

การวิเคราะห์สมรรถนะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อเพิ่มความมั่นคงของระบบส่งไฟฟ้าโดย
พิจารณาผลเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง



นายกนก สุวรรณกาญจน์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

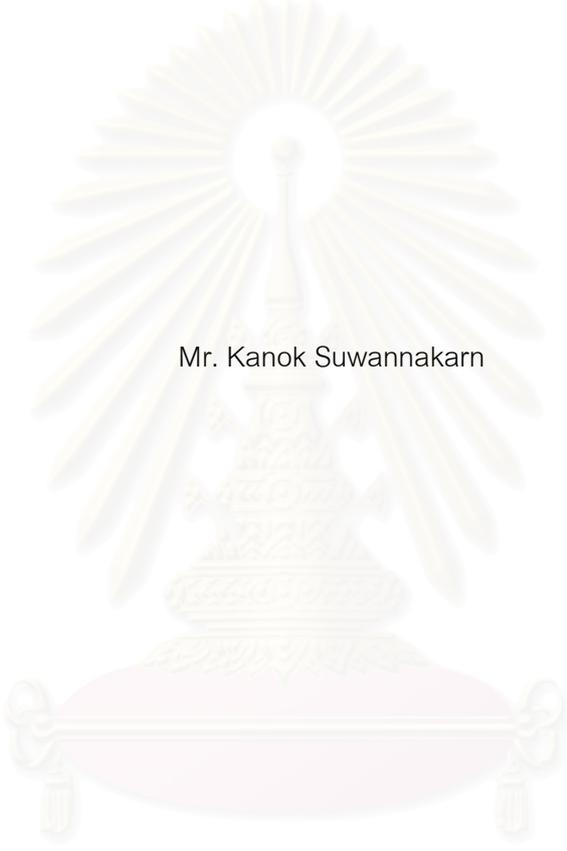
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE ANALYSIS OF ZONE-3 DISTANCE RELAY FOR ENHANCING
TRANSMISSION SYSTEM SECURITY CONSIDERING DYNAMICAL EFFECTS OF A
POWER SYSTEM



Mr. Kanok Suwannakarn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

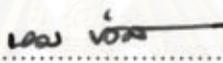
Chulalongkorn University

Academic year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

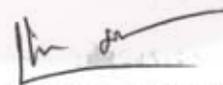
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สมรรถนะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อเพิ่มความมั่นคงของ
ระบบส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาผลเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย นายกนก สุวรรณกาญจน์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

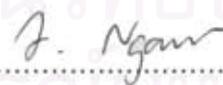
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(อาจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหฺร)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

กนก สุวรรณกาญจน์ : การวิเคราะห์สมรรถนะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อเพิ่มความมั่นคงของระบบส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาผลเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง.
(PERFORMANCE ANALYSIS OF ZONE-3 DISTANCE RELAY FOR ENHANCING TRANSMISSION SYSTEM SECURITY CONSIDERING DYNAMICAL EFFECTS OF A POWER SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 119 หน้า.

ปัญหาการเกิดสภาวะไหลตกของสายส่งอาจทำให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ทำงานผิดพลาดจนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างได้ แนวทางการแก้ปัญหาการตัดวงจรผิดพลาดนี้ได้ถูกเสนอไว้หลายวิธี แต่แนวคิดที่โดดเด่น คือ งานที่ประยุกต์ใช้องค์ประกอบสภาวะชั่วขณะร่วมกับแผนภูมิสถานะในการปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบสมรรถนะของวิธีการนี้ ก่อนการนำไปใช้งานจริงในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะการทำงานที่สำคัญของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่ได้ปรับปรุงแล้วโดยใช้ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส โดยคำนึงผลจากพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ระบบกระตุ้น และส่วนควบคุมความเร็วซึ่งมีผลต่อสภาวะชั่วคราวของระบบ ผลการทดสอบยืนยันว่าเมื่อทำการเพิ่มขึ้นตอนวิธีดังกล่าวในรีเลย์ระยะทางโซน 3 รีเลย์จะสามารถแยกความแตกต่างระหว่างการเกิดสภาวะไหลตกและการเกิดความผิดพลาด ทำให้ไม่เกิดการตัดวงจรผิดพลาดอันจะนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง นอกจากนี้สำหรับเหตุการณ์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบซึ่งจะเกิดสภาวะชั่วขณะรุนแรงจนรีเลย์อาจจะตัดสินใจว่ามีความผิดพลาดนั้น วิธีที่เสนอยังคงป้องกันการตัดวงจรผิดพลาดได้ ยิ่งไปกว่านั้นในเหตุการณ์ที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขณะที่เกิดสภาวะไหลตก ขั้นตอนวิธีนี้ยังคงให้ลำดับความสำคัญในการกำจัดความผิดพลาดก่อนซึ่งเป็นหน้าที่หลักของตัวป้องกันสำรอง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา.....2550.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4970201221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: BLACKOUT / ZONE-3 DISTANCE RELAY / TRASMISSION LINE PROTECTION

KANOK SUWANNAKARN : PERFORMANCE ANALYSIS OF ZONE-3 DISTANCE RELAY FOR ENHANCING TRANSMISSION SYSTEM SECURITY CONSIDERING DYNAMICAL EFFECTS OF A POWER SYSTEM. THESIS ADVISOR: NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 119 pp

The problem of transmission line overload could result in mal-operation of zone 3 distance relay and bring about a system blackout. There are many algorithms which have been proposed for solving this mal-trip problem. An outstanding one is the concept which employs transient components and state diagram for improving zone 3 distance relay. Verification of its performance on a real power system is the next important step before actual implementation.

This thesis examines crucially distinct operational functions of the enhanced zone 3 distance relay using the 9-bus WSCC test system, where dynamics of synchronous generators, excitation systems, and governor controls which could have an impact on the identified transient components, are also taken into account. Simulated test results herewith confirm that with this embedded algorithm the zone 3 of a distance relay can differentiate line overload from short-circuit fault, and in turn critical false tripping which could accelerate system blackout can be avoided. Additionally, in case of generation trip that could give transient characteristics similar to those of fault, the algorithm can handle it correctly. Furthermore, when the line overload is immediately followed by short-circuit fault, the latter takes higher priority, and the back-up protection of a distant line effectively remains, still.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....
Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหฐู และอาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้ตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้โอกาสในการศึกษา แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนให้กำลังใจและเอาใจใส่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมทั้งเพื่อนพี่น้องนิสิตห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ แสดงข้อคิดเห็น และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา “ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา” เป็นทุนการศึกษาในการเรียนต่อในระดับปริญญาโทตลอดระยะเวลา 2 ปี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ที่นำมาสู่ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลัง	6
2.1 พื้นฐานของระบบป้องกัน	6
2.1.1 อุปกรณ์ป้องกัน	6
2.1.2 คุณสมบัติของระบบป้องกัน	8
2.1.3 การแบ่งส่วนการป้องกัน	9
2.2 ระบบป้องกันสายส่ง	9
2.2.1 พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	9
2.2.2 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทาง	13
2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3	16
2.4 เหตุการณ์ที่สามารถใช้การป้องกันโซน 3 เป็นการป้องกันสำรองได้.....	19
2.5 แนวทางแก้ปัญหาการตัดวงจรอย่างไม่เหมาะสมของรีเลย์ระยะทางโซน 3	22
2.5.1 วิธีการเพิ่มเงื่อนไขในการตัดสินใจตัดวงจรโดยใช้แผนภาพร่วมกับการ วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน.....	22
2.5.2 การใช้ขอบเขตแบบเปลี่ยนแปลงได้ร่วมกับการกำหนดค่าตัวคูณ ความไวในการตัดวงจร	25

2.5.3	การใช้ประยุกต์ใช้แผนภูมิสถานะร่วมกับการตรวจวัดสภาวะชั่วขณะ ในการตัดสินใจตัดวงจร.....	27
บทที่ 3	รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	28
3.1	พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ	28
3.2	แผนภูมิสถานะการตัดสินใจของรีเลย์ระยะทางโซน 3	30
3.3	ผลทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่ได้มีการ เสนอไว้	33
บทที่ 4	การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง.....	35
4.1	การสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและส่วนควบคุม	35
4.1.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	35
4.1.2	ระบบกระตุ้น.....	38
4.1.3	ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	42
4.2	การสร้างแบบจำลองของสายส่งและระบบไฟฟ้า.....	43
4.3	การสร้างแบบจำลองของโหลด	46
4.3.1	โหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่	46
4.3.2	โหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่.....	47
บทที่ 5	ระบบทดสอบ	49
5.1	ระบบทดสอบที่ 1	49
5.2	ระบบทดสอบที่ 2	51
5.3	การกำหนดค่าขีดเริ่มสำหรับตัดสินใจค่า TC	52
5.4	ขั้นตอนการทดสอบกับระบบทดสอบที่ 1	53
5.4.1	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดพลาด	54
5.4.2	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำการ ปลดโหลด.....	54
5.4.3	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตาม ด้วยความผิดพลาด	54
5.5	ขั้นตอนการทดสอบกับระบบทดสอบที่ 2	55
5.5.1	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดพลาด	55
5.5.2	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำการ ปลดโหลด.....	55

5.5.3	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตาม ด้วยความผิดพลาด.....	55
5.5.4	การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตาม ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ	56
บทที่ 6 ผลการทดสอบ		57
6.1	ผลการทดสอบกับระบบที่ 1	57
6.1.1	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดพลาด.....	57
6.1.2	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำ การปลดโหลด.....	63
6.1.3	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้ว ตามด้วยความผิดพลาด	68
6.1.4	วิเคราะห์ผลการทดลองจากระบบทดสอบที่ 1	73
6.2	ผลการทดสอบกับระบบที่ 2	74
6.2.1	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดพลาด.....	74
6.2.2	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำ การปลดโหลด.....	76
6.2.3	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้ว ตามด้วยความผิดพลาด	82
6.2.4	ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วมี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ	85
6.2.5	วิเคราะห์ผลการทดลองจากระบบทดสอบที่ 2	103
บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....		104
7.1	สรุปผลการศึกษา	104
7.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	105
รายการอ้างอิง.....		108
ภาคผนวก.....		110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		119

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบป้องกันและบทบาทของระบบป้องกัน	
สำรวจ [3]	21



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน	6
รูปที่ 2.2 การแบ่งโซนการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	10
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของสายส่งเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟสลงดินที่เห็นจากรีเลย์ R.....	10
รูปที่ 2.4 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อมีสายส่งหลายเส้นต่อเชื่อมอยู่ที่บัส	12
รูปที่ 2.5 ระบบสายส่งที่มีจุดเชื่อมต่อกับสายส่งเส้นอื่น	12
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์รีเลย์บน R - X diagram.....	13
รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติแบบโม.....	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติของโมรีเลย์ในแกน G - B และแกน R - X	15
รูปที่ 2.9 ภาพโซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบโม.....	15
รูปที่ 2.10 ภาพระบบแบบที่มีจุดเชื่อมต่อกับหลายแหล่งจ่าย	16
รูปที่ 2.11 ภาพขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบโม	17
รูปที่ 2.12 จำนวนสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หลุดออกจากระบบเนื่องจากการตัด วงจรของรีเลย์โซน 3 [9]	18
รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ [4] ได้นำเสนอไว้	23
รูปที่ 2.14 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางเมื่อตรวจพบอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของ การทำงาน	23
รูปที่ 2.15 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่ปรับปรุงใน [2]	26
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ	28
รูปที่ 3.2 ภาพทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	31
รูปที่ 3.3 สัญญาณ SC และ TC ในเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง	31
รูปที่ 3.4 แผนภูมิสถานะกระบวนการตัดวงจรของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ	32
รูปที่ 4.1 AVR ชนิด IEEE type DC1A	39
รูปที่ 4.2 แผนภาพของ AVR ชนิด IEEE type DC1A เมื่อคำนึงถึงค่าเริ่มต้นและ Limiter แบบ Non-wind up	40
รูปที่ 4.3 แผนภาพของ PSS	41

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.4 แผนภาพของแบบจำลองของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	41
รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	42
รูปที่ 4.6 แบบจำลองสายส่งแบบ PI	43
รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่	46
รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่	47
รูปที่ 4.9 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว	47
รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 1 [5]	49
รูปที่ 5.2 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 2 WSCC 9 บัส	51
รูปที่ 5.3 ค่า H_{sum} เมื่อทดสอบเพื่อหาค่าขีดเริ่มสำหรับ TC ของระบบทดสอบที่ 1	53
รูปที่ 5.4 ค่า H_{sum} เมื่อทดสอบเพื่อหาค่าขีดเริ่มสำหรับ TC ของระบบทดสอบที่ 2	53
รูปที่ 6.1 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโซน 3	57
รูปที่ 6.2 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ	58
รูปที่ 6.3 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดเมื่อไม่ได้กำจัดความผิดปกติออกไป	58
รูปที่ 6.4 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	59
รูปที่ 6.5 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน	60
รูปที่ 6.6 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดัน ภายในคงที่	60
รูปที่ 6.7 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ	61
รูปที่ 6.8 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดเมื่อกำจัดความผิดปกติในเวลา 2.3 วินาที	61
รูปที่ 6.9 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	62
รูปที่ 6.10 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน	62
รูปที่ 6.11 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดัน ภายในคงที่	63
รูปที่ 6.12 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อทำการเพิ่มโหลดแล้วปลดโหลด	63
รูปที่ 6.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	64
รูปที่ 6.14 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	65
รูปที่ 6.15 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน	65
รูปที่ 6.16 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่	66

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.17 ภาพทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินจนเกิดการสูญเสีย เสถียรภาพ	66
รูปที่ 6.18 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	67
รูปที่ 6.19 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ	67
รูปที่ 6.20 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินตามด้วย ความผิดพลาด	68
รูปที่ 6.21 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ	69
รูปที่ 6.22 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	69
รูปที่ 6.23 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	70
รูปที่ 6.24 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน	70
รูปที่ 6.25 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่	71
รูปที่ 6.26 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	71
รูปที่ 6.27 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	72
รูปที่ 6.28 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน	72
รูปที่ 6.29 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่	73
รูปที่ 6.30 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดความผิดพลาด	74
รูปที่ 6.31 แรงดันที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดได้เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น	74
รูปที่ 6.32 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	75
รูปที่ 6.33 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	75
รูปที่ 6.34 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วตัดโหลดออก	76
รูปที่ 6.35 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	77
รูปที่ 6.36 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	77
รูปที่ 6.37 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	78
รูปที่ 6.38 กำลังของโหลดเมื่อใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่	79
รูปที่ 6.39 ค่า Conductance ของโหลดเมื่อใช้แบบจำลองแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่	79
รูปที่ 6.40 P – V curve ของบัส 5	80
รูปที่ 6.41 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่	80
รูปที่ 6.42 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ตรวจวัด	81
รูปที่ 6.43 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	81
รูปที่ 6.44 สถานะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ	82

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.45 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิดปกติ83	83
รูปที่ 6.46 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	83
รูปที่ 6.47 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	84
รูปที่ 6.48 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	84
รูปที่ 6.49 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	85
รูปที่ 6.50 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าหลุดออก	86
รูปที่ 6.51 ภาพขยายของรูปที่ 6.50	86
รูปที่ 6.52 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	87
รูปที่ 6.53 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางคำนวณได้	87
รูปที่ 6.54 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	88
รูปที่ 6.55 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	88
รูปที่ 6.56 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าหลุดออก	89
รูปที่ 6.57 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	89
รูปที่ 6.58 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	90
รูปที่ 6.59 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	90
รูปที่ 6.60 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	91
รูปที่ 6.61 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 2 หลุด	92
รูปที่ 6.62 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	92
รูปที่ 6.63 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	93
รูปที่ 6.64 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	93
รูปที่ 6.65 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	94
รูปที่ 6.66 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 2 หลุด	95
รูปที่ 6.67 ภาพขยายของรูปที่ 6.66	95
รูปที่ 6.68 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	96
รูปที่ 6.69 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	96
รูปที่ 6.70 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	97

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.71 ภาพกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	98
รูปที่ 6.72 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 3 หลุด	98
รูปที่ 6.73 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	99
รูปที่ 6.74 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	99
รูปที่ 6.75 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	100
รูปที่ 6.76 ภาพกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	100
รูปที่ 6.77 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 3 หลุด	101
รูปที่ 6.78 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	101
รูปที่ 6.79 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้	102
รูปที่ 6.80 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ	102
รูปที่ 7.1 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิดพลาด	105
รูปที่ 7.2 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด	106
รูปที่ 7.3 กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส 5 บัส 6 และบัส 8	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากการศึกษาการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Blackout) ในอดีต พบว่ามีหลายครั้งซึ่งการทำงานอันไม่พึงประสงค์หรือการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบป้องกันสำรอง (Backup Protection) เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดการรบกวนระบบจนนำไปสู่การเปิดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่อง (Cascading Outage) [1] เช่น การที่รีเลย์ป้องกันตรวจจับความผิดปกติ (Fault) นอกเขตการป้องกันของตัวเองแล้วทำการตัดวงจร ซึ่งการตัดวงจรผิดพลาดนี้อาจจะทำให้สถานการณ์ที่เกิดเลวร้ายลงยิ่งขึ้น และถึงแม้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะเป็นไปอย่างถูกต้องแต่การทำงานของรีเลย์ก็อาจจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงกับระบบได้ เช่น ในกรณีที่รีเลย์ป้องกันตัดสายส่งที่เกิดความผิดปกติออกแล้วทำให้กำลังที่เคยไหลผ่านสายส่งเส้นที่เกิดความผิดปกติเปลี่ยนแปลงทิศทางไหลจนทำให้สายส่งเส้นอื่นเกิดสภาวะโหลดเกิน (Overload) ซึ่งสายส่งเส้นที่เกิดสภาวะโหลดเกินนั้นอาจจะถูกตัดวงจรด้วยรีเลย์ป้องกันโซน 3 จนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง [2]

จากบทความของ S. H. Horowitz และ A. G. Phadke [3] ได้เน้นย้ำให้เห็นถึงปัญหาการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่มีต่อสภาวะโหลดที่ไม่ได้คาดคิดไว้ล่วงหน้า (Unexpected Loading Condition) ทำให้เกิดการเปิดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่องจนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างในที่สุด ตัวอย่างกรณีที่เคยเกิดขึ้นมาแล้วได้แก่ การเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม 2003 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดาซึ่งเกิดจากการตัดวงจรอันไม่พึงประสงค์ของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เนื่องจากสภาวะโหลดเกิน นอกจากนี้ยังพบว่าการทำงานที่ไม่คาดคิดของรีเลย์ระยะทางโซน 3 มักมีส่วนร่วมต่อการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับบริเวณกว้างด้วยแทบทุกครั้ง [2] - [4]

อย่างไรก็ตามรีเลย์ระยะทางโซน 3 ก็ยังมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าจนไม่สามารถตัดทิ้งออกจากระบบได้ [3] ดังนั้นการทำให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 สามารถทำงานได้อย่างที่ควรจะเป็นเมื่ออยู่ในสภาวะโหลดเกินหรืออยู่ในสภาวะที่กำลังจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทำให้เกิดงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามพัฒนาขีดความสามารถของรีเลย์ระยะทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์แนวคิดเกี่ยวกับการทำให้รีเลย์มีความสามารถในการปรับการทำงานด้วยตัวเอง (Adaptive Relaying) ซึ่งมีจุดประสงค์หลัก คือให้รีเลย์ระยะทางทำงานเฉพาะ

ในสถานการณ์ที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น แต่ไม่ทำงานในกรณีอื่นๆ แม้รีเลย์ระยะทางจะตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานได้ก็ตาม

การแก้ปัญหาการตัดวงจรที่ผิดพลาดของรีเลย์โซน 3 ด้วยการทำให้รีเลย์มีความสามารถในการปรับการทำงานด้วยตัวเองได้รับการนำเสนอไว้หลายแง่มุมได้แก่ การแก้ปัญหาการตัดวงจรผิดเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน (Overload) โดยวิธีการใช้ขอบเขตแบบเปลี่ยนแปลงได้ (Adaptive Blinder) ร่วมกับการกำหนดค่าตัวคูณความไว (Sensitivity Factor) ในการตัดวงจร [2], การแก้ปัญหาการตัดวงจรผิดเนื่องจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน (Voltage Instability) โดยวิธีการเพิ่มเงื่อนไขในสภาวะไม่ปกติ [4] ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นการแก้ปัญหาแต่ละอย่างอย่างเจาะจงโดยละเอียดปัญหาอื่นๆ แต่จากงานของ Chul-Hwan Kim และคณะ [5] เป็นการมองปัญหาในภาพรวมโดยรวมปัญหาทั้งเรื่องของสภาวะโหลดเกินและการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันไว้ด้วยกัน โดยประยุกต์ใช้แผนภูมิสถานะ (State Diagram) ร่วมกับองค์ประกอบอยู่ตัว (Steady State Component: SC) และองค์ประกอบสภาวะชั่วคราว (Transient Component: TC) จากการแยกองค์ประกอบความถี่ของขนาดแรงดัน ณ บัสที่รีเลย์ระยะทางต่ออยู่ เพื่อเป็นการเพิ่มเงื่อนไขในการตัดวงจรให้ตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แต่ต้องไม่ตัดวงจรเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการเกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันอีกด้วย

ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้วิธี [5] มาประยุกต์ใช้และทดสอบการทำงานในสภาวะที่เสมือนจริงมากขึ้น เนื่องจากวิธีการดังกล่าวยังไม่ได้รับการทดสอบในสภาพการทำงานที่มีผลของขดลวดสนามในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสและการทำงานของระบบกระตุ้น (Excitation System) ส่วนประกอบทั้งสองชนิดนี้มีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพและสภาวะชั่วขณะของระบบ โดยทดสอบภายใต้การรบกวนระบบด้วยสภาวะต่างๆ ได้แก่ การเกิดสภาวะโหลดเกิน การเกิดความผิดปกติและเกิดการตัดวงจรสายส่ง (Line tripped) นอกจากนี้ยังเพิ่มสถานการณ์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ร้ายแรงที่สามารถเกิดขึ้นได้ เพื่อทดสอบสมรรถนะของรีเลย์ระยะทางแบบปรับตัวเองได้ว่ายังคงทำงานได้ถูกต้องหรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.) ศึกษาสมรรถนะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่ผ่านการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการทำงาน (Algorithm) ภายใต้การรบกวนระบบด้วยสภาวะต่างๆ ได้แก่ การเกิดสภาวะโหลดเกิน การเกิดความผิดปกติบนสายส่ง และการเกิดเหตุการณ์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบภายใต้สภาวะโหลดเกิน
- 2.) วิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยสำคัญในกรณีที่การทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะนี้ไม่สามารถรองรับเหตุการณ์ที่เกิดจากการรบกวนระบบในข้อ 1
- 3.) สามารถกำหนดระบบทดสอบที่เหมาะสมสำหรับทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.) ศึกษาเหตุการณ์ที่ทำให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ทำงานอย่างไม่พึงประสงค์
- 2.) ศึกษาขั้นตอนวิธีที่นำมาใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ให้เป็นรีเลย์แบบปรับการทำงานเองได้โดยใช้แนวคิดของ [5] เป็นต้นแบบ
- 3.) ทดสอบสมรรถนะของรีเลย์ทั้งแบบปกติและแบบที่ทำการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการทำงานบนระบบทดสอบของ Western States Coordinating Council (WSCC) โดยคำนึงถึงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 1 และโซน 2 ร่วมด้วย
- 4.) เหตุการณ์ที่สนใจในการทดสอบได้แก่ การเกิดความผิดปกติบนสายส่ง การเกิดสภาวะโหลดเกิน การเกิดสภาวะโหลดเกินร่วมกับการเกิดความผิดปกติในโซน 3 และการเกิดสภาวะโหลดเกินร่วมกันกับการที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่เลือกใช้
- 5.) กำหนดให้ไม่เกิดความผิดพลาดซ้ำซ้อนในการทดสอบการทำงานของรีเลย์
- 6.) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่รวมผลของขดลวดสนามและระบบกระตุ้นซึ่งประกอบด้วยตัวปรับเทียบแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator: AVR), ตัวเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer: PSS) และตัวจำกัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Limiter)
- 7.) คิดผลของระบบควบคุมความเร็ว (Governor System) ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอกับโหลดที่เพิ่มขึ้น
- 8.) สมมติให้รีเลย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นรีเลย์ระยะทางแบบเชิงเลขซึ่งสามารถโปรแกรมได้
- 9.) โหลดของระบบทดสอบกำหนดให้เป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่และแบบกำลังคงที่โดยจะทำการทดสอบกับโหลดทั้งสองชนิดเพื่อหาแบบจำลองของโหลดที่เหมาะสมกับการทดสอบการทำงานเชิงพลวัตของรีเลย์ระยะทางโซน 3

- 10.) กรณีที่เกิดการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ จะวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยเพื่อกำหนดแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนวิธีการทำงานเพื่อให้รองรับเหตุการณ์ที่ทำงานผิดพลาดนั้นได้

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

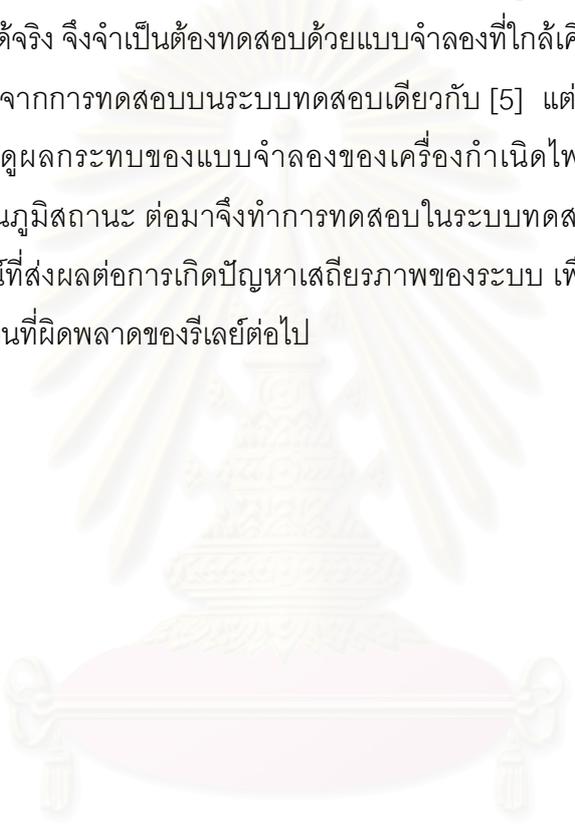
- 1.) ศึกษาพื้นฐานของระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าและการทำงานของรีเลย์ระยะทาง
- 2.) ศึกษาปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างและปัญหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อค้นหาปัญหาที่เกิดจากการตัดวงจรผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโซน 3
- 3.) ศึกษาการแก้ปัญหาที่เกิดจากการตัดวงจรผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ในบทความทางวิชาการต่างๆ
- 4.) คัดเลือกวิธีการที่ได้ศึกษามาปรับปรุงการทำงานของรีเลย์และสร้างแบบจำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อใช้ในการทดสอบ
- 5.) สร้างแบบจำลองอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดันภายในคงที่ในการทดสอบแบบจำลองของรีเลย์ในข้อที่ 4 เพื่อดูว่าการทำงานของรีเลย์ที่ปรับปรุงขั้นตอนวิธีการทำงานแล้วเป็นไปตามที่ได้ศึกษามา
- 6.) พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังให้เสมือนจริงมากขึ้นโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่คิดรวมผลของขดลวดสนามและระบบกระตุ้น
- 7.) ทดสอบการทำงานของรีเลย์ที่ปรับปรุงขั้นตอนวิธีการทำงานแล้วบนระบบทดสอบอย่างง่ายโดยสมมติให้เกิดความผิดพลาด หรือเกิดสภาวะโหลดเกินเพื่อดูความแตกต่างของรีเลย์ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะกับรีเลย์ระยะทางปกติ
- 8.) ทำการทดสอบรีเลย์กับระบบทดสอบ WSCC 9 บัส โดยสมมติให้เกิดความผิดพลาด การเกิดสภาวะโหลดเกิน และการเกิดสภาวะโหลดเกินร่วมกับการเกิดความผิดพลาด
- 9.) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 8 โดยเพิ่มกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบเพื่อดูสมรรถนะการทำงานของรีเลย์ที่มีการเพิ่มอัลกอริทึมเข้าไปแล้ว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1.) ผลการทดสอบเพื่อยืนยันสมรรถนะของอัลกอริทึมที่สามารถนำมาใช้กับรีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเพิ่มความมั่นคงของระบบส่งไฟฟ้า
- 2.) แบบจำลองทางพลวัตของระบบไฟฟ้าและรีเลย์ระยะทางเพื่อเป็นพื้นฐานในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางอื่นๆ ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการทำงานของรีเลย์ระยะทางและปัญหาในการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตัดวงจรผิดพลาดอันเนื่องมาจากสภาวะโหลดเกิน จากนั้นจึงนำแนวคิดและวิธีการปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ได้มีการเสนอไว้ในบทความต่างๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการปรับปรุงรีเลย์ระยะทาง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางมากที่สุด

เพื่อทดสอบว่าการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะสามารถนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังได้จริง จึงจำเป็นต้องทดสอบด้วยแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น โดยการทดสอบจะเริ่มจากการทดสอบบนระบบทดสอบเดียวกับ [5] แต่เพิ่มความซับซ้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อดูผลกระทบของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ ต่อมาจึงทำการทดสอบในระบบทดสอบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และเพิ่มเหตุการณ์ที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพของระบบ เพื่อวิเคราะห์การทำงานที่อาจก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลัง

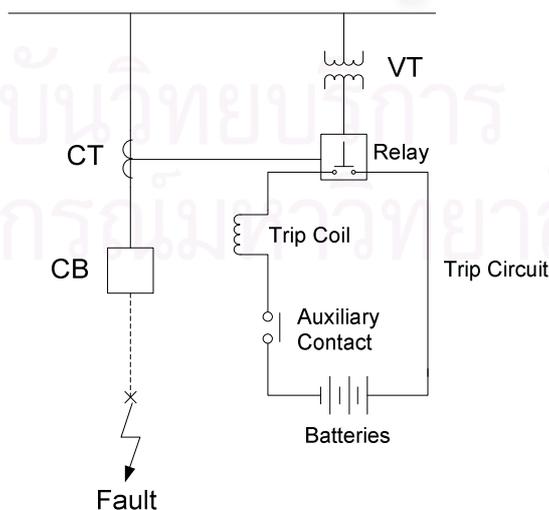
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปและระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกัน หลักการทำงาน และปัญหาที่เกิดขึ้น โดยจะพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลังเนื่องจากการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางเป็นหลัก นอกจากนี้ ยังได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาการตัดวงจรผิดพลาดจากงานวิจัยต่างๆ ที่น่าสนใจอีกด้วย

2.1 พื้นฐานของระบบป้องกัน

ระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง ทำหน้าที่กำจัดความผิดปกติหรือเหตุการณ์อันไม่พึงประสงค์ ออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อรักษาให้ระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือทำงานได้เป็นปกติและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันเป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานของระบบป้องกัน อันได้แก่ อุปกรณ์ป้องกัน คุณสมบัติของระบบป้องกัน และการแบ่งส่วนการป้องกัน [6]

2.1.1 อุปกรณ์ป้องกัน

โดยทั่วไปอุปกรณ์ป้องกันในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังจะมีส่วนประกอบสำคัญดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบป้องกัน

โดยอุปกรณ์พื้นฐานของระบบป้องกันทั่วไป ได้แก่

- เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker: CB)
- รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay)
- อุปกรณ์ปลดวงจรและแบตเตอรี่ (Trip Circuit and Batteries)
- หม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน (Current Transformer: CT, Voltage Transformer: VT)

2.1.1.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker: CB)

คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรทั้งในกรณีที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในภาวะปกติและภาวะผิดปกติ การเปิด-ปิดวงจรในภาวะปกติสามารถทำได้ทุกขณะตามต้องการ แต่เมื่อระบบอยู่ในภาวะผิดปกติ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องตัดวงจรอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ ช่วยตรวจจับภาวะผิดปกติและสั่งให้อุปกรณ์ตัดวงจร เปิด หรือ ปิด วงจรโดยอัตโนมัติ

2.1.1.2 รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay)

คือ อุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถรับการกระตุ้นจากสัญญาณที่แปลงมาจากระบบไฟฟ้าผ่านทางหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งรีเลย์จะทำการตรวจจับภาวะผิดปกติโดยวัดปริมาณทางไฟฟ้าตลอดเวลา ปริมาณทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดภาวะผิดปกติ ได้แก่ แรงดัน กระแส ความถี่ และมุมทางไฟฟ้า

รีเลย์สามารถมีสัญญาณเข้าได้หลายสัญญาณขึ้นกับชนิดของรีเลย์ เมื่อขนาดของสัญญาณเข้ามีขนาดเท่ากับค่าที่กำหนดรีเลย์จะทำงานโดยสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรต่อไป

2.1.1.3 อุปกรณ์ปลดวงจรและแบตเตอรี่ (Trip Circuit and Batteries)

การสั่งให้ตัวตัดวงจรทำงานนั้น รีเลย์จะสั่งผ่านหน้าสัมผัสของรีเลย์เพื่อให้ขดลวดที่ควบคุมการทำงานของตัวตัดวงจรสั่งให้ตัวตัดวงจรทำงานอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งวงจรการทำงานจะประกอบด้วยหน้าสัมผัสและขดลวดหลายชนิด รายละเอียดในการทำงานของวงจรควบคุมการตัดวงจรของรีเลย์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [6] - [8]

2.1.1.4 หม้อแปลงกระแส, หม้อแปลงแรงดัน (Current Transformer: CT, Voltage Transformer: VT)

เป็นหม้อแปลงที่ทำหน้าที่แปลงกระแสหรือแรงดันให้มีขนาดที่น้อยลงเพื่อให้สามารถป้อนเข้าสู่รีเลย์ได้ โดยทั่วไปกระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสจะมีขนาดมาตรฐานที่ 1 A หรือ 5 A และแรงดันขาออกของหม้อแปลงแรงดันจะมีขนาดมาตรฐานที่ 110 V หรือ 120 V

2.1.2 คุณสมบัติของระบบป้องกัน

การทำงานของระบบป้องกันที่ดีจะช่วยให้สามารถลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในระบบ จึงควรพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของระบบป้องกัน โดยระบบป้องกันที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

2.1.2.1 ความเชื่อถือได้ (Reliability)

หมายถึง ความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อต้องการให้ทำงาน ค่าความเชื่อถือได้มีความหมายเป็น 2 นัย ได้แก่ ระบบต้องทำงานในขณะที่เกิดความผิดปกติในโซนการป้องกัน และระบบต้องไม่ทำงานในกรณีที่เกิดความผิดปกติของโซนการป้องกันหรือไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น

2.1.2.2 ความวางใจได้ (Dependability)

หมายถึง การที่ระบบป้องกันต้องทำงานถูกต้องทุกครั้งที่เกิดความผิดปกติและต้องทำงานถูกต้องสำหรับความผิดปกติทุกรูปแบบ รวมทั้งจะต้องทำงานได้เมื่อต้องการให้ทำงาน เช่น ทำงานซ้ำกันหลายๆ ครั้งในช่วงเวลาสั้นๆ

2.1.2.3 ความมั่นคง (Security)

หมายถึง ระบบป้องกันต้องไม่ทำงานเมื่อไม่ต้องการให้ทำงาน เช่น ไม่ทำงานในสภาวะไหลตกปกติ การตัดวงจรโดยไม่จำเป็น หรือการเกิดความผิดปกติของเขตการป้องกัน โดยทั่วไปค่าความมั่นคงจะมีค่าผกผันกับค่าความวางใจได้ ยิ่งความวางใจได้ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นมากเท่าใด จะส่งผลให้ค่าความมั่นคงของระบบมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการทำงานของรีเลย์ควรที่จะรักษาให้ระบบตัดวงจรถูกต้องโดยที่ค่าความมั่นคงของระบบยังคงมีค่าสูง

2.1.2.4 ความรู้จักเลือก (Selectivity)

หมายถึง การออกแบบระบบป้องกันโดยรวมที่รีเลย์ที่อยู่ใกล้ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติจะเป็นตัวกำจัดความผิดปกติออกไปก่อน รวมไปถึงการกำหนดระดับขั้นของค่าขีดเริ่ม การหน่วงเวลา และลักษณะสมบัติของรีเลย์ เพื่อให้ได้การทำงานตามที่กำหนดไว้

2.1.2.5 เขตการป้องกัน (Protection Zone)

หมายถึง อาณาบริเวณ (Zone) ที่ต้องการให้รีเลย์ทำงาน โดยจะมีเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นตัวตัดวงจร การออกแบบเขตการป้องกันต้องสอดคล้องกับความรู้จักเลือก

2.1.3 การแบ่งส่วนการป้องกัน

ในระบบป้องกัน อาจเกิดความผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อมิให้ระบบเกิดความเสียหายจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันสำรองในกรณีที่ส่วนป้องกันหลักไม่สามารถทำงานได้ เป็นปกติ ดังนั้นการแบ่งส่วนการป้องกันจึงมีความสำคัญเพื่อให้ระบบป้องกันมีความเชื่อถือได้สูง การแบ่งส่วนการป้องกันนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ระบบป้องกันปฐมภูมิ (Primary Protection) และระบบป้องกันสำรอง (Backup Protection)

2.1.3.1 ระบบป้องกันปฐมภูมิ

หมายถึง การป้องกันลำดับแรกโดยอุปกรณ์ป้องกันในเขตป้องกันต้องทำหน้าที่แยกส่วนของวงจรที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ การทำงานของระบบป้องกันปฐมภูมินั้นต้องทำงานเร็วที่สุดเท่าที่ทำได้และต้องแยกส่วนของวงจรไฟฟ้าให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบน้อยที่สุด

2.1.3.2 ระบบป้องกันสำรอง

หมายถึง การใช้ระบบป้องกันอีกชุดหนึ่งที่มีเวลาการทำงานช้ากว่าระบบป้องกันปฐมภูมิ ทำหน้าที่ป้องกันในกรณีที่ระบบป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงาน ซึ่งผลการทำงานเพื่อกำจัดความผิดปกติของระบบป้องกันสำรองมักจะแยกส่วนของวงจรออกมามากกว่าการทำงานโดยระบบป้องกันปฐมภูมิ

ทั้งนี้ระบบป้องกันสำรองยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

- การป้องกันสำรองท้องถิ่น (Local Backup Protection) ซึ่งจะเป็นระบบป้องกันสำรองที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับระบบป้องกันปฐมภูมิ
- การป้องกันสำรองระยะไกล (Remote Backup Protection) เป็นระบบป้องกันสำรองที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากระบบป้องกันปฐมภูมิ

2.2 ระบบป้องกันสายส่ง

ระบบป้องกันสายส่งมีไว้เพื่อกำจัดความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสาย โดยมีอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการป้องกัน คือ รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) การทำงานจะมีการแบ่งส่วนการทำงานดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2.1 พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

การทำงานของระบบป้องกันสายส่ง (Transmission Line Protection) ในปัจจุบันนิยมใช้รีเลย์ระยะทางแบบเชิงเลข (Numerical Distance Relay) รีเลย์ชนิดนี้สามารถโปรแกรมได้ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบป้องกัน การทำงานของรีเลย์

จากรูปที่ 2.3 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังให้เหลือเพียงสองบัส คือบัส R และบัส Q โดยที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า S และ U ต่ออยู่ตามลำดับ Z_E เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบส่วนที่เหลือ และ Z_L เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส R และ Q ซึ่งจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์เห็นในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติที่จุด F รีเลย์ R จะเห็นสายส่งมีระยะทางสั้นลง โดยจะเห็นค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_R ถ้า Z_R มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโซนการทำงานที่ตั้งไว้ รีเลย์ R จะทำการตัดวงจร ซึ่งจะตัดวงจรทันทีหรือมีการหน่วงเวลาไว้ก่อนขึ้นอยู่กับว่า Z_R ตกอยู่ในโซนการทำงานใด

$$Z_R = nZ_L + Z_F \quad (2.1)$$

โดยที่

Z_R	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ R มองเห็น
n	คือ	ระยะห่างจากรีเลย์ R มีหน่วยเป็น p.u.
Z_L	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์ R ทำหน้าที่ป้องกัน
Z_F	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดปกติ

ในส่วนของกาหนดช่วงของโซนการป้องกัน (Zone of Protection) จะกำหนดโดย

Zone 1 กำหนดที่ระยะความยาว 85 – 90 % ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน

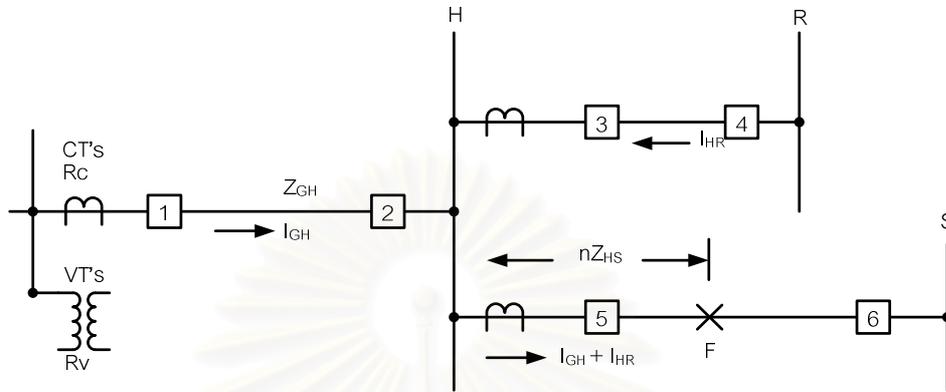
Zone 2 กำหนดที่ระยะความยาว 120 – 150 % ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน และจะหน่วงเวลาการทำงานไว้ที่ 0.03 วินาที เนื่องจากทำงานเป็นระบบป้องกันสำรองให้กับรีเลย์ป้องกันปฐมภูมิของสายส่งเส้นถัดไป

Zone 3 กำหนดที่ระยะความยาวไม่เกิน 150 % ของสายส่งเส้นถัดไปที่ยาวที่สุด และจะหน่วงเวลาการทำงานไว้ที่ 1 – 2 วินาที เนื่องจากทำงานเป็นระบบป้องกันสำรองระยะไกล

อย่างไรก็ตาม การคิดค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์มีกรณีพิเศษที่ต้องพิจารณาดังนี้ คือ กรณีที่มีสายส่งหลายเส้นต่อเชื่อมอยู่ที่บัส และกรณีที่มีจุดเชื่อมต่อกับสายส่งเส้นอื่น

ในทางปฏิบัติแต่ละบัสมักจะมีสายส่งหลายเส้นต่อเชื่อมอยู่ดังรูปที่ 2.4 รีเลย์ระยะทางจะเห็นค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าที่ควรจะเป็นดังสมการที่ (2.2) สมการนี้แสดงให้เห็นถึงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่จุด F ทั้งนี้จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ที่เห็นจะมีค่า

สูงขึ้นเนื่องจากพจน์ $\frac{I_{HR}}{I_{GH}}(nZ_{HS})$ ด้วยเหตุนี้การพิจารณาช่วงของโซนการป้องกันจะถูกปรับปรุงเพื่อชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ที่มากขึ้น ซึ่งทำได้โดยการปรับหรือขยายขอบเขตของการป้องกันออกไป

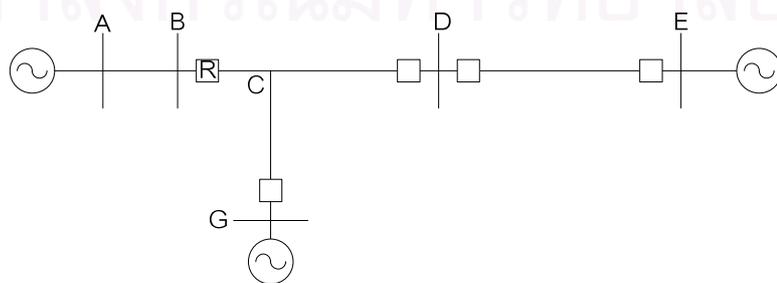


รูปที่ 2.4 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อมีสายส่งหลายเส้นต่อเชื่อมอยู่ที่บัส

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดความผิดปกติจะเป็นดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned}
 Z_{App} &= \frac{I_{GH}Z_{GH} + nZ_{HS}(I_{GH} + I_{HR})}{I_{GH}} \\
 &= Z_{GH} + nZ_{HS} + \frac{I_{HR}}{I_{GH}}(nZ_{HS})
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

สำหรับระบบสายส่งที่มีจุดเชื่อมต่อกับสายส่งเส้นอื่น (Multi-terminal Line) ดังรูปที่ 2.5 จะมีปัญหาเกิดขึ้นเช่นเดียวกันคือ รีเลย์เห็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลสูงกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากกระแสจากจุดแยกสาย (Infeed Current) ที่ฉีดเข้าระบบ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงการกำหนดโซนการป้องกันโดยคำนึงถึงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์มองเห็นดังนี้ [6]



รูปที่ 2.5 ระบบสายส่งที่มีจุดเชื่อมต่อกับสายส่งเส้นอื่น

เมื่อพิจารณาการปรับตั้งรีเลย์ R จะได้ขอบเขตของแต่ละโซนการป้องกันดังนี้

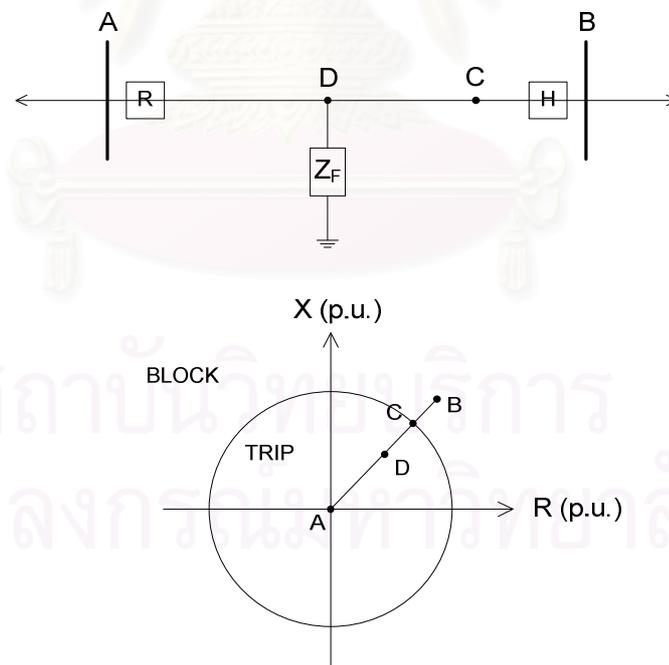
Zone 1 ให้ตั้งไว้ที่ 85 – 90 % ของอิมพีแดนซ์สมมูลสายส่งที่น้อยที่สุดระหว่าง B ถึง D และ B ถึง G โดยไม่คิดผลของกระแสจากจุดแยกสาย

Zone 2 ให้ตั้งไว้ที่ 120 % ของอิมพีแดนซ์สมมูลของสายส่งที่มากที่สุดระหว่าง B ถึง D และ B ถึง G โดยคิดผลของกระแสจากจุดแยกสายร่วมด้วย

Zone 3 ให้ตั้งไว้โดยคิดอิมพีแดนซ์สมมูลของสายจาก B ถึง D แล้วนำไปรวมกับค่า 120 – 150 % ของอิมพีแดนซ์สมมูลของสายส่งเส้นถัดไปที่ยาวที่สุดเมื่อคิดผลของกระแสจากจุดแยกสาย

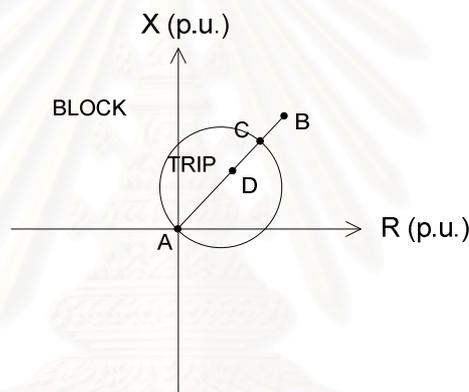
2.2.2 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทาง

นอกจากจะพิจารณาระยะของโซนการป้องกันแล้ว รีเลย์ระยะทางยังต้องคำนึงถึงลักษณะสมบัติของรีเลย์ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการป้องกันไม่ให้กว้างหรือแคบจนเกินไป การพิจารณาการทำงานของรีเลย์ระยะทางจะสนใจค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเป็นหลัก ดังนั้นจึงมักแสดงทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Locus) บนแผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ (R- X Diagram) ควบคู่ไปกับลักษณะสมบัติของรีเลย์ป้องกันดังเช่นรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์รีเลย์บน R – X diagram

รูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) ซึ่งใช้ขนาดของอิมพีแดนซ์เป็นเงื่อนไขตัดสินตัดวงจร โดยจะทำการตัดวงจรเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นมีค่าน้อยกว่าขนาดที่กำหนดไว้ (ตกอยู่ใน TRIP โซน) อย่างไรก็ตามการใช้อิมพีแดนซ์รีเลย์ไม่สามารถกำหนดทิศทางในการตัดวงจรได้เนื่องจากรีเลย์จะเห็นการลัดวงจรทั้งที่อยู่ข้างหน้าและข้างหลัง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักใช้รีเลย์ที่มีลักษณะสมบัติแบบโม (Mho Relay) ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากมีคุณสมบัติของการเป็นรีเลย์ระยะทางแบบมีทิศทาง (Directional Distance Relay) หรือรีเลย์ที่มีลักษณะสมบัติแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral Relay) ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานใน R-X diagram ได้มากกว่า นอกจากนี้ยังมีลักษณะสมบัติแบบอื่นๆ อีกสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [7], [8] ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นขึ้นกับลักษณะของระบบและลักษณะของความผิดปกติที่มักเกิดขึ้นในระบบ

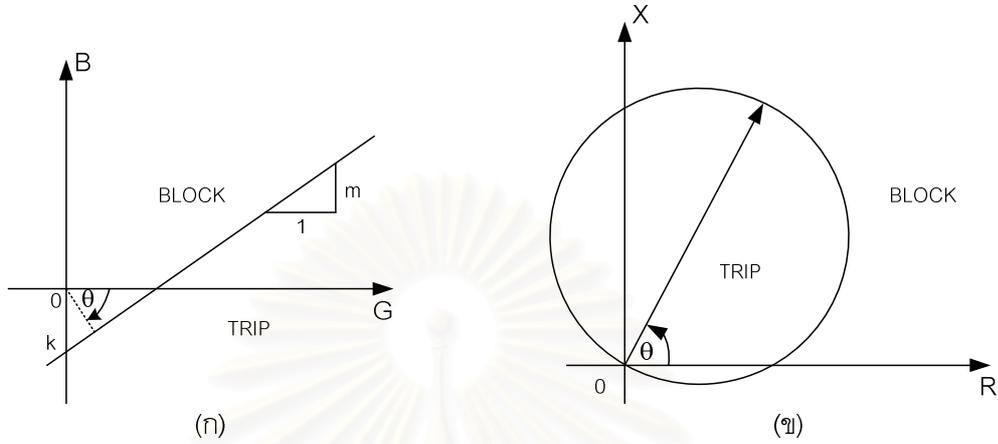


รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติแบบโม

จากรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโมรีเลย์ครอบคลุมทั่วทั้งความยาวสายได้ โดยที่กินอาณาเขตการป้องกันน้อยกว่าการใช้อิมพีแดนซ์รีเลย์ นั่นหมายความว่า การใช้โมรีเลย์ในการป้องกันสายส่งจะมีโอกาสตัดวงจรผิดพลาดเนื่องจากการตรวจจับอิมพีแดนซ์จากนอกอาณาเขตที่รีเลย์ไม่ได้ทำหน้าที่ป้องกันได้น้อยกว่าด้วย

ลักษณะสมบัติแบบโมนั้นจะใช้ค่าความนำไฟฟ้าเชิงซ้อน (Admittance) เป็นตัวตัดสินการตัดวงจรสามารถอธิบายการทำงานได้ด้วยรูปที่ 2.8 และสมการที่ (2.3) จากรูปที่ 2.8 ก. จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาในแกนของค่า B กับ G นั้น ลักษณะสมบัติแบบโมจะเป็นเส้นตรงโดยมีโซนการทำงานอยู่ในบริเวณ TRIP และเมื่อทำการแปลงแกนจาก B-G ไปเป็น R-X จะพบว่าลักษณะสมบัติแบบโมบนแกน R-X จะเปลี่ยนเป็นรูปวงกลมดังรูปที่ 2.8 ข. ซึ่งสมการของวงกลมในแกน R-X นี้มี

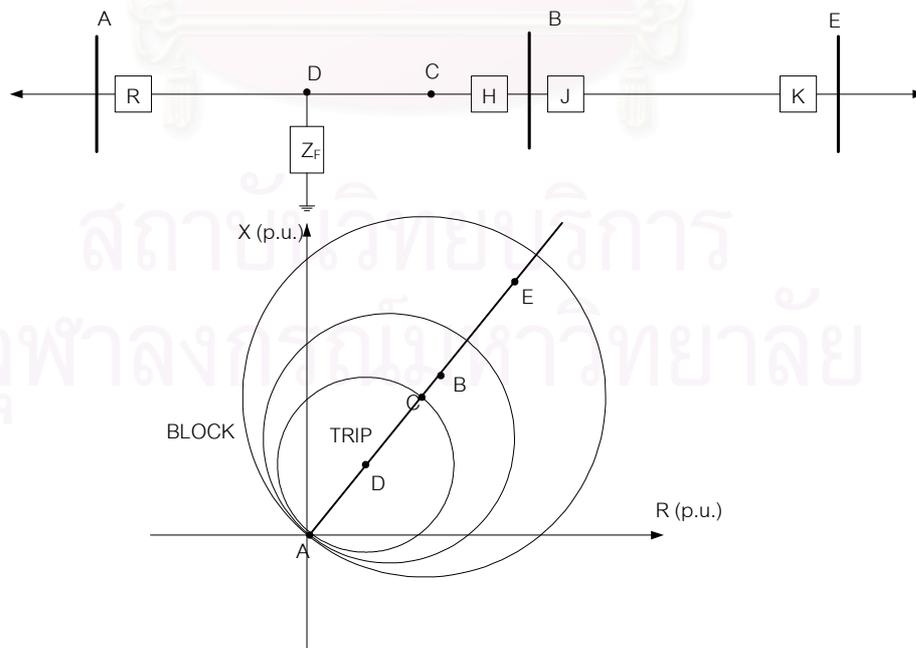
ความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติในแกน B-G ดังสมการที่ (2.3) สำหรับที่มาและการพิสูจน์นั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [7]



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติของโมรีเลย์ในแกน G - B และแกน R - X

$$\left(R + \frac{m}{2k}\right)^2 + \left(X + \frac{1}{2k}\right)^2 = \frac{m^2 + 1}{4k^2} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาการป้องกันทั้ง 3 ไซนการป้องกันด้วยลักษณะสมบัติแบบโมจะได้ดังรูปที่ 2.9

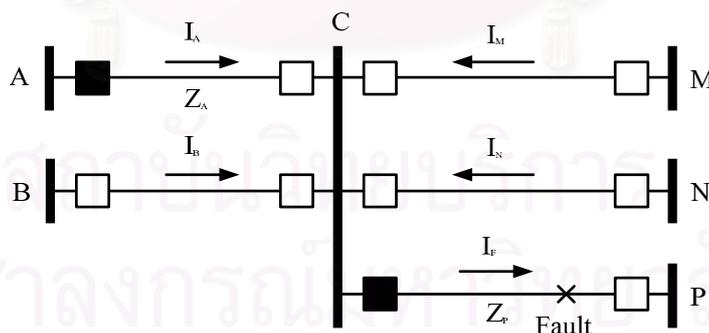


รูปที่ 2.9 ภาพไซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบโม

2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3

เนื่องจากรีเลย์ระยะทางโซน 3 มีขอบเขตการทำงานที่กว้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจุดเชื่อมต่อกับหลายแหล่งจ่าย [3] ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะมีโซนการทำงานของรีเลย์โซน 3 กว้างกว่าแบบที่เป็นสายส่งเส้นเดียวมาก จะได้เห็นจากรูปที่ 2.11 จึงอาจจะตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่เข้ามาในโซนการทำงานได้แม้จะเป็นกรณีที่ไม่ใช่การเกิดความผิดปกติขึ้น เช่น การเกิดสภาวะโหลดเกิน และการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ปัญหาเหล่านี้มักจะพบในระบบที่มีการส่งกำลังผ่านสายส่งจนใกล้เคียงพิกัดของสายส่ง อย่างไรก็ตามเป้าหมายหลักของรีเลย์โซน 3 คือการเป็นตัวป้องกันสำรองในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้น ดังนั้นความผิดปกติที่ตรวจพบเหล่านี้จึงไม่ควรทำให้รีเลย์โซน 3 ทำงาน เพราะการตัดวงจรในสถานการณ์เหล่านี้อาจจะทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นและนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของทั้งระบบได้

จากรูปที่ 2.10 รีเลย์ระยะทางที่บัส A จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิสำหรับสาย AC นอกจากนี้รีเลย์ A ยังถูกออกแบบให้เป็นการป้องกันสำรองของสาย CP ด้วย โดยจะทำงานในกรณีที่รีเลย์ที่บัส C ซึ่งป้องกันสาย CP ไม่ทำการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติ ด้วยลักษณะระบบดังรูปที่ 2.10 เมื่อเกิดความผิดปกติที่รีเลย์ A จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าความเป็นจริงจนอาจจะไม่ทำการตัดวงจรได้ การกำหนดขนาดของการป้องกันโซน 3 จึงต้องชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรับตั้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับระบบที่มีจุดเชื่อมต่อกับหลายแหล่งจ่าย เมื่อกำหนดให้กระแสจากสายส่งแต่ละเส้นมีค่าใกล้เคียงกันจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของโซน 3 ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าแบบที่ไม่ได้ชดเชยค่าจากการมีจุดเชื่อมต่อกับหลายจุดอย่างมาก



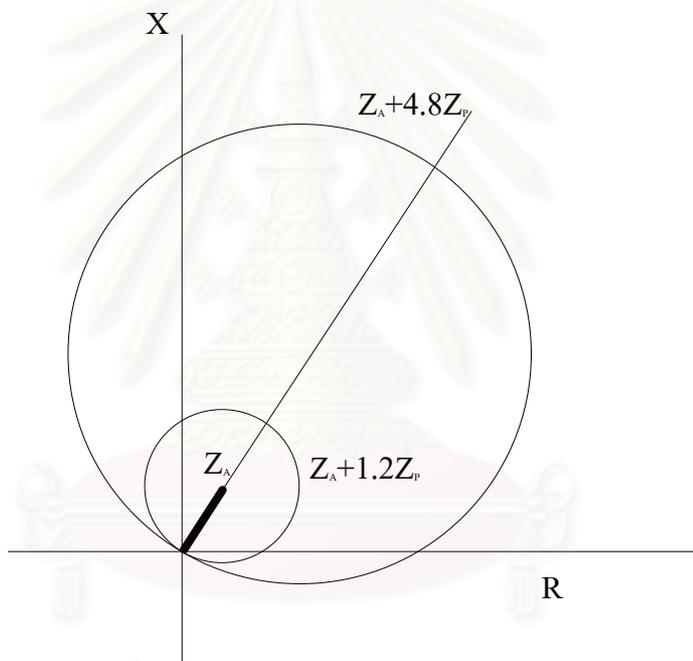
รูปที่ 2.10 ภาพระบบแบบที่มีจุดเชื่อมต่อกับหลายแหล่งจ่าย

เมื่อเป็นระบบแบบที่มีจุดเชื่อมต่อกับหลายแหล่งจ่าย จะคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายส่งได้ดังสมการที่ (2.4)

$$Z_3 = Z_A + k \cdot Z_P \left\{ 1 + \frac{I_B + I_M + I_N}{I_A} \right\} \quad (2.4)$$

โดยที่

- Z_3 คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ต้องทำการป้องกัน
- Z_A คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์ระยะทางทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิ
- Z_P คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์ระยะทางทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันสำรอง
- I_B, I_M, I_N คือ กระแสจาก Infeed อื่น นอกเหนือจากสายที่ทำการป้องกัน
- k คือ ค่าตัวคูณชดเชยความยาวสาย มีค่าระหว่าง 1.2 – 1.5

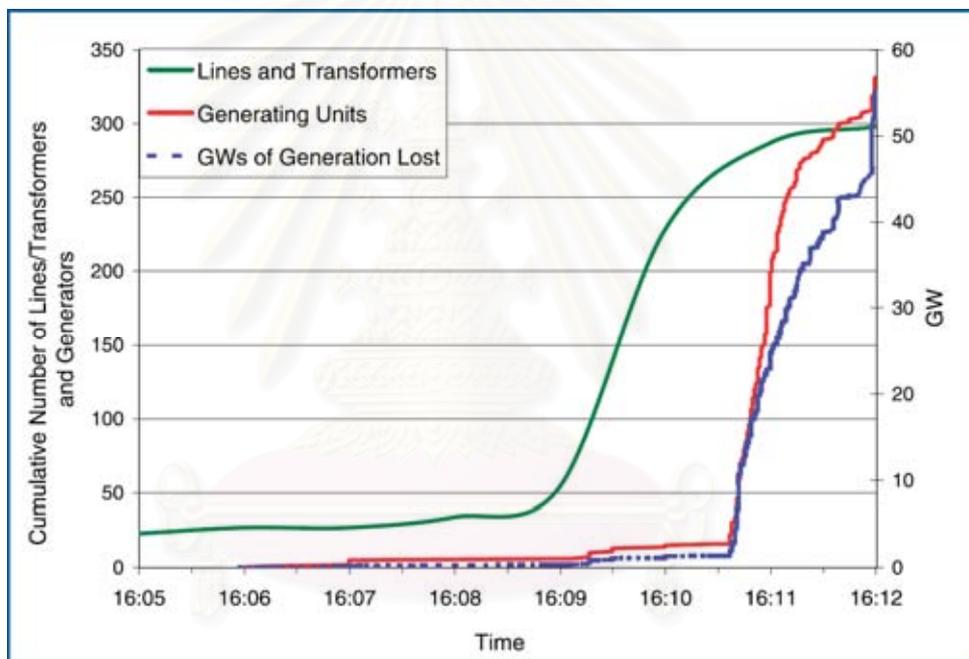


รูปที่ 2.11 ภาพขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบโม

เหตุผลที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานในสภาวะโหลดเกิน เพราะเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นค่ากระแสในสายส่งจะเพิ่มสูง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์โซน 3 มองเห็นมีค่าต่ำจนตกอยู่ในโซนการทำงาน ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรสายส่งเส้นที่ตนเองป้องกันอยู่ออกไป ผลที่เกิดคือกำลังไฟฟ้าที่เคยไหลผ่านสายส่งเส้นนั้นจะเปลี่ยนทิศทางไปไหลในสายส่งเส้นอื่นทำให้สายส่งเส้นอื่นที่ทำงานใกล้เคียงพิกัดเกิดสภาวะโหลดเกินตามไปด้วย เมื่อสายส่งเส้นอื่นเกิดสภาวะโหลดเกินรีเลย์โซน 3 ที่เห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้น

นั้นตกอยู่ในโซนการป้องกันจะทำการตัดวงจรออกอีกตามลำดับ ซึ่งการตัดวงจรในลักษณะนี้จะทำให้เกิดการเปิดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่องและนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

เหตุการณ์การตัดวงจรผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เนื่องจากสภาวะโหลดเกินถูกระบุไว้อย่างชัดเจนใน [9] ว่าเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างที่สหรัฐอเมริกาเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม ค.ศ. 2003 ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้ระบุว่ารีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้ตัดสายส่งสำคัญออกจากระบบเป็นจำนวนมากเนื่องจากตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานที่เป็นผลมาจากสภาวะโหลดเกินแล้วตัดสินใจว่าเป็นความผิดพลาด ผลคือในช่วงเวลาระหว่าง 16:05:57 ถึง 16:10:38 ตามเวลาท้องถิ่น มีกำลังไฟฟ้าที่ถูกตัดออกจากระบบเป็นปริมาณมหาศาลดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 จำนวนสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หลุดออกจากระบบเนื่องจากการตัดวงจรของรีเลย์โซน 3 [9]

สำหรับปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันที่ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรผิดพลาดนั้นจะมีลักษณะปัญหาที่ใกล้เคียงกันกับปัญหาการเกิดสภาวะโหลดเกินคือเมื่อแรงดันที่บัสที่รีเลย์ตรวจจับอยู่มีค่าต่ำลง รีเลย์จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายต่ำลงแล้วตัดวงจรสายที่รีเลย์นั้นป้องกันอยู่ซึ่งอาจจะทำให้ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันยิ่งทวีความรุนแรงจนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้

2.4 เหตุการณ์ที่สามารถใช้การป้องกันโซน 3 เป็นการป้องกันสำรองได้

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่ารีเลย์ระยะทางโซน 3 สามารถทำให้เกิดปัญหาร้ายแรงอย่าง การเกิดการตัดวงจรอย่างต่อเนื่องได้ ทั้งที่หน้าที่ของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เป็นเพียงแค่การป้องกัน สำรอง และปัจจุบันรีเลย์ระยะทางปฐมภูมิก็ได้รับการพัฒนาขีดความสามารถจนสามารถกำจัด ความผิดพลาดได้แทบทุกเหตุการณ์โดยไม่มีความผิดพลาดแล้ว ดังนั้นระดับความต้องการใช้งาน การป้องกันสำรองระยะไกลจึงควรที่จะยิ่งน้อยลง อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ [3] ได้กล่าวยืนยัน ถึงความจำเป็นที่จะต้องมรีเลย์ระยะทางโซน 3 ในระบบไฟฟ้าโดยพิจารณา เมื่อเกิดเหตุการณ์ ผิดพลาดของอุปกรณ์แต่ละชนิด มีรายละเอียดดังนี้

1.) แบตเตอรี่

หน้าที่ของแบตเตอรี่คือการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดของรีเลย์ ดังนั้นการที่แบตเตอรี่ เสื่อมสภาพหรือเสียนั้นจะทำให้รีเลย์ไม่สามารถใช้งานได้ โดยปกติสำหรับสายส่งที่มีแรงดันไฟฟ้า สูงมักจะมีแบตเตอรี่สำรองเสมอ ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้การป้องกันโซน 3 เพื่อทำหน้าที่ เป็นการป้องกันสำรองกรณีเกิดความผิดปกติของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม การป้องกันโซน 3 ยังคง มีความจำเป็นสำหรับระบบที่มีแบตเตอรี่เพียงก้อนเดียวและอยู่ห่างไกลยากจะเข้าถึง ซึ่งหน่วยงาน ที่ทำหน้าที่บำรุงรักษาต้องใช้เวลาในการซ่อมแซม

2.) รีเลย์

ในทางปฏิบัติมักจะใช้รีเลย์หลายตัวในการป้องกันความผิดพลาด เพื่อให้ครอบคลุมใน กรณีที่มีรีเลย์ตัวใดตัวหนึ่งเสีย ยิ่งในระบบที่มีระดับแรงดันสูงจะมีรีเลย์อยู่สองชุดพร้อมทั้งระบบนำ ร่อง (Pilot System) ทำให้ดูเหมือนกับการป้องกันสำรองระยะไกลนั้นไม่มีความจำเป็นในกรณีนี้ อย่างไรก็ตามยังมีความเป็นไปได้ที่จะมีรีเลย์ที่เสียมากกว่า 1 ตัว ดังนั้นการป้องกันสำรองจึงยังคง จำเป็นในกรณีที่รีเลย์เสียหาย

3.) อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Transducer)

ในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไม่สูงมากนัก อุปกรณ์แปลงสัญญาณไม่ว่าจะเป็น CT หรือ VT จะมีอยู่เพียงชุดเดียว การเกิดความผิดปกติขึ้นกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณอาจนำไปสู่การตัด วงจรผิดพลาดได้ ดังนั้นการป้องกันสำรองระยะไกลยังคงจำเป็นสำหรับกรณีนี้ แต่ในกรณีที่ระดับ แรงดันสูงขึ้น อุปกรณ์แปลงสัญญาณมักมีมากกว่า 1 ชุด จึงไม่ค่อยพบปัญหาเนื่องจากความ เสี่ยงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ

4.) เซอร์คิตเบรกเกอร์

เซอร์คิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สำรองไว้ ดังนั้นความเสียหายและการ ตัดวงจรผิดพลาดของเซอร์คิตเบรกเกอร์จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาด้วย ในกรณีที่มีความจำเป็น สูง เช่น เบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่กำจัดความผิดพลาดไม่ทำงานและไม่มีกรป้องกันสำรอง อาจจะต้อง

ตัดวงจรสายส่งด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดด้วย Breaker Failure เพื่อกำจัดความผิดปกติพ่วงออกไป ซึ่งการใช้ Breaker Failure จะทำให้สายส่งจำนวนมากถูกตัดออก อย่างไรก็ตามสามารถหลีกเลี่ยงการใช้งาน Breaker Failure ได้ด้วยการใช้ระบบการป้องกันสายส่งแบบนำร่อง (Pilot Protection) แต่การจะใช้วิธีนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการติดตั้งระบบสื่อสาร ดังนั้นการป้องกันระยะไกลโซน 3 จึงเป็นทางเลือกที่มักนิยมใช้ในการเป็นการป้องกันสำรองในกรณีที่เกิดการทำงานผิดพลาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์มากกว่า

5.) Breaker Failure Relay

การทำงานของ Breaker Failure Relay จะทำงานเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดวงจรได้เมื่อเกินระยะเวลาที่กำหนดไปแล้วไม่ว่าจะเป็นการไม่ตัดวงจรเนื่องจากการทำงานของรีเลย์หรือจากความเสียหายของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์เอง โดย Breaker Failure Relay จะสั่งให้ระบบการป้องกันสำรองทำงานแล้วตัดวงจรเพื่อแยกส่วนของความผิดปกติพ่วงและส่วนที่เบรกเกอร์ทำงานผิดพลาดออกจากระบบ ในกรณีที่ Breaker Failure Relay ไม่ทำงานการป้องกันสำรองระยะไกลจึงจำเป็นสำหรับกรณีนี้

6.) โครงสร้างบัส (Bus Configuration)

รูปแบบของโครงสร้างบัสบางรูปแบบ การป้องกันปฐมภูมิและการป้องกันสำรองท้องถิ่นไม่เพียงพอในการกำจัดความผิดปกติพ่วงออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การป้องกันสำรองระยะไกลเข้ามาช่วย สำหรับรายละเอียดของผลของโครงสร้างบัสที่มีต่อระบบป้องกันสามารถศึกษาเพิ่มเติมใน [3]

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การป้องกันสำรองโซน 3 ยังจำเป็นต่อการป้องกันในกรณีที่อุปกรณ์เหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นการป้องกันโซน 3 จึงยังคงมีความสำคัญ อย่างไรก็ตามนอกจากการป้องกันระยะไกลโซน 3 แล้ว ในทางปฏิบัติอาจจะใช้การป้องกันด้วย Local Breaker Failure หรือการป้องกันโซน 3 แบบกลับทิศ (Reverse Zone 3) แทนได้ แต่การป้องกันระยะไกลโซน 3 ยังเป็นวิธีที่ครอบคลุมต่อการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ มากที่สุดดังดูได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบป้องกันและบทบาทของระบบป้องกันสำรอง [3]

ชนิดอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาด, รายละเอียด	ระบบป้องกันสำรอง		
	Remote Zone3	Local Breaker Failure	Reverse Zone 3
เบตเตอร์, สถานีย่อยแบบเบตเตอร์ก้อนเดียว	✓	✗	✗
เบตเตอร์ 1 ก้อน, สถานีย่อยแบบใช้เบตเตอร์ 2 ก้อน	✓	✓	✓
รีเลย์, ในระบบการป้องกันแบบขั้นที่มีตัวป้องกันสำรอง	✓	✗	✗
รีเลย์, ในระบบการป้องกันแบบขั้นที่ไม่มีตัวป้องกันสำรอง	✓	✓	✓
รีเลย์ระยะทางแบบขั้น, ในระบบการป้องกันแบบขั้นและแบบนำร่อง	✓	✓	✓
รีเลย์แบบนำร่อง, ในระบบการป้องกันแบบขั้นและแบบนำร่อง	✓	✓	✓
อุปกรณ์วัดแรงดัน, ในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์วัดแรงดันสำรอง	✓	✗	✗
อุปกรณ์วัดแรงดัน, ในระบบที่มีอุปกรณ์วัดแรงดันสำรอง	✓	✓	✓
หม้อแปลงกระแส, ในระบบที่ไม่มีหม้อแปลงกระแสสำรอง	✓	✗	✗
หม้อแปลงกระแส, ในระบบที่มีหม้อแปลงกระแสสำรอง	✓	✓	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแส, ในสถานีย่อยแบบ 1 บัส 1 เบรกเกอร์	✓	✓	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแส, ในสถานีย่อยแบบ 2 บัส 1 เบรกเกอร์	✓	✓	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแส, ในสถานีย่อยแบบวงที่ไม่มีระบบสื่อสาร	✓	✗	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแส, ในสถานีย่อยแบบวงที่มีระบบสื่อสาร	✓	✓	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กลาง, ในสถานีย่อยแบบ 1.5 เบรกเกอร์ ที่ไม่มีระบบสื่อสาร	✓	✗	✓
เซอร์กิตเบรกเกอร์กลาง, ในสถานีย่อยแบบ 1.5 เบรกเกอร์ ที่มีระบบสื่อสาร	✓	✓	✓
บัสเซอร์กิตเบรกเกอร์, ในสถานีย่อยแบบ 1.5 เบรกเกอร์	✓	✓	✓
ความเสียหายเนื่องจากการเกิดอุบัติเหตุกับสถานี	✓	✗	✗

จากความสามารถในการเป็นตัวป้องกันสำรองดังกล่าว จึงจำเป็นต้องคงรีเลย์ระยะทางโซน 3 ไว้ ดังนั้นการแก้ปัญหาการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ให้ตัดวงจรได้อย่างถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อการรักษาความมั่นคงของระบบ แนวทางหลักในการแก้ปัญหาคือการออกแบบให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ทำงานเฉพาะกับเหตุการณ์ที่เป็นความผิดปกติ ในส่วนของเหตุการณ์อื่นๆ ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของรีเลย์ต้องไม่ทำงาน แม้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์เห็นจะตกอยู่ในโซนการทำงานก็ตาม แม้ว่าการปรับปรุงการทำงานเช่นนี้จะเป็นการลดความวุ่นวายใจของรีเลย์ แต่ในสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบเช่นนี้ การรักษาความมั่นคงของและเสถียรภาพระบบเป็นสิ่งที่สำคัญกว่า ดังนั้นจึงควรให้รีเลย์ทำงานในแนวทางที่จะทำให้ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้

2.5 แนวทางแก้ปัญหาการตัดวงจรอย่างไม่เหมาะสมของรีเลย์ระยะทางโซน 3

งานวิจัยเพื่อลดผลกระทบของการตัดวงจรอย่างไม่เหมาะสมของรีเลย์ระยะทางโซน 3 มีแนวคิดหลักคือให้รีเลย์สามารถตัดสินใจได้ว่าเหตุการณ์ใดควรจะตัดวงจร และเหตุการณ์ใดไม่ควรตัดวงจร ซึ่งมักจะใช้การโปรแกรมเงื่อนไขการตัดวงจรลงในรีเลย์ระยะทางแบบเชิงเลข เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและไม่ต้องลงทุนเปลี่ยนโครงสร้างของรีเลย์ใหม่ ทั้งนี้เหตุการณ์ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ควรตัดวงจรคือการเกิดความผิดปกติในโซน 3 ของการทำงานเท่านั้น สำหรับเหตุการณ์อื่นๆ ที่ทำให้รีเลย์ตรวจพบค่าอิมพีแดนซ์ภายในโซน 3 ของการทำงาน รีเลย์ไม่ควรตัดวงจรเพราะการตัดวงจรมองจากจะไม่สามารถแก้ปัญหาได้แล้ว ยังอาจจะส่งผลให้ปัญหาลุกลามขึ้นอีกด้วย งานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการป้องกันการตัดวงจรผิดพลาดของรีเลย์โซน 3 ได้แก่

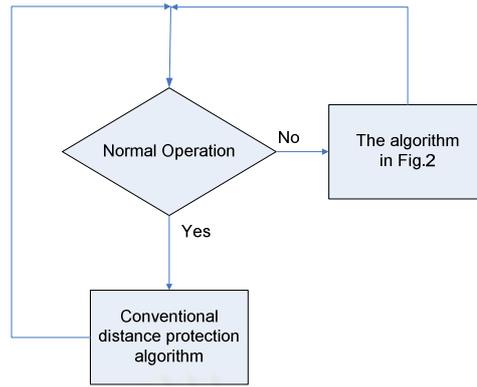
งานวิจัยของ Mattias Jonsson และ Jaap E. Daalder [4] เรื่อง “An Adaptive Scheme to Prevent Undesirable Distance Protection Operation During Voltage Instability”

งานวิจัยของ Seong-II Lim และคณะ [2] เรื่อง “Adaptive Blinder for Distance Relay Based on Sensitivity Factors”

งานวิจัยของ Chul-Hwan Kim และคณะ [5] เรื่อง “An Enhance Zone 3 Algorithm of a Distance Relay Using Transient Component and State Diagram”

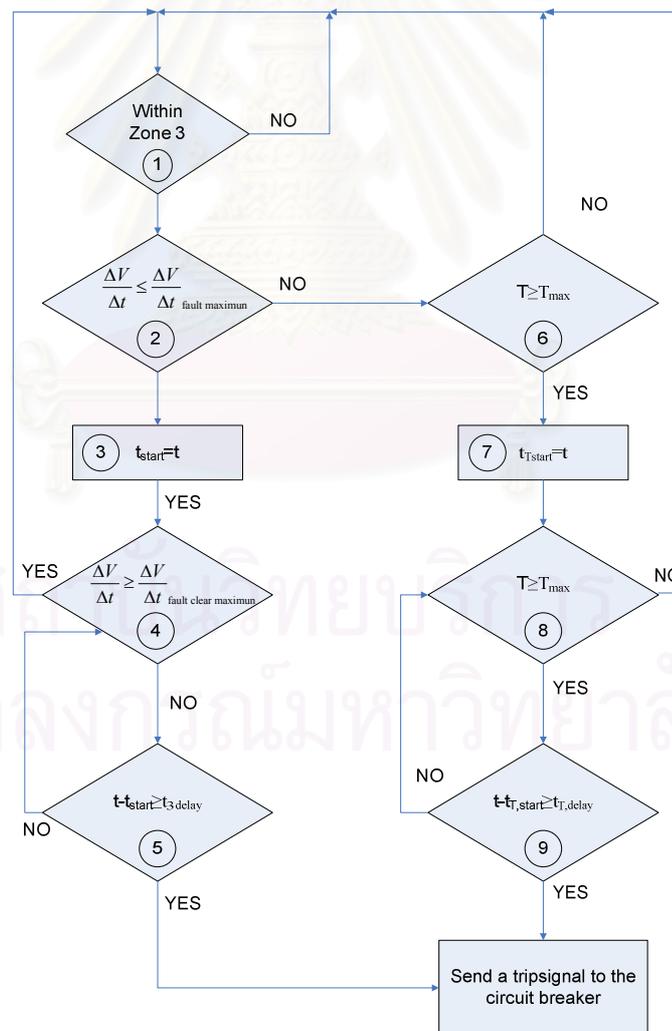
2.5.1 วิธีการเพิ่มเงื่อนไขในการตัดสินใจตัดวงจรโดยใช้แผนภาพร่วมกับการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน

งานวิจัยโดย [4] มีแนวคิดหลักในการปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ด้วยการใส่แผนภาพเพิ่มเงื่อนไขการตัดสินใจตัดวงจรในกรณีที่เกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน โดยจะแบ่งการทำงานของรีเลย์เป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่เป็นการทำงานตามปกติซึ่งจะทำงานเหมือนกับรีเลย์ระยะทางทั่วไป และรูปแบบที่จะทำงานเมื่อตรวจพบค่าอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของการทำงาน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ [4] ได้นำเสนอไว้

เมื่อรีเลย์ระยะทางตรวจพบค่าอิมพีแดนซ์เข้ามาในโซน 3 แล้ว จะทำการตัดสินใจตัดวงจรโดยใช้ขั้นตอนวิธีตามแผนภาพในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางเมื่อตรวจพบอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของการทำงาน

รีเลย์ที่ทำการปรับปรุงประเภทนี้จะใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Derivative of the Voltage) เป็นสัญญาณขาเข้าของรีเลย์ด้วย เพื่อช่วยในการตัดสินใจว่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบในโซนการทำงานเกิดจากความผิดปกติหรือไม่ สามารถอธิบายการทำงานแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

กล่องที่ 1 ทำหน้าที่ตรวจสอบว่ามีค่าอิมพีแดนซ์เข้ามาในโซน 3 หรือไม่

กล่องที่ 2 ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบนั้นเกิดจากความผิดปกติหรือเกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันโดยการใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากโดยปกติแล้วเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติและตำแหน่งใกล้เคียงจะมีค่าเข้าใกล้ 0 ในทันที ทำให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมาก จึงได้เงื่อนไขการตัดสินใจดังนี้

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \leq \frac{\Delta V}{\Delta t}^{\text{fault maximum}} \quad \text{หมายความว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} > \frac{\Delta V}{\Delta t}^{\text{fault maximum}} \quad \text{หมายความว่าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น}$$

กล่องที่ 3 ทำหน้าที่เริ่มจับเวลาการเข้าสู่โซน 3 โดย t_{start} คือ เวลาที่เข้าสู่โซน 3

กล่องที่ 4 ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าความผิดปกติถูกกำจัดออกไปแล้วหรือไม่ โดยใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้า โดยปกติ ณ เวลาที่มีการกำจัดความผิดปกติออกไปค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูง

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \geq \frac{\Delta V}{\Delta t}^{\text{fault clear minimum}} \quad \text{หมายความว่าความผิดปกติถูกกำจัดออกไป}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} < \frac{\Delta V}{\Delta t}^{\text{fault clear minimum}} \quad \text{หมายความว่าความผิดปกติยังไม่ถูกกำจัดออกไป}$$

กล่องที่ 5 เป็นช่วงเวลาที่ยอมให้ความผิดปกติถูกกำจัด โดย t_{3delay} คือ ระยะเวลาของรีเลย์โซน 3

กล่องที่ 6 – 9 เป็นส่วนที่ป้องกันความเสียหายจากความร้อน (Thermal Overload) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการป้องกันการตัดวงจรผิดพลาดเนื่องจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน

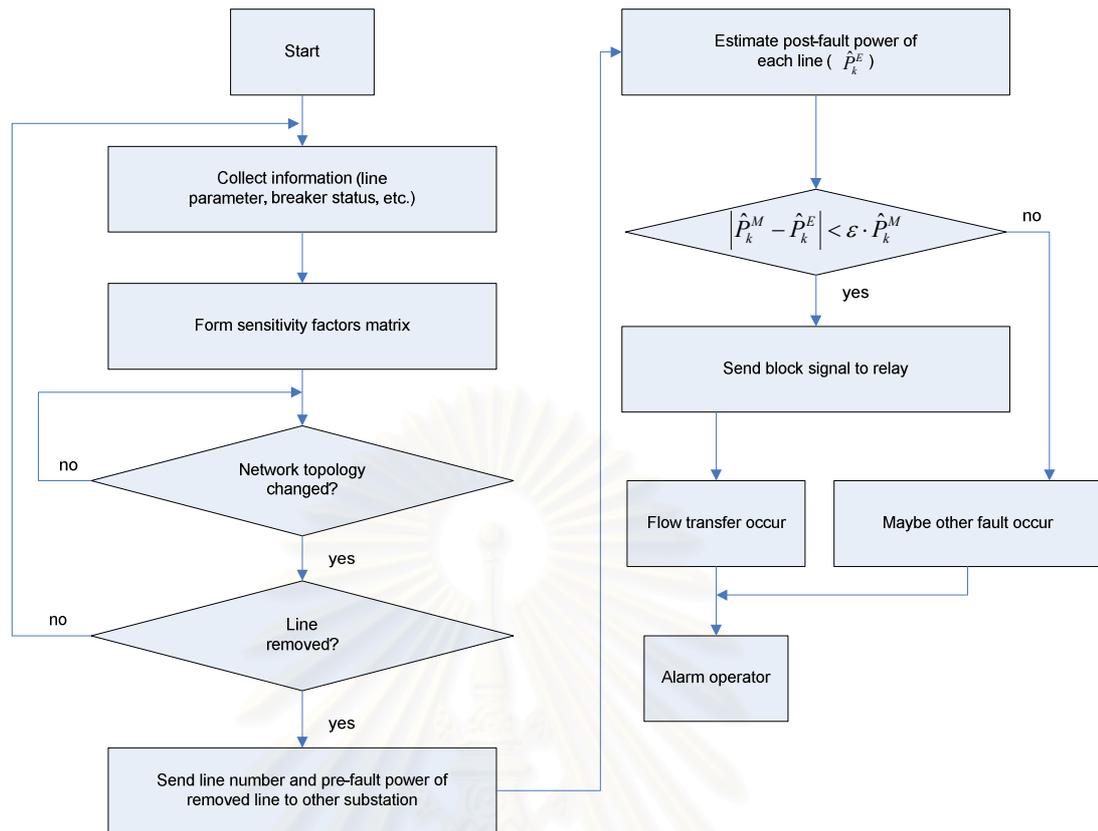
จากผลการทดสอบที่ได้เสนอไว้ใน [4] พบว่าเมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันรีเลย์จะยังคงไม่ทำการตัดวงจร ไม่ว่าจะใช้กับรีเลย์ที่มีลักษณะสมบัติแบบใด อย่างไรก็ตาม แม้จะสามารถปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางในสภาวะที่เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันได้แต่วิธีที่นำเสนอนี้ยังมีกรณีที่น่าจะทำให้เกิดการตัดวงจรผิดพลาดได้อยู่ เนื่องจากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าที่ไม่สามารถคาดเดาได้ และมีหลายเหตุการณ์ที่ค่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันมีลักษณะเดียวกัน เช่น ในขณะที่เกิดความผิดปกติขึ้น ถ้ามีการสับต่อตัวเก็บประจุเข้ากับบัสที่รีเลย์ตรวจวัดแรงดันอยู่เพื่อรักษาระดับแรงดัน ขนาดแรงดันที่บัสนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันมีค่าสูงคล้ายกับขณะที่เกิดการกำจัดความผิดปกติออกไป ซึ่งอาจทำให้รีเลย์ตัดสินใจเกิดการกำจัดความผิดปกติออกไปเรียบร้อยแล้ว ทำให้รีเลย์ไม่ตัดวงจรในกรณีนี้

นอกจากนี้ ในกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบในขณะที่เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันนั้นอาจจะทำให้แรงดันของระบบลดลงไปมาก จนอาจจะทำให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันมีค่าติดลบมากๆ จนทำให้ตีความเป็นความผิดปกติและรีเลย์อาจจะทำการตัดวงจรออกโดยไม่จำเป็นได้ ดังนั้นกรณีนี้จึงเป็นปัญหาของขั้นตอนวิธีของ [4]

2.5.2 การใช้ขอบเขตแบบเปลี่ยนแปลงได้ร่วมกับการกำหนดค่าตัวคูณความไวในการตัดวงจร

งานวิจัยของ [2] เกิดขึ้นจากการศึกษาการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างแล้วพบว่าปัญหาหนึ่งที่ทำให้เกิดการตัดวงจรอย่างต่อเนื่องคือการที่เกิดความผิดปกติขึ้นแล้วมีการตัดสายส่งที่เกิดความผิดปกติออกไป ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เคยไหลอยู่ในสายส่งเส้นนั้นเปลี่ยนทิศทางการไหลไปที่สายส่งเส้นอื่น ทำให้สายส่งบางเส้นเกิดสภาวะโหลดเกินขึ้น สายส่งที่เกิดสภาวะโหลดเกินนี้อาจถูกรีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรออกอย่างไม่จำเป็น ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่เคยผ่านสายส่งเส้นนี้เปลี่ยนทิศทางไปยังสายส่งเส้นที่เหลือและทำให้สภาวะโหลดเกินที่เกิดขึ้นรุนแรงมากยิ่งขึ้น เป็นผลให้รีเลย์โซน 3 ตัดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่จะลดโอกาสการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างคือการทำให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ไม่ตัดวงจรเนื่องจากสภาวะโหลดเกินนั่นเอง



รูปที่ 2.15 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่ปรับปรุงใน [2]

แนวทางที่น่าเสนอ คือ การเพิ่มขอบเขตป้องกันแบบเปลี่ยนแปลงได้ (Adaptive Blinder) ให้กับรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อป้องกันการตัดวงจรอย่างไม่เหมาะสมเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน โดยมีขั้นตอนวิธีดัง รูปที่ 2.15 เพื่อปรับปรุงให้รีเลย์ระยะทางสามารถแยกแยะได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบในโซน 3 นั้นเกิดจากสภาวะโหลดเกินหรือเกิดจากความผิดพลาดของ แนวคิดหลักของแผนภาพการทำงานคือการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งนั้นที่วัดได้เมื่อความผิดพลาดถูกกำจัดออกไป (\hat{P}_k^M) กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งนั้นที่ได้ประมาณขึ้นเมื่อความผิดพลาดถูกกำจัดออกไป (\hat{P}_k^E) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.5)

$$|\hat{P}_k^M - \hat{P}_k^E| < \epsilon \cdot \hat{P}_k^M \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

โดยค่า ϵ เป็นค่าตัวคูณความไวซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณใน [2] และ k เป็นลำดับของสายส่ง

ถ้าค่า \hat{P}_k^M ที่ได้สอดคล้องกับสมการ (2.5) รีเลย์จะตัดสินใจว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบเกิดจากสภาวะโหลดเกินและไม่ทำการตัดวงจรพร้อมทั้งส่งสัญญาณไปที่ศูนย์ควบคุมเพื่อแจ้งการเกิด

สภาวะไหลตื้น ในกรณีที่ไม่สอดคล้องรีเลย์จะตัดสินใจว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นแล้วทำการตัดวงจร

อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอมาข้างต้นยังไม่สามารถใช้งานได้กับระบบที่ไม่มีระบบสื่อสารระหว่างสถานีย่อยเพราะจำเป็นต้องทราบข้อมูลของสายส่งทั้งระบบว่ามีสายใดถูกตัดออกจากระบบ นอกจากนี้การทดสอบไม่ได้คำนึงถึงสภาวะชั่วขณะที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นอีกด้วย

2.5.3 การใช้ประยุกต์ใช้แผนภูมิสถานะร่วมกับการตรวจวัดสภาวะชั่วขณะในการตัดสินใจตัดวงจร

จุดประสงค์ของงานวิจัยของ [5] คือต้องการให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรเฉพาะเมื่อเกิดความผิดปกติในโซนการป้องกันเท่านั้น สำหรับเหตุการณ์อื่นๆ ได้แก่ การเกิดสภาวะไหลตื้น และการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งทั้งสองเหตุการณ์นี้ รีเลย์ระยะทางโซน 3 ไม่ควรตัดวงจร เนื่องจากอาจจะนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างได้ดังที่เคยเกิดขึ้นแล้วในเหตุการณ์ไฟฟ้าดับบริเวณกว้างเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม ค.ศ. 2003

แนวคิดของวิธีการนี้ คือ การแยกความแตกต่างของการเกิดความผิดปกติกับสภาวะไหลตื้น หรือการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันด้วยการวัดความรุนแรงของสภาวะชั่วขณะ ดังนั้น จึงสามารถแยกการเกิดความผิดปกติออกจากสองเหตุการณ์ที่เหลือได้ ขั้นตอนวิธีนี้จึงเพิ่มความมั่นใจให้กับระบบเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แต่ยังคงรักษาระดับความวางใจได้ในสภาวะปกติไว้ ในส่วนของรายละเอียดของขั้นตอนวิธีจะกล่าวในบทต่อไป

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดสอบกับระบบอย่างง่ายที่มีเพียงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสต่ออยู่กับบัสอนันต์ และละเลยพลวัตทางด้านแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไป ซึ่งอาจจะทำให้สภาวะชั่วครู่ของระบบไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำขั้นตอนวิธีของ [5] มาทดสอบกับระบบที่มีจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้นเป็น 3 เครื่องต่อกับระบบที่เป็นโครงข่ายเพื่อให้เห็นพลวัตของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องต่ออยู่ นอกจากนี้ในแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสที่ใช้จะคำนึงถึงพลวัตทางด้านแรงดันเนื่องจากผลของขดลวดสนามและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เพื่อให้สภาวะชั่วครู่ที่จำลองขึ้นใกล้เคียงความจริงมากที่สุดด้วย

บทที่ 3

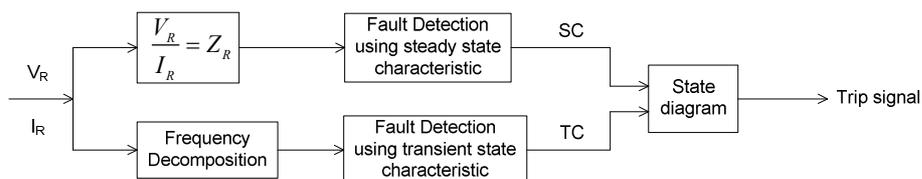
รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

โดยทั่วไปการทำงานของรีเลย์ระยะทางจะเป็นแบบสภาวะอยู่ตัว คือ สัญญาณที่สั่งให้รีเลย์ตัดวงจรจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้น รีเลย์จึงไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เข้าไปในโซนการทำงานนั้นเกิดจากความผิดพลาดหรือเกิดจากสาเหตุอื่นๆ ที่รีเลย์ไม่ควรตัด เช่น การเกิดสภาวะโหลดเกิน และการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ในสภาวะเหล่านี้การตัดวงจรอาจจะนำไปสู่การตัดวงจรอย่างต่อเนื่อง (Cascading Outage) และการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างได้ในที่สุด ดังนั้นปัญหาของการตัดสินใจตัดวงจรคือการบ่งชี้ว่าอิมพีแดนซ์ที่เข้ามาอยู่ในโซน 3 นั้นเกิดจากความผิดพลาดหรือเกิดจากสาเหตุอื่น

จากแนวคิดของ [5] ได้ทำการปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อไม่ให้รีเลย์ทำงานเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินหรือสภาวะการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ทั้งนี้นอกจากการตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของการทำงานแล้ว ยังเพิ่มการตรวจวัดสภาวะชั่วขณะจากองค์ประกอบชั่วขณะและแผนภูมิสถานะ เข้าไปในรีเลย์ระยะทางโซน 3 ทำให้รีเลย์สามารถบ่งชี้ความแตกต่างของการเกิดความผิดพลาดกับสภาวะโหลดเกินหรือการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบรีเลย์ชนิดนี้ต่อไป

3.1 พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 แล้วว่า รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะทำการตรวจจับสภาวะชั่วขณะเป็นตัวช่วยในการแยกแยะเหตุการณ์อื่นๆ ออกจากการเกิดความผิดพลาด ซึ่งการตัดสินใจจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ตกอยู่ในโซน 3 ของการทำงานไม่เพียงพอต่อการตัดสินใจหรือบ่งชี้ความรุนแรงของสภาวะชั่วครู่ของระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่รีเลย์ระยะทางจะต้องรับสัญญาณเข้าอื่นเพิ่มเติม จาก [5] จะให้รีเลย์รับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อนำไปวิเคราะห์ความรุนแรงของสภาวะชั่วขณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

จากแผนภาพการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ รีเลย์จะรับกระแสและแรงดันของสายส่งที่ทำการป้องกันอยู่ แล้วจะแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบสถานะอยู่ตัว (Steady State Component: SC) กับส่วนที่เป็นองค์ประกอบสถานะชั่วขณะ (Transient Component: TC) จากนั้นจึงนำทั้งสององค์ประกอบไปเข้าแผนภูมิสถานะ (State Diagram) เพื่อทำการตัดสินใจตัดวงจรต่อไป

สัญญาณ SC ในรูปที่ 3.1 เป็นสัญญาณในรูปแบบฐานสอง (Binary) ได้จากการนำค่ากระแสและแรงดันของสายส่งที่รีเลย์ป้องกันอยู่มาคำนวณเป็นค่าอิมพีแดนซ์ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ตกอยู่ในโซน 3 หรือไม่ ถ้าตกอยู่ในโซน 3 ค่า SC จะเป็น "1" แต่ถ้าค่าอิมพีแดนซ์อยู่นอกโซน 3 SC จะมีค่าเป็น "0" ซึ่งการคำนวณหาค่า SC นี้จะเหมือนกับการทำงานของรีเลย์ระยะทางทั่วไปนั่นเอง

ในกรณีของการเกิดความผิดปกติ รีเลย์จะเห็นความยาวสายที่ตัวเองป้องกันอยู่มีค่าสั้นลงดังสมการที่ (2.1) จนตกอยู่ในโซนการทำงาน SC จึงมีค่าเป็น "1" แต่ในกรณีของการเกิดสภาวะไหลเกินนั้นรีเลย์จะเห็นค่ากระแสในสายส่งเพิ่มขึ้นจนทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นมีค่าลดลงจนตกในโซนการทำงานแทน และในกรณีของการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน แรงดันที่บัสที่รีเลย์ตรวจจับอยู่จะลดลงจนทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซนการทำงานด้วยเช่นกัน

ในส่วนของสัญญาณ TC จะเป็นสัญญาณฐานสองที่แสดงถึงความรุนแรงของสภาวะชั่วขณะ ถ้าสภาวะชั่วขณะรุนแรงเกินกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) ที่ตั้งไว้ ค่า TC จะเป็น "1" แต่ถ้าต่ำกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน TC จะเป็น "0" ซึ่งค่า TC นี้หาได้จากการคำนวณองค์ประกอบความถี่อื่นนอกเหนือจากความถี่หลักของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์รับค่ามาจากหม้อแปลงแรงดัน (H_{sum}) แล้วใช้ Fast Fourier Transform (FFT) เป็นเครื่องมือในการแยกองค์ประกอบความถี่ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$V_H(n) = FFT(V) \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (3.1)$$

$$H_{sum} = \sum_{k=2}^{N/2} |V_H(k)| \quad (3.2)$$

โดย

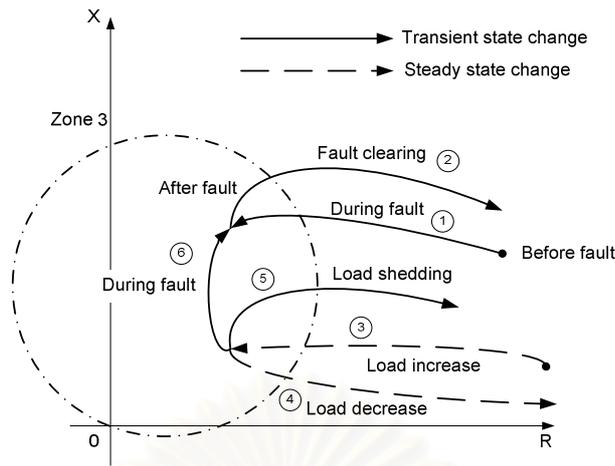
- V คือ เวกเตอร์ของแรงดันที่ทำการบันทึกค่าขนาดแรงดันจากหม้อแปลงแรงดันของรีเลย์
- N คือ จำนวนข้อมูลขนาดแรงดันที่บันทึกค่าไว้
- V_H คือ ขนาดแรงดันที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเกิดจากการแยกองค์ประกอบความถี่ของ V
- H_{sum} คือ ผลรวมขนาดแรงดันที่องค์ประกอบความถี่ต่างๆ นอกจากความถี่หลัก

ค่า H_{sum} ที่ได้นี้จะนำไปเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ หากค่า H_{sum} ที่ได้สูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน TC จะมีค่าเป็น "1" แต่หาก H_{sum} มีค่าต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน TC จะมีค่าเป็น "0" สำหรับกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะที่รุนแรงจนค่า H_{sum} สูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน และทำให้ TC มีค่าเป็น "1" ในที่สุด ซึ่งต่างจากการเกิดสภาวะโหลดเกินและการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ในช่วงก่อนที่จะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของระบบขึ้น ทั้งสองเหตุการณ์จะเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปและมีการเปลี่ยนแปลงช้าๆ จนทำให้ H_{sum} มีค่าต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน TC ที่คำนวณได้จึงมีค่าเป็น "0" สำหรับการปลดโหลด (Load Shedding) ถ้าทำการปลดโหลดในปริมาณที่มากพอก็อาจจะทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะที่มีค่ามากจนทำให้ค่า TC มีค่าเป็น "1" ได้เช่นกัน

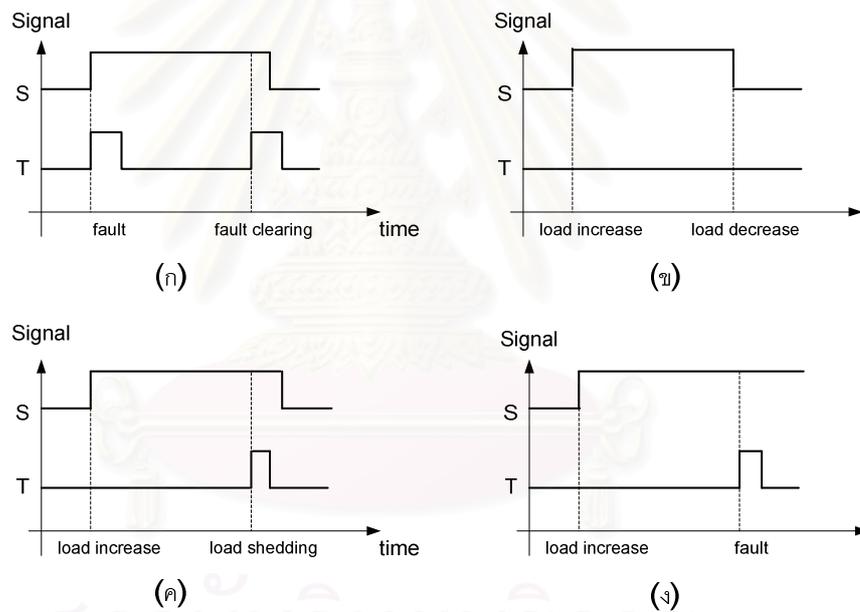
หลักจากนั้นทั้งสัญญาณ SC และ TC จะถูกส่งต่อไปยังแผนภูมิสถานะเพื่อทำการตัดสินใจตัดวงจรต่อไป

3.2 แผนภูมิสถานะการตัดวงจรของรีเลย์ระยะทางโซน 3

แผนภูมิสถานะได้มาจากการพิจารณาเหตุการณ์ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในโซน 3 ของการป้องกัน ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถสรุปเป็นเหตุการณ์หลัก แทนด้วย SC และ TC ในรูปที่ 3.3 จากรูปที่ 3.3 ก. เป็นกรณีที่เกิดความผิดปกติในโซน 3 จะพบว่าค่า SC เท่ากับ "1" เมื่อรีเลย์เห็นค่าอิมพีแดนซ์ในโซน 3 และในขณะที่เกิดความผิดปกติกับขณะที่กำจัดความผิดปกติออกไป ซึ่งทั้งสองเหตุการณ์ต่างก็ทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะรุนแรง ค่า TC จึงมีค่าเป็น "1" ในรูปที่ 3.3 ข. เป็นการเกิดสภาวะโหลดเกินด้วยการค่อยๆ เพิ่มโหลดจนเข้าโซน 3 แล้วค่อยๆ ลดโหลดจนออกจากโซน 3 จะเห็นว่าไม่มีสภาวะชั่วขณะรุนแรงเกิดขึ้นค่า TC จึงเป็น "0" ตลอดเวลา ในรูปที่ 3.3 ค. จะคล้ายกับรูปที่ 3.3 ข. แต่ใช้วิธีการปลดโหลด (Load Shedding) แทน ทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะตอนที่ปลดโหลดนั้น ส่งผลให้ค่า TC เป็น "1" ณ เวลาที่ปลดโหลด และในรูปที่ 3.3 ง. เป็นการเกิดความผิดปกติหลังจากค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3 เนื่องจากสภาวะโหลดเกิน จะเห็นว่าขณะเกิดความผิดปกติ TC เป็น "1" เนื่องจากมีสภาวะชั่วขณะรุนแรงเกิดขึ้น และ SC ยังคงค่า "1" ไว้เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ยังอยู่ในโซน 3



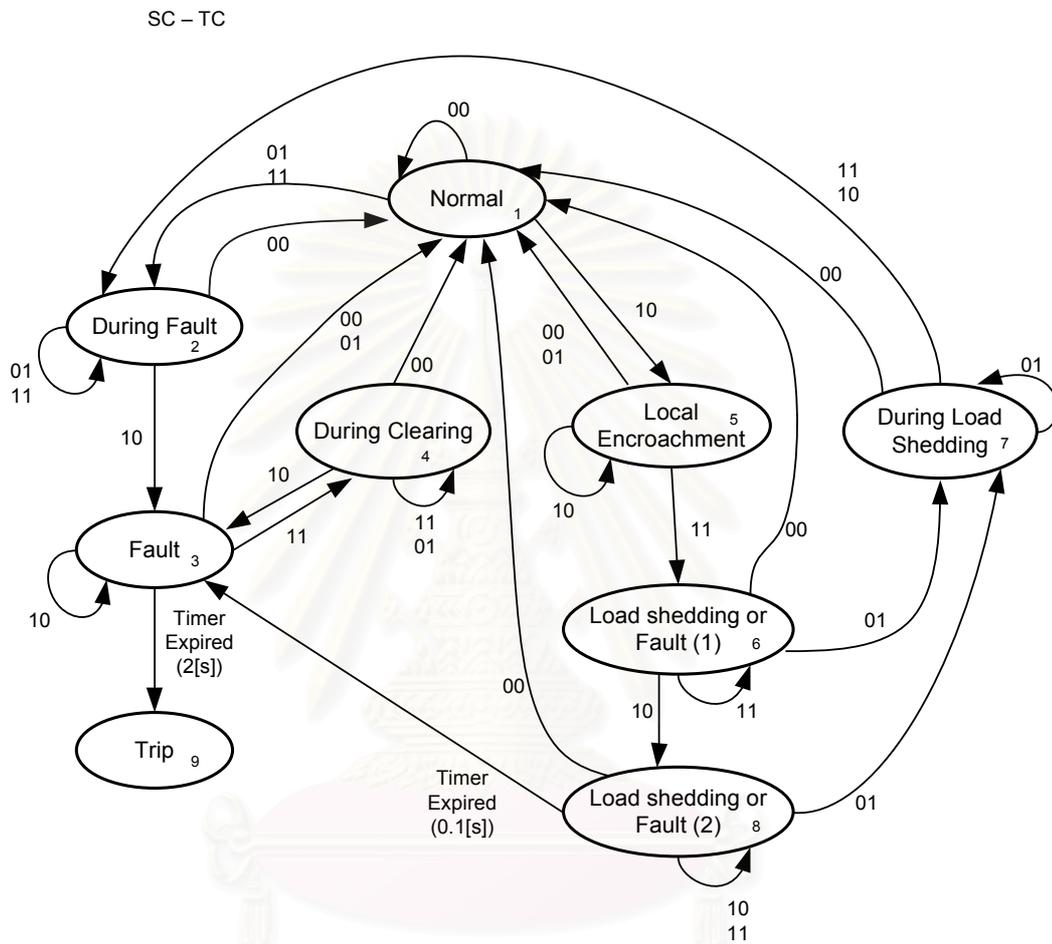
รูปที่ 3.2 ภาพทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 3.3 สัญญาณ SC และ TC ในเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ก) เกิดความผิดปกติแล้วความผิดปกติถูกกำจัดออกไป ข) โหลดเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆ ลด โหลด ค) โหลดเพิ่มขึ้นแล้วทำการปลดโหลดแบบฉับพลัน ง) เพิ่มโหลดแล้วเกิดความผิดปกติขึ้น

เหตุการณ์เหล่านี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดต่อเนื่องกัน ขึ้นกับค่า SC และ TC จึงสามารถนำมาจัดรูปให้อยู่ในแผนภูมิสถานะเดียวกันได้ดังรูปที่ 3.4 แผนภูมิสถานะนี้สามารถแบ่งการทำงานหลักได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ตีความว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น (สถานะที่ 1, 2, 3, 4 และ 9) ส่วนที่ตีความว่าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นการเกิดสภาวะโหลดเกิน หรือเกิดการสูญเสีย

เสถียรภาพแรงดันก็ได้ (สถานะที่ 5, 6, 7 และ 8) โดยจะให้การตัดสินใจตัดวงจรเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสถานะที่รีเลย์ตีความว่าเกิดความผิดปกติขึ้น (สถานะที่ 3) และให้ส่งสัญญาณตัดวงจรเมื่ออยู่ที่สถานะนี้เกินระยะเวลาหน่วงเวลาของการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 (สถานะที่ 9)



รูปที่ 3.4 แผนภูมิสถานะกระบวนการตัดวงจรของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

จาก รูปที่ 3.4 ในส่วนของการตัดสินใจว่าเกิดสภาวะไหลตเกินนั้น สามารถทำได้ทั้งในสภาวะไหลตเกินและการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน เนื่องจากทั้งสองกรณีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในแง่ของ SC และ TC อย่างไรก็ตาม รีเลย์ระยะทางยังสามารถตัดสินใจตัดวงจรได้ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นถึงแม้จะอยู่ในสถานะที่ถูกตีความว่าเป็นสภาวะไหลตเกินก็ตาม เช่น ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นในขณะที่อยู่ในสภาวะไหลตเกิน (สถานะที่ 6) รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะเปลี่ยนสถานะจาก 5 → 6 → 7 → 2 → 3 ได้ จนไปตกอยู่ในสถานะที่แน่ใจว่าระบบเกิดความผิดปกติจริงในที่สุด

นอกจากนี้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะยังเปิดโอกาสให้ สามารถปลดโหลดได้ในกรณีที่อยู่ในสภาวะโหลดเกิน โดยรีเลย์จะไม่ตัดสินใจว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นถ้าเกิดปลดโหลดแล้วค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นอยู่นอกโซนการทำงาน อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีที่การปลดโหลดออกไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นยังคงอยู่ในโซนการทำงาน ซึ่งอาจเกิดจากความผิดปกติบางส่วนในระบบ รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะสั่งให้ตัดวงจรโดยตีความว่าเกิดความผิดปกติขึ้นโดยจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ 5 → 6 → 8 → 2 → 3 ได้

จะเห็นว่าในการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะนี้ไม่มีส่วนใดที่ขึ้นกับลักษณะสมบัติของรีเลย์ นั่นคือ ขั้นตอนวิธีนี้สามารถนำไปใช้กับรีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้ทุกลักษณะสมบัตินั้นเอง นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์แนวคิดนี้ไปใช้กับรีเลย์ระยะทางโซน 2 ได้อีกด้วย

3.3 ผลทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่ได้มีการเสนอไว้

ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่ [5] ได้ทดสอบไว้ นั้น จะทำการทดสอบการทำงานของรีเลย์กับระบบทดสอบอย่างง่ายและแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบแรงดันภายในคงที่ซึ่งจะเลยผลเนื่องจากพลวัตของแรงดันไฟฟ้า เหตุการณ์ที่ได้ทำการทดสอบได้แก่

- การเกิดความผิดปกติ เพื่อทดสอบการทำงานพื้นฐานของรีเลย์
- การเกิดสภาวะโหลดเกิน เพื่อทดสอบว่าในสภาวะโหลดเกินที่รีเลย์ระยะทางไม่ควรทำการตัดวงจรนั้น รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะทำการตัดวงจรออกไปหรือไม่
- การเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน เพื่อทดสอบว่าในสภาวะที่จะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันซึ่งรีเลย์ระยะทางไม่ควรทำการตัดวงจรนั้น รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะทำการตัดวงจรออกไปหรือไม่
- การเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดปกติ เพื่อทดสอบการให้ลำดับความสำคัญ ซึ่งควรให้ลำดับความสำคัญในการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติสูงกว่าการไม่ตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ดังนั้นในเหตุการณ์นี้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะควรทำการตัดวงจร

จากผลการทดสอบพบว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะทำงานได้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ทุกประการ โดยรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แต่ไม่ตัดวงจรในกรณีอื่นๆ ที่ไม่ใช่ความผิดปกติแม้รีเลย์จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3

ของการทำงานก็ตาม นอกจากนี้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะยังให้ลำดับความสำคัญในการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติสูงกว่า เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ

อย่างไรก็ตาม การทดสอบดังกล่าวยังสร้างขึ้นบนระบบจำลองอย่างง่ายและละเลยผลของพลวัตทางแรงดันที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังอันได้แก่ การทำงานของ AVR และ PSS ซึ่งส่งผลกระทบต่อสถานะชั่วขณะของระบบ และอาจทำให้การตีความค่า TC ของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะผิดพลาดได้

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการทดสอบในระบบทดสอบที่พัฒนาเพิ่มจากที่ [5] ใช้ โดยจะคำนึงถึงพลวัตของแรงดันอันเนื่องมาจากผลของขดลวดสนามและระบบควบคุมแรงดันต่างๆ เพื่อทดสอบการทำงานของรีเลย์ด้วยแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจริง

นอกจากนี้ยังทำการทดสอบในระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ระบบทดสอบจะต่อเชื่อมแบบโครงข่ายเพื่อให้ระบบทดสอบมีความใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าที่มีอยู่จริง โดยประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 3 เครื่อง ซึ่งคำนึงถึงผลจากระบบควบคุมแรงดันและระบบควบคุมความเร็วร่วมด้วย สำหรับเหตุการณ์ที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากเหตุการณ์ดังที่ [5] ได้ทำการทดสอบไว้ ยังเพิ่มเติมในส่วนของเหตุการณ์ที่อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบร่วมด้วย รายละเอียดของระบบทดสอบและขั้นตอนการทดสอบจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงพลวัตนั้นแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ได้ผลการจำลองแบบ (Simulation) สอดคล้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสและส่วนควบคุม แบบจำลองของสายส่งและระบบไฟฟ้า และแบบจำลองของโหลด ซึ่งสามารถแทนแต่ละส่วนได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และสมการพีชคณิต สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะพัฒนาแบบจำลองของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

4.1 การสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสและส่วนควบคุม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสโดยทั่วไปสามารถแบ่งส่วนการทำงานได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและส่วนควบคุม แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยด้านเสถียรภาพและพลวัตของระบบไฟฟ้ามีหลายแบบ การเลือกใช้งานขึ้นกับความละเอียดของแบบจำลองและเหตุการณ์ที่ต้องการดูผล ในส่วนของระบบควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น ส่วนควบคุมความเร็ว และส่วนควบคุมแรงดันที่ขั้วต่อ โดยระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Governor System) จะเป็นส่วนที่ควบคุมความเร็วของโรเตอร์ซึ่งจะมีผลต่อความถี่ของระบบไฟฟ้ารวมถึงกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งออก และระบบกระตุ้น (Excitation System) จะเป็นส่วนควบคุมแรงดันที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

4.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสในการทดสอบสมรรถนะของรีเลย์สองแบบ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบสองแกน (Two-Axis Model) ซึ่งจะละเลยผลของขดลวดหน่วง (Damper Winding) และแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบแรงดันภายในคงที่ การทดสอบสมรรถนะของรีเลย์นี้ผลจากสภาวะชั่วขณะเนื่องจากองค์ประกอบของสายส่งมีผลน้อยมากเนื่องจากมีค่าคงที่เวลาที่ต่ำมากเทียบกับการทำงานของรีเลย์ จึงสามารถละเลยสภาวะชั่วขณะของสายส่งและขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบสองแกนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้ [1], [11]

- สมการฟลักซ์เชื่อมโยง (Flux linkage Equations)

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \\
 \psi_{fd} &= -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd} \\
 \psi_q &= -L_q i_q + L_{aq} i_{kq} \\
 \psi_{kq} &= -L_{aq} i_q + L_{kkq} i_{kq}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

โดยที่

ψ_d, ψ_q	คือ	ฟลักซ์เชื่อมโยงบนขดลวดสเตเตอร์ในแกน d และแกน q ตามลำดับ
ψ_{fd}, ψ_{kq}	คือ	ฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดสนามในแกน d และขดลวดหน่วงในแกน q ตามลำดับ
L_d, L_q	คือ	ตัวเหนี่ยวนำตนเอง (Self-inductance) ในแกน d และแกน q ตามลำดับ
L_{ad}, L_{aq}	คือ	ตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance) ในแกน d และแกน q ตามลำดับ
i_d, i_q	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ในแกน d และแกน q ตามลำดับ
L_{ffd}, L_{kkq}	คือ	ตัวเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดสนามในแกน d และตัวเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดหน่วงในแกน q
i_{fd}, i_{kq}	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแกน d และขดลวดหน่วงแกน q ตามลำดับ

- สมการขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Stator winding Equations)

$$\begin{aligned}
 e_d &= -R_s i_d + X'_d i_q + E'_d \\
 e_q &= -R_s i_q - X'_q i_d + E'_q
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

ค่า E'_d, E'_q ในสมการ (4.2) สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 E'_d &= -\frac{L'_{MQ}}{L_{kq}} \psi_{kq} \\
 E'_q &= \frac{L'_{MD}}{L_{fd}} \psi_{fd}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$L'_{MQ} = L_{aq} // L_{kq} = L'_q - L_l$$

$$L'_{MD} = L_{ad} // L_{fd} = L'_d - L_l$$

โดยที่

R_s, L_l คือ ตัวต้านทานอาร์เมเจอร์ และตัวเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage inductance) บน

ขดลวดสเตเตอร์ ตามลำดับ

X'_d, X'_q คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient Reactance) ในแกน d และแกน q ตามลำดับ

L'_d, L'_q คือ ตัวเหนี่ยวนำชั่วคราวในแกน d และแกน q ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาในหน่วย p.u. จะได้ว่า

$$\begin{aligned} L_l &= X_l \\ L_d &= X_d \quad L'_d = X'_d \\ L_q &= X_q \quad L'_q = X'_q \end{aligned} \quad (4.4)$$

- สมการขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Rotor winding Equations)

$$\begin{aligned} \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{do}} \left(-E'_q - (X_d - X'_d) i_d + E_{fd} \right) \\ \frac{dE'_d}{dt} &= \frac{1}{T'_{qo}} \left(-E'_d + (X_q - X'_q) i_q \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

ค่า E_{fd} ในสมการ (4.3) สามารถหาได้จาก

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd} \quad (4.6)$$

โดยที่

T'_{do}, T'_{qo} คือ ค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจรถิ่นที่ภาวะชั่วคราว (Transient Open-circuit Time Constant) ในแกน d และแกน q ตามลำดับ

e_{fd}, R_{fd} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม และความต้านทานบนขดลวดสนามในแกน d

- สมการแรงบิด (Torque Equation)

$$T_{em} = E'_q i_q + E'_d i_d + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (4.7)$$

- สมการโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Rotor Equations)

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\omega}_r &= \frac{1}{2H}(T_{mech} - T_{em} - D\Delta\omega_r) \\ \dot{\delta} &= \omega_b\Delta\omega_r \\ \Delta\omega_r &= \omega_r - \omega_e\end{aligned}\quad (4.8)$$

โดยที่

T_{mech}, T_{em}	คือ	แรงบิดทางกล และโหลดแรงบิดทางไฟฟ้า ตามลำดับ
$D, \Delta\omega_r$	คือ	ค่าคงที่การหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วโรเตอร์เทียบกับความเร็วที่จุดสมดุล ตามลำดับ
ω_b, δ	คือ	ค่าฐานของความเร็วโรเตอร์ และมุมของโรเตอร์ ตามลำดับ
ω_r, ω_e	คือ	ค่าความเร็วโรเตอร์ที่เวลาใดๆ และค่าความเร็วโรเตอร์ที่จุดสมดุล
H	คือ	ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สำหรับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแรงดันภายในคงที่ สามารถคำนวณค่าแรงดันภายในได้จากสมการที่ (4.5) โดยละเลยพลวัตของ E'_d และ E'_q และให้ค่า $X'_d = X'_q = X'$ จะได้ผลดังสมการที่ (4.9)

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q = (E'_d + jE'_q) - R_s(i_d + ji_q) - jX'_d(i_d + ji_q) = \tilde{E}' - (R_s + jX'_d)\tilde{I}_t \quad (4.9)$$

โดยที่

\tilde{E}'	คือ	ค่าแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกน d-q
V_t	คือ	ค่าแรงดันที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกน d-q มีค่าเท่ากับ $e_d + je_q$
I	คือ	ค่ากระแสที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกน d-q มีค่าเท่ากับ $i_d + j \cdot i_q$
ω_r, ω_e	คือ	ค่าความเร็วโรเตอร์ที่เวลาใดๆ และค่าความเร็วโรเตอร์ที่จุดสมดุล
H	คือ	ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

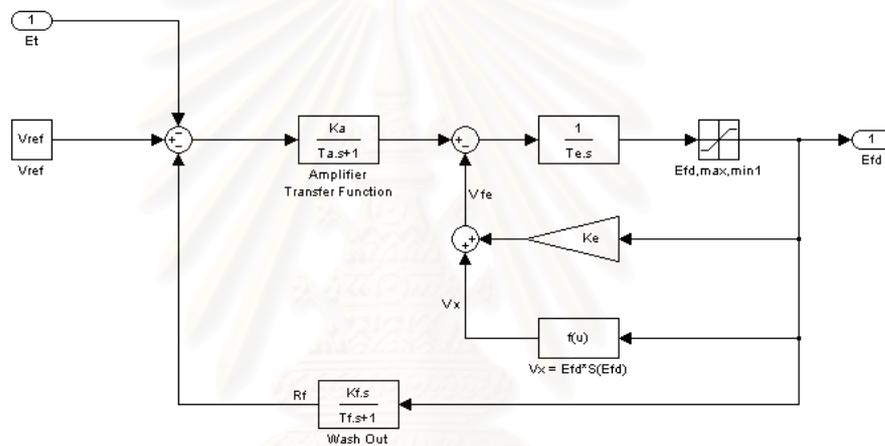
4.1.2 ระบบกระตุ้น

ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นส่วนที่ทำการควบคุมแรงดันที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านทาง E_{fd} เพื่อให้ค่าแรงดันที่ขั้วต่อมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ (V_{ref}) โดยระบบกระตุ้นจะประกอบไปด้วยตัวปรับเทียบแรงดันอัตโนมัติ, ตัวเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

กำลัง และตัวจำกัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะควบคุม E_{fd} แบบไม่เชิงเส้น โดยที่แต่ละส่วนมีหลักการการทำงานดังนี้

4.1.2.1 ตัวปรับเทียบแรงดันอัตโนมัติ

ตัวปรับเทียบแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator: AVR) เป็นอุปกรณ์สำหรับรักษาแรงดันที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เท่ากับค่าที่ตั้งไว้โดยควบคุมผ่านทาง E_{fd} สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ AVR ชนิด IEEE type DC1A [1], [12] เป็นตัวรักษาแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีแบบจำลองของ IEEE type DC1A และเพิ่มการควบคุมค่าสูงสุดต่ำสุดของ E_{fd} ด้วยตัวจำกัดแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 AVR ชนิด IEEE type DC1A

ซึ่งมีสมการอธิบายการทำงานดังนี้ [11]

$$T_E \frac{d}{dt} E_{fd} = -(K_E + S_E(E_{fd})) E_{fd} + V_R$$

$$T_F \frac{d}{dt} R_f = -R_f + \frac{K_F}{T_F} E_{fd}$$

$$T_A \frac{d}{dt} V_R = -V_R + K_A R_f - \frac{K_A K_F}{T_F} E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_t) \quad (4.10)$$

$$S_E(E_{fd}) = A_x e^{B_x E_{fd}}$$

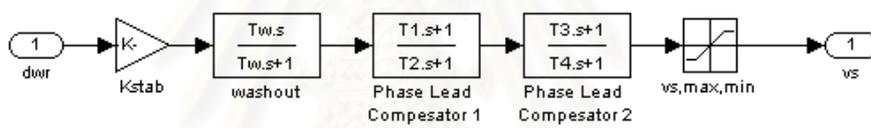
$$V_R^{\min} \leq V_R \leq V_R^{\max}$$

$$E_{fd}^{\min} \leq E_{fd} \leq E_{fd}^{\max}$$

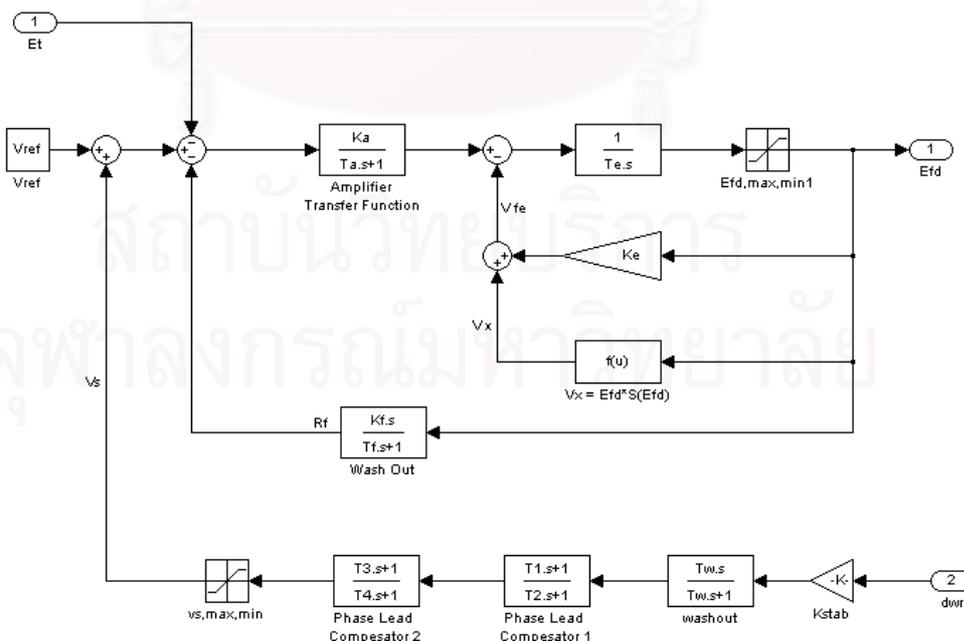
4.1.2.2 ตัวเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

แม้ว่าการเพิ่ม AVR ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสสามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วต่อได้ แต่จาก [1] การเพิ่ม AVR เพียงอย่างเดียวจะทำให้ความสามารถในการหน่วงระบบให้ระบบกลับเข้าสู่จุดทำงานปกติลดลง ดังนั้นจึงมักใช้ AVR ควบคู่ไปกับตัวเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer: PSS) โดย PSS จะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการหน่วงระบบ ทำให้ระบบสามารถทนต่อการรบกวน (Disturbance) เช่น การเกิดความผิดปกติหรือสายส่งบางเส้นหลุดออก ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพเชิงมุมของโรเตอร์ (Angle stability) ของระบบให้สูงขึ้น

จากรูปที่ 4.3 ในการทำงาน PSS จะรับ $\Delta\omega$, เป็นสัญญาณเข้า แล้วนำไปผ่านค่าการขยาย (Gain) ตัวชดเชยมุมเฟส (Lead lag compensator) และ Wash out แล้วนำไปสร้าง v_s โดยที่ จะมีตัวจำกัดค่า (limiter) ของ v_s เพื่อป้องกันค่าแรงดันที่สูงจนทำให้ PSS เสียหายได้ สัญญาณ v_s ที่ได้จะเป็นสัญญาณเข้าเสริม (Auxiliary input) ของ AVR ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แผนภาพของ PSS



รูปที่ 4.4 แผนภาพของแบบจำลองของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

4.1.2.3 ตัวจำกัดแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 เพื่อป้องกันไม่ให้ AVR สร้าง E_{fd} ที่มีค่าสูงจนทำให้ขดลวดสนามเสียหายจึงต้องมีตัวจำกัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage limiter) เพื่อจำกัดค่าของ E_{fd} ที่สร้างขึ้นให้อยู่ระหว่างค่า E_{fd}^{\min} กับค่า E_{fd}^{\max} โดยขีดจำกัดของ E_{fd} จะมีผลอย่างมากต่อการรักษาแรงดันที่บัสของ AVR เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ เช่น การเกิดสภาวะโหลดเกิน หรือการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันขึ้น และเมื่อนำองค์ประกอบทั้งสามส่วนได้แก่ AVR, PSS และ Voltage Limiter มาประกอบกันเป็นระบบกระตุ้น จะได้แผนภาพของระบบกระตุ้นดังรูปที่ 4.4

4.1.3 ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวนั้น จะควบคุมผ่าน Governor System โดย Governor System จะไปทำการปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับ Speed Droop Characteristic เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวทำงานที่ความถี่เชิงโรนัสเดียวกันและมีการแบ่งส่วนการจ่ายกำลังอย่างเหมาะสม ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้อธิบายได้โดยสมการ (4.11) และรูปที่ 4.5

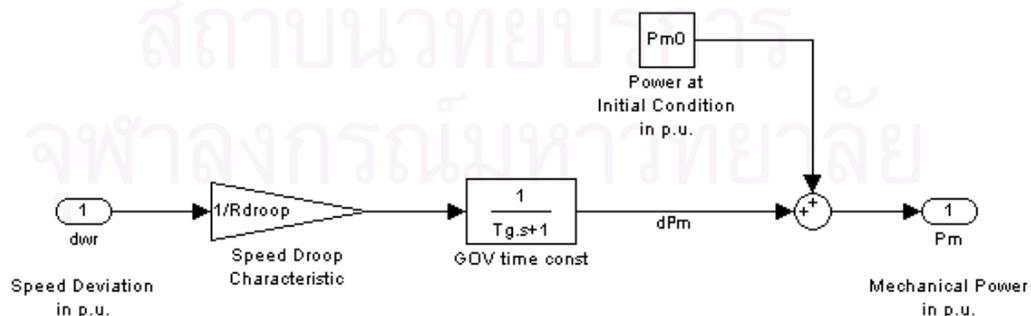
$$\Delta P_m = -\frac{\Delta \omega_r}{R} \left(\frac{1}{1+sT_G} \right) \quad (4.11)$$

$$P_{mech} = P_{m0} + \Delta P_m$$

โดยที่

R คือ ค่าคงที่ของ Speed Droop Characteristic ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

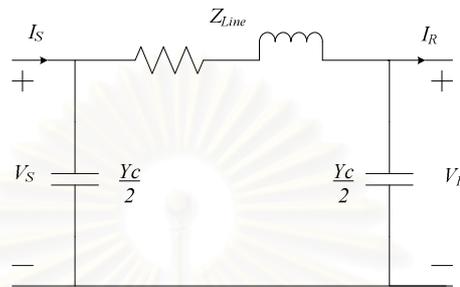
T_G คือ ค่าคงที่เวลาของระบบควบคุมความเร็ว



รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.2 การสร้างแบบจำลองของสายส่งและระบบไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้ามีทั้งแบบจำลองของสายส่งระยะสั้น แบบจำลองของสายส่งระยะกลาง และแบบจำลองของสายส่งระยะยาว [10], [13] สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้แบบจำลองของสายส่งระยะยาวแบบ PI (PI model) เป็นหลัก โดยมีแบบจำลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองสายส่งแบบ PI

โดยที่

Z_{Line}	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง
Y_C	คือ	ค่า Line Charging ของสายส่ง
V_S, I_S	คือ	ค่าแรงดันและกระแสในฝั่งส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ
V_R, I_R	คือ	ค่าแรงดันและกระแสในฝั่งรับกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ

สำหรับแบบจำลองของระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสจากแหล่งจ่ายและแรงดันที่บัส จะใช้ Bus Admittance Matrix และ Hybrid Matrix ในการจำลอง

Bus Admittance Matrix หรือ \mathbf{Y}_{bus} มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.12)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

หรืออาจเขียนเป็น

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}_{bus} \quad (4.13)$$

โดย

- \mathbf{I}_{bus} คือ เวกเตอร์ของกระแสจากแหล่งจ่ายที่ฉีดเข้าที่บัส กำหนดให้ทิศทางกระแสเข้าบัสเป็นบวก และกระแสออกจากบัสเป็นลบ
- \mathbf{V}_{bus} คือ เวกเตอร์ของแรงดันที่บัสเทียบกับบัสอ้างอิง (Reference Bus)
- \mathbf{Y}_{bus} หรือ Bus Admittance Matrix เป็นเมทริกซ์ของค่าความนำไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมระหว่างบัสต่างๆ

\mathbf{Y}_{bus} มีนิยามของแต่ละองค์ประกอบดังนี้
องค์ประกอบตามแนวเส้นทแยงมุม หรือ Self – admittance

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (4.14)$$

องค์ประกอบนอกแนวเส้นทแยงมุม หรือ Mutual admittance

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (4.15)$$

โดยค่า y_{ij} คือค่าความนำไฟฟ้าของสายที่เชื่อมระหว่างบัส i กับบัส j

ในกรณีที่รู้ค่ากระแสจากแหล่งจ่ายที่ฉีดเข้าบัส สมการที่ (4.13) สามารถใช้หาค่าแรงดันที่ทุกบัสได้ดังสมการ (4.16)

$$\mathbf{V}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \mathbf{I}_{bus} \quad (4.16)$$

เมื่อทราบแรงดันที่ทุกบัสแล้วจะสามารถหาค่ากระแสในแต่ละสายได้ด้วยสมการ (4.17)

$$I_{ij} = (V_i - V_j) \cdot y_{ij} \quad (4.17)$$

อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณค่าของกระแสในสายและค่าแรงดันบัสสำหรับการจำลองแบบระบบไฟฟ้ากำลังนั้นข้อมูลที่เป็นสัญญาณเข้ามีทั้งกระแสจากแหล่งจ่ายและแรงดันที่บัส จึง

จำเป็นต้องทำการปรับปรุงเมทริกซ์ \mathbf{Y}_{bus} ในสมการที่ (4.13) ให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ \mathbf{H}_{mod} ดังสมการที่ (4.19) เพื่อให้สามารถคำนวณได้ทั้งกระแสและแรงดันจากสัญญาณเข้าดังกล่าว

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1i} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{21} & \cdots & H_{2i} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{i1} & H_{i2} & \cdots & H_{ii} & \cdots & H_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{ni} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{H}_{mod} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1i} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{21} & \cdots & H_{2i} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{i1} & H_{i2} & \cdots & H_{ii} & \cdots & H_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{ni} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

การแปลงเมทริกซ์ \mathbf{Y}_{bus} เป็น \mathbf{H}_{mod} ทำได้โดยสมการที่ (4.20) เมื่อให้ m เป็นบัสที่ต้องการเปลี่ยนชนิดของสัญญาณเข้าจากแรงดันบัสเป็นกระแสจากแหล่งจ่ายที่ฉีดเข้าบัส และ i, j เป็นบัสใดๆ ในระบบ

$$\begin{aligned} H_{ij} &= Y_{ij} - \frac{Y_{im} Y_{mj}}{Y_{mm}} & i \neq m, j \neq m \\ H_{ij} &= -\frac{Y_{ij}}{Y_{mm}} & i = m, j \neq m \\ H_{ij} &= \frac{Y_{ij}}{Y_{mm}} & i \neq m, j = m \\ H_{ij} &= \frac{Y_{ij}}{Y_{mm}} & i = m, j = m \end{aligned} \quad (4.20)$$

ในกรณีที่ต้องการแปลงสัญญาณเข้ามากกว่า 1 บัสสามารถทำการแปลงเมทริกซ์ \mathbf{H}_{mod} เพิ่มเติมได้โดยใช้สมการที่ (4.21)

$$\begin{aligned}
 H_{ij}^{new} &= H_{ij}^{old} - \frac{H_{im}^{old} H_{mj}^{old}}{H_{mm}^{old}} & i \neq m, j \neq m \\
 H_{ij}^{new} &= -\frac{H_{ij}^{old}}{H_{mm}^{old}} & i = m, j \neq m \\
 H_{ij}^{new} &= \frac{H_{ij}^{old}}{H_{mm}^{old}} & i \neq m, j = m \\
 H_{ij}^{new} &= \frac{1}{H_{mm}^{old}} & i = m, j = m
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

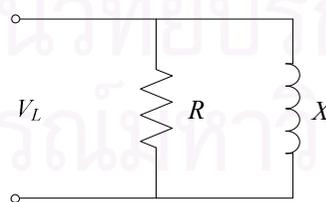
เมื่อทราบค่าแรงดันที่ทุกบัสแล้วจะสามารถคำนวณค่าปริมาณอื่นๆ ได้แก่ กระแสในแต่ละสาย การไหลของกำลังงาน และกำลังสูญเสียในระบบได้ต่อไป

4.3 การสร้างแบบจำลองของโหลด

โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการจำลองแบบระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากโหลดแต่ละแบบนั้นจะให้ผลที่แตกต่างกันตามลักษณะสมบัติของโหลด ดังนั้นการเลือกใช้โหลดในการจำลองแบบนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและสอดคล้องกับโหลดที่มีอยู่จริงของระบบนั้นๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่และแบบอิมพีแดนซ์คงที่ในการจำลองแบบ ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 โหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่

โหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ (Constant Impedance Model) จะมีค่าอิมพีแดนซ์คงที่ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่โหลดใช้ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดต่ออยู่ โดยวงจรสมมูลของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่จะเป็นค่าความต้านทานขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.7 ตัวอย่างของโหลดประเภทนี้ เช่น หลอดไฟฟ้าแบบหลอดไส้ เป็นต้น



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่

ค่าความต้านทานของโหลด (R) ประเภทนี้จะเป็นตัวรับกำลังไฟฟ้าจริง (P_L) ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำ (X) จะเป็นตัวรับกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q_L) ดังสมการที่ (4.22) และ (4.23)

$$P_L = \frac{V_L^2}{R} \quad (4.22)$$

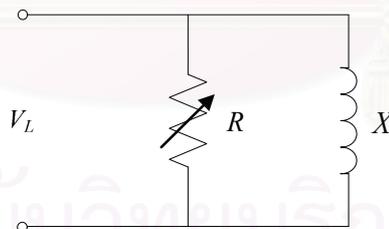
$$Q_L = \frac{V_L^2}{X} \quad (4.23)$$

4.3.2 โหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

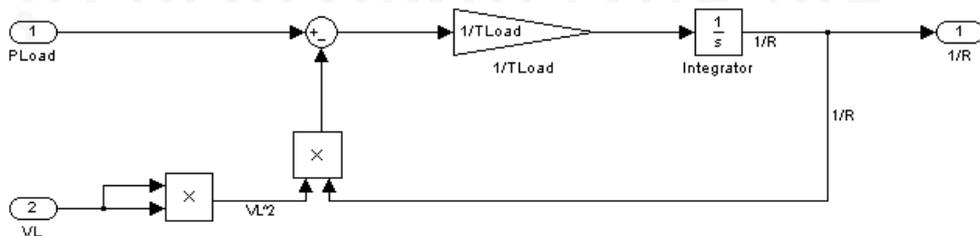
โหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Model) เป็นโหลดที่รักษากำลังไฟฟ้าจริงไว้ด้วยการปรับค่าความต้านทานของโหลดดั่งที่แสดงไว้ในวงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ในรูปที่ 4.8 และแผนภาพแบบจำลองของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ในรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายแผนภาพแบบจำลองได้โดยสมการที่ (4.24)

$$\frac{1}{T_L} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R} \right) = P_0 - \frac{V_L^2}{R} \quad (4.24)$$

ในการใช้งานจริง โหลดดังกล่าวมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อาทิ เครื่องทำความร้อน (Space Heating) เครื่องทำน้ำร้อน (Water Heating) กระบวนการทำความร้อนในโรงงาน (Industrial Process Heating) และเครื่องปรับอากาศ (Air Condition) เป็นต้น



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่



รูปที่ 4.9 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว

ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองแบบจะถูกนำไปคำนวณรวมในเมทริกซ์ \mathbf{Y}_{bus} หรือ \mathbf{H}_{mod} เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

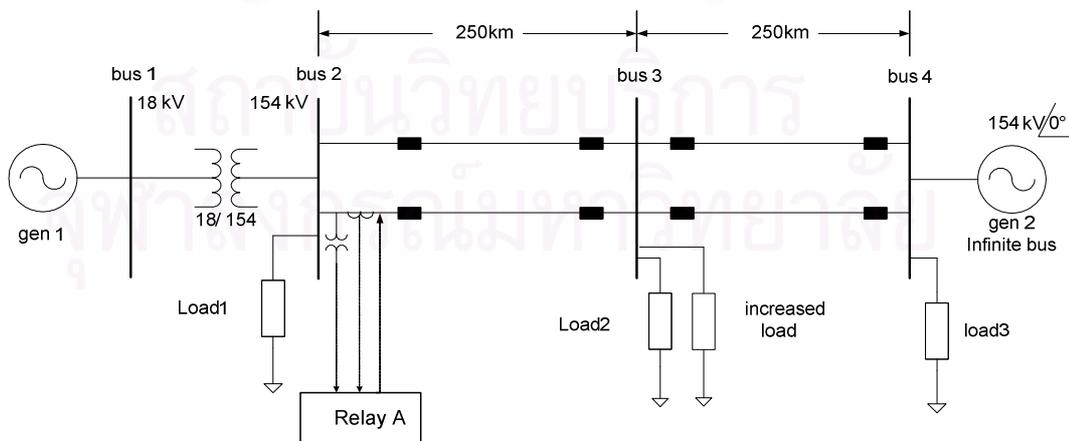
บทที่ 5

ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่จะนำมาใช้ทดสอบรีเลย์นี้มีสองระบบโดย ระบบที่ 1 จะเป็นระบบทดสอบอย่างง่ายที่ดัดแปลงมาจากระบบทดสอบของ [5] ส่วนระบบที่ 2 จะเพิ่มความซับซ้อนของระบบขึ้น ระบบจะต่อเชื่อมกันเป็นโครงข่ายและมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 3 เครื่อง พร้อมด้วยส่วนควบคุมซึ่งส่งผลต่อพลวัตของระบบไฟฟ้า เพื่อทดสอบการทำงานของรีเลย์ในระบบที่ใกล้เคียงระบบที่ใช้จริงมากขึ้น

5.1 ระบบทดสอบที่ 1

ระบบที่ใช้ในการทดสอบมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.1 และมีข้อมูลประกอบใน ภาคผนวก ก.1 ในระบบทดสอบนี้จะทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะใช้ทั้งแบบจำลองที่เป็นแบบแรงดันภายในคงที่และเป็นแบบที่คิดผลของขดลวดโรเตอร์และระบบควบคุม จากรูประบบทดสอบจะเห็นว่าเป็นระบบสายส่งแบบสายคู่ (Double Line) ซึ่งขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3 จะต้องคิดผลเสมือนกับมีจุดต่อเชื่อมสายกับสายส่งเส้นอื่น ทำให้ขอบเขตของการป้องกันกินบริเวณที่กว้างเกินกว่าความยาวสายจริงไปมาก ดังนั้นระบบนี้จึงเป็นระบบที่ค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากสถานะโหลดเกินสามารถตกอยู่ในโซนการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้ง่าย



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 1 [5]

การเริ่มทำการทดสอบรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะนั้น สิ่งแรกที่ต้องทดสอบคือ ทดสอบการทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโซน 3 ของการทำงาน โดยรีเลย์ควรจะต้องการตัดวงจรเมื่อตรวจพบค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3 เกินกว่าระยะหน่วงเวลา ซึ่งในการทดสอบการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติในโซนการป้องกันนี้ รีเลย์ไม่ควรทำงานผิดพลาดเนื่องจากการทำงานพื้นฐานที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ควรทำได้

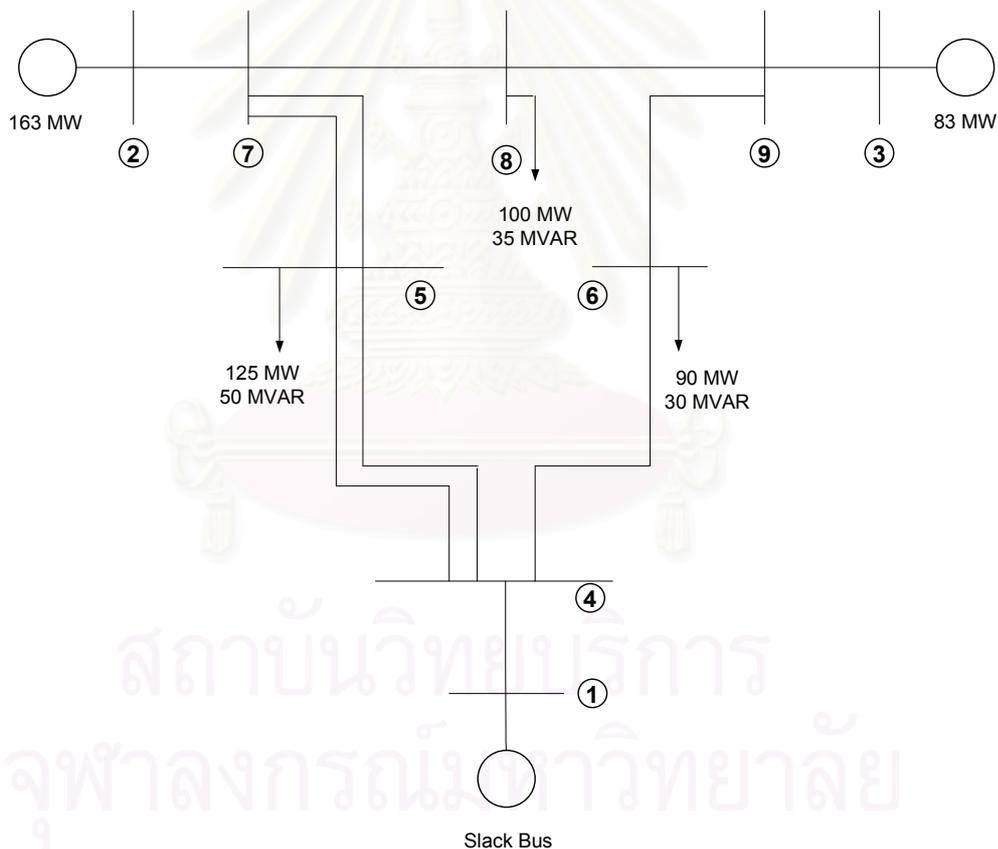
อย่างไรก็ตามโครงสร้างของระบบทดสอบนี้ไม่เหมาะสมกับการทดสอบการกำจัดความผิดปกติที่โซน 3 ของการทำงาน เช่น เมื่อกำหนดให้รีเลย์ A ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ป้องกันโซน 3 ของสายส่งที่เชื่อมต่อกันระหว่างบัส 3 กับบัส 4 และสมมติให้เกิดความผิดปกติที่สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับบัส 4 โดยที่รีเลย์ระยะทางที่บัส 3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิเกิดการขัดข้องไม่สามารถทำงานได้ จะพบว่ารีเลย์ A เพียงตัวเดียวไม่สามารถกำจัดความผิดปกติได้ เนื่องจากการกำจัดความผิดปกติต้องตัดเส้นทางทุกเส้นทางที่กระแสสามารถไหลผ่านจึงจะสามารถกำจัดความผิดปกติได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบเมื่อเกิดความผิดปกติจึงทำได้แค่เพียงให้รีเลย์ตัดวงจรสายส่งที่ตัวเองป้องกันอยู่ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ควรเกิดขึ้น และกำหนดให้ความผิดปกติเป็นความผิดปกติแบบชั่วคราว (Temporary Fault) ซึ่งจะหายไปเองภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

สำหรับการทดสอบการเกิดสภาวะโหลดเกินนั้นจะทำการเพิ่มโหลดที่บัสที่ 3 จนค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์มองเห็นตกอยู่ในโซนการทำงาน ซึ่งในกรณีนี้ถ้าเป็นรีเลย์ปกติจะตัดวงจรอย่างไม่จำเป็นจนอาจจะนำมาซึ่งการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ แต่ถ้าเป็นรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรและยังเปิดโอกาสให้ทำการปลดโหลดบางส่วนออกอีกด้วย ถึงแม้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะทำการยับยั้งการตัดวงจรเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน แต่เมื่อใดก็ตามที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นในโซนการทำงาน รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะยังสามารถตัดสินใจตัดวงจรได้ด้วย เนื่องจากรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะให้ลำดับความสำคัญในการกำจัดความผิดปกติมากกว่าการยับยั้งการตัดวงจรในสภาวะโหลดเกินนั่นเอง

เป้าหมายของการทดสอบกับระบบทดสอบที่ 1 นี้ มีเพื่อทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องตามที่กำหนดไว้หรือไม่ในกรณีที่เกิดความผิดปกติ กรณีเกิดสภาวะโหลดเกินและกรณีเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดปกติขึ้น โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสแบบแรงดันภายในคงที่ เทียบกับแบบที่รวมผลของขดลวดสนามและส่วนควบคุมต่างๆ เพื่อให้เห็นว่า ในการทำงานในสภาวะที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้นนี้ รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะได้รับผลกระทบอย่างไร ประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิดคือชนิดแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

5.2 ระบบทดสอบที่ 2

ระบบ WSCC 9 บัสที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.2 และมีข้อมูลของระบบในภาคผนวก ก.3 ระบบนี้จะใช้ทดสอบการทำงานของรีเลย์ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้นคือโครงสร้างของระบบเป็นแบบโครงข่าย (Network) และมีผลของพลวัตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกระตุ้นซึ่งอาจจะมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเนื่องจากพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากระบบควบคุม นอกจากนี้โครงสร้างของระบบสามารถทดสอบเหตุการณ์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ ซึ่งเหตุการณ์นี้เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทิศทางอย่างกะทันหันส่งผลต่อสถานะชั่วขณะของระบบ จนอาจทำให้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะตีความสถานะชั่วขณะนั้นว่าเกิดจากความผิดพลาดจนนำไปสู่การตัดวงจรผิดพลาดได้



รูปที่ 5.2 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 2 WSCC 9 บัส

ในการทดสอบระบบ WSCC เดิมใน [11] เป็นเส้นสายส่งเส้นเดียวจะมีช่วงการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่แคบกว่าระบบที่เป็นแบบสายคู่ ดังนั้นเพื่อให้เห็นปัญหาต่างๆ ของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการดัดแปลงระบบทดสอบนี้ด้วยการแปลงสายส่งที่เชื่อม

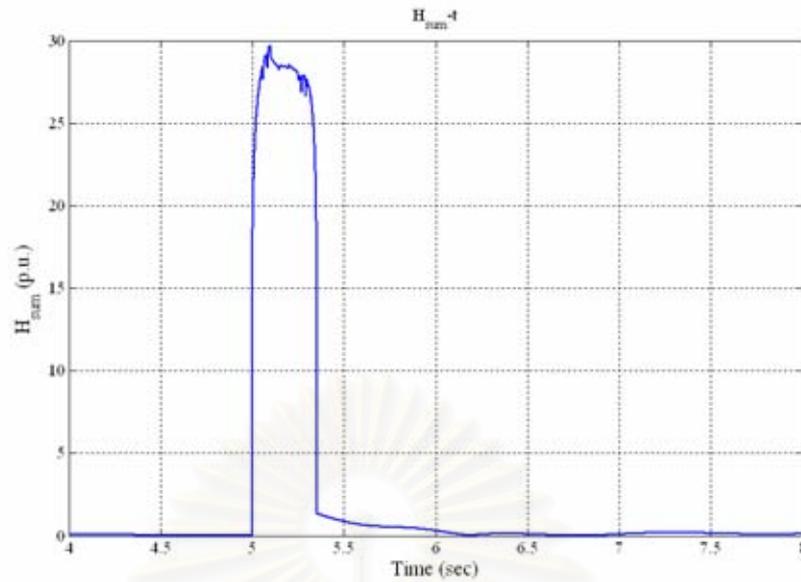
ระหว่างบัส 4 กับบัส 5 และบัส 5 กับบัส 7 ให้เป็นสายส่งแบบสายคู่ แล้วทำการติดตั้งรีเลย์ ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะไว้ที่บัส 4 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิให้กับสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 4 กับบัส 5 และเป็นตัวป้องกันสำรองให้แก่ส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 5 กับบัส 7

การทดสอบขั้นแรกจะทำการทดสอบการตัดวงจรสายส่งเมื่อเกิดความผิดปกติเพื่อดูว่ารีเลย์สามารถทำงานในหน้าที่พื้นฐานได้หรือไม่ จากนั้นจะทำการทดสอบคล้ายกับระบบทดสอบที่ 1 ได้แก่ การทดสอบการทำงานในสภาวะโหลดเกินแล้วปลดโหลดออก การทดสอบการทำงานในสภาวะโหลดเกินแล้วเกิดความผิดปกติ และเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบการตัดวงจรเมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางส่วนหลุดออกจากระบบ

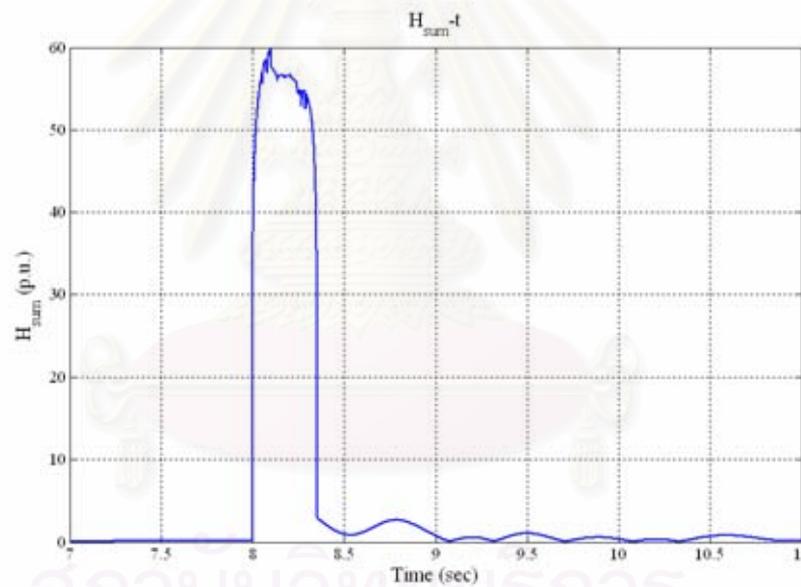
5.3 การกำหนดค่าขีดเริ่มสำหรับตัดสินค้า TC

การกำหนดค่าขีดเริ่มในการตัดสินค้า TC จะใช้แนวคิดจาก [5] โดยจะดูจากค่า H_{sum} เมื่อเกิดความผิดปกติที่ค่าความต้านทานของความผิดปกติค่าต่างๆ และที่ตำแหน่งการเกิดความผิดปกติในโซน 3 ที่ความยาวสายต่างๆ ซึ่งพบว่ายิ่งค่าความต้านทานของความผิดปกติมีค่าสูงและตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติยิ่งห่างจากรีเลย์ระยะทางเท่าไร ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ตรวจวัดได้จะยิ่งมีค่าต่ำเท่านั้น ดังนั้นการกำหนดค่าขีดเริ่มเพื่อตัดสินค้า TC จาก H_{sum} สำหรับเหตุการณ์ที่เป็นความผิดปกติจะต้องมีค่าต่ำเพียงพอที่จะครอบคลุมเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดสภาวะชั่วคราวรุนแรง

อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าขีดเริ่มที่ต่ำเกินไปอาจจะทำให้ค่า TC ที่ได้ เป็น “1” บ่อยกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดสภาวะชั่วคราวอื่นๆ ได้ ในการกำหนดค่าขีดเริ่มนี้จะใช้การพิจารณาจากค่า H_{sum} เมื่อเกิดความผิดปกติแบบชั่วคราวกินเวลา 0.1 วินาที มีค่าความต้านทานของความผิดปกติ 0.1 p.u. ณ ตำแหน่ง 80% ของความยาวสายส่งที่รีเลย์ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันสำรอง ซึ่งค่า H_{sum} ที่ได้จากการทดสอบเหตุการณ์ดังกล่าวของทั้งสองระบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.3 และค่า H_{sum} ที่ได้จากการทดสอบระบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.4 ผลที่ได้นี้จะใช้ในการเลือกค่าขีดเริ่มต่อไป



รูปที่ 5.3 ค่า H_{sum} เมื่อทดสอบเพื่อหาค่าขีดเริ่มสำหรับ TC ของระบบทดสอบที่ 1



รูปที่ 5.4 ค่า H_{sum} เมื่อทดสอบเพื่อหาค่าขีดเริ่มสำหรับ TC ของระบบทดสอบที่ 2

5.4 ขั้นตอนการทดสอบกับระบบทดสอบที่ 1

ในระบบทดสอบที่ 1 นี้ จะทำการติดตั้งรีเลย์ระยะทางไว้ที่บัสที่ 2 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิให้แก่สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2 กับ 3 และเป็นตัวป้องกันสำรองให้กับสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับ 4 และกำหนดให้ค่าขีดเริ่มในการตัดสินใจตัดสิน TC ของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะมีค่าเป็น 25

ในการทดสอบกับระบบนี้จะทำทั้งกรณีที่เป็นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเป็นแบบแรงดันภายในคงที่และกรณีที่เป็นแบบจำลองเป็นแบบคิดผลของขดลวดสนาม โดยมีเหตุการณ์ที่นำมาใช้ทดสอบการทำงานดังนี้

5.4.1 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดปกติ

กำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบชั่วคราว ณ กึ่งกลางสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับบัส 4 ซึ่งเป็นสายที่รีเลย์ระยะทาง A ทำหน้าที่เป็นป้องกันสำรองโซน 3 อยู่ โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดปกติ 20 โอห์ม สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองแบบจำลองเปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้ทดลองทั้งแบบที่ความผิดปกติเป็นความผิดปกติแบบถาวรและความผิดปกติแบบชั่วคราวที่ความผิดปกติจะหายไปเมื่อเวลาผ่านไป 2.3 วินาที

5.4.2 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำการปลดโหลด

กำหนดให้เพิ่มโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ที่บัส 3 โดยจะทำการเพิ่มจนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์เห็นอยู่ในโซนการทำงาน โดยปล่อยให้โหลดคงที่อยู่ในโซนการทำงานประมาณ 4 วินาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน จากนั้นจึงทำการปลดโหลดบางส่วนออกเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์อยู่นอกโซนการทำงาน สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองแบบจำลอง นอกจากนี้ยังทำการทดลองเพิ่มโหลดให้มากขึ้นเพื่อดูว่าแบบจำลองแบบใดจะทนต่อการสูญเสียเสถียรภาพได้มากกว่ากันและการสูญเสียเสถียรภาพมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทางหรือไม่

5.4.3 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดปกติ

กำหนดให้เพิ่มโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ที่บัส 3 โดยจะทำการเพิ่มจนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์เห็นอยู่ในโซนการทำงาน แล้วปล่อยให้โหลดคงที่อยู่ในโซนการทำงานประมาณ 4 วินาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน จากนั้นจึงให้เกิดความผิดปกติแบบชั่วคราวขึ้นที่กลางสายส่งระหว่างบัส 3 กับบัส 4 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดปกติ 20 โอห์ม สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองแบบจำลอง เมื่อกำหนดให้ความผิดปกติเกิดขึ้นนาน 2.7 วินาที และ 4 วินาที แล้วหายไปเอง

5.5 ขั้นตอนการทดสอบกับระบบทดสอบที่ 2

ในระบบทดสอบที่ 2 จะติดตั้งรีเลย์ระยะทางไว้ที่บัสที่ 4 เพื่อเป็นตัวป้องกันปฐมภูมิให้กับสายที่เชื่อมระหว่างบัส 4 กับบัส 5 และเป็นตัวป้องกันสำรองให้กับสายที่เชื่อมระหว่างบัส 5 กับบัส 7 สำหรับระบบทดสอบนี้จะเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกนเพียงชนิดเดียวเท่านั้น เนื่องจากต้องการทดสอบการทำงานให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด สำหรับค่าขีดเริ่มในการตัดสินใจค่า TC จะใช้ 25 เป็นค่าขีดเริ่ม

5.5.1 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดปกติ

กำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบชั่วคราวกลางสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 5 กับบัส 7 ซึ่งเป็นสายที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่บัส 4 ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันสำรองโซน 3 อยู่ โดยความผิดปกติแบบชั่วคราวมีค่าอิมพีแดนซ์ 30 โอห์มกินเวลานาน 4 วินาที แล้วหายไปเอง สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

5.5.2 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสถานะโหลดเกินแล้วทำการปลดโหลด

สำหรับการทดสอบนี้จะเพิ่มการทดสอบกับแบบจำลองของโหลด 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ และแบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ สำหรับแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์คงที่จะทำการทดลองโดยเพิ่มโหลดที่บัส 5 จนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์เห็นอยู่ในโซนการทำงาน แล้วปล่อยให้โหลดคงที่อยู่ในโซนการทำงานประมาณ 4 วินาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรเนื่องจากสถานะโหลดเกิน จากนั้นจึงทำการปลดโหลดบางส่วนออกเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์อยู่นอกโซนการทำงาน สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

สำหรับโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จะทดสอบโดยการเพิ่มโหลดที่บัส 5 จนค่าอิมพีแดนซ์เข้าสู่โซน 3 แล้วสังเกตผล

5.5.3 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสถานะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดปกติ

กำหนดให้เพิ่มโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ที่บัส 5 โดยจะทำการเพิ่มจนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์เห็นอยู่ในโซนการทำงาน โดยปล่อยให้โหลดคงที่อยู่ในโซนการทำงานประมาณ 4 วินาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรเนื่องจากสถานะโหลดเกิน จากนั้นจึงให้เกิดความผิดปกติแบบชั่วคราวขึ้นที่สายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 อยู่ห่างจากบัส 5 เป็นระยะทาง 90 % ของความยาวสาย โดยความผิดปกติมีค่าอิมพีแดนซ์ 200 โอห์ม กินเวลานาน 4 วินาทีแล้วหายไปเอง

ในส่วนการทำงานของรีเลย์ กำหนดให้รีเลย์ระยะทางที่บัส 7 ที่ป้องกันสายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 ทำการตัดวงจรเพื่อลดความเสียหายจากการเกิดความผิดปกติของ รีเลย์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิทำงานทันทีที่เกิดความผิดปกติ และรีเลย์ระยะทางจากสายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 อีกเส้นจะเป็นตัวป้องกันสำรองโซน 3 ของความผิดปกติ โดยสมมติให้รีเลย์ดังกล่าวทำงานหลังจากเกิดความผิดปกติไป 2 วินาที เพื่อลดความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง

สำหรับรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะในการทดลองนี้กำหนดให้ติดตั้งที่บัส 4 เพื่อป้องกันสายส่งระหว่างบัส 4 และบัส 5 ทั้งสองสาย จากนั้นสังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเมื่อทำการจำลองแบบ

5.5.4 การทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ

กำหนดให้เพิ่มโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ที่บัส 5 โดยจะทำการเพิ่มจนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์เห็นอยู่ในโซนการทำงาน โดยปล่อยให้โหลดคงที่อยู่ในโซนการทำงานประมาณ 4 วินาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ตัดวงจรเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน จากนั้นจึงให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูญเสียกำลังการผลิต สังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ ในการทดลองจะทำทั้งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 เครื่องดังนี้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 สูญเสียกำลังการผลิต 50 MW และ 60 MW

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 สูญเสียกำลังการผลิต 90 MW และ 100 MW

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 สูญเสียกำลังการผลิต 70 MW และ 80 MW

เพื่อดูผลจากการสูญเสียกำลังการผลิตที่ทำให้เสียเสถียรภาพและไม่เสียเสถียรภาพเทียบ

กัน

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

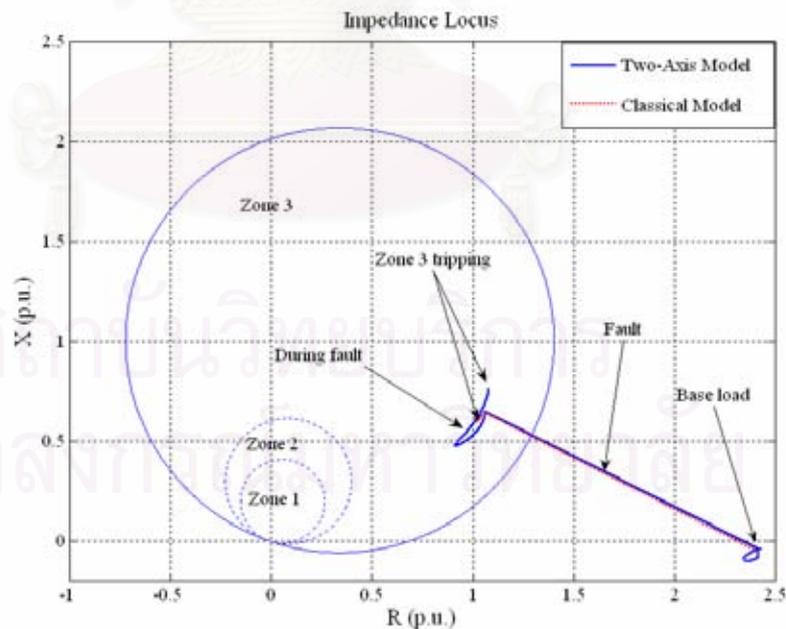
6.1 ผลการทดสอบกับระบบที่ 1

6.1.1 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดปกติ

เมื่อทำการทดสอบการเกิดความผิดปกติที่กลางสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 3 กับบัส 4 ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดปกติเท่ากับ 20 โอห์ม โดยจะทำการทดสอบในสองกรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีการกำจัดความผิดปกติออกไป และกรณีที่ความผิดปกติถูกกำจัดในเวลา 2.3 วินาที

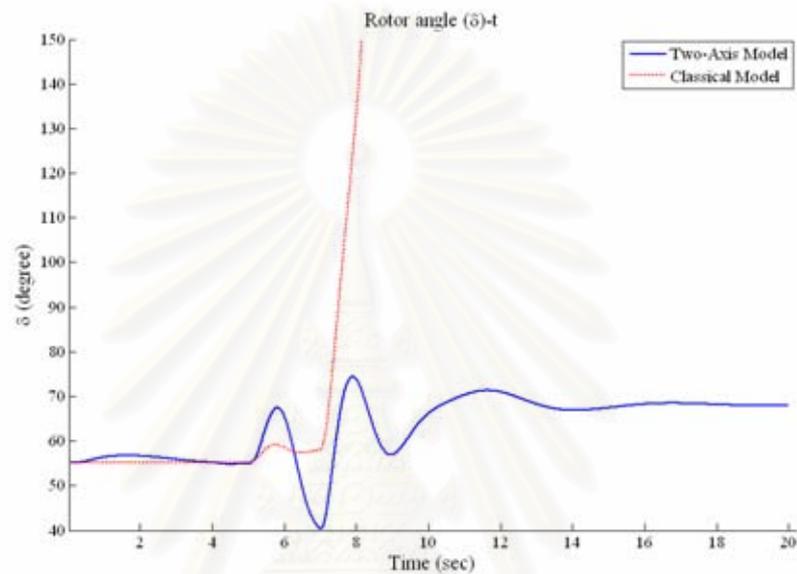
1.) กรณีที่ไม่มีการกำจัดความผิดปกติออก

จะได้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 6.1 จะเห็นว่าแบบจำลองทั้งสองแบบจะให้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ในขณะเกิดความผิดปกติที่แตกต่างกันเล็กน้อย ก่อนที่จะเกิดการตัดวงจรขึ้น อย่างไรก็ตามการตัดวงจรที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นการกำจัดความผิดปกติเนื่องจากโครงสร้างของระบบที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 เพียงตัวเดียวไม่สามารถกำจัดความผิดปกติได้

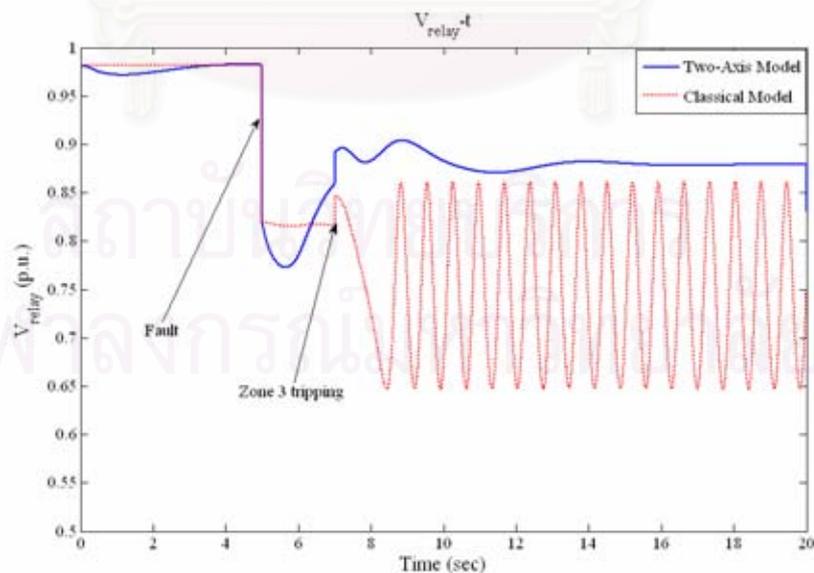


รูปที่ 6.1 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโซน 3

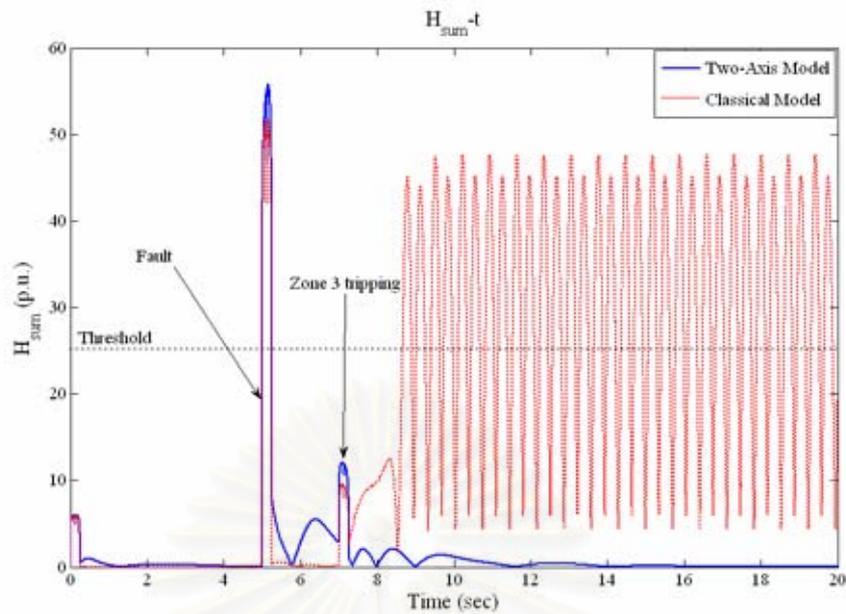
แต่เมื่อพิจารณาแรงดันที่รีเลย์ตรวจวัดในรูปที่ 6.2 และค่า H_{sum} หลังจากทีรีเลย์ทำการตัดวงจรสายส่งในรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากแบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งคอนัสจะสูญเสียเสถียรภาพของมุมโรเตอร์ ทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันซึ่งจะส่งผลต่อค่า H_{sum} อย่างมากเพราะขนาดของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเวลา ค่า H_{sum} จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามไปด้วย



รูปที่ 6.2 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ



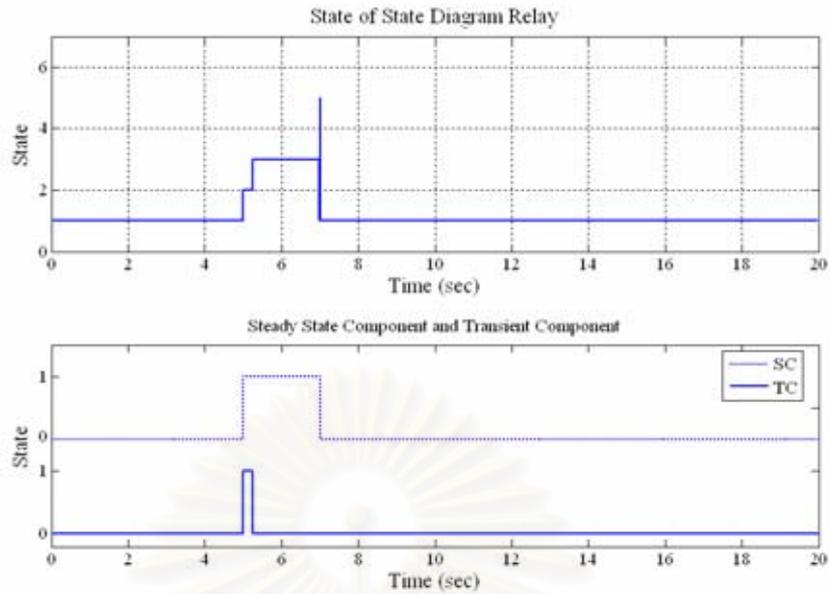
รูปที่ 6.3 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดเมื่อไม่ได้กำจัดความผิดพลาดออกไป



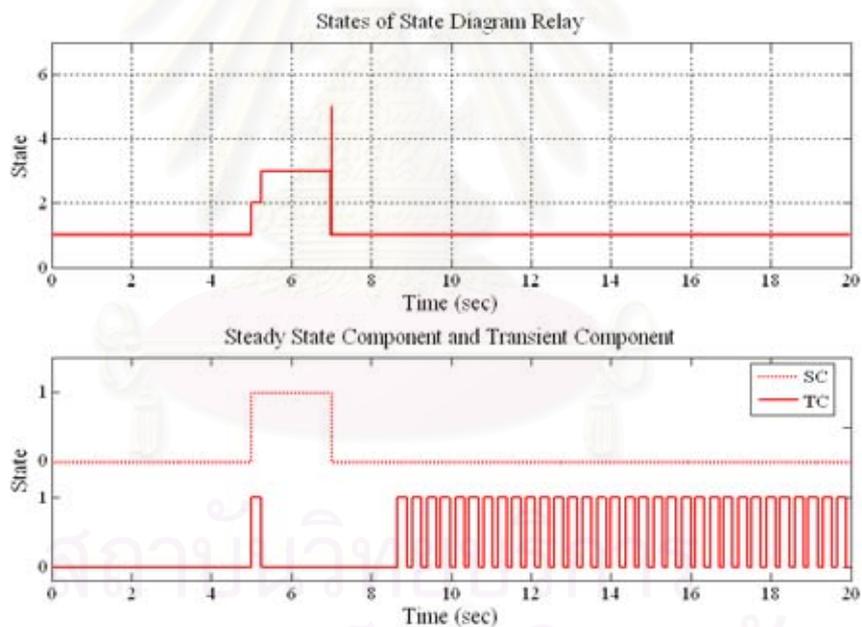
รูปที่ 6.4 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

เมื่อพิจารณาค่า H_{sum} จะพบว่า ณ เวลาที่เกิดความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันทำให้ค่า H_{sum} มีค่าสูงมาก และขณะที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ทำการตัดวงจรสายที่ป้องกันอยู่ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกครั้ง แต่ในครั้งนี้จะให้ค่า H_{sum} ที่น้อยกว่ามาก เนื่องจากการตัดวงจรในครั้งนี้ไม่ได้กำจัดความผิดปกติออกจากระบบทดสอบแต่เป็นเพียงแค่การทำให้สายส่งที่ขนานกันอยู่เหลือเพียงเส้นเดียว ดังนั้นจึงเกิดความเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไม่มากนัก ค่า H_{sum} ที่ได้จึงมีค่าต่ำ นอกจากนี้ค่า H_{sum} นี้จะส่งผลโดยตรงต่อค่า TC ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ผลของสถานะรีเลย์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 ซึ่งจะเห็นได้ชัดถึงความแตกต่างของค่า TC ชัดเจนเมื่อแบบจำลองแบบแรงดันภายในคองที่เกิดการสูญเสียเสถียรภาพขึ้น

เมื่อพิจารณาสถานะของรีเลย์พบว่าขณะเกิดความผิดปกติทั้งสองแบบจำลองให้สถานะของรีเลย์แทบไม่ต่างกัน โดยสถานะจะเปลี่ยนจาก 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 แล้วตัดวงจร ซึ่งหลังจากตัดวงจรแล้วค่าสถานะของรีเลย์เป็น 1 ตลอด



รูปที่ 6.5 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน

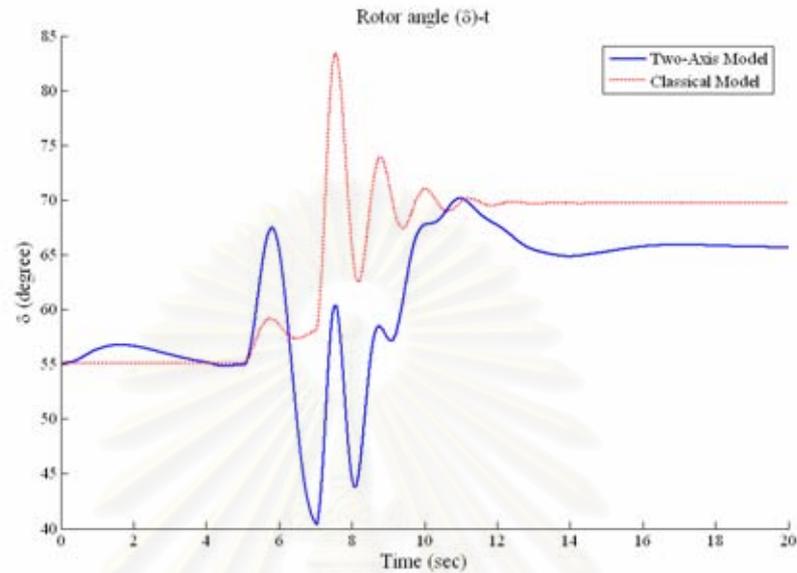


รูปที่ 6.6 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดันภายในคงที่

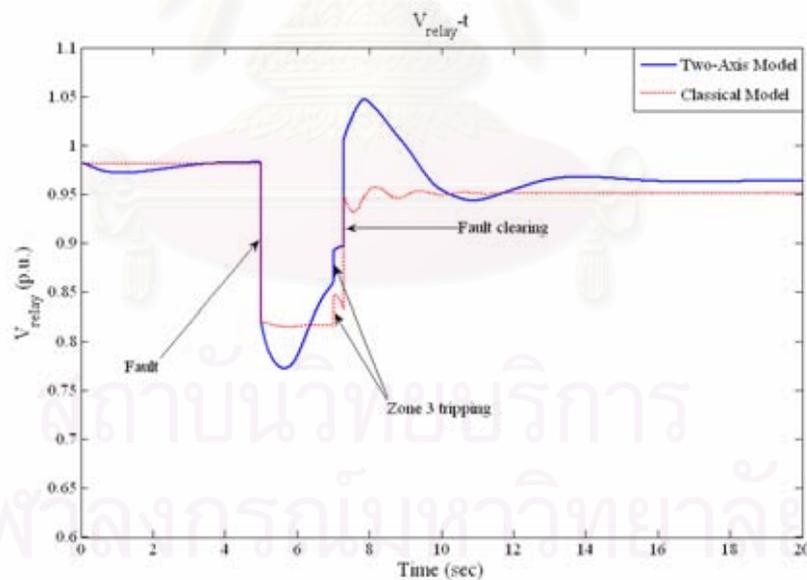
2.) กรณีที่มีการกำจัดความผิดพลาดออกไปในเวลา 2.3 วินาที

สำหรับทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ในกรณีนี้จะเหมือนกับรูปที่ 6.1 เพราะช่วงเวลาก่อนที่รีเลย์ตัดวงจรระบบมีสถานะเหมือนกันทุกประการ แต่จะมีข้อแตกต่างเมื่อทำการกำจัดความผิดพลาดออกไปหลังจากเกิดความผิดพลาดเป็นเวลา 2.3 วินาที ซึ่งจะพบว่าที่ระยะเวลาการกำจัดความผิดพลาดนี้ แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่ยังสามารถทำงานได้โดยที่ไม่เสีย

เสถียรภาพของมุมโรเตอร์ดังรูปที่ 6.7 และแรงดันไม่เกิดการแกว่งอย่างรุนแรงเหมือนกรณีที่ไม่มีการกำจัดความผิดพลาดดังรูปที่ 6.8



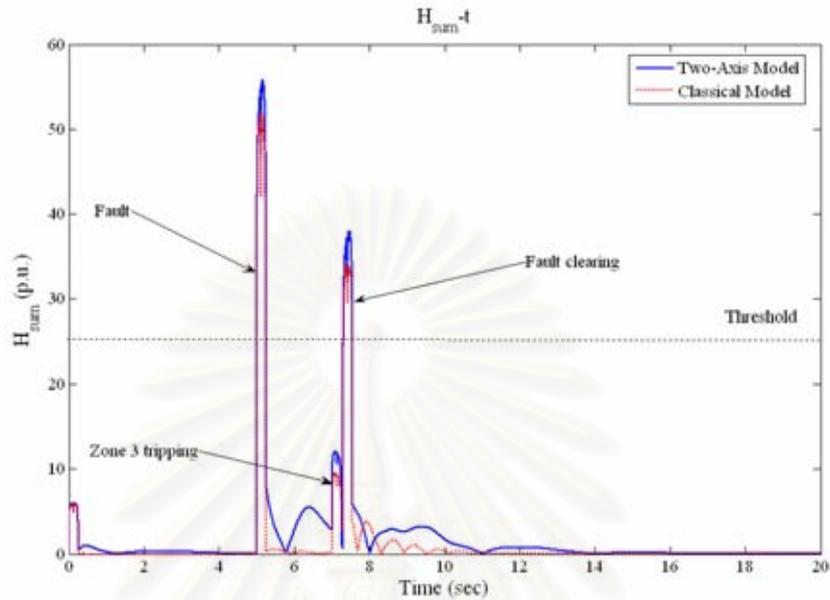
รูปที่ 6.7 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ



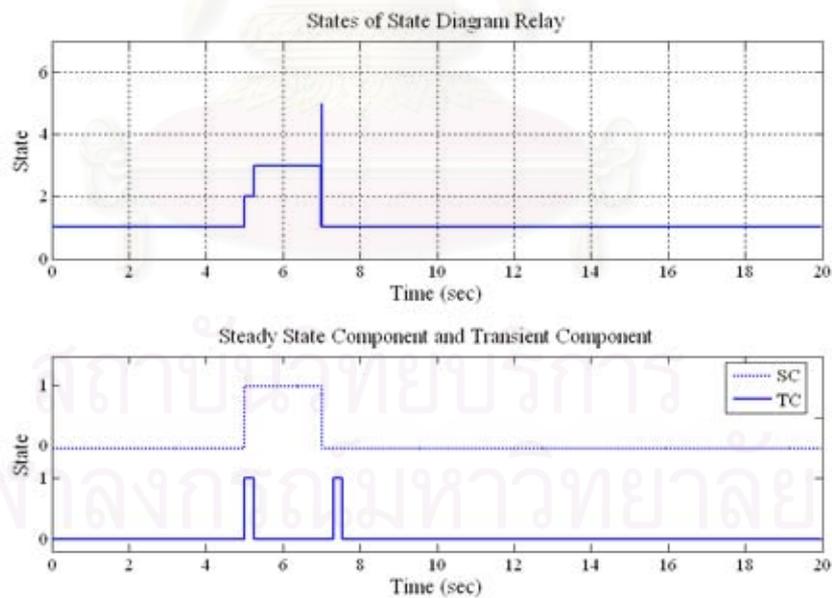
รูปที่ 6.8 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดเมื่อกำจัดความผิดพลาดในเวลา 2.3 วินาที

จากผลตอบของแรงดันที่ได้จะได้กราฟของ H_{sum} ดังรูปที่ 6.9 โดยในช่วงก่อนการกำจัดความผิดพลาด H_{sum} จะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 6.4 แต่ในขณะที่เกิดการกำจัดความผิดพลาดออกไป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรุนแรงอีกครั้งทำให้ค่า H_{sum} เพิ่มขึ้นในช่วงนั้น

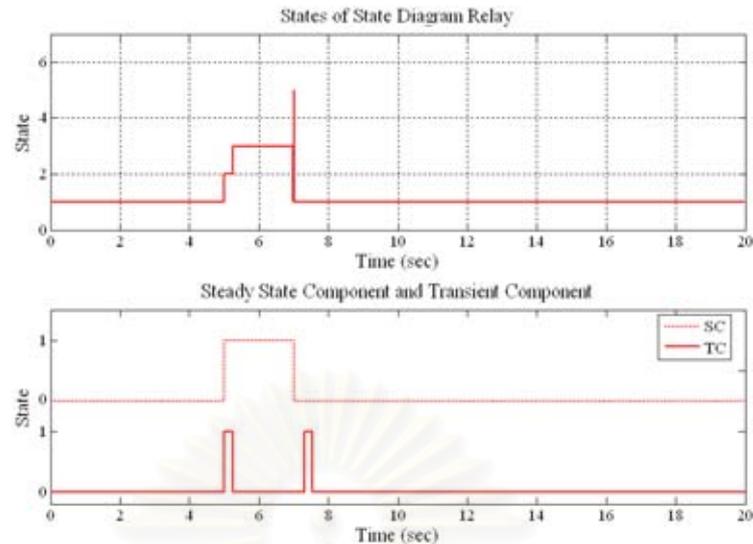
นั่นเอง ค่าสถานะของรีเลย์สามารถดูได้จากรูปที่ 6.10 พบว่าในกรณีนี้แบบจำลองทั้งสองแบบต่างให้ค่าสถานะของรีเลย์ไม่แตกต่างกันโดยจะเปลี่ยนจาก 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 แล้วตัดวงจร ซึ่งเป็นสถานะที่ถูกต้องเมื่อตรวจพบความผิดปกติ



รูปที่ 6.9 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้



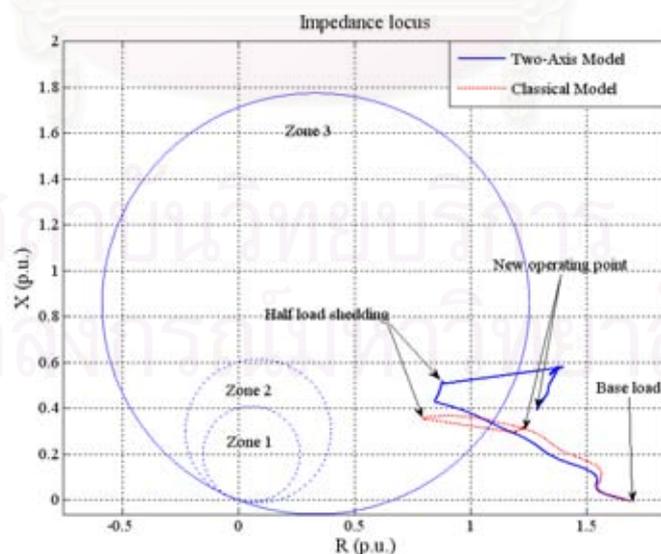
รูปที่ 6.10 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน



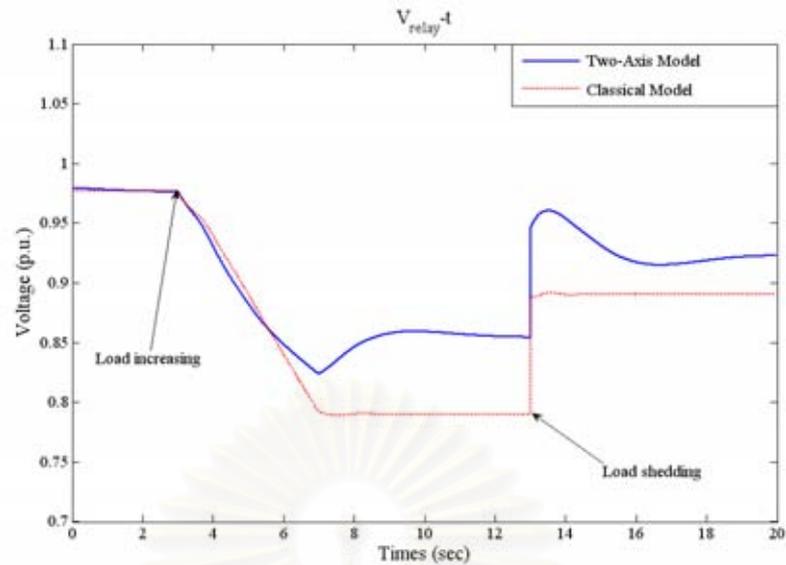
รูปที่ 6.11 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแรงดันภายในคงที่

6.1.2 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำการปลดโหลด

เมื่อทำการเพิ่มโหลดที่บัส 3 จะได้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 6.12 จากรูปจะเห็นว่าแม้จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ทุกอย่างเหมือนกันแต่ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นกลับแตกต่างกันมาก การวิเคราะห์ความแตกต่างของทางเดินค่าอิมพีแดนซ์ของทั้งสองแบบจำลองได้จากกราฟของแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่รีเลย์ตรวจวัดอยู่ดังรูปที่ 6.13



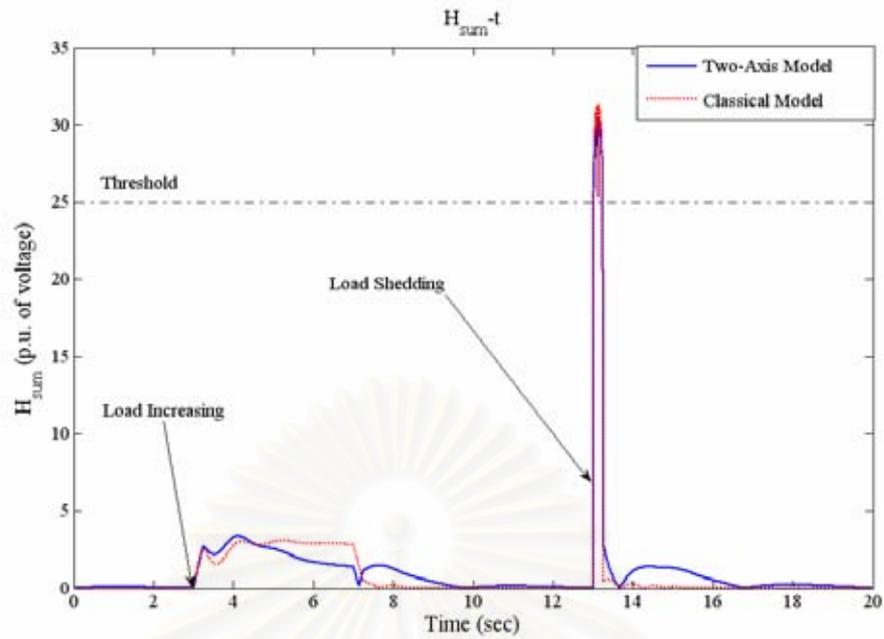
รูปที่ 6.12 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อทำการเพิ่มโหลดแล้วปลดโหลด



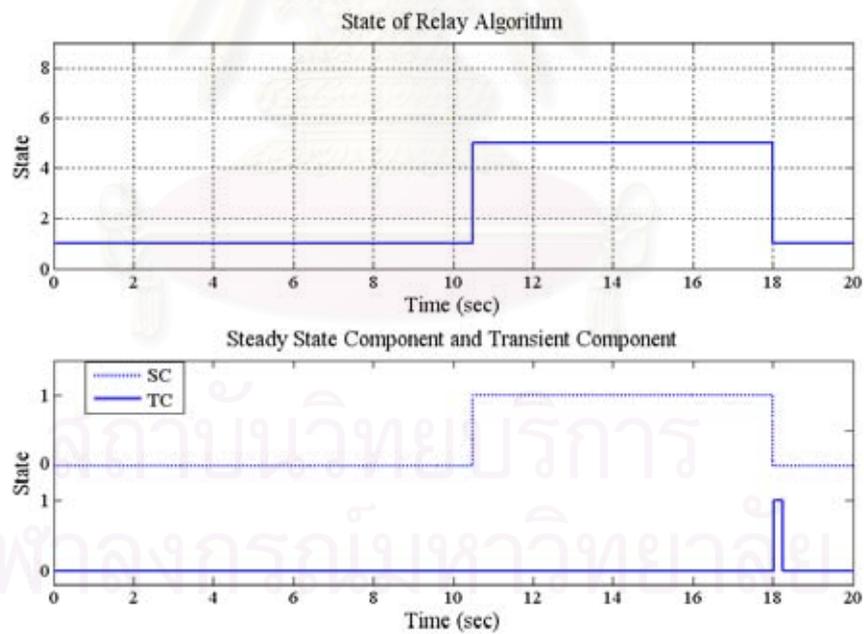
รูปที่ 6.13 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด

เมื่อพิจารณาแรงดันที่บัสพบว่า โดยรวมแล้วแรงดันของระบบที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกนจะมีขนาดแรงดันใกล้เคียงกับค่าที่จุดทำงานปกติมากกว่าเนื่องจากการควบคุมของ AVR และ PSS สังเกตได้ว่า เมื่อหยุดเพิ่มโหลด แรงดันของระบบที่ใช้แบบจำลองแบบสองแกนที่มีตัวควบคุมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ต่างจากผลที่ได้จากระบบที่ใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่ ซึ่งขนาดแรงดันจะไม่มีปรับตัวเองและค่อนข้างคงที่ในโหลดแต่ละค่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มานี้จะมีผลโดยตรงต่อการคำนวณค่า H_{sum} โดยจะได้ค่า H_{sum} ดังรูปที่ 6.14 จากรูปจะสังเกตได้ว่า ค่า H_{sum} จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน ได้แก่ ช่วงขณะที่โหลดกำลังเพิ่มขึ้นและช่วงที่มีการปลดโหลด โดยค่า H_{sum} จะมากหรือน้อยขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันรุนแรงเท่าใด จากผลการทดลองจะเห็นว่าช่วงที่มีการปลดโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมาก ค่า H_{sum} จึงมีค่าสูงเมื่อเทียบกับรอบค่าที่อยู่ ณ เวลาใกล้เคียง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า H_{sum} ขณะปลดโหลดมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มตั้งนั้นค่า TC ที่ได้จึงมีค่าเป็น “1” ดังรูปที่ 6.15 และ รูปที่ 6.16

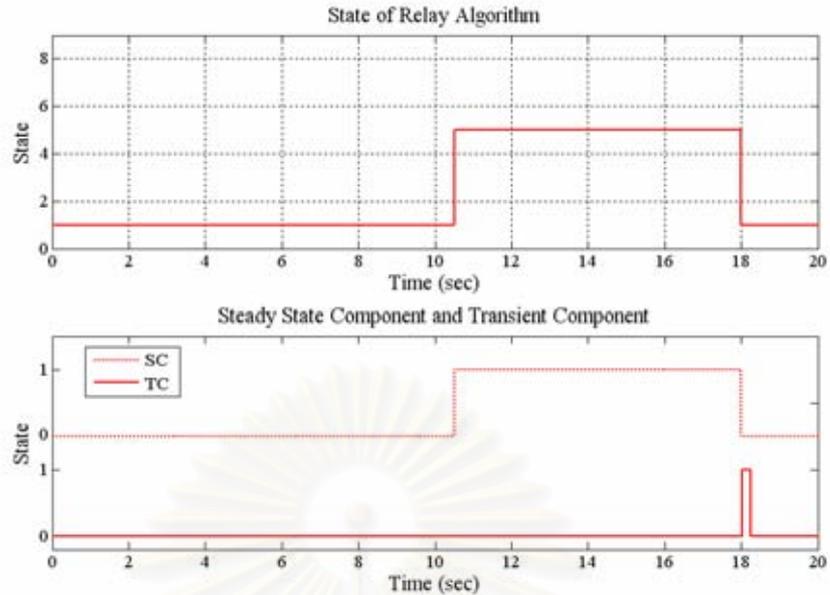
จากรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16 เมื่อพิจารณาการทำงานของรีเลย์จากสถานะของรีเลย์พบว่าในกรณีนี้สถานะของรีเลย์แทบไม่มีความแตกต่าง รีเลย์จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์เข้าสู่โซน 3 ที่วินาทีที่ 10.5 แล้วอยู่ในโซน 3 ไป 7.5 วินาที โดยคงอยู่ในสถานะที่ 5 และไม่มีการตัดวงจร เมื่อมีการปลดโหลดบางส่วนออกที่วินาทีที่ 18 พบว่า สถานะของรีเลย์กลับไปอยู่ที่สถานะที่ 1 ซึ่งเป็นสถานะปกติ



รูปที่ 6.14 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

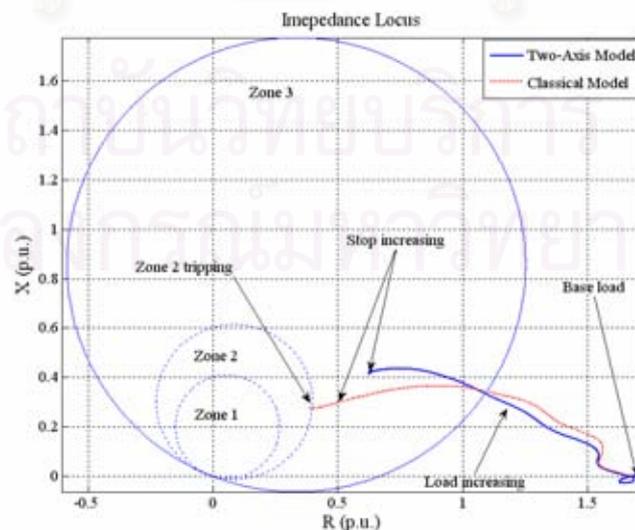


รูปที่ 6.15 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน

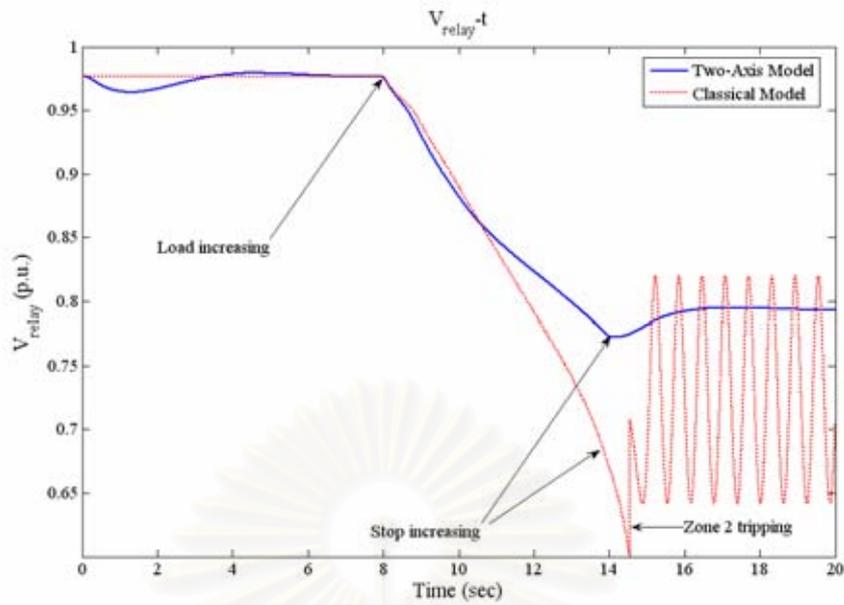


รูปที่ 6.16 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่

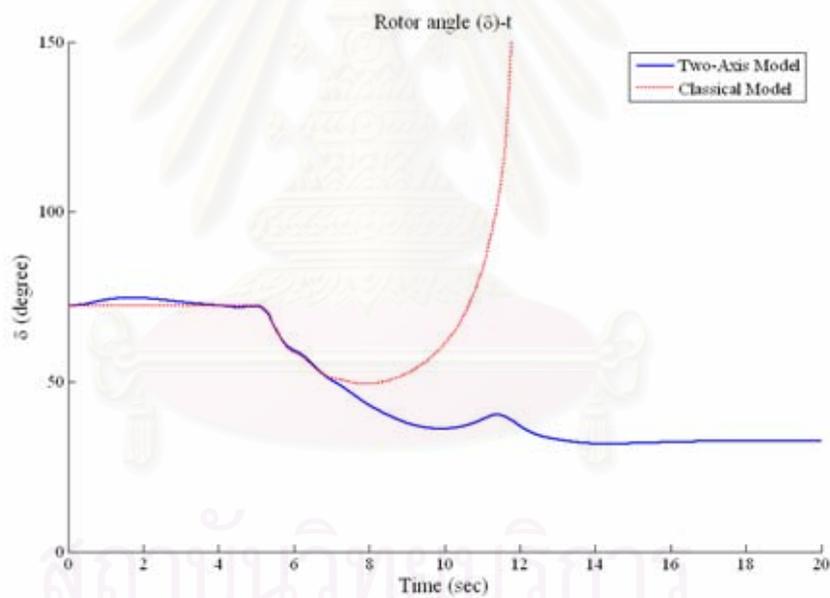
อย่างไรก็ตาม ถ้าทำการเพิ่มโหลดในบัสที่ 3 มากเกินไปอาจจะทำให้ผลที่ได้ของทั้งสองแบบจำลองแตกต่างกันอย่างมาก โดยแรงดันที่รีเลย์ตรวจวัดได้เมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่จะลดลงอย่างมากจนกระทั่งค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นตกอยู่ในโซน 2 ของการทำงานแล้วถูกตัดวงจรในที่สุด ต่างจากที่ใช้แบบจำลองแบบสองแกนที่ยังรักษาระดับแรงดันไว้ได้ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นยังอยู่ในโซน 3 และรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะตีความว่าเป็นสภาวะโหลดเกินจึงไม่มีการตัดวงจรเกิดขึ้น ดังดูได้จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มโหลดให้มีค่าสูงมากขึ้น ดังนี้



รูปที่ 6.17 ภาพทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินจนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ



รูปที่ 6.18 แรงดันไฟฟ้าที่บัลทีรีเลย์ระยะทางตรวจวัด



รูปที่ 6.19 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ

จากผลในรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มโหลดที่มากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมดังรูปที่ 6.19 โดยแรงดัน ณ บัลทีรีเลย์ตรวจวัดมีค่าลดลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตรวจวัดมีค่าลดลงตามไปด้วย จนในที่สุดค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นตกอยู่ในโซน 2 ของการทำงานและถูกตัดวงจรโดยรีเลย์ระยะทางโซน 2 แต่สำหรับ

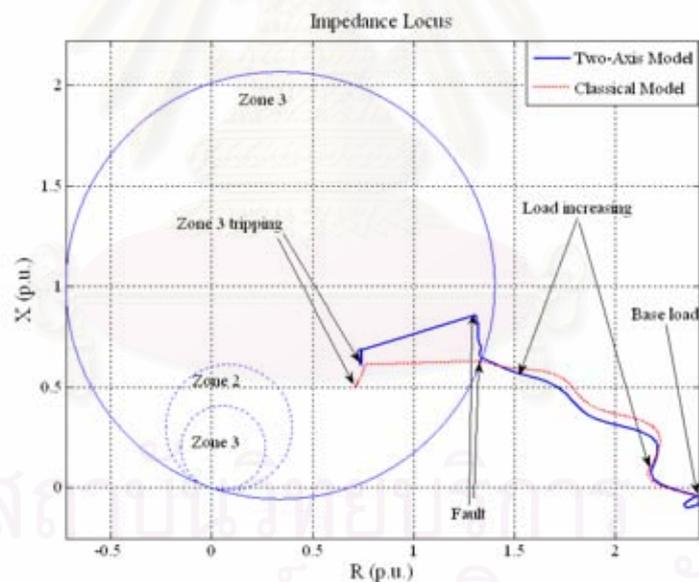
แบบจำลองแบบสองแกนที่มีระบบควบคุมอยู่นั้นจะสามารถรักษาระดับแรงดันและเสถียรภาพเชิงมุมไว้ได้

6.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดปกติ

การทดลองนี้จะแบ่งเป็นสองการทดลองที่ใช้เวลาในการกำจัดความผิดปกติออกไปต่างกัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการทำงานของรีเลย์เนื่องจากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- 1.) กรณีกำจัดความผิดปกติเมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที

จากผลการทดสอบพบว่าทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 6.20 ของทั้งสองแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มโหลดจนค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3 แล้วหยุดเพิ่มโหลด ณ เวลานั้นระบบที่ใช้แบบจำลองแบบสองแกนจะสามารถฟื้นฟูแรงดันที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มโหลดได้ด้วยการทำงานของระบบกระตุ้น ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่จะไม่สามารถฟื้นฟูแรงดันได้

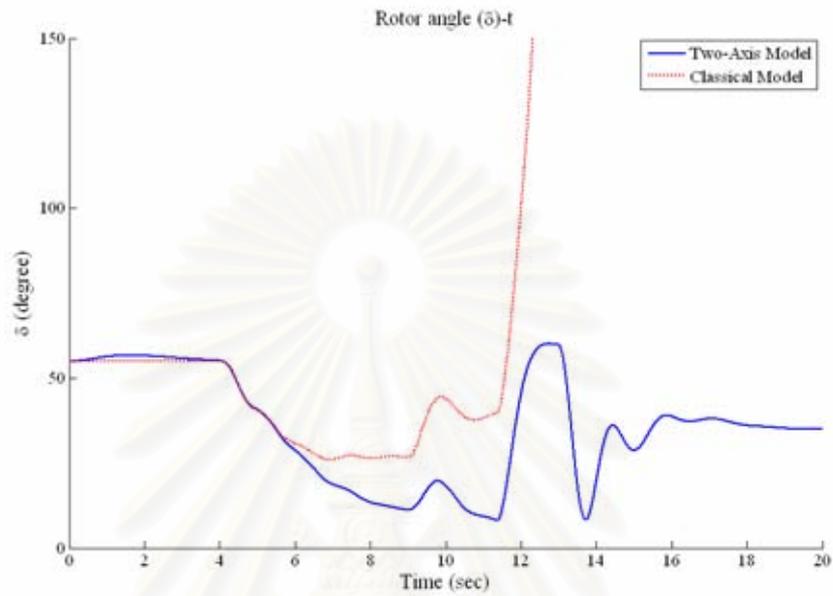


รูปที่ 6.20 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินตามด้วยความผิดปกติ

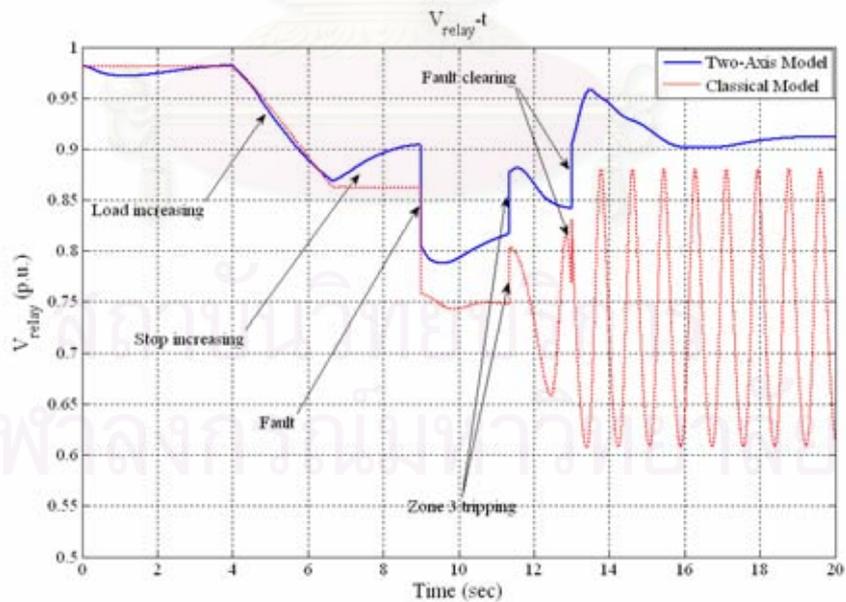
พร้อม

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นพบว่ารีเลย์ทำหน้าที่ตัดสายที่ตนเองป้องกันเมื่อผ่านการหน่วงเวลาไป 2 วินาที ซึ่งเป็นการทำงานที่คาดหวังไว้ อย่างไรก็ตาม หลังจากที่รีเลย์ทำงานแล้ว ระบบที่ใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่กลับสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมไปดังรูปที่ 6.21 ทำให้แรงดันหลังจากที่รีเลย์ตัดสายที่ป้องกันออกไปเกิดการแกว่งขึ้นอย่างรุนแรงดังรูปที่ 6.22 จนส่งผลกระทบต่อ

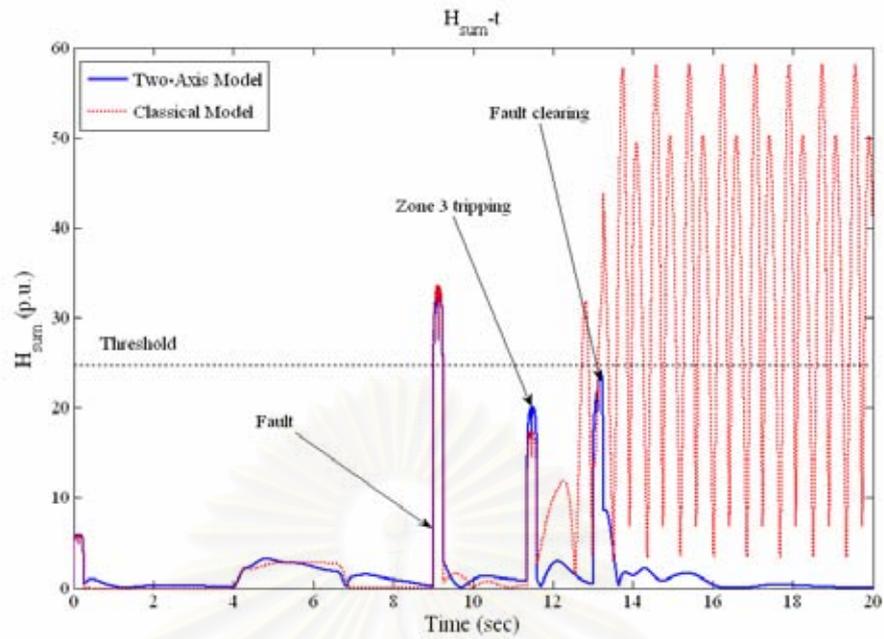
ถึงค่า H_{sum} ดังรูปที่ 6.23 ซึ่งค่า H_{sum} ที่แกว่งอย่างรุนแรงของแบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่ ทำให้ค่า TC ที่รีเลย์คำนวณได้จากการใช้แบบจำลองทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันอย่างมากดังรูปที่ 6.24 และรูปที่ 6.25



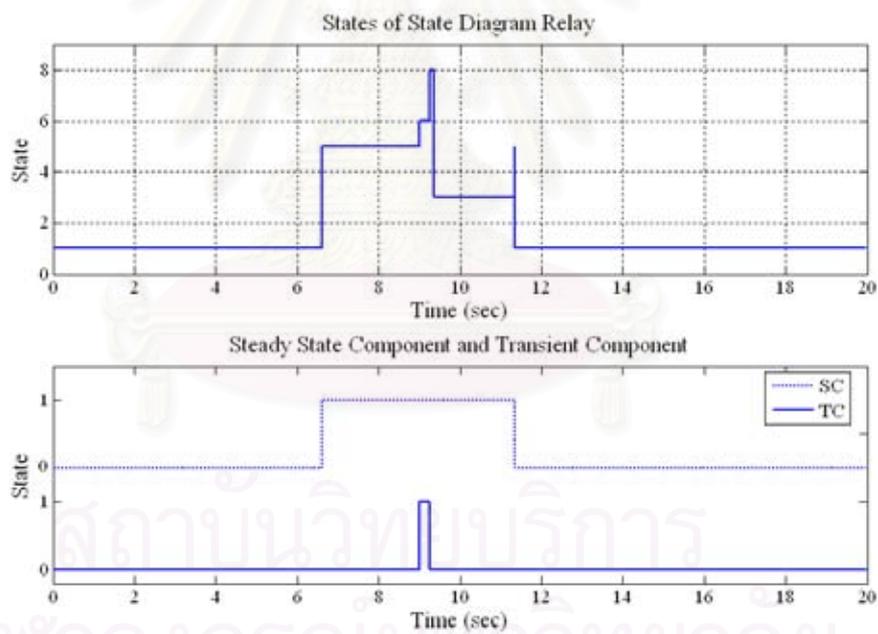
รูปที่ 6.21 มุมของโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบ



รูปที่ 6.22 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



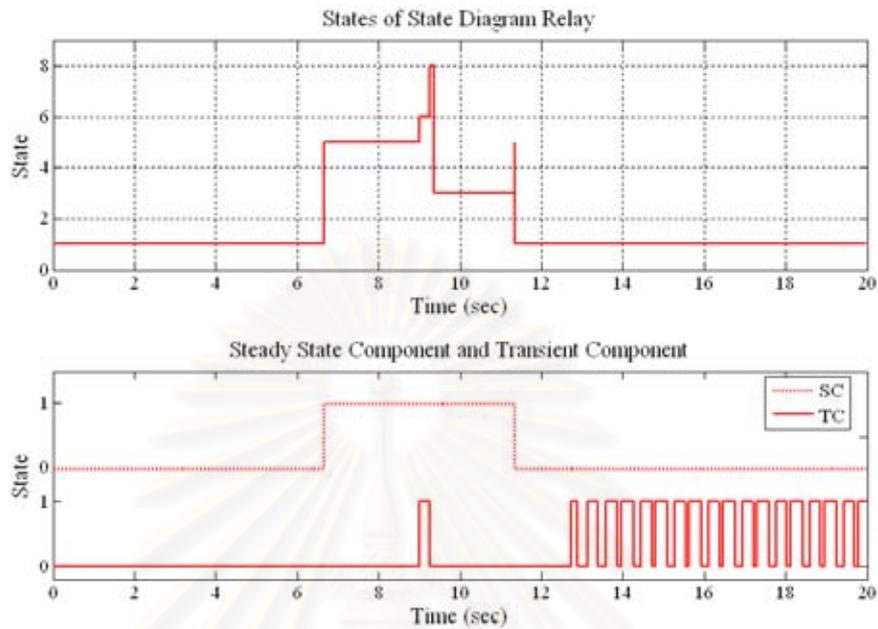
รูปที่ 6.23 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้



รูปที่ 6.24 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน

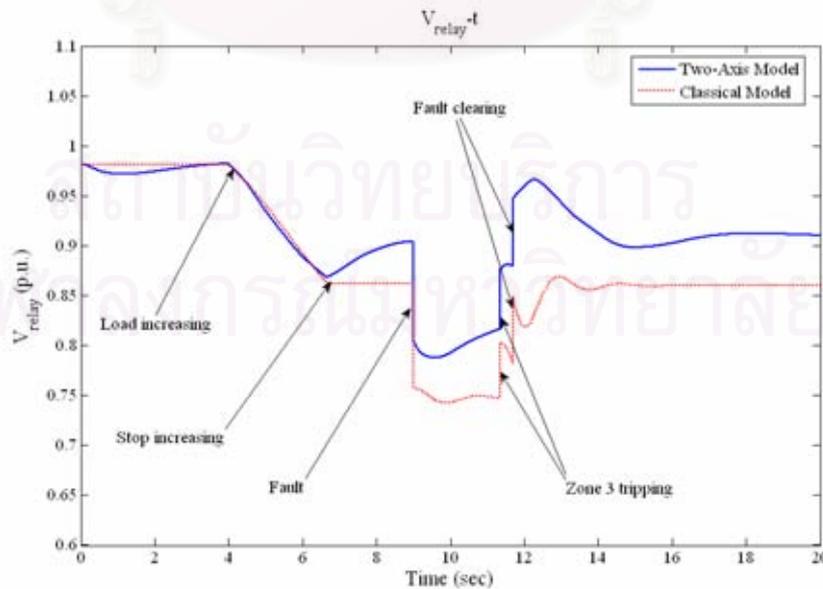
เมื่อพิจารณาสถานะของรีเลย์ที่ได้จากการทดสอบ พบว่าในช่วงก่อนเกิดการตัดวงจรแบบจำลองทั้งสองแบบให้สถานะของรีเลย์ไม่ต่างกันโดยเมื่อรีเลย์โซน 3 เห็นค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากสภาวะโหลดเกิน สถานะของรีเลย์จะเปลี่ยนเป็นสถานะที่ 5 จนกระทั่งเกิดความผิดพลาดขึ้น สถานะของรีเลย์จะเปลี่ยนจาก 5 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 3 และเกิดการตัดวงจรในที่สุด หลังจาก

เกิดการตัดวงจรแล้ว แม้ค่า TC ที่ได้จะแตกต่างกัน แต่ค่าสถานะของรีเลย์จะยังมีค่าเป็น 1 เนื่องจากเกิดการตัดวงจรเรียบร้อยแล้ว

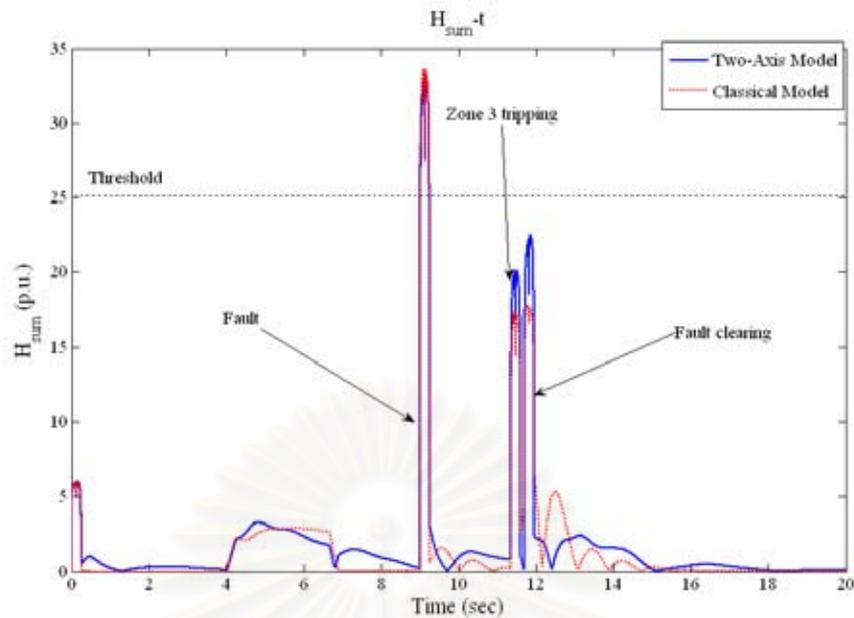


รูปที่ 6.25 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่

2.) กรณีกำจัดความผิดพลาดเมื่อเวลาผ่านไป 2.7 วินาที
 กรณีนี้จะได้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เหมือนกับรูปที่ 6.20 ทุกประการ เพราะช่วงก่อนที่
 จะกำจัดความผิดพลาดออกไปเหตุการณ์ของทั้งสองการทดลองเหมือนกัน

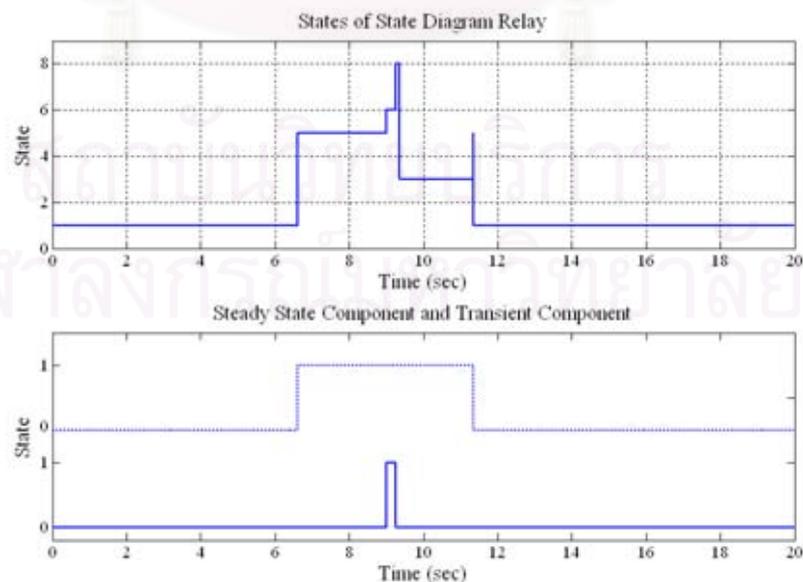


รูปที่ 6.26 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด

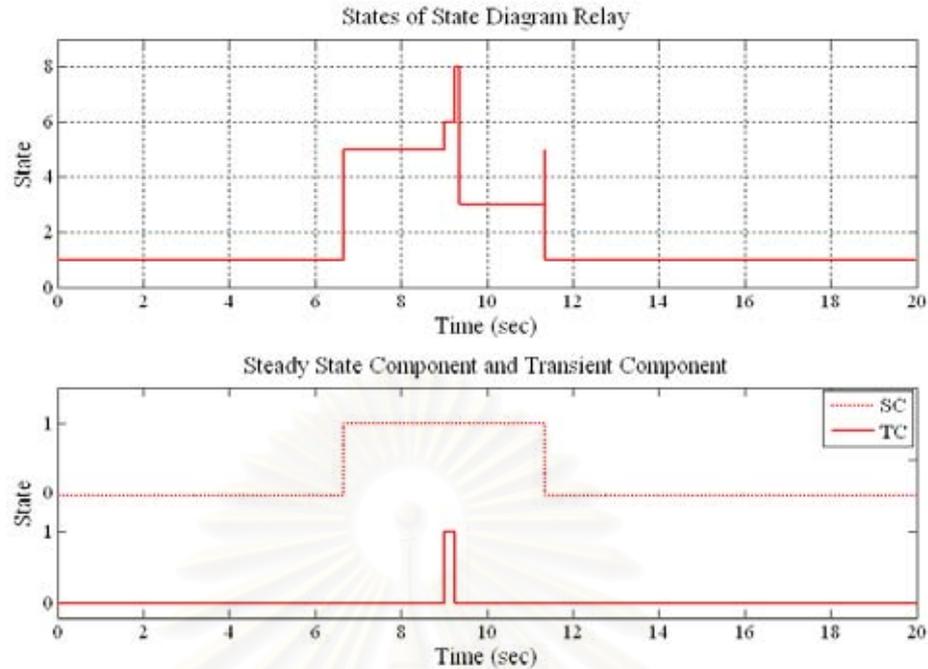


รูปที่ 6.27 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

แต่เมื่อพิจารณาค่าแรงดันที่บัสและค่า H_{sum} ในรูปที่ 6.26 และรูปที่ 6.27 ตามลำดับ พบว่าเมื่อทำการกำจัดความผิดปกติออกภายใน 2.7 วินาที ทั้งสองระบบยังคนทำงานอยู่ได้โดยที่ไม่เสียเสถียรภาพเชิงมุมไป โดยที่เหตุการณ์ที่เกิดก่อนการกำจัดความผิดปกติจะเหมือนกันกับการทดลองที่ผ่านมา คือรีเลย์จะทำการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติแม้ว่าจะอยู่ในสภาวะไหลตกเกินก็ตาม สำหรับสถานะของรีเลย์พบว่าแบบจำลองทั้งสองแบบให้ค่าสถานะที่เหมือนกันทุกประการดังรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.28 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกน



รูปที่ 6.29 สถานะของรีเลย์ระยะทางเมื่อใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่

6.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลองจากระบบทดสอบที่ 1

จากผลการทดลองกับระบบทดสอบที่ 1 จะเห็นว่ารีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะสามารถตัดสินใจตัดวงจรได้ตามที่ออกแบบไว้ ได้แก่ ตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติเพิ่มขึ้น ไม่ตัดวงจรเมื่อเกิดสภาวะไหลตกเกินโดยให้โอกาสทำการปลดไหลตกได้ และให้ลำดับความสำคัญกับการตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ตัดวงจรเมื่อเกิดสภาวะไหลตกเกิน

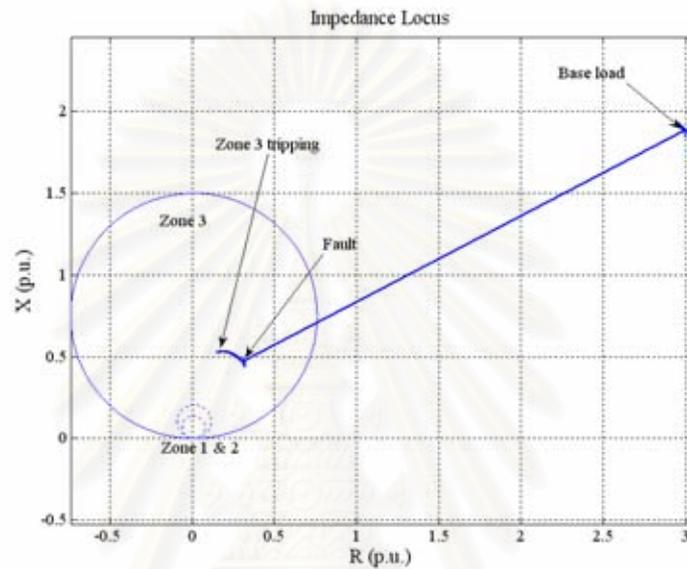
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของการใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส จะเห็นว่าแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบมีโอกาสที่จะให้ผลการทดสอบรีเลย์ที่ไม่เหมือนกัน โดยแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสองแกนที่มีระบบควบคุมร่วมด้วยจะทนต่อการเพิ่มไหลตกและการรบกวนต่างๆ ได้มากกว่าระบบที่ใช้แบบจำลองแบบแรงดันภายในคงที่ ทำให้สามารถเพิ่มไหลตกได้มากกว่าโดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่เกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมเรเตอร์ขึ้น

ดังนั้นในการทดสอบการทำงานเมื่อเกิดสภาวะไหลตกเกินของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ที่ต้องเพิ่มไหลตกเข้าไปในระบบเป็นปริมาณมาก จึงควรใช้แบบจำลองแบบสองแกน เพื่อที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยังคงรักษาเสถียรภาพเชิงมุมซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดลงอย่างรวดเร็วและการแกว่งของแรงดันจนทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเข้าไปสู่โซน 2 ของการทำงานจนเกิดการตัดวงจรที่ผิดพลาดโดยรีเลย์ระยะทางโซน 2 ในที่สุด

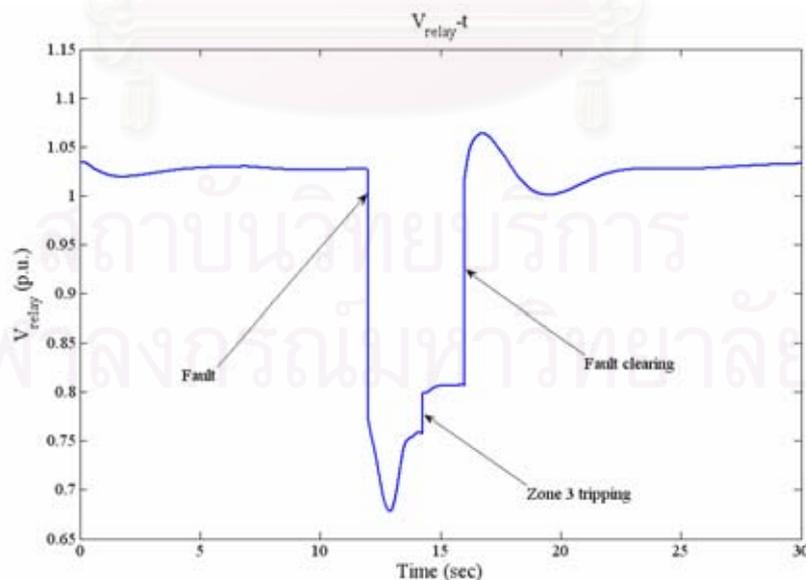
6.2 ผลการทดสอบกับระบบที่ 2

6.2.1 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดความผิดปกติ

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัสที่ 5 กับบัสที่ 7 โดยกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการกำจัดความผิดปกติคือ 4 วินาทีหลังจากเกิดความผิดปกติ จะได้ผลดังรูปที่ 6.30 และรูปที่ 6.31

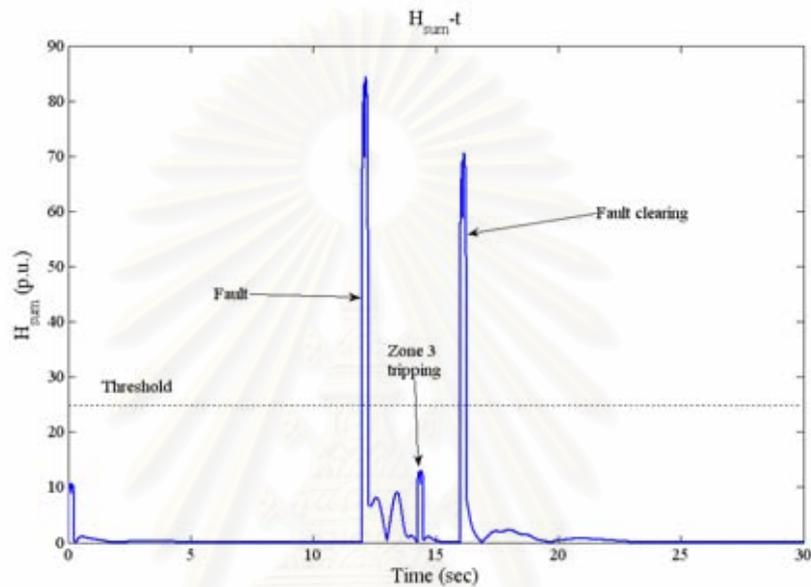


รูปที่ 6.30 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดความผิดปกติ

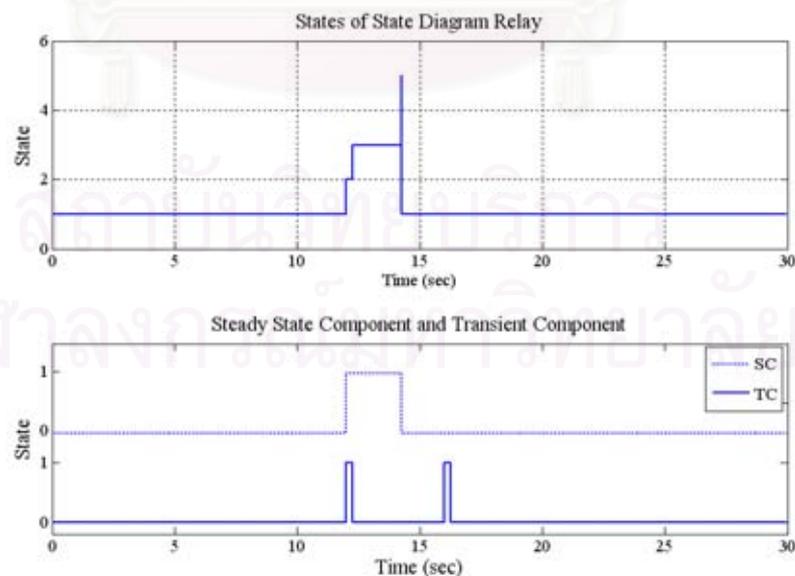


รูปที่ 6.31 แรงดันที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัดได้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นค่าอิมพีแดนซ์และค่าแรงดันที่รีเลย์ตรวจวัดได้จะลดลงอย่างรวดเร็วจนตกอยู่ในโซน 3 ของการทำงาน เมื่อรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเห็นความผิดปกติในโซนการทำงาน ก็จะทำการตัดวงจรหลังจากผ่านการหน่วงเวลา 2 วินาที ในขณะที่เกิดความผิดปกตินั้น เนื่องจากค่าแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเห็นได้ว่าค่า H_{sum} ในเวลานั้นจะสะท้อนการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันเป็นค่า H_{sum} ที่สูงมาก ทำให้สถานะของรีเลย์เปลี่ยนจาก 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 ซึ่งเป็นสถานะที่แสดงการเกิดความผิดปกติและตัดวงจร



รูปที่ 6.32 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

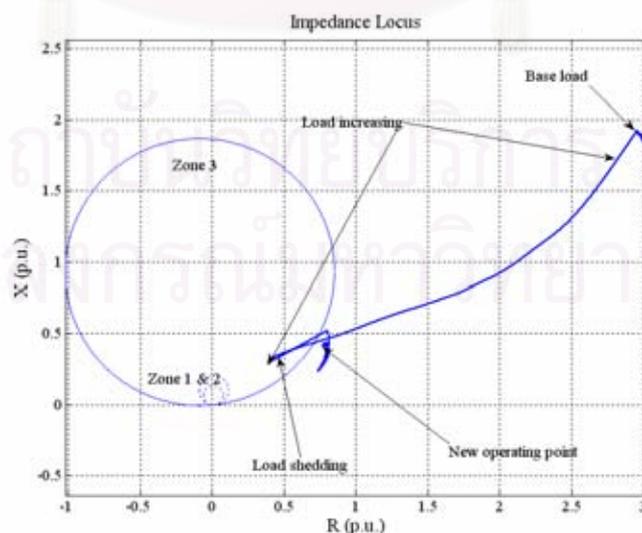


รูปที่ 6.33 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบทดสอบนี้รีเลย์ระยะทางไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดออกไปได้ดังนั้นจึงต้องมีการสมมติให้ความผิดพลาดหายไปเองเมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาทีหลังจากเริ่มเกิดความผิดพลาด เมื่อพิจารณารูปที่ 6.32 จะพบว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นค่า H_{sum} ที่รีเลย์วัดได้จะมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มและ H_{sum} จะมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มอีกครั้งในตอนที่กำลังกำจัดความผิดพลาดออกไป ในขณะที่การตัดวงจรของรีเลย์ระยะทางในระบบทดสอบนี้กลับไม่ก่อให้เกิดสภาวะชั่วคราวที่รุนแรงจนเกินค่าขีดเริ่ม เนื่องจากสายส่งที่รีเลย์ตัดออกไปไม่ทำให้โครงสร้างของระบบเปลี่ยนแปลงไปมากนัก เพราะเป็นเพียงแค่การทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างบัส 4 กับบัส 5 เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันเท่านั้นเนื่องจากเหลือสายส่งเพียงเส้นเดียว ต่างจากการกำจัดความผิดพลาดออกไปซึ่งทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และระดับแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดกลับคืนมาอย่างรวดเร็วเมื่อกำจัดความผิดพลาดออกไปเป็นเหตุให้ค่า H_{sum} มีค่าสูงมาก ค่า H_{sum} ขณะที่กำจัดความผิดพลาดออกไปจะสะท้อนอยู่ในค่า TC ที่วินาทีที่ 16 ดังรูปรูปที่ 6.33 ซึ่งค่า TC ตอนนี้นำไม่ทำให้สถานะของรีเลย์เปลี่ยนไปแต่อย่างใดเนื่องจากรีเลย์ได้ตัดวงจรสายส่งไปเรียบร้อยแล้ว

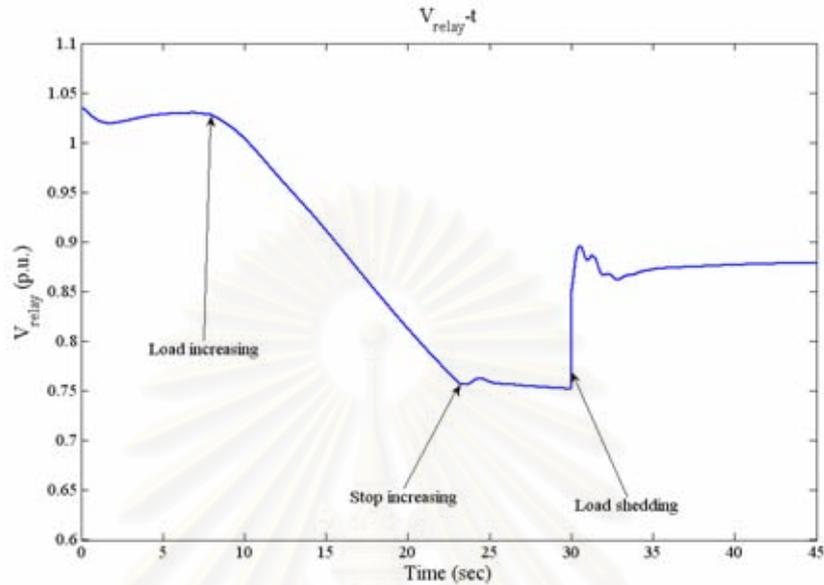
6.2.2 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วทำการปลดโหลด

เมื่อทำการเพิ่มโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ที่บัสที่ 5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่โซน 3 ของการทำงานดังรูปที่ 6.34 ซึ่งขณะที่เพิ่มโหลดนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดได้ก็จะมีค่าค่อยๆ ลดลงดังรูปที่ 6.35 จนกระทั่งหยุดการเพิ่มโหลดค่าแรงดันไฟฟ้าจึงจะคงที่ สังเกตว่าในการทดลองนี้ค่าแรงดันหลังจากหยุดเพิ่มโหลดนั้นไม่ทำการฟื้นฟูตัวเอง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่า E_{fd} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ถึงขีดจำกัดที่ตั้งไว้แล้วตามค่า E_{fd}^{\max} ที่ตั้งไว้

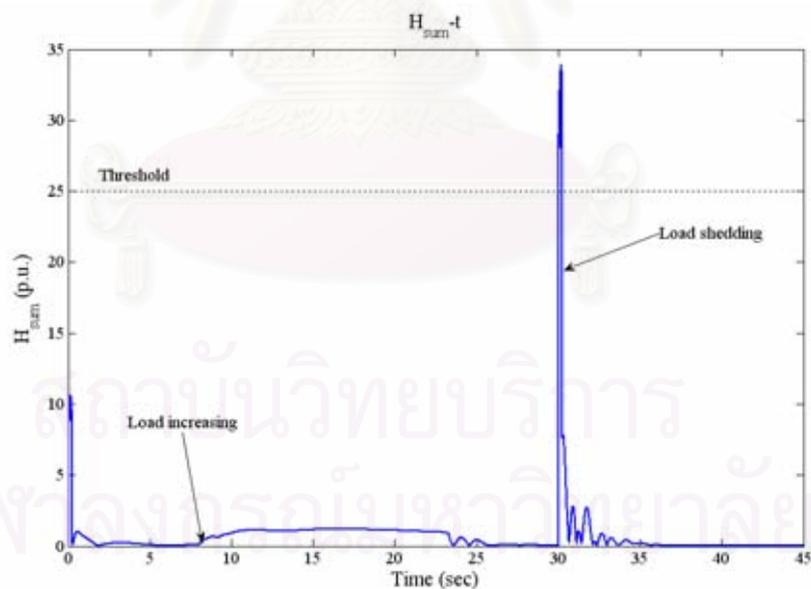


รูปที่ 6.34 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วตัดโหลดออก

เมื่อทำการปลดโหลดที่เพิ่มเข้ามาออกไปครั้งหนึ่งพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นออกจากโซน 3 ของการทำงานและแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนในที่สุดแล้วระบบจะกลับเข้าสู่จุดทำงานปกติจุดใหม่



รูปที่ 6.35 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด

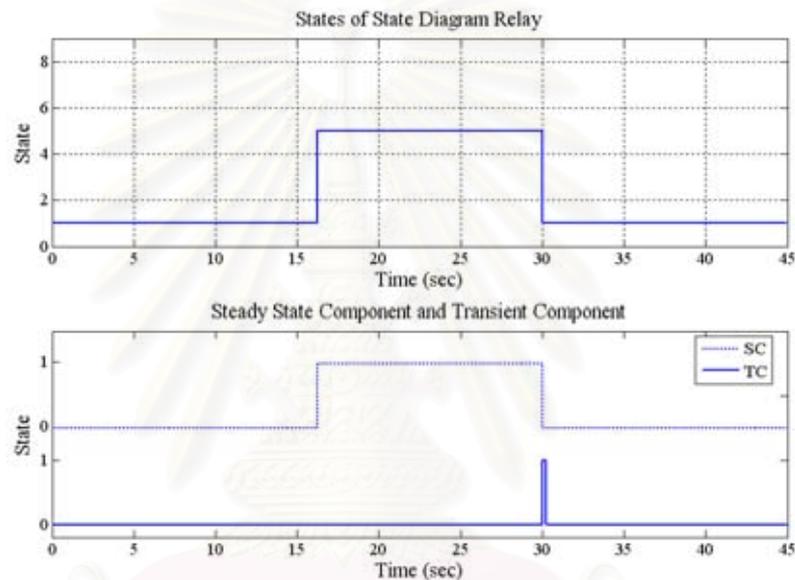


รูปที่ 6.36 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

เมื่อพิจารณาค่า H_{sum} ในรูปที่ 6.36 พบว่าขณะเพิ่มโหลดซึ่งแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นค่า H_{sum} ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วยแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

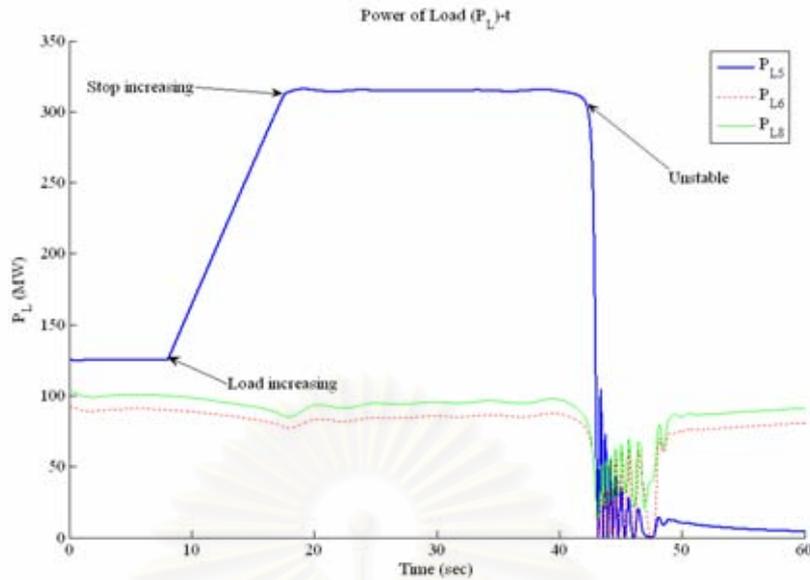
จนกระทั่งถึงตอนที่ทำการปลดโหลดออกบางส่วน ค่า H_{sum} จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สอดคล้องกับการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของค่าแรงดันที่รีเลย์ตรวจวัดได้

เมื่อพิจารณาค่าสถานะของรีเลย์จะพบว่าเมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 ของการทำงาน รีเลย์จะมีค่าสถานะเป็น 5 ซึ่งเป็นการตีความว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่มองเห็นเกิดจากสภาวะโหลดเกิน จึงไม่ทำการตัดวงจร และเมื่อโหลดถูกปลดออกไปบางส่วนจนค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางเห็น ออกนอกโซนการทำงานค่าสถานะจึงกลับมาเป็น 1 อีกครั้ง นอกจากนี้จะเห็นว่าขณะที่ทำการปลด โหลดนั้นค่า TC จะมีค่าเป็น "1" อยู่ชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับค่า H_{sum} ที่เพิ่มจนเกินค่าขีดเริ่ม

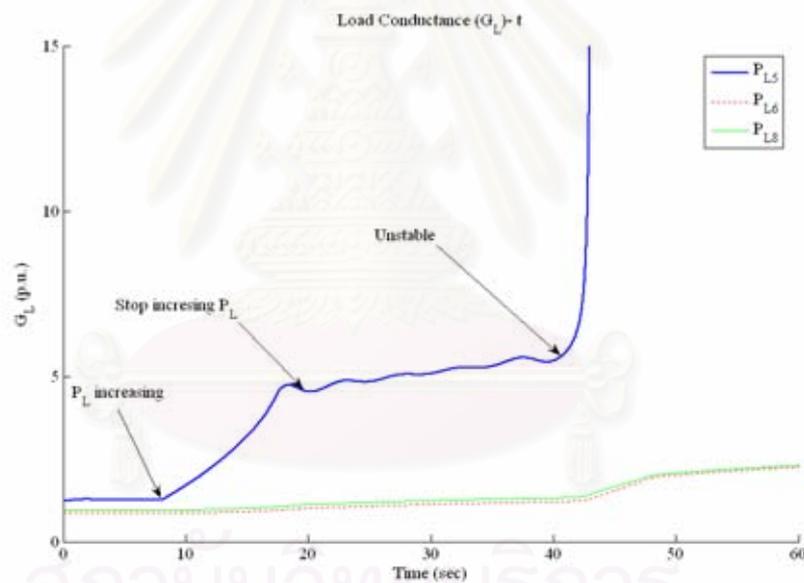


รูปที่ 6.37 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

สำหรับแบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ เมื่อทำการเพิ่มโหลดที่บัส 5 จนมี กำลังไฟฟ้า 360 MW จะได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นดังรูปที่ 6.38 ผลของการเพิ่มโหลดนี้ จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) ของโหลดเปลี่ยนไปเพื่อให้สอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าที่ โหลดได้รับดังรูปที่ 6.39 จะเห็นว่าที่วินาทีที่ 20 แม้ว่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเข้าสู่ค่าคงที่แล้วแต่ค่า ความนำไฟฟ้าของโหลดยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่วินาทีที่ 40 ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด จึงตกลงอย่างรวดเร็ว และค่าความนำไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นสูง เมื่อพิจารณาจากกราฟกำลังจริง และขนาดแรงดันของบัส 5 ในรูปที่ 6.40 จะเห็นว่าเส้นโค้งเกิดการวกกลับผ่านจุด Nose Curve แล้ว นั่นหมายความว่ามีการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันขึ้น

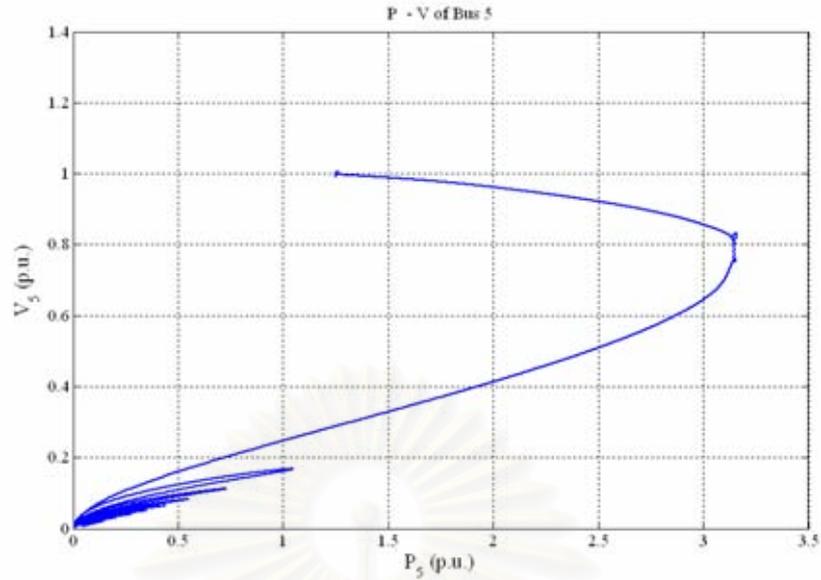


รูปที่ 6.38 กำลังของโหลดเมื่อใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

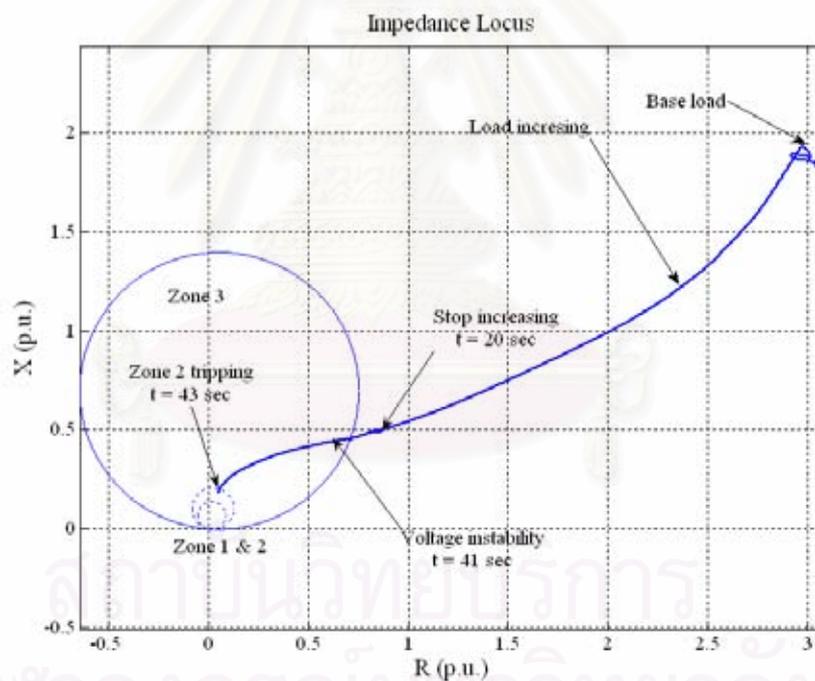


รูปที่ 6.39 ค่า Conductance ของโหลดเมื่อใช้แบบจำลองแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

เมื่อพิจารณาทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ใน รูปที่ 6.41 พบว่าในช่วงที่ทำการเพิ่มโหลดค่าอิมพีแดนซ์จะลดค่าลงเช่นเดียวกับการใช้โหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ จนกระทั่งหยุดเพิ่มโหลดที่วินาทีที่ 20 แต่ค่าอิมพีแดนซ์ยังคงลดค่าลงอยู่แต่การลดลงดำเนินไปอย่างช้าๆ จนเมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันที่วินาทีที่ 43 ค่าอิมพีแดนซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่โซน 2 และถูกตัดวงจรโดยรีเลย์ระยะทางโซน 2 ในที่สุด



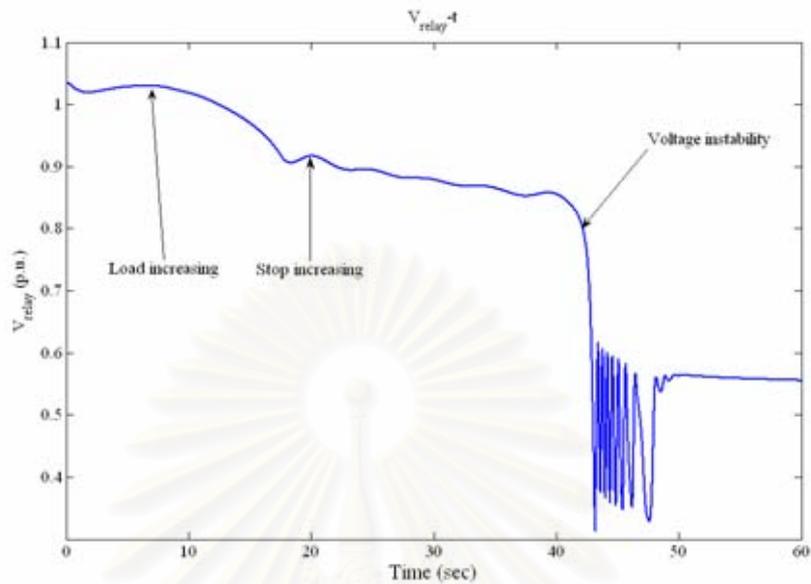
รูปที่ 6.40 P – V curve ของบัส 5



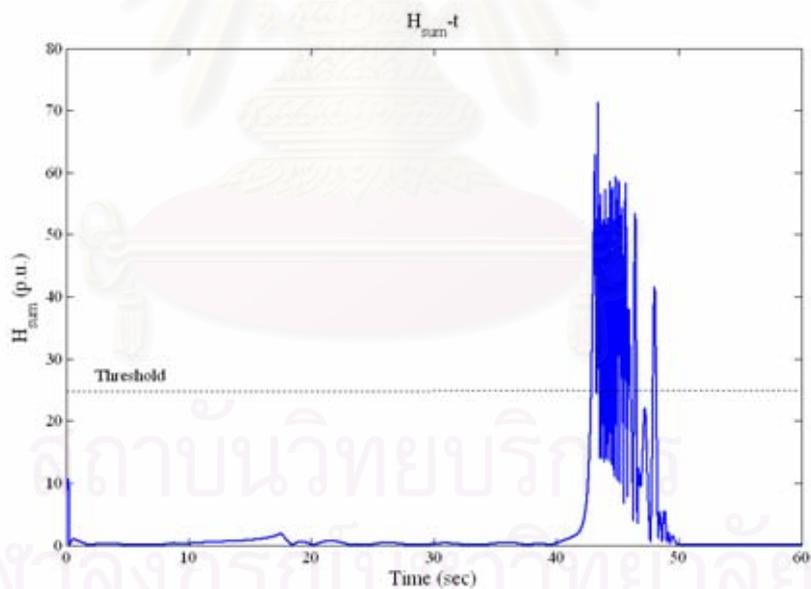
รูปที่ 6.41 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าที่แรงดันตรวจวัดได้ในรูปที่ 6.42 พบว่าเมื่อเพิ่มโหลดค่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลงเช่นเดียวกันกับเมื่อใช้แบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์คงที่ แม้ว่าหยุดเพิ่มโหลดแล้ว ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์วัดได้ยังคงลดค่าลงอย่างต่อเนื่องแต่เป็นไปด้วยอัตราที่ช้ากว่าขณะที่เพิ่มโหลด จนกระทั่งวินาทีที่ 40 ก็เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากปัญหาการสูญเสีย

เสถียรภาพแรงดัน ซึ่งเหตุการณ์นี้สอดคล้องกับทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว หลังจากเกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันขึ้น

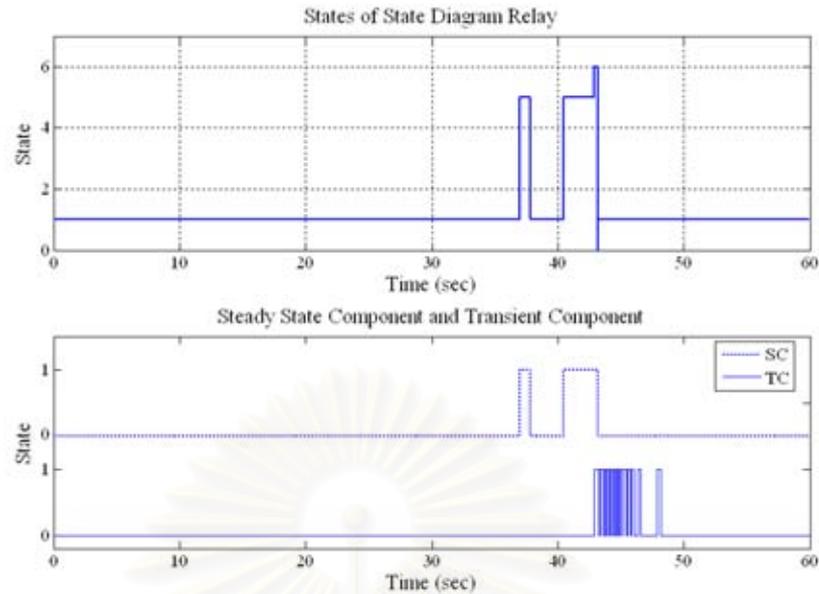


รูปที่ 6.42 แรงดันไฟฟ้าที่บัสที่รีเลย์ตรวจวัด



รูปที่ 6.43 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

จากรูปที่ 6.43 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์คำนวณได้จะมีค่าสูงในช่วงที่เกิดสูญเสียเสถียรภาพขึ้น สอดคล้องกับค่าแรงดันที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และช่วงที่เกิดการแกว่งของค่าแรงดันไฟฟ้าค่า H_{sum} ก็มีค่าสูงอีกด้วย



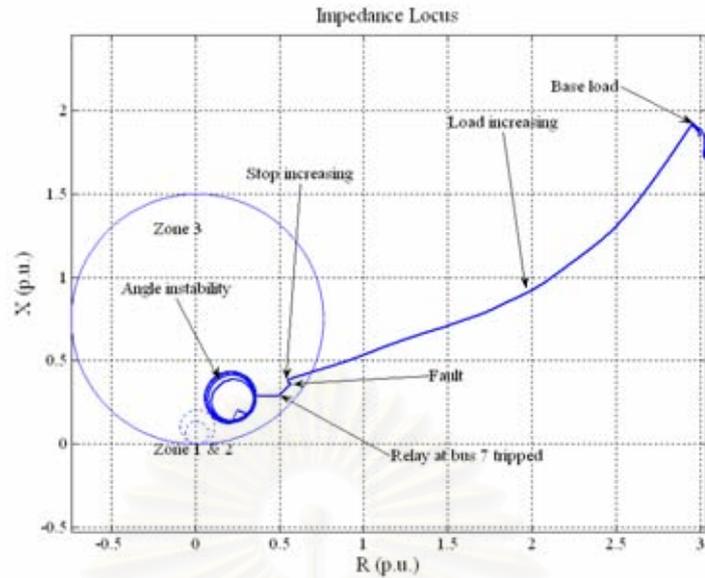
รูปที่ 6.44 สถานะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ

จากรูปที่ 6.44 จะเห็นว่าช่วงวินาทีที่ 37-38 ค่าอิมพีแดนซ์ได้เข้าสู่โซน 3 แล้ววิ่งออกไปจนกระทั่งที่วินาทีที่ 40 ค่าอิมพีแดนซ์จึงลดค่าลงจนเข้าโซน 3 และวินาทีที่ 43 ค่าอิมพีแดนซ์ก็เข้าสู่โซน 2 และเกิดการตัดวงจรดังจะเห็นได้จากสถานะที่ -1 ซึ่งได้กำหนดให้เป็นสถานะที่เข้าสู่โซน 2

6.2.3 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วตามด้วยความผิดพลาด

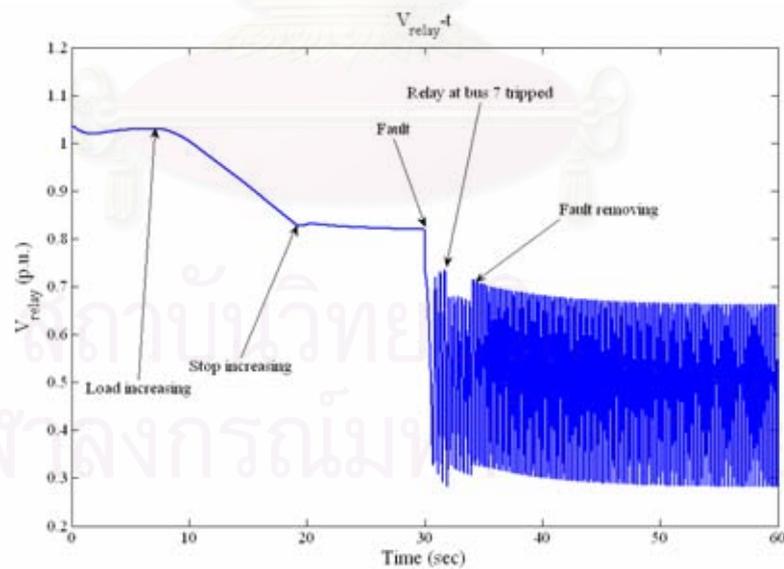
กรณีนี้เนื่องจากต้องเพิ่มโหลดเป็นปริมาณมากจนทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ง่ายเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น ดังนั้นจะกำหนดให้รีเลย์ระยะทางที่เป็นตัวป้องกันปฐมภูมิที่บัส 7 ทำการตัดวงจรทันทีที่เห็นความผิดพลาด และเพื่อให้ง่ายต่อการจำลองแบบจึงกำหนดให้รีเลย์ระยะทางอีกตัวหนึ่งที่บัส 7 ทำการตัดวงจรสายส่งหลังจากเกิดความผิดพลาดไปแล้ว 2 วินาที ในส่วนของรีเลย์ระยะทาง ณ บัสที่ 4 กำหนดให้เป็นรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะทั้งคู่

เมื่อเพิ่มโหลดที่บัส 5 จนรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเห็นค่าอิมพีแดนซ์เข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิดพลาดขึ้นที่สายส่งเชื่อมระหว่างบัส 5 กับบัส 7 ที่ตำแหน่งห่างจากบัสที่ 7 เป็นระยะทาง 10% ของความยาวสายและมีค่าความต้านทานของความผิดพลาด 200 โอห์ม จะได้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเห็นดังรูปที่ 6.45 ซึ่งจะเห็นว่าในที่สุดแล้วระบบเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมขึ้น

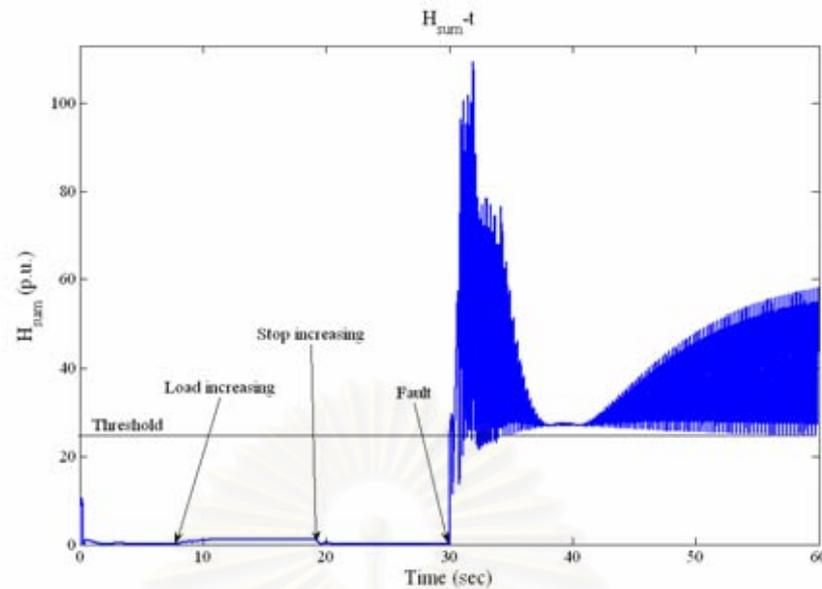


รูปที่ 6.45 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิดปกติ

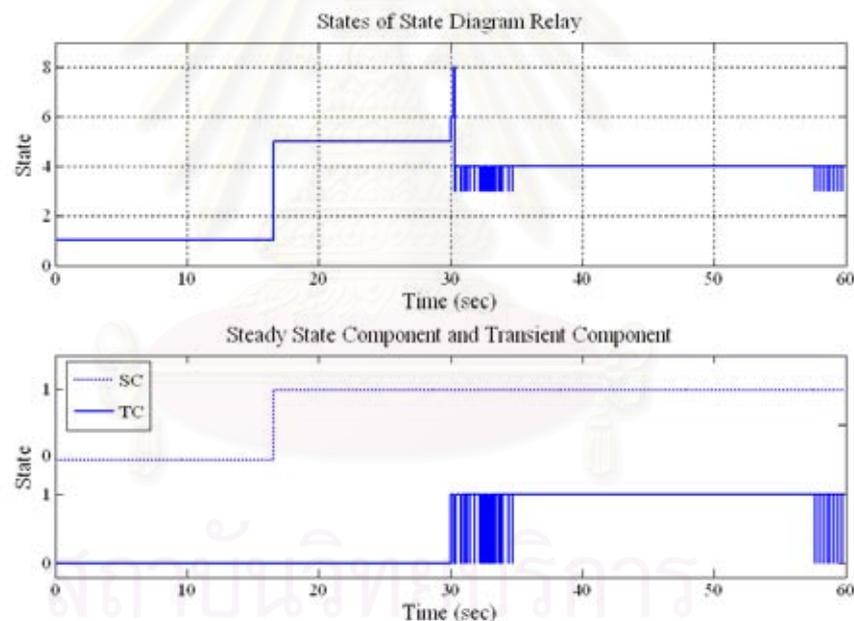
เมื่อพิจารณาค่าของแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดได้กับค่า H_{sum} จะได้ผลดังรูปที่ 6.46 และรูปที่ 6.47 ซึ่งจะพบว่าหลังจากสูญเสียเสถียรภาพแล้ว ค่า H_{sum} ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่ม ทำให้ค่า TC เป็น “1” ตลอดเวลา นั้นหมายความว่า จะไม่มีทางที่รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะตีความเหตุการณ์ว่าเป็นการเกิดความผิดปกติได้ ทำให้ไม่เกิดการตัดวงจรขึ้น



รูปที่ 6.46 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



รูปที่ 6.47 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้



รูปที่ 6.48 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

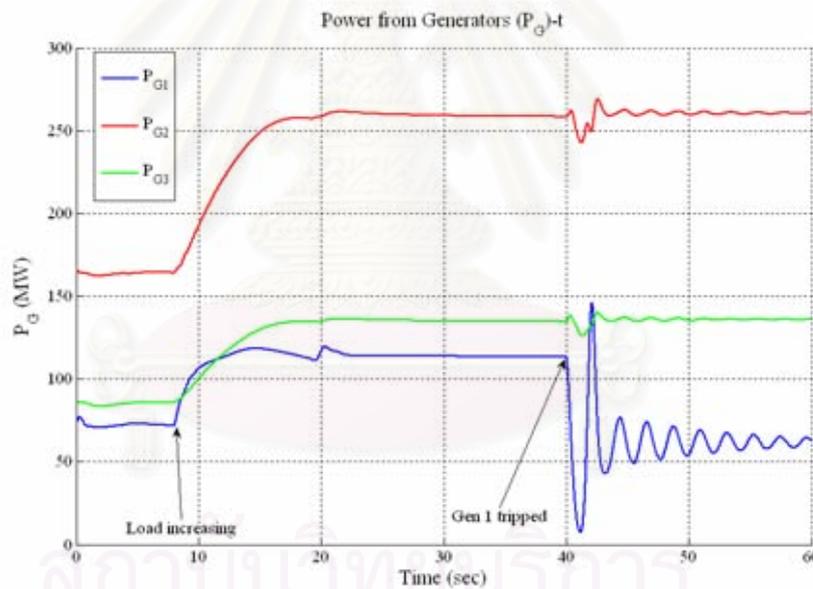
จากรูปที่ 6.48 เมื่อเกิดความผิดพลาดหลังจากที่รีเลย์ตีความว่าเกิดสภาวะไหลเกิน จะเห็นว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะไม่สั่งตัดวงจรแม้ว่าจะเกิดความผิดพลาดขึ้นก็ตาม เนื่องจากการที่ค่า TC เป็น 1 ตลอดเวลา ทำให้สถานะของรีเลย์ขึ้นไปอยู่สถานะที่ 4 ซึ่งไม่ใช่สถานะที่ตีความว่าเป็นความผิดพลาด จึงทำให้สถานะที่รีเลย์ตีความได้กับเหตุการณ์จริงที่เกิดขึ้นไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นในกรณีนี้จึงต้องมีการปรับปรุงแก้ไขแผนภูมิสถานะของรีเลย์ระยะทางต่อไป

6.2.4 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์เมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินแล้วมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ

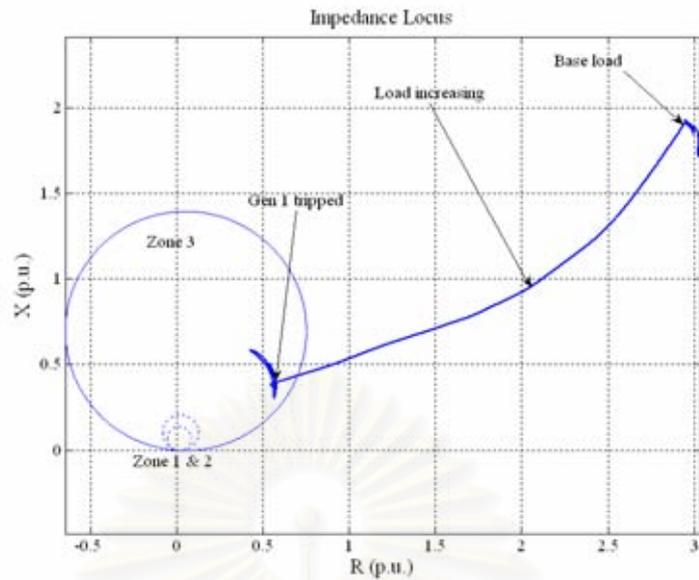
6.2.4.1 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 สูญเสียกำลังการผลิต

- สูญเสียกำลังการผลิต 50 MW

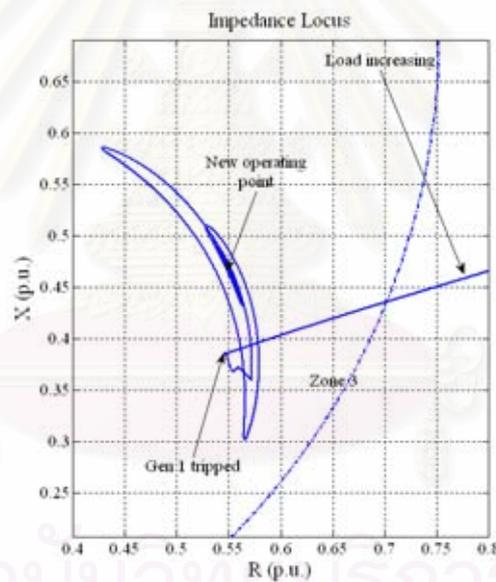
เมื่อทำการเพิ่มโหลดในบัสที่ 5 ขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำการเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นด้วยการทำงานของ Governor System จนมีกำลังการผลิตสอดคล้องกับโหลด เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 1 สูญเสียกำลังการผลิตไป 50 MW จะได้ผลดังรูปที่ 6.49 ซึ่งจะได้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นดังรูปที่ 6.50 จะเห็นว่ากรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งติดตั้งรีเลย์ที่สุดหลุดออกจากระบบไม่ทำให้ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นต่างออกไปมากนัก โดยส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นสภาวะชั่วคราวหลังจากที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจนในที่สุดก็เข้าสู่จุดทำงานใหม่ซึ่งมีขนาดของค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าจุดที่เพิ่มโหลดจนสูงสุดเล็กน้อยดังรูปที่ 6.51



รูปที่ 6.49 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

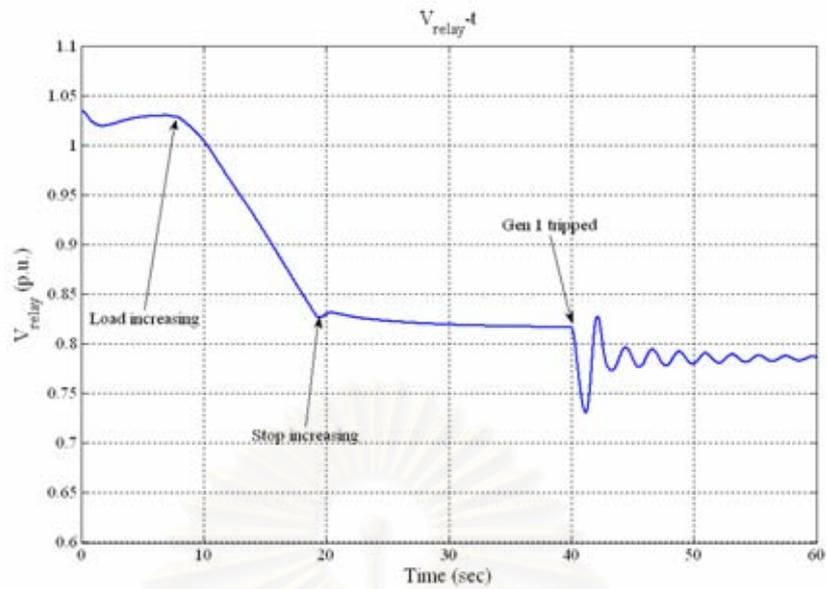


รูปที่ 6.50 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออก

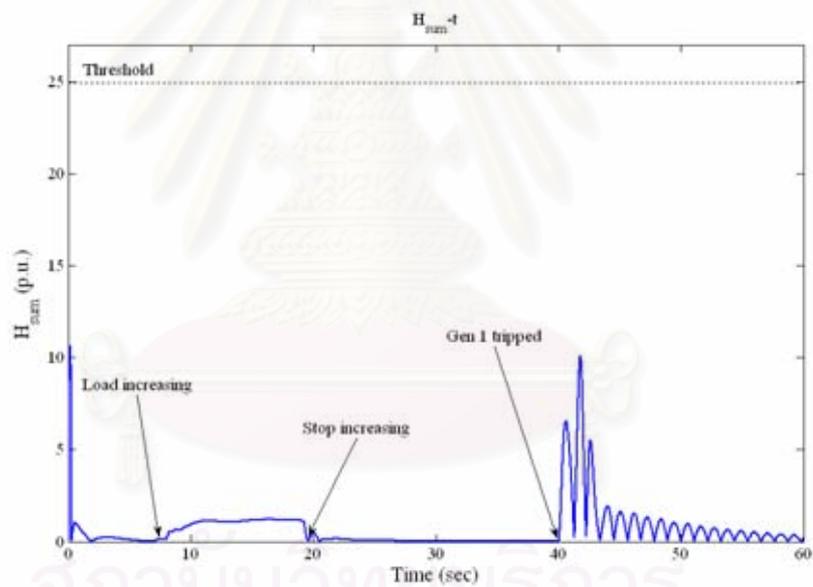


รูปที่ 6.51 ภาพขยายของรูปที่ 6.50

จากรูปที่ 6.52 เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดพบว่า เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1 สูญเสียกำลังการผลิต ผลกระทบที่มีต่อแรงดันที่รีเลย์ตรวจวัดมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนที่เหลือยังมีระบบควบคุมที่คอยรักษาแรงดันที่บัสไว้ได้ และเนื่องจากการที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและไม่รุนแรง ดังนั้นค่า H_{sum} จึงมีค่าน้อยตามไปด้วยดังรูปที่ 6.53

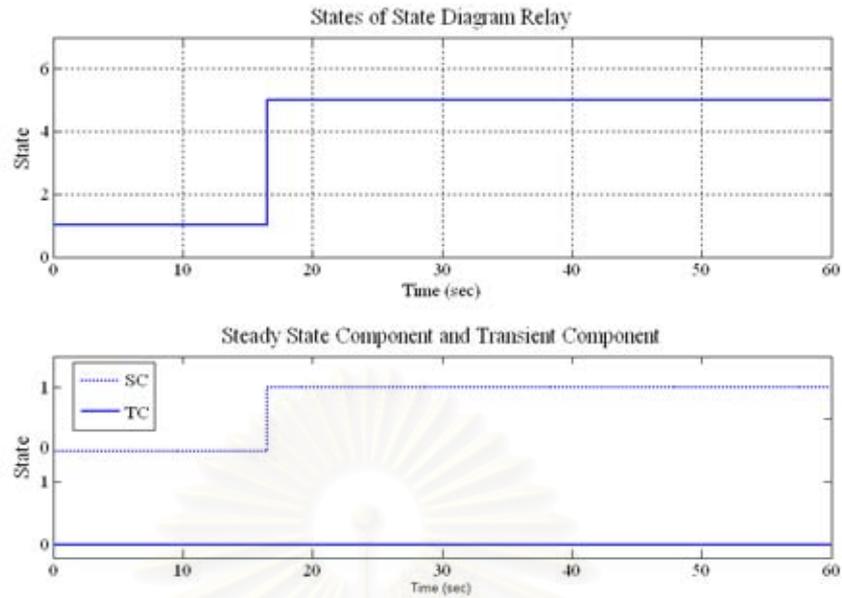


รูปที่ 6.52 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



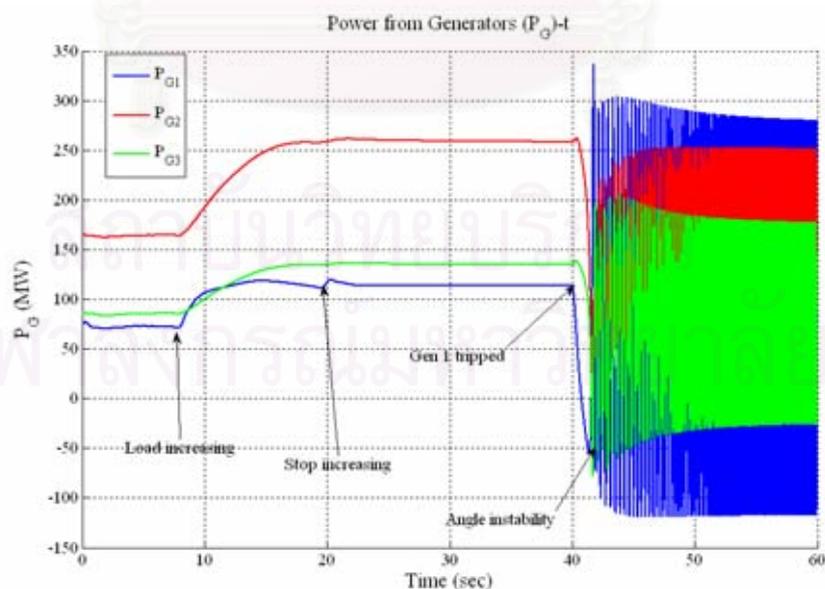
รูปที่ 6.53 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางคำนวณได้

จากรูปที่ 6.53 พบว่าค่า H_{sum} ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าขีดเริ่มมาก การที่ได้ค่า H_{sum} ต่ำ เช่นนี้รีเลย์ระยะทางจะไม่มีทางตีความเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นความผิดปกติที่ตั้งดูได้จากรูปที่ 6.54 จะเห็นว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะตีความเหตุการณ์ทั้งหมดว่าเป็นสภาวะไหลเกิน จึงไม่เกิดการตัดวงจร

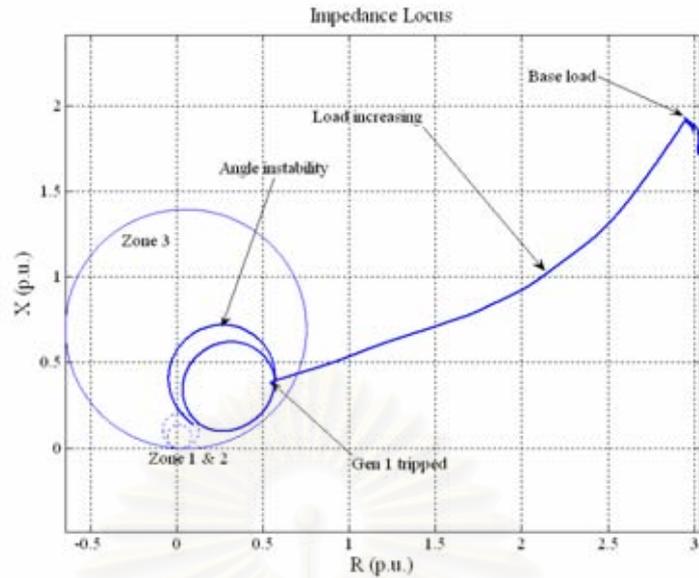


รูปที่ 6.54 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

- สูญเสียกำลังการผลิต 60 MW
กรณีนี้เป็นการทดลองเพื่อให้เห็นถึงผลที่ได้เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูญเสียกำลังการผลิตจนสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์ จากรูปที่ 6.55 จะเห็นว่าเมื่อสูญเสียกำลังการผลิตไป 60 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์จนเกิดการแกว่งอย่างรุนแรงของกำลังไฟฟ้า ซึ่งรีเลย์จะเห็นทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 6.56

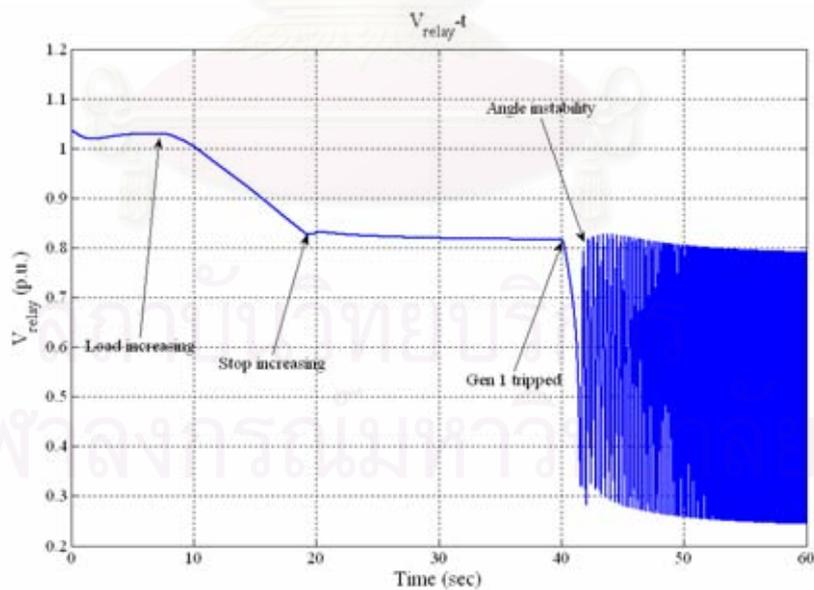


รูปที่ 6.55 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

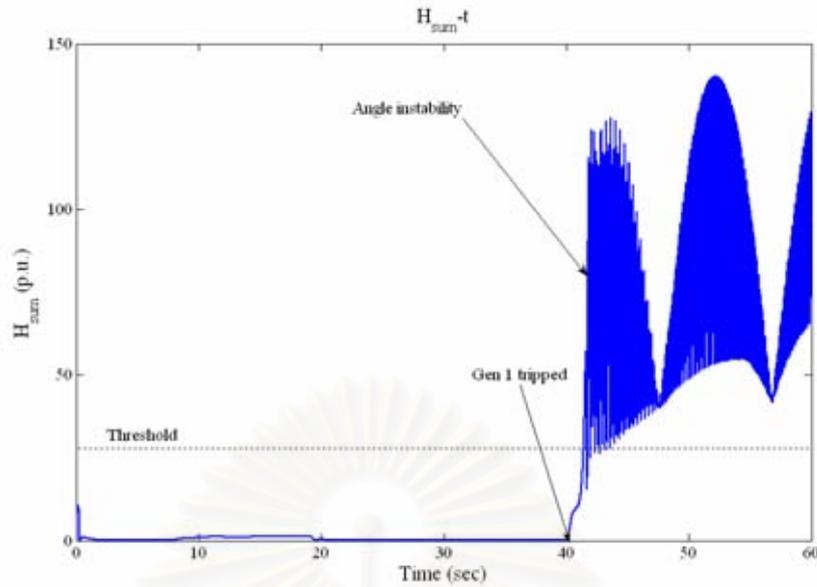


รูปที่ 6.56 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออก

เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์ขึ้นจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์หมุนเป็นวงกลมซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ใน [8] โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่เห็นนี้จะล้าเข้าไปอยู่ในโซน 2 ของการทำงาน แล้วเกิดการตัดวงจรด้วยรีเลย์โซน 2 ในที่สุด นอกจากนี้ผลของการแกว่งอย่างรุนแรงยังสะท้อนอยู่ในค่าแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์ตรวจวัดและค่า H_{sum} ดังรูปที่ 6.57 และรูปที่ 6.58

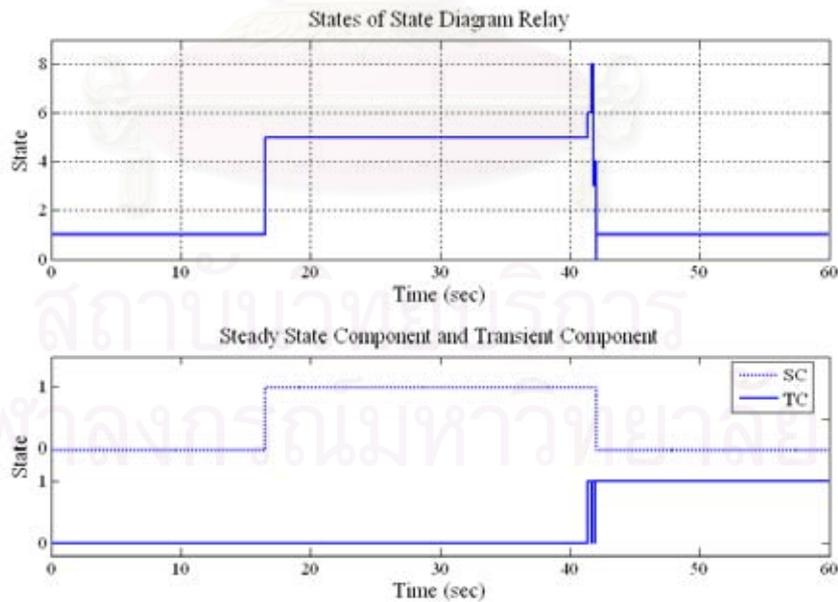


รูปที่ 6.57 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



รูปที่ 6.58 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

จากค่าผลของค่า H_{sum} จะเห็นว่าเมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมขึ้นค่า H_{sum} จะมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่า H_{sum} ในกรณีที่สูญเสียกำลังการผลิตในระดับที่ยังไม่สูญเสียเสถียรภาพ ค่า H_{sum} นี้จะมีผลโดยตรงต่อสถานะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะในรูปที่ 6.59



รูปที่ 6.59 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

เมื่อสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์แล้วจะเห็นว่าค่า TC จะมีค่าเป็น 1 เนื่องจากค่า H_{sum} ที่สูงเกินกว่าค่าขีดเริ่ม อย่างไรก็ตาม ค่าสถานะเหล่านี้ไม่ทำให้สถานะของรีเลย์ที่ได้แตกต่างไปเนื่องจากเกิดการตัดวงจรโดยรีเลย์ระยะทางโซน 2 แล้ว (สถานะเป็น -1)

6.2.4.2 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 สูญเสียกำลังการผลิต

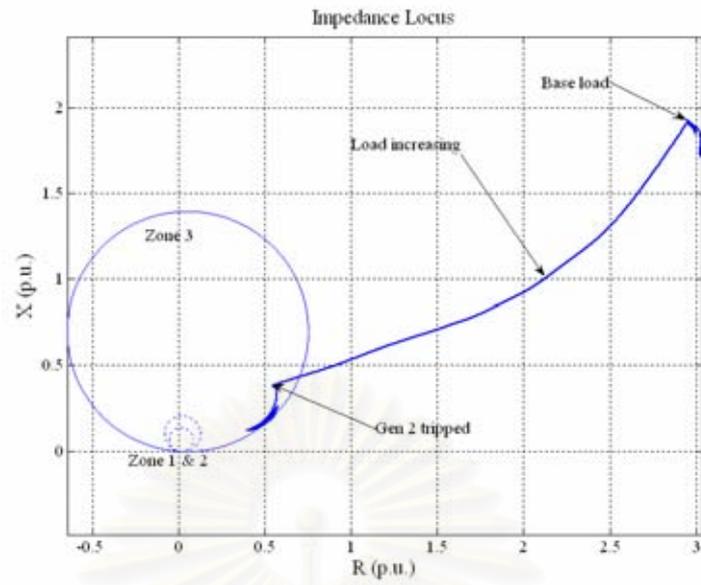
- สูญเสียกำลังการผลิต 90 MW

การสูญเสียกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 จำนวน 90 MW ยังไม่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลืออีกสองตัวสามารถปรับตัวเองด้วย Governor System จนสามารถจ่ายโหลดในขณะนั้นได้ดังรูปที่ 6.60

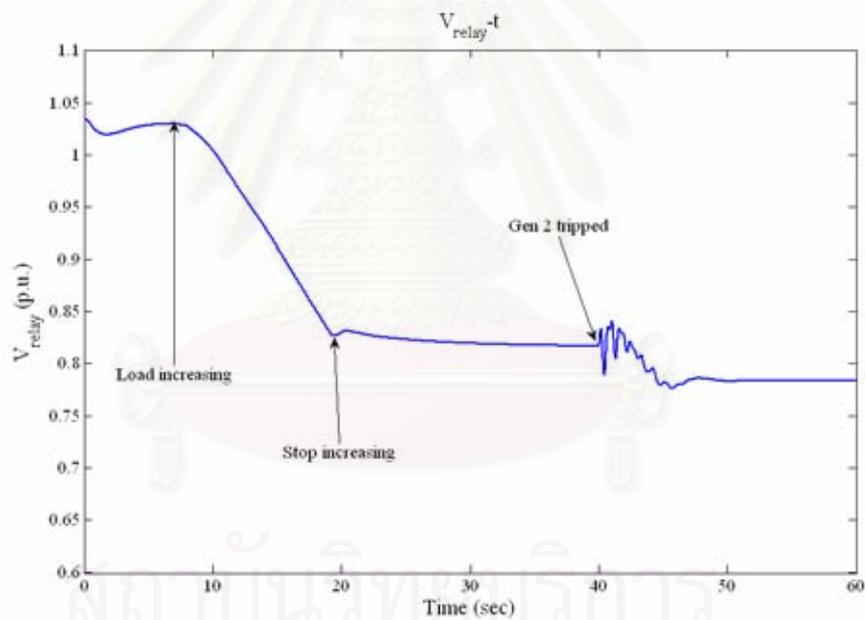


รูปที่ 6.60 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

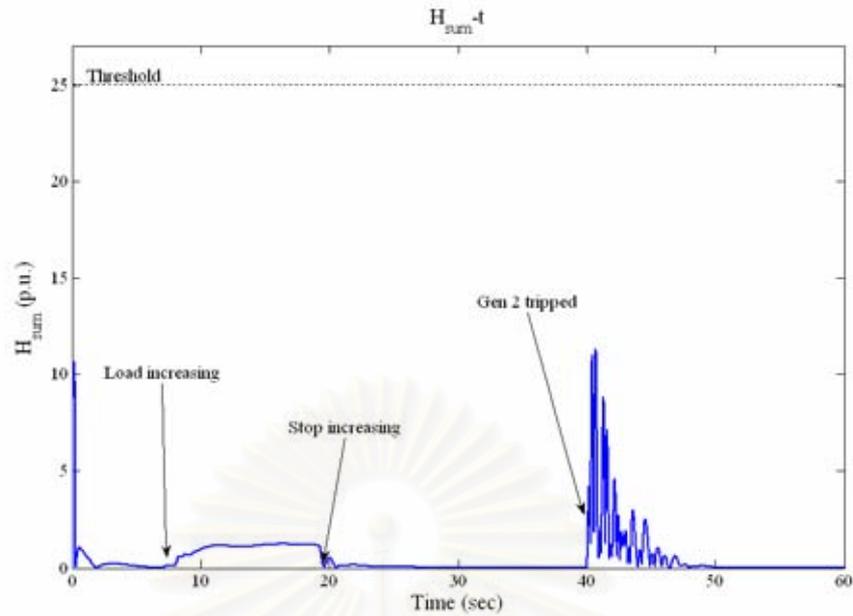
เมื่อพิจารณาทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 6.61 พบว่าเมื่อเพิ่มโหลดในบัสที่ 5 จนรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของการทำงานแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไป ค่าทางเดินของอิมพีแดนซ์ในขณะนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงไม่ได้เกิดขึ้นรุนแรงจนค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเข้าสู่โซน 2 หรือทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะรุนแรงได้ ดังดูได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า H_{sum} ในรูปที่ 6.62 และรูปที่ 6.63 ซึ่งจะเห็นว่าค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย และค่า H_{sum} ที่รีเลย์คำนวณได้ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าขีดเริ่มมาก จนทำให้ค่า TC ที่ได้มีค่าเป็น "0" ตลอด ดังรูปที่ 6.64



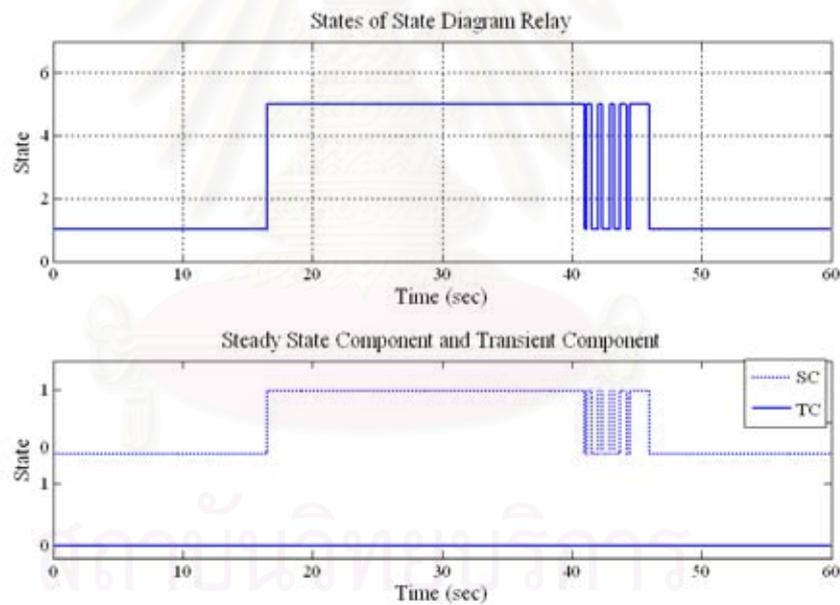
รูปที่ 6.61 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หลุด



รูปที่ 6.62 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



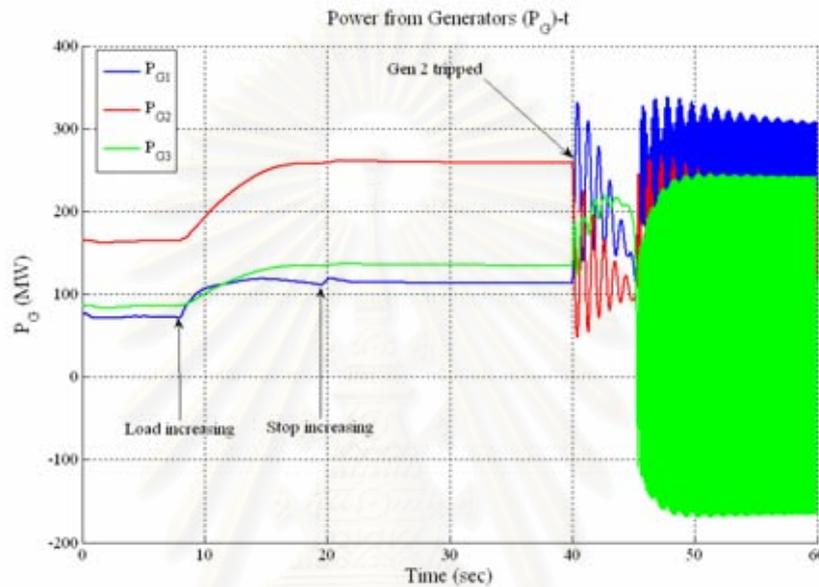
รูปที่ 6.63 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้



รูปที่ 6.64 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

จากสถานะของรีเลย์ที่ได้ จะเห็นว่าไม่มีทางที่รีเลย์จะตัดวงจรผิดพลาดเนื่องจากดีความ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นความผิดพลาด เนื่องจากค่า TC เป็น 0 ตลอดการทดลอง

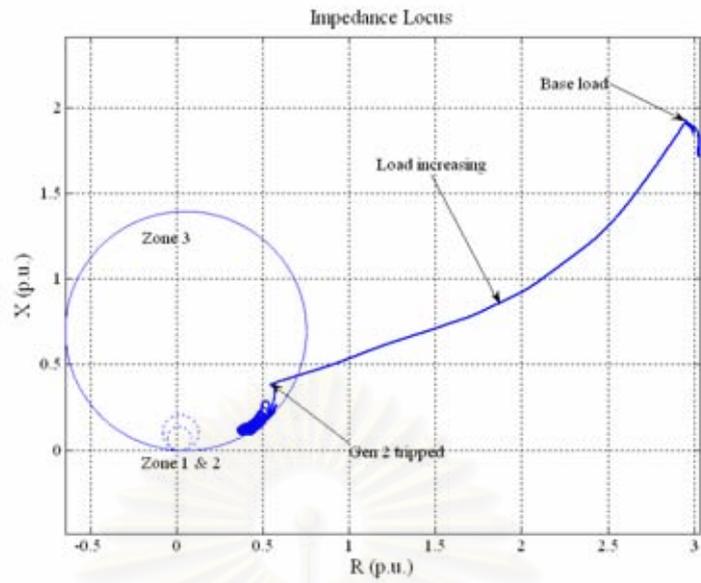
- เมื่อสูญเสียกำลังการผลิต 100 MW
หลังจากเพิ่มโหลดที่บัสที่ 5 จนรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่บัส 4 เห็นค่าอิมพีแดนซ์ในโซน 3 ของการทำงานแล้วจึงทำการตัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 ออกไป 100 MW จะได้ผลดังรูปที่ 6.65 จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสามเครื่องพยายามเพิ่มกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อโหลดที่เหลือแต่ไม่สามารถทำได้จนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด



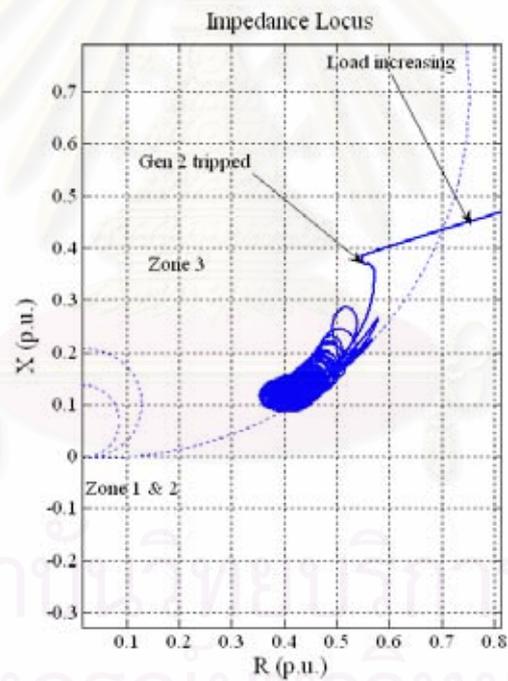
รูปที่ 6.65 กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 6.66 พบว่าเมื่อเพิ่มโหลด รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่บัส 4 จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์น้อยลงเรื่อยๆ จนค่าอิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3 ของการทำงาน และเมื่อเกิดการตัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ออกไปจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพขึ้นดูได้จากภาพขยายของทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 6.67 จะเห็นว่าทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์หมุนเป็นวงกลมซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นกับทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพขึ้น

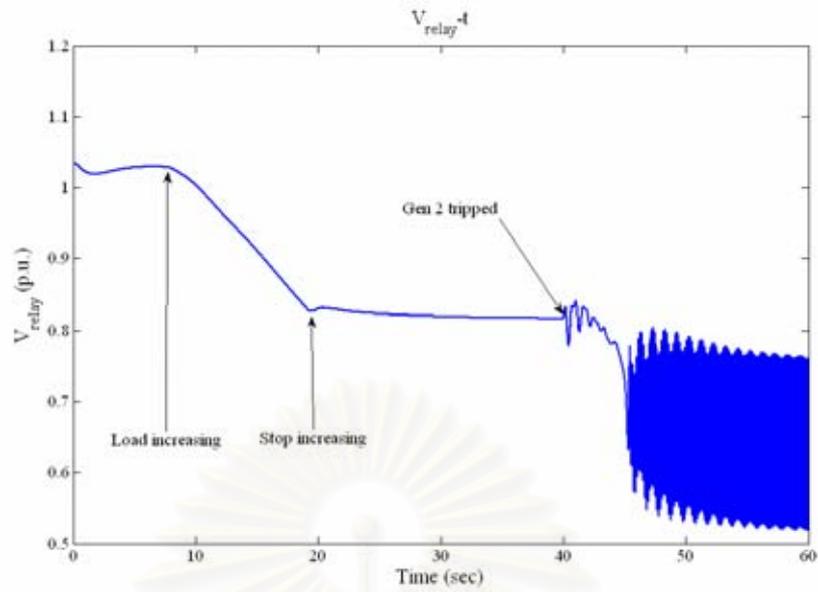
ในส่วน of ค่าขนาดแรงดันและค่า H_{sum} ในรูปที่ 6.68 และรูปที่ 6.69 ขณะเพิ่มโหลดค่าของแรงดันจะลดลงแต่ค่าของ H_{sum} ยังมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เช่นเดียวกับกับขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 เกิดการสูญเสียกำลังการผลิต H_{sum} ที่ได้เปลี่ยนไปจากเดิมแต่ไม่มากนัก จนกระทั่งเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ แรงดันทางไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วและค่า H_{sum} ก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากตามสภาวะชั่วขณะของระบบ



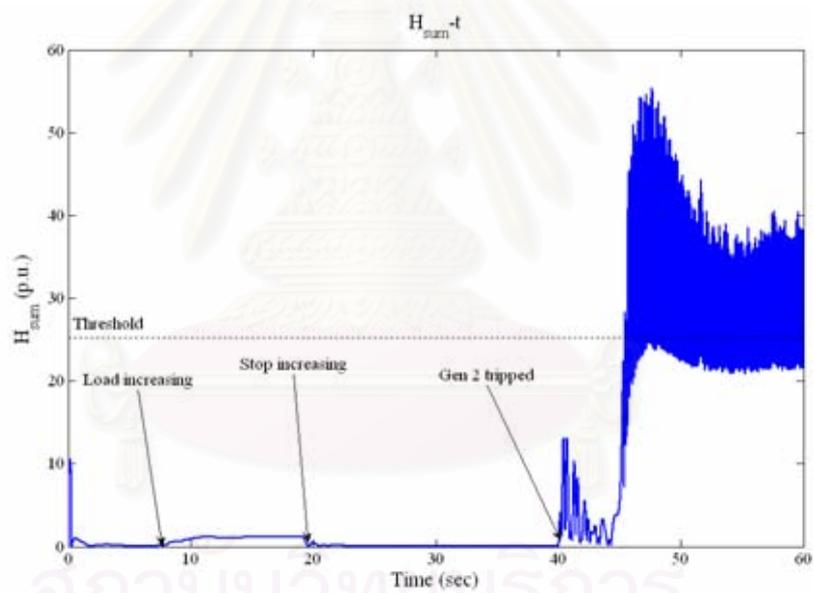
รูปที่ 6.66 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หลุด



รูปที่ 6.67 ภาพขยายของรูปที่ 6.66

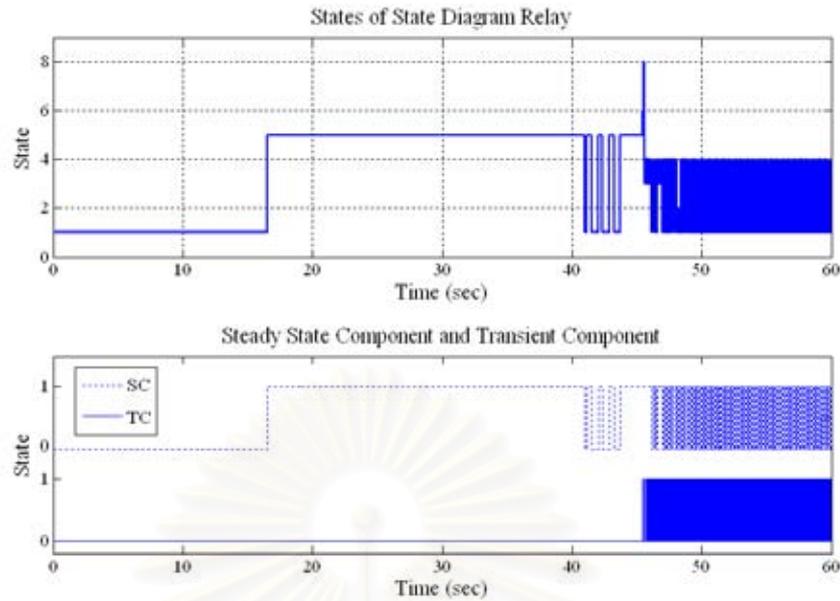


รูปที่ 6.68 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



รูปที่ 6.69 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

จากค่า H_{sum} ที่สูงขึ้นจนเกินค่าขีดเริ่มเมื่อสูญเสียเสถียรภาพ จะทำให้ค่า TC ที่ได้เป็น “1” และค่า TC จะเปลี่ยนแปลงค่าตามค่า H_{sum} ที่ปรับตัวสูงต่ำตลอดเวลาจนได้สถานะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะดังรูปที่ 6.70



รูปที่ 6.70 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

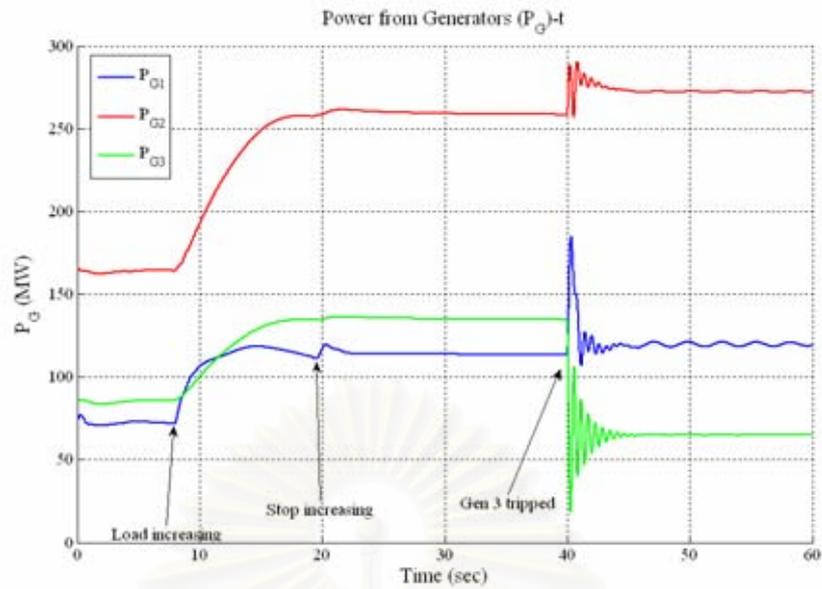
จากสถานะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ จากค่า SC จะเห็นว่ามี การเข้าออก จากโซน 3 หลังจากเกิดการสูญเสียกำลังการผลิตขึ้น ซึ่งการแกว่งเข้าออกโซน 3 นี้ อาจจะทำให้เกิด ปัญหาขึ้นได้ถ้าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นความผิดพลาด เนื่องจากรีเลย์จะไม่ตัดวงจร ซึ่งเหตุการณ์นี้ อาจจะเป็นการเกิดความผิดพลาดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาดสูง

6.2.4.3 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 สูญเสียกำลังการผลิต

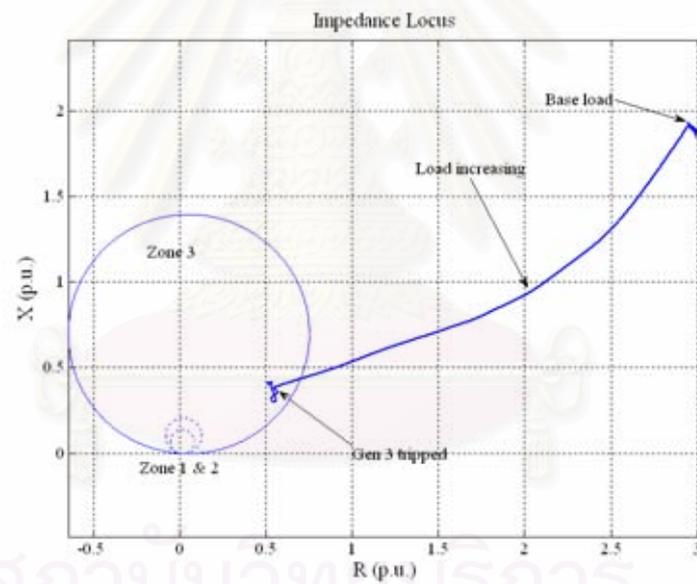
- กรณีสูญเสียกำลังการผลิต 70 MW

เมื่อเพิ่มโหลดให้กับบัสที่ 5 จนรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่บัส 4 เห็นค่า อิมพีแดนซ์ตกอยู่ในโซน 3 แล้วทำการตัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 ออกไป 70 MW พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสามเครื่องสามารถปรับตัวเองจนสามารถจ่ายโหลดทดแทนกำลัง การผลิตส่วนที่หายไปได้ดังรูปที่ 6.71

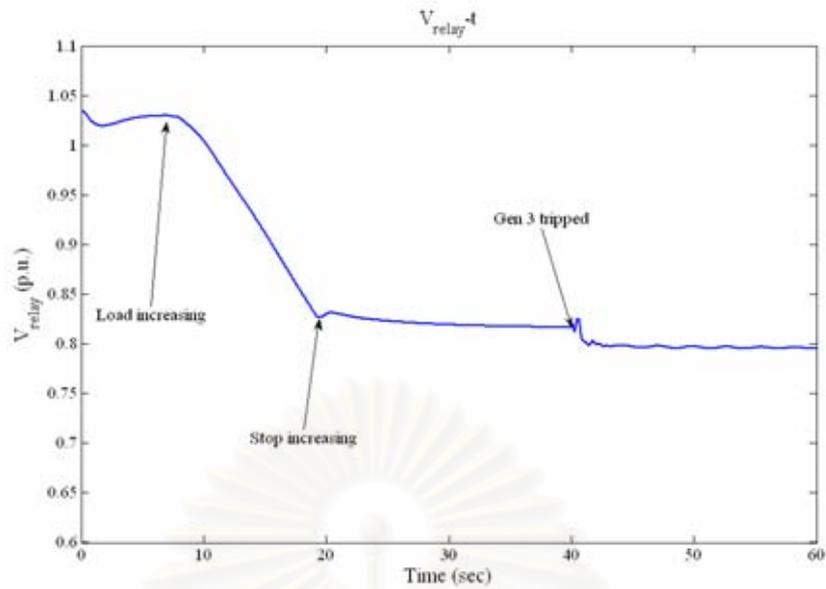
จากรูปจะพบว่าสภาวะชั่วขณะของระบบมีค่าไม่รุนแรงนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาทางเดิน ของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 6.72 จึงพบว่าไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งที่เกิดจากการเพิ่มโหลด เท่าใดนัก สอดคล้องกับค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์วัดได้และค่า H_{sum} ที่มีค่าต่ำมากในรูปที่ 6.73 และรูปที่ 6.74 ดังนั้นในกรณีนี้จะพบว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะตีความว่าเป็น การเกิดสภาวะโหลดเกินตลอดการทดสอบดังรูปที่ 6.75



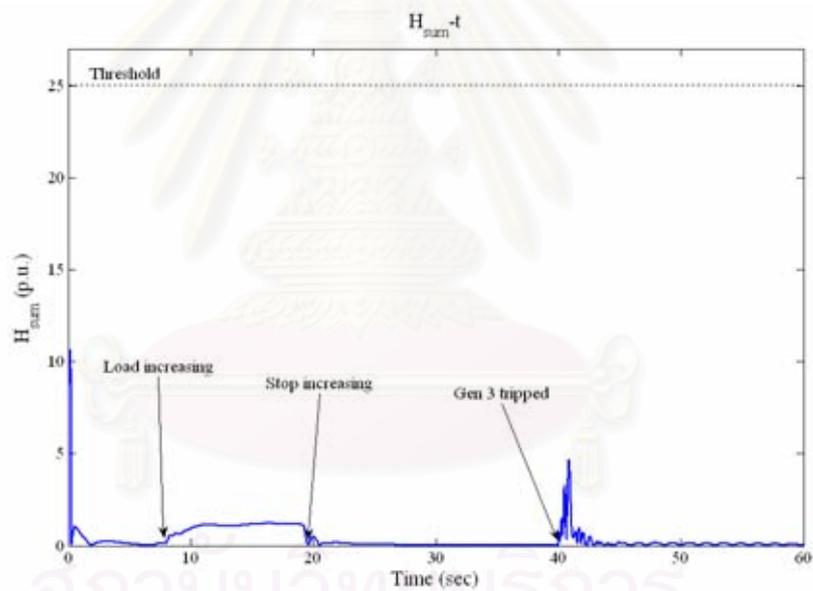
รูปที่ 6.71 ภาพกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.72 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 หลุด

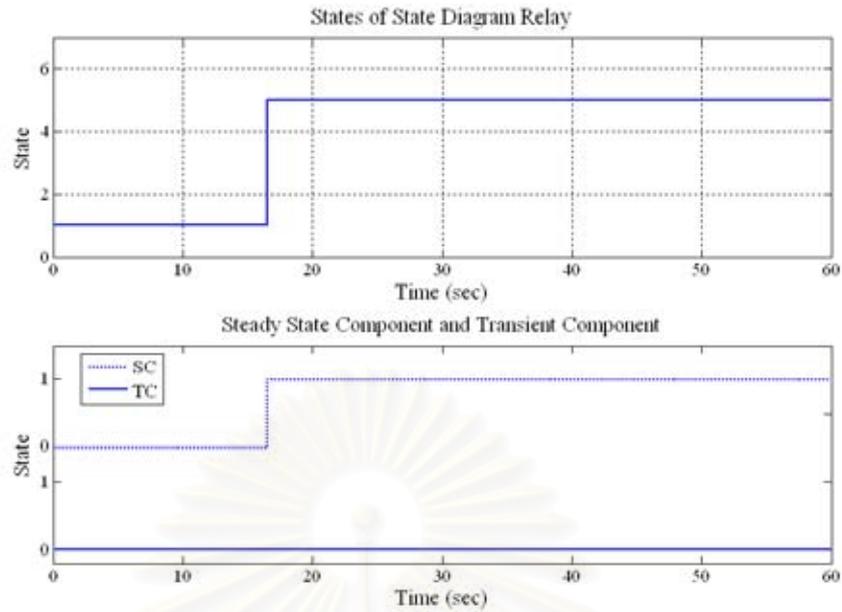


รูปที่ 6.73 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



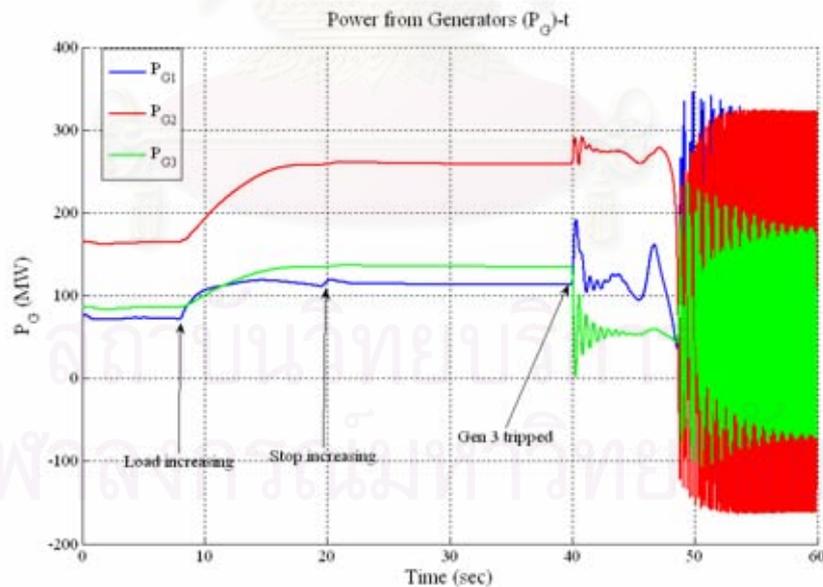
รูปที่ 6.74 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้

จะเห็นว่าค่า H_{sum} ที่ได้มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการตีความค่า TC ของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ จะได้ค่า TC เป็น "0" ตลอดและได้ค่าสถานะเป็น 5 ซึ่งแสดงถึงสถานะโหลดเกินโดยตลอดเช่นกัน



รูปที่ 6.75 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

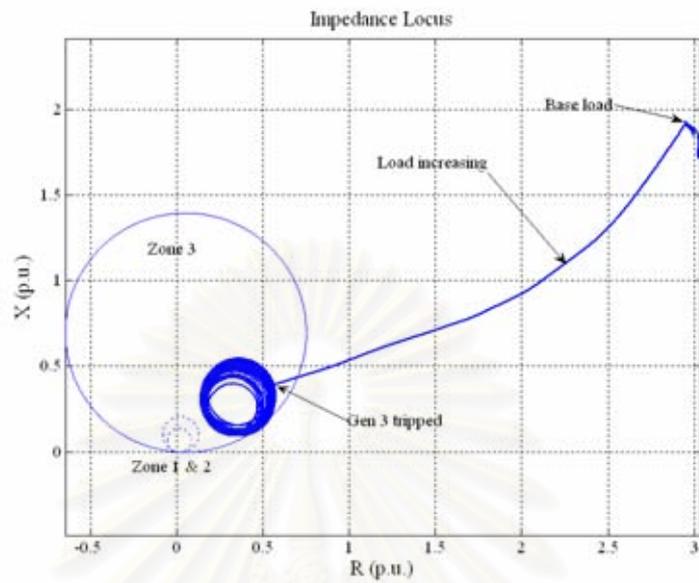
- กรณีสูญเสียกำลังการผลิต 80 MW ที่การสูญเสียกำลังการผลิต 80 MW นี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะพยายามปรับตัวเพื่อให้สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ แต่ไม่สามารถทำได้และเกิดการสูญเสียเสถียรภาพดังรูปที่ 6.76



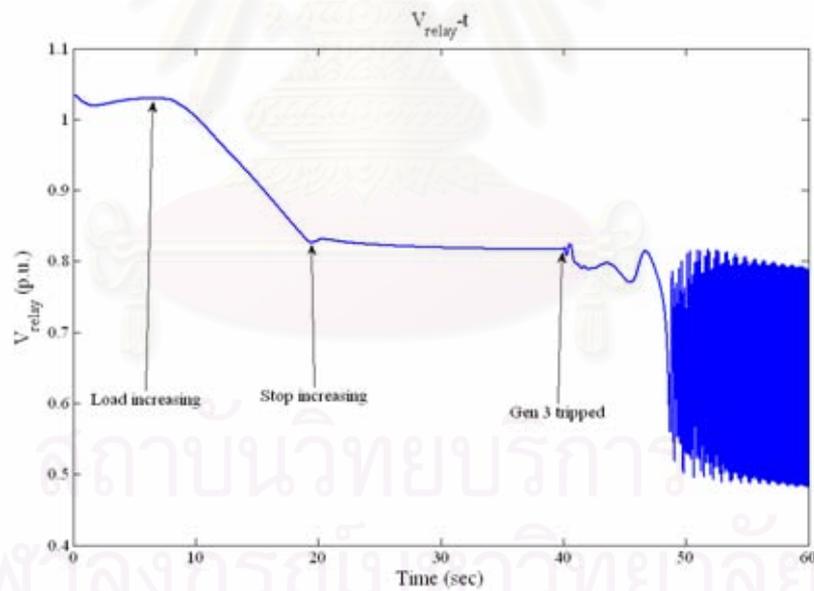
รูปที่ 6.76 ภาพกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์จะหมุนเป็นวงกลมดังรูปที่ 6.77 นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รีเลย์เห็นจะลดค่าลงอย่างรวดเร็วแล้วเกิดการแกว่ง ผลของ

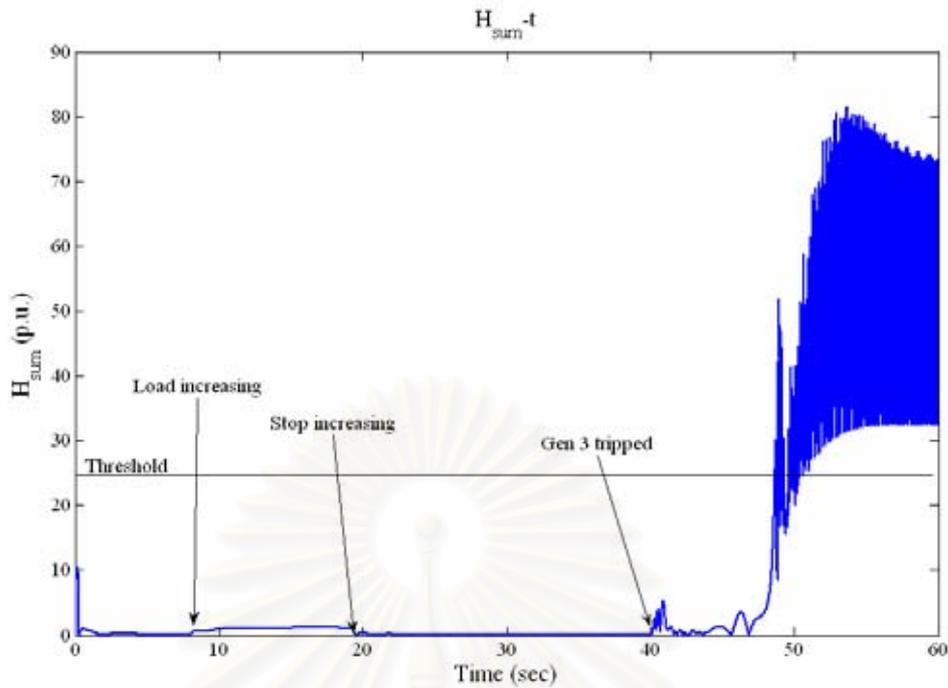
แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงนี้ทำให้ค่า H_{sum} มีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 6.78 และรูปที่ 6.79



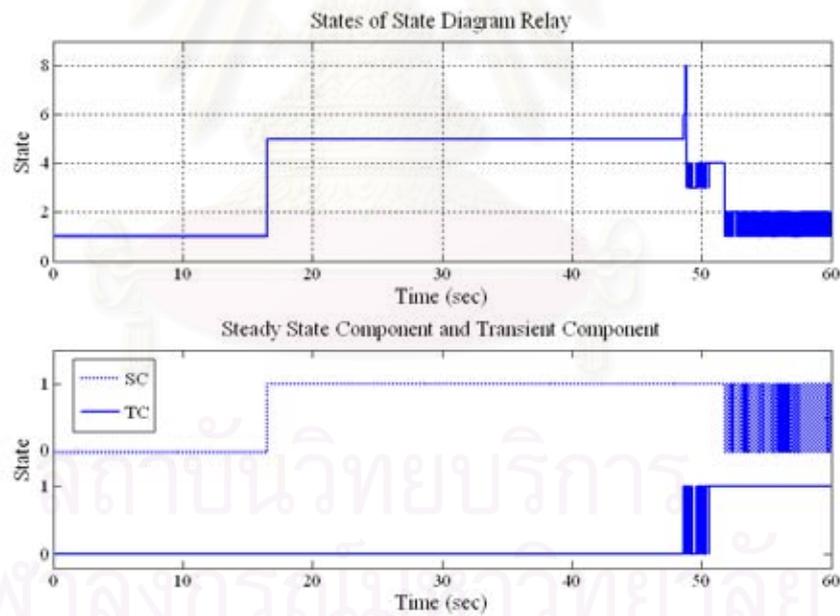
รูปที่ 6.77 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 หลุด



รูปที่ 6.78 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด



รูปที่ 6.79 ค่า H_{sum} ที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะคำนวณได้



รูปที่ 6.80 สถานะของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะ

เมื่อพิจารณาค่าสถานะของรีเลย์พบว่าในขณะที่เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตนั้นรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะยังคงตีความว่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นภาวะไหลเกิน แต่เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพขึ้น รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะตีความผิดว่าเกิดความผิดพลาดขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ 48 – 51 วินาที ค่า H_{sum} ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงสูงต่ำตลอดเวลา ค่า

TC จึงเปลี่ยนค่าอยู่ระหว่าง “0” กับ “1” ตามไปด้วย ทำให้รีเลย์ตัดสินสถานะอยู่ระหว่าง 3 กับ 4 และไม่เกิดการตัดวงจรขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาที่ 53 วินาที ทางเดินอิมพีแดนซ์ที่หมุนเป็นวงกลมและขยายขนาดรัศมีการหมุนจนออกนอกโซน 3 ทำให้ค่า SC มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ไม่เกิดการตัดวงจรอีกเช่นกัน

6.2.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากระบบทดสอบที่ 2

จากผลการทดลองเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นแสดงให้เห็นว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะยังคงทำหน้าที่ตัดวงจรได้ตามปกติเมื่อเกิดความผิดปกติในโซน 3 เช่นเดียวกันกับรีเลย์ระยะทางโซน 3 โดยทั่วไป

เมื่อทดสอบการเกิดสภาวะโหลดเกินด้วยการใช้แบบจำลองของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่พบว่าไม่เกิดการตัดวงจรขึ้นแสดงว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะสามารถป้องกันการทำงานกรณีเกิดสภาวะโหลดเกินได้ แต่เมื่อใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าจริงคงที่พบว่ามีปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มโหลดมากจนถึงค่าหนึ่ง ดังนั้นในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ที่จำเป็นต้องเพิ่มโหลดในปริมาณมากจึงไม่ควรใช้แบบจำลองแบบกำลังจริงคงที่เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันจนไม่สามารถหาข้อสรุปจากการทดลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางได้

ในส่วนของ การทดสอบการให้ลำดับความสำคัญในการกำจัดความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโซน 3 ขณะที่รีเลย์ตรวจพบสภาวะโหลดเกิน พบว่าในกรณีนี้รีเลย์ไม่ทำการตัดความผิดปกติออกไปเนื่องจากการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันทำให้เกิดสภาวะชั่วขณะขึ้นเป็นเวลานาน รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจึงไม่สามารถตีความเหตุการณ์ว่าเป็นความผิดปกติได้และไม่ทำการตัดวงจร กรณีนี้จึงเป็นปัญหาของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะที่ต้องทำการแก้ไขต่อไป

สำหรับการเกิดเหตุการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบและการสูญเสียกำลังการผลิตจากผลการทดลองพบว่าการสูญเสียกำลังการผลิตส่งผลโดยตรงต่อสภาวะชั่วขณะของระบบน้อยมาก จนรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะไม่สามารถตีความว่าเป็นความผิดปกติได้ ในทางกลับกัน การสูญเสียกำลังการผลิตในปริมาณมากจนกระทั่งระบบเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์กลับกลายเป็นปัญหาให้เกิดการตัดวงจรโดยโซน 2 เนื่องจากค่าทางเดินอิมพีแดนซ์ที่หมุนเป็นวงกลมจนเข้าโซน 2 อย่างไรก็ตามด้วยขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่เกิดการตัดวงจรโดยรีเลย์โซน 3 เนื่องจากสภาวะชั่วขณะกินระยะเวลายาวนาน ทำให้รีเลย์ไม่สามารถตีความในสถานะที่เกิดความผิดปกติได้

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

7.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้สรุปได้ว่า รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะที่พิจารณาองค์ประกอบ TC, SC ร่วมกับแผนภูมิสถานะ เมื่อทดสอบกับระบบทดสอบที่ 1 และระบบ WSCC ที่รวมผลของพลวัตเชิงแรงดันที่สำคัญร่วมด้วย ผลที่ได้เมื่อไม่มีปัญหาด้านเสถียรภาพเกิดขึ้นกับระบบ คือ รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะสามารถตัดสินใจตัดวงจรได้อย่างถูกต้อง ได้แก่

- ในกรณีที่เกิดความผิดปกติพร้อมในโซน 3 รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะทำการตัดวงจร
- ในกรณีที่เกิดสภาวะไหลเกิน รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะไม่ทำการตัดวงจร และยังเปิดโอกาสให้มีการทำการปลดไหลค้อออกได้
- ในกรณีที่เกิดสภาวะไหลเกินแล้วตามด้วยการเกิดความผิดปกติ รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะจะให้ลำดับความสำคัญแก่การตัดวงจรสูงกว่า
- ในกรณีที่เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตในระดับที่ระบบยังไม่เสถียรภาพ พบว่ารีเลย์ไม่ทำการตัดวงจรในกรณีศึกษา

อย่างไรก็ตามเมื่อระบบมีปัญหาด้านเสถียรภาพเกิดขึ้น เช่นในกรณีที่เกิดสภาวะไหลเกินตามด้วยความผิดปกติแล้วระบบสูญเสียเสถียรภาพ รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะอาจจะไม่ทำการตัดวงจรอย่างที่ควรจะเป็น จากผลการทดลองนี้ทำให้ผลว่ารีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะอาจทำงานผิดพลาดได้เมื่อมีการสูญเสียเสถียรภาพเกิดขึ้นในวงจร ซึ่งเป็นปัญหาที่จะต้องทำการปรับปรุงการทำงานต่อไป

เมื่อพิจารณาถึงกรณีการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างในปี ค.ศ. 2003 ที่สหรัฐอเมริกา ถ้ารีเลย์ระยะทางที่ใช้ในขณะนั้นเป็นรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะ โอกาสที่จะเกิดการตัดวงจรอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เนื่องจากสภาวะไหลเกินจะลดลงส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างลดลงไปอีก จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการนำรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะไปใช้ประโยชน์จริง จะสามารถลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมหาศาล

สำหรับการสร้างระบบทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 การใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแรงดันภายในคงที่เพียงพอต่อการทดสอบ

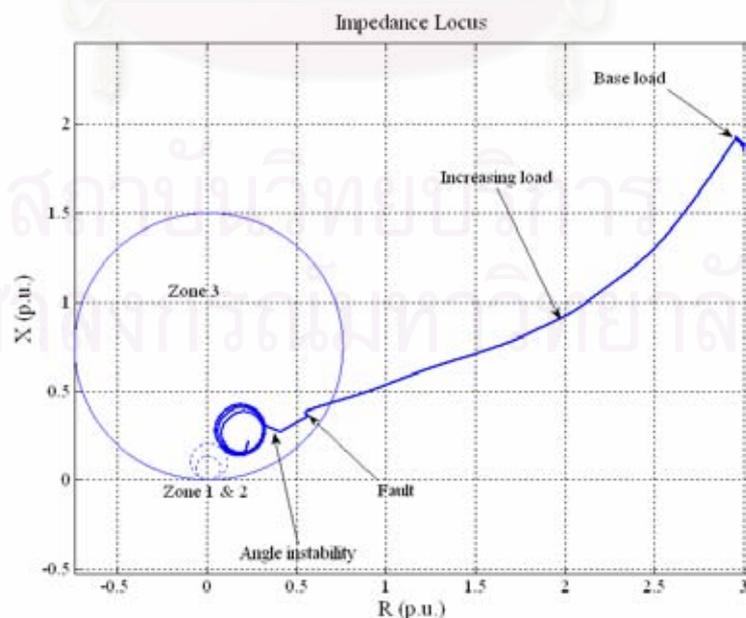
การเกิดความผิดพลาดทั่วไป หรือการเกิดสภาวะโหลดเกินที่ไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าต้องทำการทดสอบ ในสภาวะโหลดเกินอย่างรุนแรงร่วมกับเหตุการณ์อื่นๆ ควรจะใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบสองแกนที่มีผลของระบบควบคุมต่างๆ เพื่อให้สามารถทนต่อเหตุการณ์เหล่านั้นได้โดยที่ไม่ เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ นอกจากนี้การที่ใช้แบบจำลองที่ละเอียดมากขึ้นยังทำให้ได้ผลที่ ใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริงอีกด้วย

ในส่วนของแบบจำลองของโหลดที่ใช้ในการทดลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ในสภาวะโหลดเกิน พบว่าควรใช้แบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์คงที่ เนื่องจากแบบจำลองแบบ กำลังไฟฟ้าจริงคงที่มีโอกาสเกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันขึ้น จนทำให้ไม่สามารถ ทดสอบการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้

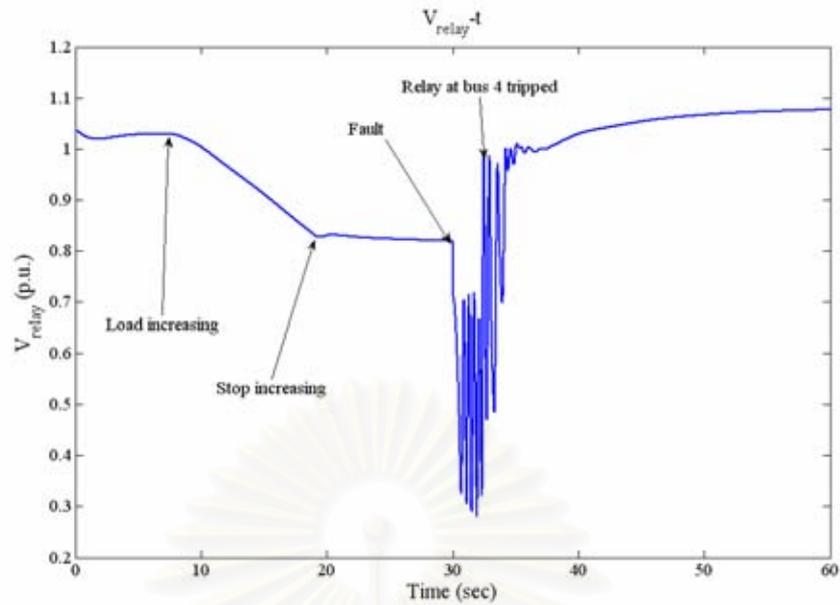
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการทดลองของระบบ WSCC ในกรณีที่เพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิด พรงขึ้น พบว่าปัญหาที่ทำให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 แบบแผนภูมิสถานะไม่ทำการตัดวงจรเมื่อเกิด ความผิดพลาดขึ้น เกิดจากสถานะของรีเลย์เปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างสถานะที่ 3 กับ 4 ซึ่งอันที่จริง แล้วเหตุการณ์นี้ควรได้รับการตัดวงจรโดยรีเลย์ระยะทางโซน 3 เพื่อกำจัดความผิดพลาดออกไป

ผลการทดสอบต่อไปนี้เป็นผลเมื่อให้รีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะตัดสายส่งที่เชื่อม ระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ทั้งสองเส้นออกไป หลังจากเกิดความผิดพลาดไปแล้วเป็นเวลา 2 วินาที เพื่อ แสดงให้เห็นว่าถ้าเกิดการตัดวงจรอย่างถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 3 แล้ว ปัญหาการสูญเสีย เสถียรภาพที่เกิดขึ้นจะหายไป

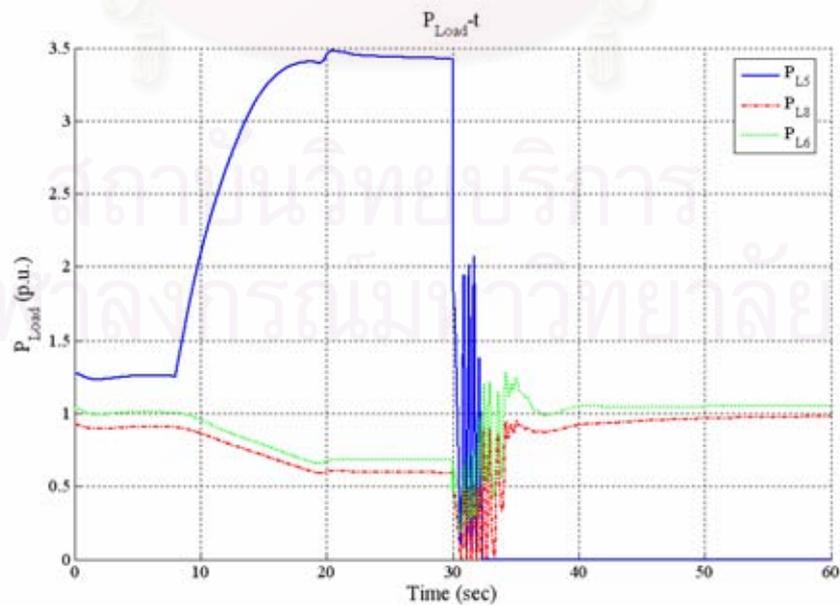


รูปที่ 7.1 ทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเพิ่มโหลดจนเข้าสู่โซน 3 แล้วเกิดความผิดพลาด



รูปที่ 7.2 แรงดันที่บัสที่รีเลย์ระยะทางตรวจวัด

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์จะมีช่วงเวลาที่หมุนเป็นวงกลมน้อยลง เนื่องจากรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะได้ตัดวงจรออกไปแล้ว เมื่อพิจารณารูปที่ 7.2 พบว่าเมื่อทำการตัดวงจรระบบจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งเนื่องจากในการตัดวงจรนี้นอกจากจะทำให้ความผิดพลาดหายไปแล้วยังตัดโหลดที่บัสที่ 5 ออกไปด้วยดังจะเห็นได้จากกราฟกำลังไฟฟ้าของโหลดในรูปที่ 7.3 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าของโหลด ณ บัสที่ 5 กลายเป็น 0 เนื่องจากถูกตัดออกจากวงจรแล้ว



รูปที่ 7.3 กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส 5 บัส 6 และบัส 8

จากผลที่ได้ในเบื้องต้นจะเห็นว่าหากสามารถปรับปรุงรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะให้สามารถรองรับเหตุการณ์นี้ได้ก็จะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบได้อย่างมาก แนวทางที่เป็นไปได้ในการปรับปรุงสมรรถนะของรีเลย์ระยะทางแบบแผนภูมิสถานะได้แก่ การปรับปรุงในส่วนของแผนภูมิสถานะและการเพิ่มเงื่อนไขตัดสินใจอื่นนอกจาก TC และ SC อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการตัดสินใจตัวจริงนั้นต้องคำนึงว่าจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดในกรณีอื่นๆ อีกหรือไม่ การปรับปรุงที่ดีควรที่จะเพิ่มความมั่นคงของระบบในภาพรวมมิใช่เพียงแต่กรณีใดกรณีหนึ่ง นอกจากนี้อาจจะต้องคำนึงถึงการทำงานของการทำงานของการป้องกันอื่นๆ ในช่วงที่เกิดการสูญเสียเสถียรภาพด้วย เพราะในบางกรณีอาจจะไม่จำเป็นต้องปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางเนื่องจากมีการป้องกันชนิดอื่นๆ ครอบคลุมการทำงานแล้ว

ดังนั้น สำหรับงานวิจัยที่จะมีขึ้นในอนาคต ปัญหาการตัดสินใจตัวจริงเมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพจึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจ เพื่อให้การทำงานของรีเลย์ระยะทางเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการป้องกันระบบส่งไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่มีการขยายตัวและมีความซับซ้อนสูงมากในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Kundur, P. Power system stability and control. United States of America: McGraw-Hill, 1994.
- [2] Seong-II, L., Han-Chuan, Y., Seong-Jeong, R., Seung-Jae, L., and Myeon-Song, C. Adaptive blinder for distance relay based on sensitivity factors. Proceedings of PowerCon 2006, International Conference on Power System Technology, 1-5. : (October 2006).
- [3] Horowitz, S. H., and Phadke, A. G. Third zone revisited. IEEE Transaction on Power Delivery 20 (January 2006): 23-29.
- [4] Jonsson, M., and Daalder, J. E. An adaptive scheme to prevent undesirable distance protection operation during voltage instability. IEEE Transaction on Power Delivery 18 (October 2003): 1174-1180.
- [5] Chul-Hwan, K., Jeong-Yong H., and Aggarwal, R. K. An enhanced zone 3 algorithm of a distance relay using transient components and state diagram. IEEE Transaction on Power Delivery 20 (January 2005): 39-46.
- [6] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การป้องกันระบบไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ซีซีพี พรินติ้ง, 2548.
- [7] Anderson, P. M. Power system protection. United States of America: IEEE PRESS and McGraw-Hill, 1999.
- [8] Blackburn, J. L. Protective relaying principles and applications. 2nd ed.: Marcel Dekker, 1998.
- [9] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [Online]. Available from: <http://www.ferc.gov> [April 2004]
- [10] Saadat, H. Power system analysis. 2nd ed.: McGraw-Hill, 2004.
- [11] Sauer, P. W., and Pai, M. A. Power system dynamics and stability. United States of America: Prentice Hall, 1998.
- [12] IEEE Std. 421.5TM-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies [Online]. Available from: <http://www.ieee.org> [January 2008]

- [13] Stevenson, W. D. Elements of power system analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1994.
- [14] Carson W. Taylor. Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

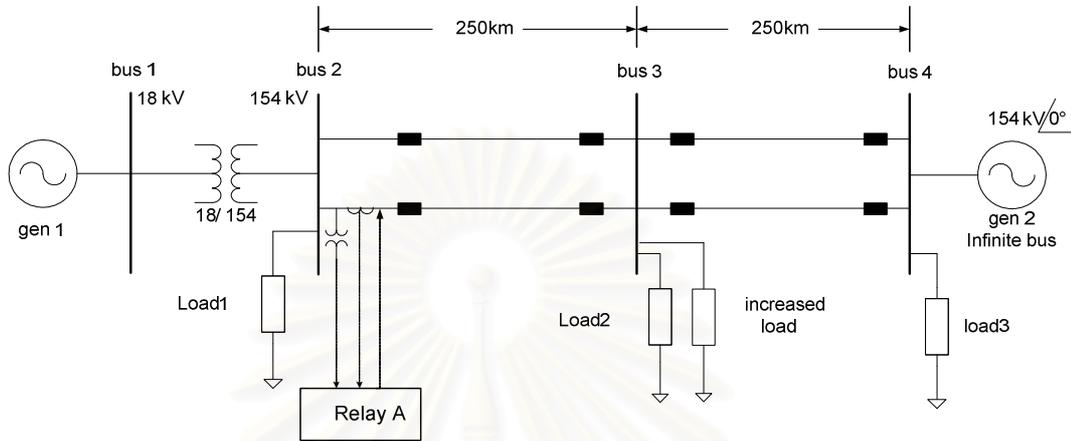
ข้อมูลของระบบทดสอบ

ก.1 คำนิยามสำหรับข้อมูลต่างๆ

Sbase	คือ	ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าของระบบ (MVA)
Bus	คือ	หมายเลขของบัส
Type	คือ	ชนิดของบัส 1 = Load Bus, 2 = PV Bus, 3 = Slack Bus
Pd	คือ	ความต้องการกำลังจริง (p.u.)
Qd	คือ	ความต้องการกำลังรีแอกทีฟ (p.u.)
Gs	คือ	ค่าความต้องการกำลังจริงของค่า Shunt Conductance (MW)
Bs	คือ	ค่ากำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัสของ Shunt Susceptance (MVar)
Vm	คือ	ค่าเริ่มต้นในการคำนวณของขนาดของแรงดันบัส (องศา)
Va	คือ	ค่าเริ่มต้นในการคำนวณของมุมของแรงดันบัส (องศา)
baseKV	คือ	ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (kV)
Pg	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากบัส (MW)
Qg	คือ	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากบัส (MVar)
Vg	คือ	ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
MBase	คือ	ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVA)
Sta	คือ	สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 = ทำงาน, 0 = ไม่ทำงาน
fbus	คือ	ตำแหน่งที่สายส่งต่อเชื่อม (จากบัสที่)
tbus	คือ	ตำแหน่งที่สายส่งต่อเชื่อม (ถึงบัสที่)
R	คือ	ความต้านทานของสายส่ง (p.u.)
X	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง (p.u.)
B	คือ	ค่า Susceptance ของ Line Charging ของสายส่ง (p.u.)
status	คือ	สถานะของสายส่ง 1 = เชื่อมต่อ, 0 = ไม่เชื่อมต่อ

ก.2 ระบบทดสอบที่ 1

ระบบทดสอบที่ 1 มีโครงสร้างดังรูปที่ ก.1 มีข้อมูลของโหลดและสายส่งดังตารางที่ ก.1 – ก.4 กำหนดให้ค่า $S_{base} = 100 \text{ MVA}$



รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 1

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลสายส่งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1

	R	X	C
ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง	0.1342 Ω /km	0.4765 Ω /km	0.0090 μF /km
โหลดของบัส 1	237 Ω	147 Ω	-
โหลดของบัส 2	237 Ω	147 Ω	-
โหลดของบัส 3	237 Ω	147 Ω	-
ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	0 Ω	28.41 Ω	-

ตารางที่ ก. 2 ข้อมูลบัสในระบบทดสอบที่ 1

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Vm	Va	baseKV
1	2	0	0	0	0	1	0	18
2	1	0	0	72.233	-44.785	1	0	154
3	1	0	0	72.233	-44.785	1	0	154
4	3	0	0	72.233	-44.785	1	0	154

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 1

Bus	Pg	Qg	Vg	MBase	Sta
1	130	0	1.025	100	1

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบที่ 1

fbus	tbus	R	X	B	status
1	2	0	0.0576	0	1
2	3	0.1415	0.5023	0.2012	1
2	3	0.1415	0.5023	0.2012	1
3	4	0.1415	0.5023	0.2012	1
3	4	0.1415	0.5023	0.2012	1

ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและส่วนควบคุมมีดังนี้

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 1

Parameters	Unit	Gen 1
H	secs	6.4
R_s	p.u.	0
X_d	p.u.	0.8958
X'_d	p.u.	0.1198
X_q	p.u.	0.8645
X'_q	p.u.	0.1969
τ'_{d0}	secs	6.0
τ'_{q0}	secs	0.535
D	p.u.	0.0068

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลของส่วนสร้างสนาม (IEEE type A) ในระบบทดสอบที่ 1

Parameters	Unit	Exc 1
K_A	p.u.	20
τ_A	secs	0.2
K_E	p.u.	1.0
τ_E	secs	0.314
K_F	p.u.	0.063
τ_F	secs	0.35
A	p.u.	0.0039
B	p.u.	1.555
E_{fd}^{\max}	p.u.	5
E_{fd}^{\min}	p.u.	-5

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลของ PSS ในระบบทดสอบที่ 1

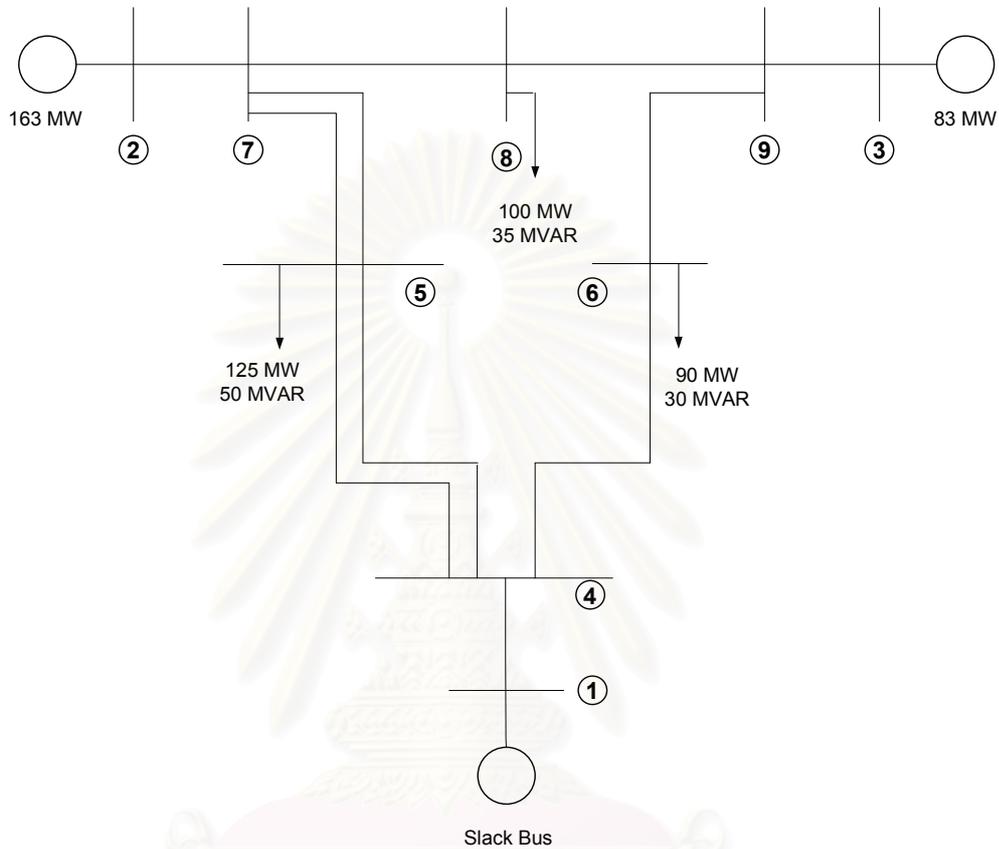
Parameters	Unit	PSS 1
K_{stab}	p.u.	0.00009
τ_w	secs	1.5
T_1	p.u.	1.8
T_2	secs	0.02
T_3	p.u.	1.8
T_4	secs	0.032
v_s^{\max}	p.u.	0.2
v_s^{\min}	p.u.	-0.2

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบที่ 1

Parameters	Unit	Gov 1
R_{droop}	p.u.	0.2
T_G	secs	0.1

ก.3 ระบบ WSCC 9 Bus

สำหรับระบบ WSCC ที่ใช้ในการทดลองการทำงานของรีเลย์นั้นจะทำการดัดแปลงจาก [11] เพื่อให้เห็นผลของช่วงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 3 ชัดเจน โดยจะดัดแปลงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบการทำงานของรีเลย์โซน 3 ระบบที่ 2 WSCC 9 บัส

ข้อมูลของบัส สายส่ง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณหาราคาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เมื่อกำหนดให้ค่า $S_{base} = 100 \text{ MVA}$ มีดังนี้

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสในระบบ WSCC

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Vm	Va	baseKV
1	3	0	0	0	0	1	0	230
2	2	0	0	0	0	1	0	230
3	2	0	0	0	0	1	0	230
4	1	0	0	0	0	1	0	230

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสในระบบ WSCC

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Vm	Va	baseKV
5	1	125	50	0	0	1	0	230
6	1	90	30	0	0	1	0	230
7	1	0	0	0	0	1	0	230
8	1	100	35	0	0	1	0	230
9	1	0	0	0	0	1	0	230

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ WSCC

Bus	Pg	Qg	Vg	MBase	Sta
1	0	0	1.04	100	1
2	163	0	1.025	100	1
3	85	0	1.025	100	1

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลสายส่งในระบบ WSCC

fbus	tbus	R	X	B	status
1	4	0	0.0576	0	1
4	6	0.017	0.092	0.158	1
6	9	0.039	0.17	0.358	1
3	9	0	0.0586	0	1
9	8	0.0119	0.1008	0.209	1
8	7	0.0085	0.072	0.149	1
7	2	0	0.0625	0	1
7	5	0.064	0.322	0.158	1
7	5	0.064	0.322	0.158	1
5	4	0.02	0.170	0.088	1
5	4	0.02	0.170	0.088	1

ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและส่วนควบคุมมีดังนี้

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ WSCC

Parameters	Unit	Gen 1	Gen 2	Gen 3
H	secs	23.64	6.4	3.01
R_s	p.u.	0	0	0
X_d	p.u.	0.146	0.8958	1.3125
X'_d	p.u.	0.0608	0.1198	0.1813
X_q	p.u.	0.0969	0.8645	1.2578
X'_q	p.u.	0.0969	0.1969	0.25
τ'_{d0}	secs	8.96	6.0	5.89
τ'_{q0}	secs	0.31	0.535	0.6
D	p.u.	0.0125	0.0068	0.0048

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลของส่วนสร้างสนาม (IEEE type A) ของระบบ WSCC

Parameters	Unit	Exc 1	Exc 2	Exc 3
K_A	p.u.	20	20	20
τ_A	secs	0.2	0.2	0.2
K_E	p.u.	1.0	1.0	1.0
τ_E	secs	0.314	0.314	0.314
K_F	p.u.	0.063	0.063	0.063
τ_F	secs	0.35	0.35	0.35
A	p.u.	0.0039	0.0039	0.0039
B	p.u.	1.555	1.555	1.555
E_{fd}^{\max}	p.u.	1.1	5	5
E_{fd}^{\min}	p.u.	-1.1	-5	-5

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลของ PSS ในระบบ WSCC

Parameters	Unit	PSS 1	PSS 2	PSS 3
K_{stab}	p.u.	0.0457	0.000063	0.000118
τ_w	secs	20	1.5	1.5
T_1	p.u.	0.86	1.9	1.4
T_2	secs	0.002	0.02	0.02
T_3	p.u.	0	1.8	1.3
T_4	secs	0	0.02	0.02
v_s^{\max}	p.u.	0.2	0.2	0.2
v_s^{\min}	p.u.	-0.2	-0.2	-0.2

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลของระบบควบคุมความเร็วในระบบ WSCC

Parameters	Unit	Gov 1	Gov 2	Gov 2
R_{droop}	p.u.	0.2	0.2	0.2
T_G	secs	0.1	0.1	0.1

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกนก สุวรรณกาญจน์ เกิดวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย