

การศึกษาเสถียรภาพสถานะชั่วคราวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว
ของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

A STUDY ON TRANSIENT STABILITY DISTRIBUTED GENERATOR OF VSPP
INTERCONNECTED POWER SYSTEM IN ISLANDING MODEL OF OPERATION

วชิรา เขจรสัจย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาเสถียรภาพสถานะชั่วคราวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว
ของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

วชิรา เขจรสัตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

A Study on Transient Stability for Distributed Generator of VSPP Interconnected Power System in Islanding Model of Operation

ชื่อ-นามสกุล

นายชริรา เขจรศักดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยั้ง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

.....กรรมการ
(อาจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)

.....กรรมการ
(อาจารย์พินิจ ศรีธร, Ph.D.)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 6 เดือน มกราคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ
ชื่อ-นามสกุล	นายวิชา เจริญศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำท้ายเขื่อนชลประทาน เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2 จำนวน 27 บัส

การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวในวิทยานิพนธ์ใช้วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน เพื่อหามุมวิกฤตและค่าเวลาวิกฤตของการกำจัดความผิดพลาดเพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณในการจำลอง กรณีที่เกิดความผิดพลาดสามเฟสที่บริเวณตำแหน่งบัสที่ทดสอบ

ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงเมื่อจำลองความผิดพลาดเกิดที่บริเวณบัสที่ทดสอบ มุมวิกฤตและเวลาวิกฤตการกำจัดความผิดพลาดซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์บริเวณตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด การประยุกต์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดแยกของสายส่ง บริเวณพื้นที่ดังกล่าว เวลาวิกฤตการกำจัดความผิดพลาดที่บัส 24 คือ 0.30 วินาที บัสที่ 20 คือ 0.35 วินาที และบัสที่ 25 คือ 0.15 วินาที ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์สามารถไปประยุกต์เป็นแนวทางในการวางแผนวิเคราะห์การจ่ายไฟได้ หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว

Thesis Title	A Study on Transient Stability for Distributed Generator of VSPP Interconnected Power System in Islanding Model of Operation
Name-Surname	Mr.Wachira Kechonsut
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistance Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

This thesis presents a study on transient stability for distributed Generator of very small power producer interconnected power system in islanding model of operation at Khundanprakanchon dam, Nakhonnayok province. The installation capacity is 10 MW connected to Nakhonnayok2 substation of Provincial Electricity Authority. The total bus number is 27 buses which are considered in this study.

The analysis of transient stability in this thesis is use the equal area criterion in order to find the critical angle and critical clearing time to remove of faults for distributed generator. The studies are carried out using MATLAB/SIMULINK program.

The simulation results show that the rotor angle is changed by fault in distribution line. The critical angle and critical clearing time are also changing which is direct proportion depend on line impedance. The application of protective installation at starting point and the node point distribution line the critical clearing time at bus number 24 is 0.30 second, bus number 20 is 0.35 second and bus number 25 is 0.15 second respectively. The results of the analysis can be adapted to help for electrical power planning scheme. If the power is distributed under islanding condition with limitation of stability and quality, then the reliability of power system could be satisfied and also able to reduce the impact of power outage.

Keywords: Distributed generator, islanding operation, transient stability

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดีข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ที่ให้คำปรึกษาในด้านการเรียนการสอนการวิจัย และในทุกๆ เรื่องซึ่งมีความเข้าใจนักศึกษาเสมือนหนึ่งเป็นบุคคลในครอบครัว เป็นผู้ที่ยึดติดตามกระตุ้นเตือนเสมอมาอย่างเสมอต้นเสมอปลาย และขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณาจารย์นอกภาคต่างๆ ท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงวิชาต่างๆ เป็นผู้ที่ทำให้คำชี้แนะ สั่งสอน และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจสามารถเรียบเรียงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จ และต้องขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณ พี่ๆ พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่สนับสนุนข้อมูล และให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยในทุกๆ ด้านมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

วชิรา เจริญชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	15
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	16
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	16
1.4 ขอบเขตของการวิทยานิพนธ์	16
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	16
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 วิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.2 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	19
2.3 ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก	21
2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability)	27
2.5 สมการการแกว่ง (Swing Equation)	27
2.6 แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ	31
2.7 เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว	34
บทที่ 3 การออกแบบและทดสอบ	40
3.1 แบบจำลองการทดสอบเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับทดสอบเสถียรภาพสถานะชั่วคราว ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
4.1 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	48
4.2 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20 เพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	50
4.3 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	53
4.4 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16 เพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	58
4.5 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	61
4.6 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10 เพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	64
4.6 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25 เพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	67
4.6 ผลทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27 เพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ข้อมูล Source Code ของโปรแกรมในงานวิจัย	79
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	83

สารบัญ (ต่อ)

ประวัติผู้เขียน..... 106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	47
ตารางที่ 4.1 ค่ามุมวิกฤตบริเวณบัสต่างๆ	75
ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาวิกฤตบริเวณบัสต่างๆ	75



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบสายส่ง 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	20
รูปที่ 2.2 ระบบจำหน่าย 22 และ 33 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	20
รูปที่ 2.3 ระบบจำหน่ายแรงต่ำ 400/230 โวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	21
รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของแกน โรเตอร์ภายในสภาวะปกติมุมทางไฟฟ้าจะคงที่.....	28
รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะต่างๆ	31
รูปที่ 2.6 การต่อเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์แบบคลาสสิก	31
รูปที่ 2.7 การแปลงวงจรไฟฟ้าแบบ Y ให้เป็นวงจรแบบ	32
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์.....	33
รูปที่ 2.9 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	35
รูปที่ 2.10 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันในการลัดวงจรสามเฟสด้านส่ง	36
รูปที่ 2.11 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤต	37
รูปที่ 2.12 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเมื่อลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิด	38
รูปที่ 2.13 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิด	39
รูปที่ 3.1 เครื่องผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับ ระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2.....	40
รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียลบัส 27 บัส เครื่องผลิตไฟฟ้า ขนาด กำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	41
รูปที่ 3.3 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24	42
รูปที่ 3.4 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20	42
รูปที่ 3.5 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18	43
รูปที่ 3.6 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16	43
รูปที่ 3.7 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15	44
รูปที่ 3.8 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10	44
รูปที่ 3.9 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25	45
รูปที่ 3.10 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27	45
รูปที่ 4.1 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24	48
รูปที่ 4.2 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 24	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.30 แบบจำลองทดสอบการเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10	64
รูปที่ 4.31 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10.....	65
รูปที่ 4.32 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ	65
รูปที่ 4.33 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.5 วินาที	66
รูปที่ 4.34 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.8 วินาที	66
รูปที่ 4.35 แบบจำลองทดสอบการเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25	67
รูปที่ 4.36 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25.....	67
รูปที่ 4.37 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ	67
รูปที่ 4.38 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 25	68
รูปที่ 4.39 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.10 วินาที	69
รูปที่ 4.40 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.15 วินาที	69
รูปที่ 4.41 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.2 วินาที	70
รูปที่ 4.35 แบบจำลองทดสอบการเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27	71
รูปที่ 4.36 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดพอลิเมอร์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27.....	71
รูปที่ 4.37 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ	72
รูปที่ 4.38 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 27	73
รูปที่ 4.39 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.10 วินาที	73
รูปที่ 4.40 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.16 วินาที	74
รูปที่ 4.41 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.17 วินาที	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
E'	กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
E_B	กำลังไฟฟ้าที่บัสบนันต์
E_t	แรงดันที่ปลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
f	ความถี่ของระบบไฟฟ้า
f_0	ความถี่เริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
H	ความใหญ่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหน่วยเป็น MJ.s/MVA
J	โมเมนต์ความเฉื่อยของ Prime Mover และ Generator
$J\omega_m$	ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant, M)
P_e	กำลังทางไฟฟ้า
P_m	กำลังทางกล
P_s	กำลังไฟฟ้าเชิง โครนัส
t_s	ค่าคงที่ทางเวลา
T_a	กำลังทอร์กอัตราเร่ง
T_e	กำลังทางไฟฟ้า
T_m	กำลังทอร์กทางกล
X'_d	ความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
X_T	ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้า
X_{T_r}	ความต้านทานหม้อแปลงไฟฟ้า
δ	มุมโรเตอร์
$\Delta\delta$	การเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์
δ_m	มุมการเคลื่อนที่ (Angular Displacement) ของโรเตอร์ เทียบกับแกนอ้างอิง
θ_m	มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยเทียบกับแกนอ้างอิงของสเตเตอร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
กฟผ.	การไฟฟ้าฝ่ายผลิต
กฟภ.	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
PEA	Provincial Electricity Authority
p.u.	Per Unit
SPP	Small Power Producer
T_r	Transformer
VSPP	Very Small Power Producer



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ออกแบบให้รับไฟจากโรงไฟฟ้าและระบบสายส่ง(Generation and Transmission System) ของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ระดับแรงดัน 115 เควี 22 เควี หรือ 33 เควี ผ่านสถานีไฟฟ้าย่อย จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟรายใหญ่ที่ระดับแรงดัน 115 เควี 22 เควี หรือ 33 เควี ผ่านระบบจำหน่ายโดยตรง เป็นแบบเรเดียล อีกส่วนหนึ่งจะถูกแปลงแรงดันให้ต่ำลงเหลือ 400 โวลต์ และ 230 โวลต์ โดยหม้อแปลงระบบจำหน่ายและเดินสายแรงต่ำไปหาผู้ใช้ไฟอีกทีหนึ่ง

ปัจจุบันรัฐบาลได้ดำเนินนโยบายส่งเสริมให้ภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการลงทุนผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นการนำเอาพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาผลิตกระแสไฟฟ้าขายให้กับ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงมีโครงการพัฒนาแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก(VSPP) เกิดขึ้น [1] และแนวโน้มของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากนับวันจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) เป็นหัวข้อที่มีการนำมาสนทนาระหว่าง การไฟฟ้า ลูกค้า รวมทั้งเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว [3,4] การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาหรือมีการดับไฟเมื่อมีแผนปฏิบัติ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดไฟฟ้ดับ เมื่อเริ่มต้นเข้าสู่การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ จากการหลุดออกจากระบบไฟฟ้าหลักของการไฟฟ้า ความปลอดภัยเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สำคัญในการจ่ายไฟ เนื่องจาก ผู้ปฏิบัติงานอาจไม่ทราบว่าบริเวณการเกิดความผิดปกติยังมีการจ่ายไฟอยู่หรือไม่ และการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระยังคงมีเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมหรือไม่ [5,6] วิทยานิพนธ์นี้ได้เห็นความสำคัญจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้า หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้และมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้ดับได้อีกทางหนึ่ง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาผลตอบสนองทางด้านเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากรณีที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดจ่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กมากจ่ายไฟแบบแยกอิสระ
2. เก็บผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไว้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าต่อไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระผลการศึกษาจะเป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันระบบไฟฟ้าและสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

พิจารณาและวิเคราะห์ผลตอบสนองทางด้านเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกอิสระ ประมวลผลใช้โปรแกรม MATLAB

1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

- ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยค้นคว้าจากตำราวิชาการต่างๆ
 2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่ใช้ในการทดสอบรวมถึงหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์
 3. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า
 4. ทำการออกแบบระบบทดสอบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า
 5. ทำการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยจำลองสถานการณ์ความผิดปกติตำแหน่งต่างๆในระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ
 6. วิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย
 7. จัดทำรายงานการวิจัยและสรุปผลดำเนินงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวระบบไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กมากกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
2. ผลจากการวิเคราะห์สามารถไปประยุกต์เป็นแนวทางในการวางแผนวิเคราะห์การจ่ายไฟได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพสถานะชั่วคราวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระผู้วิจัยขอเสนอรายละเอียดต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อ ได้ดังนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
3. ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer: VSPP)
4. เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prabha Kundur [1] ได้สรุปนิยาม และ ประเภทของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งนิยามของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง คือความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพย่อมสามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้ เสถียรภาพในระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ เสถียรภาพการเคลื่อนที่เชิงมุม (Rotor Angle Stability), เสถียรภาพของความถี่ (Frequency Stability) และ เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability)

F.H. Guan, D.M Zhao, X. Zhang, B.T Shan, Z. [2] เป็นบทความที่อธิบายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) มีการแบ่งประเภทและคุณลักษณะทางเทคนิคของพลังงานต่างๆมีการจัดหมวดหมู่ตามประเภทเทคโนโลยีของพลังงาน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำขนาดเล็ก พลังงานเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งพลังงานแต่ละประเภทมีคุณลักษณะทางเทคนิคแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็น กำลังการผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เสถียรภาพของระบบข้อจำกัดสถานที่ติดตั้ง และผลกระทบต่างๆ ต่อระบบไฟฟ้า

Gomez, J.C.; Morcos, M.M [3] เป็นบทความที่กล่าวถึงการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) ซึ่งเป็นหัวข้อที่มีการนำมาสนทนาระหว่าง การไฟฟ้า ลูกค้า รวมทั้งเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นเข้าสู่การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ จากการหลุดออกจากระบบไฟฟ้าหลักของการไฟฟ้า ความปลอดภัยเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สำคัญในการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานอาจไม่ทราบว่ามีบริเวณ

การเกิดความบกพร่อง ยังมีการจ่ายไฟอยู่หรือไม่ และการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระยังคงมีเสถียรภาพ และคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมหรือไม่ แต่ถ้าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ได้ และมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟดับได้อีกทางหนึ่ง

Pradit Fuangfoo Wei-Jen Lee Khaled A. Nigim [4] เป็นบทความที่กล่าวถึง การจ่ายไฟแบบ islanding โดยตั้งใจจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือต่อระบบไฟฟ้าประเทศไทย โดยได้จำลองการจ่ายไฟ และศึกษาคุณสมบัติทางไดนามิกของระบบไฟฟ้าในขณะที่จ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

Pradit Fuangfoo,Thongchai Meenual, Wei-Jen Lee, Chow-Chompoo-Inwai[5] เป็นบทความที่กล่าวถึงการจ่ายไฟแบบ Islanding อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาหรือมีการดับไฟเมื่อมีแผนปฏิบัติ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ จะไม่อนุญาตให้ดำเนินการต้องศึกษาผลกระทบเสียก่อนเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและเสถียรภาพของระบบก่อน

การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ มีปัจจัยสำคัญในการพิจารณา ดังนี้

1. ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในระบบจำหน่ายที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่
2. ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกัน

การศึกษารายจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- Forming of islanding
- Operating during islanding
- Resynchronization

การศึกษผลกระทบต่อการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) จะศึกษาผลกระทบ 2 ส่วน ดังนี้

- การศึกษาผลกระทบทางพลวัต
- การศึกษาผลกระทบทาง Steady-State

จากการวิจัยที่ได้ศึกษาจะเห็นได้ว่าการจ่ายไฟแบบแยกอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพระบบไฟฟ้า ต้องมีการศึกษาผลกระทบและแนวทางการปฏิบัติในการจ่ายไฟแบบแยกอิสระก่อนจะนำไปปฏิบัติจริง เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานอีกทั้งเสถียรภาพระบบไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้าต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ [5-6] เพื่อความมั่นคงต่อการจ่ายไฟและสามารถลดความเสียหายจากไฟฟ้าดับได้

2.2 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นรัฐวิสาหกิจด้านสาธารณูปโภค ก่อตั้งขึ้นตามพระราชบัญญัติการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ. 2503 โดยรับโอนทรัพย์สิน หนี้สินและความรับผิดชอบขององค์กรไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในขณะนั้นมาดำเนินการ วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคคือ การผลิตจัดหาให้ได้มา จัดส่งและจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ประชาชน ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมต่างๆ ในเขตจำหน่าย 73 จังหวัดทั่วประเทศ ยกเว้นจังหวัด กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แบ่งระบบจำหน่ายตามระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 ระดับ คือ

1. สายส่งระบบ 115 และ 69 เควี
2. ระบบจำหน่าย 33 และ 22 เควี
3. ระบบจำหน่ายแรงต่ำ 400/230 โวลท์



รูปที่ 2.1 ระบบสายส่ง 115 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 2.2 ระบบจำหน่าย 22 และ 33 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 2.3 ระบบจำหน่ายแรงต่ำ 400/230 โวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2.3 ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer: VSPP)

ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก หมายถึง ผู้ผลิตไฟฟ้า ทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเอง มีลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยมีปริมาณพลังไฟฟ้าขายเข้าระบบไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ จากพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในธรรมชาติ เมื่อใช้หมดไปแล้วสามารถผลิตทดแทนได้ใหม่ในระยะเวลาอันสั้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังน้ำ พลังงานคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร, พลังงานความร้อนใต้พิภพ, พลังงานชีวมวล, พลังงานจากก๊าซชีวมวล รวมถึงพลังงานขั้นที่สองที่ผลิตจากพลังงานหมุนเวียนตามที่กล่าวมา เช่น เชื้อเพลิงจากพืช (Biofuel) เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น ทั้งนี้ไม่รวมถึงพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปหรือแหล่งทรัพยากรมีจำกัด เช่น พลังงานที่ได้จากถ่านหิน, หินน้ำมัน, ทรายน้ำมัน, น้ำมันดิบ, น้ำมันเชื้อเพลิง, ก๊าซธรรมชาติ และนิวเคลียร์ ซึ่งมีรายละเอียด และรูปแบบกระบวนการผลิตดังต่อไปนี้

1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เช่น พลังลม พลังแสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก (Mini Hydroelectricity) พลังน้ำขนาดเล็กมาก (Micro Hydro Electricity) พลังคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร พลังความร้อนใต้พิภพ และก๊าซชีวมวล เป็นต้น

2. การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงดังต่อไปนี้

ก) กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร หรือกากจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือการเกษตร

ข) ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากกากหรือเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร หรือจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือการเกษตร

ค) ขยะมูลฝอย

ง) ไม้จากการปลูกป่าเป็นเชื้อเพลิงซึ่งผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่ใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้เชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

เสริมได้ แต่ทั้งนี้พลังงานความร้อนที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงเสริมในแต่ละรอบปีไม่เกินร้อยละ 25 ของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในรอบปีนั้นๆ

3. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานที่ได้มาจากกระบวนการผลิต การใช้ หรือการขนส่งเชื้อเพลิง ได้แก่

ก) พลังงานที่เหลือทิ้งเช่น ไอน้ำที่เหลือจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือการเกษตร

ข) พลังงานสูญเสีย เช่น ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์

ค) พลังงานที่เป็นผลพลอยได้ เช่น พลังงานกลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการปรับลดความดันของก๊าซธรรมชาติ ทั้งนี้ไม่รวมถึงการใช้พลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปมาผลิตไฟฟ้าโดยตรง

2.3.1 ระเบียบและหลักเกณฑ์

ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (VSPP)

เป็นระเบียบว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย สำหรับปริมาณพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW โดยเริ่มใช้ระเบียบนี้ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2549 เป็นต้นไป มีประเด็นสำคัญพอสังเขป ดังนี้

2.3.1.1 ปริมาณพลังไฟฟ้าของ VSPP ที่จะจ่ายเข้ากับระบบสำหรับ กฟภ. กำหนด ปริมาณพลังไฟฟ้า ตามระดับแรงดัน คือ ระบบ 22 kV ไม่เกิน 8.0 MW/ ผู้ได้รับอนุญาต และระบบ 33 kV ไม่เกิน 10.0 MW/ ผู้ได้รับอนุญาต

2.3.1.2 ปริมาณพลังไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบ 66 kVA จะเชื่อมโยงกับระบบ ณ ระดับแรงดัน 22-33 kV ปริมาณพลังไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไม่เกิน 66kVA จะเชื่อมโยงระบบ ณ ระดับแรงดันที่ กฟภ. พิจารณา โดย กฟภ. สามารถขยายปริมาณพลังไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ทำการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า ได้ตามความเหมาะสมของระบบในแต่ละพื้นที่ โดยจะพิจารณาถึงความปลอดภัย มาตรฐานทางด้านบริการ และผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

2.3.1.3 กำหนดให้จุดติดตั้งเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเป็นจุดแบ่งความรับผิดชอบระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายกับผู้ให้สัญญา

2.3.1.4 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของ กฟภ. ที่สภาวะปกติอยู่ที่ $\pm 5\%$ ของแรงดันปกติและในสภาวะไม่ปกติยอมรับได้ถึง $\pm 10\%$ ของแรงดันปกติ

2.3.1.5 รักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที

2.3.1.6 รักษาค่า Power Factor อยู่ในช่วง 0.85 Lagging

2.3.1.7 ค่าปริมาณความผิดเพี้ยนรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายวัดที่จุดต่อร่วม จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า (PRC-PQG-01/1998) ประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

2.3.1.8 ต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่มีมาตรฐานและมีจำนวนชนิดที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายยอมรับ

นอกจากที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีข้อกำหนดอีกหลายประการที่เป็นลักษณะของระเบียบทั่วไป ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยตรง จึงไม่ขอกล่าวไว้ ณ ที่นี้

ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP (สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน)[9]

ได้กำหนดคำนิยามของ “พลังงานหมุนเวียน” ว่า หมายถึง พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เมื่อใช้หมดไปแล้วสามารถผลิตทดแทนได้ใหม่ในระยะเวลาอันสั้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ พลังงานคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ รวมถึงพลังงานขั้นที่สองที่ผลิตจากพลังงานหมุนเวียนตามที่กล่าวมา เช่น เชื้อเพลิงจากพืช (Biofuel) เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น ไม่รวมถึงพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปหรือแหล่งทรัพยากรมีจำกัด เช่น พลังงานที่ได้จากถ่านหิน หินน้ำมัน ทรายน้ำมัน น้ำมันดิบ น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ และนิวเคลียร์ เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP

- เพื่อส่งเสริมให้ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากเข้ามามีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า
- เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- เพื่อเป็นการกระจายโอกาสไปยังพื้นที่ห่างไกลให้มีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า
- เพื่อช่วยแบ่งเบาภาระทางด้านการลงทุนของรัฐในระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า

ลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าของ VSPP

การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP ที่ผลิตไฟฟ้าตามลักษณะกระบวนการผลิตดังต่อไปนี้

- การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เช่น พลังลม พลังแสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก (Mini Hydroelectricity) พลังน้ำขนาดเล็กมาก (Micro Hydroelectricity) พลังคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร พลังความร้อนใต้พิภพ และก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

- การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้หรือที่แปรรูปมาจากกากหรือเศษวัสดุจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือการเกษตร ขยะมูลฝอย ไม้จากการปลูกป่าเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้อาจจะใช้พลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปหรือแหล่งทรัพยากรมีจำกัด แต่พลังงานความร้อนที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงเสริมในแต่ละรอบปี ต้องไม่เกินร้อยละ 25 ของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในรอบปีนั้นๆ

- การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานที่ได้มาจากกระบวนการผลิต การใช้ หรือการขนส่งพลังงานที่เหลือทิ้ง เช่น พลังงานไอน้ำที่เหลือจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือการเกษตร พลังงานสูญเสียจากไอเสียเครื่องยนต์ พลังงานที่เป็นผลพลอยได้ เช่น พลังงานกล ซึ่งเป็นผลพลอยได้ จากการปรับลดความดันของก๊าซธรรมชาติ ทั้งนี้ ไม่รวมถึงการใช้พลังงานสิ้นเปลือง ที่ใช้แล้วหมดไปมาผลิตไฟฟ้าโดยตรง

ค่าใช้จ่ายของ VSPP

- ค่าใช้จ่ายที่ VSPP จะต้องรับภาระในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าได้แก่ ค่าจำหน่ายไฟฟ้าจากจุดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าถึงโรงไฟฟ้าของ VSPP ค่ามาตรวัดไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับระบบป้องกันไฟฟ้าและค่าทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน ยกเว้นกรณีที่อยู่การผลิตไฟฟ้ามีระบบป้องกันรวมอยู่แล้ว ทั้งนี้ จะไม่คิดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบแบบเพื่อการขนานเครื่องสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับระบบแรงดันต่ำ โดยจะต้องชำระค่าใช้จ่ายดังกล่าวให้เสร็จสิ้นก่อนที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะเริ่มดำเนินการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า

หลักการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟาระหว่าง การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย กับ VSPP มีรายละเอียดการพิจารณา ดังนี้

- การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานที่ได้มาจากกระบวนการผลิต อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP เท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก ตามประเภทการใช้ไฟฟ้าของ VSPP รวมกับค่าไฟฟ้าผันแปร (Fuel Adjustment Charge (at the given time): Ft) ขายปลีก ในเดือนนั้นๆ ในส่วนของค่าไฟฟ้าส่วนอื่นๆ ที่นอกเหนือจากค่าพลังงานไฟฟ้า VSPP ยังคงต้องจ่ายตามประเภทการใช้ไฟฟ้านั้นๆ ตามเดิม

- VSPP ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าขายเข้าระบบไม่เกิน 6 MW การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะแบ่งการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ VSPP ขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายน้อยกว่า หรือเท่ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP ในแต่ละเดือน การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้ เท่ากับค่าพลังงานไฟฟ้าตาม โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกหรือค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ย ที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP รายนั้นๆ ในเดือนนั้นๆ รวมกับค่า Ft ขายปลีก

- ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ VSPP ขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายมากกว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP ในแต่ละเดือน การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เท่ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP ในแต่ละเดือน ด้วยราคาค่าพลังงานไฟฟ้าตาม โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกหรือค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ย ที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP รายนั้นๆ ในเดือนนั้นๆ รวมกับค่า Ft ขายปลีก

พลังงานไฟฟ้าส่วนที่ VSPP ขายเกินกว่าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP กำหนดราคาซื้อขายเป็น 2 กรณี คือ กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตราปกติ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าขายส่งเฉลี่ยทุกระดับแรงดัน ที่การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทยขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวมกับค่า Ft ขายส่งเฉลี่ย กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตรา TOU อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดัน 11-33 kV ที่การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทยขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย รวมกับค่า Ft ขายส่งเฉลี่ย

- VSPP ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าขายเข้าระบบเกินกว่า 6 MW การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าในอัตราค่าไฟฟ้า ดังนี้

- กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตราปกติ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าขายส่งเฉลี่ยทุกระดับแรงดัน ที่การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทยขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย รวมกับ Ft ขายส่งเฉลี่ย

- กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตรา TOU อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดัน 11-33 kV ที่การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทยขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย รวมกับค่า Ft ขายส่งเฉลี่ย

- VSPP ที่มีปริมาณพลังงานไฟฟ้าเสนอขายตามสัญญาเกิน 1 MW ณ จุดรับซื้อไฟฟ้าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่นำมาคำนวณจะถูกหักออกร้อยละ 2 ของปริมาณพลังงานไฟฟ้าส่วนที่ VSPP ขายเกินกว่าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ VSPP เพื่อเป็นค่าดำเนินการ โครงการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP

ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP (สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ Cogeneration)[9]

วัตถุประสงค์ของการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP

- เพื่อส่งเสริมให้ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากเข้ามามีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า
- เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- เพื่อส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพมีการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- เพื่อเป็นการกระจายโอกาสไปยังพื้นที่ห่างไกลให้มีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า
- เพื่อช่วยแบ่งเบาภาระทางด้านการลงทุนของรัฐในระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า

ลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าของ VSPP

การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP ที่ผลิตไฟฟ้าด้วยระบบผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าร่วมกัน (Cogeneration หรือ Combined Heat and Power : CHP) โดยใช้เชื้อเพลิงที่เป็นพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งมีข้อกำหนดในกระบวนการผลิตดังนี้

- เป็นการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่อง โดยการนำพลังงานความร้อนที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้าไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม (Thermal Processes) เรียกว่า Topping Cycle หรือ ในทางตรงข้าม โดยการนำพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการอุตสาหกรรมไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Bottoming Cycle

- ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัดส่วนการประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า (Primary Energy Saving) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ในแต่ละปี

ค่าใช้จ่ายของ VSPP

- ค่าใช้จ่ายที่ VSPP จะต้องรับภาระในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า ได้แก่ ค่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากจุดเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าถึงโรงไฟฟ้าของ VSPP ค่ามาตรวัดไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับระบบป้องกันไฟฟ้าและค่าทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน ยกเว้นกรณีที่อุปกรณ์ของผู้ผลิตไฟฟ้ามีระบบป้องกันรวมอยู่แล้ว ทั้งนี้ จะไม่คิดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบแบบเพื่อการขนานเครื่องสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับระบบแรงดันต่ำ โดยจะต้องชำระค่าใช้จ่ายดังกล่าวให้เสร็จสิ้นก่อนที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะเริ่มดำเนินการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า

หลักการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟ้าระหว่าง การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย กับ VSPP มีรายละเอียดการพิจารณา ดังนี้

- การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้า เท่ากับค่าไฟฟ้าตาม โครงสร้าง ค่าไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดันที่ VSPP ทำการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวม กับค่า Ft ขายส่งเฉลี่ย

- ผู้ผลิต ไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่มีปริมาณพลังไฟฟ้าเสนอขายตามสัญญาเกิน 1 เมกะวัตต์ ณ จุดรับซื้อพลังงานไฟฟ้า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่นำมาคำนวณ จะถูกหักออกร้อยละ 2 ของ ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้าที่ขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย เพื่อเป็นการดำเนินการ โครงการรับซื้อไฟฟ้า จากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก

2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability)

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง [8], [9] จะมีความสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ กับ ความสามารถในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบรวมกันถ้าเกิดมีเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นไม่ว่าจะเป็นสาเหตุอื่นใดก็ตามหากระบบยังมีความสามารถกลับเข้ามาสู่ สภาวะสมดุลได้เรียกว่า “ระบบยังมีเสถียรภาพ” ซึ่งตัววัดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ ความถี่ และแรงดัน การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งตามชนิดและขนาดของ สิ่งรบกวน (Disturbance) ได้สามรูปแบบคือ เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) เสถียรภาพคงตัว (Steady State Stability) และเสถียรภาพพลวัต (Dynamic Stability)

3.2.1 เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) เกิดจากระบบมีสิ่งรบกวนขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดขึ้น อย่างรวดเร็ว และดับพลันได้แก่เกิดการลัดวงจรในระบบ การปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือการเปลี่ยนแปลงของโหลดขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

3.2.2 เสถียรภาพคงตัว (Steady State Stability) เกิดจากระบบมีสิ่งรบกวนซึ่งมีขนาดเล็กๆ และเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ได้แก่การเพิ่ม หรือลดของโหลดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

3.2.3 เสถียรภาพพลวัต (Dynamic Stability) เกิดจากระบบมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้น ได้แก่ปลด โหลดขนาดขนาดใหญ่ออกจากระบบทำให้เกิดการแกว่งของไฟฟ้ากำลัง (Power Oscillation) ในรูป ของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

2.5 สมการการแกว่ง (Swing Equation)

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจจะหมุนเร็วขึ้นหรือช้าลง ซึ่งจะส่งผลต่อ Synchronously Rotating Air Gap MMF ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความเร่ง และมีการเคลื่อนที่แบบพลวัต

(Dynamic Motion) เกิดขึ้น เรียกสมการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบพลวัตนี้ว่า “สมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้า” (Swing Equation) [8], [9] และเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคจร โดยไม่คิดค่าความสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าระบบไฟฟ้ากำลังจะสมดุลเมื่อกำลังทอร์กทางกลจะเท่ากับกำลังทางไฟฟ้าดังสมการที่ (2.1)

$$T_m = T_e \quad (2.1)$$

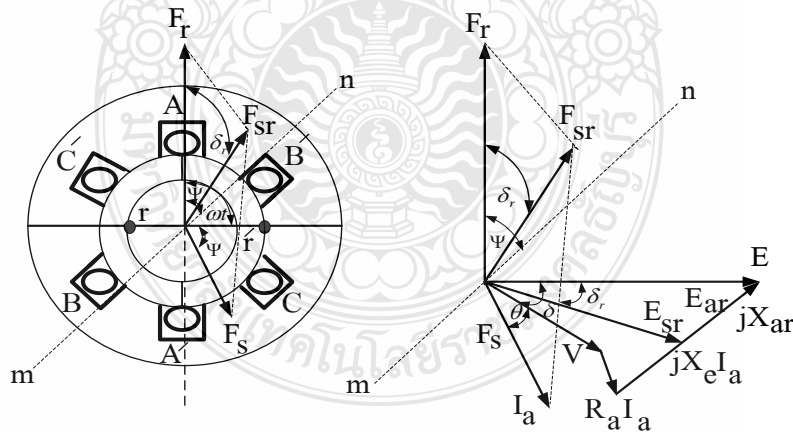
เมื่อพิจารณาเมื่อสิ่งรบกวนในระบบ (Disturbance) พบว่า $T_m \neq T_e$ ขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นและมีทอร์กอัตราเร่ง (Accelerating Torque, T_a) เกิดขึ้นบนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ($T_m > T_e$) และ Decelerating ($T_m < T_e$) เขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.2)

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

สามารถเขียนสมการในรูปโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment Of Inertia) ได้เป็นดังสมการที่ (2.3)

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ Prime Mover และ Generator และ θ_m มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยเทียบกับแกนอ้างอิงของสเตเตอร์



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของแกนโรเตอร์ภายในสภาวะปกติมุมทางไฟฟ้าจะคงที่

เมื่อความเร็วโรเตอร์สัมพันธ์กับความเร็วสเตเตอร์การวัดตำแหน่งมุมโรเตอร์จะทำการเทียบกับแกนอ้างอิงโดยหมุนที่ความเร็วเชิงโคจรเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการที่ (2.4)

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.4)$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วเชิงโคจรของเครื่องจักรกล [rad/s]

δ_m คือ มุมการเคลื่อนที่ (Angular Displacement) ของโรเตอร์ เทียบกับแกนอ้างอิง ก่อนเกิดการรบกวน ($t = 0$) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (Rotor Angular Velocity) ได้ตั้งสมการที่ (2.5)

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{ms}t + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.5)$$

อัตราเร่งของโรเตอร์ (Rotor Acceleration) หาได้ตั้งสมการที่ (3.6)

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{ms}t + \frac{d\delta_m}{dt}$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.6)$$

นำสมการที่ (3.6) แทนในสมการที่ (2.3) จะได้เป็นสมการที่ (2.7)

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.7)$$

คูณด้วย ω_m ทั้ง 2 ข้างของสมการ โดยที่ $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$ จะได้สมการที่ (2.8)

$$J \omega_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.8)$$

เมื่อ $J \omega_m$ คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant, M)

โดยที่ M มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานจลน์สะสมของการหมุน (Wk) (Kinetic Energy Of The Rotating Masses) และสามารถเขียนอยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าได้ตั้งสมการที่ (2.9)

$$J \omega_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

ซึ่งค่า M จะไม่คงที่ถ้าความเร็วโรเตอร์ ω_m เบี่ยงออกความ ω_{sm} ซึ่งในทางปฏิบัติ ค่า ω_m จะไม่ต่างจาก ω_{sm} มากนักเมื่อเครื่องจักรทำงานที่สภาวะคงตัว ก่อนที่จะสูญเสียเสถียรภาพซึ่งสามารถสมมติให้ $\omega_m = \omega_{sm}$ จะได้ตั้งสมการที่ (2.10)

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m$$

หรือ
$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.10)$$

และสามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในเทอมของค่ามุมกำลังไฟฟ้า (Electrical Power Angle, δ) ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้ $\delta = \frac{\rho}{2} \delta_m$ และ $\omega = \frac{\rho}{2} \omega_m$

เมื่อ ρ คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเขียนได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{2}{\rho} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

สามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในรูป p.u. ได้เป็นสมการที่ (2.12)

$$\frac{2}{\rho} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.12)$$

เมื่อ S_B คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐานของระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติ จะบอกค่าคงที่เป็นค่าคงที่ H นิยามว่า

$$H = \frac{\text{Kinetic Energy in MJ at Rated Speed}}{\text{Machine Rating in MVA}}$$

$$= \frac{W_K}{W_B}$$

แทนค่า $\omega_{sm} = \frac{\rho}{2} \omega_m$ จะได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{2}{\rho} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.13)$$

เมื่อ ω_s คือ Electrical Angular Velocity ซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω_s และความถี่ f_0 สามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เป็นสมการที่ (3.14)

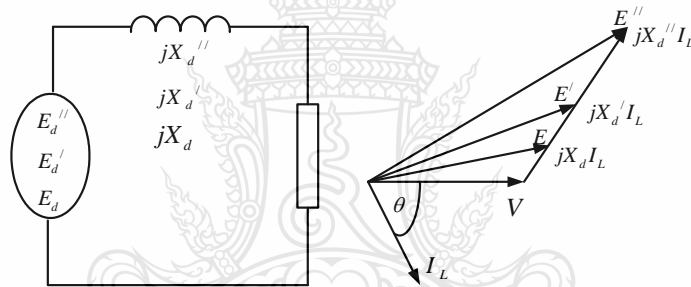
$$\frac{2H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)m} \quad (2.14)$$

และวิเคราะห์มุม δ ในรูปขององศาทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

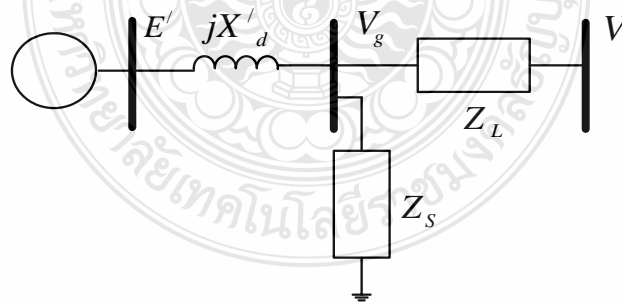
$$\frac{H}{180f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.15)$$

2.6 แบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง [8], [9] จะใช้แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแหล่งจ่าย E' กับค่า X_d'' , X_d' และ X_d แล้วแต่สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองละเลยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วขึ้นดังแสดงได้ในรูปที่ 2.5 และการต่อเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับสายส่งจะจำลองรูปแบบอย่างง่ายในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์แบบคลาสสิกดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6

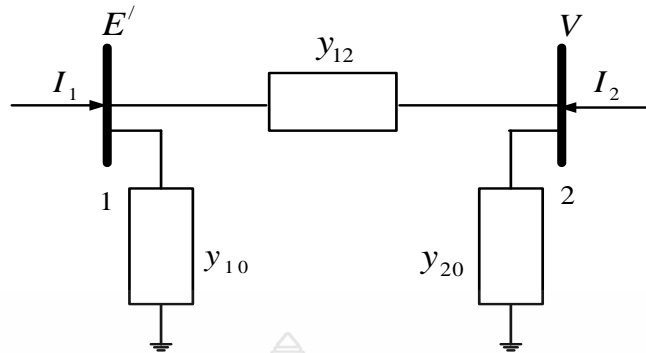


รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะต่างๆ



รูปที่ 2.6 การต่อเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์แบบคลาสสิก

บัส V เรียกว่า Infinite Bus โดยมี ขนาดแรงดัน และ ความถี่ คงที่ ซึ่งบัส V อาจเป็นบัสเชื่อมต่อภายนอกที่มีขนาดใหญ่ (Very Large System) และจากรูปที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์วงจรแบบ Y ให้เป็นวงจรแบบ Δ ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแปลงวงจรไฟฟ้าแบบ Y ให้เป็นวงจรแบบ Δ

รูปที่ 2.7 สามารถเขียนสมการแปลงอิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้าแบบ Y ให้เป็นวงจรแบบ Δ ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังสมการ

$$y_{10} = \frac{Z_L}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

$$y_{20} = \frac{jX'_d}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

$$y_{12} = \frac{Z_S}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

จากรูปที่ 2.7 หาสมการของกระแส I_1 และ I_2 ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังสมการ

$$I_1 = (y_{10} + y_{12})E' - y_{12}V$$

$$I_2 = -y_{12}E' + (y_{20} + y_{12})V$$

เขียนสมการโหนดให้อยู่ในรูปเมตริกเป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix}$$

และจากสมการในรูปแบบเมตริกหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่โหนด 1 ได้จากสมการ

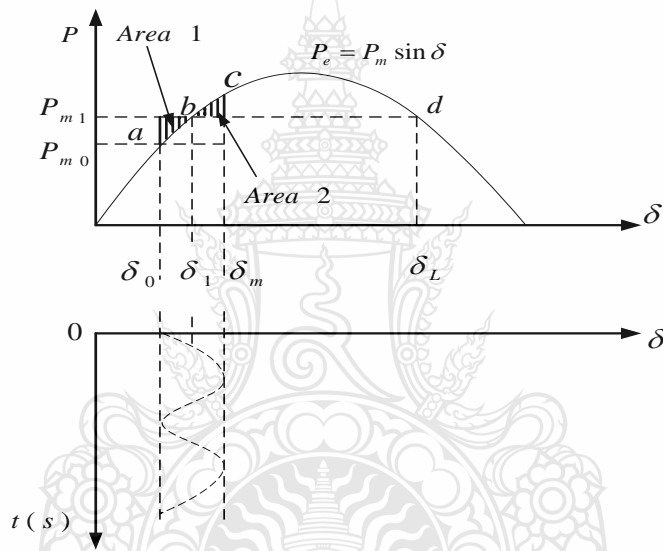
$$\begin{aligned} P_e &= \Re [E' I_1^*] \\ &= \Re [(|E'| \angle \delta) (|Y_{11}| \angle -\theta_{11} |E'| \angle -\delta + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} |V| \angle 0)] \end{aligned}$$

จากสมการที่โหนด 1 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการ

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos \delta - \theta_{12}$$

และระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ ค่า Z_L และ Z_s จะพบว่า $X \gg R$ ในการวิเคราะห์ และคำนวณอย่างง่าย สามารถตัดค่าความต้านทานทิ้งได้ ซึ่งจะพบว่า $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$ และ $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$ และสามารถ

นำสมการข้างต้นดังกล่าวมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_e) และมุมการเปลี่ยนแปลงของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (δ) ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_e) และการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ (δ)

จากรูปที่ 2.8 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอยู่ภายใต้ความสมดุลระหว่าง Mechanical Torque และ Electrical Torque ถ้าเสถียรภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปจุดสมดุลจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยมีผลทำให้อัตราเร่งของ Rotor Angle เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามกฎของการเคลื่อนที่ (Motion Equation) ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าอีกเครื่องหนึ่งมุมของ Rotor เมื่อเทียบกับแกน Rotor ของเครื่องกำเนิดนั้นจะมากกว่าเครื่องกำเนิดที่หมุนช้ากว่า [5] ความแตกต่างของมุมเป็นผลให้ภาระของเครื่องกำเนิดที่ช้ากว่าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดที่เร็วกว่าซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกราฟ $P-\delta$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดมุมที่แยกออกจากกันมากเท่าใดจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าที่ลดลงตามความสัมพันธ์ระหว่าง $P-\delta$ และผลของมุมที่แยกออกมากยิ่งขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบยิ่งลดลง และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมุมเป็น 90° ดังสมการที่ (2.16)

$$P_{Max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (3.16) สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จนถึงค่า P_{max} (Maximum Power Transferred) ซึ่งค่า P_{max} เป็นขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าของเสถียรภาพในสภาวะคงตัว (Steady State Stability Limit) และสามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้เป็นสมการที่ (2.17)

$$P_e = |E'| |V| |B_{12}| \cos(\delta - 90^\circ) \quad (2.17)$$

2.7 เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว

การศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวมีเพื่อต้องการทราบว่าเครื่องกำเนิดจะคงอยู่ในระบบได้หรือไม่เมื่อต้องเจอกับการรบกวนที่รุนแรงทันทีทันใด การรบกวนชนิดนี้อาจมีเช่น การลัดวงจร การหลุดออกของเครื่องกำเนิดในระบบ การเชื่อมต่อของโหลดขนาดใหญ่หรือการสูญเสียโหลดขนาดใหญ่ เป็นต้น

วิธีการเงื่อนไขพื้นที่เท่ากันจะใช้การศึกษาพื้นที่ที่เก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการหมุนกับพลังงานที่เข้ามารบกวนว่ามีขนาดเท่ากันหรือไม่ จะศึกษาเครื่องกำเนิดหนึ่งตัวต่ออยู่กับบัสระบบใหญ่เท่านั้น

จากสมการการแกว่งของเครื่องกลเมื่อไม่คิดค่าความหน่วงตั้งสมการที่(2.18)

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.18)$$

เมื่อ p_d เป็นกำลังที่ใช้ในการเร่ง จากสมการที่(2.18) จะได้ว่า

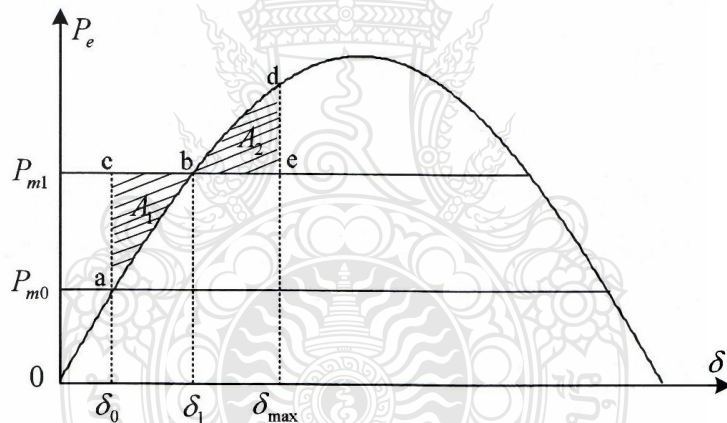
$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_a) \quad (2.19)$$

ถ้านำ $2d\delta/dt$ มาคูณเข้าไปในสมการที่(2.19) และแก้สมการและจัดรูปใหม่ จะได้ ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเครื่องกลเทียบกับความเร็วเชิงโคไซน์ ตามสมการที่ (2.20)

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{2 \frac{\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_a) d\delta} \quad (2.20)$$

ถ้าระบบมีเสถียรภาพภายหลังการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.21)

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_a) d\delta = 0 \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.9 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

จากรูปที่ 2.9 ถ้าเราพิจารณาที่จุดทำงานปกติหนึ่งหรือจุดของการทำงาน δ_0 ณ จุดนี้กำลังทางกล $P_m = P_{e0}$ พิจารณาในรูปซึ่งกำลังทางกลด้านเข้าแบบขั้นเข้าไปเป็น P_{m1} เนื่องจาก $P_{m1} > P_{e0}$ กำลังอัตราเร่งขึ้นของที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นบวกและมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงการเร่งนี้เป็นตามสมการที่ (2.22)

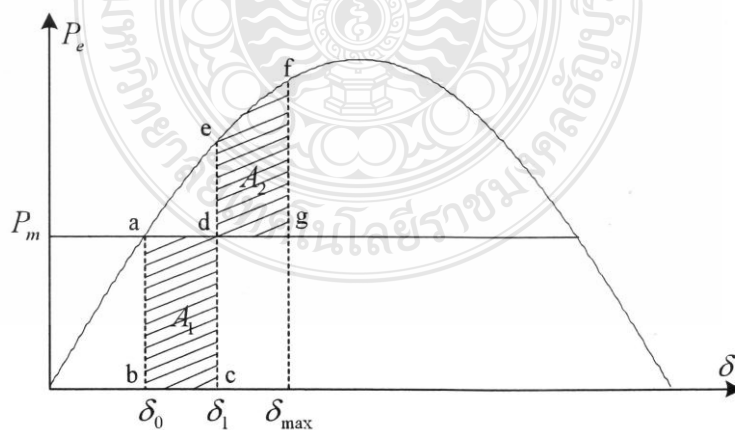
$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area } A_1 \quad (2.22)$$

จากรูปที่ 3 การที่มุมโหลดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อ $\delta = \delta_1$ กำลังทางไฟฟ้า P_e จะเท่ากับกำลังทางกลด้านเข้า P_{m1} ที่จุด b ถึงแม้ว่ากำลังการเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่โรเตอร์จะยังหมุนด้วยแรงเฉื่อยส่งผลให้ δ และ กำลังทางไฟฟ้า P_e ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยแรงเฉื่อยต่อไปจะส่งผลให้ $P_m < P_e$ จะทำให้โรเตอร์มีอัตราเร่งลดลงมีค่าเป็นลบโรเตอร์จะกลับมาหมุนที่ความเร็วเชิงโคไซน์อีกครั้งที่ $\delta = \delta_{\max}$ สำหรับพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จากการเร่งแบบลบนี้นหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area}A_2 \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.9 การที่โรเตอร์แกว่งไปจุด b และมุมกำลัง δ_{\max} พบว่า $|\text{area}A_1| = |\text{area}A_2|$ มุมของโรเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่าง δ_0 และ δ_{\max} ด้วยความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์เอง การแกว่งนี้จะมีกรหน่วงและเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งใหม่ที่จุด b แล้วมาหยุดที่มุม δ_1

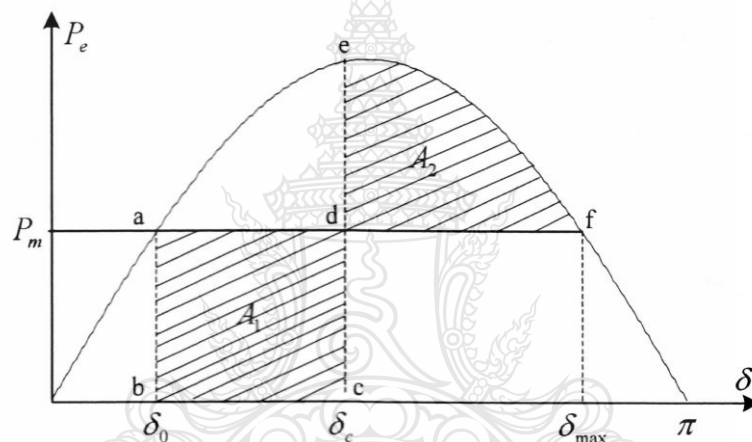
ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดต่อกับระบบขนาดใหญ่ผ่านสายส่ง ถ้า สมมุติกำลังอินพุตมีค่าคงที่ P_m จ่ายโหลดที่มุมโหลดคงที่ δ_0 ดังรูปที่ 2.10 และมีการเกิดฟอลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิด จะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้าไปที่บัสของระบบใหญ่ เนื่องจากเราไม่คิดค่าความต้านทานของเครื่องกำเนิด P_e ลดลงมาที่ค่าศูนย์เส้นมุมโหลดจึงอยู่ที่แนวนอน ($P=0$) เครื่องกำเนิดจึงมีความเร่งเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นจะสะสมในเพลลาเครื่องกลและมุมโหลดก็จะเพิ่มขึ้นจะสะสมในเพลลาเครื่องกลและมุมโหลดก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันในการลัดวงจรสามเฟสด้านส่ง

เมื่อพอลต์หายไปที่มุม δ_1 จะทำให้ระบบทำงานที่จุด e ดังรูปที่ 4 กำลังสุทธิ $P_m - P_e$ ก็จะเริ่มลดลงและพลังงานจลน์ที่สะสมก่อนหน้านี้อาจลดลงเป็นศูนย์ที่จุด f ซึ่ง ณ จุดนี้พื้นที่ A_2 จะเท่ากับ A_1 เนื่องจากที่จุด f นี้มีค่า $P_e > P_m$ โรเตอร์จะลดความเร็วลงมาผ่านจุด e และจุด a การลดลงนี้เป็นลักษณะการแกว่งไปมารอบๆ มุม δ_0 หลังเคลียร์พอลต์แล้วถ้าระบบไม่สูญเสียเสถียรภาพจะทำงานกลับมาที่มุม δ_0

มุมวิกฤตที่ต้องการลัดวงจรออก (Critical clearing angle, δ_c) เพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพนั้น เมื่อมุม δ_1 ที่เพิ่มขึ้นแล้วทำให้พื้นที่ A_2 เริ่มน้อยกว่าพื้นที่ A_1 และมุม δ_c คือมุมที่ทำให้ $A_1 = A_2$ และ δ_{\max} ตัดที่ส่วนโค้งของกราฟ ณ จุด f ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤต

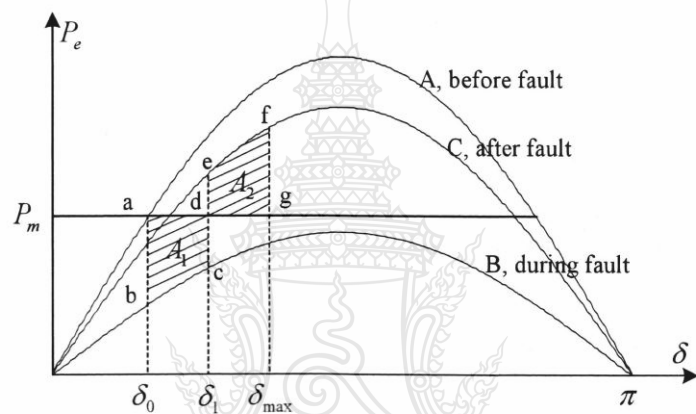
หากประยุกต์เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเข้าไปพิจารณาในรูปที่ 5. จะได้ว่าค่ามุมวิกฤต ดังสมการที่ (2.24)

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_{\max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$\cos \delta_c = \frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_{\max} - \delta_c) + \cos \delta_{\max} \quad (2.24)$$

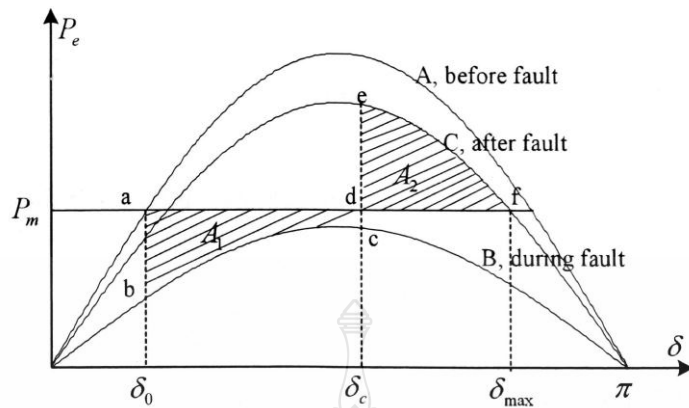
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่งอื่นๆ ในระบบที่ห่างจากบัส สมมุติว่ากำลังทางกลด้านเข้าเครื่องกำเนิดมีค่าคงที่ P_m จ่ายโหลดทางไฟฟ้าที่มุมโหลด δ_0 จากรูปที่ 2.12 ค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างบัสถูกเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขณะเกิดพอลต์มีกำลังไฟฟ้าสามารถส่งผ่านไปอีกด้านเป็นตามเส้น B เมื่อเคลียร์

ฟอลต์โดยการเปิดเบรกเกอร์ที่ปลายทั้งสองด้านส่งผลให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเป็นดังกราฟ c ขณะเกิดฟอลต์สามเฟสจุดทำงานจะเลื่อนไปจุด b ของกราฟ B ส่งผลให้ $P_m > P_e$ กำลังอัตราเร่งขึ้นของที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นบวกและมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น เกิดพลังงานที่สะสมในโรเตอร์ เมื่อเคลียร์ฟอลต์ที่มุม δ_1 โดยตัดสายส่งที่เกิดฟอลต์ออกไปจุดทำงานย้ายมาอยู่ที่จุด e ของกราฟ c ส่งผลให้ $P_m > P_e$ กำลังอัตราเร่งขึ้นของที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นลบพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะถูกใช้จนหมดเท่ากับศูนย์ที่จุด f มุมกำลังเท่ากับ δ_{max} พื้นที่ A_1 จะเท่ากับ A_2 จากจุด f กำลัง $P_e > P_m$ โรเตอร์ยังหมุนต่อด้วยอัตราเร่งแบบหน่วงเพื่อให้ระบบกลับสู่จุดทำงานอีกครั้ง มุมโรเตอร์จะแกว่งไปมาอยู่รอบจุด e ที่ความถี่ธรรมชาติ จุดทำงานจุดใหม่หลังจากเคลียร์ฟอลต์จะเป็นจุดตัดของ P_m กับกราฟ c



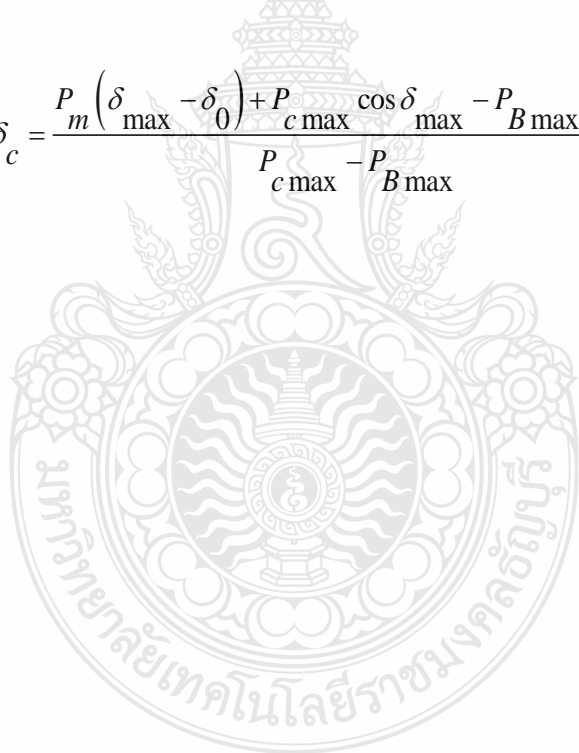
รูปที่ 2.12 เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเมื่อลัดวงจรห่างจากเครื่องกำเนิด

มุม δ_1 เพิ่มขึ้นแล้วทำให้พื้นที่ A_2 เริ่มน้อยกว่าพื้นที่ A_1 มุมวิกฤตที่ต้องเอากำลังจากรอกคือมุมที่ทำให้พื้นที่ A_2 เท่ากับพื้นที่ A_1 และ δ_{max} ตัดที่ส่วนโค้งของกราฟ หรือจุด f



รูปที่ 2.13 เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤตเมื่อสัตวงจรห่างจากเครื่องกำเนิด
เมื่อใช้เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเข้าไปพิจารณาใน รูปที่ 2.13 จะได้ว่าค่ามุมวิกฤตดังสมการที่ (2.25)

$$\cos \delta_c = \frac{P_m (\delta_{\max} - \delta_0) + P_{c \max} \cos \delta_{\max} - P_{B \max} \cos \delta_0}{P_{c \max} - P_{B \max}} \quad (2.25)$$

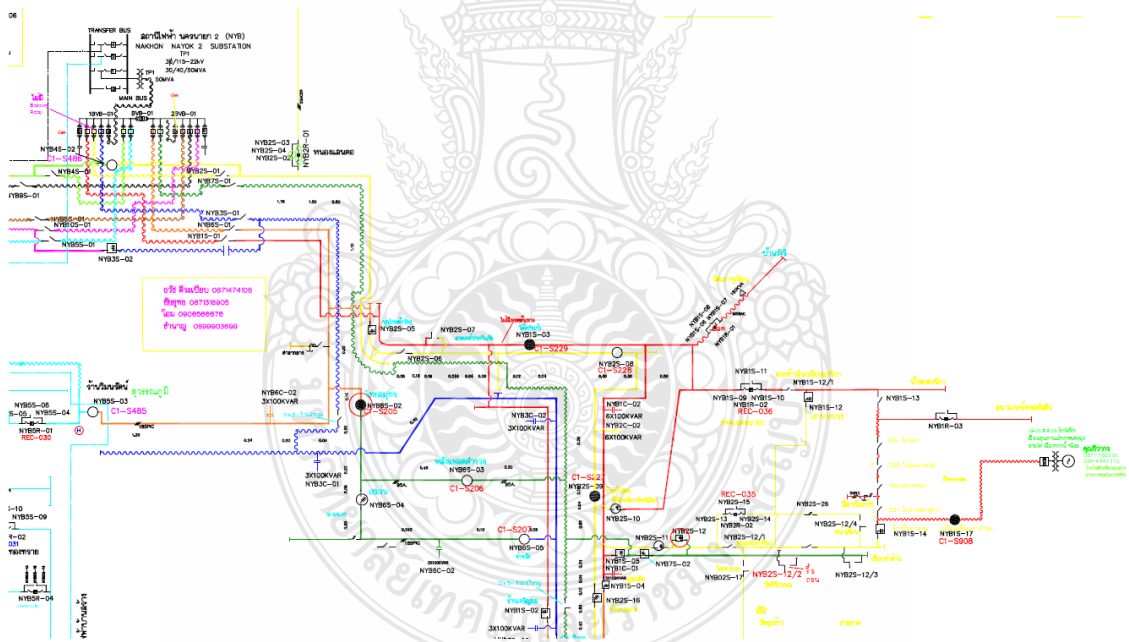


บทที่ 3

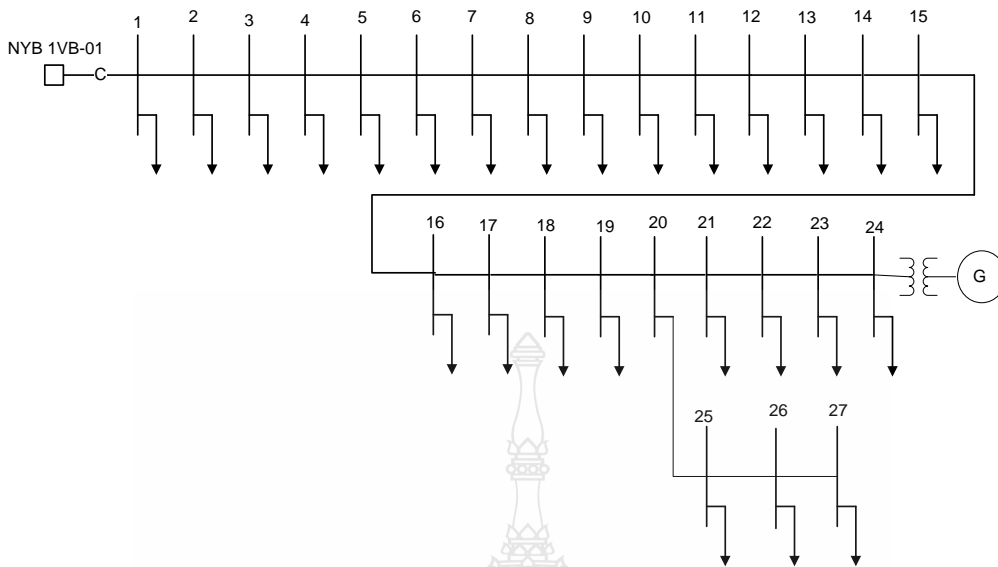
การออกแบบและทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพสถานะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำท้ายเขื่อนชลประทาน เขื่อนขุนด่านปราการชล จ. นครนายก ซึ่งอยู่ระหว่างการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2 โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ เพื่อหาเสถียรภาพสถานะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ซึ่งได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การทดสอบเสถียรภาพสถานะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ



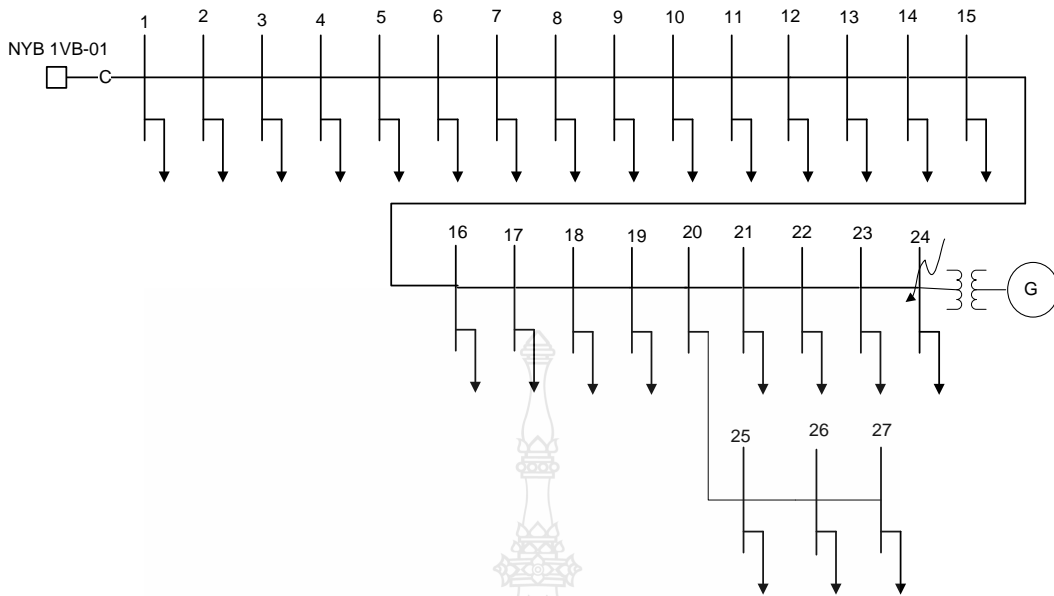
รูปที่ 3.1 เครื่องผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียลบัส 27 บัส เครื่องผลิตไฟฟ้าขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานี่ไฟฟ้านครนายก 2

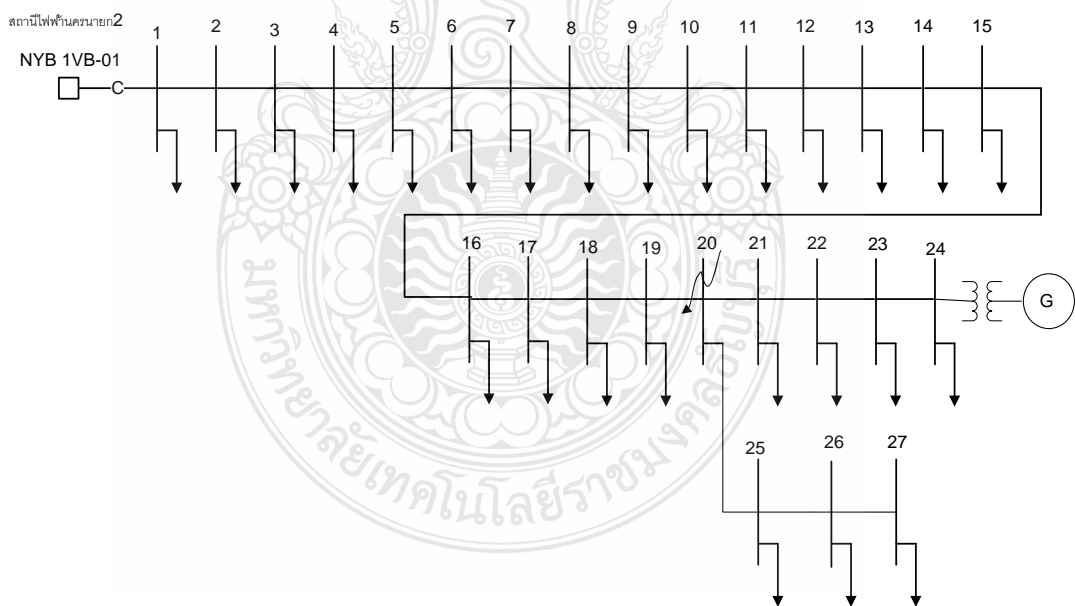
วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ จากรูป 3.1 และ 3.2 โดยทำการทดสอบจำนวน 8 กรณีศึกษา ดังนี้

1. กรณีที่ 1 ทดสอบการเกิดฟลตต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



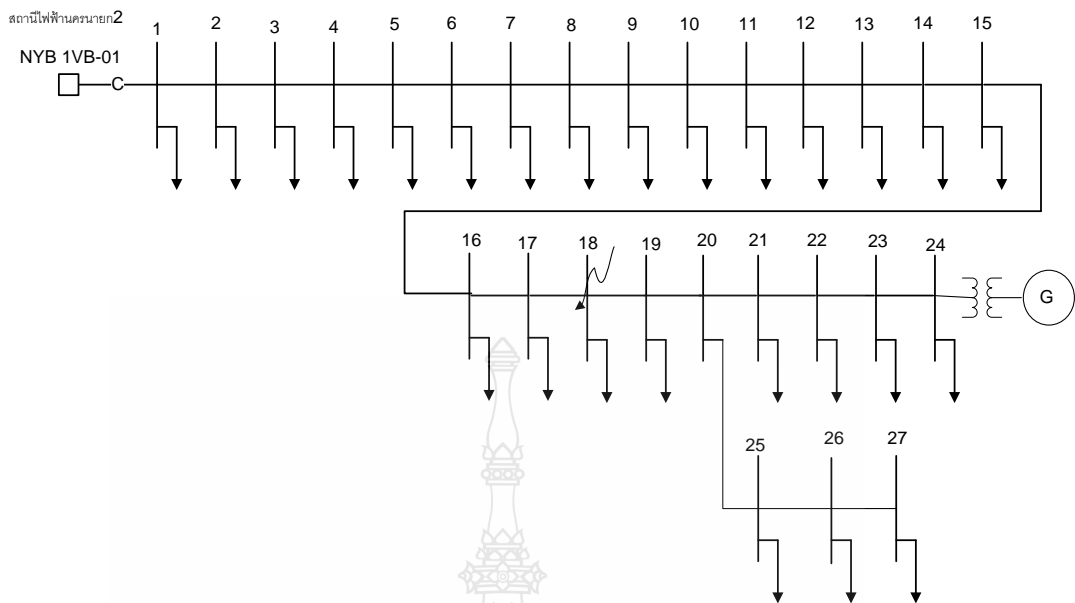
รูปที่ 3.3 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24

2. กรณีที่ 2 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



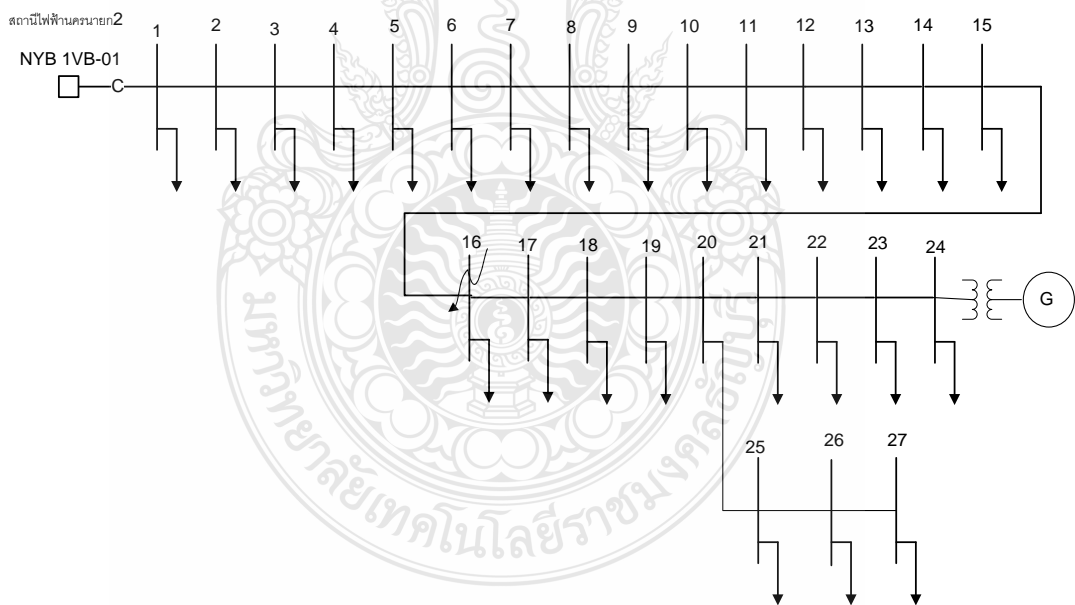
รูปที่ 3.4 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20

3. กรณีที่ 3 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



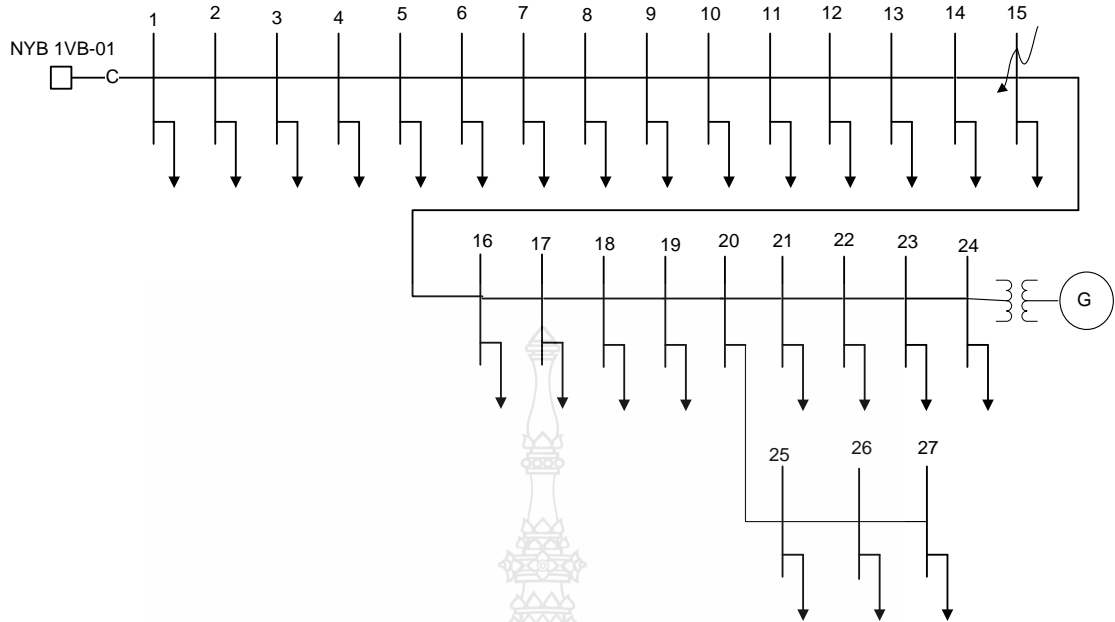
รูปที่ 3.5 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18

4. กรณีที่ 4 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



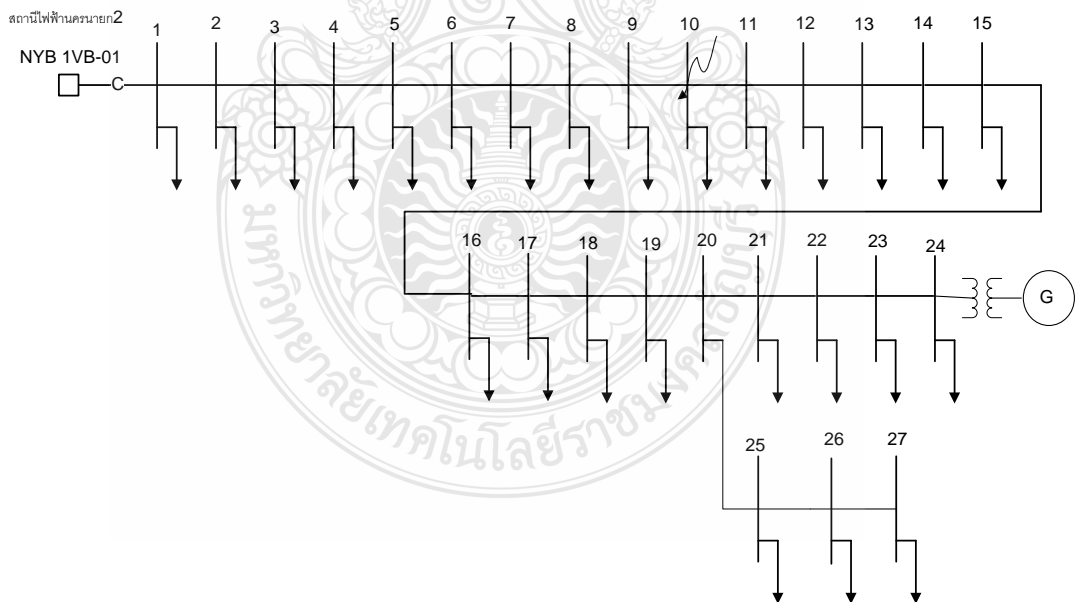
รูปที่ 3.6 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16

5. กรณีที่ 5 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



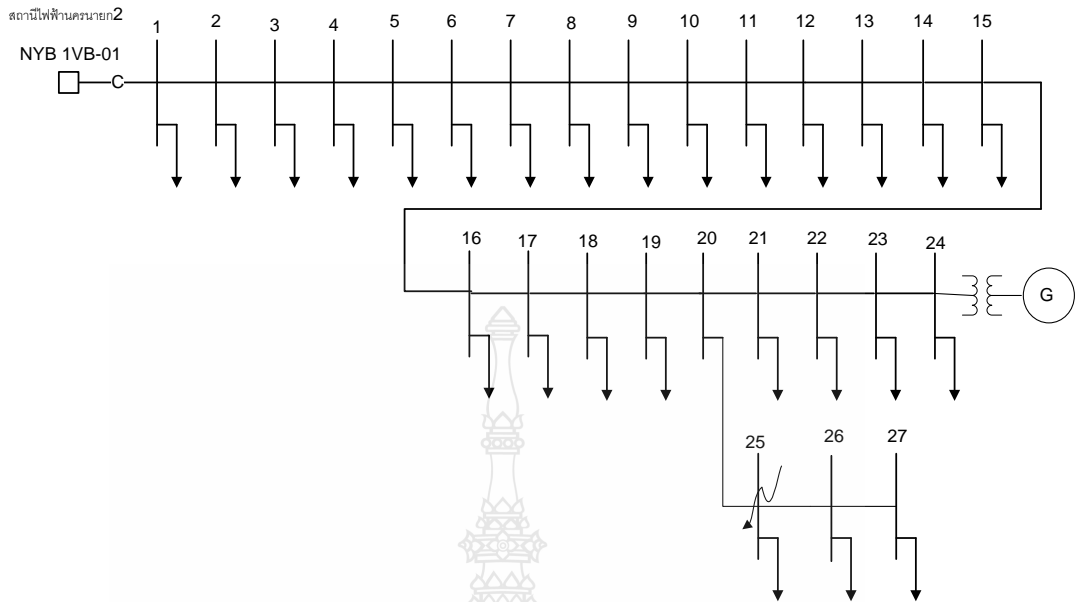
รูปที่ 3.7 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15

6. กรณีที่ 6 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส

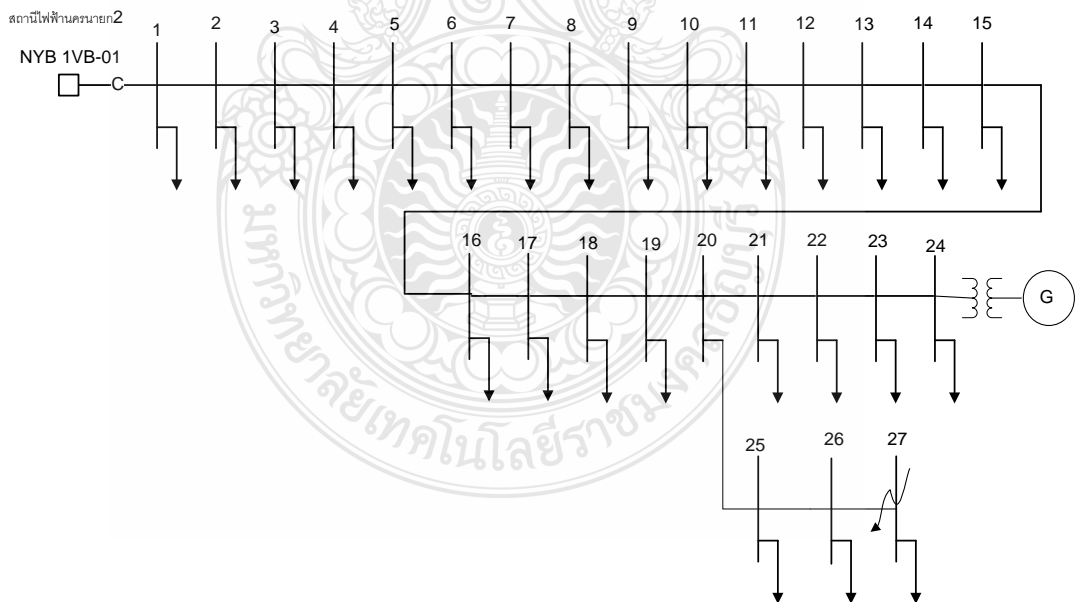


รูปที่ 3.8 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10

7. กรณีที่ 7 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 3.9 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25
 8. กรณีที่ 8 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 3.10 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27

3.2 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับทดสอบเสถียรภาพสถานะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

หัวข้อนี้จะการศึกษาสถานะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยจำลองทดสอบการเกิดฟลด์สามเฟสบริเวณบัสต่างๆเพื่อหาค่ามุมวิกฤต ลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส โดยค่าตัวแปร ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

โดยค่าตัวแปร ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่ากำลังไฟฟ้า ($P_c = 0.86 \text{ p.u}$)
- ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ($X_d = 0.062 \text{ p.u}$)
- ค่าความต้านทานของขดลวดหม้อแปลง ($X_t = 0.2 \text{ p.u}$)
- $H = 5 \text{ MJ/MVA}$ เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ

$$S = 0.86 + j0.43$$

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0.86 - j0.43}{1 \angle 0^\circ} = 0.86 - j0.43$$

ค่าความต้านทานทั้งระบบเท่ากับ $X_t = 0.5711 \text{ p.u}$

$$E' = V + jX_t I$$

E' ได้มาจากการคำนวณ คือ $E' = 1.337 \angle 21.48^\circ$

ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามตารางที่ 3.1 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในแต่ละกรณี มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก ตามสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

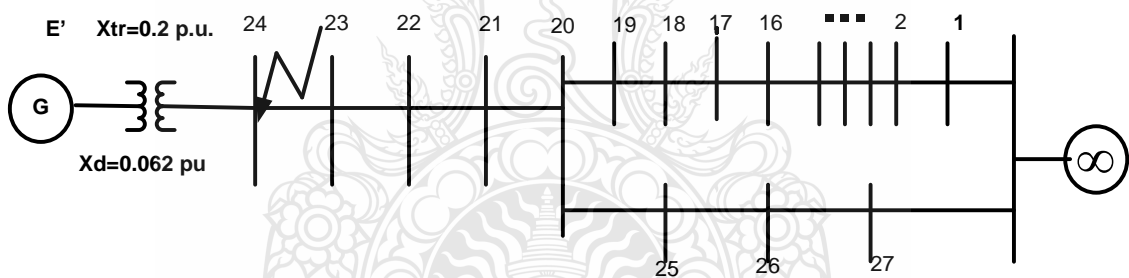
บัสที่	ความยาว(km)	Reactance (p.u.)
1	4.23	0.17250
2	0.96	0.03915
3	1.26	0.05138
4	1.51	0.06158
5	0.2	0.00816
6	1.15	0.04690
7	2.16	0.08809
8	0.68	0.02773
9	1.59	0.06484
10	1.26	0.05138
11	0.58	0.02365
12	0.91	0.03711
13	1.19	0.04853
14	1.06	0.04323
15	0.63	0.02569
16	0.53	0.02161
17	0.54	0.02202
18	0.58	0.02365
19	0.48	0.01957
20	0.73	0.02977
21	0.33	0.01346
22	1.05	0.04282
23	1.21	0.04934
24	0.93	0.03793
25	2.18	0.08890
26	1.39	0.05668
27	0.37	0.01509

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำท้ายเขื่อนชลประทาน เขื่อนขุนด่านปราการชล จ. นครนายก ซึ่งอยู่ระหว่างการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2 โดยการนำข้อมูลต่างๆของระบบมาใช้จำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK M-File เพื่อหาค่ามุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณต่างๆของสายส่ง โดยทำการทดสอบจำนวน 8 กรณีศึกษาดังนี้

4.1 กรณีที่ 1 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมอเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 24 โดยค่าตัวแปร ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่ากำลังไฟฟ้า ($P_e = 0.86 \text{ p.u.}$)
- ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ($X_d = 0.062 \text{ p.u.}$)
- ค่าความต้านทานของขดลวดหม้อแปลง ($X_t = 0.2 \text{ p.u.}$)
- $H = 5 \text{ MJ/MVA}$ เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ

$$S = 0.86 + j0.43$$

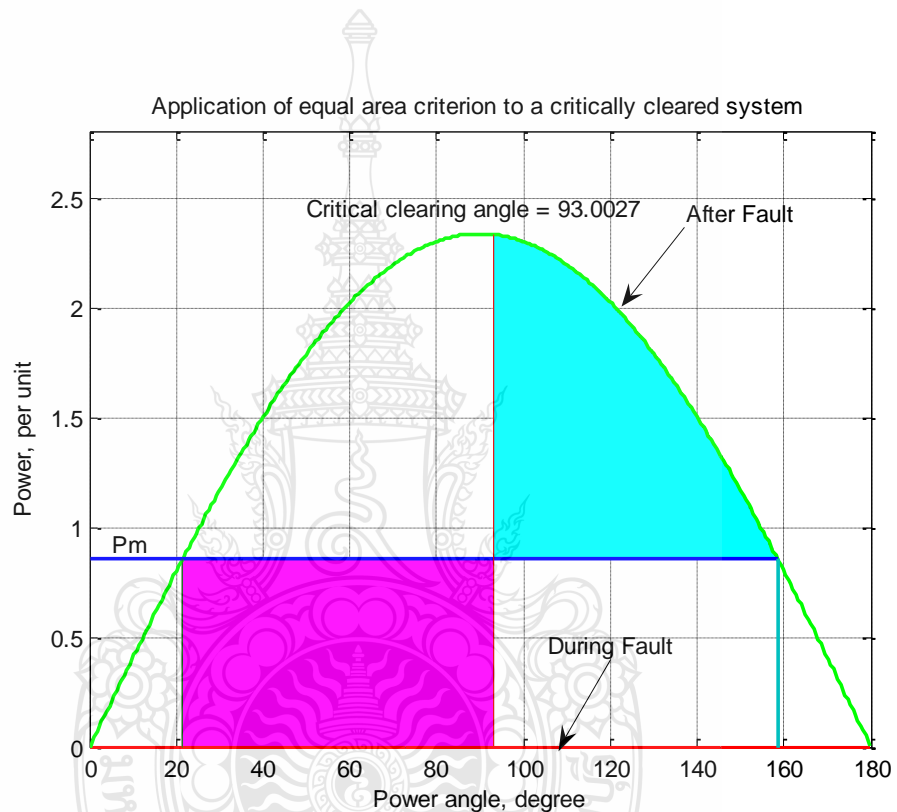
$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0.86 - j0.43}{1 \angle 0^\circ} = 0.86 - j0.43$$

ค่าความต้านทานทั้งระบบเท่ากับ $X_t = 0.5711$ p.u

$$E' = V + jX_t I$$

E' ได้มาจากการคำนวณ คือ $E' = 1.337 \angle 21.48^\circ$

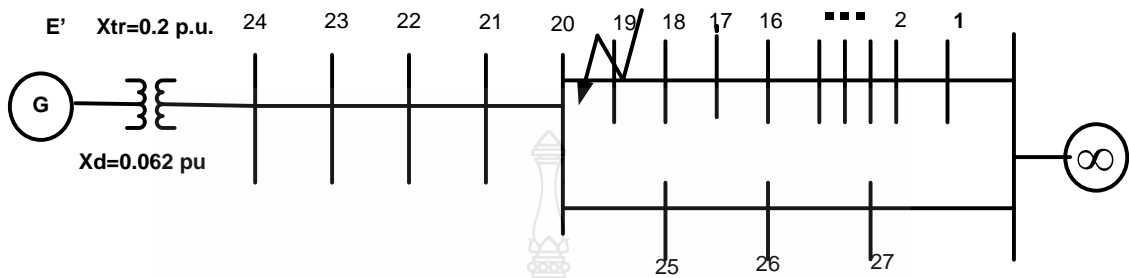
นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีที่ 1 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดง
ได้ตั้ง M-File ในภาคผนวก ก



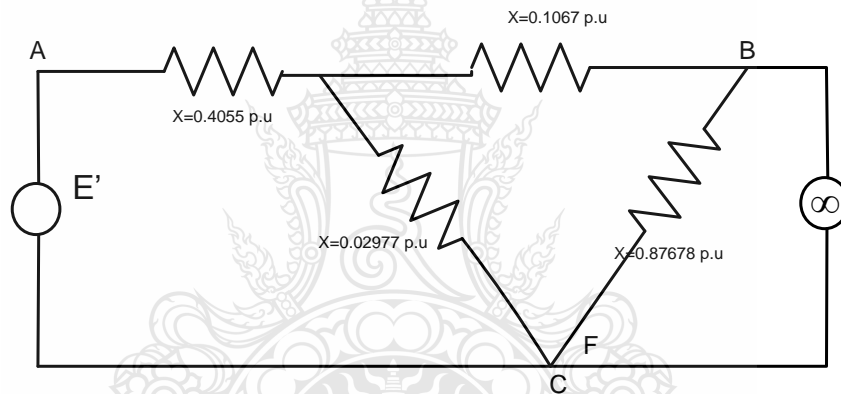
รูปที่ 4.2 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 24

จากรูปที่ 4.2 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่า
ค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 93.00 องศา และ เวลาวิกฤตที่ 0.30 วินาที เพื่อที่ยังคงรักษา
เสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้

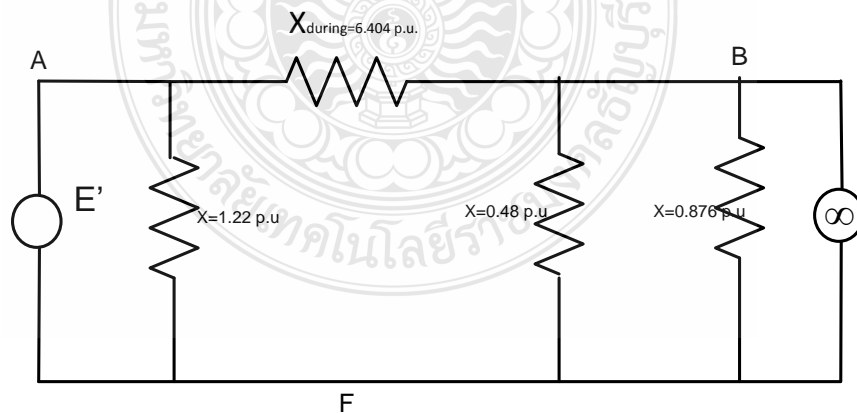
4.2 กรณีที่ 2 ทดสอบการเกิดฟลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมอเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.3 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20

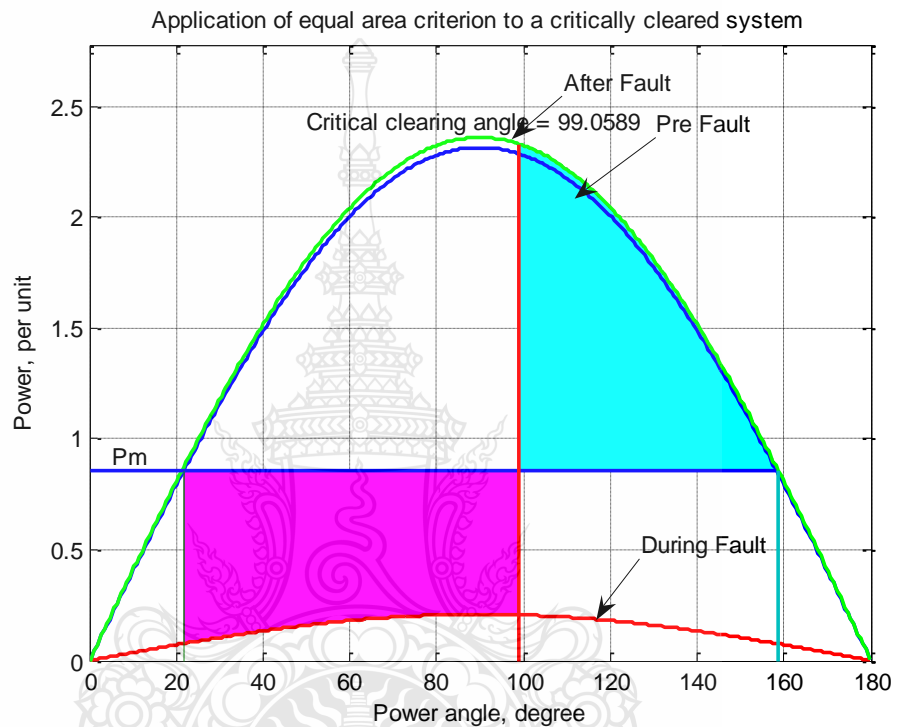


รูปที่ 4.4 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20



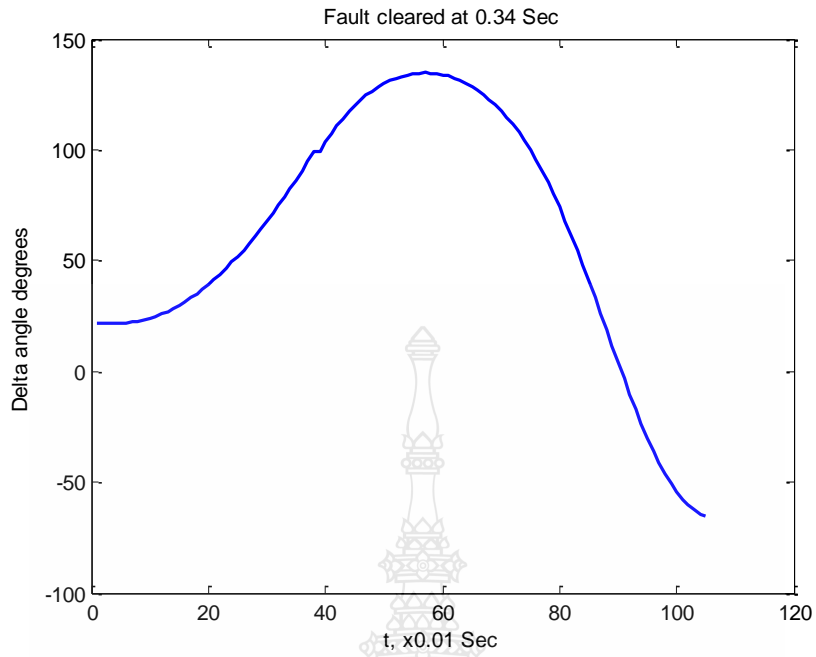
รูปที่ 4.5 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.5 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิรตซ์ และ $H = 5$ MJ/MVA เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 2 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก

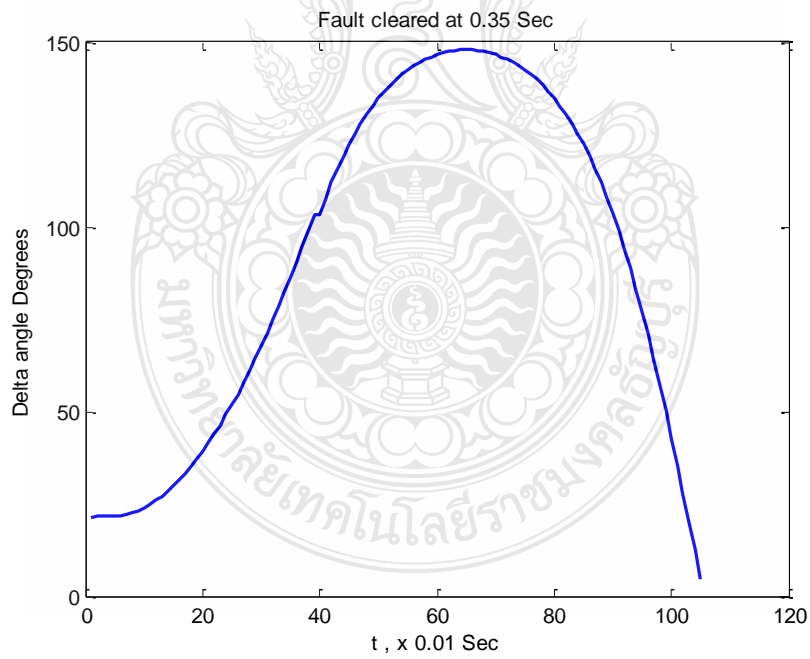


รูปที่ 4.6 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 20

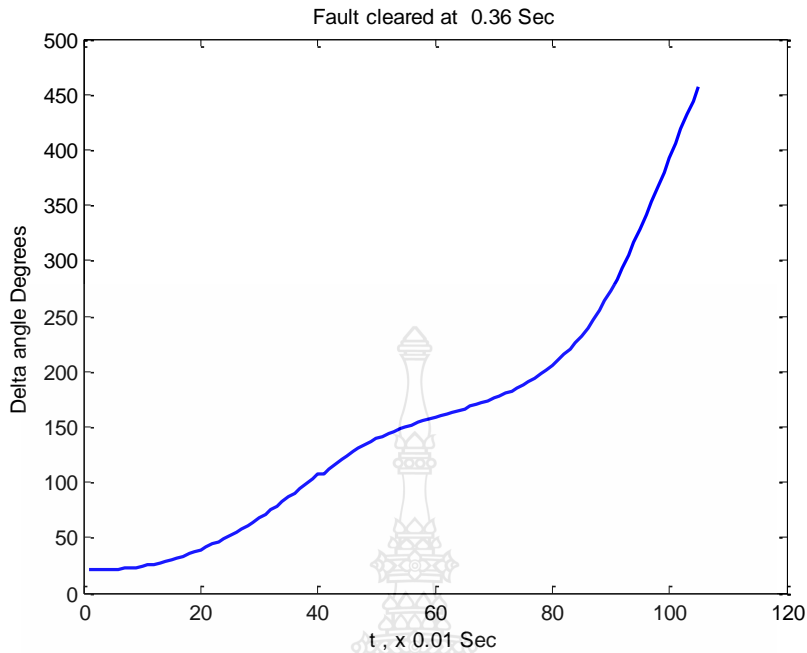
จากรูปที่ 4.6 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 99.05 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 4.7 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.34 วินาที



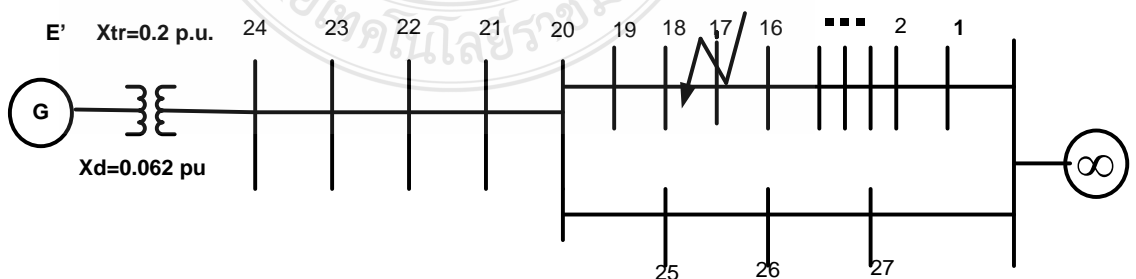
รูปที่ 4.8 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.35 วินาที



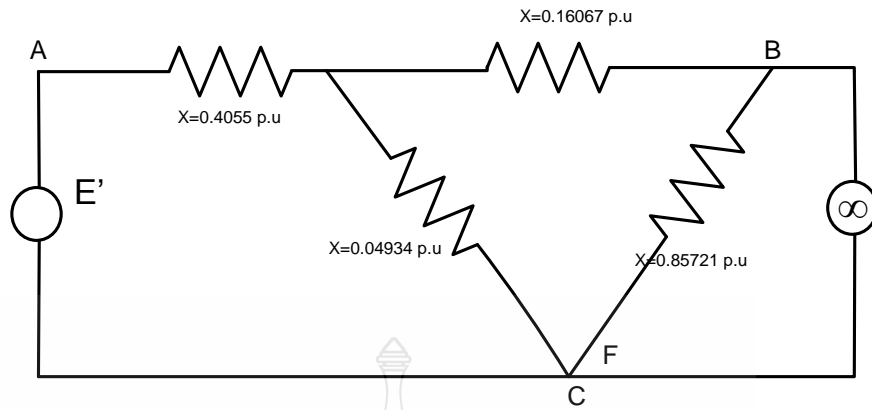
รูปที่ 4.9 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมเมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.36 วินาที

จาก รูปที่ 4.7-4.9 เมื่อทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 20 เพื่อหาการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟสพบว่า เวลาวิกฤต ที่ต้องเคลียร์การลัดวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 0.35 วินาที

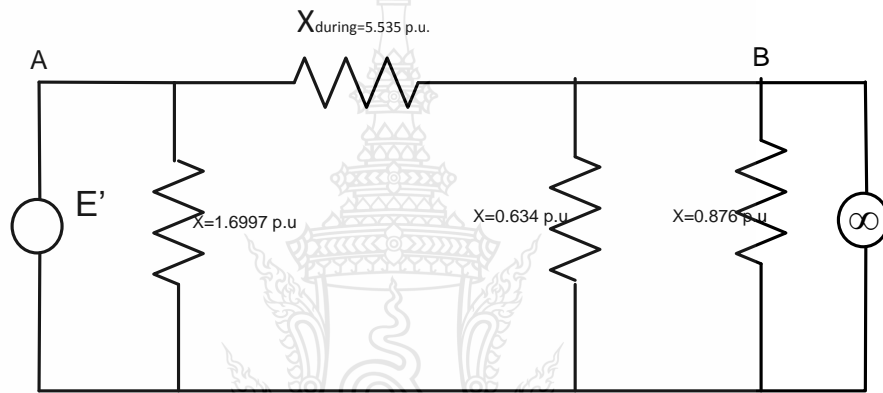
4.3 กรณีที่ 3 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.10 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18

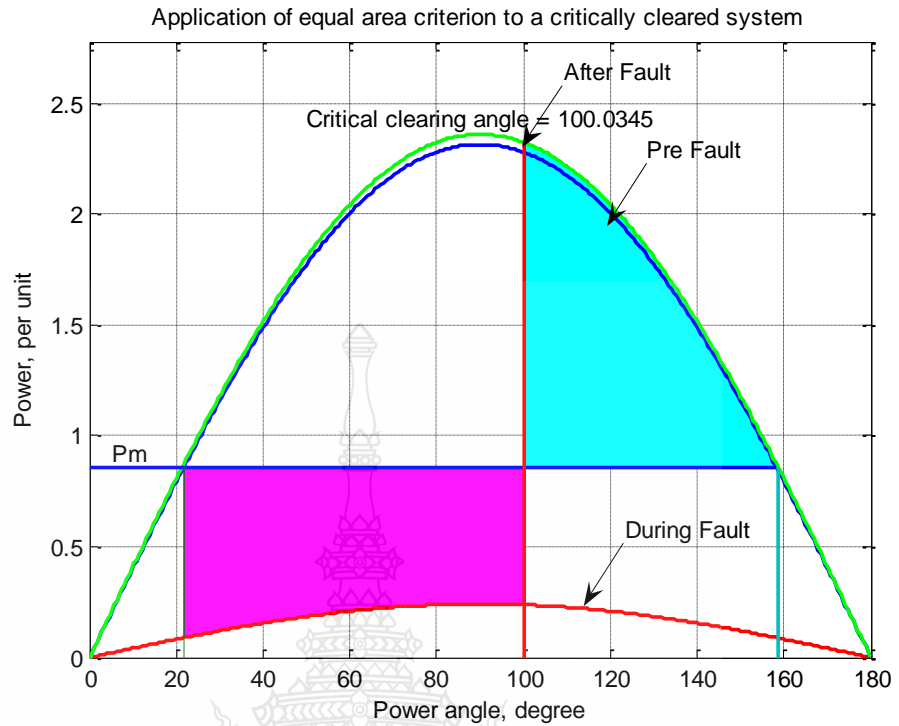


รูปที่ 4.11 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 18



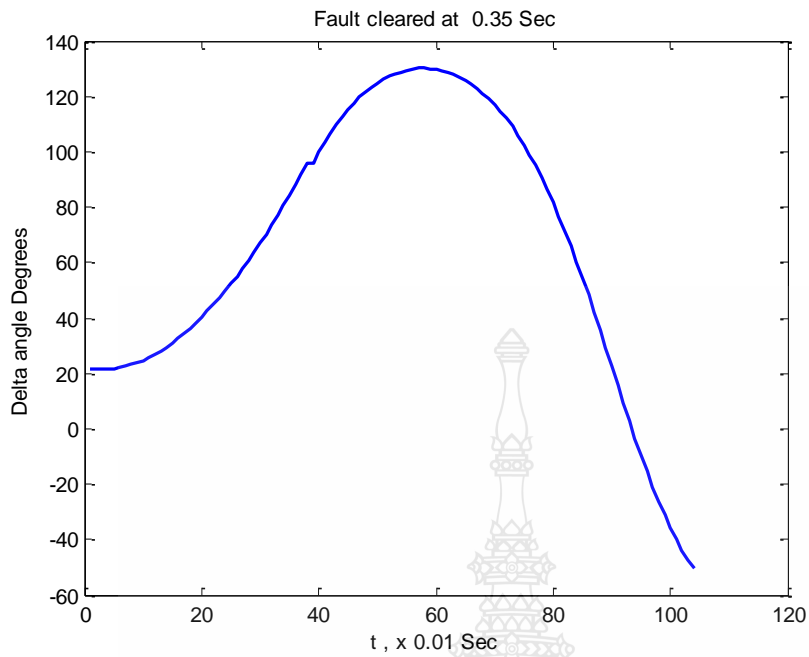
รูปที่ 4.12 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.12 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิร์ตซ์ และ $H = 5$ MJ/MVA เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 3 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก

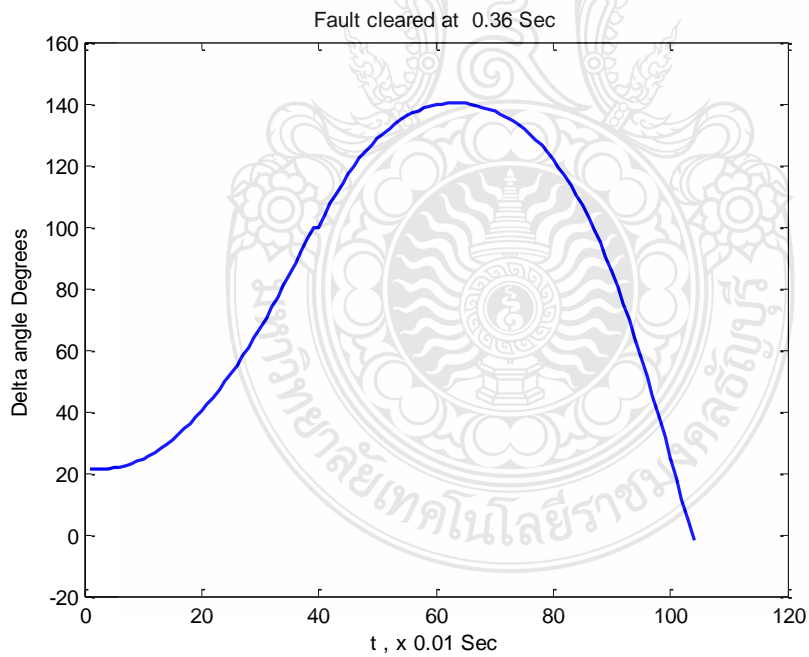


รูปที่ 4.13 มุมวิกฤตเมื่อตัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 18

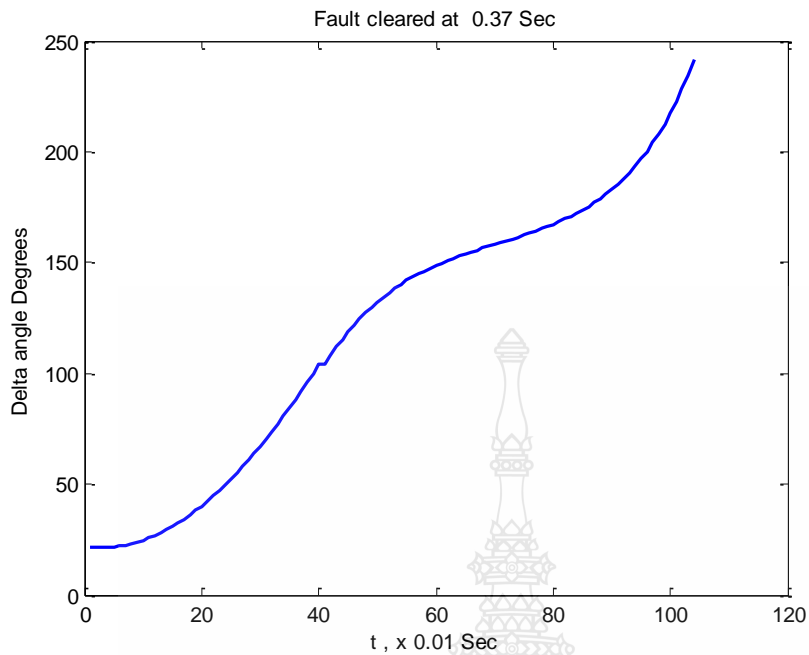
จากรูปที่ 4.13 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 100.03 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 4.14 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.35 วินาที



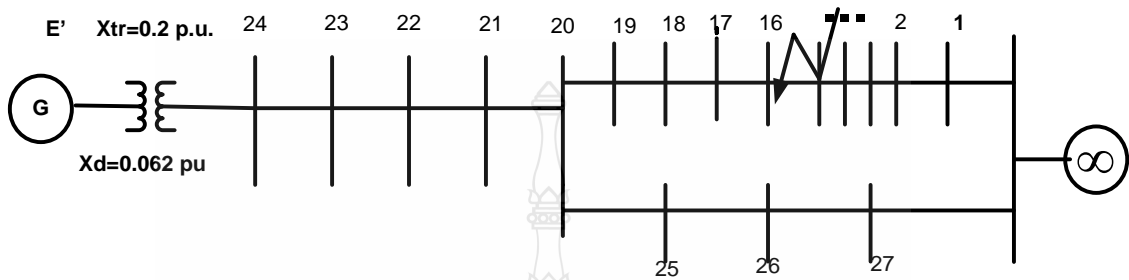
รูปที่ 4.15 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.36 วินาที



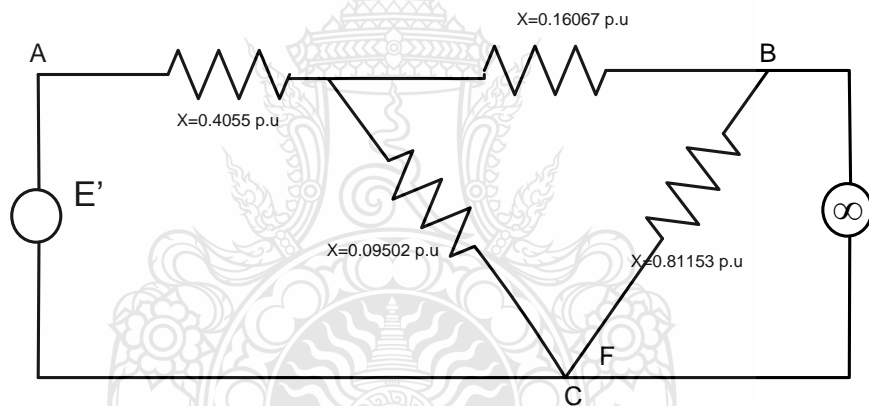
รูปที่ 4.16 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.37 วินาที

จากรูปที่ 4.14-4.16 เมื่อทดสอบการเกิดฟลัดสามเฟสบริเวณบัสที่ 18 เพื่อหาการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟสพบว่าเวลาวิกฤต ที่ต้องเคลียร์การลัดวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 0.36 วินาที

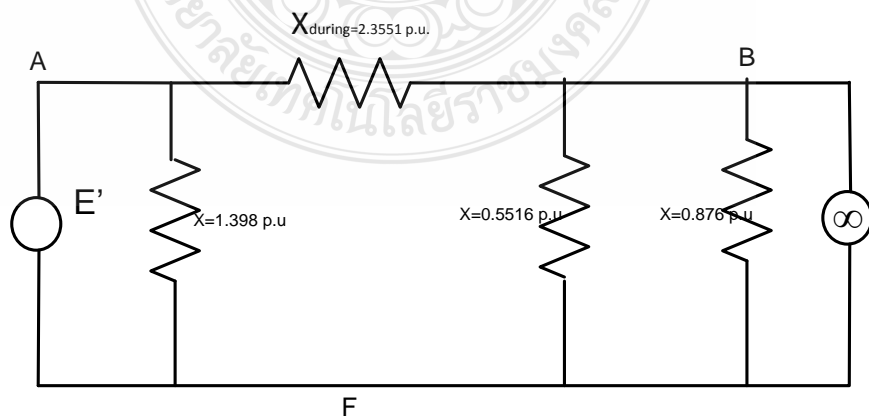
4.4 กรณีที่ 4 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมอเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.17 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16

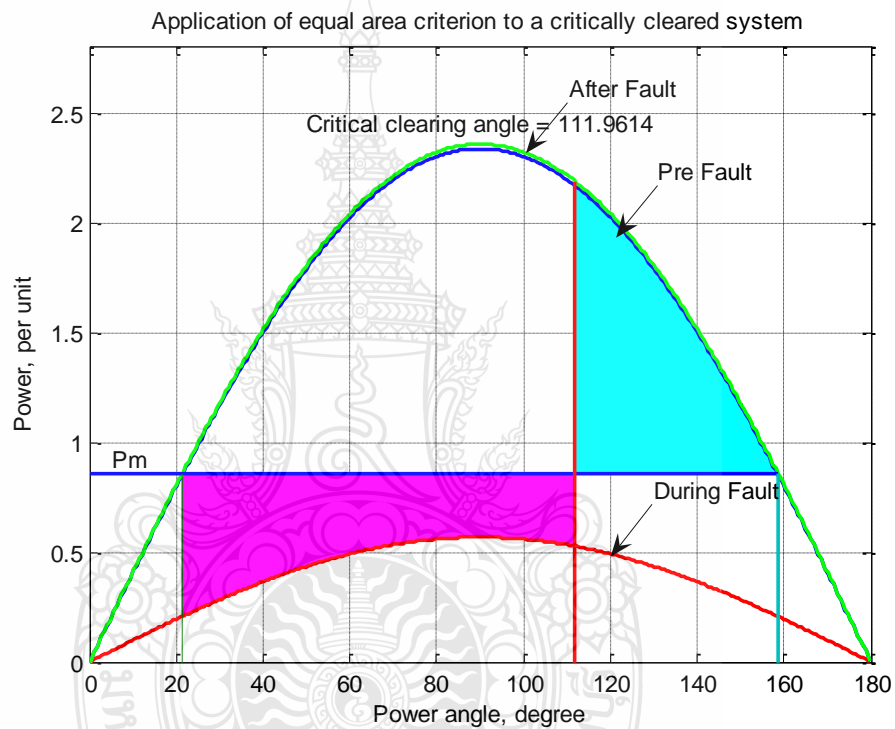


รูปที่ 4.18 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16



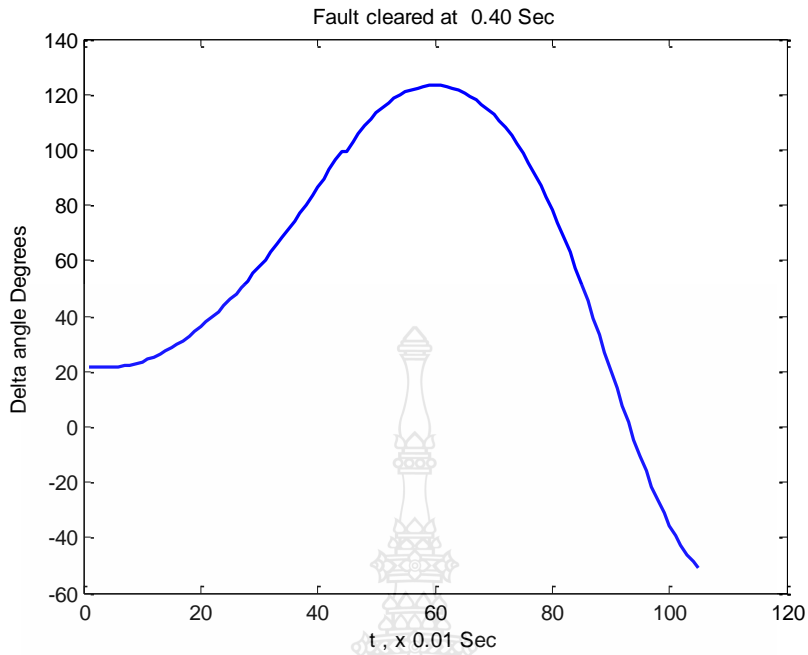
รูปที่ 4.19 แบบจำลองวงจรมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.19 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์ยูนิต กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิรตซ์ และ $H = 5 \text{ MJ/MVA}$ เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 4 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก

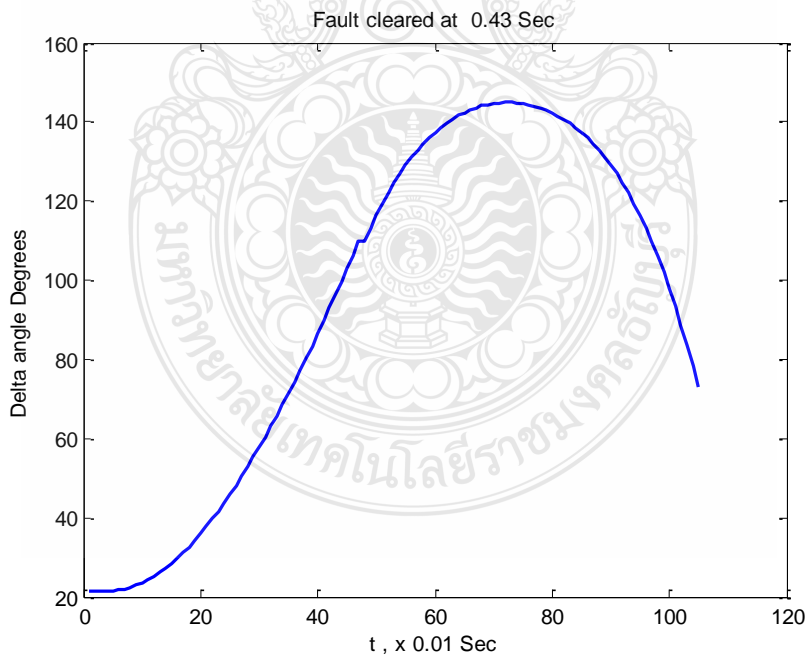


รูปที่ 4.20 มุมวิกฤตเมื่อตัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 16

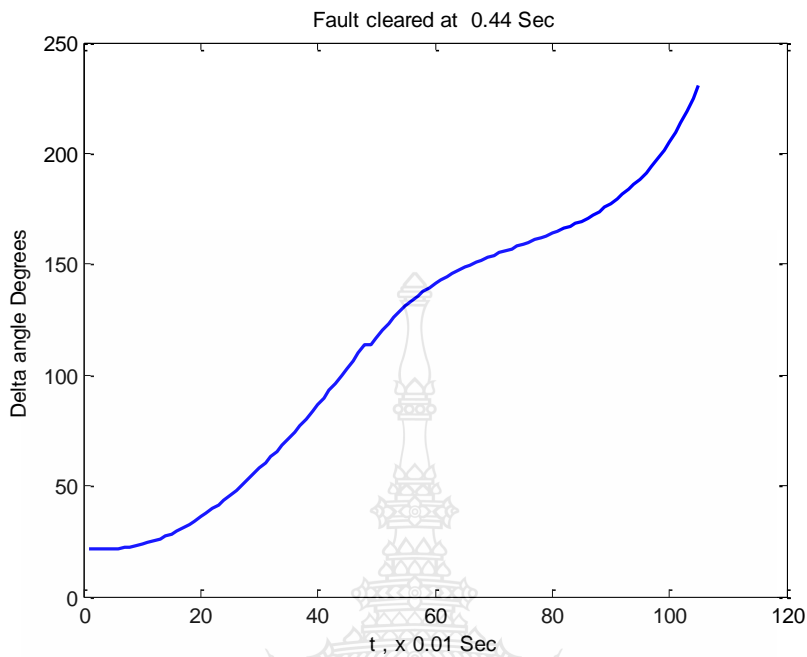
จากรูปที่ 4.20 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 111.96 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 4.21 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.40 วินาที



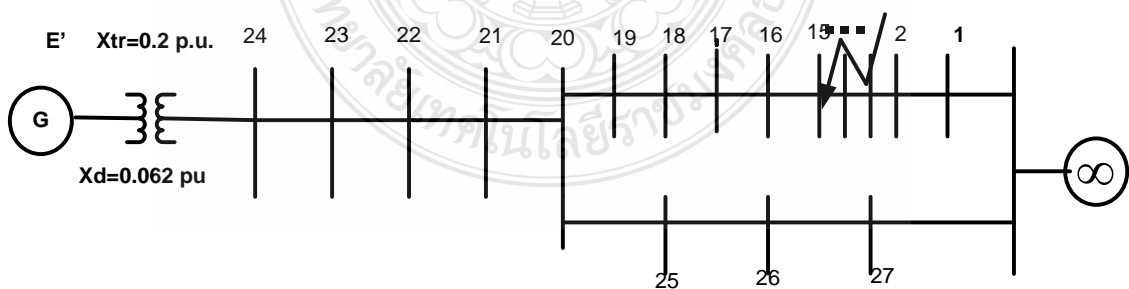
รูปที่ 4.22 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.43 วินาที



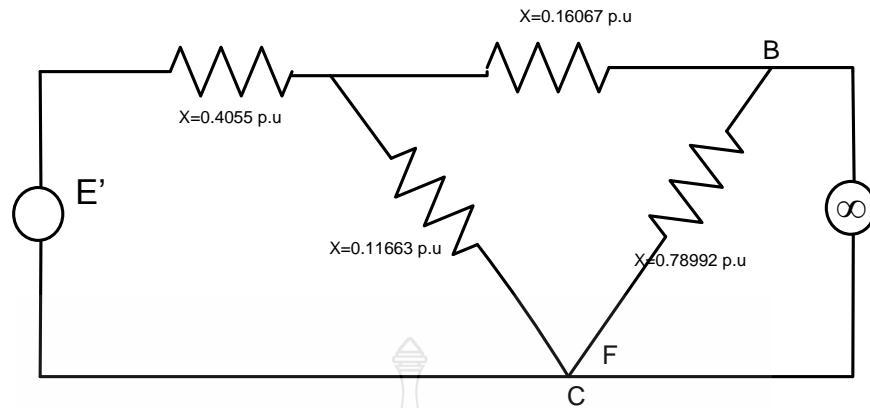
รูปที่ 4.23 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.44 วินาที

จากรูปที่ 4.21-4.23 เมื่อทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16 เพื่อหาการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟสพบว่าเวลาวิกฤต ที่ต้องเคลียร์การตัดวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 0.43 วินาที

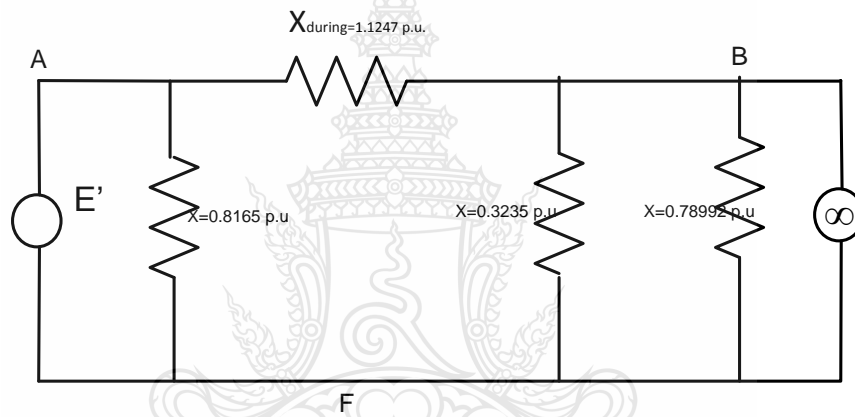
4.5 กรณีที่ 5 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตตัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.24 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15

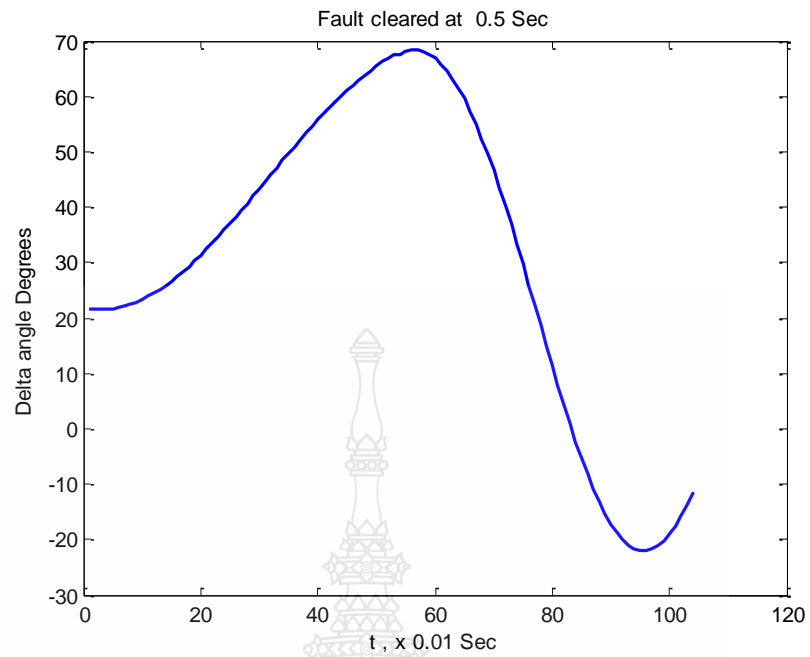


รูปที่ 4.25 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 15

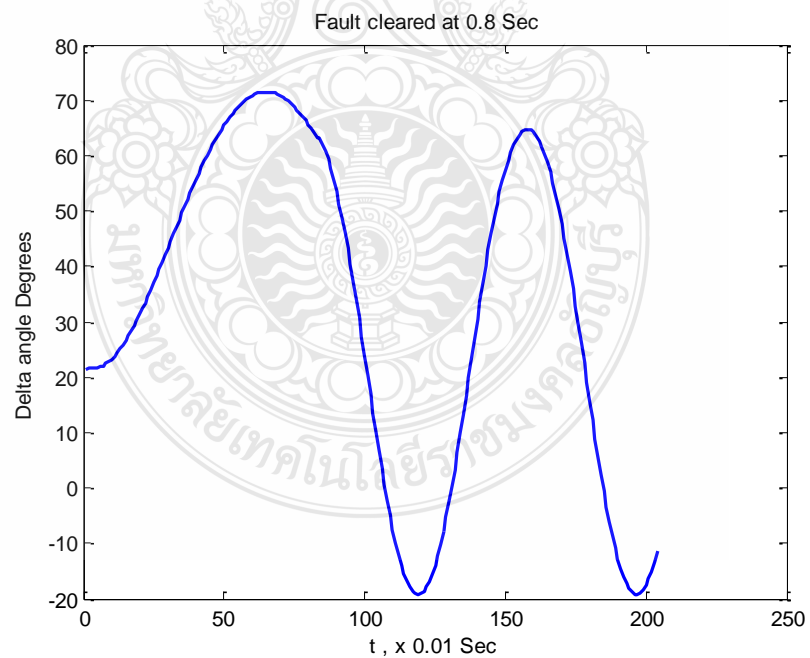


รูปที่ 4.26 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

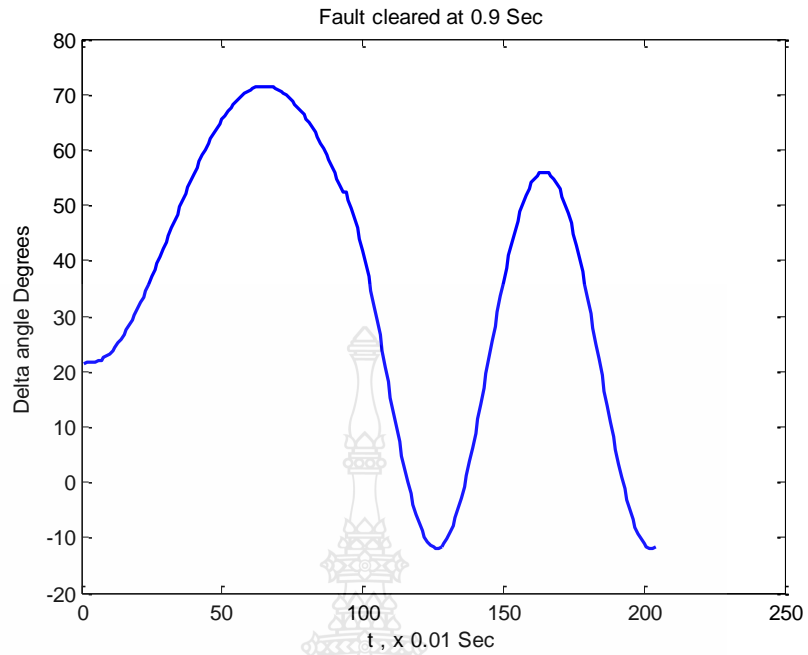
จากรูปที่ 4.26 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_B เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิรตซ์ และ $H = 5 \text{ MJ/MVA}$ เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 5 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก พบว่าไม่สามารถหามุมวิกฤตได้ เมื่อเกิดการลัดวงจรบริเวณดังกล่าวระบบยังคงมีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.27 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.5 วินาที

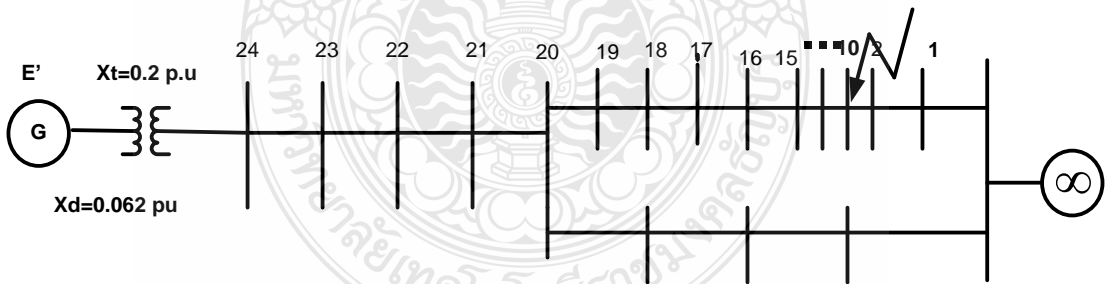


รูปที่ 4.28 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.8 วินาที

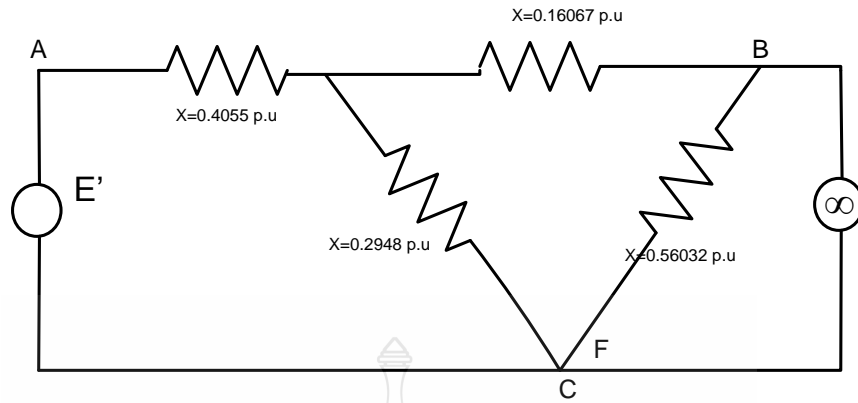


รูปที่ 4.29 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.9 วินาที

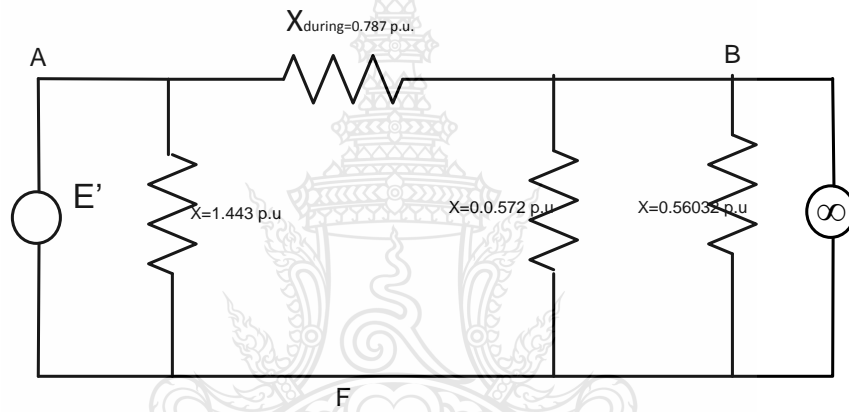
4.6 กรณีที่ 6 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตตัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.30 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10

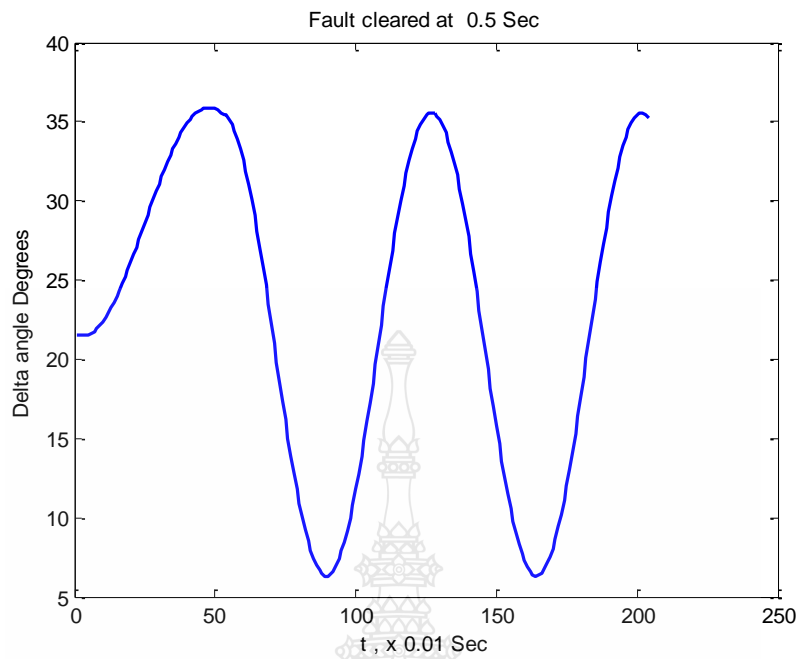


รูปที่ 4.31 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 10



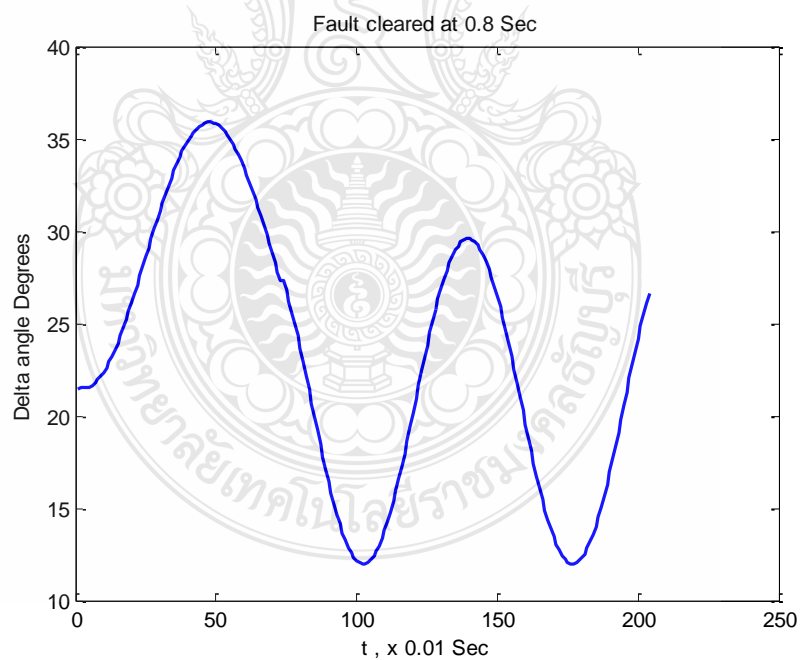
รูปที่ 4.32 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.32 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_B เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิร์ตซ์ และ $H = 5$ MJ/MVA เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 5 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก พบว่าไม่สามารถหามุมวิกฤตได้ เมื่อเกิดการลัดวงจรบริเวณดังกล่าวระบบยังคงมีเสถียรภาพ



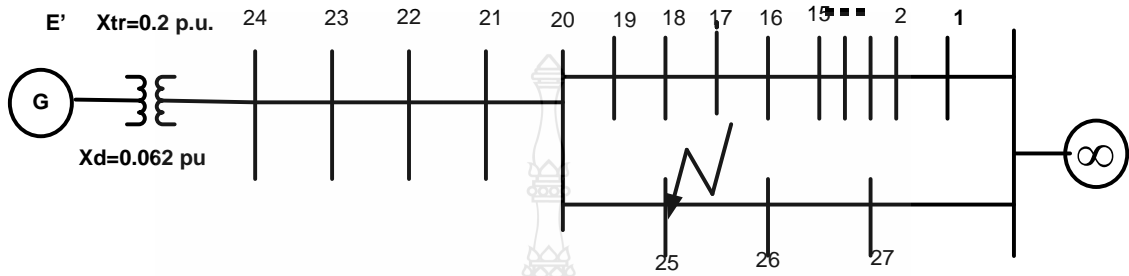
รูปที่ 4.33

การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.5 วินาที

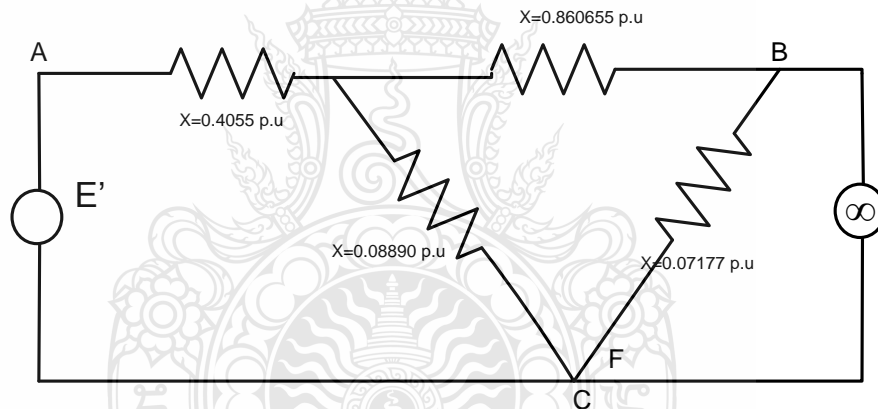


รูปที่ 4.34 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อตัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.8

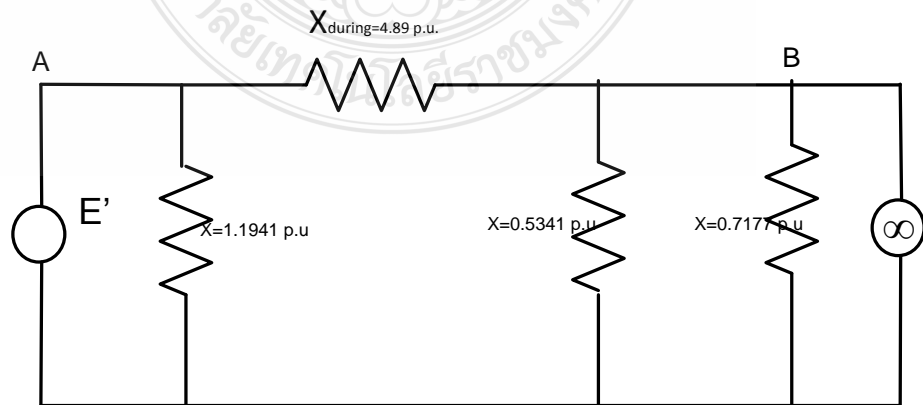
4.7 กรณีที่ 7 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.35 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25

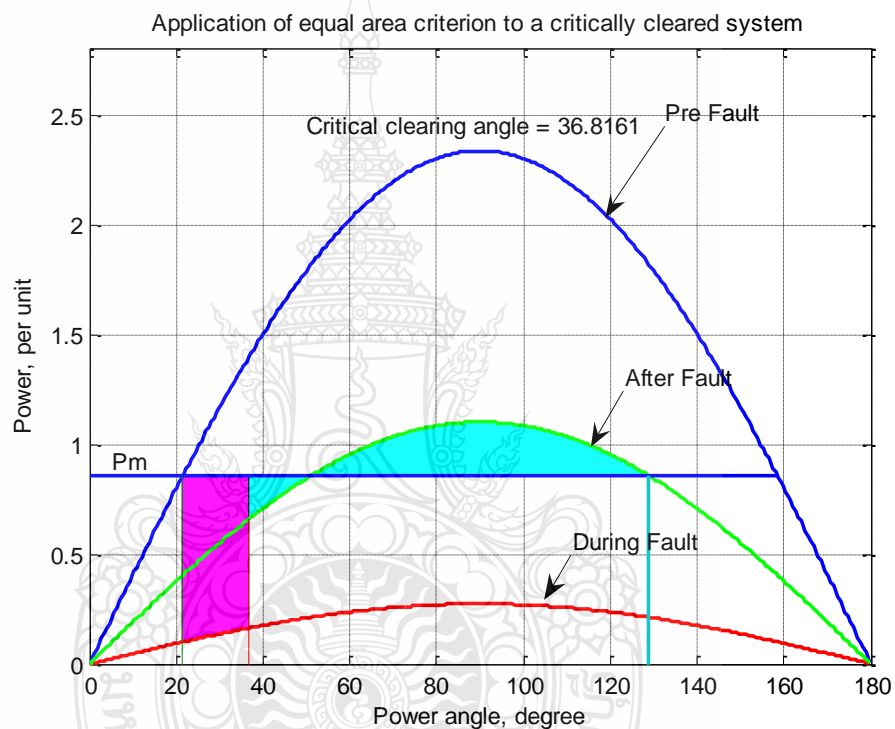


รูปที่ 4.36 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 25



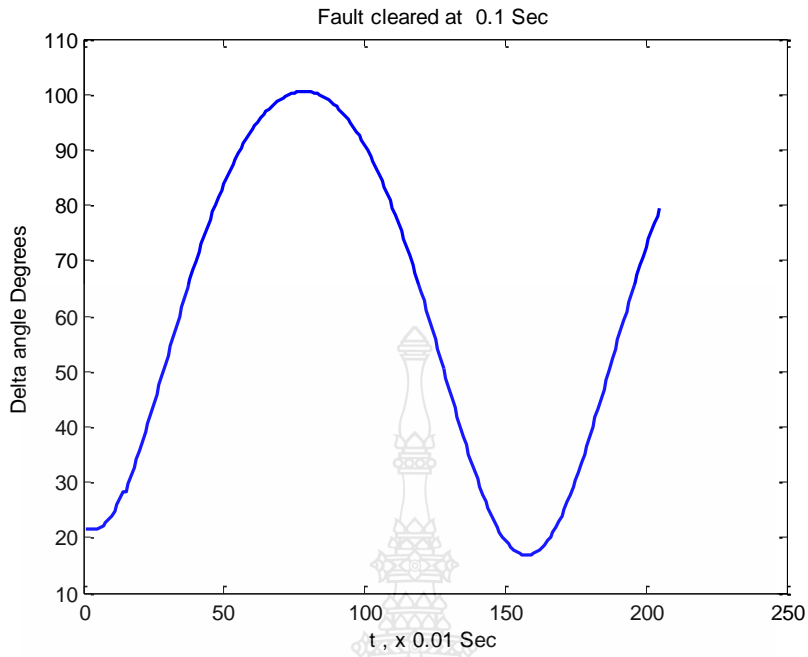
รูปที่ 4.37 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.37 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์ยูนิต กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิรตซ์ และ $H = 5$ MJ/MVA เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 4 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก

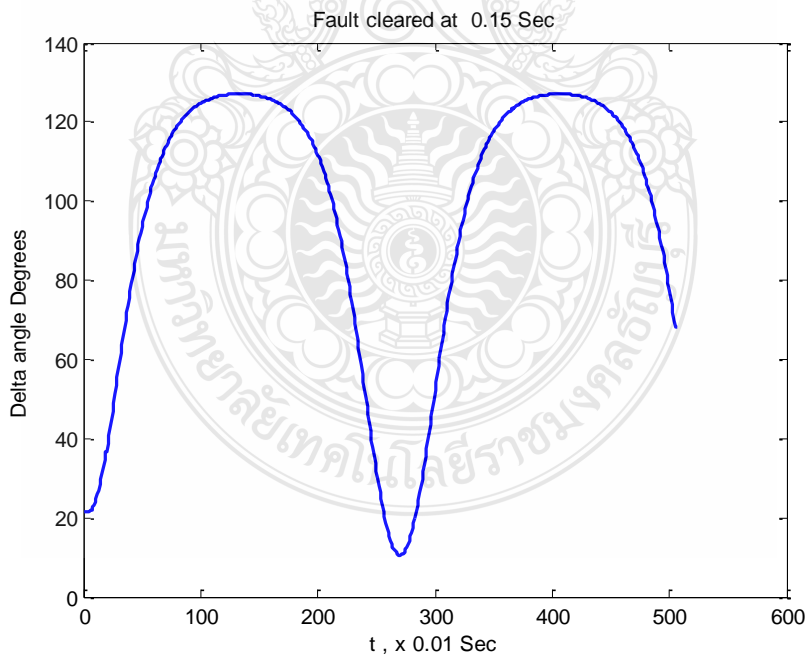


รูปที่ 4.38 มุมวิกฤตเมื่อตัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 25

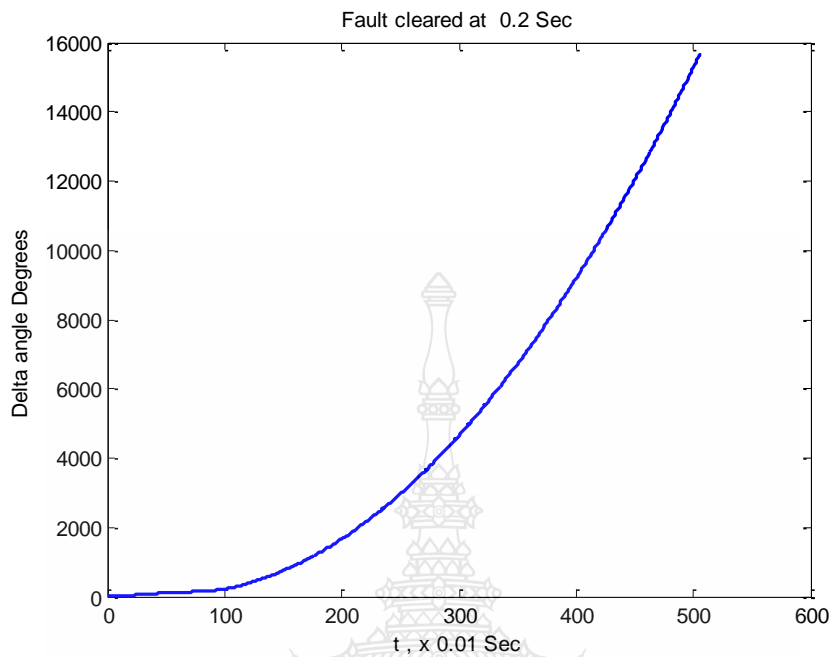
จากรูปที่ 4.38 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 36.81 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 4.39 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.10 วินาที



รูปที่ 4.40 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.15 วินาที

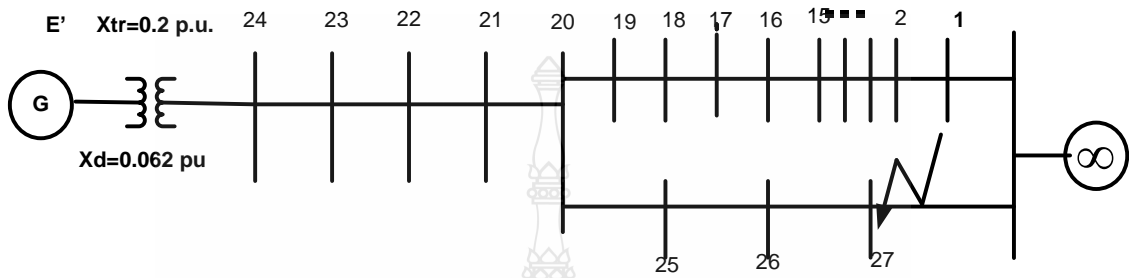


รูปที่ 4.41 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.20 วินาที

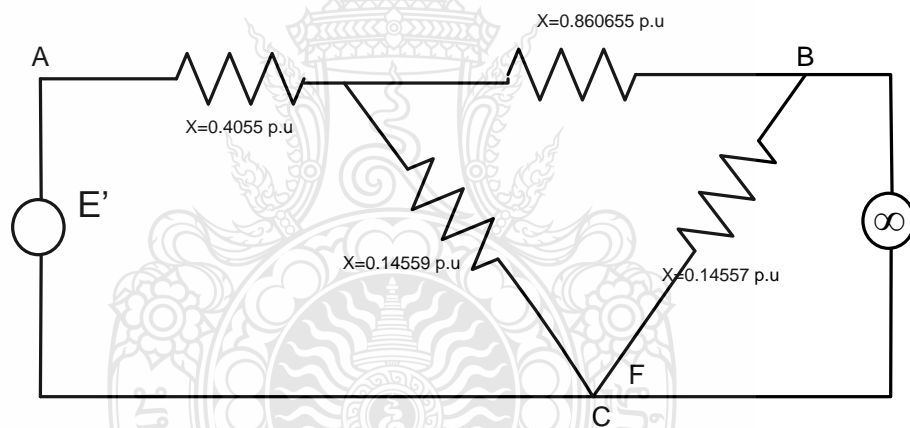
จากรูปที่ 4.39-4.41 เมื่อทดสอบการเกิดฟลัดสามเฟสบริเวณบัสที่ 25 เพื่อหาการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟสพบว่าเวลาวิกฤต ที่ต้องเคลียร์การลัดวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 0.15 วินาที



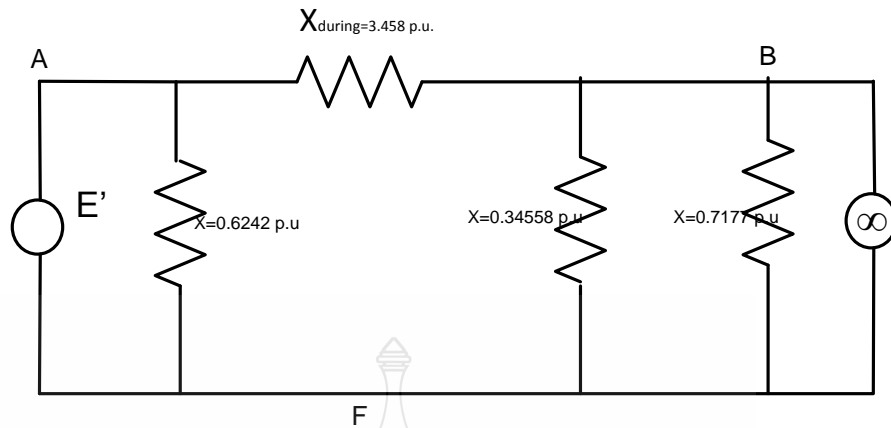
4.8 กรณีที่ 8 ทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 27 เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟส และการตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟส



รูปที่ 4.42 แบบจำลองทดสอบการเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16

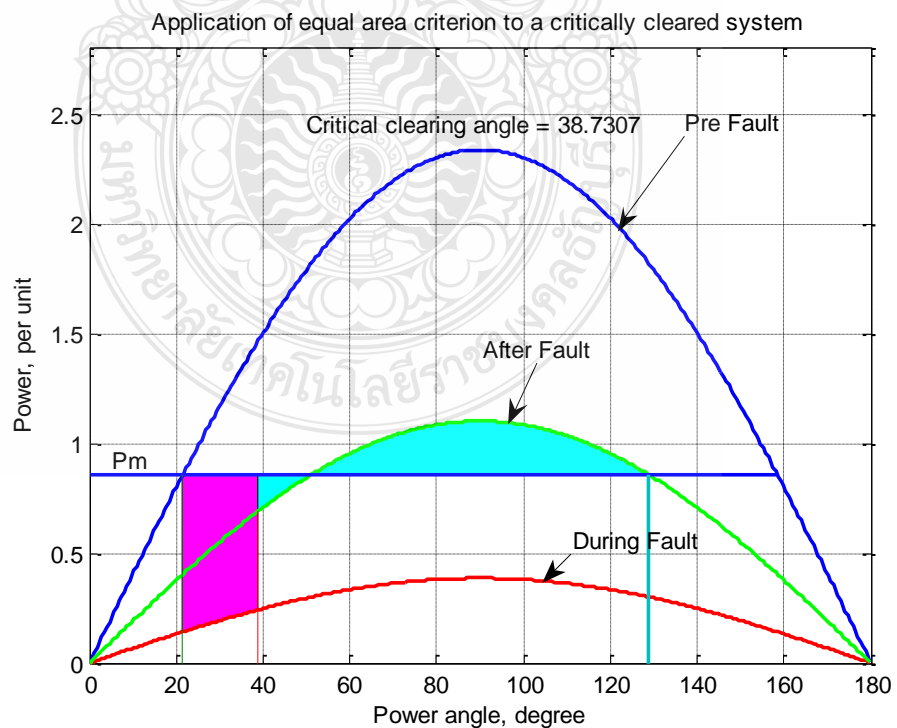


รูปที่ 4.43 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบเกิดฟอลต์สามเฟสบริเวณบัสที่ 16



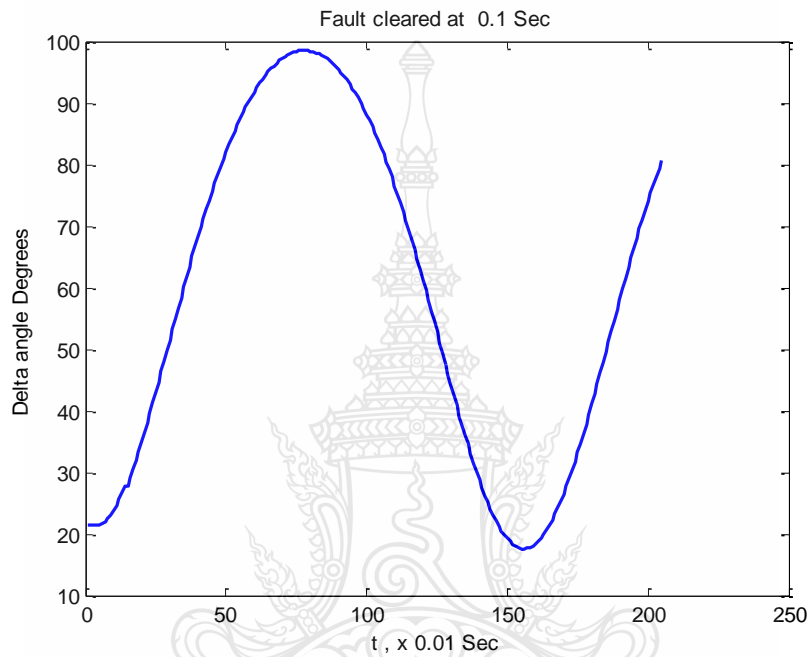
รูปที่ 4.44 แบบจำลองวงจรสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 4.44 ค่า E' ได้มาจากการคำนวณ, E_B เป็นแรงดันไฟฟ้าของบัสอนันต์, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์ยูนิต กำหนดให้ความถี่ของระบบ 50 เฮิรตซ์ และ $H = 5$ MJ/MVA เป็นค่าความเฉื่อยคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดในกรณีนี้ 4 มาพล็อตลงในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดัง M-File ในภาคผนวก ก

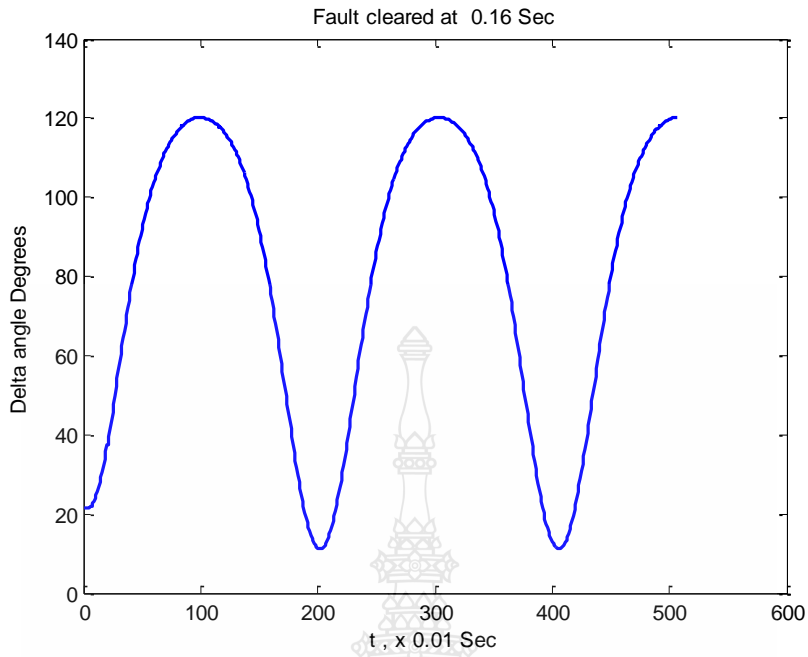


รูปที่ 4.45 มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณบัสที่ 27

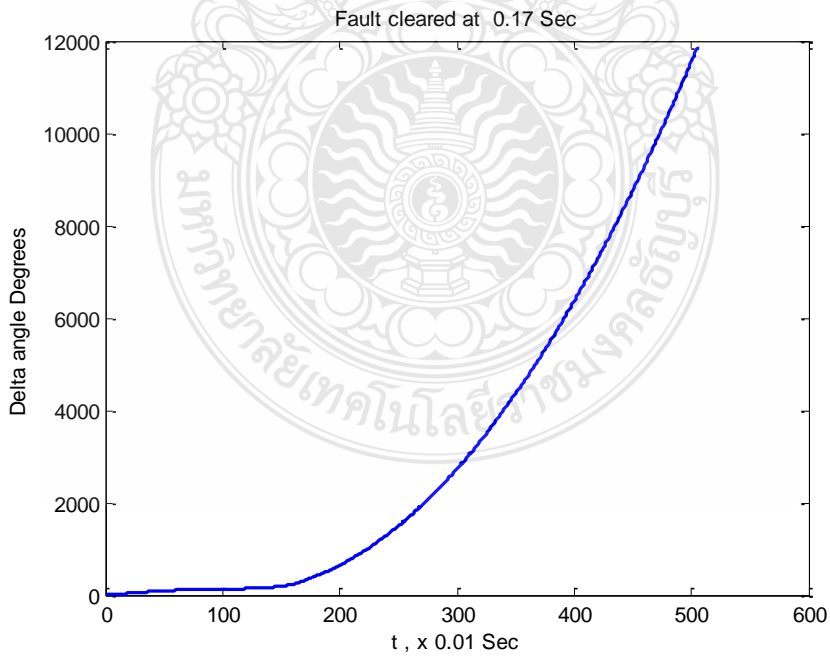
จากรูปที่ 4.45 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อม สมการที่ 2.24 มาทำการศึกษาจะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 38.73 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 4.46 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมเมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.10 วินาที



รูปที่ 4.47 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมเมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.16 วินาที



รูปที่ 4.48 การตอบสนองเชิงเวลาของมุมเมื่อลัดวงจรสามเฟส เวลาวิกฤตที่ 0.17 วินาที

จาก รูปที่ 4.46-4.48 เมื่อทดสอบการเกิดฟลัดสามเฟสบริเวณบัสที่ 25 เพื่อหาการตอบสนองเชิงเวลาของมูมเมื่อลัดวงจรสามเฟสพบว่าเวลาวิกฤต ที่ต้องเคลียร์การลัดวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 0.16 วินาที

การศึกษาสภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยจำลองทดสอบการเกิดฟลัดสามเฟสบริเวณบัสต่างๆเพื่อหาค่ามูมวิกฤตและเวลาวิกฤต จำนวน 8 กรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่ามูมวิกฤตบริเวณบัสต่างๆ

ตำแหน่ง	บัสที่24	บัสที่20	บัสที่18	บัสที่16	บัสที่15	บัสที่10	บัสที่25	บัสที่27
มูมวิกฤต(องศา)	93.00	99.05	101.35	111.96	มีเสถียรภาพ	มีเสถียรภาพ	36.81	38.73

ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาวิกฤตบริเวณบัสต่างๆ

ตำแหน่ง	บัสที่24	บัสที่20	บัสที่18	บัสที่16	บัสที่15	บัสที่10	บัสที่25	บัสที่27
เวลาวิกฤต (วินาที)	0.30	0.35	0.36	0.43	มีเสถียรภาพ	มีเสถียรภาพ	0.15	0.16

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเสถียรภาพเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของตำแหน่งต่างๆในระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระการศึกษาเสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำท้ายเขื่อนชลประทาน เขื่อนขุนด่านปราการชล จ. นครนายก ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของสถานีไฟฟ้านครนายก 2 โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 เมื่อทำการทดสอบการเกิดฟลด์สามเฟสบริเวณบัสต่างๆในระบบไฟฟ้า เพื่อหาค่ามุมวิกฤตลัดวงจรสามเฟสและการตอบสนองเชิงเวลาของมุมเมื่อลัดวงจรสามเฟสนั้นจะพบว่าค่ามุมวิกฤต ของแต่ละจุดจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อค่ามุมวิกฤตแตกต่างกันนั้นจะทำให้ค่าเวลาวิกฤตของระบบเปลี่ยนไปจากเดิมด้วย ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงเมื่อจำลองความผิดปกติที่บริเวณบัสที่ทดสอบ มุมวิกฤตและเวลาวิกฤตการกำจัดความผิดปกติซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์บริเวณตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ การประยุกต์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดแยกของสายส่ง บริเวณพื้นที่ดังกล่าว เวลาวิกฤตการกำจัดความผิดปกติที่บัส 24 คือ 0.30 วินาที บัสที่ 20 คือ 0.35 วินาที และบัสที่ 25 คือ 0.15 วินาที ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์สามารถไปประยุกต์เป็นแนวทางในการวางแผนวิเคราะห์การจ่ายไฟได้ หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว เป็นหัวข้อที่มีการนำมาสนทนาระหว่าง การไฟฟ้า ลูกค้า รวมทั้งเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาหรือมีการดับไฟเมื่อมีแผนปฏิบัติ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นเสถียรภาพเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของตำแหน่งต่างๆในระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ หากการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบที่เชื่อมโยง และนำผลการศึกษามาพิจารณา หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง



รายการอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) เข้าถึงได้จาก: <http://www.pea.co.th/vspp/vspp.htm>
- [2] F.H. Guan, D.M Zhao, X. Zhang, B.T Shan, Z. Liu, “Research on Distributed Generation Technologies and its impacts on Power System” Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on
- [3] Gomez, J.C.; Morcos, M.M.; “Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages” Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES
- [4] Pradit Fuangfoo, Thongchai Meenual, Wei-Jen Lee, Chow-Chompoo-Inwai, “PEA Guide lines of Impact Study and Operation of DG for Islanding Operation” Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007. ICPS 2007. IEEE/IAS
- [5] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” PRC-PQG-01/1998
- [6] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” PRC-PQG-02/1998
- [7] P.Kundur, “Power system stability and control, McGraw-Hill Inc., New York , USA, 1994.
- [8] Pradit Fuangfoo Wei-Jen Lee Khaled A. Nigim “Intentional Islanding Operation to Improve the Service Reliability of Thailand Electric Power System” Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE
- [9] N. Hashim, N. Hamzah, M.F. Abdul Latip “Transient Stability Analysis of the IEEE14Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS)” Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on
- [10] F. I. Izuogbunam, E. N. C. Okafor and S. O. E. Ogbogu “Multimachine transient stability analysis of the expanded 49 bus, 330KV Nigeria power system” Adaptive Science and Technology (ICAST), 2011 3rd IEEE International Conference
- [11] H. Saadat, “Power System Analysis”, Tata McGraw Hill, New Delhi, 2002.



ภาคผนวก ก

ข้อมูล Source Code ของโปรแกรมในงานวิจัย


```

function eacfault(Pm, E, V, X1, X2, X3)
if exist('Pm')~=1
Pm = input('Generator output power in p.u. Pm = '); else, end
if exist('E')~=1
E = input('Generator e.m.f. in p.u. E = '); else, end
if exist('V')~=1
V = input('Infinite bus-bar voltage in p.u. V = '); else, end
if exist('X1')~=1
X1 = input('Reactance before Fault in p.u. X1 = '); else, end
if exist('X2')~=1
X2 = input('Reactance during Fault in p.u. X2 = '); else, end
if exist('X3')~=1
X3 = input('Reactance after Fault in p.u. X3 = '); else, end
Pe1max = E*V/X1; Pe2max=E*V/X2; Pe3max=E*V/X3;
delta = 0:.01:pi;
Pe1 = Pe1max*sin(delta); Pe2 = Pe2max*sin(delta); Pe3 = Pe3max*sin(delta);
d0 =asin(Pm/Pe1max); dmax = pi-asin(Pm/Pe3max);
cosdc = (Pm*(dmax-d0)+Pe3max*cos(dmax)-Pe2max*cos(d0))/(Pe3max-Pe2max);
if abs(cosdc) > 1
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('system can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
else, end
dc=acos(cosdc);
if dc > dmax
fprintf('No critical clearing angle could be found.\n')
fprintf('System can remain stable during this disturbance.\n\n')
return
else, end
Pmx=[0 pi-d0]*180/pi; Pmy=[Pm Pm];
x0=[d0 d0]*180/pi; y0=[0 Pm]; xc=[dc dc]*180/pi; yc=[0 Pe3max*sin(dc)];
xm=[dmax dmax]*180/pi; ym=[0 Pe3max*sin(dmax)];
d0=d0*180/pi; dmax=dmax*180/pi; dc=dc*180/pi;

```

```

x=(d0:.1:dc);
y=Pe2max*sin(x*pi/180);
y1=Pe2max*sin(d0*pi/180);
y2=Pe2max*sin(dc*pi/180);
x=[d0 x dc];
y=[Pm y Pm];
xx=dc:.1:dmax;
h=Pe3max*sin(xx*pi/180);
xx=[dc xx dmax];
hh=[Pm h Pm];
delta=delta*180/pi;
if X2 == inf
fprintf('\nFor this case tc can be found from analytical formula. \n')
H=input('To find tc enter Inertia Constant H, (or 0 to skip) H = ');
    if H ~= 0
        d0r=d0*pi/180; dcr=dc*pi/180;
        tc = sqrt(2*H*(dcr-d0r)/(pi*50*Pm));
    else, end
else, end
%clc
fprintf('\nInitial power angle = %7.3f \n', d0)
fprintf('Maximum angle swing = %7.3f \n', dmax)
fprintf('Critical clearing angle = %7.3f \n\n', dc)
if X2==inf & H~=0
fprintf('Critical clearing time = %7.3f sec. \n\n', tc)
else, end
h = figure; figure(h);
fill(x,y,'m')
hold;
fill(xx,hh,'c')
plot(delta, Pe1,'-', delta, Pe2,'r-', delta, Pe3,'g-', Pmx, Pmy,'b-', x0,y0, xc,yc, xm,ym), grid
Title('Application of equal area criterion to a critically cleared system')
xlabel('Power angle, degree'), ylabel(' Power, per unit')

```

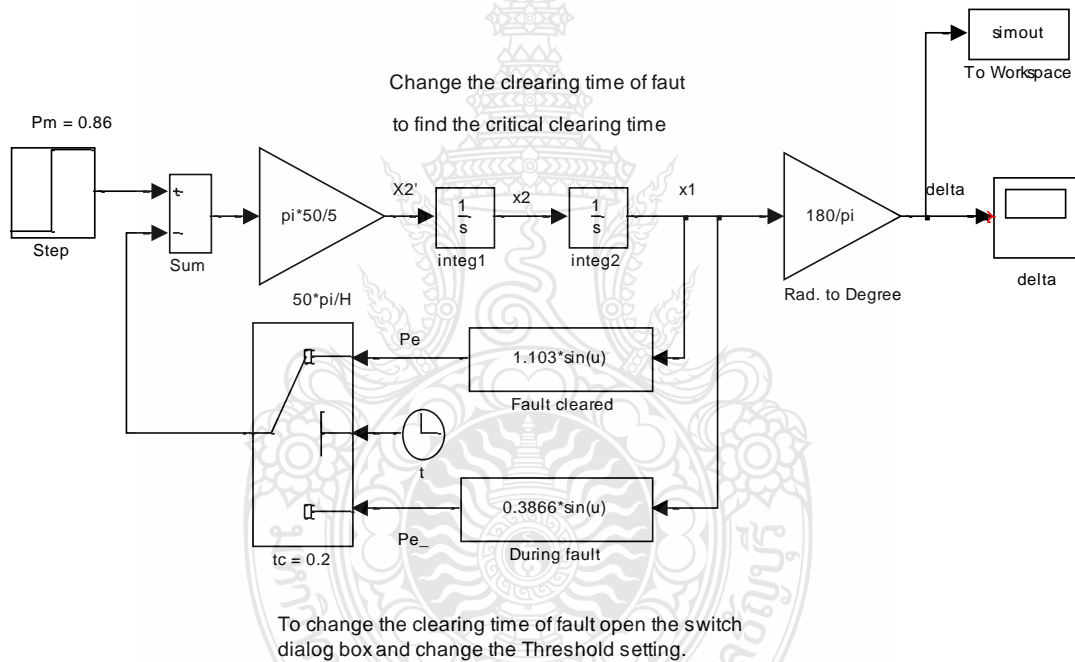
```
text(5, 1.07*Pm, 'Pm')
```

```
text(50, 1.05*Pe1max,['Critical clearing angle = ',num2str(dc)])
```

```
axis([0 180 0 1.1*Pe1max])
```

```
hold off;
```

โปรแกรม MATLAB/SIMULINK





ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ข.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวสำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ข.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า: กรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

ข.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวสำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

**การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9**

9th Conference on Energy Network of Thailand

**พลังงานสีเขียวเพื่อโลกที่สดใส
Green Energy Brightens Our World**

ณ ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก
8-10 พฤษภาคม 2556

จัดการประชุมโดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ENETT
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน
Conference on Energy Network of Thailand

MTEC
M
PTT Group
ท.ฟ.ต.
การดำเนินงานวิจัยและนวัตกรรม

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ศ.ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ผศ.ดร. กอดขวัญ นามสงวน
ผศ.ดร. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ

ดร. สถาพร ทองวิค
ดร. สโรชา เจริญวัย
ดร. สรพงษ์ ภาสุปรีย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศ.ดร. สมชาติ โสภณรมณฤทธิ
รศ.ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ. วิศิษฐ์ สีสมาติกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร. เพ็ญญารัตน์ จินดา
ดร. อำนวย บุญลอย
ดร. ฉัตรชัย นิยมผล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร. ชโลธร ธรรมแท้
ดร. กীরติ สุตักขณ์
ดร. อีระชาติ พรพิบูลย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด
รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธียานนท์
ผศ.ดร. นุภาพ แยมไตรพัฒน์
ผศ.ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์
ผศ.ดร. วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์
ผศ.ดร. สมชาย ศรีพัฒน์พัฒน์
ผศ.ดร. ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร
ผศ.ดร. ขวัญจิต วงษ์ชาลี
ผศ.ดร. สลิลทิพย์ สันจูนธิดา
ผศ.ดร. ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์
ดร. วาโย ช้างเจริญ
ดร. สมศักดิ์ เพ็ชรกุล
ดร. วิไลลักษณ์ สระมูล
ดร. วิฑิตะพล หุยนันท
อ. กิตติศักดิ์ ยงศิริ
อ. ขวัญชัย หนาแน่น
อ. ปุณยภัทร ภูมิภาค
อ. ไมตรี กระทบพิจิตร

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ
ดร. ยงยุทธ ชนบดีเฉลิมรุ่ง
ดร. สิริมาส เสงรัมย์
ดร. สันต์ จันทร์สมศักดิ์
ดร. สุพรรณนิภา วัฒนา
ดร. ศรายุทธ วิทยุผล

มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร. มั่นชนา รังสิโยภาส
ดร. วิชรินทร์ ตงบัง

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เจริญพร เลิศสถิตอนการ
ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด
ดร. อีร์พัฒน์ ชมภูคำ
ดร. โสภา สุวแพทย์
ดร. นิตา ชัยมูล
ดร. มณีรัตน์ องค์กรรัตน์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร. รุ่ง กิตติพิชัย
ดร. วรศิษฐ์ ตรีทัศน์วินท์
รศ. ศุภชัย นาทะพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร. กฤษณชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์
ดร. สมชัย ทิรัญวโรคม
ดร. ขวัญชัย จ้อยเจริญ
ดร. วันชัย ทิรัญสิงห์
ดร. บุญยฤทธิ ประสาทแก้ว
ดร. วารุณี อริยะวิริยะ
ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์กุลนันท์
ดร. บุญยง ปลั่งกลาง
ดร. อำนาจ เรืองวารี

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

ดร. โยธิน อังกุล
ดร. ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

รศ.ดร. วัชรฯ เพิ่มชาติ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร. สมพร ธเนศวรณิษฐ์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร. เทพฤทธิ์ ทองชูบ
ดร. กীরติ ชยะกุลศรี
ดร. วิชชากร เสงศรีธวัช
ดร. ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล
ดร. วริศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์
ดร. นิมิต บุญภิรมย์
อ. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ
อ. เฉษิณ จันทร์สา

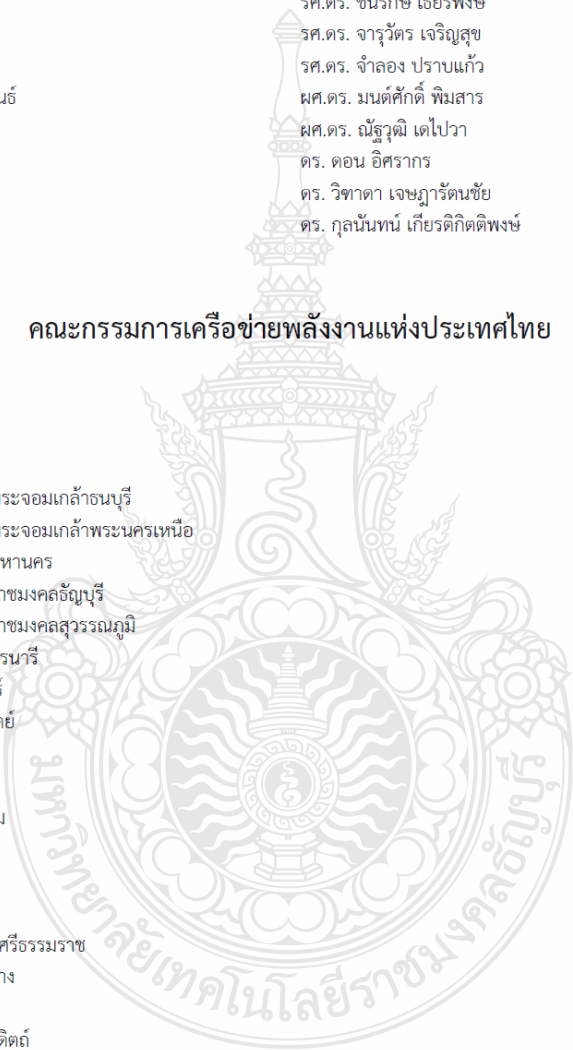
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. ชยุต นันทดลิต

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ที่บุญมา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์
รศ.ดร. ชินวัช เชียรพงษ์
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข
รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร
ผศ.ดร. ธีรวิมล เตใจวา
ดร. ดอน อิศรากร
ดร. วิฑาตา เจษฎารัตนชัย
ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

คณะกรรมการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยทักษิณ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
มหาวิทยาลัยราชภัฏจตุรดิตถ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยศิลปากร



รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
EC064	Investigation of a Real-time Energy Monitoring and Management Prototype using Artificial Neural Networks	700
EC065	การศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบระหว่างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าและรถจักรยานยนต์ใช้น้ำมันที่เป็นระบบหัวฉีด	708
EC066	การศึกษาเวลาและประจุพื้นผิวดักของไดโอดกำลังที่สภาวะหยุดนำกระแส	716
EC067	การหาประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตามมาตรฐาน IEEE 112-2004 วิธีแบบ F1	722
EC068	ไฮเวอร์คราฟต์ไฟฟ้า	728
EC069	การสร้างเครื่องอบไฟฟ้าชนิดรังสีอินฟราเรดช่วงไกลแบบระบบปิด	735
EC070	การศึกษาปล่องผนังโซลาร์เซลล์ระบายอากาศและทำน้ำร้อนแบบธรรมชาติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของบ้านจำลองภายใต้สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น	742
EC071	การเปรียบเทียบระบบควบคุมการทำงานสำหรับเครื่องอบไฟฟ้าแบบแผ่รังสีความร้อนชนิดรังสีอินฟราเรดช่วงไกล	748
EC072	การออกแบบและจัดสร้างที่นอนลมป้องกันแผลกดทับ	755
EC073	การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวสำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	761
EC074	การศึกษาการคืนพลังงานขณะเบรกของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า	767
EC075	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่โหลดไม่สมดุลด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง/เดินหน้าแบบปรับปรุง	775
สาขาวัสดุพลังงาน: Energy Material (EM)		
รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
EM001	สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุออกไซด์ CuFeO_2 เติลฟอสไซด์ที่เจือด้วยอะตอม Al, Sn, Ti และ Au	782
EM002	การเตรียมวัสดุท่อนาโนจากแร่โอลิเมนไทยด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง	789
EM003	การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดใหญ่	797
EM004	การวิเคราะห์การกระจัดและพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟโออิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ	803
EM005	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของแอลอีดีสีขาวยุติให้ความสว่างสูงภายใต้อุณหภูมิต่ำ	809
EM006	การลดฮาร์มอนิกในวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	814
EM007	การดำเนินงานด้วยดีเอสพีสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์คู่โดยใช้เทคนิคสเปกตรัมเฟสล็อกด้วยวิธีมอดูเลชัน	820
สาขานโยบายพลังงาน: Energy Policy (EP)		
รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
EP001	การศึกษาปัญหาการใช้งานระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระในจังหวัดชัยภูมิ	826
EP002	ความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำห้วยอ่างที่มีการก่อสร้างระบบกักน้ำร่วมกับระบบไฮบริดจ์พื้นที่จังหวัดน่านในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์	834
EP003	การทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานการณ์ฉุกเฉินโดยการพิจารณาวัตถุประสงค์เอทีซี	840
EP004	เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพสำหรับแหล่งทรัพยากรในประเทศไทย	846





การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวสำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
Analysis Transient stability for Very Small Distributed Generator System

วชิรา เจริญชัย¹, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์²

^{1,2} ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทร: 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@enr.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า โดยใช้วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) เพื่อหามุมวิกฤตและค่าเวลาวิกฤตของการกำจัดฟอลต์เพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพ ผลการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับบัสบัสนั้นจะพบว่ค่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 52.225 องศาและระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ 0.050 วินาที ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวพบว่า ค่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 60.116 องศาและระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ 0.142 วินาที หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

คำหลัก: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว, การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ, เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว

Abstract

This paper presents a transient stability. Distributed generator of very small power producer using Equal-area criterion to find the critical angle of the stability. The test results a model case of a three phase fault near the Bus no.1. The critical angle is 52.225 degree and critical time is 0.050 second the event of the islanding operation a three phase fault near the Bus no.51 the critical angle is 60.116 degree and critical time is 0.142 second. If we can island operation .It can increase the stability of power system reliability and reduce losses due to power outages

Keywords: Distributed generator, islanding operation, transient stability

1. บทนำ

ปัจจุบันรัฐบาลได้ดำเนินนโยบายส่งเสริมให้ภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการลงทุนผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นการนำเอาพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาผลิตกระแสไฟฟ้าขายให้กับ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงมีโครงการพัฒนาแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very small power producer) เกิดขึ้น [1] และแนวโน้มของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากนับวันจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น

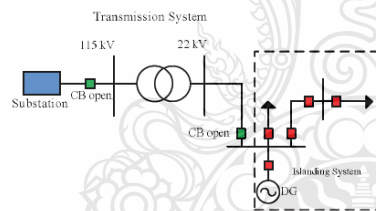
การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) เป็นหัวข้อที่มีการนำมาสนทนาระหว่าง การไฟฟ้า ลูกค้ารวมทั้งเจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาหรือมีการดับไฟเมื่อมีแผนปฏิบัติ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลด

มูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง [2, 3]

บทความนี้นำเสนอเสถียรภาพชั่วคราว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยใช้วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) โดยจำลองผลของเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อไม่ได้ออกเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำเข้าระบบ และเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำเมื่อจ่ายไฟแบบแยกอิสระ เพื่อหามุมวิกฤตเพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพได้

2. การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Operation)

การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระคือการที่ระบบไฟฟ้าหลักถูกตัดวงจรออกอาจเนื่องจากการบำรุงรักษาหรือเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่าย โดยที่ผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยจ่ายไฟฟ้าทดแทนระบบหลัก



รูปที่ 1. การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Operation)

จากรูปที่ 1 แสดงการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ระบบไฟฟ้าหลักถูกตัดวงจรออก อาจเนื่องจากการบำรุงรักษาหรือเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง โดยผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยหรือผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก หมายถึง ผู้ผลิตไฟฟ้า ทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเอง มี

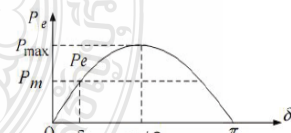
ลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยมีปริมาณพลังงานขายเข้าระบบไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ [1] จากพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังน้ำ พลังงานคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร, พลังงานความร้อนใต้พิภพ, พลังงานชีวมวล, พลังงานจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า [4]

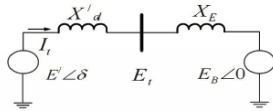
3.1 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอยู่ภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดเชิงกล และ แรงบิดทางไฟฟ้า ถ้าเสถียรภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปจุดสมดุลจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยมีผลทำให้อัตราเร่งของ มุมโรเตอร์ เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามกฎของการเคลื่อนที่ (Motion Equation) ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าอีกเครื่องหนึ่งมุมของ โรเตอร์ เมื่อเทียบกับแกนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดนั้นจะมากกว่าเครื่องกำเนิดที่หมุนช้ากว่า [5] ความแตกต่างของมุมเป็นผลให้ภาระของเครื่องกำเนิดที่ช้ากว่าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดที่เร็วกว่าซึ่งเป็นการเพิ่มชั้นของขนาดมุมที่แยกออกจากกันมากเท่าใดจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าที่ลดลงตามความสัมพันธ์ระหว่าง $P-\delta$ และผลของมุมที่แยกออกมากยิ่งขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบยิ่งลดลงและกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมุมเป็น 90 องศา ดังสมการ

$$P = \frac{|E'| |V|}{X_t} \sin \delta \quad (1)$$



รูปที่ 2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $P-\delta$



รูปที่ 3. วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับบัสอนันต์

จากรูปที่ 3 เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับบัสอนันต์โดยที่ E' เป็นแรงดันที่อยู่หลัง Reactance X'_d , X'_d เป็นความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, E_t เป็นแรงดันที่ปลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, E_B เป็นแรงดันที่ปลายของ Infinite Bus, δ เป็นมุมระหว่าง E' ที่อยู่เหนือ E_B และกำหนดให้มุม E' เป็นมุมอ้างอิงจะได้ ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{i} &= \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} \\ &= \frac{E' - E_B (\cos\delta - j\sin\delta)}{jX_T} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่กำลังไฟฟ้าหลัง X'_d หาได้จากสมการ (3)-(5)

$$S' = P + jQ = E' \times I_t^* \quad (3)$$

$$E' = E'_t + jX'_d I_t^* \quad (4)$$

$$X_T = X'_d + X_E \quad (5)$$

3.2 เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว [4]

การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวเพื่อต้องการทราบว่าเครื่องกำเนิดจะอยู่ในระบบได้หรือไม่เมื่อต้องเจอกับการรบกวนที่รุนแรงทันทีทันใด การรบกวนชนิดนี้อาจเช่น การลัดวงจร การหลุดออกของเครื่องกำเนิดในระบบ การเชื่อมต่อของโหลดขนาดใหญ่ หรือการสูญเสียโหลดขนาดใหญ่ เป็นต้น[4]

จากสมการการแกว่งของเครื่องกลเมื่อไม่คิดค่าความหน่วงดังสมการที่(6)

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (6)$$

เมื่อ

H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MWS/MVA

P_m คือ กำลังกล ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_e คือ กำลังไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

δ คือมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อ P_a เป็นกำลังที่ใช้ในการเร่ง จากสมการที่(6) จะได้ว่า

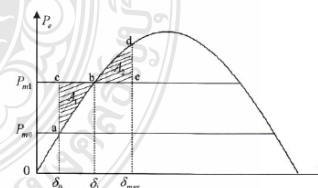
$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_a) \quad (7)$$

ถ้านำ $2d\delta/dt$ มาคูณเข้าในสมการที่(7) และแก้สมการและจัดรูปใหม่ จะได้ ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเครื่องกลเทียบกับความเร็วเชิงโคไซน์ ตามสมการที่ (8)

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{2 \frac{\pi f_0}{H} \int (P_m - P_a) d\delta} \quad (8)$$

ถ้าระบบมีเสถียรภาพภายหลังการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่(9)

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_a) d\delta = 0 \quad (9)$$



รูปที่ 4. เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

จากรูปที่ 4 ถ้าเราพิจารณาที่จุดทำงานปกติหนึ่งหรือจุดของการทำงาน δ_0 ณ จุดนี้กำลังทางกล $P_m = P_e0$

พิจารณาในรูปซึ่งกำลังทางกลด้านเข้าแบบขั้นเข้าไปเป็น P_{m1} เนื่องจาก $P_{m1} > P_e$ กำลังอัตราเร่งขึ้นของโรเตอร์จะมีค่าเป็นบวกและมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงการเร่งนี้เป็นตามสมการที่ (10)

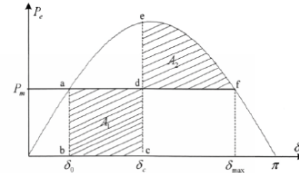
$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area}A_1 \quad (10)$$

จากรูปที่ 4 การที่มุมโหลดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อ $\delta = \delta_1$ กำลังทางไฟฟ้า P_e จะเท่ากับกำลังทางกลด้านเข้า P_{m1} ที่จุด b ถึงแม้ว่ากำลังการเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่โรเตอร์จะยังหมุนด้วยแรงเฉื่อยส่งผลให้ δ และ กำลังทางไฟฟ้า P_e ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยแรงเฉื่อยต่อไปจะส่งผลให้ $P_m < P_e$ จะทำให้โรเตอร์มีอัตราเร่งลดลงมีค่าเป็นลบโรเตอร์จะกลับมาหมุนที่ความเร็วเชิงโคไซน์อีกครั้งที่ $\delta = \delta_{\max}$ สำหรับพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จากการเร่งแบบลบบนนี้ได้จากสมการที่ (11)

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_m - P_e) d\delta = \text{area}A_2 \quad (11)$$

จากรูปที่ 4 การที่โรเตอร์แกว่งไปจุด b และมุมกำลัง δ_{\max} พบว่า $|\text{area}A_1| = |\text{area}A_2|$ มุมของโรเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่าง δ_0 และ δ_{\max} ด้วยความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์เอง การแกว่งนี้จะมีการหน่วงและเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งใหม่ที่จุด b แล้วมาหยุดที่มุม δ_1

ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดต่อกับระบบขนาดใหญ่ผ่านสายส่ง ถ้า มีการเกิดฟอลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิด จะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้าไปที่บัสของระบบใหญ่



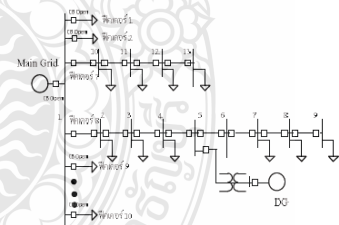
รูปที่ 5. เส้นไขพื้นที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤต หากประยุกต์เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเข้าไปพิจารณาในรูปที่ 5. จะได้ว่าค่ามุมวิกฤต ดังสมการที่ (12)

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} (P_{\max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$\cos \delta_c = \frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_{\max} - \delta_c) + \cos \delta_{\max} \quad (12)$$

4. การออกแบบและทดสอบ

ทำการออกแบบและทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อไม่ได้ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ และกรณีที่ได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ จากรูปที่ 6 เป็นตัวอย่างระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบระบบโดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบที่บัสที่ 5

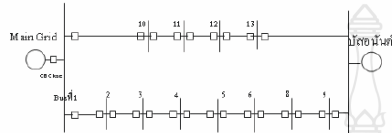


รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบระบบ

กรณีที่ 1 ทำการออกแบบและทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อไม่ได้ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเข้าระบบ ดังรูปที่ 7 โดยค่าพารามิเตอร์ทดสอบ ดังนี้ $E' = 1.10 \angle 38.76^\circ$, $E_B = 1 \angle 0^\circ$, $P = 1.0 \text{ pu}$, 50 Hz , $H = 1.0 \text{ MJ / MVA}$

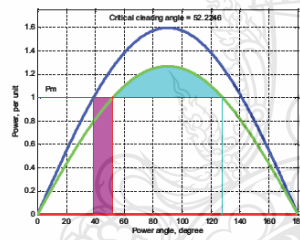


โดยทดสอบกรณีตัวอย่างเพื่อหาค่ามุมวิกฤตกรณี ที่
เกิดฟอลต์สามเฟสที่บริเวณใกล้บัสที่ 1 ดังรูปที่ 7

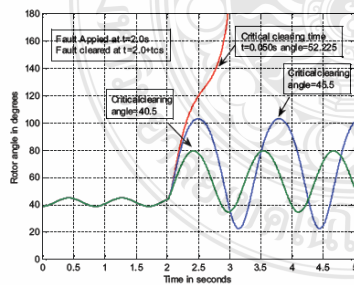


รูปที่ 7. โดอะแกรมเส้นเดียวของระบบทดสอบ

ทำการกำหนดค่าโดยค่า E' ได้มาจากการ
คำนวณในสมการที่ (1)-(4), E_B เป็นแรงดันของบัสอนันต์
, P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์, ความถี่ของระบบ 50Hz และ H เป็นค่าความเฉื่อย
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น $MW.s / MVA$



รูปที่ 8. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้
บัสที่ 1



รูปที่ 9. การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อ
ลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้บัสที่ 1

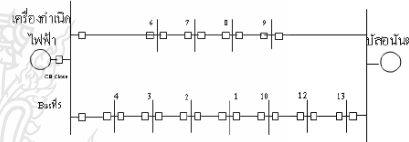
จากรูปที่ 8 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนด
พร้อมสมการที่ (1)-(4), และ (12) มาทำการศึกษาก็จะเห็น
ว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 52.225
องศา

จากรูปที่ 9 ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลา
วิกฤตที่ $t_c = 0.050$ วินาที

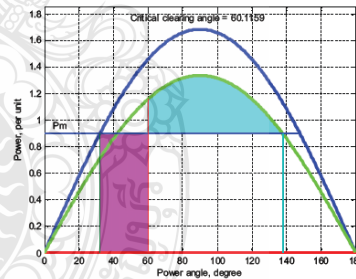
กรณีที่ 2 ทำการออกแบบและทดสอบ
เสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจ่ายไฟ
แบบแยกอิสระ ดังรูปที่ 10 โดยมีค่าพารามิเตอร์ทดสอบ
ดังนี้

$$E' = 1.15 \angle 32.262^\circ, E_B = 1 \angle 0^\circ, P = 0.9 \text{ pu.},$$

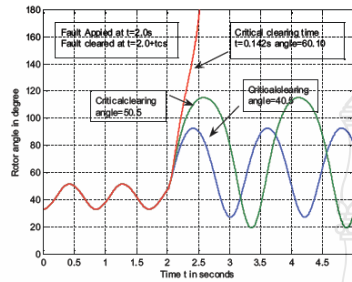
$$50\text{Hz}, H = 3.5 \text{ MJ / MVA}$$



รูปที่ 10. โดอะแกรมเส้นเดียวของระบบทดสอบ



รูปที่ 11. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณ
ใกล้บัสที่ 5



รูปที่12. การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อ
ลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้บัสที่ 5

จากรูปที่11 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อมสมการที่ (1)-(4), และ (12) มาทำการศึกษาก็จะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 60.116 องศา

จากรูปที่12 ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.142$ วินาที

5. สรุป

ผลการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับบัสนั้นจะพบว่าค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 52.225 องศาและระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.050$ วินาที

ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวพบว่า ค่ามุมวิกฤตที่จะต้องปลดสายส่งออกที่มุม 60.116 องศาและระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.142$ วินาที

สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) สืบค้นได้จาก: <http://www.pea.co.th/vspp/vspp.htm>
- [2] Gomez, J.C.; Morcos, M.M.; "Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES
- [3] Pradit Fuangfoo, Thongchai Meenual, Wei-Jen Lee, Chow-Chompoo-Inwai, "PEA Guide lines of Impact Study and Operation of DG for Islanding Operation" Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007. ICPS 2007. IEEE/IAS
- [4] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ "แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ ระบบไฟฟ้ากำลัง", ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2533, หน้า 119-148.
- [5] Kundur, P. "Power System Stability and Control", Chapter 13, Transient Stability, pp.827-958

ข.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า: กรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ



Department of Alternative Energy Development and Efficiency
MINISTRY OF ENERGY

กำหนดการและบทความ

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

การประชุมสัมมนาวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
The 5th Thailand Renewable Energy For Community Conference
TREC-5
18 - 20 ธันวาคม 2555

จัดโดย สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน(แห่งประเทศไทย)
ณ สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

adiCET



การประชุมสัมมนาวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 5

The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)

18-20 December 2555

หน้าแรก	การลงทะเบียน	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน	ติดต่อเรา
---------	--------------	---------------	---------------	-----------

เมนู
Call For Papers
ความเป็นมา
สารจากประธาน
คณะกรรมการ
กำหนดการสำคัญ
โปรแกรมการประชุม
การลงทะเบียน
การลงทะเบียน
Social Program
สถานที่จัดงาน
สถานที่พักและการเดินทาง
ผู้สนับสนุน
ติดต่อเรา

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ	
1. รศ.ดร.วิदनพงศ์ รัชชวีเชียร	
2. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	
3. ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	
4. ศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาภ	
5. Prof. Dr. Joseph KHEDARI	
6. รศ.ดร.มายุทธ สงค์ธนาพิทักษ์	
7. ผศ.ดร.สมชัย หิรัญโรดม	
8. ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด	
9. คุณอำนวย ทองสลัด	
10. ผศ.ดร.เรืองเดช วงศ์หล้า	

คณะกรรมการดำเนินงาน	
ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	ประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	รองประธาน
ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิศักดิ์พิชญ์	กรรมการ
ผศ.ดร. ต่อพงศ์ ศรีธำชาติ	กรรมการ
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการ
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายบทความ	
ดร. ณัฐยา ตันตรานนท์	ประธาน
ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิศักดิ์พิชญ์	รองประธาน
ดร. วีระ วงศ์ปัญญา	กรรมการ
ดร. อนุสรณ์ ชนารักษ์	กรรมการ
ดร. ประพิศาร์ ชนารักษ์	กรรมการ
ดร. วรวิภา ยงประยูร	กรรมการ
นางสาวสิริสรณ์ สิทธิรินทร์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้และการลงทะเบียน	
รศ.ดร. วิदनพงศ์ รัชชวีเชียร	ประธาน
ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	รองประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	กรรมการ
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ	
ดร. วีระ ชาญเมืองใจ	ประธาน
นายสุวัจน์ ศรีแก้ว	รองประธาน
นายกฤษณะ ศรีปุก	กรรมการ
นางปณิตา สิมสกุล	กรรมการ
นายอานนท์ ผัดแปง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์	
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์	ประธาน
ดร. บุญยง ปลั่งกลาง	รองประธาน
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการ
อ. เจนจิรา เปี่ยมดี	กรรมการ
นายภานุพงษ์ อินต๊ะวงศ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายพิธีการและการต้อนรับ	
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์	ประธาน
อ. เจนจิรา เปี่ยมดี	รองประธาน
ดร. บุญยง ปลั่งกลาง	กรรมการ
ดร. ณัฐยา ตันตรานนท์	กรรมการ
ดร. วีระ ชาญเมืองใจ	กรรมการ
นางปณิตา สิมสกุล	กรรมการและเลขานุการ

สารบัญ

บทความ	หน้า
Oral Presentation Session	
กลุ่มที่ 1 ไฟฟ้าชุมชน (CP)	
CP001	1
การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์และรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นสำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวล กรณีศึกษาจังหวัดสุพรรณบุรี <i>กฤษณนที สานธิ สุรินทร์ แหวมงาม</i>	
CP002	9
กังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ <i>วรรณกร พรหมอารีย์</i>	
CP003	16
การศึกษาการกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อการประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ <i>สิทธิชัย กันทะวงศ์ เอกรัตน์ นภกานต์ และบุญยั้ง ปลั่งกลาง</i>	
CP004	22
การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์คู่ โดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ฟัลส์ <i>วิฑมอดูเสชั้น อรรรนที บัวศรี วันชัย ทรัพย์สิงห์</i>	
CP005	28
การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อช่วยคำนวณรายการอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายสายส่งชิงอากาศ 22 kV <i>กุลเดชา อนุกุลภิมย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	
CP006	34
การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV เชื่อมกับกังหันลมลำตะคอง <i>ชนสิษฐ์ จันเงิน กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	
CP007	42
การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 5 kW <i>ชาคริต จินลอย วิรัชย์ โรยรินทร์ เดชา อินทรโทโส</i>	
CP008	49
การประเมินด้านเทคนิคการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่ต้นน้ำน่าน <i>ไตรรัตน์ ปะที กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	

สารบัญ

บทความ	หน้า
CP009 การศึกษากังหันลมผลิตไฟฟ้าจากชุดพัดลมระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ บัญญัติ นิยมवास เสรี ทองชุม	58
CP010 การศึกษากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ บัณฑิต เสรีจกกิจ วิรัชย์ โรยนรินทร์ เตชา อินทรโทโล่	64
CP011 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับ ระบบไฟฟ้า: กรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ วชิรา เขจรสิทธิ์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	70
CP012 การออกแบบเครื่องให้ออกซิเจนในน้ำด้วยใบพัดตีน้ำระบบพลังงานแสงอาทิตย์ วิศิษฐ์ ทองอ่อน ประสงค์ ทองชัย งามอาจ แสدتใหม่	78
CP013 การวิเคราะห์และออกแบบคอนเวอร์เตอร์อัตราขยายแรงดันสูง โดยใช้เทคนิคการเหลื่อม กระแสด้านเข้า สำหรับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ วีระชาติ ชัดมัน วันชัย ทรัพย์สิงห์	83
CP014 การวิเคราะห์ลักษณะและศักยภาพพลังงานลมของสถานีวัดลมบ้านร่มโพธิ์ไทย จังหวัดเชียงราย वलันต์ ปินะเต ดวงกลม ดังโพนทอง ณัฐวุฒิ ดุษฎี ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	89
CP015 การพัฒนารถไฟฟ้าต้นแบบ รัฐพร เงินมีศรี ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วิชัย คงฤทธิ์ แม้นศิริ ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด	113
CP016 การผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กอย่างง่ายสำหรับชนบท อิสริยะ สนิโซ มูฮำหมัดนุร ยูนิ อิสมาแอล เจ๊ะเต๊ะ รอมซี มาหะ ลุดพี ลือณี	118
CP017 ระบบวัดและบันทึกผลการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคโนโลยีไร้สาย เอกวิทย์ ห้ายักวงษ์	126

การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับ
ระบบไฟฟ้า: กรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

Transient Stability Analysis of Very Small Distributed Generator in Interconnected
Power system: Case Study on Islanding Mode Operation

CP011

วชิรา เจริญชัย ฤกษ์ชัยวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์
ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิตนครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี12110
โทร: 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเสถียรภาพชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยใช้วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) เพื่อหามุมวิกฤตและค่าเวลาวิกฤตของการกำจัดพอลด์ เพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพผลการทดสอบแบบจำลองกรณีที่เกิดพอลด์สามเฟสที่บริเวณใกล้เบรกเกอร์ที่ 1 มุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 56.693 องศา และกรณีที่เกิดพอลด์สามเฟสที่บริเวณกึ่งกลางสายส่งระหว่างเบรกเกอร์ที่ 1 และ 4 มุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 80.627 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้ หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ, เสถียรภาพสภาวะชั่วคราว

1. บทนำ

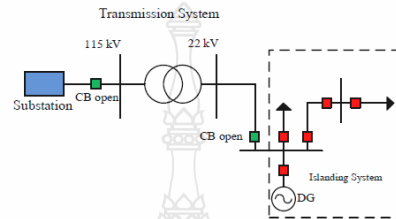
ปัจจุบันรัฐบาลได้ดำเนินนโยบายส่งเสริมให้ภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการลงทุนผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นการนำเอาพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาผลิตกระแสไฟฟ้าขายให้กับ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงมีโครงการพัฒนาแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very small power producer) เกิดขึ้น [1] และแนวโน้มของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากขึ้นจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น

การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator) เป็นหัวข้อที่มีการนำมาสนทนาระหว่าง การไฟฟ้า ลูกค้า รวมทั้ง เจ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาหรือมีการดับไฟเมื่อมีแผนปฏิบัติการ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ หากเกิดกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีเสถียรภาพและมีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า และลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง [2, 3]

บทความนี้นำเสนอเสถียรภาพชั่วคราว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ โดยใช้วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) โดยจำลองผลของเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อไม่ตัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหันไอน้ำเข้าระบบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหันไอน้ำเมื่อจ่ายไฟแบบแยกอิสระเพื่อหามุมวิกฤตเพื่อให้เครื่องกำเนิดอยู่ในเสถียรภาพได้

2. การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Operation)

การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระคือการที่ระบบไฟฟ้าหลักถูกตัดวงจรออก อาจเนื่องจากการบำรุงรักษาหรือเกิดฟอลต์ในระบบ ในระบบจำหน่ายที่มีระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยต่ออยู่หากเกิดสิ่งผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่ายไม่จำเป็นที่จะเกิดการเกิดลัดวงจรระหว่าง สายตัวนำ สายระบบจำหน่ายขาด ต้นไม้ล้มใส่สายไฟฟ้า หรือแม้กระทั่ง ระบบไฟฟ้าหยุดจ่ายไฟฟ้าเพื่ออนุรักษ์ หรือเพื่อปรับปรุงระบบจำหน่าย ทำให้ระบบจำหน่ายไม่มีไฟฟ้าอยู่ในระบบแต่หากระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยยังจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยรับรู้ว่าจะระบบจำหน่ายไม่มีไฟฟ้าอยู่เปรียบเสมือนระบบจำหน่ายเป็นทะเลและระบบผลิตไฟฟ้า ขยาย เป็นเกาะกลางทะเล



รูปที่ 1. การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Operation)

จากรูปที่ 1 แสดงการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระระบบไฟฟ้าหลักถูกตัดวงจรออก อาจเนื่องจากการบำรุงรักษาหรือเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า หากสามารถจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุณภาพไฟฟ้า อยู่ในเกณฑ์ก็จะสามารถเพิ่มเสถียรภาพความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับได้อีกทางหนึ่ง

โดยผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยหรือผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากหมายถึง ผู้ผลิตไฟฟ้าทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเองมีลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยมีปริมาณพลังงานขายเข้าระบบไม่เกิน 10 เมกะวัตต์ [1] จากพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังน้ำ พลังงานคลื่นทะเลหรือมหาสมุทร พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล, พลังงานจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้า

3.1 เสถียรภาพระบบไฟฟ้า

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอยู่ภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดเชิงกลและ แรงบิดทางไฟฟ้า ถ้าเสถียรภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปจุดสมดุลจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยมีผลทำให้อัตราเร่งของ มุมโรเตอร์เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามกฎของการเคลื่อนที่ (Motion Equation) ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าอีกเครื่องหนึ่งของ มุมโรเตอร์ เมื่อเทียบกับแกนโรเตอร์ ของเครื่องกำเนิดนั้นจะมากกว่าเครื่องกำเนิดที่หมุนช้ากว่า [6] ความแตกต่างของมุมเป็นผลให้ภาวะของเครื่องกำเนิดที่ช้ากว่าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดที่เร็วกว่าซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกราฟ $p-\delta$ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดมุมที่แยกออกจากกันมากเท่าใดจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าที่ลดลงตามความสัมพันธ์ระหว่าง $p-\delta$ และผลของมุมที่แยกออกมามากยิ่งขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบยิ่งลดลง และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมุมเป็น 90 องศาจึงสมการ

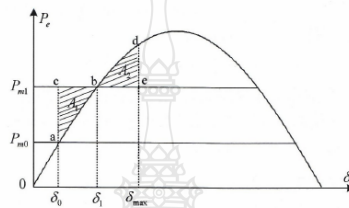
$$P = \frac{|E||V|}{X_t} \quad (1)$$

ถ้านำ $2\delta \frac{d\delta}{dt}$ มาคูณเข้าไปในสมการที่(7) และแก้สมการและจัดรูปใหม่ จะได้ ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเครื่องกลเทียบกับความเร็วเชิงโคจร ตามสมการที่(8)

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{2 \frac{\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_a) d\delta} \quad (8)$$

ถ้าระบบมีเสถียรภาพภายหลังการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่(9)

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_a) d\delta = 0 \quad (9)$$



รูปที่ 4. เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

จากรูปที่ 4 ถ้าเราพิจารณาที่จุดทำงานปกติหนึ่งหรือจุดของการทำงาน δ_0 ณ จุดนี้กำลังทางกล $P_m = P_{e0}$ พิจารณาในรูปซึ่งกำลังทางกลด้านเข้าแบบขั้น เข้าไปเป็น P_{m1} เนื่องจาก $P_{m1} > P_{e0}$ กำลังอัตราเร็วขึ้นของที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นบวกและมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงการเร่งนี้เป็นตามสมการที่(10)

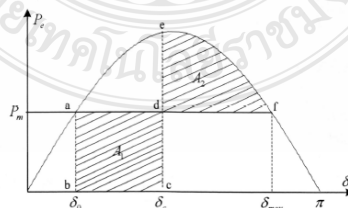
$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area } A_1 \quad (10)$$

จากรูปที่ 4 การที่มุมโหลดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อ δ_1 กำลังทางไฟฟ้า P_e จะเท่ากับกำลังทางกลด้านเข้า P_{m1} ที่จุด b ถึงแม้ว่ากำลังการเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่โรเตอร์จะยังหมุนด้วยแรงเฉื่อยส่งผลให้และ กำลังทางไฟฟ้า P_e ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยแรงเฉื่อยต่อไปจะส่งผลให้ $P_m < P_e$ จะทำให้โรเตอร์มีอัตราเร่งลดลงมีค่าเป็นลบโรเตอร์จะกลับมาหมุนที่ความเร็วเชิงโคจรอีกครั้งที่ δ_{max} สำหรับพลังงานที่สะสมในโรเตอร์จากการเร่งแบบลบบนี้หาได้จากสมการที่(11)

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_m - P_a) d\delta = \text{area } A_2 \quad (11)$$

จากรูปที่ 4 การที่โรเตอร์แกว่งไปจุด b และมุมกำลัง δ_{max} พบว่า $|\text{area } A_1| = |\text{area } A_2|$ มุมของโรเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่าง δ_0 และ δ_{max} ด้วยความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์เอง การแกว่งนี้จะมีกการหน่วงและเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งใหม่ที่จุดแล้วมาหยุดที่มุม δ_1

ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดต่อกับระบบขนาดใหญ่ผ่านสายส่ง ถ้า มีการเกิดฟลลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิด จะไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้าไปที่บัสของระบบใหญ่



รูปที่ 5. เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากันเพื่อหาค่ามุมวิกฤต

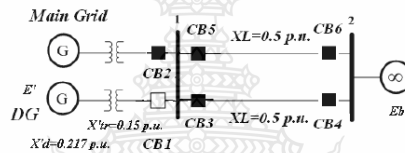
หากประยุกต์เงื่อนไขพื้นที่เท่ากันเข้าไปพิจารณาในรูปที่ ๖. จะได้ว่าค่ามุมวิกฤต ดังสมการที่(12)

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_{\max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$\cos \delta_c = \frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_{\max} - \delta_c) + \cos \delta_{\max} \quad (12)$$

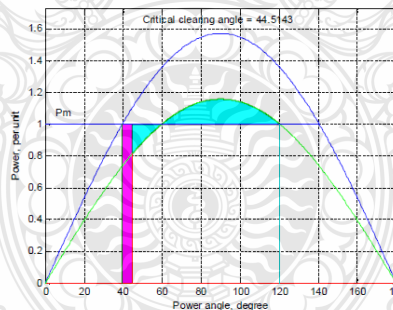
4. การออกแบบและทดสอบ

กรณีที่ 1 ทำการออกแบบและทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อไม่ตัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำเข้าระบบ โดยทำการปลดเบรกเกอร์ที่ 1 ดังรูปที่ 6 โดยค่าพารามิเตอร์ทดสอบดังนี้ $E' = 1.10 \angle 18.51^\circ$, $E_B = 1 \angle 0^\circ$, $P = 1.0 \text{ p.u.}$, 50 Hz , $H = 1.0 \text{ MJ / MVA}$ โดยทดสอบกรณีตัวอย่างเพื่อหาค่ามุมวิกฤต 2 กรณีดังนี้
 กรณีที่ 1 เกิดฟลัดสามเฟสที่บริเวณใกล้เบรกเกอร์ที่ 3
 กรณีที่ 2 เกิดฟลัดสามเฟสที่บริเวณกึ่งกลางสายส่งระหว่างเบรกเกอร์ที่ 5 และเบรกเกอร์ที่ 6

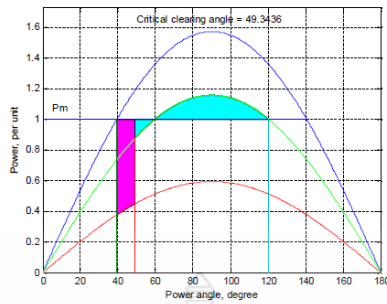


รูปที่ 6. โดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ

ทำการกำหนดค่าโดยค่า E' ได้มาจากการคำนวณในสมการที่ (1)-(4), E_B เป็นแรงดันของบัสอนันต์ P เป็นกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ความถี่ของระบบ 50 Hz และ H เป็นค่าความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MJ.s / MVA



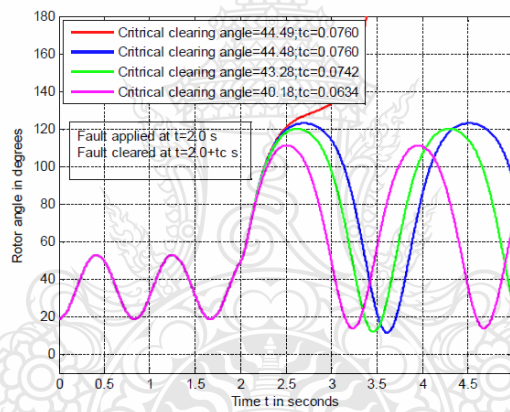
รูปที่ 7. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้เบรกเกอร์ที่ 3



รูปที่ 8. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณกึ่งกลางสายส่งระหว่างเบรกเกอร์ที่ 5 และเบรกเกอร์ที่ 6

จากรูปที่ 7 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อมสมการที่(1)-(4), และ (12) มาทำการศึกษาก็จะเห็นว่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 44.5143 องศา

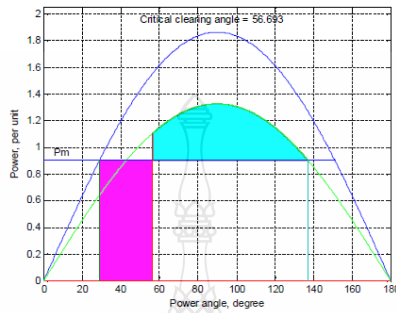
จากรูปที่ 8 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อมสมการที่(1)-(4), และ (13) มาทำการศึกษาก็จะเห็นว่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 49.343 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



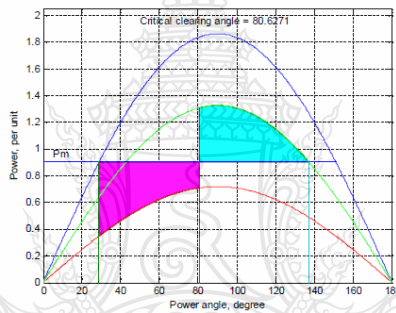
รูปที่ 9. การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้เบรกเกอร์ที่ 5

กรณีนี้ที่ 2 ทำการออกแบบและทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันไอน้ำเมื่อจ่ายไฟแบบแยกอิสระ ดังรูปที่ 8 โดยทำการปลดเบรกเกอร์ที่ 2 ดังรูปที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ทดสอบดังนี้

$$E = 1.15 \angle 42.3^\circ, E_B = 1 \angle 0^\circ, P = 0.9 \text{ pu}, 50 \text{ Hz}, H = 3.5 \text{ MU} / \text{MTA}$$



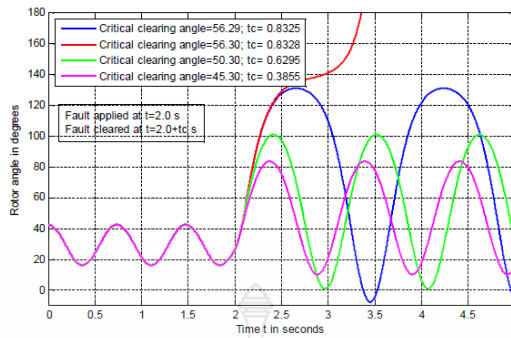
รูปที่ 10. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้ CB1



รูปที่ 11. มุมวิกฤตเมื่อลัดวงจรสามเฟสบริเวณกึ่งกลางสายส่งระหว่าง CB2 และ CB4

จากรูปที่ 10 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อมสมการที่ (1)-(4), และ (12) มาทำการศึกษาก็จะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 56.693 องศา

จากรูปที่ 11 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดพร้อมสมการที่ (1)-(4), และ (13) มาทำการศึกษาก็จะเห็นว่าค่ามุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 80.627 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้



รูปที่ 12. การตอบสนองเชิงเวลาของมุมโรเตอร์เมื่อลัดวงจรสามเฟสที่บริเวณใกล้เบรกเกอร์ที่ 1 ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกอิสระ

จากรูปที่ 12 ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพที่เวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.385s (\delta_c = 45.30^\circ)$, $t_c = 0.6295s (\delta_c = 50.30^\circ)$

และ $t_c = 0.8325s (\delta_c = 56.29^\circ)$ ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อเวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.8328s (\delta_c = 56.30^\circ)$ เมื่อเปรียบเทียบกับมุมวิกฤตจากรูปที่ 10 จะมีค่ามุมวิกฤตประมาณ $(\delta_c = 56.29^\circ \pm 0.39^\circ)$ องศา

5. สรุป

ผลการทดสอบเสถียรภาพชั่วคราวเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันไอน้ำต่อเข้ากับบัสบนันต์ในกรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวพบว่า กรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสที่บริเวณใกล้ เบรกเกอร์ที่ 1 มุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 56.693 องศา ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อเวลาวิกฤตที่ $t_c = 0.8328s (\delta_c = 56.30^\circ \pm 0.39^\circ)$ และกรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสที่บริเวณกึ่งกลางสายส่งระหว่าง เบรกเกอร์ที่ 2 และ 4 มุมวิกฤตที่ต้องปลดสายส่งออกที่มุม 80.627 องศา เพื่อที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบให้อยู่ได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) เข้าถึงได้จาก: <http://www.pea.co.th/vspp/vspp.htm>
- [2] Gomez, J.C.; Morcos, M.M.; "Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES
- [3] Pradit Fuangfoo, Thongchai Meenual, Wei-Jen Lee, Chow-Chompoo-Inwai, "PEA Guide lines of Impact Study and Operation of DG for Islanding Operation" Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007. ICPS 2007. IEEE/IAS
- [4] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ "แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, ทริปเพิล เอ็ดยูเคชั่น จำกัด 2533, หน้า 119-148.
- [5] Kundur, P. "Power System Stability and Control", Chapter 13, Transient Stability, pp.827-958

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายชริรา เขจรสัจย์
วัน เดือน ปี	5 ธันวาคม 2527
ที่อยู่	81 ม.8 บ้านสุขสำราญ ต.เซิม อ.โพนพิสัย จ.หนองคาย 43120
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมื่อปี พ.ศ.2549
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งวิศวกร ระดับ 6 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 1 ภาคกลาง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

