



การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม POWERWORLD
POWER SYSTEM STABILITY ANALYSIS USING POWERWORLD
SIMULATOR

นายพรชัย ยั่งยืนเจริญสุข รหัส 50382519
นายวรวัฒน์ แปะคำเรือง รหัส 50382762

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
ฉบับที่.....	11/อ.ค. 2555.....
เลขทะเบียน.....	157-3287-6.....
เลขเรียกหนังสือ.....	ปร.....
มหาวิทยาลัยนครพนม พ231 ๑	

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต²⁵⁶³
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
ปีการศึกษา 2553



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม PowerWorld
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพรชัย ยั่งยืนเจริญสุข รหัส 50382519 นายวรวัฒน์ แป้งคำเรือง รหัส 50382762
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.แคทรียา สุวรรณศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

.....กรรมการ
(ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

.....กรรมการ
(ดร.สุภาวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม PowerWorld		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพรชัย	ยังยืนเจริญสุข	รหัส 50382519
	นายวรวัฒน์	แบ่งคำเรือง	รหัส 50382762
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. แคทรียา สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2553		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม PowerWorld การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าใช้วิธี Newton-Raphson ระบบศึกษาแบ่งเป็น 2 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้า 4 บัสและ 10 บัส

สำหรับระบบไฟฟ้า 4 บัส ค่าเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ แรงดันมุมเฟสและกำลังไฟฟ้าจะถูกคำนวณด้วยเครื่องคำนวณและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม เสถียรภาพของระบบถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤต นอกจากนั้นผลการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความถี่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วย

สำหรับระบบไฟฟ้า 10 บัส เสถียรภาพของระบบถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PowerWorld ค่ามุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตได้ถูกวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสถูกพิจารณาเพื่อหาความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง ค่าคงที่ความถี่และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสภาวะการลัดวงจรเกิดขึ้น การลัดวงจรจะต้องถูกกำจัดภายในมุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตเพื่อรักษาเสถียรภาพของวงจร

Project title	Power System Stability Analysis using PowerWorld Simulator		
Name	Mr.Pornchai	Yangyuncharoensuk	ID. 50382519
	Mr.Worawat	Paengkhamrueang	ID. 50382762
Project advisor	Mrs.Cattareeya Suwanasri, D.Eng.		
Major	Electrical Engineering		
Department	Electrical and Computer Engineering		
Academic year	2010		

Abstract

This project presents power system stability analysis by using PowerWorld Simulator. To calculate power flow, Newton-Raphson method is applied. The case studies are separated into 2 systems, the 4-bus and 10-bus systems.

For 4-bus system, admittance matrix, bus voltage, phase angle, power generation are manually calculated and compared with simulated results in order to verify the results from the PowerWorld program. The system stability is analyzed using the equal-area criterion in order to determine the critical clearing phase angle and critical clearing time. In addition, the effects of damping and inertia constant are analyzed.

For 10-bus system, the stability is analyzed using PowerWorld program. The critical clearing phase angle and critical clearing time are analyzed from relation graph between clearing time and phase angle. The violation of each generator phase angle is considered in order to investigate the importance by damping and inertia constants as well as the change of power generation.

The analysis results show that when fault occurred, the fault must be eliminated within δ_{cr} and t_{cr} in order to maintain the system stability.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.แกทรียา สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความกรุณา แนะนำความคิด ความรู้ แนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้โอกาสในการจัดทำปริญญานิพนธ์ รวมไปถึงการเอื้อเฟื้อเอกสารแหล่งข้อมูลในการค้นคว้าเพิ่มเติมและอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการวิเคราะห์ช่วยให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณะกรรมการการสอบปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบเพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้สิ่งที่คณะผู้จัดทำรักและซาบซึ้งอยู่เสมออันคือพระคุณของบิดา มารดา ซึ่งเข้าใจและให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้าน ในการศึกษาและทำปริญญานิพนธ์จนกระทั่งประสบผลสำเร็จ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นายพรชัย ชัยยืนเจริญสุข
นายวรวัฒน์ แปงคำเรือง

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....ก	
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ค	
กิตติกรรมประกาศ.....ง	
สารบัญ.....จ	
สารบัญตาราง.....ช	
สารบัญรูป.....ซ	
บทที่ 1 บทนำ..... 1	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... 1	
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... 1	
1.3 ขอบข่ายการทำงาน..... 1	
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน..... 2	
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	
1.6 งบประมาณที่ใช้..... 3	
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 4	
2.1 นิยามปัญหาของโหลด..... 4	
2.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า..... 6	
2.2.1 ข้อมูลสำหรับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า..... 6	
2.2.2 ค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ..... 7	
2.3 ขั้นตอนการดำเนินการของวิธี Newton-Raphson..... 7	
2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดไฟลต์ด้วยวิธี Newton-Raphson..... 8	
2.5 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า..... 9	
2.5.1 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน..... 13	
2.5.2 มุมเคลียร์วิกฤต..... 15	
2.5.3 การประยุกต์ใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน..... 18	
2.6 โปรแกรม PowerWorld..... 23	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	26
3.1 ระบบศึกษา 4 บัส	26
3.2 ระบบศึกษา 10 บัส	30
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรม PowerWorld	32
4.1 ระบบไฟฟ้า 4 บัส	32
4.1.1 กราฟแสดงสถานะต่างๆในวงจรศึกษาโดยมีค่า $H=5$, $D=5$	33
4.1.2 กราฟแสดงการลัดวงจรระหว่างบัส 1 – บัส 3 โดยปรับค่า D และ H	35
4.2 ระบบไฟฟ้า 10 บัส	43
4.2.1 กราฟแสดงการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในวงจร โดยปรับกำลังไฟฟ้าใน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	59
5.1 สรุปผล	61
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	61
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแจกแจงค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ	37
4.1 ค่าเวลาเคลียร์ฟอลต์ที่ $D=0$	37
4.2 ค่าเวลาเคลียร์ฟอลต์ที่ $D=1$	39
4.3 ค่าเวลาเคลียร์ฟอลต์ที่ $D=5$	41
4.4 ค่าเวลาเคลียร์ฟอลต์ที่ $D=10$	43
4.5 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.21	47
4.6 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.22	48
4.7 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.23	49
4.8 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.25	51
4.9 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.26	52
4.10 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.27	53
4.11 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.29	55
4.12 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.30	56
4.13 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.31	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บัณฑิตต่างๆ โดยกำลังที่ไหลเข้าบัสถือว่าเป็นบวก.....	5
2.2 ระบบเครื่องกักกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องกระตุ้น	10
2.3 วงจรสมมูลลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	10
2.4 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า P และมุมเฟส δ	12
2.5 การเปลี่ยนแปลงพลังไฟฟ้าในระบบจาก P_{m0} ไปเป็น P_{m1} ทำให้มีการเร่งและหน่วง โรเตอร์เพื่อเข้าสู่จุดเสถียรภาพ.....	14
2.6 เส้นโค้งแสดงกำลังไฟฟ้ามุม δ แสดงมุมเคลียร์วิกฤต δ_{cr} และพื้นที่ A_1 เท่ากับพื้นที่ A_2	15
2.7 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่สายส่งด้านใดด้านหนึ่ง.....	18
2.8 กราฟขณะการลัดวงจรตามรูปที่ 2.7: A ก่อนเกิดฟอลต์, B ขณะเกิดฟอลต์และ C หลังแยกฟอลต์ออกจากระบบ	19
2.9 ระบบไฟฟ้าในขั้นตอนเกิดการลัดวงจร	19
2.10 รีแอกแตนซ์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.7 เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟสที่จุดใดๆ บนสายส่ง TL2.....	21
2.11 การใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันในการเคลียร์ฟอลต์เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ระบบสายส่ง พลังงานไฟฟ้าโดยพื้นที่ A_1 และ A_2 มีค่าเท่ากัน	21
2.12 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ 100,000 บัส	23
2.13 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์ข้อมูลขาแดน.....	24
2.14 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	25
2.15 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์แบบ 3 มิติ	25
3.1 ระบบศึกษา 4 บัส	26
3.2 วงจรสมมูล 4 บัส	26
3.3 วงจรขณะเกิดการลัดวงจรและกราฟแสดงพื้นที่เท่ากันของ A_1 และ A_2	28
3.4 ระบบศึกษา 10 บัส	31
4.1 ระบบศึกษา 4 บัส	32
4.2 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะปกติ	33
4.3 (ก) เมื่อเกิดการลัดวงจรมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ข) หลังเกิดการลัดวงจร มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสวิตช์เข้าสู่มุม 27.95°	34
4.4 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเกิดการลัดวงจรที่เคลียร์ฟอลต์หลัง ในเวลาเคลียร์วิกฤต	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่า $D=0$ และ $H=1$	35
4.6 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=0$ และ $H=5$	36
4.7 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=0$ และ $H=10$	36
4.8 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=1$ และ $H=1$	37
4.9 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=1$ และ $H=5$	38
4.10 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=1$ และ $H=10$	38
4.11 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=1$	39
4.12 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=5$	40
4.13 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=10$	40
4.14 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=1$	41
4.15 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=5$	42
4.16 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=10$	42
4.17 ระบบศึกษา 10 บัส	43
4.18 มุมเฟสในสภาวะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW	44
4.19 มุมเฟสในสภาวะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW	45
4.20 มุมเฟสในสภาวะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และบัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ	46
4.21 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด เท่ากับ 150 MW	47
4.22 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างบัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW	48
4.23 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างบัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ บัส 2, 3 และบัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ	49
4.24 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่สายส่งระหว่างบัส 6 – บัส 8 และเคเบิลฟอลต์ หลังเวลาเคสรีริงวิกฤต	50
4.25 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด เท่ากับ 150 MW	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW.....	52
4.27 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และ บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ	53
4.28 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 และเคลียร์ฟอลต์ หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต.....	54
4.29 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW	55
4.30 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW	56
4.31 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และ บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ	57
4.32 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 และเคลียร์ฟอลต์ หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า คือ ความสามารถของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัสที่สามารถทำงานในสถานะปกติได้เมื่อเกิดการแกว่งตัวของระบบ (Disturbance) โดยไม่สูญเสียการซิงโครไนซ์ ซึ่งโดยทั่วไปการดูแลเสถียรภาพของระบบจะต้องรักษามุมเฟส (Phase Angle) ระหว่างบัสของสายส่งไม่ให้ห่างกันมากเกินไปและขนาดของแรงดันต้องอยู่ใกล้กับค่าพิกัด (Nominal Voltage) โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลง และอุปกรณ์อื่นๆ จะต้องไม่ทำงานเกินพิกัด (Overloaded)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (PowerWorld Simulator) ใช้เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ในโครงงานนี้โปรแกรม PowerWorld จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์หาแรงดันและมุมเฟสของแต่ละบัสในระบบไฟฟ้า ภายใต้สภาวะคงตัวแบบสามเฟส (Three-Phase Steady State Condition) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Losses) ในระบบได้ และสุดท้ายเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (System Stability) จะถูกวิเคราะห์และปรับปรุงให้ในสภาพที่ทำงานที่สมบูรณ์ที่สุด โดยการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมเฟสสูงสุด (Maximum Power Angle)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติและสภาวะเกิดการลัดวงจร โดยใช้โปรแกรม PowerWorld

1.3 ขอบข่ายการทำงาน

1. ออกแบบระบบไฟฟ้าที่กำหนดให้และวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี Newton-Raphson และ โปรแกรม PowerWorld
2. คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี Newton-Raphson โดยใช้โปรแกรม PowerWorld
3. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยใช้โปรแกรม PowerWorld
4. ศึกษาเสถียรภาพของระบบจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมเฟสสูงสุดเมื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping) และค่าความเฉื่อย (Inertia Constant)

5. วิเคราะห์แรงดัน มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าของระบบในสภาวะปกติและสภาวะไม่ปกติ
6. เสนอแนะวิธีปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ในสภาพที่ทำงานที่สมบูรณ์ที่สุด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2553							ปี 2554		
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) ศึกษาการใช้งานโปรแกรม PowerWorld										
2) ศึกษาการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี Newton-Raphson										
3) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยวิธี Newton-Raphson โดยคำนวณด้วยมือ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld										
4) สร้างระบบไฟฟ้าและทดสอบระบบไฟฟ้าที่กำหนดให้ด้วยโปรแกรม PowerWorld										
5) วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรม PowerWorld										
6) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยใช้โปรแกรม PowerWorld										
7) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จากกราฟความถี่กับมุมระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมเฟสสูงสุด										
8) เสนอแนะวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ในสภาพที่ทำงานที่สมบูรณ์ที่สุด										
9) สรุปผลการทดสอบ										

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เราสามารถใส่โปรแกรม PowerWorld มาวิเคราะห์และปรับปรุงเสถียรภาพของระบบจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมเฟสสูงสุด โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Newton-Raphson

1.6 งบประมาณ

1. ค่าเอกสารประกอบการทำโครงการ	500 บาท
2. ค่าถ่ายเอกสารและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	1,500 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาทถ้วน)	<u>2,000 บาท</u>
หมายเหตุ: เจลี่ยทุกรายการ	



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการไหลของโหลดเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านปฏิบัติการ ควบคุมและวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการประเมินสมรรถนะของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบและศึกษาผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุปกรณ์ในระบบ เช่น เมื่อระบบไฟฟ้าโหลดเพิ่มขึ้นก็จะเกิดการเชื่อมต่อโหลดใหม่หรือติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าขึ้นใหม่เข้ากับระบบเดิม จึงทำให้มีผลกระทบต่อแรงดันและกระแสของระบบ อีกทั้งยังมีผลต่อการไหลของกำลังจริงและกำลังเสมือนด้วย ซึ่งผลกระทบเหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาก่อน เพื่อจะได้ดำเนินการดังกล่าวให้มีความถูกต้อง

2.1 นิยามปัญหาของโหลด

การศึกษาการไหลของโหลดในบทนี้จะศึกษาระบบ 3 เฟสสมดุล และการคำนวณเป็นระบบเฟสเดียว ผลการศึกษาที่สมบูรณ์มีความต้องการที่ทราบถึงตัวแปร 4 ตัว ที่แต่ละบัส k ใดๆในระบบ คือ

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

ก่อนการแก้ปัญหาก็จะต้องทราบค่าตัวแปรที่แต่ละบัส 2 ค่าก่อนและหลังจากได้แก้ปัญหการไหลโหลดจะมีผลทำให้ทราบค่าตัวแปร 2 ค่าที่เหลือ

โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดโหลดหรือบัสไว้ 3 ชนิดดังนี้

1. บัสสวิง (Swing Bus)

บัสนี้เป็นบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ในการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดและกำลังสูญเสียของระบบ บัสสวิงจะกำหนดค่าขนาดแรงดัน ($|V_k|$) และมุมเฟส (δ_v) เพื่อความสะดวกจะเลือกค่า $V \angle \delta_k = 1.0 \angle 0$ ซึ่งถือว่าเป็นเฟสอ้างอิงของระบบ

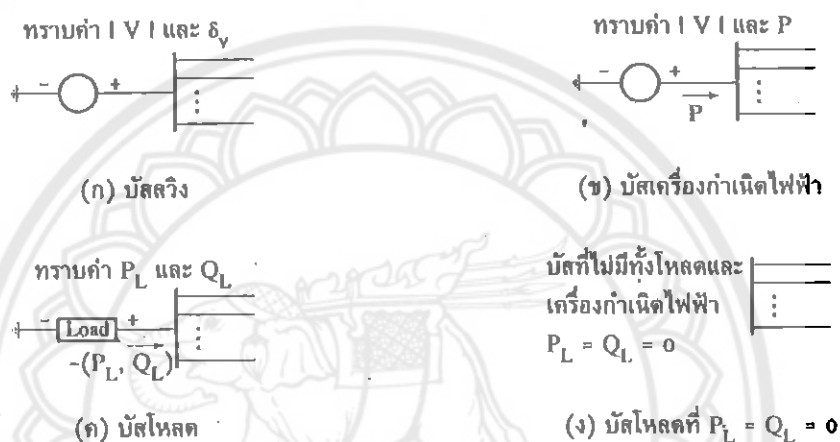
2. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P) และขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส ($|V_k|$) ส่วนค่า Q และ δ_v จะต้องคำนวณหา

3. บัสโหลด (Load Bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริง (P_L) และกำลังเสมือน (Q_L) ซึ่งเป็นกำลังตามความต้องการของโหลด โดยต้องกำหนดหาขนาดแรงดัน ($|V_k|$) และมุมเฟส δ ของบัส สำหรับบัสใดที่ไม่มีทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสนี้จะพิจารณาเป็นบัสโหลดเช่นเดียวกัน

จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในบัสแต่ละชนิดจะมีตัวแปรที่ทราบค่าเพียง 2 ตัว ส่วนตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัวจะต้องกำหนดหา โดยรูปที่ 2.1 ได้แสดงตัวแปรที่กำหนดในบัสแต่ละชนิด



รูปที่ 2.1 บัสชนิดต่างๆ โดยกำลังที่โหลดเข้าบัสถือว่าเป็นบวก

ในการตั้งปัญหาการไหลของโหลดนั้นจะต้องมีสมการของระบบ ซึ่งจะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับการเลือกวิธีการแก้ปัญหา โดยมีความเป็นไปได้ที่สามารถแนะนำได้ 3 วิธีดังนี้

1. สมการกระแสสามารถเขียนสมการที่บัส k ใดๆ ในเทอมของแรงดันที่ไม่ทราบค่า รูปแบบของสมการนี้คือ

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

วิธีนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายและจะได้สมการที่เป็นกลุ่มของสมการที่เป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้น แหล่งจ่ายกระแสที่ทราบค่า I_k สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ P_k , Q_k และ V_k ได้ ถ้ามีความจำเป็นสมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์โดยการใช้บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์

2. สมการแรงดันสามารถเขียนสมการที่บัส k ใดๆ ในเทอมของกระแสที่ไม่ทราบค่า รูปแบบทั่วไปของสมการนี้คือ

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

สมการที่ได้จะเป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้นเช่นเดียวกัน สมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ค่อยจะเหมาะสมกับการแก้ปัญหาการไหลของโหลด

3. การเขียนสมการของบัสในเทอมของกำลังจริงและกำลังเสมือน ในกรณีนี้สมการของกำลังที่ไหลเข้าหรือออกจากบัส k ใดๆ จะอยู่ในรูปแบบของสมการไม่เชิงเส้นคือ

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

จากตัวแปร 4 ตัวที่บัส k ใดๆ (P_k, Q_k, E_k และ δ_k) จะมีตัวแปรที่ทราบค่า 2 ตัวและไม่ทราบค่า 2 ตัว การแก้ปัญหาก็จะใช้วิธี Newton-Raphson ซึ่งเป็นวิธีที่ได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสำหรับแก้ปัญหากลุ่มของสมการที่ (2.3) [1, 2]

2.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง จะต้องทราบข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบก่อน เพื่อใช้ในการหากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบ

2.2.1 ข้อมูลสำหรับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

1. เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ (Y) ของระบบ
2. บัสสวิง (Swing Bus) คือบัสอ้างอิงของระบบที่บัสนี้จะกำหนดค่าแรงดัน และ มุมของแรงดันไว้
3. บัสโหลด (Load Bus) คือบัสที่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัสนี้จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน (P, Q)
4. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Bus) คือบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดัน (P, V)
5. อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานของสายส่ง เวลาเพิ่มอุปกรณ์เข้ามาในระบบ
6. ข้อมูลอื่นๆ เช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง พิกัดตัวเก็บประจุ ขนทานและการตั้งแท๊ปของหม้อแปลง

2.2.2 ค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V) และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า (δ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่ามาให้ หรือต้องคำนวณ ณ บัสต่างๆ ได้แก่ บัสสวิง บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และบัสโหลด ดังตารางที่ 2.1 [1, 2]

ตารางที่ 2.1 การแจกแจงค่าที่กำหนดให้และค่าที่ต้องคำนวณที่บัสต่างๆ

บัส	ค่าที่กำหนดมาให้		ค่าที่ต้องคำนวณ	
บัสสวิง (Swing Bus)	V	δ	P	Q
บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Gen. Bus)	P	V	Q	δ
บัสโหลด (Load Bus)	P	Q	V	δ

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการของวิธี Newton-Raphson

โดยที่สมการเขียนอยู่ในรูปแบบโพลาร์ได้ดังนี้

1. หาค่า P_k และ Q_k ที่ไหลเข้าไปในระบบที่ทุกๆบัส (ยกเว้นบัสสวิง) โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแรงดันทั้งขนาดและมุมสำหรับรอบที่ 1 ส่วนรอบต่อไปให้นำค่าแรงดันที่ได้จากรอบก่อนหน้ามาแทนค่าในสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)
2. คำนวณหา ΔP_k และ ΔQ_k (ยกเว้นบัสสวิง)
3. คำนวณหาตัวคูณในจาโคเบียนเมทริกซ์ โดยการแทนค่าแรงดันทั้งขนาดและมุมลงในสมการที่จะทำอนุพันธ์บางส่วน
4. ทำการลดรูปหรืออินเวอร์สจาโคเบียนเมทริกซ์ และคำนวณหาค่า $\Delta \delta_k$ และ $\Delta |V_k|$ ที่ทุกๆบัส
5. คำนวณค่าใหม่ของ δ_k และ $|V_k|$ โดยการรวม $\Delta \delta_k$ และ $\Delta |V_k|$ เข้ากับค่า δ_k และ $|V_k|$ ของรอบก่อนหน้า
6. กลับสู่ขั้นตอนที่ 1 และทำกระบวนการรอบนี้ซ้ำ โดยอิลิเมนต์ใดที่ต้องหาค่าซึ่งต้องเกี่ยวข้องกับแรงดันก็ให้ใช้แรงดันทั้งขนาดและมุมจากรอบล่าสุด สำหรับกระบวนการรอบจะต้องดำเนินการจนกระทั่งทุกค่าของ ΔP และ ΔQ หรือทุกค่าของ $\Delta \delta_k$ และ $\Delta |V_k|$ มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด

สำหรับค่าของ P และ Q ที่บัสสวิงและค่า Q ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)

2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดไฟฟ้ด้วยวิธี Newton-Raphson

ที่บัสโหลดบัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงและกำลังเสมือน ซึ่งเป็นกำลังโดยความต้องการของโหลด

- ทราบค่า P_i^{sch} และ Q_i^{sch}

กำหนดค่าแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่ากับบัสสวิง (Swing Bus) หรือกำหนด

$$|V_i^{(0)}| = 1 \text{ และ } \delta_i^{(0)} = 0$$

- หาค่า $P_i^{(k)}, Q_i^{(k)}$ จาก

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

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

- หาค่า $\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)}$ จาก

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

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

ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส

- ทราบค่า P_i^{sch}

- กำหนดค่ามุมเฟสของแรงดันบัสเริ่มต้น โดยกำหนดให้เท่ากับบัสสวิง (Swing Bus) หรือกำหนด $\delta_i^{(0)} = 0$

- หาค่า $P_i^{(k)}$ จากสมการ (2.4)

- หาค่า $\Delta P_i^{(k)}$ จากสมการ (2.6)

หาสมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์จาโคเบียน [J]

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

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

$$\text{หาค่า } \Delta\delta_i^{(k)}, \Delta|V_i^{(k)}| \text{ จาก } \begin{bmatrix} \Delta\delta_i^{(k)} \\ \Delta|V_i^{(k)}| \end{bmatrix} = [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} \end{bmatrix}$$

หาค่า $\delta_i^{(k+1)}, |V_i^{(k+1)}|$ จาก

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2.9)$$

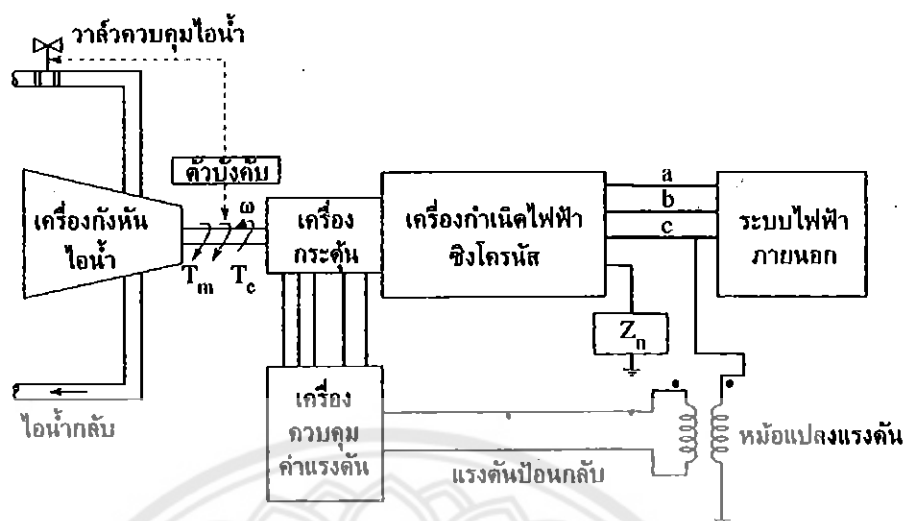
$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (2.10)$$

กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยใช้ $\delta_i^{(k+1)}, |V_i^{(k+1)}|$ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ และ $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ เมื่อ ε มีค่าน้อยมาก โดยทั่วไปแล้ว กำหนดให้ $\varepsilon = 2.5 \times 10^{-4}$ [1, 2]

2.5 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

องค์ประกอบพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบไปด้วยระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ภายนอก เครื่องต้นกำลัง และเครื่องกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

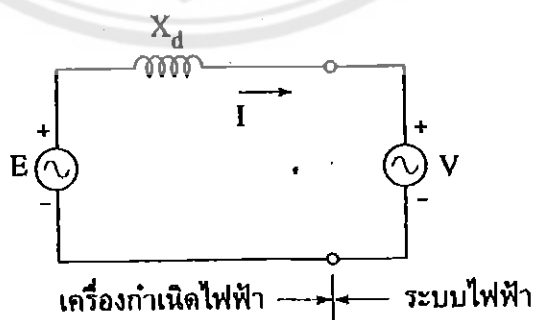
จากรูปที่ 2.2 เครื่องกังหันจะผลิตแรงบิดหรือทอร์ก T_m (Torque) ตามทิศทางของการหมุน โดยทอร์กนี้สามารถควบคุมได้โดยตรงจากการไหลของไอน้ำไปยังเครื่องกังหันด้วยตัวบังคับ (Governor) และวาล์วควบคุมไอน้ำ (Main Steam Valve) ซึ่งทอร์กนี้จะมีขนาดเท่ากับและต้านทานกับทอร์กแม่เหล็กไฟฟ้า T_e (Electromagnetic Torque) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กของโรเตอร์และสเตเตอร์ โดยทอร์กจะมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้า P_e ($P_e = T_e \omega_m$) ในการทำงานนั้นตัวบังคับจะตรวจสอบความเร็วของเพลลา (ω) ว่ามีการเบี่ยงเบนไปจากความเร็วที่ตั้งไว้ (ω_s) เท่าไร จึงพยายามปรับความเร็วของเพลลาให้เท่ากับความเร็วที่ได้ตั้งไว้ โดยการควบคุมตำแหน่งของวาล์วควบคุมไอน้ำ ซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็นความเร็วในสถานะอยู่ตัวลงที่และถือเป็นกรณีของระบบ 3 เฟสสมดุล ดังนั้นจึงให้ความสัมพันธ์ของทอร์กคือ $T_m = T_e$



รูปที่ 2.2 ระบบเครื่องกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องกระตุ้น

สำหรับแรงดันเหนี่ยวนำภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า E จะมีการควบคุม โดยเครื่องกระตุ้นและหม้อแปลงแรงดันทำการตรวจสอบแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและป้อนแรงดันกลับมายังเครื่องควบคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulator) ซึ่งเครื่องควบคุมค่าแรงดันจะเปรียบเทียบค่าแรงดันป้อนกลับกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้ตั้งไว้ จึงใช้ค่าความแตกต่าง (Error) ไปควบคุมการจ่ายของแรงดันของเครื่องกระตุ้นให้กับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจะได้ไม่เกิดความแตกต่างของแรงดันอ้างอิงและแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง

ถ้าพิจารณาให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลในสภาวะอยู่ตัวสามารถเขียนวงจรสมมูลลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.3 เมื่อประยุกต์ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนเป็นสมการที่มีหน่วยเป็น per unit ได้คือ

$$E = jX_d I + V \quad (2.11)$$

หรือ

$$I = \frac{E - V}{jX_d} \quad (2.12)$$

สำหรับกำลังเชิงซ้อน

$$S = VI^* = V \frac{E - V}{jX_d} \quad (2.13)$$

เมื่อ V คือ $V \angle 0^\circ$ คือแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

E คือ $E \angle \delta$ คือแรงดันเหนี่ยวนำภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

δ คือมุมกำลัง

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) จะได้

$$\begin{aligned} S &= V \left[\frac{E}{X_d} \angle \delta - 90^\circ + j \frac{V^2}{X_d} \right] \\ &= \frac{VE}{X_d} \angle 90^\circ - \delta - j \frac{V^2}{X_d} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{VE}{X_d} \cos \angle 90^\circ - \delta + \frac{VE}{X_d} \sin \angle 90^\circ - \delta \right] - j \frac{V^2}{X_d} \\ &= \frac{VE}{X_d} \sin \delta + j \left[\frac{VE}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

เมื่อกำลังจริงคือ

$$P = \operatorname{Re}[S] = \frac{VE}{X_d} \sin \delta \quad (2.16)$$

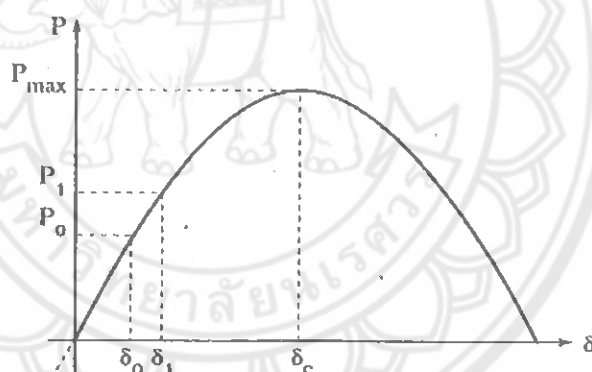
และกำลังเสมือนคือ

$$Q = \operatorname{Im}[S] = \frac{VE}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \quad (2.17)$$

สำหรับกำลังจริง P จากสมการที่ (2.16) คือ P_m ที่ได้จากการเปลี่ยนรูปกำลังกลเป็นกำลังไฟฟ้า ซึ่งสมการที่ (2.16) จะใช้อธิบายปฏิกิริยาของระบบควบคุมระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเครื่องกังหันและเครื่องกระตุ้น โดยเริ่มพิจารณากำลังจริงที่ได้รับจากการปรับวาล์วควบคุมไอน้ำเพียงอย่างเดียว ถ้ามีการเปิดวาล์วมากนั่นคือ เครื่องกังหันจะผลิตทอร์คมาก ดังนั้นกำลังกลจะเพิ่มมากขึ้นด้วย และจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ถ้ากำหนดให้ E , V และรีแอกแตนซ์ X_d มีค่าคงที่ ดังนั้นตัวแปรเพียงตัวเดียวที่ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นคือ มุมกำลัง δ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจาก P_0 ถึง P_1 จะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของมุมกำลังจาก δ_0 และ δ_1 อย่างไรก็ตามการเพิ่มกำลังไฟฟ้ามีขีดจำกัดอยู่ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่งได้แก่ P_{max} ซึ่งเป็นขีดจำกัดของเสถียรภาพแบบอยู่ตัวใช้อ้างอิงโดยมีสมการเป็น

$$P_{max} = \frac{VE}{X_d} \sin \delta_c = \frac{VE}{X_d} \quad (2.18)$$

เมื่อ $\delta_c = 90^\circ$ เรียกว่า มุมกำลังวิกฤต (Critical Power Angle)



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า P และมุม δ

ถ้ามีการเพิ่มกำลังกล P_m ต่อไปโดยมุม δ ไม่เกินค่า 90° จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารที่ซึ่งใครในช้กับระบบได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยทั่วไปจะทำงานโดยมีมุมกำลังขนาดเล็ก (ประมาณ 20°) จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าการตั้งวาล์วควบคุมไอน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการไหลของกำลังไฟฟ้าและมุม δ

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมส่วนที่สองกล่าวคือตั้งค่าของเครื่องควบคุมค่าแรงดันให้สูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันเหนี่ยวนำภายในมีค่าเพิ่มขึ้น จากสมการที่ (2.17) สมมติให้ค่าแรงดันรีแอกแตนซ์และมุม δ มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังเสมือนจะเพิ่มขึ้นตามด้วยเหตุนี้ ทำให้การตั้ง

ค่าของเครื่องควบคุมแรงดันจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันเหนี่ยวนำและกำลังเสมือนที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.5.1 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน

ในกรณีที่ระบบไม่เสถียรภาพมุม δ จะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาและเครื่องจักรซึ่งโครนัสก็จะหลุดจากซิงโครไนซ์ แต่ในกรณีของระบบที่เสถียรภาพมุม δ จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการแกว่งไปมาและในที่สุดก็จะหยุดลงที่ ซึ่งจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าระบบที่เสถียรภาพนั้นที่บางช่วงของเวลาจะต้องมี $\frac{d\delta}{dt} = 0$

ถ้าพิจารณาดิฟเฟอเรนเชียล $\frac{dx^2}{dt}$ เราจะได้

$$\frac{dx^2}{dt} = 2x \frac{dx}{dt}$$

ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = 2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

หรือ

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d(d\delta/dt)^2}{2d\delta} \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ (2.19) ลงในสมการ $M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$ จะได้

$$Md \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = 2(P_m - P_e)d\delta \quad (2.20)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.20) ดังนั้น

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.21)$$

หรือ

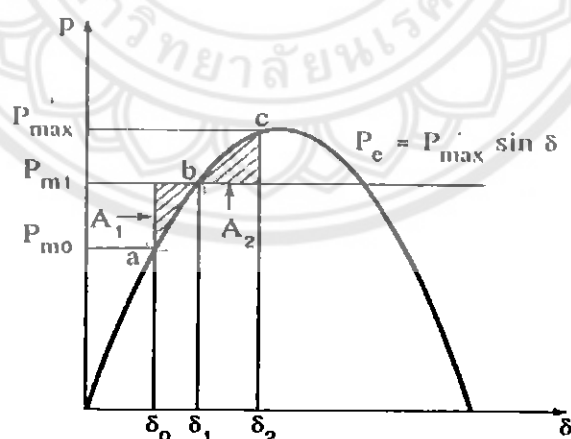
$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.22)$$

เมื่อ δ_0 คือ มุมกำลังเริ่มต้นก่อนที่โรเตอร์จะเกิดการแกว่งเพราะสาเหตุจากการรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

จากหลักเกณฑ์ของเสถียรภาพเราจะได้ $\frac{d\delta}{dt} = 0$ (ที่เวลาในบางช่วง) นั้นหมายถึง

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.23)$$

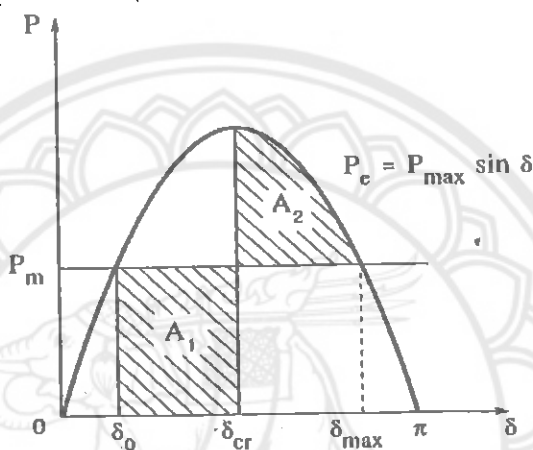
จากสมการที่ (2.23) เป็นเงื่อนไขสำหรับการเสถียรภาพโดยการพิจารณาจากรูปที่ 2.5 ถ้าระบบเริ่มต้นจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่มุม δ_0 แต่เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นกับระบบจะทำให้ต้องมีการจ่ายพลังงานเพิ่มขึ้นโดยมุม δ เลื่อนไปสู่มุม δ_0 ดังนั้นจึงต้องเร่งโรเตอร์จากมุม δ_0 เลื่อนไปสู่มุม δ_1 เพื่อให้เข้าสู่จุดเสถียรภาพ โดยใช้พลังงานในการเร่งโรเตอร์เท่ากับพื้นที่ A_1 แต่โรเตอร์ไม่สามารถหยุดที่มุม δ_1 ได้เนื่องจากความเฉื่อยของส่วนที่หมุน จึงทำให้มุม δ เคลื่อนที่ไปสู่มุม δ_2 ($P_{m1} < P_{e2}$) ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการหน่วงโรเตอร์กลับมาที่มุม δ_1 โดยใช้พลังงานเท่ากับพื้นที่ A_2 จึงต้องทำให้เกิดเสถียรภาพ ตามที่กล่าวมานี้จะเป็นหลักเกณฑ์พื้นที่ที่เท่ากันสำหรับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวคือพื้นที่บวก (หรือพลังงานที่ใช้เร่งโรเตอร์) ต้องเท่ากับพื้นที่ลบ (หรือพลังงานที่ใช้หน่วงโรเตอร์)



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าในระบบจาก P_{m0} ไปเป็น P_{m1} ทำให้มีการเร่งและหน่วงโรเตอร์เพื่อเข้าสู่จุดเสถียรภาพ

2.5.2 มุมเคลียร์วิกฤต

เมื่อมีการรบกวนหรือเกิดการลัดวงจรขึ้นกับระบบไฟฟ้าจะมีผลทำให้มุม δ มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของกำลังที่ทำให้เกิดความเร่ง ซึ่งถ้ามุม δ มีค่าสูงมากระบบก็จะเข้าสู่สภาวะไม่เสถียรภาพ ถ้าต้องการให้ระบบยังคงอยู่ในสภาวะเสถียรภาพและสอดคล้องกับเงื่อนไขของหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันเราจึงจำเป็นต้องแยกฟลัดด์ออกก่อนที่จะระบบจะมีมุม δ เกินค่าวิกฤตค่าหนึ่งซึ่งเรียกมุมนี้ว่า มุมเคลียร์วิกฤต δ_{cr} ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเวลาเคลียร์วิกฤตที่สอดคล้องกันสำหรับแยกฟลัดด์ออกจากระบบเรียกว่า เวลาเคลียร์วิกฤต t_{cr}



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งแสดงกำลังไฟฟ้ามุม δ แสดงมุมเคลียร์วิกฤต δ_{cr} และพื้นที่ A_1 เท่ากับพื้นที่ A_2

ในกรณีเฉพาะรูปที่ 2.6 เราสามารถหามุมเคลียร์วิกฤตและเวลาเคลียร์วิกฤตได้ดังนี้
พื้นที่สี่เหลี่ยม A_1 จะได้

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \quad (2.24)$$

ในขณะที่พื้นที่ A_2 คือ

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_e - P_m) d\delta \\ &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \\ A_2 &= P_{max}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{max}) - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน ดังนั้นพื้นที่ $A_1 = A_2$ โดยที่

$$\begin{aligned} P_{max}(\cos\delta_{cr} - \cos\delta_{max}) - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) &= P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \\ P_{max}(\cos\delta_{cr} - \cos\delta_{max}) &= P_m(\delta_{max} - \delta_0) \end{aligned} \quad (2.26)$$

ดังนั้นจะได้

$$\cos\delta_{cr} = \frac{P_m}{P_{max}}(\delta_{max} - \delta_0) + \cos\delta_{max} \quad (2.27)$$

สำหรับเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและมุม δ เป็นฟังก์ชันไซน์ซอซอด์ ดังนั้นจะได้

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \text{ เรเดียสทางไฟฟ้า} \quad (2.28)$$

และ

$$P_m = P_{max}\sin\delta_0 \quad (2.29)$$

เมื่อแทนค่า

$$\cos\delta_{cr} = \frac{P_{max}\sin\delta_0}{P_{max}}(\pi - \delta_0 - \delta_0) + \cos(\pi - \delta_0)$$

และ

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0)\sin\delta_0 - \cos\delta_0] \quad (2.30)$$

จากสมการแกว่งจะได้

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.31)$$

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่เวลา $t = 0$ ในทันทีทันใดนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก P_e จะตกลงเป็นศูนย์ แต่กำลังกลขาเข้าที่เพลารอเตอร์ยังคงมีอยู่ซึ่งจะเป็นกำลังที่ทำให้เกิดความเร่งนั่นเอง ดังนั้นในเหตุการณ์ช่วงเวลาดังกล่าวเราจะได้

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \quad (2.32)$$

และ

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} P_m = \frac{2\pi f}{2H} P_m = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2.33)$$

ดังนั้นในขณะที่เกิดการลัดวงจรความเร็วของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเราสามารถหาค่าความเร็วนี้ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.33) จะได้

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt + c_1 \quad (2.34)$$

เนื่องจากสภาวะก่อนเกิดการลัดวงจรระบบมีความเป็นเสถียรภาพ หรือ $\frac{d\delta}{dt} = 0$ ดังนั้นเมื่อเริ่มเกิดการลัดวงจรที่ $t = 0$ ค่า C_1 ในสมการที่ (2.34) จึงเท่ากับศูนย์ ถ้าเราต้องการหามุม δ ที่เลื่อนออกไปจากมุม δ_0 เนื่องจากได้รับความเร่งที่โรเตอร์ จึงสามารถทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.34) เทียบกับเวลาจะได้

$$\delta = \int \frac{\omega_s}{2H} P_m t dt = \frac{\omega_s}{4H} P_m t^2 + c_2 \quad (2.35)$$

ขณะที่เริ่มเกิดการลัดวงจรที่เวลา $t=0$

$$\delta = \frac{\omega_s}{4H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (2.36)$$

มุม δ เป็นตำแหน่งเชิงมุม ของโรเตอร์ที่เลื่อนออกไป เนื่องจากความเร่งนั่นเอง
ถ้าเรากำหนดหามุมเคลียร์ริงวิกฤตจากสมการที่ (2.30) ได้แล้วและนำมาแทนค่าทางซ้ายมือของสมการที่ 2.36 จะคำนวณหาเวลาเคลียร์ริงวิกฤตได้เช่นกันคือ

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s}{4H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (2.37)$$

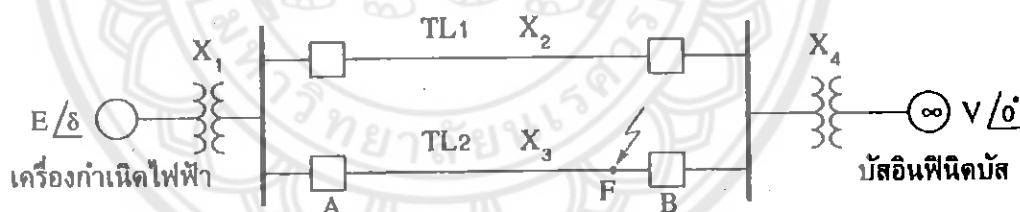
เมื่อได้ δ_{cr} เราจะสามารถหาค่า t_{cr} ได้จากสมการ

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.38)$$

2.5.3 การประยุกต์ใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน

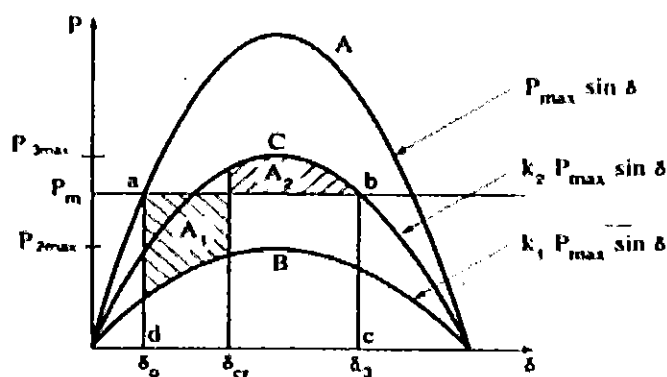
ในการศึกษาผลกระทบของการลัดวงจรที่มีต่อเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น สิ่งหนึ่งที่สนใจก็คือเวลาเคลียร์ริงวิกฤต (ไซเคิลหรือวินาที) ซึ่งในช่วงเวลานี้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องแยกสายส่งที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบให้ได้ แต่ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถทำงานสำเร็จภายในช่วงเวลาดังกล่าวระบบก็จะเกิดสถานะไม่เสถียรภาพ สำหรับหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันไม่ใช่เป็นวิธีการหาเวลาเคลียร์ริงวิกฤต แต่เป็นวิธีการที่ใช้หามุมเคลียร์ริงวิกฤตซึ่งมันก็จะสอดคล้องกับเวลาด้วยเช่นกันดังได้แสดงให้เห็นในหัวข้อก่อนหน้านี้ ในขณะที่ชนิดของการลัดวงจรที่นำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพแบบทรานเซียนต์ส่วนมากแล้วจะเป็นการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟส และที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันสามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 เครื่อง หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เครื่องกับอีก 1 อินฟินิตีบัสเท่านั้น อย่างไรก็ตามหลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้เราสามารถเข้าใจถึงเสถียรภาพแบบทรานเซียนต์ได้เป็นอย่างดี

1. กรณีเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟส ที่สายส่งด้านใดด้านหนึ่ง



รูปที่ 2.7 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่สายส่งด้านใดด้านหนึ่ง

พิจารณาแผนภาพเส้นเดียวตามรูปที่ 2.7 เป็นระบบไฟฟ้าที่มีสายส่ง 2 วงจรต่อขนานกัน โดยที่ปลายสายส่งต่อกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสสวิง เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟส ที่ปลายสายส่งหนึ่งตรงจุด F ในทันทีที่ทันใดนั้นเองกำลังไฟฟ้าขาออก P_e จะตกลงเป็นศูนย์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ A และ B จะทำงานโดยปลดสายส่ง TL2 เพื่อแยกฟอลต์ออกจากระบบ หลังจากนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะส่งพลังไฟฟ้าเข้าระบบโดยผ่านสายส่ง TL1 ดังที่ได้กล่าวมานี้จะแสดงเป็นลำดับขั้นตอนได้ 3 เงื่อนไข ตามรูปที่ 2.8 ดังนี้



รูปที่ 2.8 กราฟขณะการลัดวงจรตามรูปที่ 2.7: A ก่อนเกิดฟอลต์, B ขณะเกิดฟอลต์ และ C หลังแยกฟอลต์ออกจากระบบ

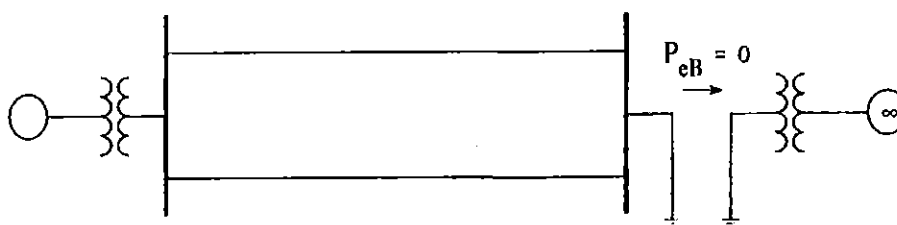
1. ขั้นตอนก่อนเกิดการลัดวงจรแสดงด้วยเส้นโค้ง A ซึ่งถือว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ ดังนั้น $P_e = P_m$ และสามารถหาค่า P_e ได้จากสมการ

$$P_{eA} = \frac{EV}{X_{eq}} \sin \delta \quad (2.39)$$

โดยที่

$$X_{eq} = X_1 + X_4 + \frac{X_2 X_3}{X_2 + X_3}$$

2. ขั้นตอนขณะเกิดการลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟส ขึ้นที่จุด F จะเสมือนกับว่าได้แยกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้น กำลังไฟฟ้าขาออก $P_e = 0$ พื้นที่ A1 ในรูปที่ 2.8 จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์ที่ทำให้เกิดความเร่งและมีการเลื่อนมุม δ ไปตำแหน่ง δ_1



รูปที่ 2.9 ระบบไฟฟ้าในขั้นตอนเกิดการลัดวงจร

3. ขั้นตอนหลังจากแยกฟอลต์ออกจากระบบ ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ A และ B สามารถแยกได้ทันที ระบบจะได้รับพลังงานไฟฟ้าโดยผ่านสายส่ง TL1 ตามเส้นทาง C ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$P_{ec} = \frac{EV}{X_1 + X_2 + X_4} \quad (2.40)$$

หลังจากแยกสายส่ง TL2 ออกจากระบบแล้วโรเตอร์ยังคงได้รับความเร่งจนมุม δ เคลื่อนออกไปเกินมุม δ_1 จนกระทั่งถึงมุม δ_2 ซึ่งในช่วงนี้กำลังไฟฟ้าขาออก P_e มีค่าสูงกว่ากำลังกลขาเข้า P_m ตามพื้นที่ A_2 โดยที่เราสามารถหาค่าพื้นที่ A_1 และ A_2 ได้จาก

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (p_m - p_{2max} \sin \delta) d\delta \quad (2.41)$$

และ

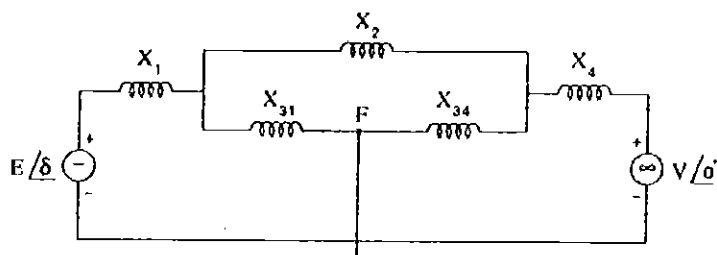
$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_2} (p_{3max} \sin \delta - p_m) d\delta \quad (2.42)$$

สำหรับการคำนวณหาค่า δ_{cr} นั้น เราจะใช้สมการที่ (2.41) เท่ากับสมการ (2.42) จะได้

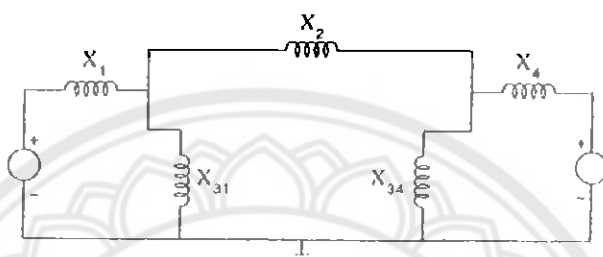
$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{2max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_2} (P_{3max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.43)$$

2. กรณีเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟสที่ตำแหน่งใดๆ บนสายส่ง

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร 3 เฟสที่ตำแหน่งใดๆ บนสายส่งของระบบไฟฟ้า ในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ามีอิมพีแดนซ์บางส่วนของสายส่งต่อระหว่างบัสกับจุดการลัดวงจรคงแสดงเป็นรีแอกแตนซ์ไออะแกรมได้ตามรูปที่ 2.10



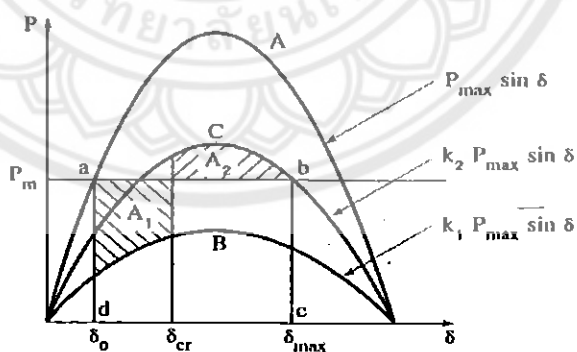
(n)



(ข)

รูปที่ 2.10 รีแอกแตนซ์ไอโซแกรมของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.7 เมื่อเกิดการลัดวงจร
แบบสมมาตร 3 เฟสที่จุดใดๆ บนสายส่ง TL2

ดังนั้นถ้าประยุกต์หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน เราสามารถสร้างเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างกำลังและมุม δ ได้ตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันในการเคลียร์ฟอลต์เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่
ระบบสายส่งพลังงานไฟฟ้าโดยพื้นที่ A_1 และ A_2 มีค่าเท่ากัน

จากรูปที่ 2.11 กำหนดให้เส้นโค้ง A คือกำลังไฟฟ้าของระบบก่อนเกิดการลัดวงจร สำหรับ
ช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจรแสดงด้วยเส้นโค้ง B และเส้นโค้ง C เป็นกำลังไฟฟ้าของระบบหลังจาก

แยกพอลต์ออกจากระบบแล้ว ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงเหตุการณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$A = P_{max} \sin \delta \quad (2.44)$$

$$B = k_1 A = k_1 P_{max} \sin \delta \quad (2.45)$$

$$C = k_2 A = k_2 P_{max} \sin \delta \quad (2.46)$$

โดยที่ $k_1 < k_2$

สำหรับเงื่อนไขของการรักษาสภาวะเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้นต้องมีพื้นที่ $A_1 = A_2$ ดังนั้นถ้าใช้เงื่อนไขดังกล่าวเราจะได้

$$(\delta_{max} - \delta_0) P_m = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} B d\delta + \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} C d\delta \quad (2.47)$$

แทนค่า B จากสมการที่ (2.45), C จากสมการที่ (2.46) และ $P_m = P_{max} \sin \delta_0$ ลงสมการที่ (2.47) ทำการอินทิเกรตแล้วจัดเรียงเทอมใหม่ ในที่สุดจะได้

$$\cos \delta_{cr} = \frac{1}{k_2 - k_1} [(\delta_{max} - \delta_0) \sin \delta_0 - k_1 \cos \delta_0 + k_2 \cos \delta_{max}] \quad (2.48)$$

จากรูปที่ 2.11 จะได้

$$P_m = P_{max} \sin \delta_0 = k_2 P_{max} \sin \delta_{max} = k_2 P_{max} \sin(\pi - \delta_{max}) \quad (2.49)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.49) จะได้

$$\sin \delta_0 = k_2 \sin(\pi - \delta_{max}) \quad (2.50)$$

เมื่อกำหนดค่า k_1 , k_2 และ δ_0 มาให้เราก็สามารถคำนวณหามุมเคลียร์ริงวิกฤตได้จากสมการที่ (2.48) และสมการที่ (2.50) สำหรับสมการในการคำนวณเวลาหาเคลียร์ริงวิกฤตในกรณีนี้ไม่สามารถจัดเป็นรูปแบบได้ อย่างไรก็ตามการหาเวลาเคลียร์ริงวิกฤตสามารถทำได้ถ้ามีเส้นโค้งแกว่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม δ กับเวลา t [1, 2]

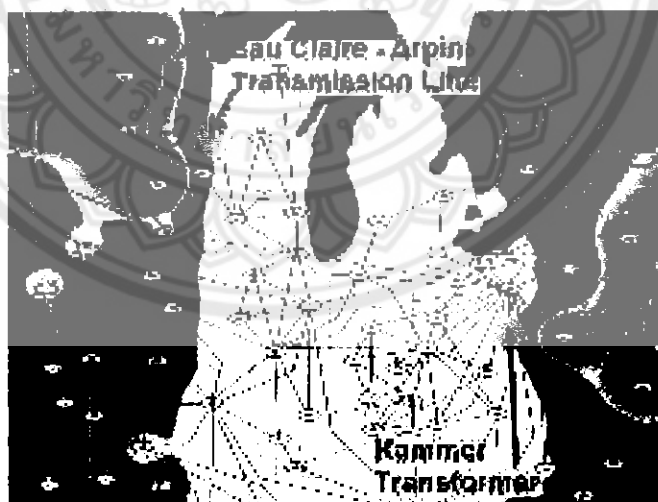
2.6 โปรแกรม PowerWorld

โปรแกรม PowerWorld คือโปรแกรมจำลองการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถจำลองลักษณะของการเกิดฟอลต์แบบต่างๆ สามารถวิเคราะห์การไหลของกำลังและคำนวณการไหลของกำลังได้ด้วยวิธี Newton-Raphson โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ครบ ทำให้เราสามารถวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ และปรับค่าของระบบ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความเฉื่อย เพื่อให้เกิดเสถียรภาพได้เร็วขึ้น

โปรแกรม PowerWorld เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการมองเห็นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับนักวางแผน นักการทดลองด้านกำลัง ผู้ประกอบ นักศึกษาและบุคคลอื่นที่ต้องการการเข้าถึงข้อมูลระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ใช้งานง่าย

การสร้างระบบไฟฟ้าของเราจะแสดงการโต้ตอบและเครื่องมือการนำเสนอที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยให้องค์กรของคุณที่มีความต้องการที่หลากหลายจากงานนำเสนอและในการศึกษาเพื่อการตลาดให้กับลูกค้าและเตรียมการสำหรับการพิจารณาให้ถูกต้อง

โปรแกรม PowerWorld สามารถสร้างระบบการจำลองระบบไฟฟ้าแรงดันสูงและการวิเคราะห์ หลักของซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาทรงพลังที่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การไหลของพลังงานในระบบที่มีมากถึง 100,000 บัส



รูปที่ 2.12 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในระบบ 100,000 บัส [5]

การจำลองประกอบด้วย

1. ตัวเลือกการแก้ปัญหการไหลของกำลังจำนวนมาก
2. การไหลแรงดันไฟฟ้าและการคำนวณการสูญเสีย

3. การวิเคราะห์ความผิดปกติของแบบสมดุลและไม่สมดุล
4. เครื่องมือในการวิเคราะห์อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพและหลากหลายกรณี
5. และตัวเลือกเครื่องมืออื่นๆอีกมากมายเพื่อให้ตรงกับกรวิเคราะห์ระบบกำลังที่ต้องการ
6. การรักษาความปลอดภัยที่จำกัด (Optimal Power Flow; OPF)
7. การรักษาความปลอดภัยที่จำกัด (Security Constrained OPF; SCOPF)
8. การสำรอง (Reserves; OPF)
9. ความสามารถในการโอน (Transfer Capability; ATC)
10. การประมวลผลโครงสร้างแบบบูรณาการ (Integrated Topology Processing)
11. เครื่องมือการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน
เปรียบเทียบกับแรงดัน (Real and Reactive Power)
12. เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability)
13. การคำนวณการกระจาย (Distributed Computing)
14. เซอร์เวอร์อัตโนมัติ (Automation Server SimAuto)

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

รีทรีฟเวอร์และซอฟต์แวร์ OPS-X เป็นเครื่องมือแสดงข้อมูลเรียลไทม์ใช้สำหรับการดำเนินการระบบ, นักวิเคราะห์ระบบและนักการตลาดด้านไฟฟ้าเพื่อการรับและวิเคราะห์ข้อมูล ผู้ใช้สามารถนำเข้าข้อมูลเรียลไทม์ เช่น Geographic Information System (GIS) ใช้ในการแสดงข้อมูลสภาพอากาศที่ทันสมัย ซึ่ง GIS นำมาใช้สนับสนุนข้อมูล เช่น ห้องสมุดที่สมบูรณ์และข้อมูลชายแดน โดยเครื่องมือการสร้างแผนภาพแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.13 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์ข้อมูลชายแดน [5]

โปรแกรม PowerWorld เป็นเครื่องจำลองขั้นตอนของเวลา (รวมทั้งพื้นฐานของโปรแกรมจำลองและรีทรีฟเวอร์) ช่วยให้สามารถระบุเงื่อนไขการดำเนินงานและการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับ ณ ตำแหน่งของเวลา



รูปที่ 2.14 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [5]

โปรแกรม PowerWorld ใช้กราฟฟิกความละเอียดสูงไดอะแกรมบรรทัดเดียวทางภูมิศาสตร์ที่มีการสำรวจได้อย่างง่ายดายและมีการเชื่อมโยง 3 มิติรูปทรงแผนภูมิวงกลมขนาดแบบไดนามิกและการสร้างภาพแผนภาพการไหลของระบบที่เหมือนจริง



รูปที่ 2.15 การใช้โปรแกรม PowerWorld วิเคราะห์แบบ 3 มิติ [5]

15732876

ร.ร.

พ 23/17

2553

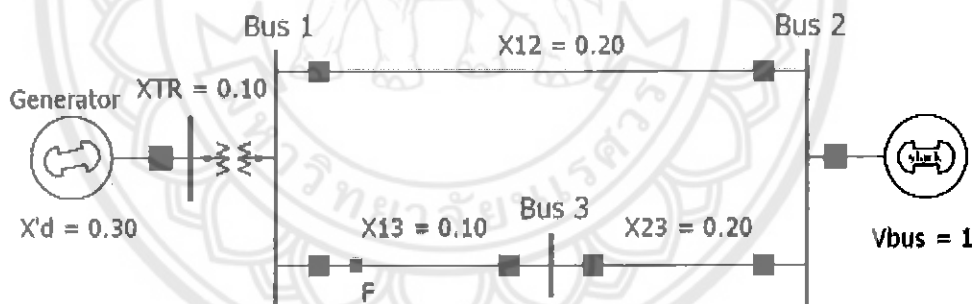
บทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

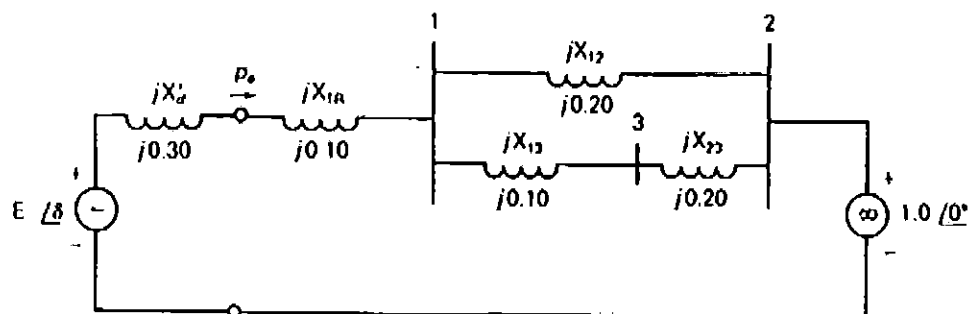
ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้หลักเกณฑ์พื้นที่เท่ากันจะสามารถใช้กับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กเท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ เนื่องจากความซับซ้อนในการแก้สมการ อย่างไรก็ตามวิธีวิเคราะห์โดยพื้นที่เท่ากันจะช่วยให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ในบทนี้จะศึกษาระบบ 3 เฟส 4 บัส เพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาขนาดมุมเฉลี่ยรั้งวิกฤต (δ_{cr}) และเวลาเฉลี่ยรั้งวิกฤต (t_{cr}) เพื่อคงเสถียรภาพของระบบไว้ได้

3.1 ระบบศึกษา 4 บัส

ระบบ Single Line 3 Phase มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลง 1 ตัวและสายส่งไฟฟ้า 4 เส้นผ่านไปยังบัสสวิงโดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของแต่ละตัวอยู่ในรูปของ per unit และบัสสวิงมีค่าเป็น 1.0 per unit ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 0.95 ถ้าหาลัง โดยมีการลัดวงจรที่สายส่งระหว่างบัส 1 และบัส 3



รูปที่ 3.1 ระบบศึกษา 4 บัส



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูล 4 บัส

วิธีการคำนวณ

จากวงจรสมมูลจะได้

$$\begin{aligned} X_{eq} &= X'_d + X_{TR} + X_{12} \parallel (X_{13} + X_{23}) \\ &= 0.30 + 0.10 + 0.20 \parallel (0.10 + 0.20) \\ &= 0.520 \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่ากระแสและแรงดันภายในระบบ

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{V_{bus} (\text{p.f.})} \angle -\cos^{-1}(\text{p.f.}) \\ &= \frac{(1.0)}{(1.0)(0.95)} \angle -\cos^{-1}(0.95) \\ &= 1.05263 \angle -18.195^\circ \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= E \angle \delta = V_{bus} + jX_{eq}I \\ &= 1.0 \angle 0^\circ + (j0.520)(1.05263 \angle -18.195^\circ) \\ &= 1.0 \angle 0^\circ + 0.54737 \angle 71.805^\circ \\ &= 1.1709 + j0.5200 \\ &= 1.2812 \angle 23.946^\circ \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

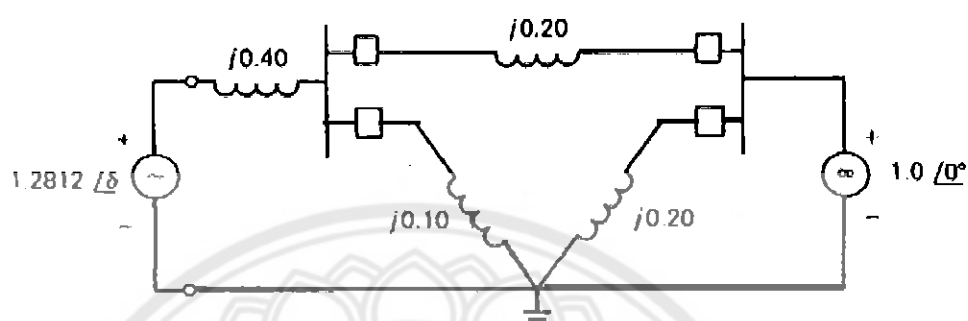
สมการกำลังไฟฟ้าที่ส่งโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังบัสสวิตช์ขณะทำงานปกติ เขียนแทนด้วย P_{e1} จากสมการที่ (2.39) จะได้

$$\begin{aligned} P_{e1} &= \frac{EV_{bus}}{X_{eq}} \sin \delta \\ &= \frac{(1.2812)(1.0)}{0.520} \sin \delta \\ &= 2.4638 \sin \delta \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

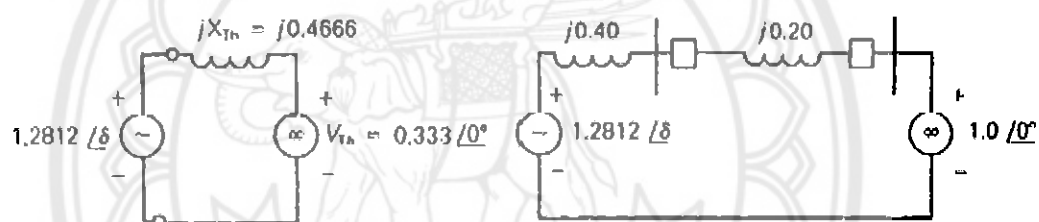
ในสภาวะขณะเกิดการลัดวงจรที่สายส่งระหว่างบัส 1- บัส 3 ทำการแยกฟอลต์ โดยการเปิดหม้อแปลงไฟฟ้าที่สายส่งระหว่างบัส 1 - บัส 3 และสายส่งระหว่างบัส 1 - บัส 3 โดยหากการลัดวงจรโดยใช้ทฤษฎีบทของเทเวนินจะได้

$$\begin{aligned} X_{Th} &= 0.40 + 0.20 \parallel 0.10 \\ &= 0.46666 \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{Th} &= 1.0 \angle 0^\circ \left[\frac{X_{13}}{X_{13} + X_{12}} \right] \\
 &= 1.0 \angle 0^\circ \frac{0.10}{0.30} \\
 &= 0.33333 \angle 0^\circ \quad \text{per unit}
 \end{aligned}$$

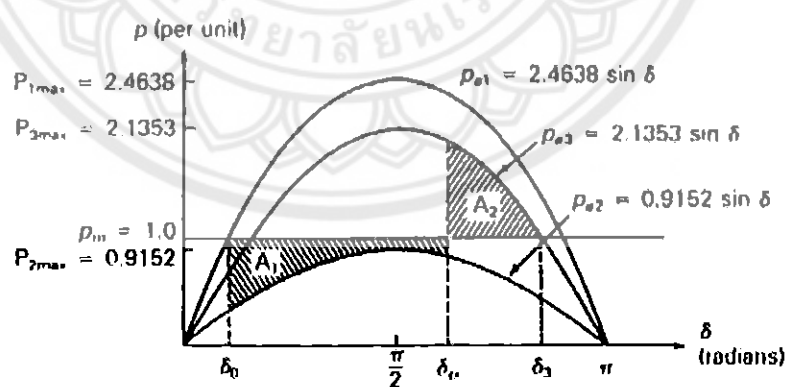


(n) Flaulted Network



(ข) Thevenin Equivalent Of The Faulted Network

(ก) Postfault Conditions



(ง) P - δ

รูปที่ 3.3 วงจรขณะเกิดการลัดวงจรและกราฟแสดงพื้นที่เท่ากันของ A1 และ A2

จากรูปที่ 3.3 (ข) สมการกำลังไฟฟ้าที่ส่งโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังบัสสวิงระหว่างที่เกิดการลัดวงจร เขียนแทนด้วย P_{e2} จากสมการที่ (2.39) โดยใช้ค่าขณะเกิดการลัดวงจรจะได้

$$\begin{aligned}
 P_{e2} &= \frac{EV_{Th}}{X_{Th}} \sin \delta \\
 &= \frac{(1.2812)(0.3333)}{0.46666} \sin \delta \\
 &= 0.9152 \sin \delta \quad \text{per unit}
 \end{aligned}$$

หลังเกิดการลัดวงจรแสดงในรูปที่ 3.3 (ค) หม้อแปลงไฟฟ้าเปิดและต่อวงจรใหม่ที่สายส่งระหว่างบัส 1 – บัส 3 และสายส่งระหว่างบัส 2 - บัส 3 จากรูป หลังเกิดการลัดวงจรกำลังไฟฟ้าเขียนแทนด้วย P_{e3} จากสมการที่ (2.40) จะได้

$$\begin{aligned}
 P_{e3} &= \frac{(1.2812)(1.0)}{0.60} \sin \delta \\
 &= 2.1353 \sin \delta \quad \text{per unit}
 \end{aligned}$$

กราฟ $P - \delta$ พื้นที่ A_1 เป็นพื้นที่เร่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพื้นที่ A_2 เป็นพื้นที่ชะลอตัวลงสอดคล้องกับความสำเร็จในระบบ แสดงในรูปที่ 3.3 (ง) จากสมการที่ (2.41) และสมการที่ (2.42) จะได้

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{2max} \sin \delta) d\delta \\
 A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_3} (P_{3max} \sin \delta - P_m) d\delta
 \end{aligned}$$

โดยพื้นที่ A_1 เท่ากับพื้นที่ A_2 จะได้

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{2max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_3} (P_{3max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

หลังจากแทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 \int_{0.4179}^{\delta_{cr}} (1.0 - 0.9152 \sin \delta) d\delta &= \int_{\delta_{cr}}^{2.6542} (2.1353 \sin \delta - 1.0) d\delta \\
 (\delta_{cr} - 0.4179) + 0.9152(\cos \delta_{cr} - \cos 0.4179) &= 2.1353(\cos \delta_{cr} - \cos 2.6542) - (2.6542 - \delta_{cr}) \\
 \cos \delta_{cr} &= -\frac{0.4868}{1.2201} \\
 \delta_{cr} &= 1.9812 \text{ radians} = 113.5^\circ
 \end{aligned}$$

ถ้าเกลิบ์ฟอลต์ก่อน $\delta = \delta_{cr} = 113.5^\circ$ ยังคงเสถียรภาพ ถ้าเกลิบ์ฟอลต์หลัง 113.5° จะสูญเสียเสถียรภาพ

เมื่อได้ δ_{cr} จะสามารถคำนวณหาค่า t_{cr} จากสมการที่ (2.38) จะได้

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

โดยแทนค่า $H=5$ จะได้

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4(5)(1.9812 - 0.4179)}{(2\pi 60)(1.0)}}$$

$$t_{cr} = 0.2880 \text{ s}$$

เมื่อเกิดลัดวงจรต้องแยกฟอลต์ออกก่อนที่จะมีมุมเกินค่าเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤต จากการคำนวณค่าตัวแปรของระบบ 4 บัส ใช้เครื่องคิดเลขเปรียบเทียบกับ โปรแกรม เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับค่าที่ได้จาก โปรแกรม จึงสามารถเชื่อถือได้ว่าค่าที่ได้จาก โปรแกรมมีความถูกต้องและนำโปรแกรม PowerWorld ไปใช้ในการออกแบบและคำนวณระบบที่ใหญ่ขึ้นได้

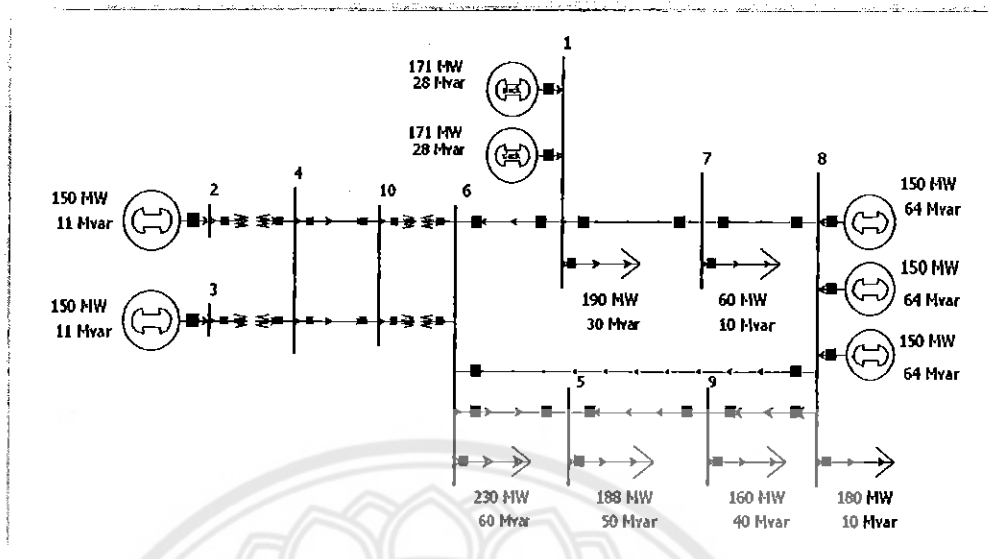
มุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตจะมีค่าน้อย เมื่อขณะเกิดการลัดวงจรกำลังการผลิตหรือส่งไฟฟ้ามีค่าลดลงมากอย่างทันทีทันใด จึงจำเป็นต้องเคลียร์ฟอลต์อย่างรวดเร็ว

มุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตจะมีค่ามาก เมื่อขณะเกิดการลัดวงจรกำลังการผลิตหรือส่งไฟฟ้ามีค่าลดลงน้อย จึงยังมีเวลาในการเคลียร์ฟอลต์ ส่งผลให้มุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตจะมีค่ามาก [1, 3, 4]

3.2 ระบบศึกษา 10 บัส

ระบบไฟฟ้า 10 บัสดังรูปที่ 3.4 ระบบ Single Line 3 Phase มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 7 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 4 ตัวและสายส่งไฟฟ้า 9 เส้นผ่านไปยังโหลด 6 จุด โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของแต่ละตัวอยู่ในรูปของ per unit และบัสตวิงคือบัสที่ 1 มีค่าเป็น 1.0 per unit

ระบบไฟฟ้า 10 บัสเป็นระบบที่ใหญ่ไม่สามารถใช้เครื่องคิดเลขคำนวณได้ จึงต้องคำนวณเคลียร์ริงวิกฤต เวลาเคลียร์ริงวิกฤตและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จากการวิเคราะห์กราฟในโปรแกรม PowerWorld ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4



รูปที่ 3:4 ระบบศึกษา 10 บัส

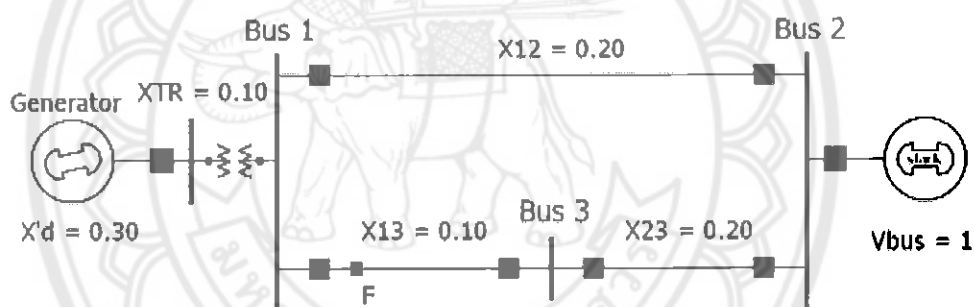
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรม PowerWorld

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบ 4 และ 10 บัส ซึ่งเกิดการลัดวงจรแบบ Single Line to Ground ที่สายส่งและบัส โดยปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D) ค่าความเฉื่อย (H) และค่ากำลังไฟฟ้า เพื่อศึกษามุมเฉลี่ยรั้งวิกฤตและเวลาเฉลี่ยรั้งวิกฤตของระบบไฟฟ้า

4.1 ระบบไฟฟ้า 4 บัส

ระบบ Single Line 3 Phase มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลง 1 ตัวและสายส่งไฟฟ้า 4 เส้นผ่านไปยังบัสสวิง โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของแต่ละตัวอยู่ในรูปของ per unit และบัสสวิง มีค่าเป็น 1.0 per unit

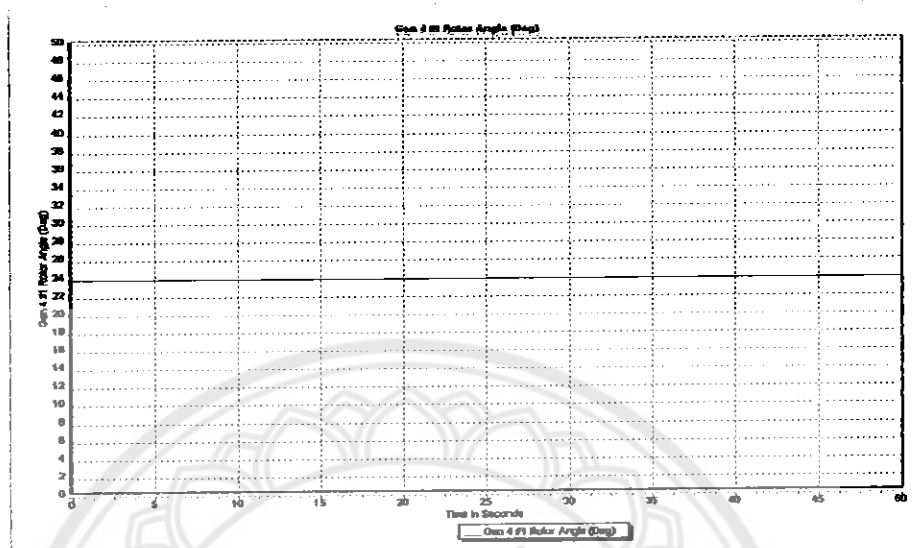


รูปที่ 4.1 ระบบศึกษา 4 บัส

จากรูปที่ 4.1 การลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างบัส 1 และบัส 3 เป็นแบบ Single Line to Ground สำหรับระบบไฟฟ้า 4 บัส ค่าเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ แรงดันมุมเฟสและกำลังไฟฟ้าจะถูกคำนวณด้วยเครื่องคำนวณและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม เสถียรภาพของระบบถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักเกณฑ์พื้นที่ที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมเฉลี่ยรั้งวิกฤตและเวลาเฉลี่ยรั้งวิกฤต นอกจากนั้นผลการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความเฉื่อยได้ถูกวิเคราะห์ด้วย

4.1.1 กราฟแสดงสถานะต่างๆในวงจรศึกษา โดยมีค่า $H=5$, $D=5$

1) สถานะปกติ



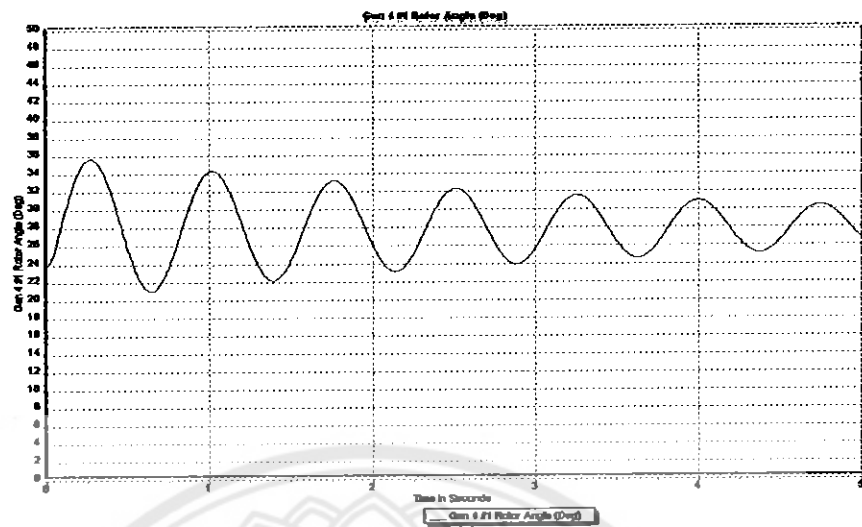
รูปที่ 4.2 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะปกติ

ในสถานะปกติมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงที่คงที่ ดังรูปที่ 4.2

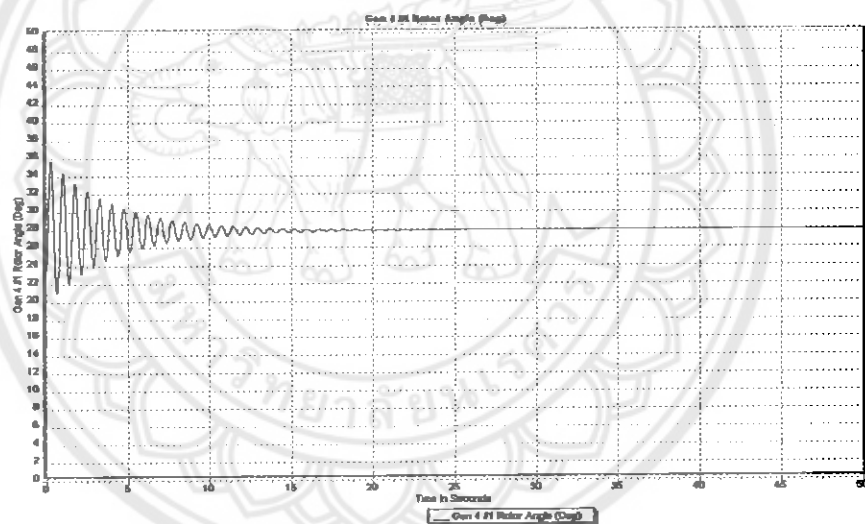
2) สถานะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์รั้งวิกฤต โดยที่เวลาเคลียร์รั้งวิกฤตน้อยกว่า 0.2880 วินาที

ก่อนเกิดการลัดวงจรมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 มีค่าเท่ากับ 27.95° เมื่อเกิดสถานะลัดวงจรมุมเคลียร์รั้งวิกฤตจะเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งสมดุลไปสู่ค่าสูงสุดดังรูปที่ 4.3 (ก) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดการลัดวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องสร้างกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ ดังนั้นจึงต้องเร่งมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นนั่นเอง

การเคลียร์ฟอลต์เพื่อให้ระบบยังรักษาเสถียรภาพไว้ได้จะต้องทำการเคลียร์ภายในเวลาเคลียร์รั้งวิกฤตและมุมเคลียร์รั้งวิกฤต จึงจะทำให้มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งเข้าสู่มุมใดมุมหนึ่ง นั่นคือ 27.95° ดังรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งเป็นมุมเดียวกับขณะก่อนเกิดการลัดวงจร



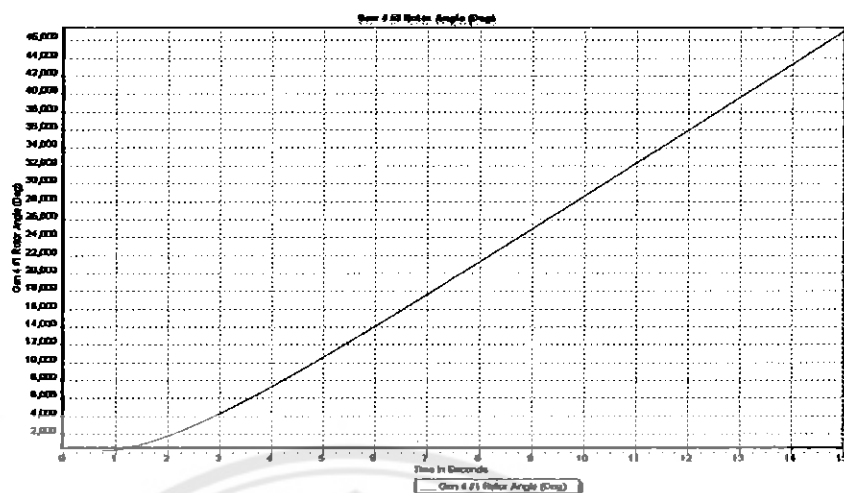
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) เมื่อเกิดการลัดวงจรมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ข) หลังเกิดการลัดวงจรมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสลับเข้าสู่มุม 27.95°

3) สภาวะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต โดยที่เวลาเคลียร์ริงวิกฤตมากกว่า 0.2880 วินาที

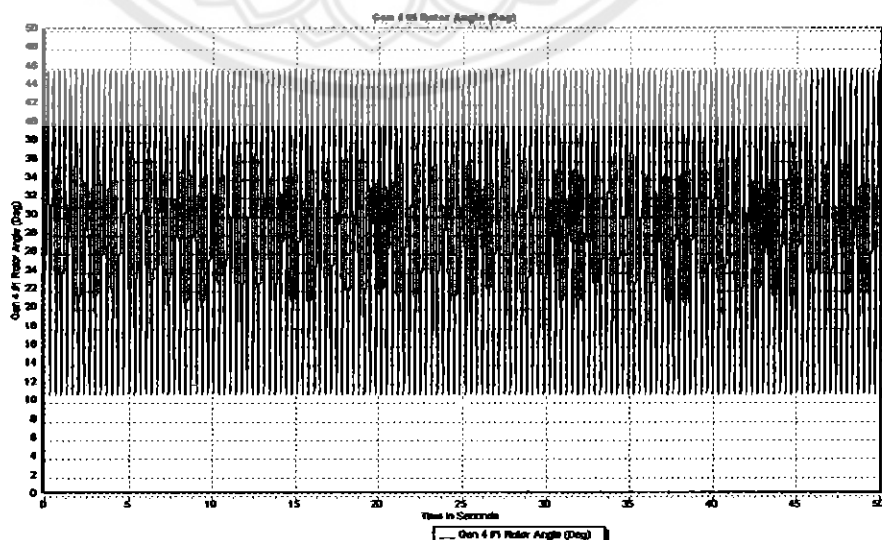


รูปที่ 4.4 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเกิดการลัดวงจร
ที่เคลียร์ฟอลต์หลังในเวลาเคลียร์รีંગวิกฤต

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์รี้งวิกฤต กราฟจะถู้ออกโดยจะ
ไม่มีมุมที่คงที่ดังรูปที่ 4.4

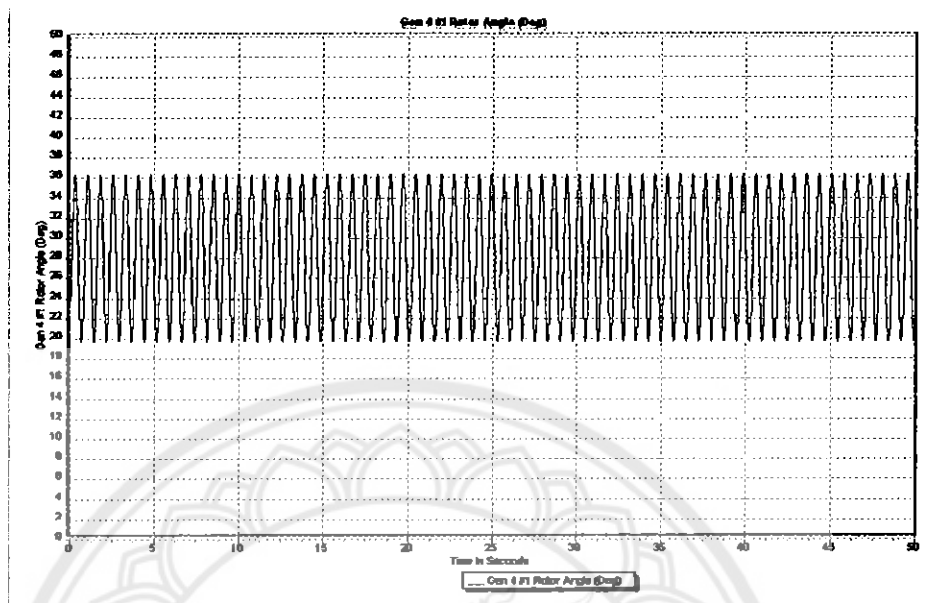
4.1.2 กราฟแสดงการลัดวงจรระหว่างบัส 1 – บัส 3 โดยปรับค่า D และ H แบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 1) กรณีที่ 1 กำหนดให้ค่า $D=0$ โดยปรับค่า $H=1$, $H=5$ และ $H=10$
เมื่อทำการปรับค่า $H=1$



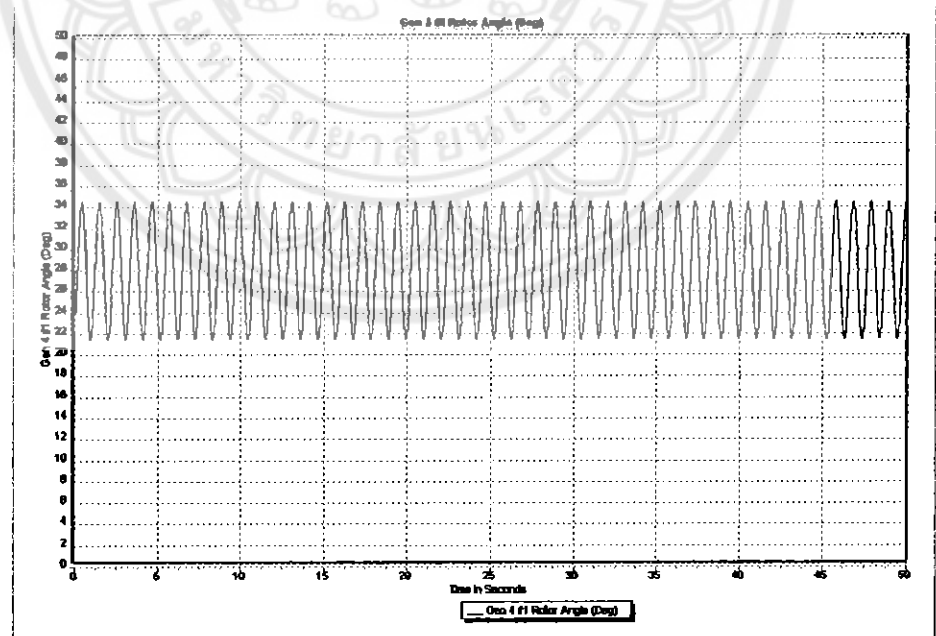
รูปที่ 4.5 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=0$ และ $H=1$

เมื่อทำการปรับค่า $H=5$



รูปที่ 4.6 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=0$ และ $H=5$

เมื่อทำการปรับค่า $H=10$



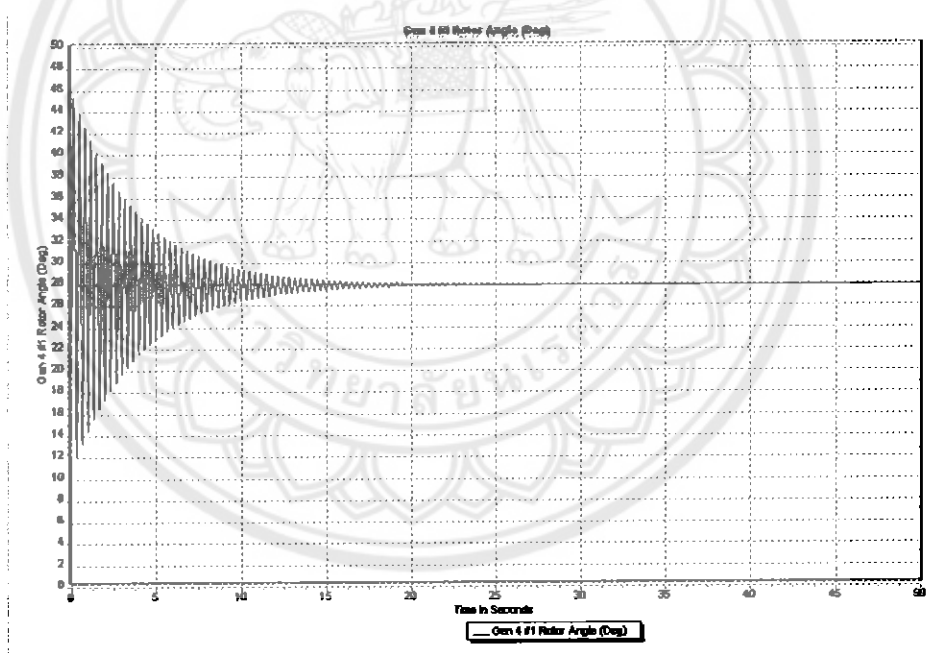
รูปที่ 4.7 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=0$ และ $H=10$

ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาเคสียร์ฟอลต์ที่ $D=0$

ค่า H	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
1	1.9812	0.1288
5	1.9812	0.2880
10	1.9812	0.4073

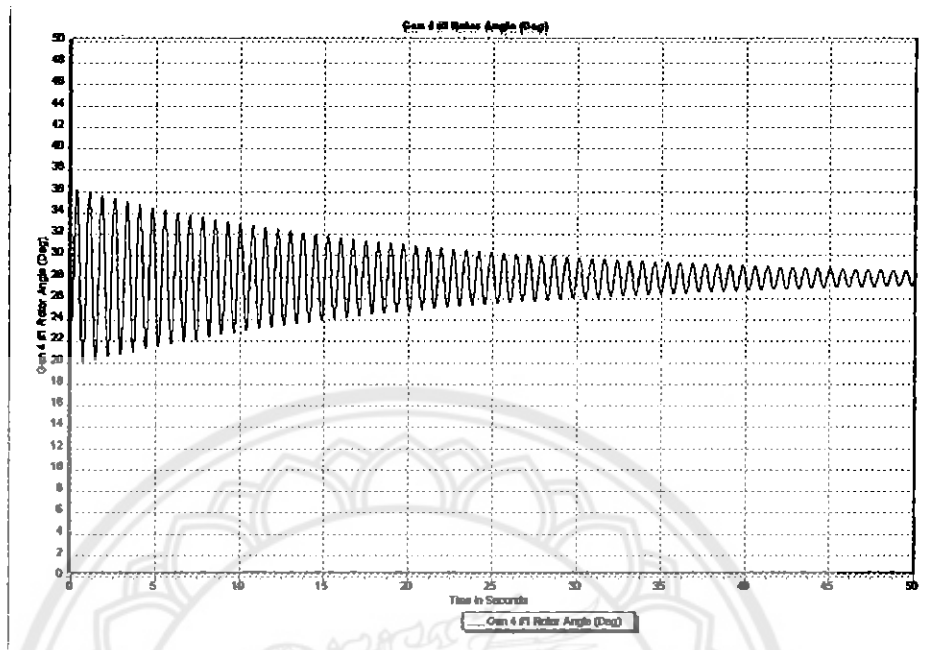
เมื่อค่า D เป็น 0 จะไม่เกิดเสถียรภาพ เนื่องจากมุมเฟสไม่คงที่โดยมีการแกว่งไปเรื่อยๆ ไม่เข้าสู่มุมใดมุมหนึ่ง เมื่อปรับค่า H จะสังเกตได้ว่าค่า H ยิ่งสูงความถี่ยิ่งมาก ทำให้กราฟมีมุมเฟสในการแกว่งลดน้อยลงแต่ใช้เวลานานในแต่ละรูปคลื่น

2) กรณีที่ 2 กำหนดให้ค่า $D=1$ โดยปรับค่า $H=1, H=5$ และ $H=10$
เมื่อทำการปรับค่า $H=1$



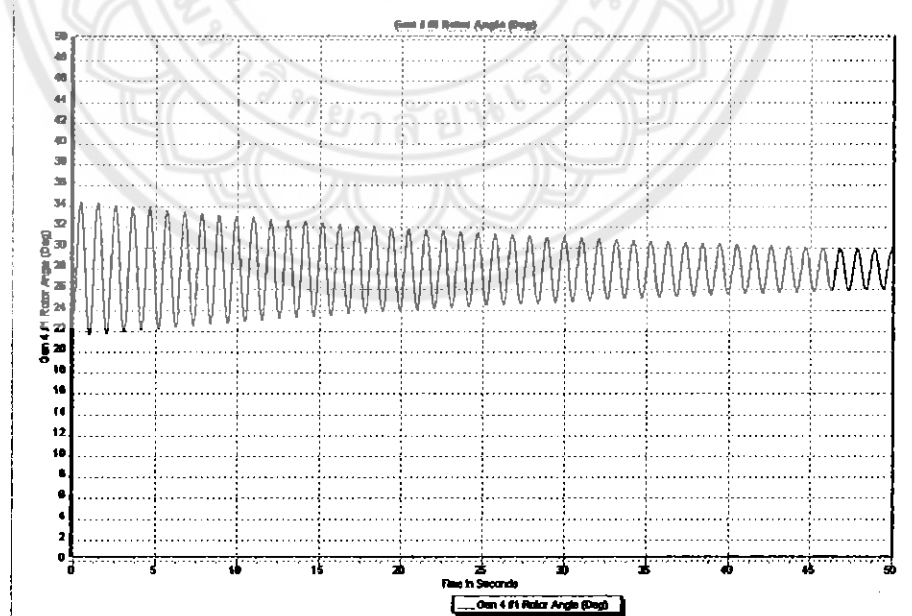
รูปที่ 4.8 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=1$ และ $H=1$

เมื่อทำการปรับค่า $H=1$



รูปที่ 4.9 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่า $D=1$ และ $H=5$

เมื่อทำการปรับค่า $H=10$



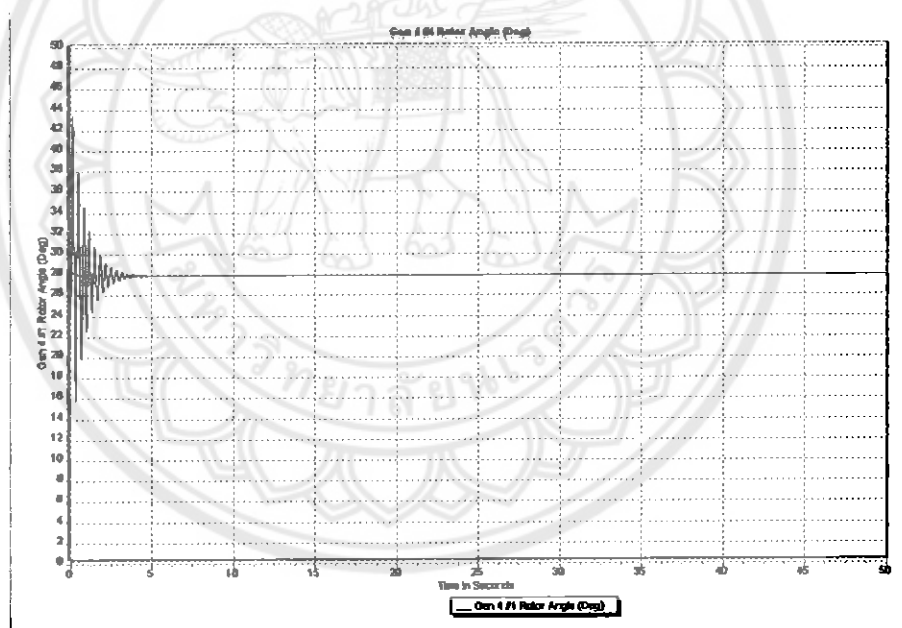
รูปที่ 4.10 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่า $D=1$ และ $H=10$

ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาเคลียร์พอลด์ที่ $D=1$

ค่า H	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
1	1.9812	0.1288
5	1.9812	0.2880
10	1.9812	0.4073

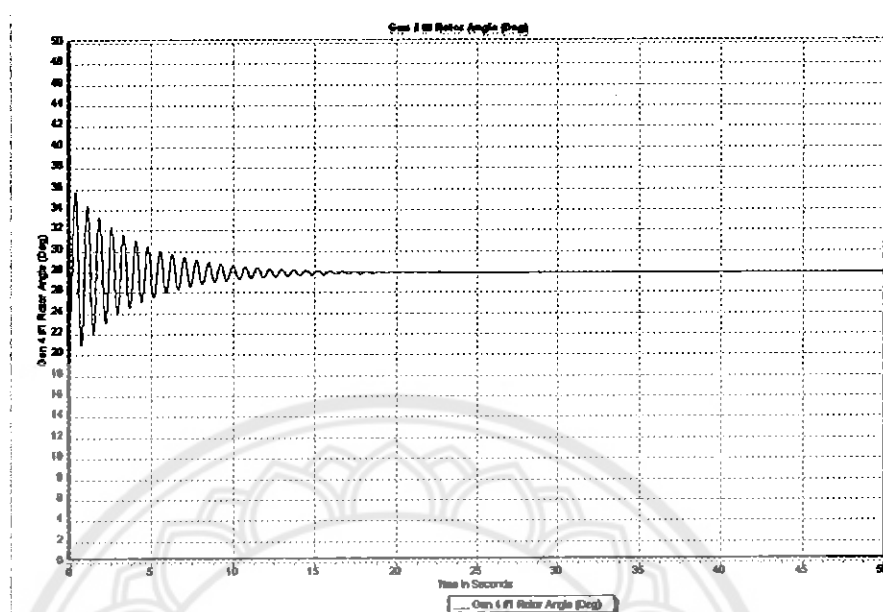
เมื่อมีค่า D มาเกี่ยวข้องทำให้ระบบสามารถเกิดเสถียรภาพ เนื่องจากกราฟมีการแกว่งเข้าสู่มุมใดมุมหนึ่ง และเมื่อปรับค่า H จะสังเกตได้ว่าค่า H ยิ่งมากความถี่ของมุมในการแกว่งจะลดน้อยลง แต่กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมใดมุมหนึ่งได้ช้าลง เนื่องจากใช้เวลามากกว่า

3) กรณีที่ 3 กำหนดให้ค่า $D=5$ โดยปรับค่า $H=1, H=5$ และ $H=10$
เมื่อทำการปรับค่า $H=1$



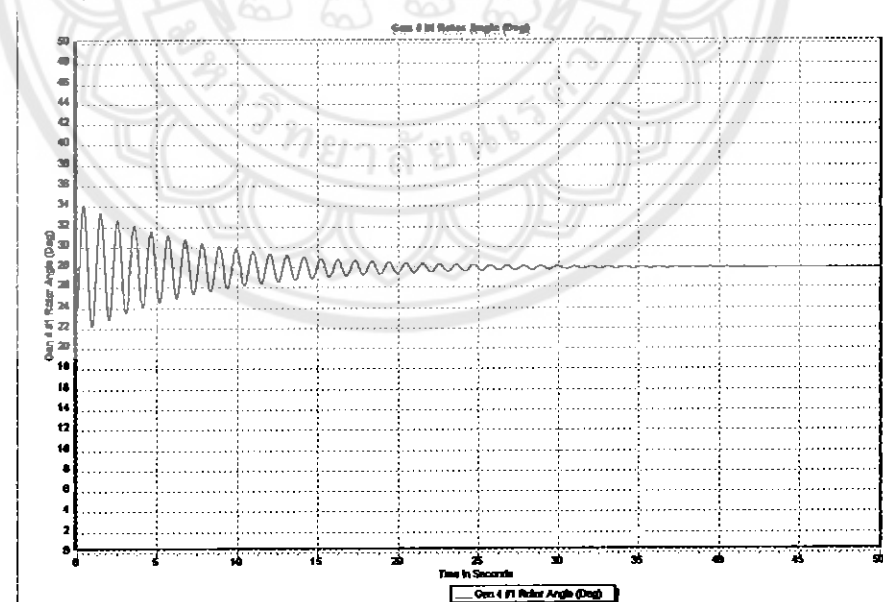
รูปที่ 4.11 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=1$

เมื่อทำการปรับค่า $H=5$



รูปที่ 4.12 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=5$

เมื่อทำการปรับค่า $H=10$



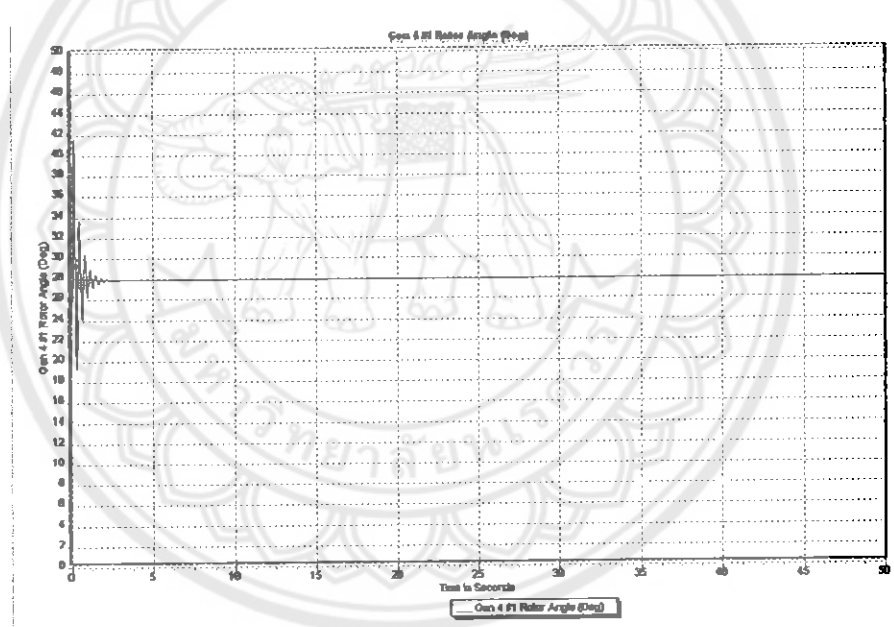
รูปที่ 4.13 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=5$ และ $H=10$

ตารางที่ 4.3 ค่าเวลาเคลียร์พอสต์ที่ $D=5$

ค่า H	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
1	1.9812	0.1288
5	1.9812	0.2880
10	1.9812	0.4073

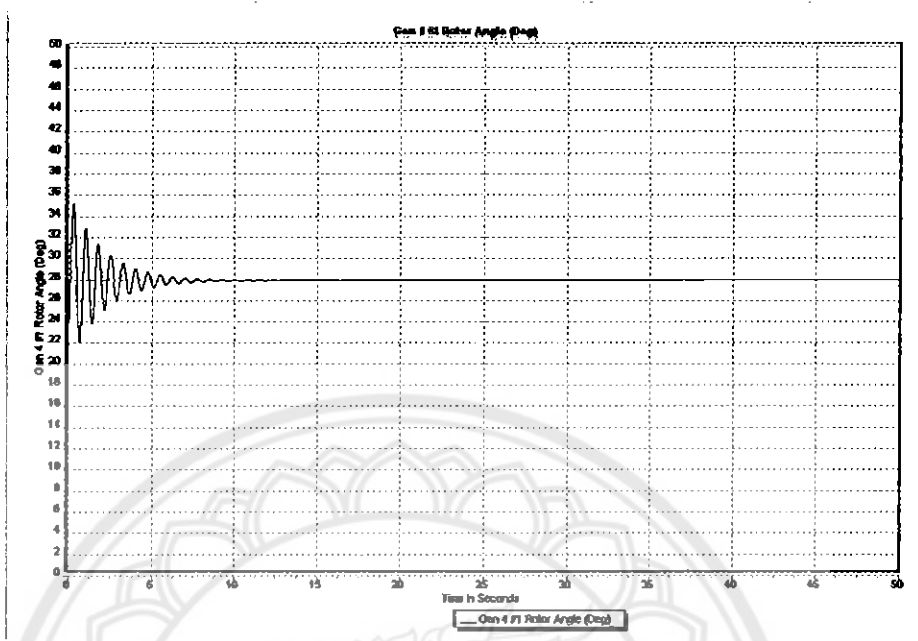
ในกรณีนี้กราฟจะคล้ายกับกรณีที่ 2 แต่กรณีที่ 3 จะเข้าสู่มุมโคมูนหนึ่งได้เร็วกว่า ทำให้เกิดเสถียรภาพได้เร็วกว่ากรณีที่ 2

4) กรณีที่ 4 กำหนดให้ค่า $D=10$ โดยปรับค่า $H=1$, $H=5$ และ $H=10$
เมื่อทำการปรับค่า $H=1$



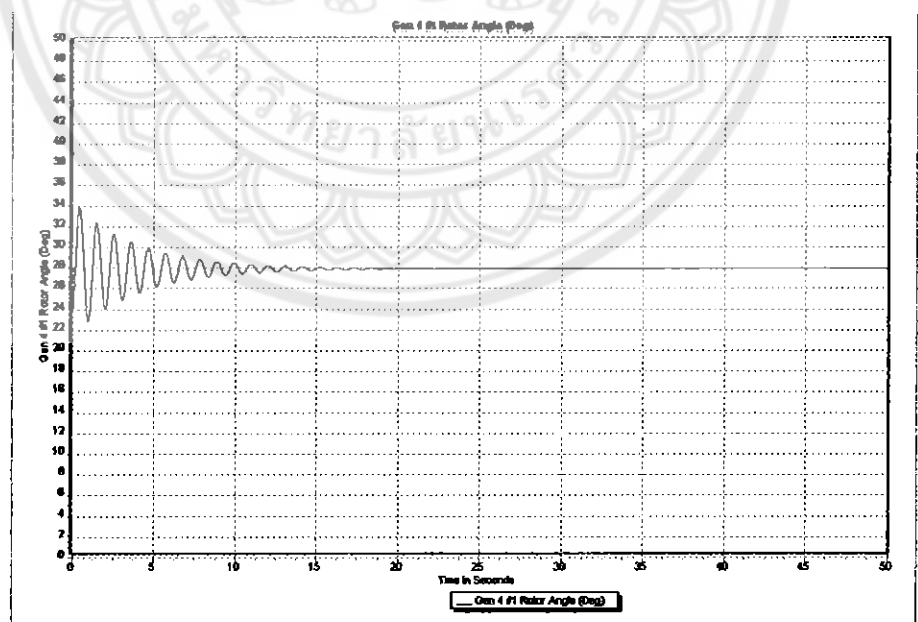
รูปที่ 4.14 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=1$

เมื่อทำการปรับค่า $H=5$



รูปที่ 4.15 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=5$

เมื่อทำการปรับค่า $H=10$



รูปที่ 4.16 มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยค่า $D=10$ และ $H=10$

ตารางที่ 4.4 ค่าเวลาเคลียร์ฟอลต์ที่ $D=10$

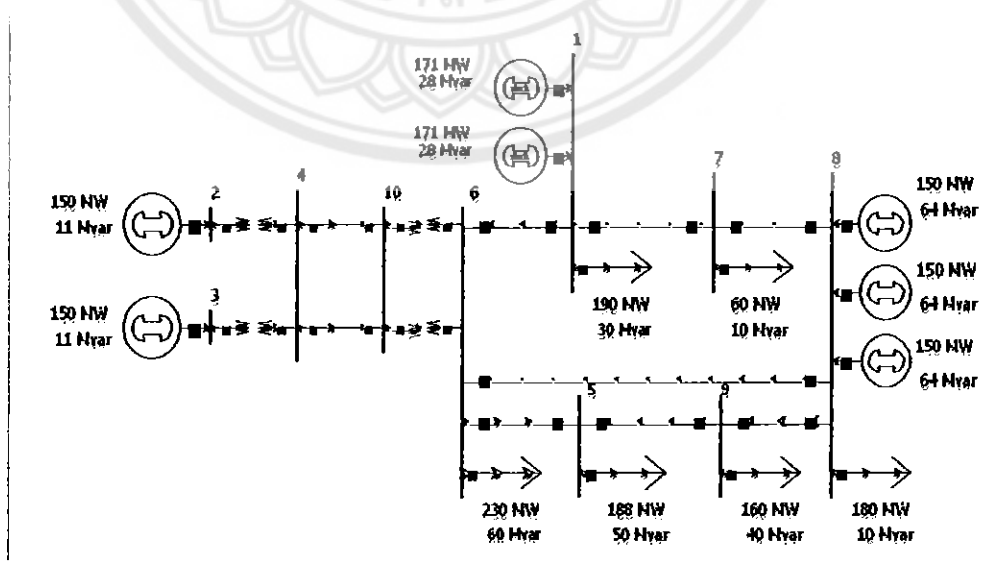
ค่า H	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
1	1.9812	0.1288
5	1.9812	0.2880
10	1.9812	0.4073

ในกรณีนี้กราฟจะคล้ายกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 แต่กรณีที่ 4 นั้นจะเข้าสู่มุมโคมหนึ่งได้เร็วกว่า ทำให้เกิดเสถียรภาพได้เร็วกว่ากรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

เมื่อเกิดลัดวงจรต้องแยกฟอลต์ออกก่อนที่ระบบจะมีมุมเกินค่าเคลียร์วิกฤต δ_{cr} และเวลาเคลียร์วิกฤตสำหรับแยกฟอลต์ออกจากระบบต้องน้อยกว่าเวลาเคลียร์วิกฤต t_{cr} เมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เข้าสู่มุมโคมหนึ่งได้เร็วขึ้น ซึ่งหมายถึงเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น เมื่อทำการปรับค่าคงที่ความเฉื่อยเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ช้าลงเนื่องจากจะใช้เวลามากกว่าในแต่ละรูปคลื่น

4.2 ระบบไฟฟ้า 10 บัส

ระบบไฟฟ้า 10 บัสดังรูปที่ 4.17 ระบบ Single Line 3 Phase มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 7 เครื่องเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 4 ตัวและสายส่งไฟฟ้า 9 เส้นผ่านไปยังโหลด 6 จุด โดยมีค่ารีแอกแตนซ์ของแต่ละตัวอยู่ในรูปของ per unit และบัสสวิทช์บัสที่ 1 มีค่าเป็น 1.0 per unit



รูปที่ 4.17 ระบบศึกษา 10 บัส

จากรูปที่ 4.17 สำหรับระบบไฟฟ้า 10 บัส เติลยรภาพของระบบถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PowerWorld ค่ามุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤตได้ถูกวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสถูกพิจารณา เพื่อหาความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง ค่าคงที่ความเฉื่อยและการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า

การจำลองการเกิดการลัดวงจร Single Line to Ground แบ่งเป็น 3 จุด คือ

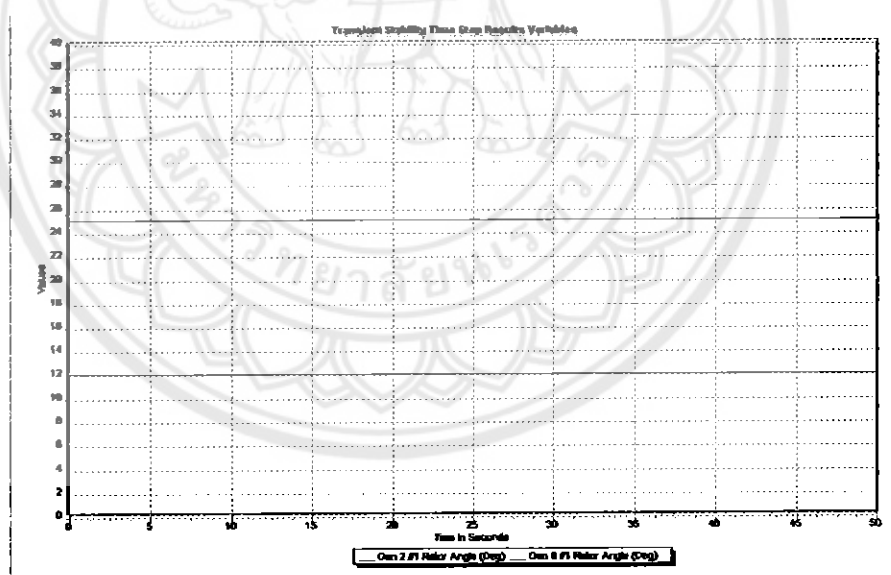
1. เกิดการลัดวงจรระหว่างบัส 6 และบัส 8
2. เกิดการลัดวงจรที่บัส 4
3. เกิดการลัดวงจรที่บัส 8

4.2.1 กราฟแสดงการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในวงจรโดยปรับกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยจำลองการลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็น 4 กรณี ดังนี้

4.2.1.1 กรณีที่ 1 สถานะปกติ

1) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 150 MW

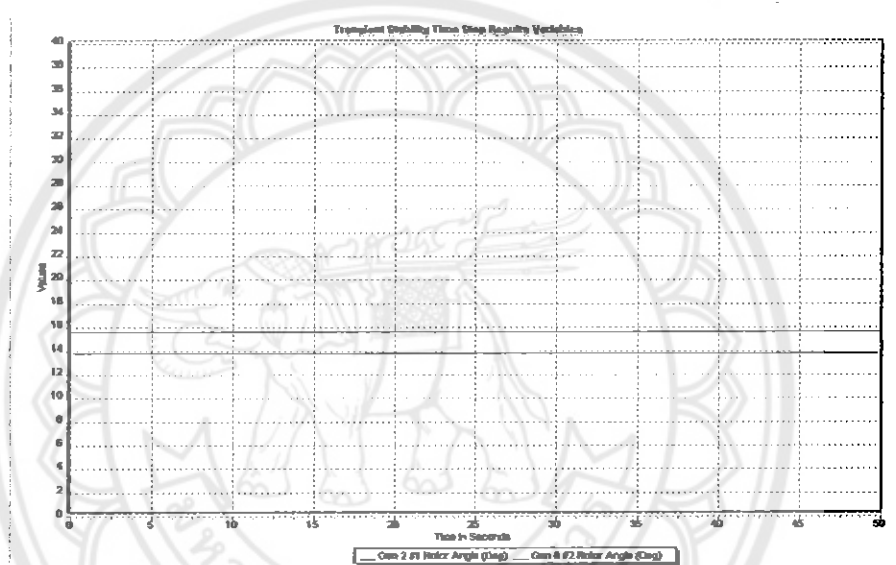


รูปที่ 4.18 มุมเฟสในสถานะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW

ในสถานะปกติมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงและคงที่ โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 คิวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.18

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตเท่ากัน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 มีกำลังการผลิตเท่ากับ 150 MW จะส่งผลให้มุมเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากันด้วย โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.18 นั่นคือเส้นกราฟเส้นบนเป็นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างเป็นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 ซึ่งเส้นกราฟจะทับกัน

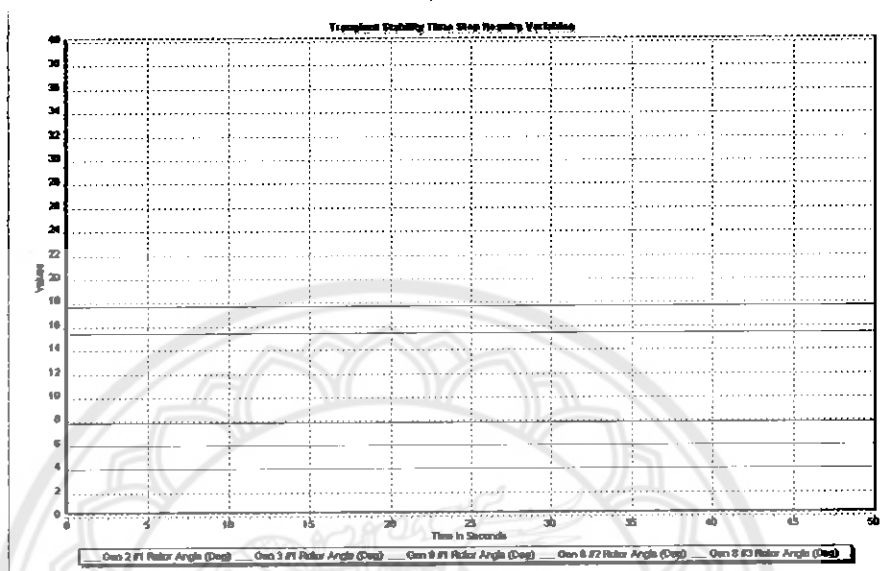
2) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 160 MW



รูปที่ 4.19 มุมเฟสในสภาวะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW

ในสภาวะปกติมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงและคงที่ โดยกราฟเส้นบนคือ มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.19

3) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 เท่ากับ 160 MW, ตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW



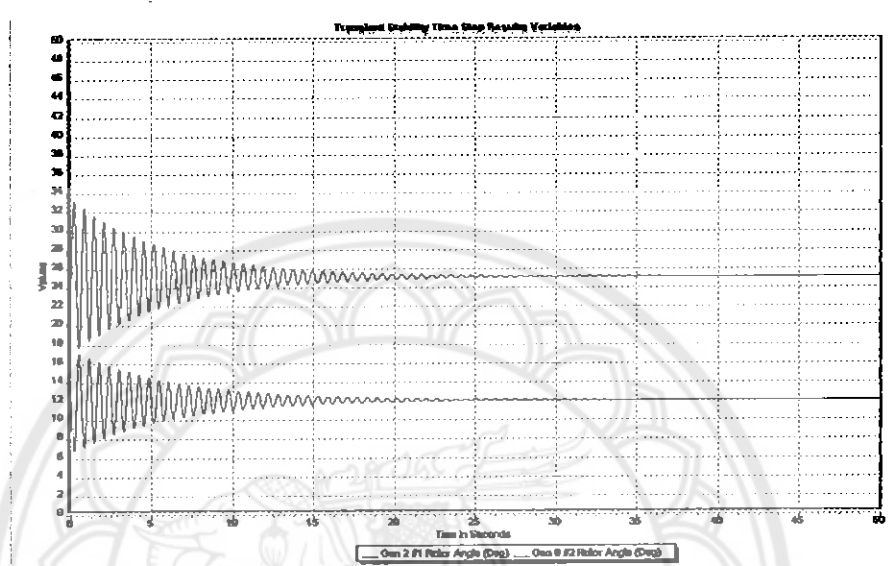
รูปที่ 4.20 มุมเฟสในสถานะปกติโดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และบัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ

ในสถานะปกติมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงและคงที่ โดยกราฟเส้นแรกคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 กราฟเส้นที่ 2 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 กราฟเส้นที่ 3 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 กราฟเส้นที่ 4 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 2 และกราฟเส้นที่ 5 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ดังรูปที่ 4.20

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตไม่เท่ากันจะส่งผลให้มุมเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เท่ากันด้วย สังเกตได้จากรูปที่ 4.20 นั่นคือเส้นมุมเฟสแต่ละเส้นจะไม่ทับกัน

4.2.1.2 กรณีที่ 2 การลัดวงจรที่สายส่งระหว่างบัส 6 – บัส 8 โดยเวลาเคลียร์รีจิกวูดเท่ากับ 0.05 วินาที

1) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 150 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2407 วินาที



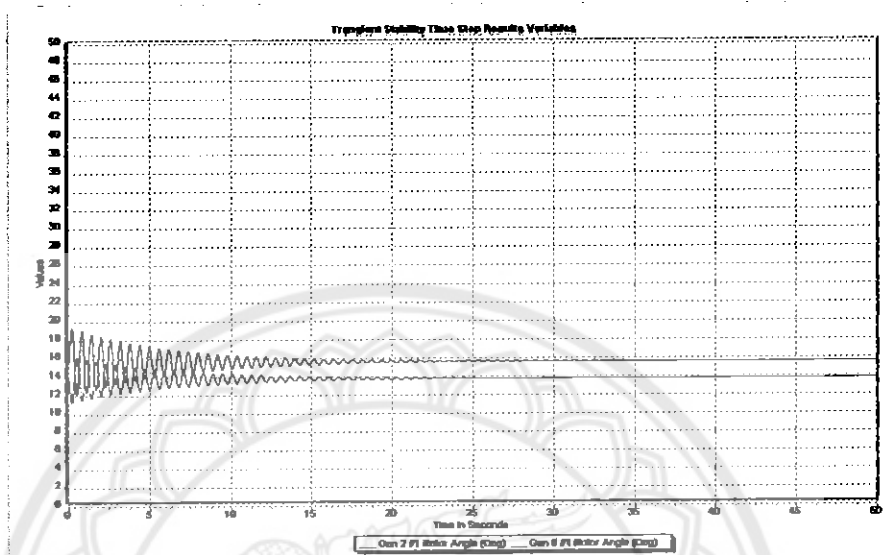
รูปที่ 4.21 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW

ตารางที่ 4.5 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์รีจิกวูดที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.21

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.4393	0.5356	0.2407
Bus 3	0.4393	0.5356	0.2407
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2114	0.5316	0.2407
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2114	0.5316	0.2407
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2114	0.5316	0.2407

ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2407 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.21

2) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 160 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.4390 วินาที



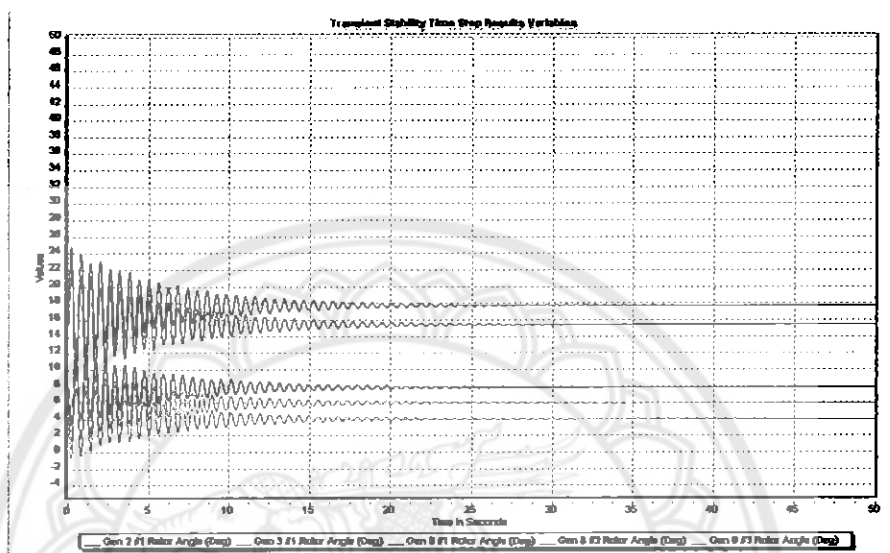
รูปที่ 4.22 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างบัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW

ตารางที่ 4.6 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤตที่ $H=3$ ของรูปที่ 4.22

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.2727	0.9676	0.4390
Bus 3	0.2727	0.9676	0.4390
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2408	0.9670	0.4390
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2408	0.9670	0.4390
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2408	0.9670	0.4390

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.4390 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.22

3) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 เท่ากับ 160 MW, ตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2800 วินาที



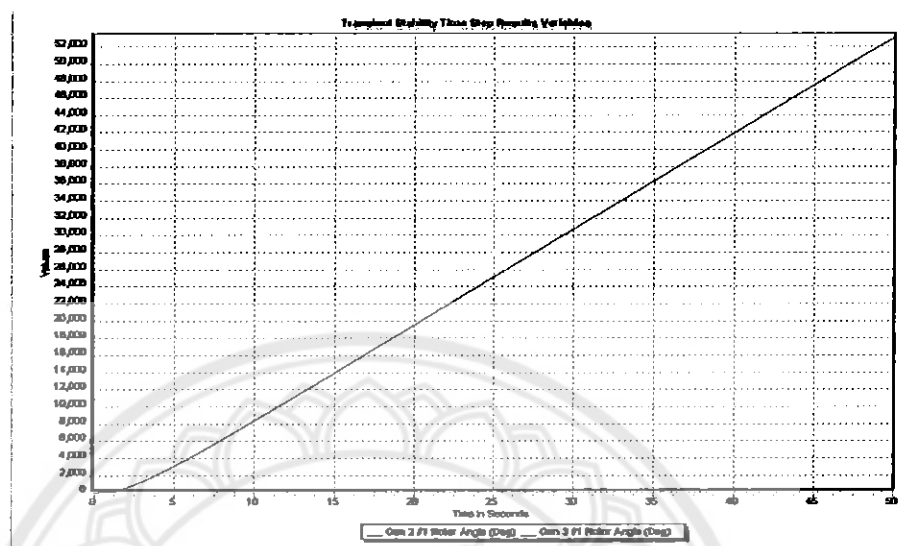
รูปที่ 4.23 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างบัส 6 – บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และบัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.23

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.3098	0.6195	0.2880
Bus 3	0.2694	0.6193	0.2880
Bus 8 ตัวที่ 1	0.1369	0.6165	0.2880
Bus 8 ตัวที่ 2	0.1039	0.6159	0.2880
Bus 8 ตัวที่ 3	0.0703	0.6153	0.2880

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2880 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นแรกคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 กราฟเส้นที่ 2 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 กราฟเส้นที่ 3 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 กราฟเส้นที่ 4 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 2 และกราฟเส้นที่ 5 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ดังรูปที่ 4.23

4) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต

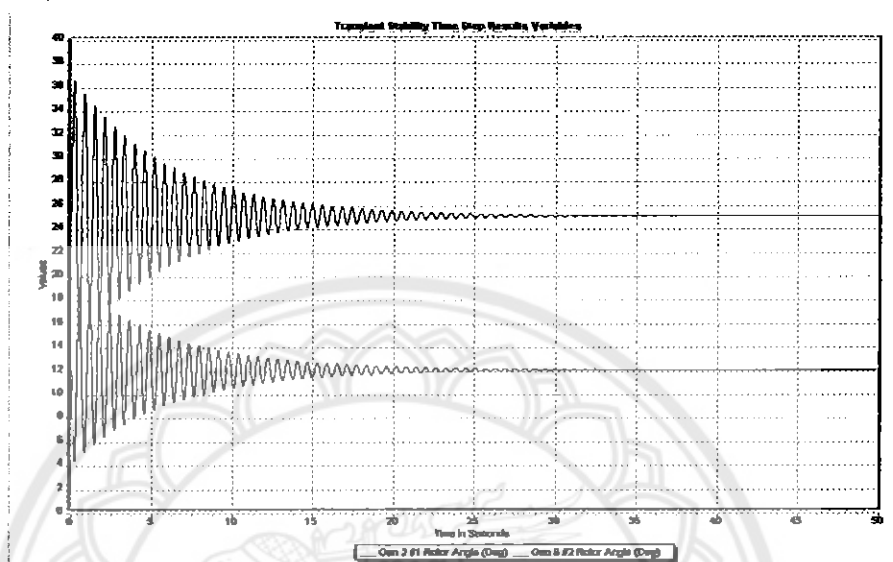


รูปที่ 4.24 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่สายส่งระหว่างบัส 6 – บัส 8 และเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต

ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อไม่สามารถเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์ริงวิกฤต กราฟจะเป็นลู่ออกโดยจะไม่มีมุมที่คงที่ดังรูปที่ 4.24

4.2.1.3 กรณีที่ 3 การลัดวงจรที่บัส 4 โดยเวลาเคลียร์ริงวิกฤตเท่ากับ 0.05 วินาที

1) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 150 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.1860 วินาที



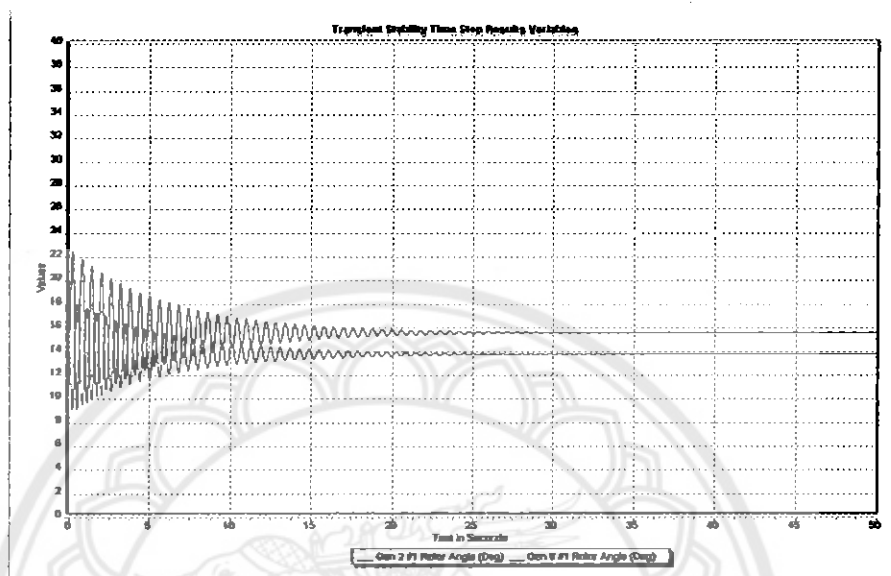
รูปที่ 4.25 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW

ตารางที่ 4.8 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์ริงวิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.25

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.4393	0.4156	0.1860
Bus 3	0.4393	0.4156	0.1860
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2114	0.4116	0.1860
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2114	0.4116	0.1860
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2114	0.4116	0.1860

ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.1860 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.25

2) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 160 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2956 วินาที



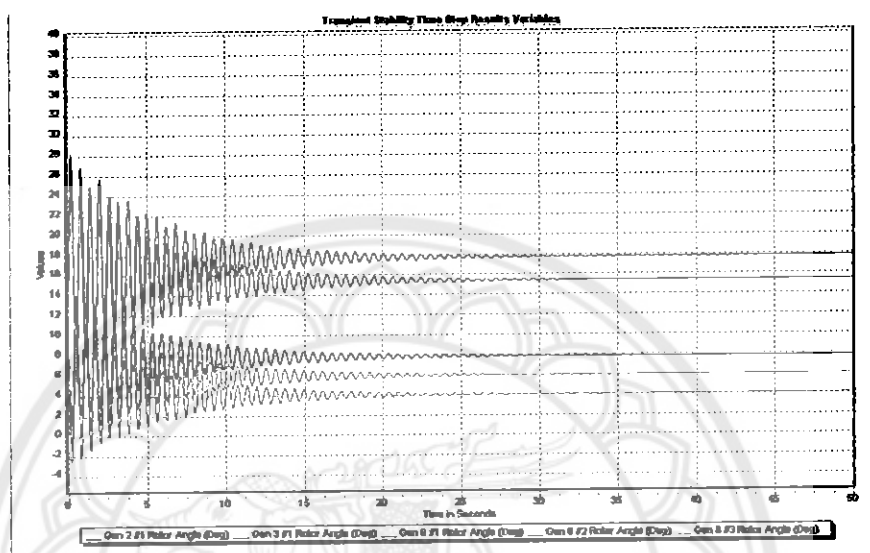
รูปที่ 4.26 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW

ตารางที่ 4.9 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.26

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.2727	0.6531	0.2956
Bus 3	0.2727	0.6531	0.2956
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2408	0.6525	0.2956
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2408	0.6525	0.2956
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2408	0.6525	0.2956

ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2956 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.26

3) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 เท่ากับ 160 MW, ตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2151 วินาที



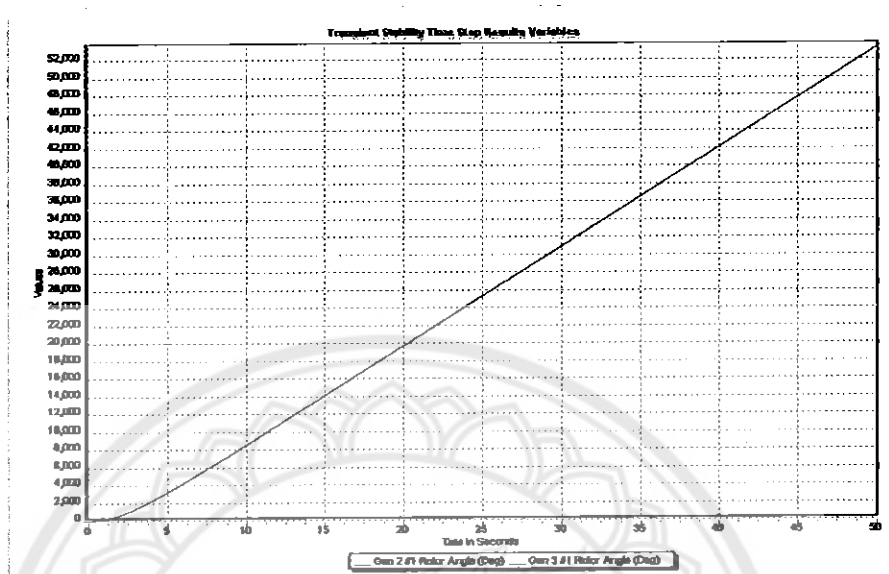
รูปที่ 4.27 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และ บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.27

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.3098	0.4772	0.2151
Bus 3	0.2694	0.4765	0.2151
Bus 8 ตัวที่ 1	0.1369	0.4742	0.2151
Bus 8 ตัวที่ 2	0.1039	0.4736	0.2151
Bus 8 ตัวที่ 3	0.0703	0.4730	0.2151

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2151 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นแรกคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 กราฟเส้นที่ 2 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 กราฟเส้นที่ 3 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 กราฟเส้นที่ 4 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 2 และกราฟเส้นที่ 5 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ดังรูปที่ 4.27

4) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์
 หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต

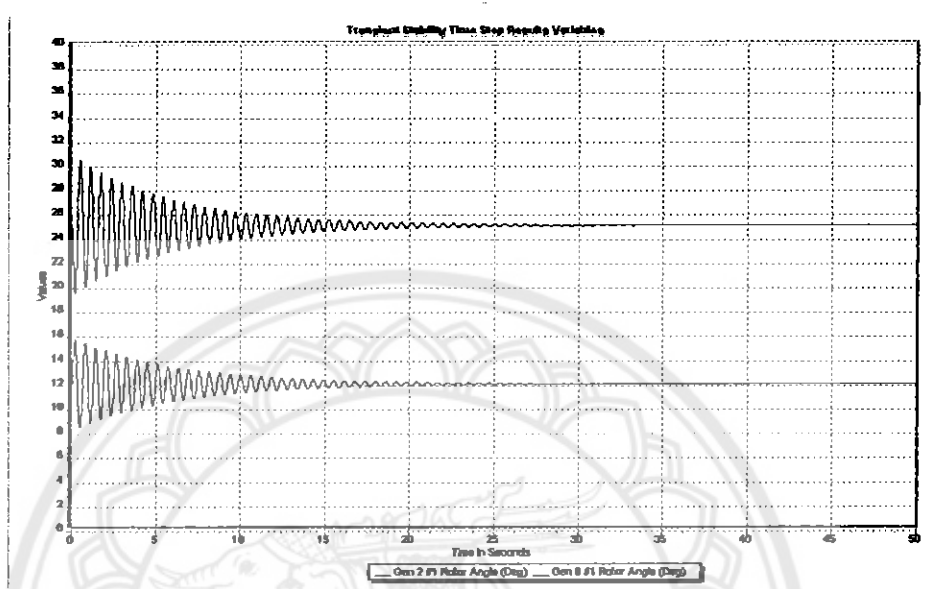


รูปที่ 4.28 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 4
 และเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์ริงวิกฤต

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อไม่สามารถ
 เคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์ริงวิกฤต กราฟจะถู้ออกโดยจะไม่มีมุมที่คงที่ดังรูปที่ 4.28

4.2.1.4 กรณีที่ 4 การลัดวงจรที่บัส 8 โดยเวลาเคลียร์ริงวิกฤตเท่ากับ 0.05 วินาที

1) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 150 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2938 วินาที



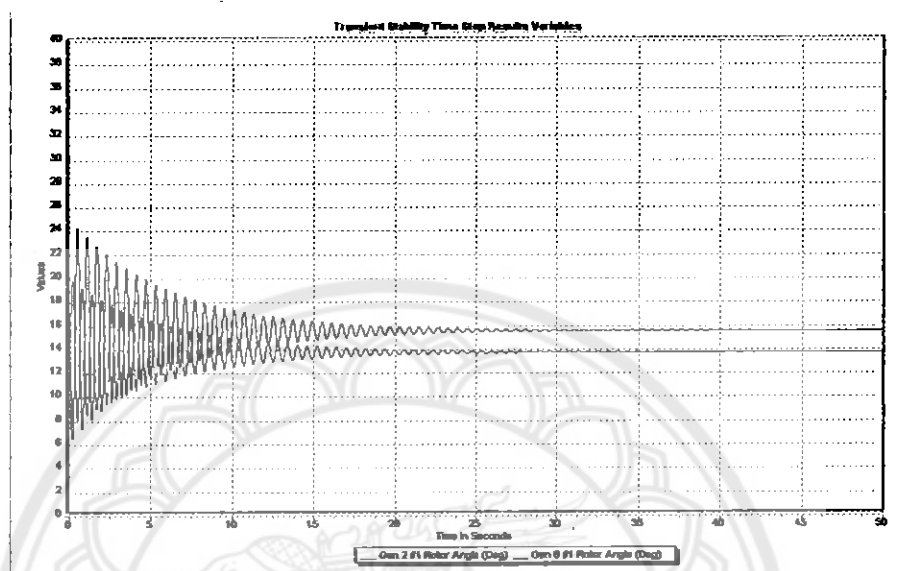
รูปที่ 4.29 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 150 MW

ตารางที่ 4.11 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์ริงวิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.29

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.4393	0.6520	0.2938
Bus 3	0.4393	0.6520	0.2938
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2114	0.6481	0.2938
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2114	0.6481	0.2938
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2114	0.6481	0.2938

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2938 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.29

2) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 160 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2468 วินาที



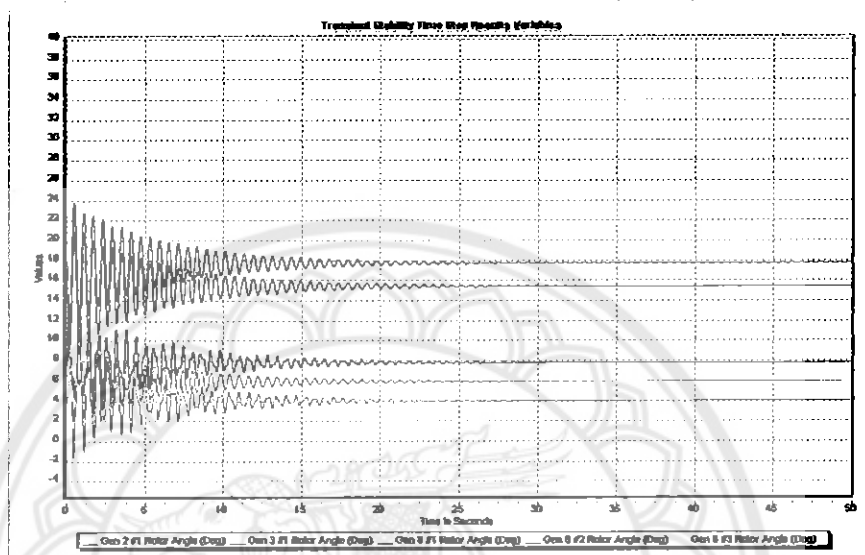
รูปที่ 4.30 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 เท่ากับ 120 MW และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 160 MW

ตารางที่ 4.12 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.30

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.2727	0.5461	0.2468
Bus 3	0.2727	0.5461	0.2468
Bus 8 ตัวที่ 1	0.2408	0.5455	0.2468
Bus 8 ตัวที่ 2	0.2408	0.5455	0.2468
Bus 8 ตัวที่ 3	0.2408	0.5455	0.2468

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2468 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นบนคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และบัส 3 และกราฟเส้นล่างคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.30

3) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และบัส 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 เท่ากับ 160 MW, ตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 140 MW และตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 120 MW ควรเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2999 วินาที



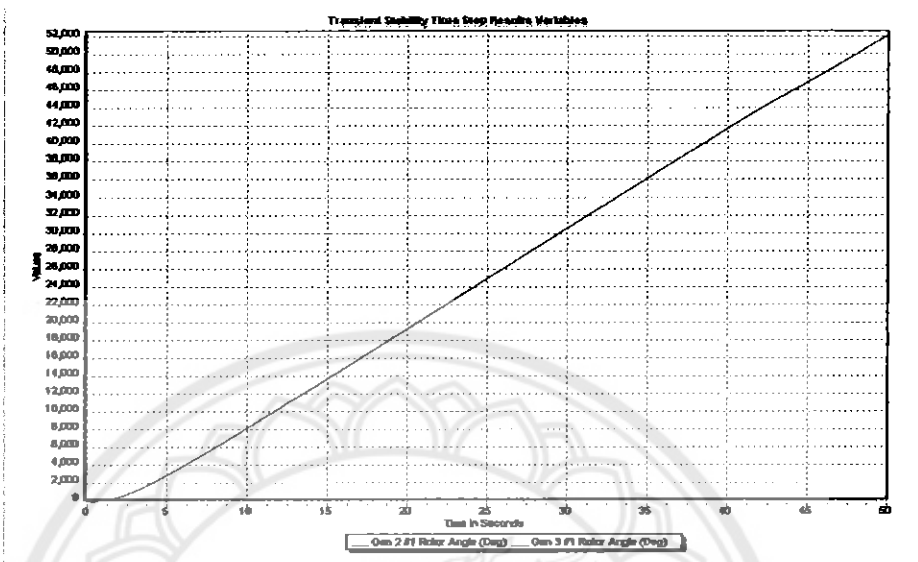
รูปที่ 4.31 มุมเฟสที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8 โดยกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2, 3 และ บัส 8 ตัวที่ 1, 2, 3 มีค่าเท่ากับ 140, 120, 160, 140 และ 120 MW ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ค่ามุมเฟสและเวลาเคลียร์วิกฤต $H=3$ ของรูปที่ 4.31

Generator ที่	δ_0 (เรเดียน)	δ_{cr} (เรเดียน)	t_{cr} (วินาที)
Bus 2	0.3098	0.6632	0.2999
Bus 3	0.2694	0.6625	0.2999
Bus 8 ตัวที่ 1	0.1369	0.6601	0.2999
Bus 8 ตัวที่ 2	0.1039	0.6596	0.2999
Bus 8 ตัวที่ 3	0.0703	0.6590	0.2999

ในสภาวะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลา 0.2999 วินาที กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ โดยกราฟเส้นแรกคือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 กราฟเส้นที่ 2 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3 กราฟเส้นที่ 3 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 1 กราฟเส้นที่ 4 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ตัวที่ 2 และกราฟเส้นที่ 5 คือมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 8 ดังรูปที่ 4.31

4) กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะเกิดการลัดวงจรและเคลียร์ฟอลต์
หลังเวลาเคลียร์รีริงวิกฤต



รูปที่ 4.32 มุมเฟสของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 8
และเคลียร์ฟอลต์หลังเวลาเคลียร์รีริงวิกฤต

ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ เมื่อไม่สามารถ
เคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์รีริงวิกฤต กราฟจะลู่ออกโดยจะไม่มีมุมที่คงที่ดังรูปที่ 4.32

ในสถานะปกตินั้นกราฟจะเป็นเส้นตรง โดยมีมุมเฟสคงที่และมุมเฟสนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าและโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่ามากมุมเฟสจะสูง เมื่อกำลังไฟฟ้ามีค่าน้อย
มุมเฟสจะต่ำตามไปด้วย ส่วนค่าโหลคนั้น เมื่อโหลคมีค่ามากมุมเฟสจะต่ำ โหลคที่มีค่าน้อยมุม
เฟสจะสูง ในสถานะเกิดการลัดวงจรนั้นกราฟจะมีการแกว่งและจะไม่เข้าสู่มุมใดมุมหนึ่ง เมื่อ
ทำการเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์รีริงวิกฤต กราฟจะมีการแกว่งเข้าสู่มุมที่คงที่ แต่ถ้าไม่
สามารถเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์รีริงวิกฤตนั้นกราฟจะลู่ออก

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า 4 บัสและ 10 บัส โดยการปรับค่ามุมเกียร์รีจิกวักต เวลาเกียร์รีจิกวักต ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง ค่าคงที่ความเฉื่อย และกำลังไฟฟ้าจะเห็นได้ว่า

1. กรณีเกียร์ฟอลต์ภายในเวลาเกียร์รีจิกวักตและมุมเกียร์รีจิกวักต มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยังคงเกิดเสถียรภาพและสามารถกลับสู่สภาวะปกติได้
2. กรณีเกียร์ฟอลต์หลังเวลาเกียร์รีจิกวักตและมุมเกียร์รีจิกวักต มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสูญเสียเสถียรภาพ
3. กรณีปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงมาก ขนาดมุมเฟสในการแกว่งจะสูงแต่ลดลงเร็วทำให้เข้าสู่เสถียรภาพได้เร็ว เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงน้อย ขนาดมุมเฟสในการแกว่งจะน้อยและลดลงช้า จึงทำให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ช้า การปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงสามารถปรับที่ขดลวด Damping ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. กรณีปรับค่าความเฉื่อย เมื่อค่าความเฉื่อยมากจะส่งผลกับค่ากำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เนื่องจากความหน่วงทำให้เข้าสู่มุมเสถียรภาพได้ช้า เมื่อค่าความเฉื่อยน้อยความหน่วงจะน้อยตาม จึงทำให้เข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วแต่ไม่สามารถปรับค่าความเฉื่อยเป็นศูนย์ได้ การปรับค่าค่าความเฉื่อยสามารถปรับที่ใบพัดกังหันหรือปริมาณการไหลของน้ำหรือไอน้ำก่อนเข้าใบพัด
5. กรณีปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่ามาก มุมเฟสจะมีสูง หากกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าน้อย มุมเฟสจะมีค่าต่ำตามไปด้วย
6. การเกิดการลัดวงจรที่บัสและระหว่างสายส่งนั้น กรณีเกิดที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นการลัดวงจรที่รุนแรงกว่าการลัดวงจรระหว่างสายส่ง เนื่องจากหากเกิดการลัดวงจรที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้กำลังการผลิตไม่สามารถส่งจ่ายได้ในทันที แต่การลัดวงจรระหว่างสายส่งกำลังไฟฟ้ายังสามารถเบี่ยงเบนการไหลไปยังสายส่งเส้นอื่นได้ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เท่าเดิมและโหลดยังสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้เท่าเดิม

7. การลัดวงจรที่มีค่ากระแสการลัดวงจรสูงจำเป็นต้องเคลียร์ฟอลต์ออกให้เร็วกว่าการลัดวงจรที่มีกระแสลัดวงจรต่ำ ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องพิจารณาตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรและความสำคัญของโหลดควบคู่กันไปด้วย
8. ความสำคัญของโหลด เช่น โหลดที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจจำเป็นต้องกำจัดการลัดวงจรอย่างรวดเร็ว หากกำจัดไม่ทันภายในเวลาเคลียร์ริงวิกฤตจะส่งผลกระทบและสร้างความเสียหายให้กับระบบและเศรษฐกิจโดยรวม

จากการศึกษา เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ โดยไม่มีค่าคงที่ เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์และต้องเคลียร์ฟอลต์ภายในเวลาเคลียร์ริงวิกฤต จะส่งผลให้มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับมามากที่เหมือนในสภาวะปกติและทำให้สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ได้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

โปรแกรม PowerWorld นั้นเป็นรุ่นสำหรับนักศึกษาที่มีการแสดงรายละเอียดของโปรแกรมจำกัด จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาและออกแบบวงจรมาก



เอกสารอ้างอิง

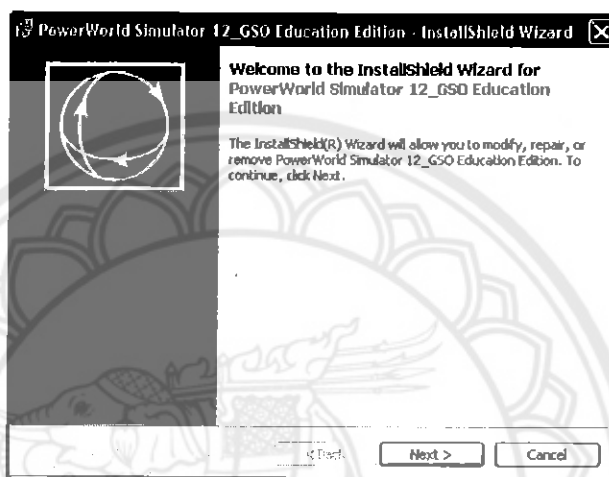
- [1] พิชัย อารีย์. (2552) การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Analysis) สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ชนิตา รอดอินทร์และเนตรทราย สุธัมฤทธิ์, (2540) Advanced Engineering Group. ระบบกำลังไฟฟ้า. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [3] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma and Thomas J. Overbye, (2545) Power System Analysis and Design.
- [4] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. (2538) การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. หจก. เม็ดทรายพรีนติ้ง
- [5] <http://www.powerworld.com/>



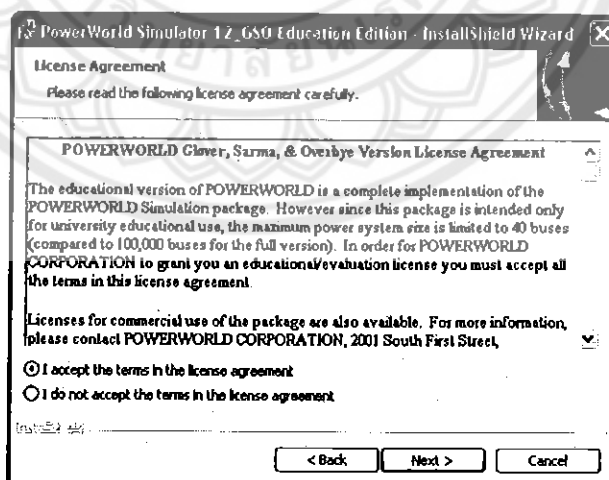


วิธีติดตั้งโปรแกรม PowerWorld

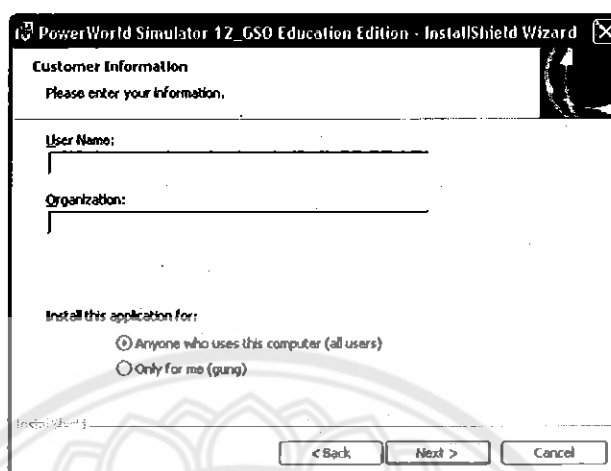
1. ใส่แผ่นโปรแกรม PowerWorld ที่ต้องการติดตั้งลงในเครื่องรอสักครู่โปรแกรมรันโดยอัตโนมัติ จากนั้นจะมีหน้าต่างขึ้นมา ถ้าหากใส่แผ่นโปรแกรมลงไปแล้วไม่รันอัตโนมัติให้กดเข้าไปที่ My Computer ดับเบิ้ลคลิกตรง Disk ที่แผ่นโปรแกรมอยู่ จากนั้นให้กด Next



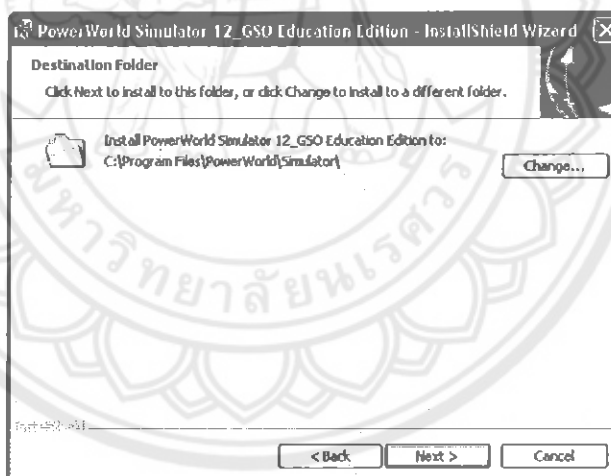
2. จะมีเงื่อนไขในการใช้โปรแกรม PowerWorld ให้กดเลือก I accept the terms in the license agreement แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



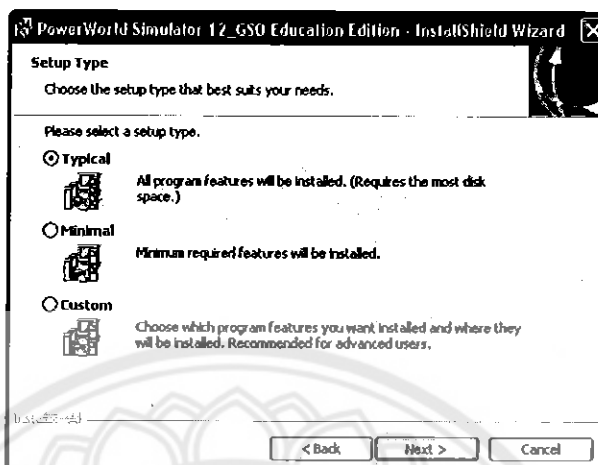
3. จากนั้นให้ใส่ User Name แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



4. จากนั้นให้เลือกไฟล์ โปรแกรม PowerWorld ไปเก็บไว้ที่ที่เราต้องการจะเก็บแล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



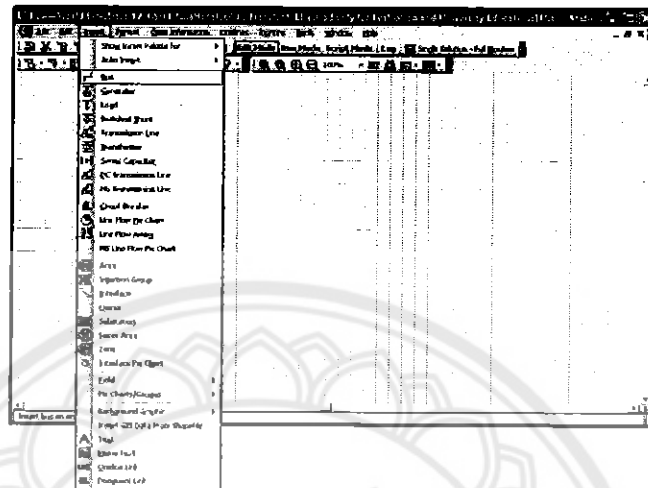
5. จากนั้นให้เลือกวิธีติดตั้งแบบ Typical แล้วกด Next เพื่อทำขั้นตอนต่อไป



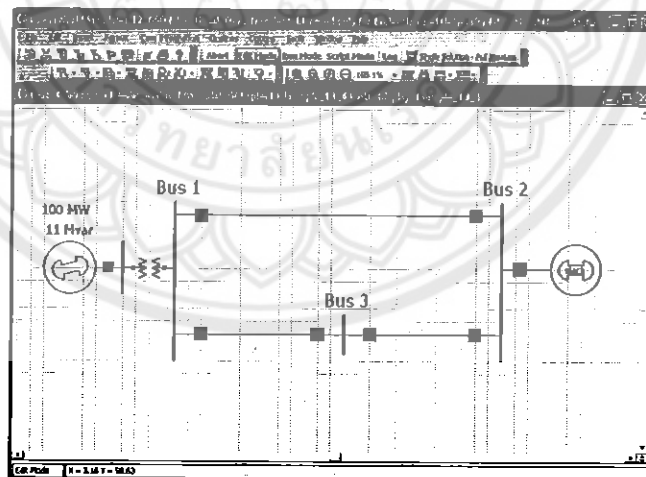
6. จากนั้นกด Install เพื่อติดตั้งโปรแกรม PowerWorld หลังจากนั้นให้รอจนกระทั่งโปรแกรมลงเสร็จให้กด Finish เท่านั้นก็สามารถใช้โปรแกรม PowerWorld ได้ตามที่เราต้องการ



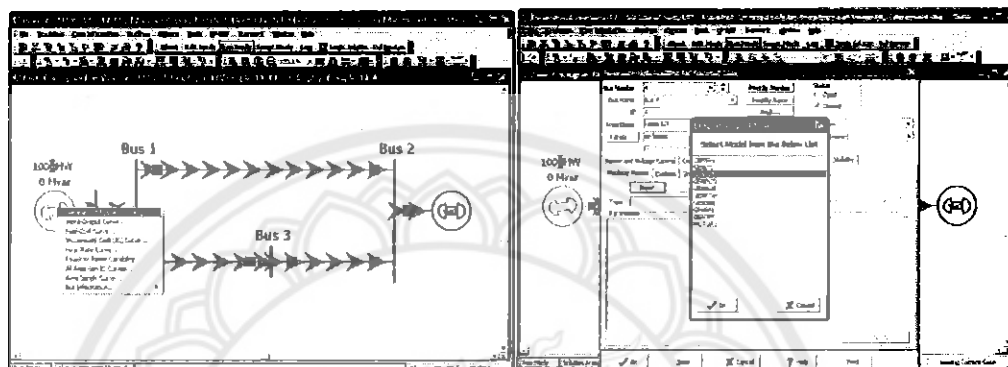
3. จากนั้นไปคลิกที่ Insert แล้วจะมีอุปกรณ์ต่างๆออกมา ให้เราเลือกใช้อุปกรณ์มาสร้างระบบตามที่ต้องการออกแบบดังรูป



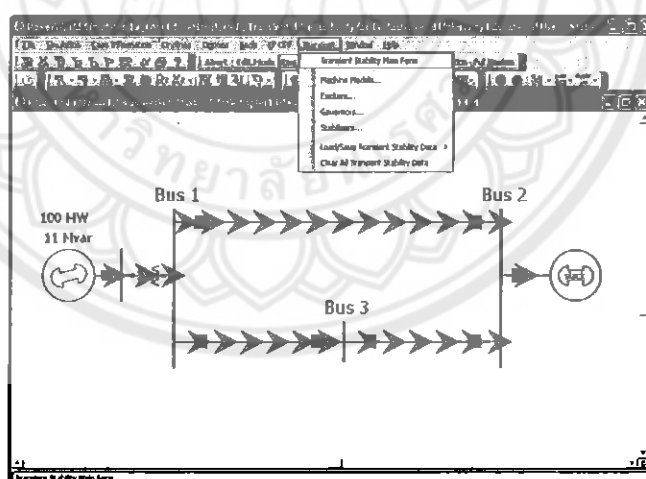
4. จากนั้นเราจะทำการวาดระบบ โดยการวาดบัสขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรกเมื่อวาดบัสเสร็จให้วาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง และโหลด ขณะเดียวกันกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าไปด้วย เมื่อทำการออกแบบเสร็จจะได้วงจรที่ต้องการ



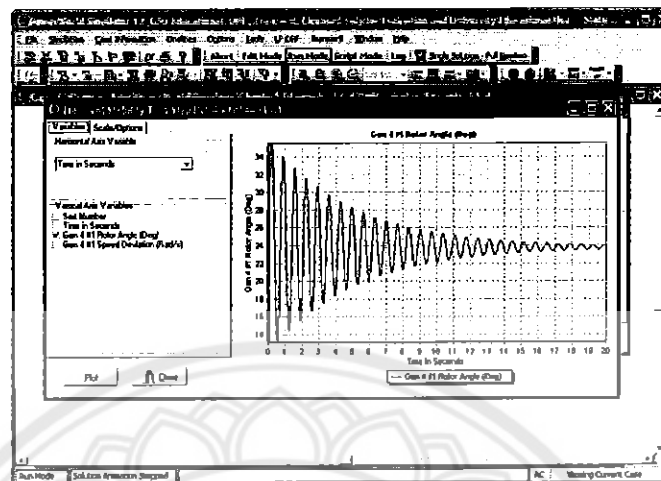
5. เมื่อออกแบบระบบเสร็จเราจะทำการวาดกราฟเพื่อดูค่ามุมเคลียร์ริงวิกฤตและเวลาเคลียร์ริงวิกฤต โดยจะต้องกด Run Mond ก่อน จากนั้นไปตั้งค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping) และค่าความเฉื่อย (Inertia Constant) โดยการคลิกขวาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วคลิกตรง Generator Information Dialog... → Stability → Machine Models → Insert → GENCLS จากนั้นทำการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความเฉื่อยดังรูป



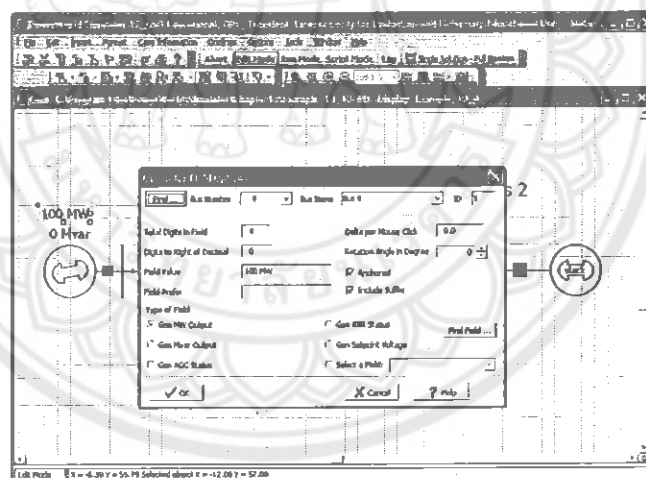
6. เมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงและค่าความเฉื่อยแล้วจะไปทำการวาดกราฟโดยไปที่ Transient → Transient Stability Main Form ดังรูป



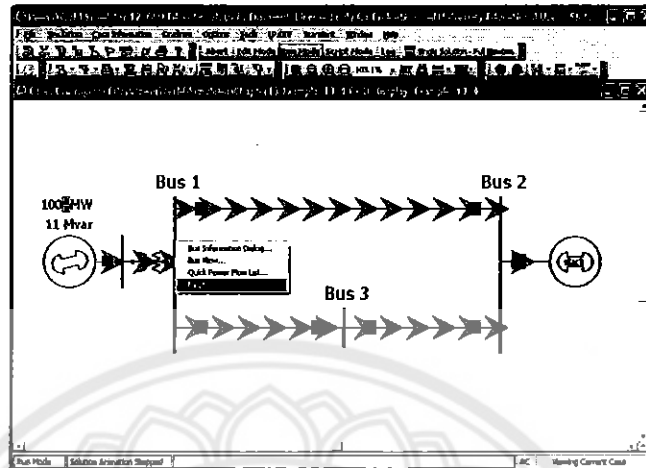
9. จากนั้นจะได้รูปกราฟดังรูป



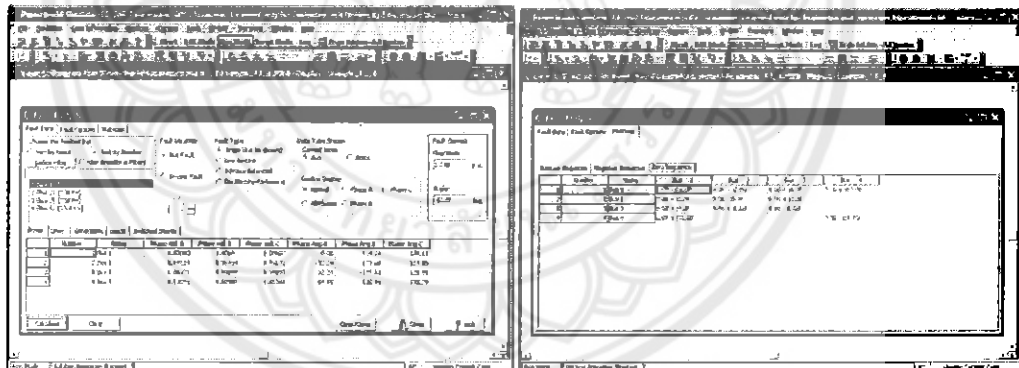
10. วิธีทำให้กำลังไฟฟ้าและโหลดสามารถปรับค่าได้ โดยคลิกขวาตรงกำลังไฟฟ้าที่ต้องการปรับค่าแล้วไปเปลี่ยนค่า Delta per Mouse Click เพื่อให้สามารถปรับค่าได้ดังรูป



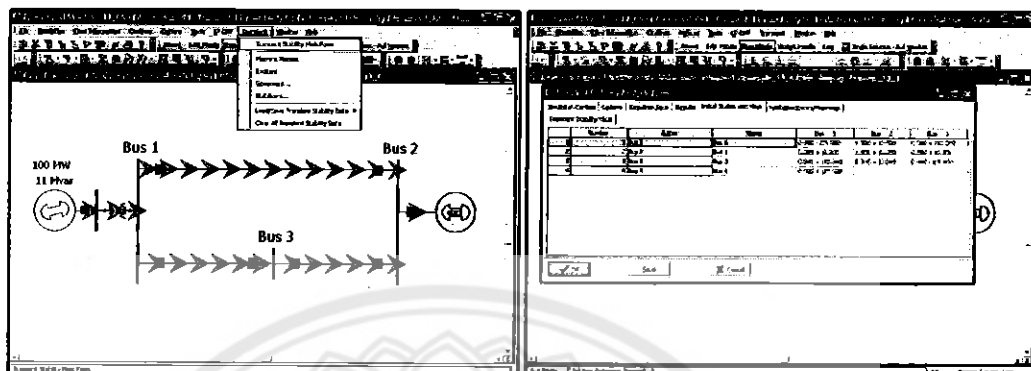
11. วิธีดูค่า Positive Sequence, Negative Sequence และ Zero Sequence รวมทั้งค่า Fault Current โดยระบบต้องอยู่ระหว่าง Run Mode ไปคลิกขวาตรงบัสแล้วคลิก Fault... ดังรูป



12. จากนั้นไปคลิก Calculate มุมซ้าย เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณค่า แล้วจะสามารถดูค่า Fault Current ที่เกิดขึ้นในแต่ละบัสได้ แล้วคลิกตรง Matrices เราจะได้ค่าของ Positive Sequence, Negative Sequence และ Zero Sequence จะแสดงดังรูป



13. วิธีการหาค่า Y_{bus} คณิตตรง Transient $\rightarrow$ Transient stability Main Form $\rightarrow$ Initial States and Y_{bus} ดังรูป



ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายพรชัย ยิ่งยืนเจริญสุข
 ภูมิลำเนา 90/1 หมู่ 10 ต.ห้วยซ้อ อ.เชียงของ จ.เชียงราย
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนห้วยซ้อวิทยาคม
 รัชมังคลาภิเษก จ.เชียงราย
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: slkk_k@hotmail.com



ชื่อ นายวรวัฒน์ แปงคำเรือง
 ภูมิลำเนา 62 หมู่ 11 ต.ป่าแฝก อ.แม่ใจ จ.พะเยา
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่ใจวิทยาคม
 จ.พะเยา
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: kongzya@hotmail.com