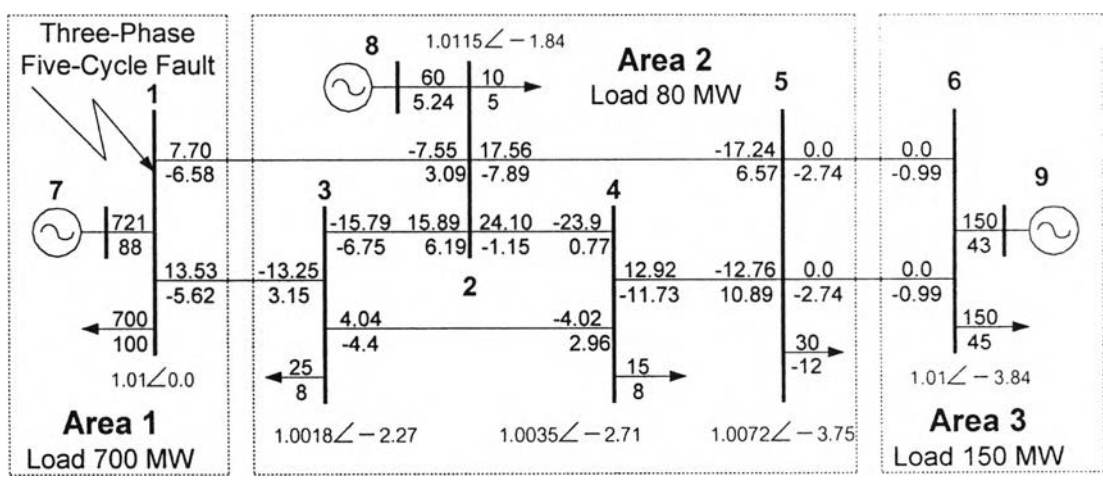
บทที่ 6

การทดสอบเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้า

6.1 บทนำ

ในบทนี้เราจะทำการทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบภายใต้เหตุการณ์ที่เราสนใจโดยเฉพาะระบบที่เชื่อมโยงกัน (Interconnection) ตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไปเช่น เกิดฟอลต์ที่บัส ,เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ จากนั้นจะทำการศึกษาพฤติกรรมในส่วนต่าง ๆ ของระบบเริ่มจากระบบส่งจะศึกษาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลัก (Tie-Line) ,ศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัส , การทำงานของรีเลย์วัดระยะทาง ในส่วนของระบบผลิตจะศึกษาความถี่และมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยในแต่ละเหตุการณ์ที่เราสนใจจะพิจารณาจากสภาพระบบในขณะนั้นเป็นข้อมูลก่อนเกิดเหตุการณ์ สิ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อระบบในช่วงเกิดเหตุการณ์คือระดับของการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งหลักก่อนเกิดเหตุการณ์ ,เวลาที่ใช้ในการเคลียร์ฟอลต์ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ , ค่าการปรับตั้งของรีเลย์วัดระยะทาง ,เวลาที่ใช้ในการรีโคลส [1]



รูปที่ 6.1 ระบบที่ใช้ทดสอบ

พิจารณารูปที่ 6.1 ซึ่งแสดงระบบ 3 ระบบเชื่อมโยงกันโดยระบบที่ 1 และระบบที่ 3 เป็นระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ และระบบที่ 2 เป็นระบบกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งเป็นระบบที่เราสนใจโดยเหตุการณ์ที่เราจะศึกษาคือกรณีระบบที่ 3 ต้องการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบที่ 1 โดยผ่านระบบที่ 2 จะสามารถรับกำลังสูงสูงได้ปริมาณเท่าไรโดยใช้เงื่อนไขดังนี้

กรณีที่ 1

ที่เวลา 0.00 วินาที เกิดสามเฟสฟอลต์ที่บัส 1

ที่เวลา 0.10 วินาที เคลียร์ฟอลต์โดยสายส่ง 1-2 ทริฟ

กรณีที่ 2

ที่เวลา 0.00 วินาที เกิดสามเฟสฟอลต์ที่บัส 1

ที่เวลา 0.10 วินาที เคลียร์ฟอลต์โดยสายส่ง 1-3 ทริฟ

ซึ่งการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการทราบขีดจำกัดสูงสุดในการส่งกำลังไฟฟ้าจากระบบที่ 1 ไปยังระบบที่ 3 โดยพิจารณาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของสายส่งหลัก

6.2 ข้อมูลของระบบและผลการทดสอบ

ระบบที่จะทำการทดสอบเสถียรภาพอยู่ในรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นระบบส่ง 115 kV โดยมีข้อมูลของส่วนต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตาราง

สายส่ง	ความยาว (Km)	R	X	B/2	Limit (MVA)
1-3	80	0.144176	0.252408	0.014644	83.65
1-2	100	0.180220	0.315510	0.018305	83.65
2-3	20	0.036044	0.063102	0.003661	83.65
2-4	20	0.036044	0.063102	0.003661	83.65
2-5	50	0.090110	0.157755	0.009153	83.65
3-4	40	0.072088	0.126204	0.007322	83.65
4-5	30	0.054066	0.094653	0.005492	83.65
5-6 (1)	100	0.180220	0.315510	0.018305	83.65
5-6 (2)	100	0.180220	0.315510	0.018305	83.65

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลของสายส่ง

บัส	กำลังผลิต (MW)	กำลังผลิต (Mvar)	โหลด (MW)	โหลด (Mvar)	ขนาดศักดาไฟฟ้า (pu)	มุมของศักดาไฟฟ้า (ดีกรี)
1			700	100	1.0100	0.0000
2	60		10	5	1.0115	
3			25	8		
4			15	8		
5			30	-12		
6	150		150	45	1.0100	

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลของบัส

บัส	พิกัด (MVA)	Power Factor	H (MJ/MVA)	Reactance (pu)
7	900	0.85	26.25	0.025
8	75	0.80	4.641	0.185
9	270	0.85	11.15	0.085

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัส	ขนาดศักดาไฟฟ้า (pu)	มุม (Degree)
1	1.01000	0.000
2	1.01150	-1.837
3	1.00177	-2.271
4	1.00350	-2.711
5	1.00723	-3.746
6	1.01000	-3.836

ตารางที่ 6.4 ศักดาไฟฟ้าในแต่ละบัส

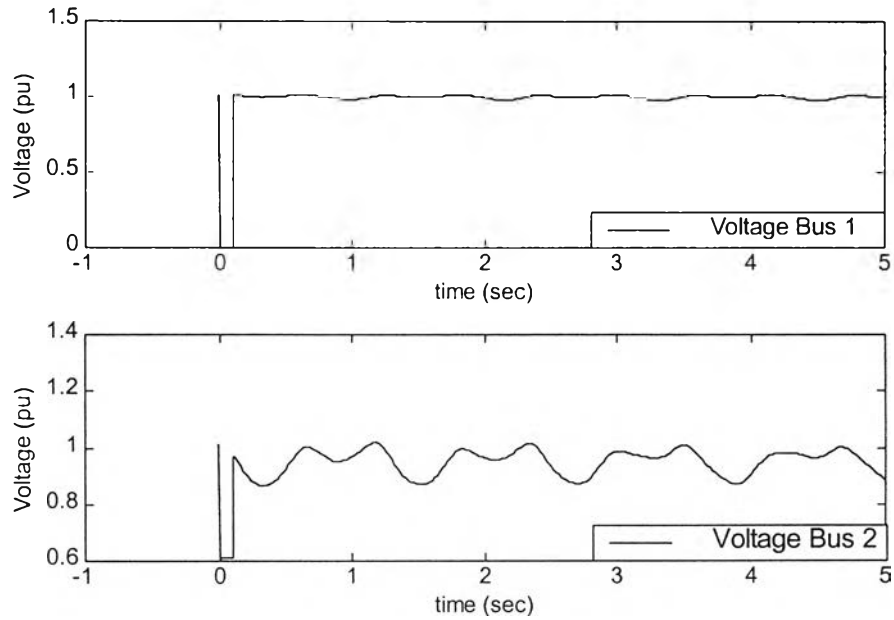
บัส-บัส	P (MW)	Q (Mvar)
1-3	13.53	-5.62
3-1	-13.25	3.15
1-2	7.70	-6.58
2-1	-7.55	3.09
2-3	15.89	6.19
3-2	-15.79	-6.75
2-4	24.10	-1.15
4-2	-23.90	0.77
2-5	17.56	-7.89
5-2	-17.24	6.57
3-4	4.04	-4.4
4-3	-4.02	2.96
4-5	12.92	-11.73
5-4	-12.76	10.89
5-6	0	-5.47
6-5	0	-1.98

ตารางที่ 6.5 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

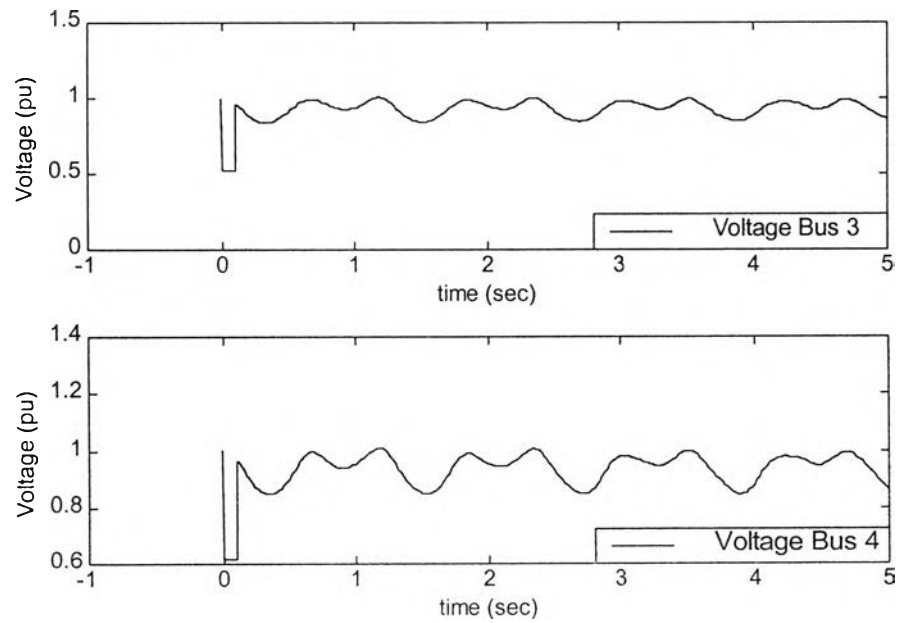
Area-Area	P (MW)	Q (Mvar)
1-2	21.53	-12.20
2-1	-20.80	6.24
2-3	0	-5.47
3-2	0	-1.98

ตารางที่ 6.6 กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่าง Area

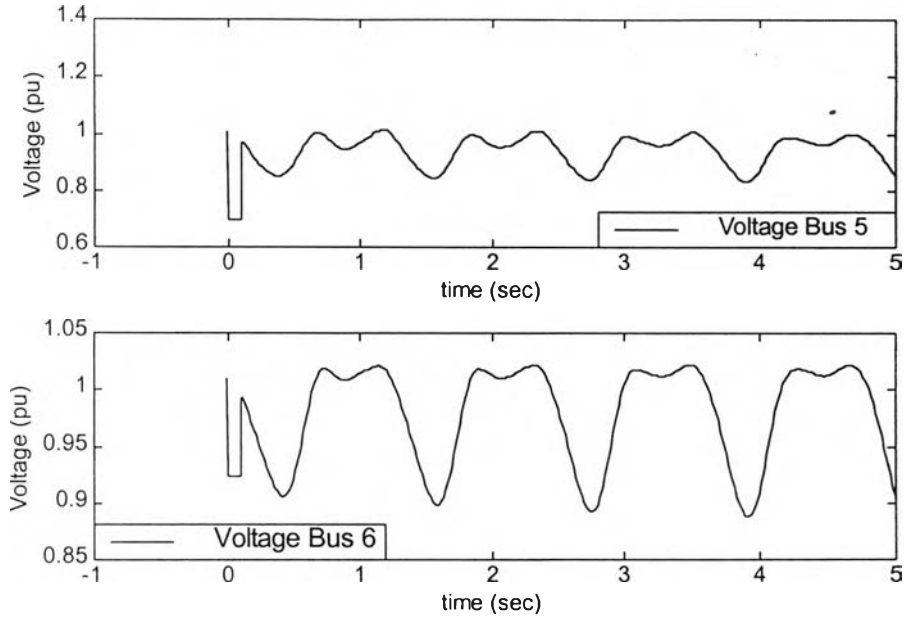
ผลการทดลองกรณีสายส่ง 1 – 2 ทริฟ ขณะสภาพระบบดังรูปที่ 6.1 (Base Case)



รูปที่ 6.2 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 1 และ 2

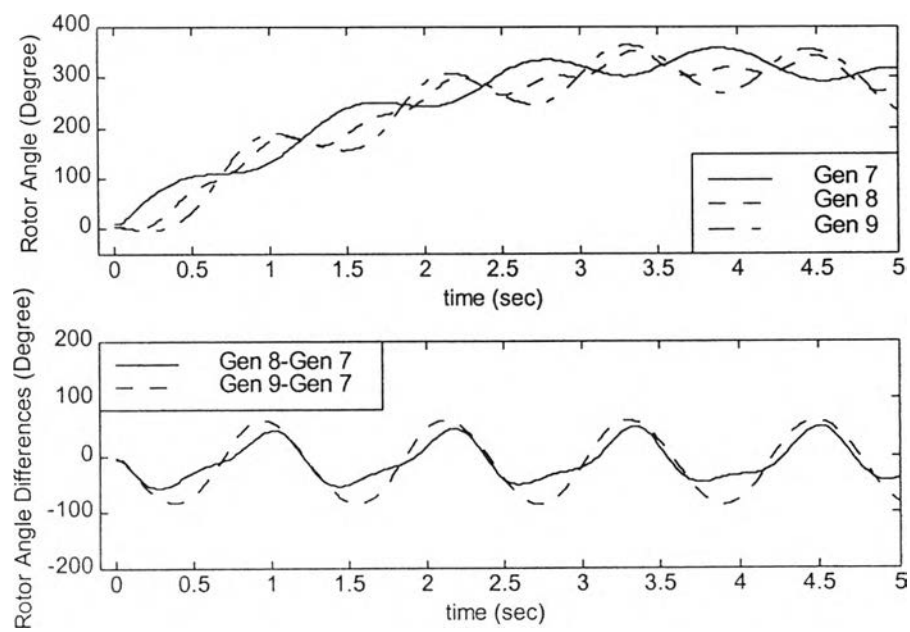


รูปที่ 6.3 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 3 และ 4



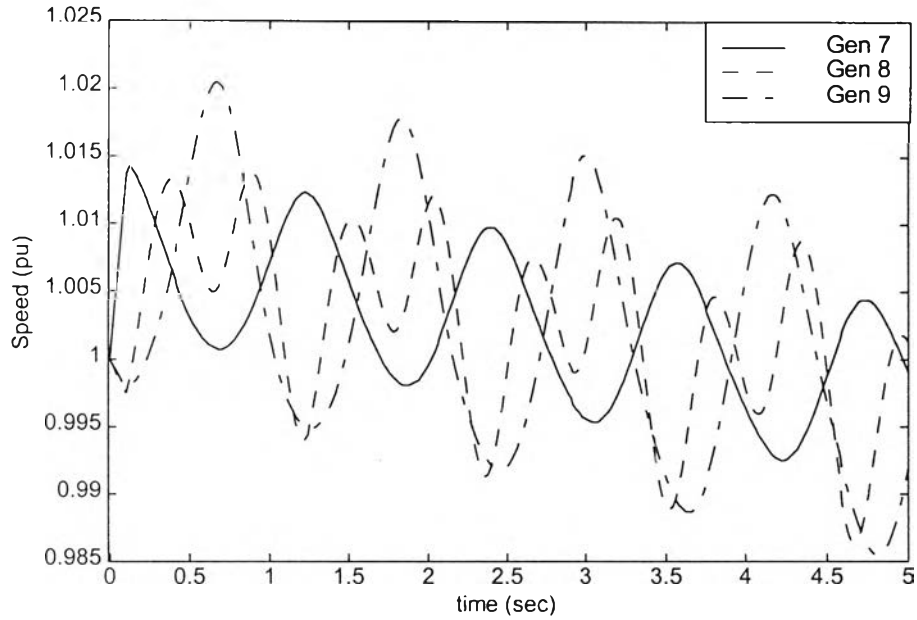
รูป 6.4 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 5 และ 6

จากรูปที่ 6.2 ,6.3 และ 6.4 สรุปได้ว่าเมื่อเกิด ฟอลต์ ที่บริเวณใกล้ ๆ บัส 1 เป็นเวลา 0.1 วินาที ศักดาไฟฟ้าทุกบัสมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.9 pu ยกเว้นบัส 6 และหลังจากฟอลต์เคลียร์โดยปลดสายส่ง 1-2 พบว่าศักดาไฟฟ้าทุกบัสอยู่ในเกณฑ์ปกติ

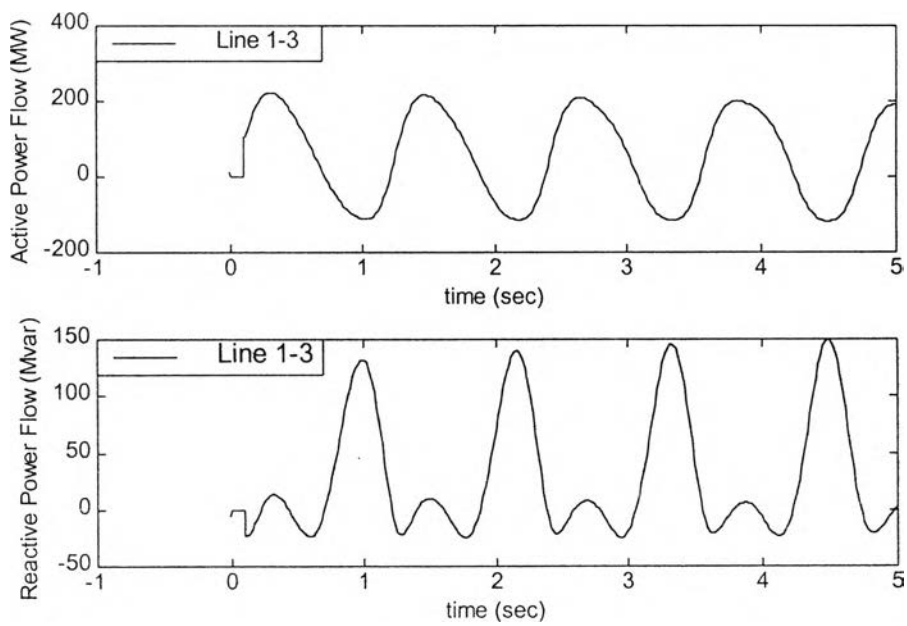


รูปที่ 6.5 มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พิจารณารูปที่ 6.5 รูปบนแสดงค่ามุมของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และรูปล่างแสดงค่ามุมของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 7 ซึ่งพบว่ามุมยังเกาะกลุ่มไปด้วยกัน



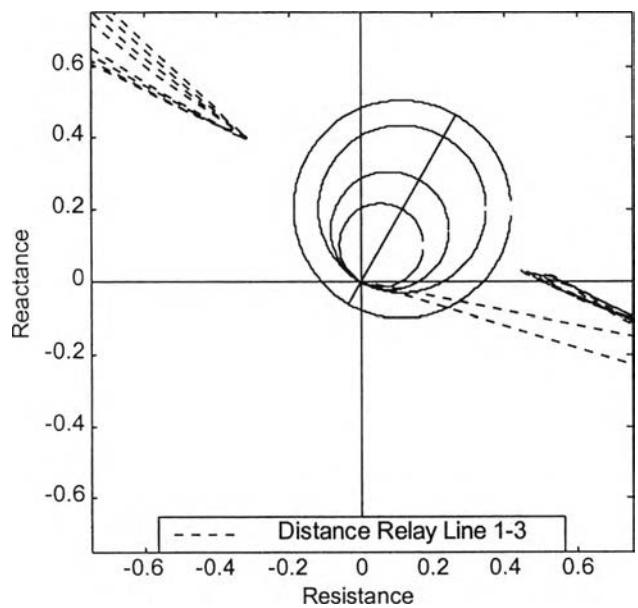
รูปที่ 6.6 ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.7 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

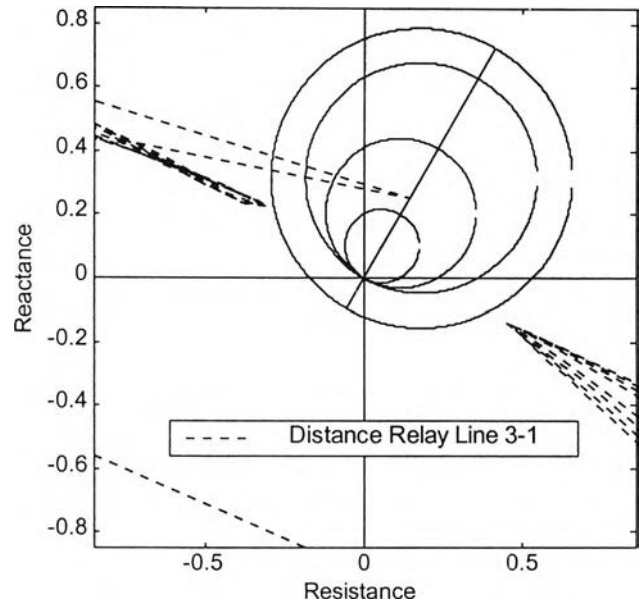
พิจารณารูปที่ 6.6 ซึ่งแสดงค่าความเร็วของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยขณะที่เกิด ฟอลต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 7 จะเกิด Over Speed เนื่องจากไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยัง Area 2 ได้ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 8 และ 9 จะเกิด Under Speed ในขณะฟอลต์เนื่องจากกำลังผลิตไม่พอจ่ายโหลด แต่หลังจากเคลียร์ฟอลต์ความเร็วของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะค่อย ๆ กลับเข้ามาใกล้ที่ 1 pu ตามเดิม

พิจารณารูปที่ 6.7 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหล (MW) ในสายส่ง 1 – 3 จะลดลงจาก 13.5 MW เหลือ 0.0 MW และเมื่อเคลียร์ฟอลต์จะเพิ่มขึ้นโดยแกว่งที่รอบ ๆ 21 MW



รูปที่ 6.8 การทำงานของรีเลย์วัดระยะทางของสายส่ง 1 – 3

พิจารณารูปที่ 6.8 รีเลย์วัดระยะทางที่บัส 1 จะไม่สั่งทริฟสายส่งเนื่องจากหลังจากเคลียร์ฟอลต์ค่าอิมพีแดนซ์ปรากฏ (Apparent Impedance) เคลื่อนที่ออกจากโซนทำงานไปแล้ว ส่วนรีเลย์ทางฝั่งตรงข้ามดังรูปที่ 6.9 คือรีเลย์ที่บัส 3 จะเห็นฟอลต์อยู่ในโซน 2 เพียง 5 ไซเคิล หลังจากนั้นอิมพีแดนซ์ปรากฏเคลื่อนที่ออกจากโซนทำงานไปแล้วรีเลย์จึงไม่สั่งทริฟ ดังนั้นสรุปได้ว่าในสภาวะปกติเมื่อ Area 2 รับกำลังไฟฟ้าจาก Area 1 ปริมาณ 20 MW หากเกิดฟอลต์ใกล้ ๆ บัส 1 โดยปลดสายส่ง 1-2 ระบบยังคงมีเสถียรภาพ

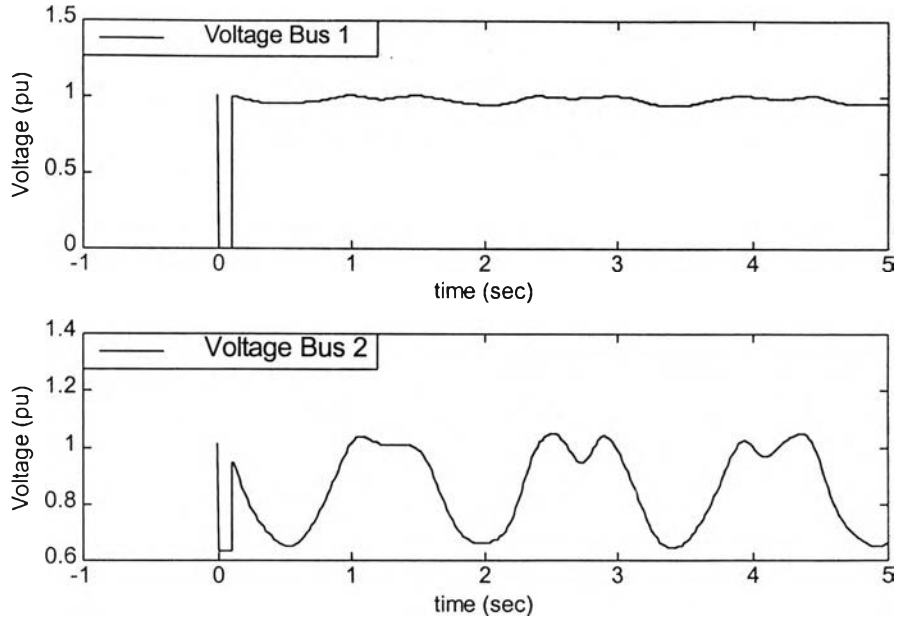


รูปที่ 6.9 การทำงานของรีเลย์วัดระยะทางของสายส่ง 3 - 1

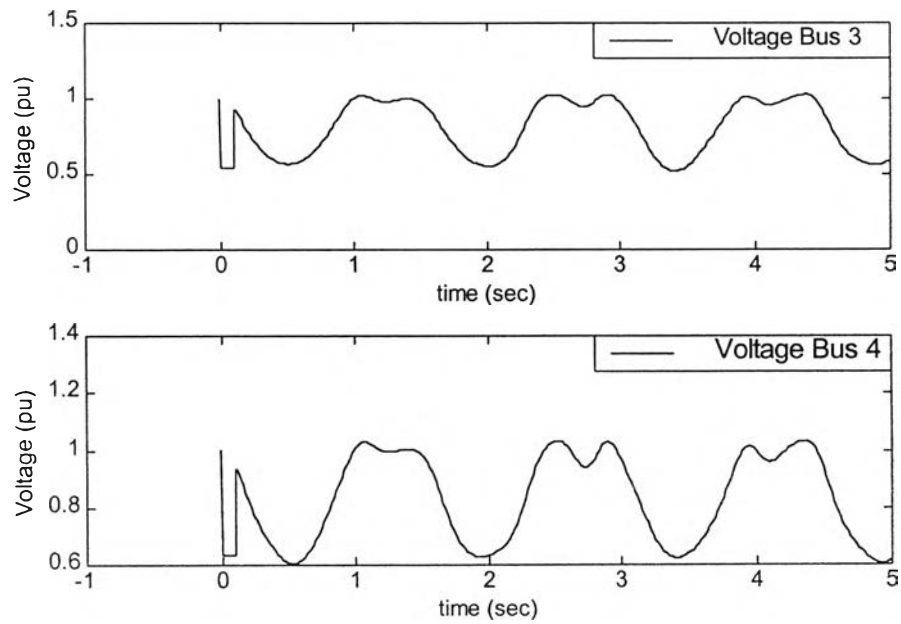
กรณีมีโหลดขนาด 50 MW เข้ามาที่ Area 3 หาก Area 3 ไม่เพิ่มกำลังผลิตแต่รับกำลังผลิตจาก Area 1 โดยผ่านทาง Area 2 ดังนั้น Area 1 จะต้องส่งกำลังไฟฟ้าประมาณ 80 MW ซึ่งประกอบด้วย 20 MW จ่ายไปยัง Area 2 , 50 MW จ่ายไปยัง Area 3 และค่าความสูญเสียประมาณ 10 MW โดย

การไหลของกำลังไฟฟ้าสายส่ง 1-3 คือ 46.7 MW -20 Mvar
การไหลของกำลังไฟฟ้าสายส่ง 1-2 คือ 37.6 MW -20.25 Mvar

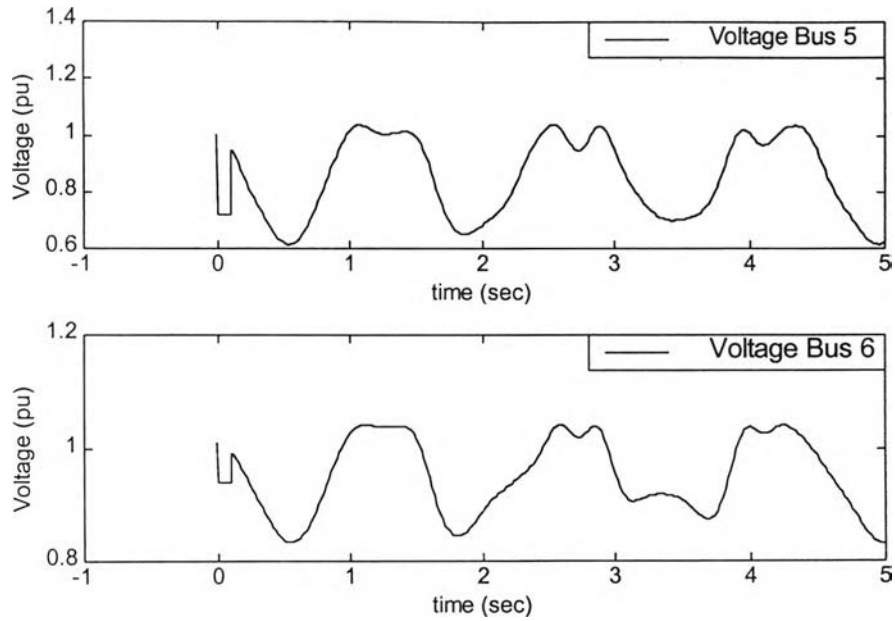
หากเกิดฟอลต์ที่บัส 1 สายส่ง 1-2 หรือสายส่ง 1-3 ทริฟ จะทำให้สายส่งที่เหลือต้องรับกำลังส่ง 93.39 MVA หรือ 111.6 % ของ Thermal Limit ผลการทดลองกรณีเกิดฟอลต์ที่บัส 1 และสายส่ง 1-2 ทริฟ สรุปได้ว่าศักดาไฟฟ้าทุกบัสยกเว้นบัส 1 และบัส 6 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ดังรูปที่ 6.10 ,6.11 และ 6.12



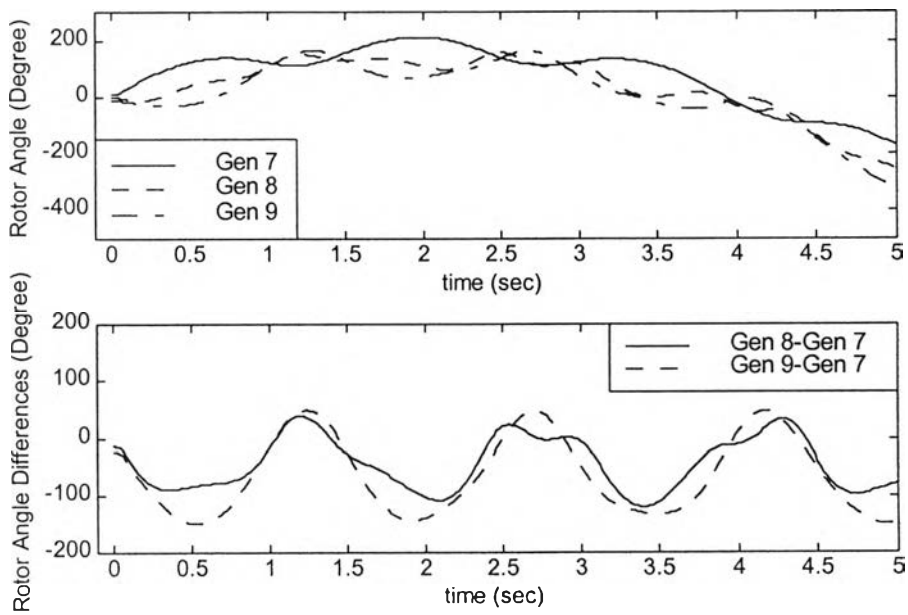
รูปที่ 6.10 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 1 และ2



รูปที่ 6.11 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 3 และ 4

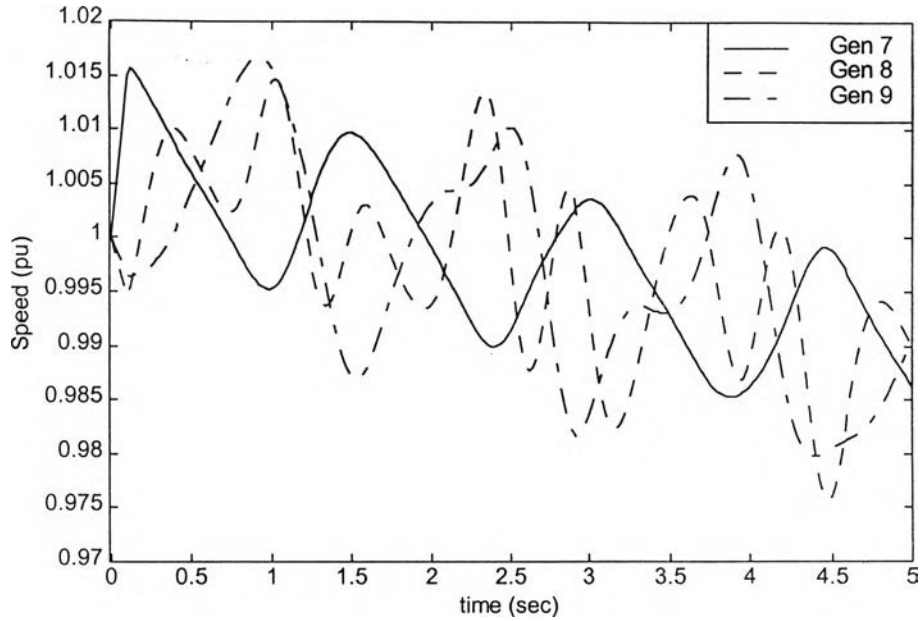


รูปที่ 6.12 ศักดาไฟฟ้าที่บัส 5 และ 6



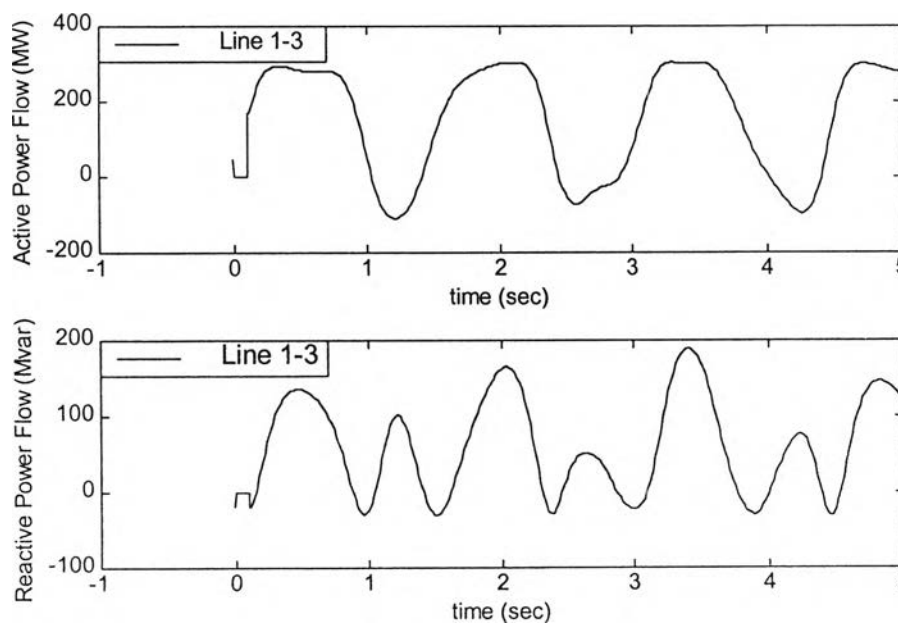
รูปที่ 6.13 มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 8 และ 9 เริ่มจะไม่เกาะกลุ่มกับ Area 1 ซึ่งก็คือระบบเริ่มทำท่าจะแยกเป็น 2 ระบบ (System Seperate) ระหว่าง Area 1 แยกออกจาก Area 2 และ 3 ดังรูปที่ 6.13



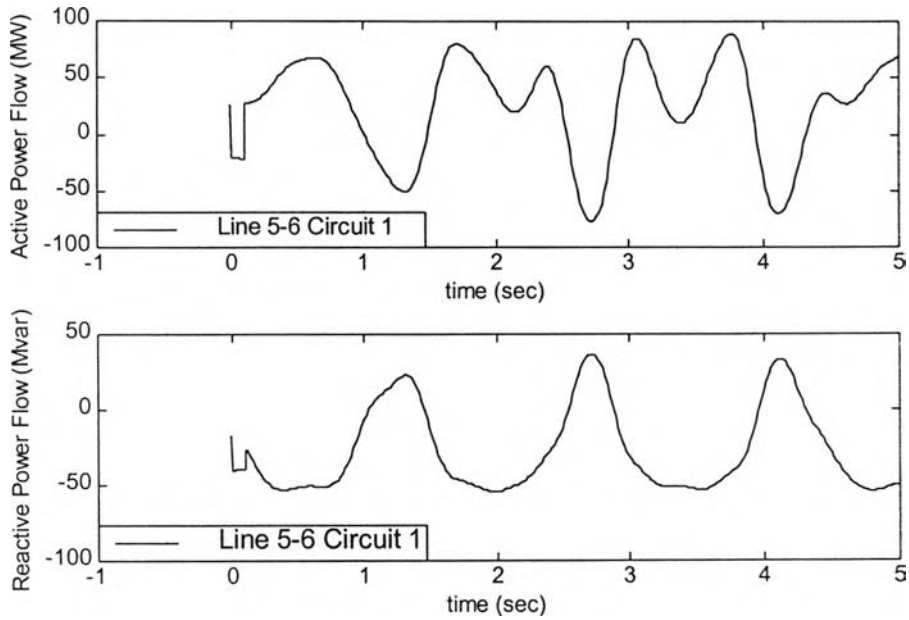
รูปที่ 6.14 ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในส่วนของความเร็วของเครื่องเนิดไฟฟ้าพบว่าเครื่องกำเนิดที่ 8 และ 9 มีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มไปด้วยกัน โดยแยกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 7 ซึ่งเป็นระบบหลักดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.15 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

ในส่วนของกำลังไฟฟ้าของสายส่งหลักระหว่าง Area 1 และ 2 ซึ่งก็คือสายส่ง 1-3 เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมากหลังจากเคลียร์ฟอลต์โดยเปลี่ยนแปลงจาก 46.7 MW เป็น 84.4 MW หลังจากเคลียร์ฟอลต์จะแกว่งอยู่รอบ ๆ ค่า 84.4 MW ดังรูปที่ 6.15

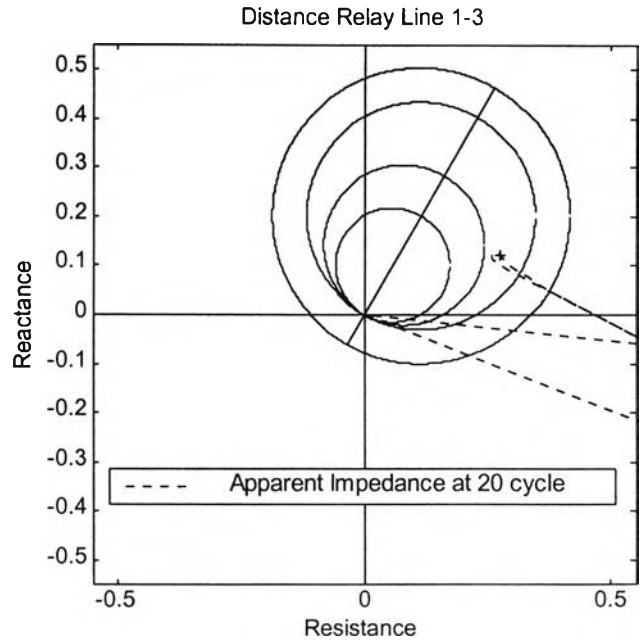


รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

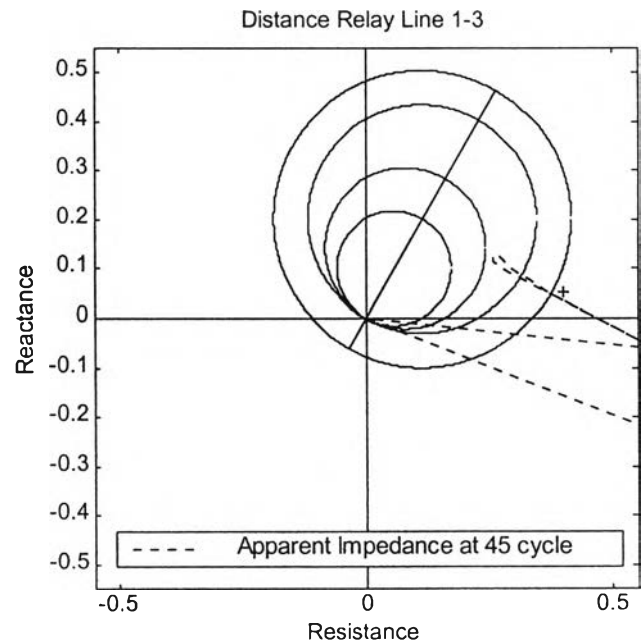
ในส่วนของสายส่งหลักระหว่าง Area 2 และ Area 3 สายส่ง 5-6 แต่ละวงจรหลังจากเคลียร์ฟอลต์ กำลังไฟฟ้าจะแกว่งโดยเริ่มแรกมีค่าอยู่ 26 MW และลดลงขณะที่เกิดฟอลต์จากนั้นจะกลับไปแกว่งที่รอบ ๆ 26 MW ตามเดิมดังรูปที่ 6.16

ในส่วนของรีเลย์วัดระยะทางของสายส่ง 1-3 ที่บัส 1 และบัส 3 รีเลย์จะยังคงไม่ทำงานโดยรีเลย์ที่บัส 1 เมื่อเวลาผ่านไป 20 ไซเคิล และ 45 ไซเคิล แสดงดังรูปที่ 6.17 และ 6.18 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะนี้จัดเป็นการแกว่งแบบมีเสถียรภาพ โดยทั่ว ๆ ไปเวลาที่ใช้ในการทำงานของรีเลย์วัดระยะทางในแต่ละโซนเป็นดังนี้

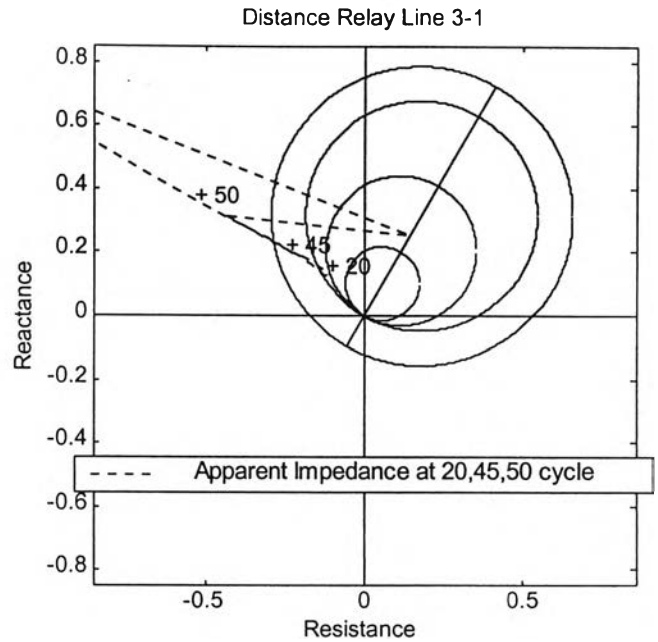
โซนที่ 1 ประมาณ 0.10 วินาที
โซนที่ 2 ประมาณ 0.40 วินาที
โซนที่ 3 ประมาณ 1.00 วินาที
โซนป้องกันการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะบล็อคเป็นเวลาประมาณ 0.05 วินาที



รูปที่ 6.17 รีเลย์วัดระยะทางสายส่ง 1-3 ที่เวลา 20 ไซเคิล



รูปที่ 6.18 รีเลย์วัดระยะทางสายส่ง 1-3 ที่เวลา 45 ไซเคิล



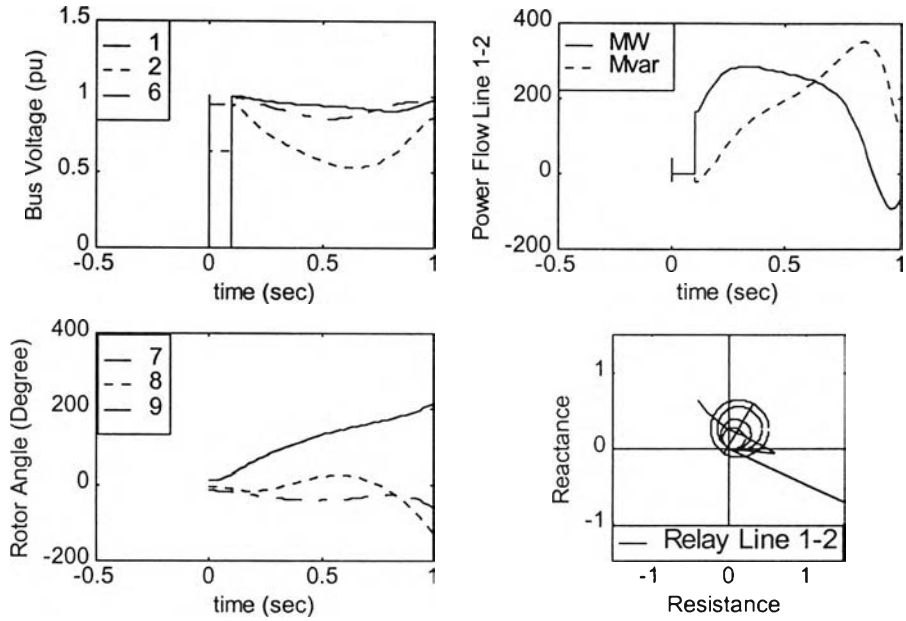
รูปที่ 6.19 รีเลย์วัดระยะทางสายส่ง 3-1 ที่เวลา 20 ,45 ,50 ไซเคิล

ส่วนรีเลย์ที่บัส 3 ดังรูปที่ 6.19 เช่นกันจะยังคงไม่ทำงานโดยขณะที่เกิดฟอลต์รีเลย์จะเห็นฟอลต์ในโซนที่ 2 ประมาณ 5 ไซเคิล หลังจากเคลียร์ฟอลต์เกิดการแกว่งของกำลังอย่างมากทำให้อิมพีแดนซ์กลับเขาไปยังโซนที่ 2 และออกไปในที่สุดจึงทำให้รีเลย์ไม่ทำงานแต่สภาวะของระบบในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในลักษณะนี้มีโอกาสที่จะเกิดการแยกระบบระหว่าง Area 1 กับ Area 2 และ 3 ได้มาก

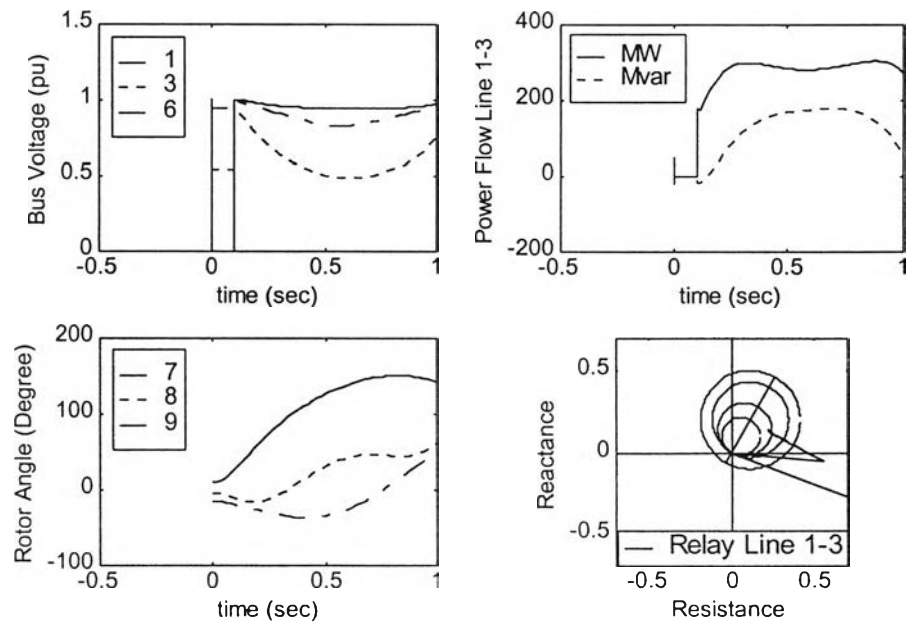
ในขณะนี้เราสามารถทราบขีดจำกัดในการส่งกำลังไฟฟ้าอย่างประมาณจาก Area 1 ไปยัง Area 3 คือประมาณ 50 MW แต่สิ่งที่เราต้องพิจารณาต่อไปก็คือหากเกิด ฟอลต์ ที่ใกล้ ๆ บัส 1 โดยสายส่ง 1-2 หรือสายส่ง 1-3 ทริฟ กรณีใดจะเป็นกรณีที่อันตรายและค่าขีดจำกัดทางเสถียรภาพ (Stability Limit) เป็นเท่าไร

จากการทดลองพบว่าเมื่อ Area ที่ 3 เพิ่มโหลดขึ้นไปที่ 205 MW (หรือรับ 55 MW จาก Area 1) โดยจ่ายกำลังผลิตเท่าเดิมคือ 150 MW ดังนั้น Area ที่ 1 จะส่งกำลังเข้ามายัง Area ที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 91.88 - j42.85 MVA โดยส่งผ่านไปยังสายส่ง 1-2 ที่ 41.23 - j21.61 MVA และสายส่ง 1-3 ที่ 50.65 - j21.24 MVA เมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส 1 โดยสายส่ง 1-3 ทริฟ ผลการทดลองอยู่ในรูปที่ 6.20 ส่วนกรณี

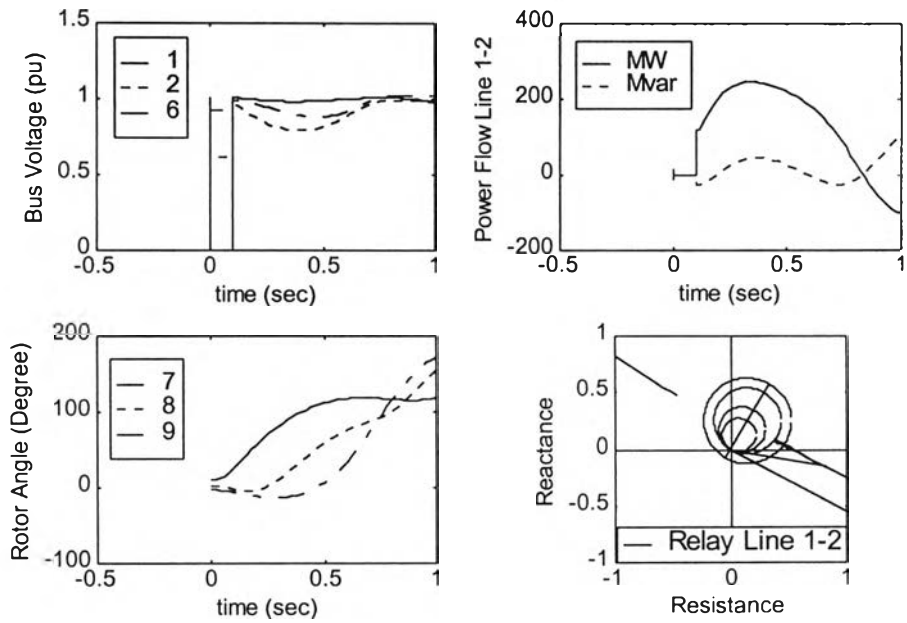
สายส่ง 1-2 ทริฟอยู่ในรูปที่ 6.21 ซึ่งสรุปได้ว่ากรณีสายส่ง 1-3 ทริฟจะให้ผลรุนแรงที่สุดนั่นคือขีดจำกัดทางเสถียรภาพจาก Area 1 ไป Area 2 สูงสุดไม่เกิน 50 MW



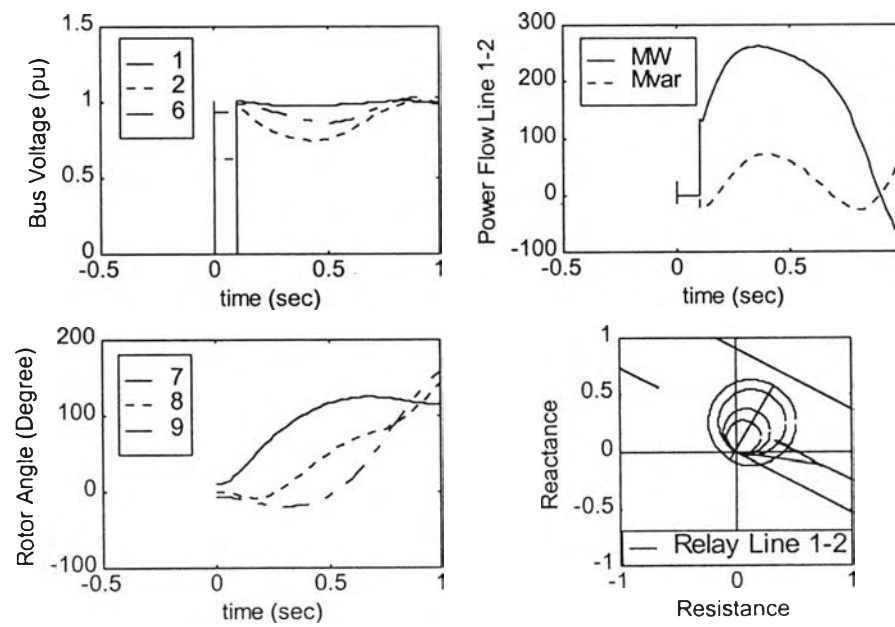
รูป 6.20 โหลด Area 3 ที่ 205 MW Line1-3 ทริฟ



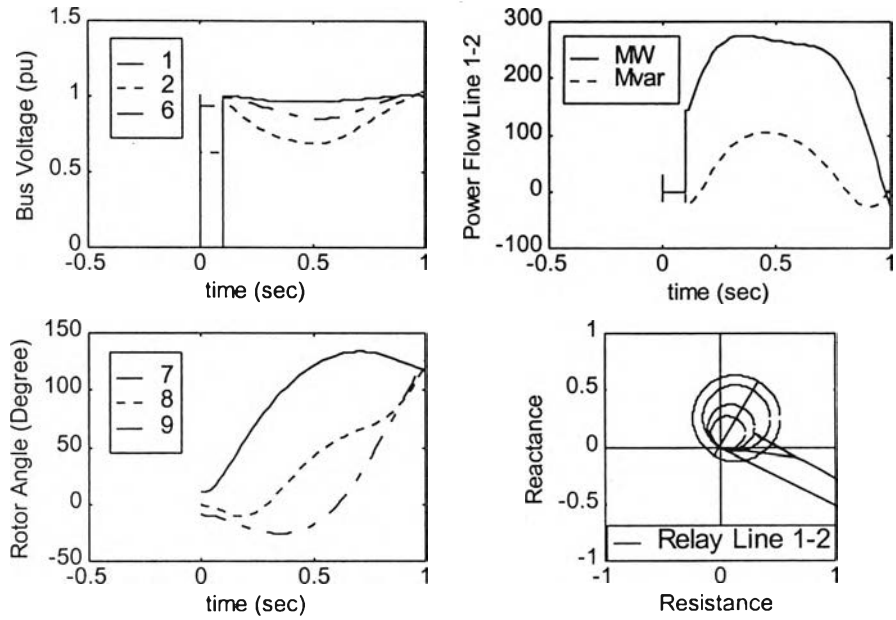
รูป 6.21 โหลด Area 3 ที่ 205 MW Line1-2 ทริฟ



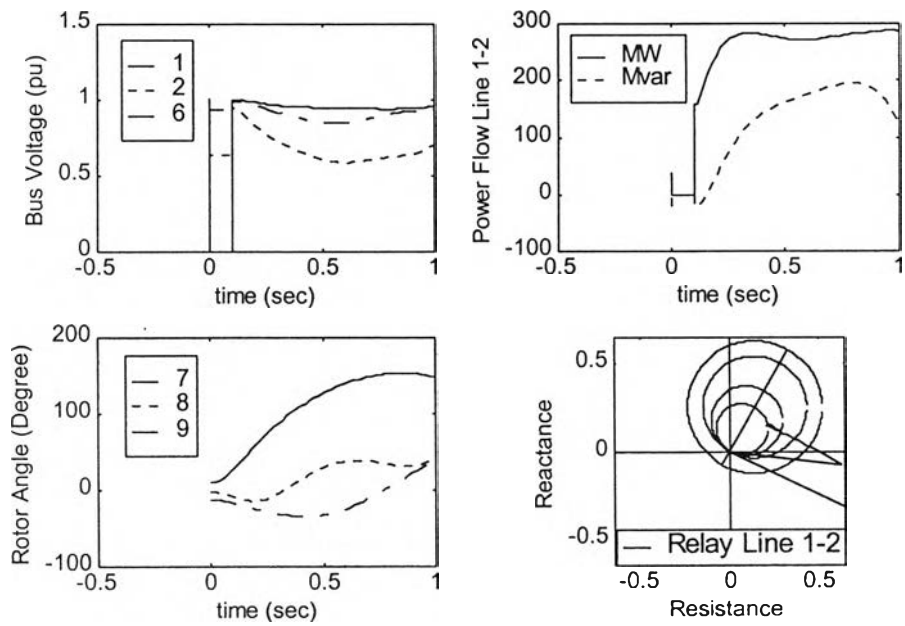
รูปที่ 6.22 โหลด Area 3 ที่ 170 MW Line 1-3 ทริฟ



รูปที่ 6.23 โหลด Area 3 ที่ 180 MW Line 1-3 ทริฟ



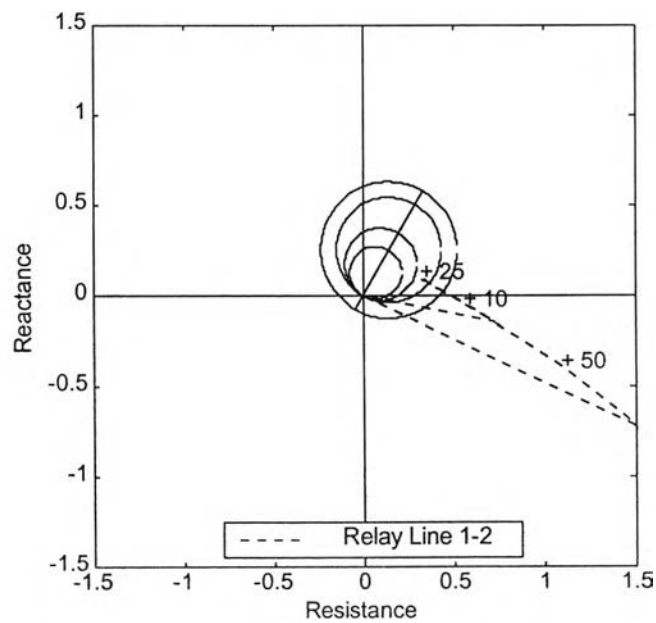
รูปที่ 6.24 โหลด Area 3 ที่ 190 MW Line 1-3 ทริฟ



รูปที่ 6.25 โหลด Area 3 ที่ 200 MW Line 1-3 ทริฟ

เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ระดับของโหลดที่ต่าง ๆ จาก 150 MW ถึง 205 MW ของ Area ที่ 3 พบว่าถ้า Area ที่ 3 มีความต้องกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 180 MW ขึ้นไปจะไม่รองรับกรณีเกิดฟอลต์ที่บัส 1 โดยสายส่ง 1-3 ทริฟ ซึ่งจากรูปที่ 6.20 ,6.24 ,6.25 อิมพีแดนซ์ปรากฏ เลยเข้าไปในโซนป้องกันค่อนข้างมากเป็นผลมาจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าหลังจากเคลียร์ฟอลต์ ส่วนที่ระดับไม่เกิน 180 MW ดังรูปที่ 6.22 ,6.23 อิมพีแดนซ์ปรากฏเลยเข้าไปในโซนป้องกันไม่มากและเป็นการแกว่งแบบมีเสถียรภาพ ซึ่งต่างจากกรณีที่เกิน 180 MW จะเป็นการแกว่งแบบไม่มีเสถียรภาพโดยเฉพาะรูปที่ 6.20 อิมพีแดนซ์ปรากฏ เลยเข้าไปในโซนป้องกันทะลุเข้าไปถึงโซน 1 และไม่เคลื่อนที่กลับมานอกโซนซึ่งลักษณะเช่นนี้รีเลย์จะทริฟอย่างทันทีทันใดเป็นผลให้เกิดการแยกระบบเป็น 2 ระบบโดย Area 2 และ 3จะเกิดไฟฟ้าดับ (Blackout) ไปในที่สุด

นอกจากนี้สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกคือเวลาที่ใช้ในการเคลียร์ฟอลต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จากกรณีที่ 205 MW ดังรูปที่ 6.20 ซึ่งเวลาในการเคลียร์ฟอลต์คือ 0.10 วินาที โดยระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ แต่หากเปลี่ยนเป็น 0.08 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 6.26 ซึ่งหากเคลียร์ฟอลต์ที่ 0.08 วินาที จะไม่เกิดการแยกระบบและระบบยังมีเสถียรภาพที่ 205 MW แต่ในทางปฏิบัติต้องเลือกใช้กรณีที่เป็นกรณีที่อันตรายโดยจะใช้เวลาในการเคลียร์ฟอลต์เผื่อไว้ และพิจารณาที่กรณีรีโคลสทำงานไม่สำเร็จหรือไม่ทำงานเพื่อที่จะทดสอบความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของสายส่งวงจรที่เหลือ



รูปที่ 6.26 ที่โหลด 205 MW เคลียร์ฟอลต์ที่ 0.08 วินาที