.88	-2.07
12	6	12	0.9777	-13.3940	0.9636	-14.4150	7.37	1.69
13	6	13	0.9777	-13.3940	0.9605	-14.5610	16.71	4.00
14	7	8	1.0059	-12.6550	1.0234	-12.6550	0.00	-10.20
15	7	9	1.0059	-12.6550	0.9922	-14.5290	29.67	11.83
16	9	10	0.9922	-14.5290	0.9817	-14.6780	6.64	9.71
17	9	14	0.9922	-14.5290	0.9590	-15.7120	10.46	6.80
18	11	10	0.9761	-14.2140	0.9817	-14.6780	2.36	-3.91
19	12	13	0.9636	-14.4150	0.9605	-14.5610	1.27	0.08
20	13	14	0.9605	-14.5610	0.9590	-15.7120	4.44	-1.80

3) คำนวณมุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q

ตารางที่ 6.21 ค่ามุมหมุนและค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q สำหรับระบบ 14 บัส

ข้อมูลสายส่ง									
สายส่ง	ค่าพารามิเตอร์สายส่ง				มุมแกน		ค่าสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q		
	c_1	c_2	c_3	c_4	$\frac{2c_2c_3}{c_3^2 - c_2^2}$	มุม θ (deg)*	$\sqrt{c_1c_4}$	$ V_s ^2$	k^{**}
1	0.9969	0.0388	0.1181	0.0034	0.7354	18.1650	0.0622	1.1236	0.0553
2	0.9891	0.1081	0.4435	0.0527	0.5181	13.6940	0.2282	1.1236	0.2031
3	0.9914	0.0940	0.3941	0.0414	0.5057	13.4120	0.2026	1.1067	0.1831
4	1.0000	0.1162	0.3526	0.0345	0.7395	18.2410	0.1857	1.1067	0.1678
5	0.9941	0.1139	0.3466	0.0335	0.7368	18.1910	0.1824	1.1067	0.1648
6	0.9941	0.1340	0.3409	0.0337	0.9300	21.4620	0.1832	1.0275	0.1782
7	0.9995	0.0267	0.0842	0.0020	0.7052	17.5950	0.0442	1.0335	0.0427
8	1.0000	0	0.4090	0.0418	0	0	0.2045	1.0275	0.1990
9	1.0000	0	1.0778	0.2904	0	0	0.5389	1.0275	0.5245
10	1.0000	0	0.4698	0.0552	0	0	0.2349	1.0335	0.2273
11	1.0000	0.1900	0.3978	0.0486	1.2372	25.5260	0.2204	0.9558	0.2306
12	1.0000	0.2458	0.5116	0.0805	1.2494	25.6630	0.2838	0.9558	0.2969
13	1.0000	0.1323	0.2605	0.0213	1.3684	26.9210	0.1461	0.9558	0.1529
14	1.0000	0	0.3523	0.0310	0	0	0.1762	1.0118	0.1741
15	1.0000	0	0.2200	0.0121	0	0	0.1100	1.0118	0.1087
16	1.0000	0.0636	0.1690	0.0082	0.8772	20.6290	0.0903	0.9845	0.0917
17	1.0000	0.2542	0.5408	0.0893	1.2070	25.1790	0.2988	0.9845	0.3035
18	1.0000	0.1641	0.3841	0.0436	1.0451	23.1320	0.2089	0.9527	0.2192
19	1.0000	0.4418	0.3998	0.0888	-9.9750	-42.1380	0.2979	0.9286	0.3209
20	1.0000	0.3419	0.6960	0.1503	1.2946	26.1580	0.3877	0.9226	0.4203

*โดยที่ $2\theta = \arctan\left(\frac{2c_2c_3}{c_3^2 - c_2^2}\right)$ และ** $k = \sqrt{c_1c_4} / |V_s|^2$

4) คำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง

ตารางที่ 6.22 ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส

ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังเส้นโค้ง P-Q							
หมายเลขสายส่ง	มุมแกน		กำลังไฟฟ้าในสายส่ง ภายหลังการหมุนแกน				ระยะทาง : d_{vc} (p.u.)
	มุม θ (deg)	k	ณ จุดทำงานเริ่มต้น		ณ จุดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด		
			กำลังจริง : P'_0 (MW)	รีแอกทีฟ : Q'_0 (MVar)	กำลังจริง : P'_{cr} (MW)	รีแอกทีฟ : Q'_{cr} (MVar)	
1	18.1650	0.0553	119.75	12.29	220.40	424.98	4.2479
2	13.6940	0.2031	62.83	17.47	96.90	104.00	0.9300
3	13.4120	0.1831	72.85	10.33	116.01	111.94	1.1039
4	18.2410	0.1678	53.86	18.40	88.85	135.79	1.2249
5	18.1910	0.1648	39.22	20.02	66.48	144.38	1.2731
6	21.4620	0.1782	24.76	-5.74	49.97	135.81	1.4377
7	17.5950	0.0427	59.93	6.62	117.36	579.15	5.7540
8	0	0.1990	29.67	2.95	55.35	119.51	1.1936
9	0	0.5245	17.19	3.16	29.58	43.08	0.4180
10	0	0.2273	41.49	14.17	67.80	99.54	0.8933
11	25.5260	0.2306	6.20	0.67	12.28	108.06	1.0757
12	25.6630	0.2969	5.92	4.71	11.16	83.83	0.7929
13	26.9210	0.1529	13.09	11.13	24.38	162.64	1.5193
14	0	0.1741	0.00	-10.20	0.00	143.60	1.5380
15	0	0.1087	29.67	11.83	55.66	226.56	2.1629
16	20.6290	0.0917	2.79	11.43	5.36	272.57	2.6115
17	25.1790	0.3035	6.58	10.61	11.60	81.97	0.7154
18	23.1320	0.2192	3.71	-2.67	7.59	113.91	1.1664
19	-42.1380	0.3209	0.89	0.91	77.91	1.81	0.7703
20	26.1580	0.4203	4.78	0.34	9.44	59.11	0.5860

5) คำนวณความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง

ตารางที่ 6.23 ความน่าจะเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างปลอดภัยในสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส

สายส่ง	เส้นโค้ง P-Q		กำลังไฟฟ้าในสายส่ง				พื้นที่		P_{area_br}
	θ (deg)	k	P'_{min} (MW)	Q'_{min} (MVar)	P'_{max} (MW)	Q'_{max} (MVar)	S_{inside} (p.u. ²)	S_{total} (p.u. ²)	
1	18.1650	0.0553	-24.37	196.08	679.93	451.53	16.8480	27.2540	0.6182
2	13.6940	0.2031	37.81	48.77	191.27	120.17	0.8211	1.3974	0.5876
3	13.4120	0.1831	43.58	46.00	222.44	133.09	1.1450	1.9408	0.5900
4	18.2410	0.1678	10.88	71.50	214.98	148.83	1.4026	2.3297	0.6020
5	18.1910	0.1648	-4.03	77.04	212.76	151.64	1.5453	2.5308	0.6106
6	21.4620	0.1782	-31.93	65.20	205.20	138.44	1.8980	3.0038	0.6319
7	17.5950	0.0427	-121.49	262.94	868.19	578.73	32.3490	50.8910	0.6357
8	0	0.1990	29.67	2.95	248.26	123.86	1.6679	2.6430	0.6311
9	0	0.5245	17.19	3.16	92.12	46.12	0.1977	0.3219	0.6142
10	0	0.2273	41.49	14.17	205.32	106.08	0.9196	1.5057	0.6106
11	25.5260	0.2306	-43.20	63.99	138.80	104.11	1.0739	1.6844	0.6376
12	25.6630	0.2969	-30.91	51.95	104.22	81.36	0.5858	0.9274	0.6317
13	26.9210	0.1529	-61.38	104.39	196.73	157.79	2.1320	3.3878	0.6293
14	0	0.1741	0.00	-10.20	297.22	143.60	3.0474	4.5710	0.6667
15	0	0.1087	29.67	11.83	447.87	228.97	5.8657	9.0806	0.6460
16	20.6290	0.0917	-92.57	148.73	367.51	264.73	6.7624	10.5480	0.6411
17	25.1790	0.3035	-26.19	53.43	97.67	80.30	0.4837	0.7751	0.6240
18	23.1320	0.2192	-44.31	61.73	154.46	109.73	1.2887	2.0036	0.6432
19	-42.1380	0.3209	-61.25	60.08	66.28	69.59	0.4672	0.8167	0.5721
20	26.1580	0.4203	-23.17	35.27	75.90	57.23	0.3193	0.5023	0.6356

6) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง

ตารางที่ 6.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส

สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดแรงดันยกกำลังสอง		ผลต่างมุม δ (deg)	เส้นโค้ง P-Q		สัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง			
	ต้นสาย	ปลายสาย	ณ ต้นสาย	ณ ปลายสาย		θ (deg)	k	p_{bus}	d_{vc}	p_{area_br}	c_{vc_br}
			$ V_S ^2$ (p.u.)	$ V_R ^2$ (p.u.)							
1	1	2	1.1236	1.1067	3.8632	18.1650	0.0553	0.5	4.2479	0.6182	1.3130
2	1	5	1.1236	1.0335	7.7665	13.6940	0.2031	1.0	0.9300	0.5876	0.5464
3	2	3	1.1067	1.0527	7.9530	13.4120	0.1831	0.5	1.1039	0.5900	0.3256
4	2	4	1.1067	1.0275	5.3805	18.2410	0.1678	0.5	1.2249	0.6020	0.3687
5	2	5	1.1067	1.0335	3.9034	18.1910	0.1648	1.0	1.2731	0.6106	0.7774
6	4	3	1.0275	1.0527	2.5725	21.4620	0.1782	0.5	1.4377	0.6319	0.4542
7	5	4	1.0335	1.0275	1.4771	17.5950	0.0427	0.5	5.7540	0.6357	1.8288
8	4	7	1.0275	1.0118	3.4115	0	0.1990	1.0	1.1936	0.6311	0.7533
9	4	9	1.0275	0.9845	5.2856	0	0.5245	1.0	0.4180	0.6142	0.2568
10	5	6	1.0335	0.9558	5.6273	0	0.2273	1.0	0.8933	0.6106	0.5455
11	6	11	0.9558	0.9527	0.8204	25.5260	0.2306	1.0	1.0757	0.6376	0.6858
12	6	12	0.9558	0.9286	1.0211	25.6630	0.2969	1.0	0.7929	0.6317	0.5008
13	6	13	0.9558	0.9226	1.1667	26.9210	0.1529	1.0	1.5193	0.6293	0.9561
14	7	8	1.0118	1.0474	0.0000	0	0.1741	1.0	1.5380	0.6667	1.0253
15	7	9	1.0118	0.9845	1.8741	0	0.1087	1.0	2.1629	0.6460	1.3972
16	9	10	0.9845	0.9637	0.1482	20.6290	0.0917	1.0	2.6115	0.6411	1.6743
17	9	14	0.9845	0.9196	1.1832	25.1790	0.3035	1.0	0.7154	0.6240	0.4464
18	11	10	0.9527	0.9637	0.4633	23.1320	0.2192	1.0	1.1664	0.6432	0.7502
19	12	13	0.9286	0.9226	0.1456	-42.1380	0.3209	1.0	0.7703	0.5721	0.4407
20	13	14	0.9226	0.9196	1.1520	26.1580	0.4203	1.0	0.5860	0.6356	0.3747

จากตารางที่ 6.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของสายส่ง (c_{vc_br}) ที่คำนวณได้ ไม่มีค่าไหนเลยที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.125 ดังนั้นสายส่งทุกเส้นจึงถูกจัดว่าเป็นสายส่งแข็งแรง (หรือเป็นสายส่งที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพียงทลายในระบบ) สำหรับค่ามุม θ สายส่งเส้นที่ 19 มีมุม θ ค่าน้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าภายหลังการหมุนแกนของเส้นโค้ง P-Q แล้ว จะได้

ค่ากำลังจริงเป็นแกน x และค่ารีแอกทีฟเป็นแกน y ส่วนสายส่งเส้นอื่นมีมุม θ ค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้ค่ากำลังจริงเป็นแกน y และค่ากำลังรีแอกทีฟเป็นแกน x

7) จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง

ตารางที่ 6.25 จัดลำดับความเสี่ยงสายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส

ลำดับ	สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดแรงดันยกกำลังสอง		ผลต่างมุม δ (deg)	เส้นโค้ง P-Q		สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง			
		ต้นสาย	ปลายสาย	ณ ต้นสาย $ V_S ^2$ (p.u.)	ณ ปลายสาย $ V_R ^2$ (p.u.)		θ (deg)	k	P_{bus}	d_{vc}	P_{area_br}	C_{vc_br}
1	9	4	9	1.0275	0.9845	5.2856	0	0.5245	1.0	0.4180	0.6142	0.2568
2	3	2	3	1.1067	1.0527	7.9530	13.4120	0.1831	0.5	1.1039	0.5900	0.3256
3	4	2	4	1.1067	1.0275	5.3805	18.2410	0.1678	0.5	1.2249	0.6020	0.3687
4	20	13	14	0.9226	0.9196	1.1520	26.1580	0.4203	1.0	0.5860	0.6356	0.3747
5	19	12	13	0.9286	0.9226	0.1456	-42.1380	0.3209	1.0	0.7703	0.5721	0.4407
6	17	9	14	0.9845	0.9196	1.1832	25.1790	0.3035	1.0	0.7154	0.6240	0.4464
7	6	4	3	1.0275	1.0527	2.5725	21.4620	0.1782	0.5	1.4377	0.6319	0.4542
8	12	6	12	0.9558	0.9286	1.0211	25.6630	0.2969	1.0	0.7929	0.6317	0.5008
9	10	5	6	1.0335	0.9558	5.6273	0	0.2273	1.0	0.8933	0.6106	0.5455
10	2	1	5	1.1236	1.0335	7.7665	13.6940	0.2031	1.0	0.9300	0.5876	0.5464
11	11	6	11	0.9558	0.9527	0.8204	25.5260	0.2306	1.0	1.0757	0.6376	0.6858
12	18	11	10	0.9527	0.9637	0.4633	23.1320	0.2192	1.0	1.1664	0.6432	0.7502
13	8	4	7	1.0275	1.0118	3.4115	0	0.1990	1.0	1.1936	0.6311	0.7533
14	5	2	5	1.1067	1.0335	3.9034	18.1910	0.1648	1.0	1.2731	0.6106	0.7774
15	13	6	13	0.9558	0.9226	1.1667	26.9210	0.1529	1.0	1.5193	0.6293	0.9561
16	14	7	8	1.0118	1.0474	0.0000	0	0.1741	1.0	1.5380	0.6667	1.0253
17	1	1	2	1.1236	1.1067	3.8632	18.1650	0.0553	0.5	4.2479	0.6182	1.3130
18	15	7	9	1.0118	0.9845	1.8741	0	0.1087	1.0	2.1629	0.6460	1.3972
19	16	9	10	0.9845	0.9637	0.1482	20.6290	0.0917	1.0	2.6115	0.6411	1.6743
20	7	5	4	1.0335	1.0275	1.4771	17.5950	0.0427	0.5	5.7540	0.6357	1.8288

จากตารางที่ 6.25 แสดงการเรียงลำดับสายส่งตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของสายส่ง (c_{vc_br}) จากบนลงล่าง โดยเรียงจากค่าน้อยไปมาก ซึ่งสายส่งที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าสายส่งที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นสายส่งที่ 9 จึงมีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายมากที่สุดในระบบ ส่วนสายส่งที่ 7 มีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายน้อยที่สุดในระบบ

6.2.5 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส

ตารางที่ 6.26 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส สำหรับระบบ 14 บัส

การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัส (โดยมีกำลังฐานเท่ากับ 100 MVA)					
ลำดับ	บัส	k_{cr}	ขนาดตัวเก็บประจุ (MVar) ที่แรงดัน 1 p.u.	ระยะทางที่ใกล้ที่สุด (d_{vc}) (หน่วย p.u.)	อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. ที่แรงดัน 1 p.u.
1	4	0.0455	159.24	0.4307	0.0521
2	9	0.2107	143.39	0.5501	0.1411
3	5	0.2459	108.06	0.4052	0.0531
4	6	0.4343	141.48	0.5620	0.1514
5	10	0.5029	137.16	0.5534	0.1499
6	14	0.5317	131.22	0.5596	0.1614
7	13	0.5378	136.51	0.5638	0.1582
8	12	0.7698	127.25	0.5555	0.1632
9	11	0.7766	131.09	0.5524	0.1561
10	8	1.1010	113.56	0.5194	0.1511

จากตารางที่ 6.26 แสดงขนาดตัวเก็บประจุซึ่งทำให้ได้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดเมื่อระยะทางที่ใกล้ที่สุดขณะยังไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.3478 p.u. พร้อมทั้งแสดงอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. สำหรับลำดับบัสนั้น เรียงลำดับความเสี่ยงของบัสจากบนลงล่าง โดยเรียงตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัส (k_{cr}) จากค่าน้อยไปค่ามาก ซึ่งบัสที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบมากกว่าบัสที่อยู่ด้านล่าง สามารถสรุปการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสได้ดังนี้

1) ผลของขนาดตัวเก็บประจุ

สำหรับระบบทดสอบ 14 บัสนั้น บัสสามลำดับแรกในตารางที่ 6.26 ซึ่งได้แก่ บัสที่ 4 บัสที่ 9 และบัสที่ 5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า บัสยังมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายมากขึ้นเท่าไร ขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากที่สุดก็ยังมีค่ามากเท่านั้น ส่วนขนาดตัวเก็บประจุสำหรับบัสที่เหลืออยู่ในตารางที่ 6.26 มีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงไม่สอดคล้องกับลำดับความเสี่ยงของบัส จึงสรุปได้ว่า เมื่อระบบทดสอบมีโครงสร้างซับซ้อนและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสมีค่ามากกว่า 0.20 มาก ๆ ลำดับความเสี่ยงของบัสกับขนาดตัวเก็บประจุสำหรับติดตั้งแทบไม่มีความสัมพันธ์กันเลย แต่ถึงกระนั้นขนาดตัวเก็บประจุของบัสที่ 4 ซึ่งเป็นบัสที่มีความเสี่ยงมากที่สุด ก็ยังคงมีค่ามากที่สุดในระบบ

2) ผลของระยะทางที่ใกล้ที่สุด

สำหรับระบบทดสอบ 14 บัสนั้น ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงไม่สอดคล้องกับลำดับความเสี่ยงของบัส แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบมีโครงสร้างซับซ้อน ลำดับความเสี่ยงของบัสกับระยะทางที่ใกล้ที่สุดแทบไม่มีความสัมพันธ์กันเลย แต่เมื่อมองระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละบัสโดยรวม เห็นได้ว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละบัสมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยระยะทางที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ 0.5252 p.u. และค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0441 p.u.

3) พิจารณาผลของขนาดตัวเก็บประจุร่วมกับผลของระยะทางที่ใกล้ที่สุด

สำหรับระบบทดสอบ 14 บัสนั้น ถึงแม้ว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดของแต่ละบัสมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุของบัสสามลำดับแรกในตารางที่ 6.26 ซึ่งได้แก่ บัสที่ 4 บัสที่ 9 และบัสที่ 5 ตามลำดับ มีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุของบัสที่เหลืออยู่ในตารางที่ 6.26 ดังนั้นเมื่อต้องการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวเข้าที่บัส ควรติดตั้งที่บัสไหนก็ได้ที่ไม่ใช่บัสสามลำดับแรกในตารางที่ 6.26

6.2.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง

ตารางที่ 6.27 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง สำหรับระบบ 14 บัส

การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าที่สายส่ง (โดยมีกำลังฐานเท่ากับ 100 MVA)						
ลำดับ	สายส่ง	หมายเลขบัส		ขนาดตัวเก็บประจุ (MVar) ที่แรงดัน 1 p.u.	ระยะทางที่ใกล้ที่สุด (d_{vc}) (หน่วย p.u.)	อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้น ต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. ที่แรงดัน 1 p.u.
		ต้น สาย	ปลาย สาย			
1	9	4	9	185.54	0.4974	0.0806
2	3	2	3	978.15	0.3499	0.0002
3	4	2	4	602.68	0.3903	0.0071
4	20	13	14	7538.04	0.3485	0.0000
5	19	12	13	1646.44	0.3485	0.0000
6	17	9	14	166.21	0.3990	0.0308
7	6	4	3	726.43	0.4219	0.0102
8	12	6	12	261.52	0.3634	0.0060
9	10	5	6	314.66	0.7356	0.1232
10	2	1	5	469.27	0.3935	0.0097
11	11	6	11	4405.55	0.3485	0.0000
12	18	11	10	254.07	0.3527	0.0019
13	8	4	7	1256.41	0.3733	0.0020
14	5	2	5	724.26	0.3948	0.0065
15	13	6	13	360.75	0.3834	0.0099
16	14	7	8	933.80	0.3485	0.0000
17	1	1	2	5383.30	0.3487	0.0000
18	15	7	9	972.22	0.3847	0.0038
19	16	9	10	281.74	0.3715	0.0084
20	7	5	4	1452.87	0.3514	0.0002

จากตารางที่ 6.27 แสดงขนาดตัวเก็บประจุซึ่งทำให้ได้ระยะทางที่ไกลที่สุดมีค่ามากที่สุด เมื่อระยะทางที่ไกลที่สุดขณะยังไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.3478 p.u. พร้อมทั้งแสดง อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. สำหรับลำดับสายส่งนั้น เรียงลำดับ ความเสี่ยงของสายส่งจากบนลงล่าง ซึ่งสายส่งที่อยู่ด้านบนจะมีความเสี่ยงเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดัน พังทลายในระบบมากกว่าสายส่งที่อยู่ด้านล่าง

สำหรับระบบทดสอบ 14 บัสนั้น สายส่งเส้นที่ 10 ซึ่งต่ออยู่กับบัสที่ 5 จะให้ทั้งระยะทางที่ไกลที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุมีค่ามากที่สุดในระบบทั้งสองค่า ดังนั้นสายส่งเส้นที่ 10 จึงเป็นสายส่งเส้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวในระบบ ส่วนสายส่งเส้นที่เหลือ เมื่อมองระยะทางที่ไกลที่สุดของแต่ละสายส่งโดยรวม เห็นได้ว่า ระยะทางที่ไกลที่สุดของแต่ละสายส่งมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยระยะทางที่ไกลที่สุดเท่ากับ 0.3774 p.u. และค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0259 p.u. ซึ่งค่าสถิติทั้งสองค่านี้ไม่ได้ นำสายส่งที่เหมาะสมที่สุดมาร่วมพิจารณาด้วย

6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างระบบ 9 บัสและ 14 บัส

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างระบบทดสอบ 9 บัสและระบบทดสอบ 14 บัส โดยแยกอธิบายตามลักษณะการติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งในตอนสุดท้ายแสดง การเปรียบเทียบผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานกับแบบอนุกรม

1) การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส

สำหรับระบบทดสอบทั้งสองระบบ เห็นได้ว่าระยะทางที่ไกลที่สุดของแต่ละบัสมีค่าใกล้เคียงกัน แต่บัสที่ถูกจัดว่าเป็นบัสอ่อนแอและบัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20 นั้น ปริมาณตัวเก็บประจุที่ติดตั้งเพื่อให้ระยะทางที่ไกลที่สุดมีค่ามากที่สุด จะต้องการปริมาณที่มากกว่าบัสอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ในระบบ ซึ่งทำให้อัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. มีค่าน้อยกว่าบัสอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ในระบบด้วย จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมด การติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวในระบบ ควรติดตั้ง ณ บัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายมาก ๆ (หรือก็คือ บัสที่แทบไม่มีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายต่ำในระบบเลย)

ยกตัวอย่าง เช่น ระบบทดสอบ 9 บัส บัสที่ 9 จะให้ระยะทางที่ไกลที่สุดมีค่ามากที่สุดในระบบ และมีอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุเป็นลำดับสอง ส่วนบัสที่ 5 ให้ระยะทางที่ไกลที่สุดมีค่าน้อยที่สุดในระบบ และมีอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บ

ประจุมีค่ามากที่สุดในระบบ เมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติ ระยะเวลาในการกู้ระบบจากสภาวะแรงดันพังทลาย ยิ่งเร็วยิ่งดี ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ณ บัสที่ 5 ซึ่งมีอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุมากที่สุด ย่อมส่งผลถึงความรวดเร็วในการกู้คืนระบบสำหรับค่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดนั้น แม้จะมีค่าน้อยที่สุดในระบบ แต่ก็มากพอที่จะให้ผู้ควบคุมจัดการกับระบบก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย ภายหลังจากติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ เช่น การตัดโหลดบางส่วนออกจากระบบ

ระบบทดสอบ 14 บัส เหตุผลการติดตั้งประจุหนึ่งตัวในระบบก็เหมือนกับที่กล่าวมาแล้วในระบบทดสอบ 9 บัส แต่อยากชี้ให้เห็นว่าบัสที่ 4 ซึ่งอยู่จัดว่าเป็นบัสอ่อนแอในระบบทดสอบ 14 บัส แต่ระยะทางที่ใกล้ที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ กลับมีค่าน้อยที่สุดในระบบทั้งคู่ ดังนั้นถ้าเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุบัสที่ 4 ก็ย่อมหมายถึงการเลือกที่ผิดพลาดควรเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ ณ บัสใดก็ได้ที่ไม่ใช่บัสที่ 4 บัสที่ 9 และบัสที่ 5 ในระบบทดสอบ 14 บัส

2) การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง

สำหรับระบบทดสอบทั้งสองระบบ การเลือกสายส่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุ ต้องคำนึงถึงบัสที่สายส่งต่ออยู่ โดยพิจารณาเฉพาะบัสที่เป็นบัสอ่อนแอและบัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20 เท่านั้น ซึ่งไม่จำเป็นว่าสายส่งที่เหมาะสมที่สุดต้องเป็นสายส่งที่ต่ออยู่กับบัสที่อ่อนแอที่สุด

ยกตัวอย่าง เช่น ระบบทดสอบ 9 บัส บัสที่ 1 ถูกจัดเป็นบัสอ่อนแอ ส่วนบัสที่ 9 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20 ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสายส่งที่ต่ออยู่กับสองบัสนี้เท่านั้น จะได้ว่าสายส่งเส้นที่ 1 ต่ออยู่กับบัสที่ 1 เป็นสายส่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวในระบบ เนื่องจากเป็นสายส่งที่ให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. มีค่ามากที่สุดในระบบทั้งสองค่า สำหรับกรณีนี้สายส่งเส้นที่ 1 เหมาะสมที่สุดต่ออยู่กับบัสอ่อนแอของระบบ

ระบบทดสอบ 14 บัส บัสที่ 2 และบัสที่ 3 ถูกจัดเป็นบัสอ่อนแอ ส่วนบัสที่ 4 บัสที่ 9 และบัสที่ 5 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20 ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะสายส่งที่ต่ออยู่กับห้าบัสนี้เท่านั้น จะได้ว่าสายส่งเส้นที่ 10 ต่ออยู่กับบัสที่ 5 เป็นสายส่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวในระบบ เนื่องจากเป็นสายส่งที่ให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. มีค่ามากที่สุดในระบบทั้งสองค่า สำหรับกรณีนี้สายส่งเส้นที่ 10 เหมาะสมที่สุดต่ออยู่กับบัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20

3) เปรียบเทียบผลการติดตั้งตัวเก็บประจุระหว่างที่บัสกับที่สายส่ง

สำหรับระบบทดสอบทั้งสองระบบ การติดตั้งตัวเก็บแบบอนุกรม ณ สายส่งที่เหมาะสมจะทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน ณ บัส เนื่องจาก การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ณ สายส่งที่เหมาะสม จะส่งผลต่อการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ณ บริเวณรอบๆสายส่ง ทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดของระบบดีขึ้น ส่วนการติดตั้งเก็บประจุแบบขนานที่บัส จะเป็นการช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟ ณ บัสที่ตัวเก็บประจุต่ออยู่เสียมากกว่า

กรณีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ณ สายส่งเส้นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สายส่งเส้นที่เหมาะสม การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน ณ บัสจะให้ผลของระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้นที่มากกว่า ดูได้จากค่าเฉลี่ยระยะทางที่ใกล้ที่สุดกรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยระยะทางที่ใกล้ที่สุดกรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่ง ซึ่งไม่ได้นำสายส่งที่เหมาะสมมาพิจารณาด้วย สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของระยะทางที่ใกล้ที่สุด กรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสจะมีมากกว่ากรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่ง แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะให้ระยะที่ใกล้ที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างกันมากกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่ง ดังแสดงในตารางที่ 6.28

ตารางที่ 6.28 ข้อมูลสถิติของระยะทางที่ใกล้ที่สุด สำหรับระบบ 9 บัสและ 14 บัส

ข้อมูลสถิติ (p.u.) ของระยะทางที่ใกล้ที่สุด	การติดตั้งตัวเก็บประจุ			
	ระบบทดสอบ 9 บัส		ระบบทดสอบ 14 บัส	
	ที่บัส	ที่สายส่ง*	ที่บัส	ที่สายส่ง**
ค่าเฉลี่ย	2.6480	2.3776	0.5252	0.3774
ค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย	0.1880	0.0674	0.0441	0.0259

*ไม่ได้นำสายส่งเส้นที่ 1 ในระบบ 9 บัส (ซึ่งให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่า 4.3012 p.u.) มาพิจารณา

**ไม่ได้นำสายส่งเส้นที่ 10 ในระบบ 14 บัส (ซึ่งให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดมีค่า 0.7356 p.u.) มาพิจารณา

ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุหนึ่งตัวเข้าไปในระบบทดสอบทั้งสองระบบ หากไม่ทราบแน่ชัดว่าสายเส้นไหนคือสายส่งเส้นที่เหมาะสม ควรเลือกไปติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสจะเหมาะสมกว่าเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่ง และเลือกติดตั้ง ณ บัสที่มีความเสี่ยงเป็นสาเหตุการเกิดแรงดันพังทลายต่ำ ๆ (หรือก็คือติดตั้ง ณ บัสที่ถูกจัดว่าเป็นบัสแข็งแรง)

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะแรงดันพังทลายในระบบส่ง ทั้งในส่วนของบัส และในส่วนของสายส่ง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสและสายส่ง ซึ่งคำนวณมาจากเส้นโค้ง P-Q นอกจากการศึกษาตำแหน่งของบัสและสายส่งที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบแล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการศึกษานาตตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ซึ่งถูกนำมาติดตั้งที่บัสแบบขนานและที่สายส่งแบบอนุกรม เพื่อทำให้ระยะทางจากจุดทำงาน เริ่มต้นไปยังจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด

สำหรับผลการทดสอบ แสดงการจัดลำดับของบัสและสายส่งที่มีความเสี่ยงต่อการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบ โดยเรียงลำดับจากความเสี่ยงสูงไปยังความเสี่ยงต่ำ พร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุกับขนาดตัวเก็บประจุ ที่มีผลต่อการเพิ่มระยะทางจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด มาแสดงให้เห็นอีกด้วย

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งเป็นสมการพาราโบลาแบบหมุนแกน มีจุดโฟกัสอยู่ที่จุดกำเนิดบนระนาบ 2 มิติ

2) การจัดลำดับความเสี่ยงของสายส่ง นอกจากการพิจารณาค่าระยะทางที่ใกล้ที่สุดไปยังเส้นโค้ง P-Q และขนาดพื้นที่ในเส้นโค้ง P-Q แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลจากบัสที่สายส่งส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปให้ด้วย จึงจะเป็นการจัดลำดับสายส่งที่พิจารณาครอบคลุมถึงโครงสร้างระบบ

3) สำหรับระบบทดสอบทั้งสองระบบ มีสายส่งที่เหมาะสมที่สุดอยู่หนึ่งเส้นที่เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าไปแล้ว จะทำให้ระยะทางที่ใกล้ที่สุดและอัตราส่วนระยะทางที่เพิ่มขึ้นต่อขนาดตัวเก็บประจุ 1 p.u. มีค่ามากกว่าที่สุดเมื่อเทียบกับสายส่งเส้นอื่นๆ ในระบบ อีกทั้งยังทำให้ระยะที่ใกล้ที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัสด้วย สายส่งเส้นที่เหมาะสมที่สุดนี้ ไม่จำเป็นต้องเป็นสายส่งที่ต่ออยู่กับบัสอ่อนแอที่สุดในระบบ แต่จะเป็นหนึ่งใน

สายส่งที่ต่ออยู่กับบัสที่ถูกจัดว่าเป็นบัสอ่อนแอ หรือเป็นบัสที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายใกล้เคียง 0.20

4) หากไม่ทราบตำแหน่งของสายส่งที่เหมาะสม ควรเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัส จะดีกว่าเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่สายส่ง เพราะค่าเฉลี่ยระยะทางที่สั้นที่สุดกรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยระยะทางที่สั้นที่สุดกรณีติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่ง ซึ่งไม่นำสายส่งที่เหมาะสมมาร่วมพิจารณาค่าเฉลี่ยด้วย

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากขั้นตอนต่างๆ ที่ได้นำเสนอและผลการทดสอบที่ได้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1) ควรมีการนำปัญหาข้อจำกัดของตัวแปรสถานะ (ขนาดและมุมของแรงดัน) เข้ามาร่วมพิจารณา สำหรับการคำนวณจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด และการคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

2) ควรมีการนำปัญหาข้อจำกัดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เข้ามาร่วมพิจารณา สำหรับการคำนวณขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

3) ควรมีการพิจารณาลำดับความเสี่ยงของบัสและสายส่ง ว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ในการติดตั้งตัวเก็บประจุหลาย ๆ ขนาด โดยพิจารณาตั้งแต่ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ ไปจนถึงมีการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขนาดเหมาะสม ณ บัสหรือสายส่ง

4) ควรมีการนำหลักการที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับวิธี MINLP (Mixed integer nonlinear programming) เพื่อคำนวณทั้งตำแหน่งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปในระบบ

5) ควรพิจารณานำอุปกรณ์ FACTS (Flexible ac transmission systems) มาติดตั้งแทนการใช้ตัวเก็บประจุ เช่น การติดตั้ง SVC (Static var compensator) แบบขนานที่บัส และการติดตั้ง TCSC (Thyristor controlled series capacitor) แบบอนุกรมที่สายส่ง เป็นต้น กรณีติดตั้งตัวอุปกรณ์ FACTS แยกหนึ่งตัว ควรเลือกติดตั้งที่สายส่งเส้นที่เหมาะสม (ซึ่งทำให้ระยะทางจากจุดทำงานเริ่มต้นไปยังจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด มีค่ามากกว่าการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่งเส้นอื่น หรือการเลือกติดตั้งที่บัส) จะเป็นการคุ้มทุนในการติดตั้งที่สุด

รายการอ้างอิง

1. Ian Dobson. Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications 39 (March 1992): 240-243.
2. Claudio, A., On bifurcations, voltage collapse and load modeling. IEEE Transactions on Power Systems 10 (February 1995): 512-522.
3. Hiroyuki Mori., and Fumitaka Iizuka. An Efficient method for calculating power flow solutions and the closest bifurcation point using mathematical programming. IEEE (1998): 570-573.
4. พรประนต ดิษยบุตร. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวโดยอาศัยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร วิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. Ian Dobson.; Liming Lu.; and Yi Hu. A direct method for computing a closest saddle node bifurcation in the load power parameter space of an electric power system. IEEE: 3019-3022.
6. Fernando Alvarado.; Ian Dobson.; and Yi Hu. Computation of closest bifurcations in power systems. IEEE Transactions on Power Systems 9 (May 1994): 918-928.
7. Ian Dobson., and Liming Lu. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. IEEE Transactions on Power Systems 8 (August 1993): 905-913.
8. Ian Dobson. Computing a closest bifurcation instability in multidimensional parameter space. Journal of Nonlinear Science 3 (1993): 307-327.
9. Haque, M.H. Determination of steady-state voltage stability limit using P-Q curve. IEEE Power Engineering Review (April 2002): 71-72.
10. Sobierajski, M.; Wilkosz, K.; Bertsch, J.; and Fulczyk, M. Using bus impedance and bus P-Q curve for voltage stability control. IEEE (2001): 79-84.
11. Claudio, A. Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations. IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications 45 (March 1998): 225-237.
12. Claudio, A. Computing system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations. IEEE (1997): 1065-1068.

13. Carson W. Taylor. Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994.
14. Seydel, R. Practical bifurcation and stability analysis from equilibrium to chaos. Second edition. New York: Springer-Verlag, 1994.
15. Glenn W. Stagg., and Ahmed H. El-Abiad. Computer methods in power system analysis. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.
16. Ian Dobson. The irrelevance of load dynamics for the loading margin to voltage collapse and its sensitivities. Bulk Power system Voltage Phenomena – III: Voltage Stability, Security & Control (August 1994).
17. Sobierajski, M.; Wilkosz, K.; Bertsch, J.; Fulczyk, M.; and Rehtanz, C. Prompt identification of weak transmission lines regarding voltage collapse. Power System Management and Control (17-19 April 2002): 285-290.
18. Stephen G. Nash., and Ariela Sofer. Linear and nonlinear programming. International edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
19. Edwin K.P. Chong., and Stanislaw H. Zak. An introduction to optimization. Second edition. New York: John Wiley & Sons, 2001.
20. รศ.ศรีบุตร แวเวจริญ และ ผศ.ดร.ชนศักดิ์ ป้ายเที่ยง. คณิตศาสตร์วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์. 2000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. ชุดที่ 7 : เรขาคณิตวิเคราะห์และเขียนกราฟ 2มิติ, 3มิติ. กรุงเทพฯ: บริษัท วงตะวัน จำกัด, 2544.
21. Nickalls, R.W.D. A new approach to solving the cubic : Cardan's solution revealed. The Mathematical Gazette 77 (1993): 354-359.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมการระดับชั้นที่สองแบบหมุนแกน

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-Q ซึ่งเป็นสมการพาราโบลาแบบหมุนแกน ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นจึงได้นำหลักการพื้นฐานสมการระดับชั้นที่สองแบบหมุนแกน [20] มาอธิบายในภาคผนวก ก

ก.1 การหมุนแกน

การหมุนแกน คือ การแปลงระบบแกนพิกัด (Coordinate Axes) ซึ่งจุดกำเนิด (Origin) อยู่ตำแหน่งเดิม และหมุนแกนไปเป็นมุมคงที่มุมหนึ่งรอบจุดคงที่ดังกล่าว

ภาคตัดกรวยใด ๆ ที่มีแกนขนานกับแกนพิกัดสามารถแทนในรูปสมการระดับชั้นที่สอง

$$Ax^2 + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (\text{ก.1})$$

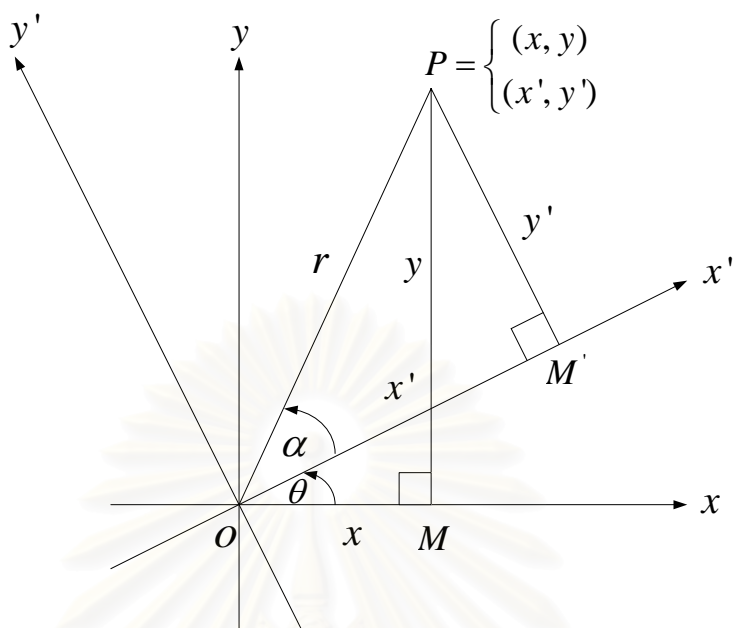
สำหรับสมการระดับชั้นที่สองใด ๆ $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$ โดยที่ $B \neq 0$ ยังแทนภาคตัดกรวยหรือภาคตัดกรวยเสื่อมกลายเป็น (Degenerate Conic) ที่มีแกนขนานกับแกนพิกัดได้ ในการศึกษาการวาดกราฟของสมการระดับชั้นที่สองใด ๆ ที่ $B \neq 0$ นี้ จะสามารถกำจัดเทอม Bxy ออกไปจากสมการได้โดยใช้วิธีการหมุนแกน

ก.2 การหาภาวะของการหมุนแกนว่าจะต้องหมุนแกนไปเท่าใดจึงจะทำให้เทอม xy ในสมการระดับชั้นที่สองใด ๆ ที่ $B \neq 0$ หายไป

สมมติสมการระดับชั้นที่สองใด ๆ มี $B \neq 0$ เขียนเป็น

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (\text{ก.2})$$

สมมติว่าหมุนแกน ox และ oy ไปเป็นมุม θ โดยที่ $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ถ้า (x', y') เป็นพิกัดของจุด P เมื่อเทียบกับแกน ox' และ oy' ใหม่ และ (x, y) เป็นพิกัดของจุด P เมื่อเทียบกับแกน ox และ oy เดิม



รูปที่ ก.1 แสดงพิกัดจุด P บนแกนพิกัด $x-y$ และบนพิกัด $x'-y'$

จากรูปที่ ก.1 เห็นได้ว่า $OM' = OP \cos(\alpha)$ และ $PM' = OP \sin(\alpha)$ จะได้ $x' = r \cos(\alpha)$ และ $y' = r \sin(\alpha)$ ส่วน $OM = OP \cos(\theta + \alpha)$ และ $PM = OP \sin(\theta + \alpha)$ จะได้

$$\begin{aligned} OM &= r[\cos(\theta) \cos(\alpha) - \sin(\theta) \sin(\alpha)] \\ &= [r \cos(\alpha)] \cos(\theta) - [r \sin(\alpha)] \sin(\theta) \\ &= x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta) \end{aligned} \quad (\text{ก.3})$$

และ

$$\begin{aligned} PM &= r[\sin(\theta) \cos(\alpha) + \cos(\theta) \sin(\alpha)] \\ &= [r \cos(\alpha)] \sin(\theta) + [r \sin(\alpha)] \cos(\theta) \\ &= x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta) \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

นั่นคือ

$$x = x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta) \quad (\text{ก.5})$$

$$y = x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta) \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อต้องการเขียน x' และ y' ในเทอมของ x และ y ก็สามารถหาได้จากสมการข้างล่าง

นี้

$$x' = \frac{\begin{vmatrix} x & -\sin(\theta) \\ y & \cos(\theta) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix}} = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$$

และ

$$y' = \frac{\begin{vmatrix} \cos(\theta) & x \\ \sin(\theta) & y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix}} = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$$

นั่นคือ

$$x' = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (\text{ก.7})$$

$$y' = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \quad (\text{ก.8})$$

แทน x และ y ในเทอมของ x' และ y' ลงในสมการ (ก.2) จัดสมการใหม่ได้

$$\begin{aligned} & A[x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta)]^2 + B[x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta)][x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta)] \\ & + C[x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta)]^2 + D[x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta)] + E[x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta)] \\ & + F = 0 \end{aligned} \quad (\text{ก.9})$$

ซึ่งจัดใหม่ได้เป็น

$$A' x'^2 + B' x' y' + C' y'^2 + D' x' + E' y' + F' = 0 \quad (\text{ก.10})$$

โดยที่

$$A' = A \cos^2(\theta) + B \sin(\theta) \cos(\theta) + C \sin^2(\theta) \quad (\text{ก.11})$$

$$B' = B \cos(2\theta) + (C - A) \sin(2\theta) \quad (\text{ก.12})$$

$$C' = A \sin^2(\theta) - B \sin(\theta) \cos(\theta) + C \cos^2(\theta) \quad (\text{ก.13})$$

$$D' = D \cos(\theta) + E \sin(\theta) \quad (\text{ก.14})$$

$$E' = E \cos(\theta) - D \sin(\theta) \quad (\text{ก.15})$$

$$F' = F \quad (\text{ก.16})$$

แต่เราต้องการหมุนแกนให้เทอม xy หายไปหรือสัมประสิทธิ์ของเทอม xy เท่ากับศูนย์ในสมการ (ก.10) จะต้องเลือกให้ θ ที่ทำให้ $B' = 0$ จากสมการ (ก.12) ดังนั้นให้ $B' = 0$ จะได้

$$B[\cos^2(\theta) - \sin^2(\theta)] + 2[C - A]\sin(\theta)\cos(\theta) = 0$$

$$B \cos(2\theta) + (C - A)\sin(2\theta) = 0$$

$$\frac{\cos(2\theta)}{\sin(2\theta)} = \frac{A - C}{B}$$

นั่นคือ
$$\cot(2\theta) = \frac{A - C}{B} \quad (\text{ก.17})$$

สมการ $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$ อาจจะแปลงเป็นสมการรูปใหม่เป็น $A'x'^2 + C'y'^2 + D'x' + E'y' + F' = 0$ ได้ ถ้าเราหมุนแกนไปเป็นมุม θ ซึ่งมุม θ หาได้จากสูตร $\cot(2\theta) = \frac{A - C}{B}$ ก่อนแล้วจึงหา $\cos(\theta)$ และ $\sin(\theta)$ จากสูตร

$$\cos(\theta) = \sqrt{\frac{1 + \cos(2\theta)}{2}} \quad \text{เมื่อ } 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad (\text{ก.18})$$

และ
$$\sin(\theta) = \sqrt{\frac{1 - \cos(2\theta)}{2}} \quad \text{เมื่อ } 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad (\text{ก.19})$$

และจะได้ว่า

$$(B')^2 - 4A'C' = B^2 - 4AC \quad (\text{ก.20})$$

$$A' + C' = A + C \quad (\text{ก.21})$$

สมการระดับชั้นที่สอง ถ้า $B \neq 0$ และ $A = C$ ให้ใช้การหมุนแกนเป็นมุม $\theta = 45^\circ$ แล้วจะสามารถกำจัดเทอม xy ได้

ก.3 การจำแนกประเภทของภาคตัดกรวย

ถ้าสมการ $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$ เป็นสมการที่มีกราฟเป็นภาคตัดกรวยแบบใดแบบหนึ่ง จะได้ว่า

- 1) ถ้า $B^2 - 4AC < 0$ แล้วกราฟจะเป็นรูปวงรี
- 2) ถ้า $B^2 - 4AC = 0$ แล้วกราฟจะเป็นรูปพาราโบลา
- 3) ถ้า $B^2 - 4AC > 0$ แล้วกราฟจะเป็นรูปไฮเพอร์โบลา

โดยเรียก $B^2 - 4AC$ ว่าค่าดิสคริมิแนนต์ (Discriminant) ของสมการ

เนื่องจากภายหลังการหมุนแกน $B' = 0$ จึงทำให้ $B^2 - 4AC = -4A'C'$ ดังนั้นจึงสามารถสังเกตจากเครื่องหมายของ $-4A'C'$ ได้ว่ากราฟเมื่อเทียบแกนใหม่เป็นกราฟชนิดใด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

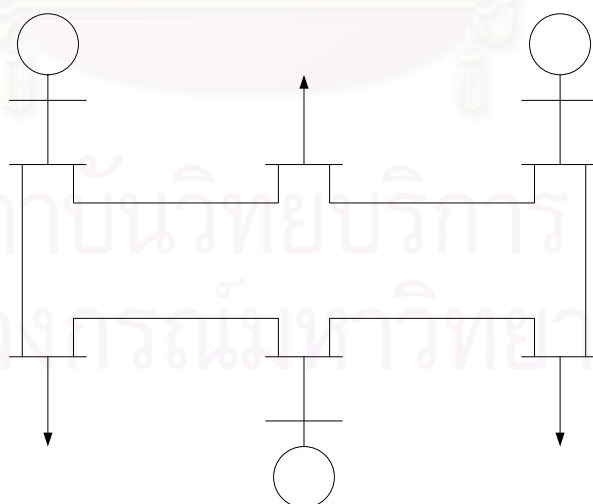
ภาคผนวก ข

ระบบทดสอบ

ภาคผนวก ข นี้แสดงข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 9 บัส และข้อมูลของระบบทดสอบมาตรฐาน 14 บัส โดยข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 9 บัสนี้เป็นข้อมูลในโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโพลว์ MATPOWER 2 ซึ่งพัฒนาโดย Power System Engineering Research Center (PSERC), Cornell University

ข้อมูลของระบบทดสอบ 14 บัส บางข้อมูลถูกดัดแปลงให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโพลว์ MATPOWER พร้อมทั้งมีการแก้ไขข้อมูลกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นของโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สภาวะแรงดันพังทลายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้จะไม่อยู่ในรูปแบบเดิม ข้อมูลของตัวต่อขนานที่บัสจะเขียนในรูปของโหลดเป็น MW ที่แรงดัน 1.0 per unit และการฉีดของกำลังเป็น MVar ที่แรงดัน 1.0 per unit ส่วนกำลังฐานมีค่าเท่ากับ 100 MVar

ข.1 ระบบทดสอบขนาด 9 บัส



รูปที่ ข.1 ระบบทดสอบขนาด 9 บัส

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 9 บัส และแรงดันที่ได้จากผลการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ สำหรับกรณีฐาน

หมายเลข บัส	ประเภทบัส	โหลด		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)		แรงดันสำหรับกรณีฐาน	
		P (MW)	Q (MVar)	G_s (MW)	B_s (MVar)	ขนาด(p.u.)	มุม(deg.)
1	บัสอ้างอิง	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
2	บัสแรงดัน	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	9.6687
3	บัสแรงดัน	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	4.7711
4	โหลดบัส	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9870	-2.4066
5	โหลดบัส	90.0000	30.0000	0.0000	0.0000	0.9755	-4.0173
6	โหลดบัส	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0034	1.9256
7	โหลดบัส	100.0000	35.0000	0.0000	0.0000	0.9856	0.6215
8	โหลดบัส	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9962	3.7991
9	โหลดบัส	125.0000	50.0000	0.0000	0.0000	0.9576	-4.3499

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 9 บัส

หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้า		ค่าขีดจำกัดกำลังจินตภาพ		ขนาด แรงดัน (p.u.)	ค่าขีดจำกัดกำลังจริง	
	P_g (MW)	Q_g (MVar)	Q_{max} (MVar)	Q_{min} (MVar)		P_{max} (MW)	P_{min} (MW)
1	0.0000	0.0000	300.0000	-300.0000	1.0000	250.0000	10.0000
2	163.0000	0.0000	300.0000	-300.0000	1.0000	300.0000	10.0000
3	85.0000	0.0000	300.0000	-300.0000	1.0000	270.0000	10.0000

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 14 บัส และแรงดันที่ได้จากผลการวิเคราะห์โหลดโพลว์ สำหรับกรณีฐาน

หมายเลข บัส	ประเภทบัส	โหลด		ตัวต่อขนาน (กำลังที่แรงดัน 1.0 p.u.)		แรงดันสำหรับกรณีฐาน	
		P (MW)	Q (MVar)	G_S (MW)	B_S (MVar)	ขนาด(p.u.)	มุม(deg.)
1	บัสอ้างอิง	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0600	0.0000
2	บัสแรงดัน	21.7000	12.7000	0.0000	0.0000	1.0520	-3.8632
3	บัสแรงดัน	94.2000	19.0000	0.0000	0.0000	1.0260	-11.8160
4	โหลดบัส	47.8000	-3.9000	0.0000	0.0000	1.0137	-9.2437
5	โหลดบัส	7.6000	1.6000	0.0000	0.0000	1.0166	-7.7665
6	โหลดบัส	11.2000	7.5000	0.0000	0.0000	0.9777	-13.3940
7	โหลดบัส	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0059	-12.6550
8	โหลดบัส	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0234	-12.6550
9	โหลดบัส	29.5000	16.6000	0.0000	19.0000	0.9922	-14.5290
10	โหลดบัส	9.0000	5.8000	0.0000	0.0000	0.9817	-14.6780
11	โหลดบัส	3.5000	1.8000	0.0000	0.0000	0.9761	-14.2140
12	โหลดบัส	6.1000	1.6000	0.0000	0.0000	0.9636	-14.4150
13	โหลดบัส	13.5000	5.8000	0.0000	0.0000	0.9605	-14.5610
14	โหลดบัส	14.9000	5.0000	0.0000	0.0000	0.9590	-15.7120

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 14 บัส

หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้า		ค่าขีดจำกัดกำลังจินตภาพ		ขนาด แรงดัน (p.u.)	ค่าขีดจำกัดกำลังจริง	
	P_g (MW)	Q_g (MVar)	Q_{max} (MVar)	Q_{min} (MVar)		P_{max} (MW)	P_{min} (MW)
1	100.0000	0.0000	250.0000	-250.0000	1.0600	300.0000	10.0000
2	83.1000	0.0000	200.0000	-200.0000	1.0450	200.0000	10.0000
3	0.0000	0.0000	60.0000	-60.0000	1.0100	60.0000	5.0000
6	0.0000	0.0000	50.0000	-50.0000	1.0700	50.0000	5.0000
8	0.0000	0.0000	60.0000	-60.0000	1.0900	60.0000	5.0000

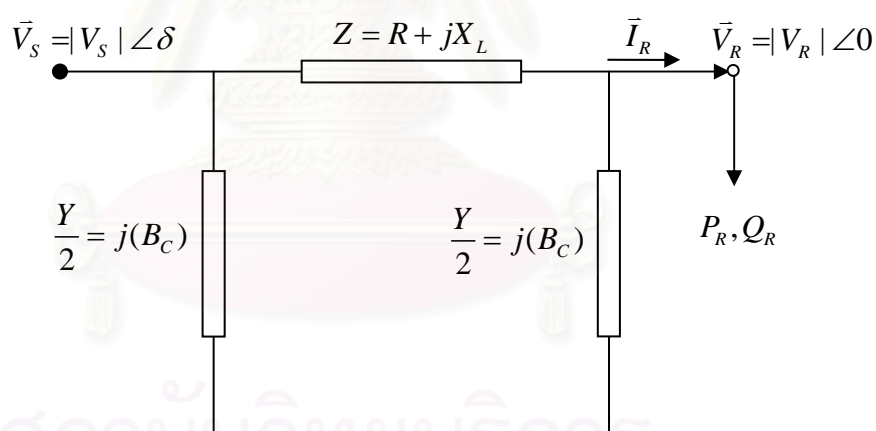
ตารางที่ ข.6 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 14 บัส

สายส่ง เส้นที่	จากบัส	ถึงบัส	R (p.u.)	X (p.u.)	Total line charging (p.u.)	Rating (MVA)	อัตราส่วน หม้อแปลง	มุมเลื่อน เฟส (องศา)
1	1	2	0.0194	0.0592	0.0528	200.0000	-	-
2	1	5	0.0540	0.2230	0.0492	100.0000	-	-
3	2	3	0.0470	0.1980	0.0438	100.0000	-	-
4	2	4	0.0581	0.1763	0.0000	100.0000	-	-
5	2	5	0.0570	0.1739	0.0340	100.0000	-	-
6	3	4	0.0670	0.1710	0.0000	100.0000	-	-
7	4	5	0.0134	0.0421	0.0346	100.0000	-	-
8	4	7	0.0000	0.2045	0.0128	100.0000	-	-
9	4	9	0.0000	0.5389	0.0000	100.0000	-	-
10	5	6	0.0000	0.2349	0.0000	100.0000	-	-
11	6	11	0.0950	0.1989	0.0000	100.0000	-	-
12	6	12	0.1229	0.2558	0.0000	100.0000	-	-
13	6	13	0.0662	0.1303	0.0000	100.0000	-	-
14	7	8	0.0000	0.1762	0.0000	100.0000	-	-
15	7	9	0.0000	0.1100	0.0000	100.0000	-	-
16	9	10	0.0318	0.0845	0.0000	100.0000	-	-
17	9	14	0.1271	0.2704	0.0000	100.0000	-	-
18	10	11	0.0821	0.1921	0.0000	100.0000	-	-
19	12	13	0.2209	0.1999	0.0000	100.0000	-	-
20	13	14	0.1709	0.3480	0.0000	100.0000	-	-

ภาคผนวก ค

สัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q สำหรับสายส่ง

การวิเคราะห์ระบบสายส่งว่ามีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันพังทลายหรือไม่นั้น จะต้องทำการคำนวณจุดทำงานที่เกิดสภาวะแรงดันพังทลายก่อน ไม่ว่าจะด้วยวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องหรือวิธีการหาค่าเหมาะสม ทั้งนี้ก็เพื่อนำค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้มาประเมินว่าสายส่งเส้นไหนควรระบุว่าเป็นสายส่งอ่อนแอหรือไม่ ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q ที่นำเสนอนี้คำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ซึ่งบ่งบอกถึงขนาดพื้นที่ที่ที่กัลังไฟฟ้าสามารถส่งผ่านสายส่งโดยไม่เกิดแรงดันพังทลายขึ้น ถึงแม้ความแม่นยำในการระบุสายส่งอ่อนแอจะมีน้อยกว่าวิธีที่ระบุโดยการคำนวณจุดแรงดันพังทลาย แต่ก็มีความรวดเร็วในการคำนวณและสามารถบ่งบอกศักยภาพของสายส่งที่มีต่อสภาวะแรงดันพังทลายได้ อีกทั้งยังใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์แรงดันพังทลายในระบบ

รูปที่ ค.1 วงจรสมมูลสายส่งความยาวแบบกลางในรูปแบบ π

จากบทที่ 4 ได้แสดงวงจรสมมูลสายส่งความยาวแบบกลางในรูปแบบ π ดังรูปที่ ค.1 โดยสามารถพิสูจน์สมการเส้นโค้ง P-Q ได้ดังสมการ (ค.1) ซึ่งอยู่ในระบบพิกัดฉาก เพื่อความสะดวกในการหาปริพันธ์ (Integrate) จึงแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วได้ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ ค.1

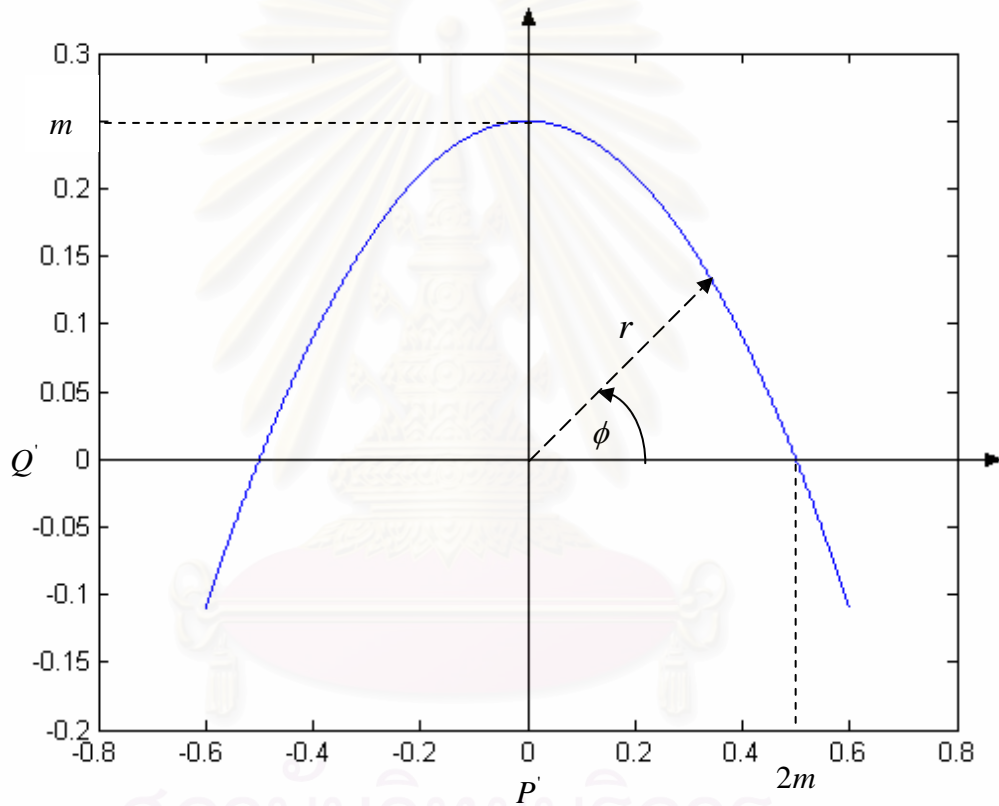
$$(P'_R)^2 = -4m(Q'_R - m) \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ $m = \frac{|V_S|^2}{4\sqrt{c_1 c_4}}$

$$c_1 = (1 - X_L B_C)^2 + (R B_C)^2$$

$$c_4 = (R)^2 + (X_L)^2$$

ค.1 สมการพิกัดเชิงขั้วของเส้นโค้ง P-Q



รูปที่ ค.2 เส้นโค้ง P-Q ของสายส่งภายหลังการหมุนแกน โดยที่ $k=1$

สมการ (ค.1) เป็นสมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งภายหลังการหมุนแกน สามารถนำมาวาดรูปได้ดังรูปที่ ค.2 เพิ่มพจน์ $(Q'_R)^2$ ลงในสมการ (ค.1) เพื่อจัดพจน์ใหม่ให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้วได้ดังนี้

$$(P'_R)^2 + (Q'_R)^2 = -4m(Q'_R) + (2m)^2 + (Q'_R)^2$$

$$(P'_R)^2 + (Q'_R)^2 = (2m)^2 - 4m(Q'_R) + (Q'_R)^2$$

$$(P'_R)^2 + (Q'_R)^2 = (2m - Q'_R)^2 \quad (\text{ค.2})$$

แทน $r = \sqrt{(P'_R)^2 + (Q'_R)^2}$ และ $Q'_R = r \sin(\phi)$ ในสมการ (ค.2) ได้

$$r + r \sin(\phi) = 2m$$

$$r = \frac{2m}{1 + \sin(\phi)} \quad (\text{ค.3})$$

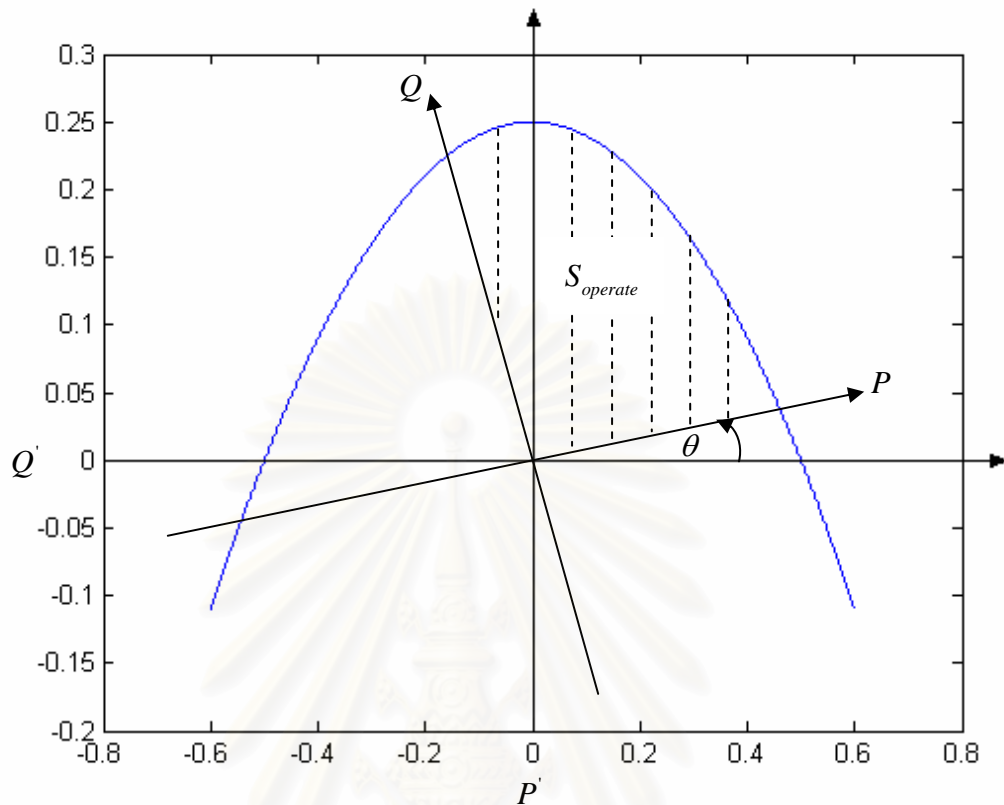
สุดท้ายเขียนให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้วได้ดังสมการ (ค.3)

ค.2 พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q

เมื่อทราบสมการพิกัดเชิงขั้วของเส้นโค้ง P-Q แล้วทำการปริพันธ์สมการ (ค.3) เพื่อหาสมการพื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q ของสายส่ง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \int r d\phi = R(\phi) &= 2m \int \frac{1}{1 + \sin(\phi)} d\phi \\ &= 2m \left[\frac{-2}{1 + \tan(\phi/2)} \right] \\ R(\phi) &= \frac{-4m}{1 + \tan(\phi/2)} + C \end{aligned} \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ C แทนค่าคงที่



รูปที่ ค.3 เส้นโค้ง P-Q ของสายส่งภายหลังการหมุนแกน โดยที่ $k = 1$

สมการคำนวณพื้นที่ที่หาได้นี้เป็นสมการสำหรับหาพื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q กรณีที่สายส่งมีการหมุนแกนแล้ว พื้นที่ที่ใช้สำหรับพิจารณานั้นคือพื้นที่ในส่วนจตุภาค (Quadrant) ที่ 1 (บริเวณที่ค่า P และ Q มีค่าเป็นบวกทั้งคู่) ของเส้นโค้ง P-Q ขณะยังไม่มีการหมุนแกน แต่เมื่อสมการเส้นโค้ง P-Q มีการหมุนแกนจะทำให้พื้นที่ในจตุภาคที่ 1 เลื่อนตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ ค.3 ดังนั้นกำหนดขอบเขตปริพันธ์ให้ $R(\phi)$ โดย $\theta \leq \phi \leq (\frac{\pi}{2} + \theta)$ เมื่อ $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$ ได้สมการออกมาดังนี้

$$\begin{aligned} \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}+\theta} r d\phi &= R\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - R(\theta) \\ &= \frac{-4m}{1 + \tan\left(\frac{(\pi/2) + \theta}{2}\right)} - \frac{-4m}{1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \end{aligned}$$

$$S_{operate} = -4m \left[\frac{1}{1 + \tan\left(\frac{(\pi/2) + \theta}{2}\right)} - \frac{1}{1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \quad (ค.5)$$

โดยที่ θ คือมุมหมุนแกน หน่วยเรเดียน

มุม θ เท่ากับศูนย์เมื่อสมการเส้นโค้ง P-Q ของสายส่งไม่มีการหมุน และมีค่าไม่เกิน 45 องศา (หรือ $\frac{\pi}{4}$ เรเดียน) เมื่อมีการหมุนแกน

จัดพจน์สมการ (ค.5) ใหม่ เมื่อ $\frac{1}{1 + \tan\left(\frac{(\pi/2) + \theta}{2}\right)} = \frac{1}{2} \left[1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$ ได้

$$S_{operate} = -4m \left[\frac{1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2} - \frac{1}{1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right]$$

$$= -4m \left[\frac{1 + \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{-2 \left(1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)} \right]$$

$$= -4m \left[\frac{-1}{1 + \cos(\theta) + \sin(\theta)} \right]$$

$$S_{operate} = \frac{4m}{1 + \cos(\theta) + \sin(\theta)} \quad (ค.6)$$

แทน $m = \frac{|V_s|^2}{4\sqrt{c_1 c_4}}$ ลงในสมการ (ค.6) ได้

$$S_{operate} = \frac{|V_s|^2}{\sqrt{c_1 c_4} \times [1 + \cos(\theta) + \sin(\theta)]} \quad (ค.7)$$

แทน $\sqrt{c_1 c_4} = \frac{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}{2}$ ลงในสมการ (ค.7) ได้สมการพื้นที่ทำงานออกมาดังนี้

$$S_{operate} = |V_s|^2 \left\{ \frac{2}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2} \times [1 + \cos(\theta) + \sin(\theta)]} \right\} \quad (ค.8)$$

ค.3 สัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q

พิจารณาสมการพื้นที่ทำงานที่ (ค.8) ได้สัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q (c_{br}) เท่ากับ

$$c_{br} = \frac{2}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2} \times [1 + \cos(\theta) + \sin(\theta)]} \quad (\text{ค.9})$$

พิจารณาสมการ (ค.9) พร้อมกับเงื่อนไข 3 ข้อ (ซึ่งพิสูจน์ไว้ในบทที่ 3) ตามข้างล่างนี้

1) กรณี $c_3^2 \geq c_2^2$ รู้ว่า $\cos(\theta) = \frac{|c_3|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$ และ $\sin(\theta) = \frac{|c_2|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$

2) กรณี $c_3^2 < c_2^2$ รู้ว่า $\cos(\theta) = \frac{|c_2|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$ และ $\sin(\theta) = \frac{|c_3|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}}$

3) $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$

ทำให้สรุปได้ว่า

1) กรณีพิจารณาให้ $\sqrt{c_3^2 + c_2^2}$ มีค่าคงที่ จะได้ว่า c_{br} มีค่ามากที่สุดที่ $\theta = 0$ และมีค่าน้อยสุดที่ $\theta = \frac{\pi}{4}$ ภายใต้ขอบเขต $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$

2) กรณีพิจารณาให้ θ เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า c_{br} ยังมีค่าน้อย เมื่อ $\sqrt{c_3^2 + c_2^2}$ ยังมีค่ามาก

โดยค่า c_{br} แปรผันตามค่าพื้นที่ทำงาน $S_{operate}$ ดังนั้นสามารถนำค่า c_{br} มาเป็นตัวบ่งบอกถึงขนาดพื้นที่การทำงานของสายส่งได้ ซึ่งพื้นที่การทำงานยิ่งมากเท่าไรก็ยิ่งเป็นการบ่งบอกว่าความน่าจะเป็นในสายส่งเส้นนั้นที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายในระบบยิ่งน้อยตามไปด้วย เขียนสมการ (ค.9) ใหม่ได้เป็น

$$c_{br} = \frac{2}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2} + |c_3| + |c_2|} \quad (\text{ค.10})$$

พิจารณาสมการ (ค.8) และสมการ (ค.10) เขียนสมการพื้นที่ทำงานได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned}
 S_{operate} &= |V_S|^2 \times c_{br} \\
 &= |V_S|^2 \left\{ \frac{2}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2} + |c_3| + |c_2|} \right\} \quad (\text{ค.11})
 \end{aligned}$$

ส่วนกรณีที่สมการเส้นโค้ง P-Q ไม่มีการหมุนแกน (ซึ่งหมายถึง $c_3 = 0$ หรือ $c_2 = 0$ แต่ต้องไม่เป็นศูนย์ทั้งคู่) สำหรับ $c_3 = 0$ จะได้

$$S_{operate} = \frac{|V_S|^2}{|c_2|} \quad (\text{ค.12})$$

และสำหรับ $c_2 = 0$ จะได้

$$S_{operate} = \frac{|V_S|^2}{|c_3|} \quad (\text{ค.13})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.4 ตัวอย่างพิจารณาสายส่งอ่อนแอกจากสัมประสิทธิ์เส้นโค้ง P-Q

ยกตัวอย่างระบบ 14 บัสในภาคผนวก ข มาแสดงการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์สายส่งอ่อนแอกด้วยสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q กับวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ผลการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์สายส่งด้วยสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q กับวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

เปรียบเทียบการวิเคราะห์สายส่งอ่อนแอกด้วยสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q กับวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์					
ลำดับ	สายส่ง	หมายเลขบัส		ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้เส้นโค้ง P-Q (c_{br})	วิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์
		ต้นสาย	ปลายสาย		ลำดับความเสี่ยง
1	9	4	9	0.9278	1
2	20	13	14	1.1029	4
3	19	12	13	1.3914	5
4	17	9	14	1.4362	6
5	12	6	12	1.5094	8
6	11	6	11	1.9444	11
7	2	1	5	1.9841	10
8	18	11	10	2.0705	12
9	10	5	6	2.1286	9
10	3	2	3	2.2389	2
11	6	4	3	2.3775	7
12	4	2	4	2.3805	3
13	5	2	5	2.4231	14
14	8	4	7	2.4450	13
15	14	7	8	2.8385	16
16	13	6	13	2.9195	15
17	15	7	9	4.5450	18
18	16	9	10	4.8403	19
19	1	1	2	7.1117	17
20	7	5	4	10.0390	20

จากตารางที่ ค.1 วิธีวิเคราะห์ด้วยสัมประสิทธิ์พื้นที่ได้เส้นโค้ง P-Q กับวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ แสดงให้เห็นว่าสายส่งเส้นที่ 9 มีความเสี่ยงในการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายมากที่สุด และสายส่งเส้นที่ 7 มีความเสี่ยงในการเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันพังทลายน้อยที่สุด ส่วนลำดับความเสี่ยงสายส่งเส้นอื่น ๆ ก็มีลำดับใกล้เคียงกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการวิเคราะห์สายส่งอ่อนแอโดยวิธีที่นำเสนอเป็นการหาจุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายที่ใกล้ที่สุด ดังนั้นการเพิ่มโหลดจึงเพิ่มไปยังทิศทางที่ทำให้สายส่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ได้เส้นโค้ง P-Q น้อย ต้องรับภาระในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างมาก

ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ได้เส้นโค้ง P-Q ไม่แนะนำให้ใช้ระบุสายส่งอ่อนแอในขณะปฏิบัติงานจริง (Real time operation) เพราะเป็นการพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของตัวสายส่งเท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งจริง หรือโครงสร้างระบบที่มีการเชื่อมต่ออย่างไร แต่ถึงกระนั้น ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ได้เส้นโค้ง P-Q ก็ยังมีประโยชน์ในการวางแผนและออกแบบเพื่อป้องกันระบบในสถานการณ์จริงได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อต้องวางแผนออกแบบติดตั้งสายส่งเพิ่มในระบบ ณ บริเวณที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างหนัก สายส่งเส้นนั้นก็ควรมีสัมประสิทธิ์พื้นที่ได้เส้นโค้ง P-Q ที่มากเพียงพอสำหรับการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยไม่ก่อให้เกิดแรงดันพังทลายขึ้นกับระบบ เป็นต้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรณนภา ฝาเสถียรพันธ์ เกิดวันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ.2543 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย