

การใช้ฟังก์ชันพลังงานสำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตของการกำจัดฟอสต์



นายอุดมการณ์ สมานมิตร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

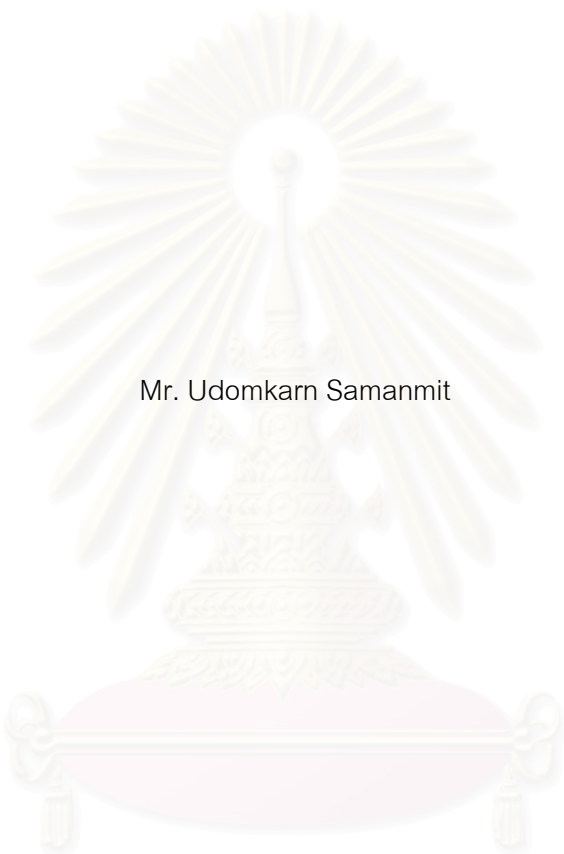
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2136-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN APPLICATION OF TRANSIENT ENERGY FUNCTION FOR CALCULATION OF CRITICAL FAULT
CLEARING TIME



Mr. Udomkarn Samanmit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2136-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ฟังก์ชันพลังงานสำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตของการ กำจัดพอลต์
โดย	นายอุดมการณ์ สมานมิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ทรงศักดิ์ ชุณหวิวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. ทรงศักดิ์ ชุณหวิวัฒน์)

..... กรรมการ
(ดร. สุเทพ ฉิมคล้าย)

อุดมการณ์ สมานมิตร: การใช้ฟังก์ชันพลังงานสำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตของการกำจัดฟอลต์. (An Application of Transient Energy Function for Calculation of Critical Fault Clearing Time) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ทรงศักดิ์ ชุขณพิพัฒน์, 71 หน้า. ISBN 974-17-2136-6.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงหลักการการคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในช่วงชั่วคราวโดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน กระบวนการคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์นั้นเริ่มจากการกำหนดให้เกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้า จากนั้นทำการจำลองพฤติกรรมพลวัตของระบบไฟฟ้าในช่วงชั่วคราว การจำลองนี้ใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมโดยที่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบไฟฟ้าได้จากภาวะอยู่ตัวไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ ในการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้านั้นทำการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันพลังงานเพื่อหาค่าพลังงานวิกฤตโดยหลักการวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ จากนั้นคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์จากการตรวจสอบค่าของฟังก์ชันพลังงานจากข้อมูลทางเดินของมุมและความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ ณ เวลาที่ค่าของฟังก์ชันพลังงานเท่ากับค่าพลังงานวิกฤตและได้ทำการเปรียบเทียบกับการระหว่างการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีฟังก์ชันพลังงานกับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีโดเมนเวลาเพื่อตรวจสอบการใช้งานได้ในหลักการ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
 สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา _____ 2545 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4270669721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : ENERGY FUNCTION / POWER SYSTEM STABILITY / POTENTIAL BOUNDARY SURFACE

UDOMKARN SAMANMIT :AN APPLICATION OF TRANSIENT ENERGY FUNCTION FOR CALCULATION OF CRITICAL FAULT CLEARING TIME. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKUMVIT PHOOMVUTHISARN Ph.D., THESIS COADVISOR : SONGSAK CHUSANAPIPUTT Ph.D., 71 pp. ISBN 974-17-2136-6.

This thesis presents a method for the calculation of fault clearing time and transient stability analyses using the transient energy function. The calculation starts with the predetermined faults which are triggered in various locations in the power system. The system under faults is then represented with dynamic model to simulate the dynamic behavior of the power system. The generator is modeled with the classical representation. The initial conditions are based on the results obtained from the steady state analyses of the power system prior to the occurrence of faults. In the dynamic study, the energy function of the power system is formulated and is used to find the critical energy with the application of the potential energy boundary surface method. The fault clearing time is computed from the fault trajectory at the point where the value of the energy function is equal to its critical energy. The result given by the energy function method is compared with the time domain simulation for verification of the critical fault clearing time.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's _____

Field of study Electrical Engineering Advisor's _____

Academic year 2002 Co-advisor's _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และ ดร. ทรงศักดิ์ ชุชนพิพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมตามลำดับ โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นที่เรียบร้อย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ ดร. สุเทพ ฉิมคล้าย ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้วิจัยขอขอบคุณสมาชิกของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบพลังงานทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดระยะเวลาทำการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ และญาติพี่น้องทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จในครั้งนี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้ำชาย น้ำสาว ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการศึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จการศึกษาด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2 การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีโดเมนทางเวลา.....	5
2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม.....	5
2.2 แบบจำลองของโหลด.....	6
2.3 สมการพลวัตของระบบไฟฟ้า.....	7
2.4 ศูนย์กลางความเฉื่อย.....	9
2.4 สมการพลวัตของระบบไฟฟ้าในรูปศูนย์กลางความเฉื่อย.....	10
2.5 แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว ของระบบไฟฟ้าโดยวิธีทางโดเมนเวลา.....	11
3 การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยวิธี ฟังก์ชันพลังงาน.....	14
3.1 หลักการเบื้องต้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว.....	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 ฟังก์ชันพลังงาน.....	15
3.3 การอธิบายส่วนประกอบของฟังก์ชันพลังงาน.....	16
3.4 การประเมินเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว	
โดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ (Potential Energy Boundary Surface)	17
3.4.1 วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์กับระบบเครื่องกำเนิด	
ไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.....	18
3.4.2 ฟังก์ชันพลังงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่อง	
ต่อกับบัสอนันต์.....	21
3.4.3 หลักการพื้นที่เท่ากันในการวิเคราะห์เสถียรภาพเครื่องกำเนิด	
ไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.....	26
3.4.4 วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์กับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	
หลายเครื่อง.....	28
3.5 การคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์โดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์.....	29
4 ผลการ Simulation ของระบบตัวอย่าง.....	31
4.1 ผลการ Simulation เทียบกับ Time Domain	
ของระบบตัวอย่างที่ 1.....	31
4.2 ผลการ Simulation เทียบกับ Time Domain	
ของระบบตัวอย่างที่ 2.....	39
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	55
ก ข้อมูลระบบทดสอบตัวอย่างที่ 1.....	56
ข ข้อมูลระบบทดสอบตัวอย่างที่ 2.....	59
ค การอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์.....	68
ง หลักการของไลอูเนออฟ.....	70



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้นของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	32
4.2 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์.	34
4.3 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์.	34
4.4 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์.	34
4.5 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้นของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	41
4.6 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์.	43
4.7 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์.	44
4.8 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์.	45
ก.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	55
ก.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	56
ก.3 แสดงค่าจากโหนดโพลาร์ของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	56
ก.4 แสดงค่าจากโหนดโพลาร์ของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับ 7.	57
ข.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	59
ข.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	60
ข.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	62
ข.4 แสดงค่าจากโหนดโพลาร์ของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	63
ข.5 แสดงค่าจากโหนดโพลาร์ของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับบัส 24.	65

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	6
2.2 แสดงระบบไฟฟ้าที่ลดบัสของโหลดเข้ารวมกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	7
3.1 แสดงการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านเนินเขาเมื่อได้รับแรงผลักดัน.	14
3.2 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	18
3.3 แสดงวงจรก่อนเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	19
3.4 แสดงวงจรสมมูลก่อนเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	19
3.5 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	19
3.6 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	19
3.7 แสดงวงจรสมมูลขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	20
3.8 แสดงวงจรสมมูลหลังกำจัดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	20
3.9 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์.	20
3.10 แสดงขอบเขตพลังงานศักย์สำหรับการพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพ.	23
3.11 ไดอะแกรมการพิจารณาหลักการพื้นที่เท่ากัน.	27
3.12 แสดงขอบเขตผิวพลังงานศักย์สำหรับระบบ 3 เครื่องกำเนิด.	28
4.1 แสดงพลังงานศักย์กับพลังงานของระบบรวม.	35
4.2 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ ที่ฟังก์ชันพลังงานเท่ากับพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.187 \text{ s}$).	35
4.3 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ ที่ฟังก์ชันพลังงานมากกว่าพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.187 \text{ s}$).	36
4.4 แสดงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 3 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.162 วินาที.	37
4.5 แสดงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 3 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.163 วินาที.	38
4.6 แสดงพลังงานศักย์กับพลังงานรวมของระบบ.	46
4.7 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ ที่ฟังก์ชันพลังงานเท่ากับพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.207 \text{ s}$).	47
4.8 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ ที่ฟังก์ชันพลังงานมากกว่าพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.208 \text{ s}$).	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 5 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.202 วินาที	48
4.10 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 6 ถึงเครื่องที่ 10 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.202 วินาที	49
4.11 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 5 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.203 วินาที	49
4.12 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 6 ถึงเครื่องที่ 10 เมื่อทำการกำจัด ฟอลต์ ณ เวลา 0.203 วินาที	50
ก.1 แสดงรูปไดอะแกรมสายเดี่ยวของระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	55
ข.1 แสดงรูปไดอะแกรมสายเดี่ยวของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เจริญรุดหน้าอย่างมากในปัจจุบัน ทำให้เกิดอุตสาหกรรมต่างๆ เกิดขึ้นมากมายเพื่อสนองความต้องการความสะดวกสบาย เริ่มตั้งแต่อดีตนั้น พลังงานที่มนุษย์ต้องการจะเป็นเพียงพลังงานความร้อนที่ได้จากต้นไม้ เพื่อความอบอุ่นแก่ร่างกาย และการปรุงอาหารเท่านั้น เมื่อเกิดการปฏิวัติอุตสาหกรรมเกิดขึ้นความต้องการพลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตมีมากกว่าเดิมหลายเท่าตัว มนุษย์มีการค้นหาแหล่งพลังงานอื่นที่มีประสิทธิภาพมาใช้ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และ แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น จากนั้นขั้นแรกรูปแบบของพลังงานที่มนุษย์ใช้นั้นมีเพียง พลังงานความร้อน พลังงานแสงสว่าง และพลังงานกล ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาความรู้ทางไฟฟ้าในระดับที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานรูปแบบใหม่นี้ได้เปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตของมนุษย์เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สามารถส่งไปตามสายส่งได้ในภาคอุตสาหกรรมใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตจัดว่าเป็นส่วนที่บริโภคพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุด ภาคที่อยู่อาศัยนั้นใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าแต่ก็จัดเป็นส่วนที่สำคัญในแง่ของการบริการ เนื่องจากการที่มนุษย์ได้ใช้พลังงานจากแหล่งพลังงาน น้ำมัน ถ่านหิน มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทำให้แหล่งสำรองพลังงานเหล่านั้นลดลงอย่างมาก หลายประเทศได้เริ่มตระหนักถึงภาวะขาดแคลนพลังงานที่จะเกิดขึ้นในอนาคตและเริ่มดำเนินการหาแนวทางแก้ไขทั้งแนวทางการประหยัดพลังงานคือ การรณรงค์การประหยัดพลังงานซึ่งส่วนนี้ต้องอาศัยความร่วมมือกันอย่างจริงจังแต่อย่างไรก็ตามพลังงานที่สำรองก็มีวันหมดอายุดี จึงมีแนวทางอีกอย่างคือการค้นหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวภาพ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อชดเชยพลังงานที่จะหมดไปของแหล่งพลังงานสำรองที่มีอยู่อย่างจำกัด

North American Electric Reliability Council (NERC) ได้นิยามความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าแสดงถึงระดับของประสิทธิภาพที่ระบบไฟฟ้าส่งไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในระดับที่ต้องการ บนพื้นฐานที่ว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่อเนื่องและปลอดภัยนั้นอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจะต้องทำงานในลักษณะที่ก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของระบบมากที่สุดบนเงื่อนไขของข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ และสภาพการณ์การใช้พลังงานพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเนื่องจากขนาดของพลังงานที่ผลิตเพื่อส่งจ่ายให้กับภาคอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยนั้นมีขนาดสูงมาก อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบมีโอกาสที่จะพบกับฟอลต์ (Fault) ที่มีระดับความรุนแรงที่สูงกว่าเดิม และหลายๆ กรณี

ช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์อยู่ในช่วงเวลาที่ชั่วครู่ประมาณ 1 วินาที[1] ปัญหานี้คือปัญหาของเสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดการผิดปกติเกิดขึ้น การที่ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพชั่วครู่ได้นั้นระบบต้องสามารถทนต่อการผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ในช่วงเวลานั้นได้ และสามารถผ่านพ้นช่วงเวลาไปสู่สภาวะคงตัว (Steady State) อย่างมีเสถียรภาพ การส่งพลังงานไฟฟ้าในระดับสูง ความรุนแรงที่เกิดจากฟอลต์ในช่วงชั่วครู่ก็มีสูงตามไปด้วย ดังนั้นในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามภาวะแบบออนไลน์ (On-line) จึงมีความจำเป็นต้องนำการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่แบบออนไลน์ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้าสูงที่สุดบนข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์นั่นเอง

แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ในอดีตที่ผ่านมาเป็นแบบออฟไลน์ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่โดยวิธีทางโดเมนทางเวลา และปัจจุบันมีการพัฒนาแนวทางหรือวิธีเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่หลายแนวทาง เช่น การปรับปรุงวิธีอินทิเกรตให้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการวิเคราะห์ทางโดเมนเวลา การวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์ตรง (Direct Method) เทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบ (Pattern Recognition Technique) การวิเคราะห์โดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) และการวิเคราะห์โดยใช้ระบบเครือข่ายประสาท (Neural Network) เป็นต้น[2] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์โดยวิธีดั้งเดิม คือวิธีทางโดเมนทางเวลาซึ่งมีลักษณะการเพิ่มของขั้นเวลาในกระบวนการจำลองสภาวะชั่วครู่ของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ก็ยังเป็นวิธีที่มีความนิยมมาก แต่เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลามาก ความต้องการใช้งานในแบบออนไลน์นั้นจึงต้องใช้วิธีอื่นที่มีใช้เวลาคำนวณน้อยลงสำหรับการวิเคราะห์ที่ทดแทน วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือวิธี แนวทางการวิเคราะห์พลังงาน (Energy Approach)[2] ซึ่งจัดเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้าโดยวิธีตรง จุดเด่นของวิธีนี้คือ ไม่มีการอินทิเกรตระบบหลังการกำจัดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะสามารถลดเวลาในการคำนวณลงอย่างมาก ทั้งยังไม่มีผลต่อการผิดพลาดในการหาเวลาวิกฤตในการกำจัดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นค่าที่จำเป็นมากในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้ากำลัง

ฟังก์ชันพลังงานผู้คิดค้นคือ ไลออปูนอฟ (Lyapunov) นักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย แต่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยใช้ฟังก์ชันพลังงานนั้นผู้ที่เริ่มใช้แนวคิดนี้คนแรกคือ วาย โอลูระ[3] ซึ่งได้เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยวิธีทางโดเมนเวลา แนวทางการคำนวณเสถียรภาพชั่วครู่โดยฟังก์ชันพลังงานนั้นได้ต้องทำการหาจุดพลังงานวิกฤตที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ ณ จุดนี้จะต้องมีกระบวนการหามาโดยให้มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบโดเมนทางเวลา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธี Potential Energy Boundary Surface หรือ PEBS มาใช้ในการหาจุดพลังงานวิกฤต เนื่องจากเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการคำนวณที่ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งวิธีการนี้ได้ใช้กับระบบทดสอบ ระบบไฟฟ้า 3 และ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้เทียบกับโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่โดยวิธีทางโดเมนเวลา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีโดเมนทางเวลาและวิธีฟังก์ชันพลังงาน
2. วิเคราะห์เปรียบเทียบผลของวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวโดยวิธีโดเมนทางเวลาและวิธีฟังก์ชันพลังงาน
3. เพื่อเป็นการพัฒนาการคำนวณให้ใช้ได้กับงานออนไลน์
4. เพื่อใช้เป็นพื้นฐานของการศึกษาขั้นสูงต่อไป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม
2. พิจารณาระบบไฟฟ้าโดยไม่รวมผลของอุปกรณ์ป้องกันใดๆ
3. ใช้แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าเป็นแบบความต้านทานคงที่

1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีของเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาทฤษฎีเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีวิธีฟังก์ชันพลังงาน
3. พัฒนาโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวโดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน
4. ทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบมาตรฐาน
5. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย เรียบเรียงผลงาน พิมพ์ผลงานและจัดเข้ารูปเล่ม เพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับงานแบบออนไลน์
2. เป็นต้นแบบของการพัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน
3. เป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในขั้นสูงต่อไป

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเป็นบทต่างๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานในแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังวิธีโดเมนทางเวลา

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานในแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังวิธีฟังก์ชันพลังงาน

บทที่ 4 เป็นผลของศึกษาจากการทดสอบกับระบบตัวอย่าง ทำการเปรียบเทียบผลกันระหว่างสองแนวทางวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว

บทที่ 5 เป็นสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 6 ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีโดเมนทางเวลา

การศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยวิธีโดเมนทางเวลานั้นเป็นวิธีที่ใช้มาดั้งเดิม [3] เพราะเป็นแนวคิดที่มีพื้นฐานมาจากสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แนวทางการวิเคราะห์ลักษณะนี้เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางที่มีในปัจจุบัน แต่เนื่องด้วยในกระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวโดยวิธีโดเมนทางเวลาต้องอาศัยการอินทิเกรตสมการพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสมการดังกล่าวไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ต้องมีเทคนิคการคำนวณต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้กับสมการเหล่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เสถียรภาพลักษณะนี้ใช้เวลาคำนวณมาก และค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดฟอลต์เพื่อให้ระบบยังมีเสถียรภาพโดยวิธีทางโดเมนเวลานั้นไม่สามารถหาได้โดยตรง ต้องอาศัยการลองผิดลองถูก [3] ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีนี้ในการที่จะใช้กับงานวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบแบบออนไลน์ จึงทำให้มีการศึกษาแนวทางอื่นที่มีความเร็วในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวถึงในบทที่ 3 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีโดเมนทางเวลาก็นับเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการเข้าใจหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากทฤษฎีหรือแนวทางการวิเคราะห์แบบใหม่ ๆ นั้นยังมีความเกี่ยวข้องกับวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมนั่นเอง

ในกระบวนการที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำเป็นต้องกำหนดแบบจำลองของระบบไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะแบบจำลองเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงกับสมการพลวัตของระบบไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะมีการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีการกำหนดแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของโหลด และสมการพลวัตของระบบไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวต่อไป

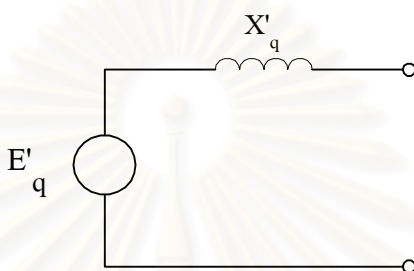
2.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสิ่งที่สำคัญคือ สมการพลวัตที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขึ้นกับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยพื้นฐานแล้วการใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมเป็นกรณีที่ย่างที่สุดในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งข้อจำกัดของแบบจำลองนี้คือสามารถใช้ได้เพียงช่วงชั่วคราวในรอบแรกของการแกว่งของโรเตอร์เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามใน

ช่วงเวลาการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถยอมรับได้เพราะช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในระดับเดียวกัน [3]

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้น ตั้งอยู่บนข้อสมมุติฐานดังต่อไปนี้ [3]

1. กำลังทางกลทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่
2. ไม่รวมผลของการหน่วง (Damping) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ช่วงเวลาชั่วคราวดังกล่าวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า EMF คงที่
4. มุมของโรเตอร์แทนด้วยมุมของแรงดัน



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2 แบบจำลองของโหลด

ในแบบจำลองแบบดั้งเดิมนั้นแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ หรือแอดมิตแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากสถานะเริ่มต้นของระบบ และกำหนดให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าคงที่ในช่วงชั่วคราว พิจารณาโหลดที่บัส k ในกรณีก่อนการรบกวนกำหนดให้เป็นแรงดัน V_k และมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเป็น P_{Lk} และ Q_{Lk} ตามลำดับ ดังนั้นจะได้แอดมิตแตนซ์สมมูลของโหลดดังนี้

$$P_{Lk} + jQ_{Lk} = V_k^2(G_{Lk} - jB_{Lk}) \quad (2.1)$$

หรือ

$$G_{Lk} = P_{Lk}/V_k^2 \quad (2.2)$$

$$B_{Lk} = -Q_{Lk}/V_k^2 \quad (2.3)$$

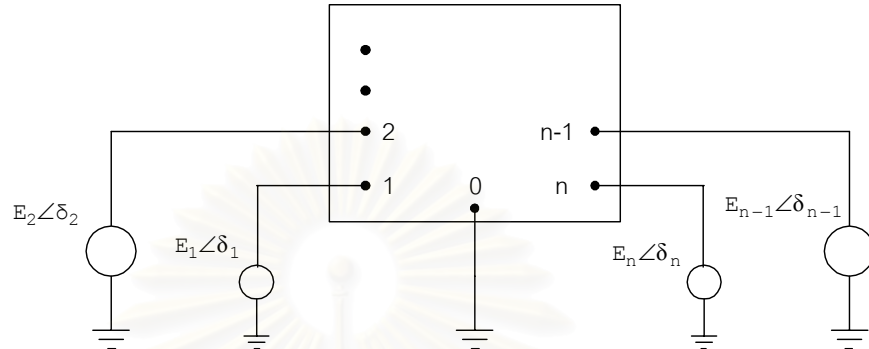
เมื่อ G_{Lk} คือค่าคอนดักแตนซ์ของโหลดที่บัส k

B_{Lk} คือ ค่าซัปเซบแตนซ์ของโหลดที่บัส k

ค่าแอดมิตแตนซ์ของโหลดนี้จะถูกรวมเข้าไปในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบไฟฟ้า

2.3 สมการพลวัตของระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y ซึ่งมีสมาชิกแนวทแยงมุม \bar{Y}_{ii} และสมาชิกนอกแนวทแยงมุม \bar{Y}_{ij}



รูปที่ 2.2 แสดงระบบไฟฟ้าที่โหลดบัสของโหลดเข้ารวมกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{ii} &= Y_{ii} \angle \theta_{ii} = \text{ค่าแอดมิตแตนซ์รวมที่บัส } i \\ &= G_{ii} + jB_{ii} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{ij} &= Y_{ij} \angle \theta_{ij} = \text{ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ระหว่างบัส } i \text{ และ } j \\ &= G_{ij} + jB_{ij} \end{aligned}$$

เวกเตอร์ของกระแสที่บัสหรือกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{I} = \mathbf{YE} \quad (2.4)$$

กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส i คือกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i มีค่าเท่ากับส่วนจริงของผลคูณแรงดันกับคอนจูเกตของกระแสที่บัส i ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P_{ei} &= \text{Re}(\mathbf{E}_i \mathbf{I}_i^*) \\ &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \\ &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{aligned}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

กำหนดให้

$$C_{ij} = E_i E_j B_{ij} \quad (2.6)$$

$$D_{ij} = E_i E_j G_{ij} \quad (2.7)$$

เมื่อ

P_{ei} คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

E_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

Y_{ij} คือ ขนาดของแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i กับ j

θ_{ij} คือ ขนาดมุมของแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i กับ j

δ_i คือ มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

B_{ij} คือ ค่าซัสเซปแตนซ์ระหว่างบัส i กับ j

G_{ij} คือ ค่าคอนดักแตนซ์ระหว่างบัส i กับ j

ในการคำนวณกำลังไฟฟ้า P_{ei} แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ (2.5) จะต้องสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าด้วย จะได้สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (2.8)$$

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - \left[E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right] \quad (2.9)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_R \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

เมื่อ H คือค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i มีหน่วยเป็น MWs / MVA

P_{mi} คือกำลังกล (Prime Mover) ทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ω_i คือ ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

ω_R คือความเร็วของกรอบอ้างอิง (Reference Frame)

2.4 ศูนย์กลางความเฉื่อย

ในสมการ (2.9) ค่ามุมและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเทียบกับกรอบอ้างอิงค่าหนึ่ง เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงกำหนดศูนย์กลางความเฉื่อย (Center of inertia, COI) ขึ้นดังนี้ [4]

$$\delta_o = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (2.11)$$

$$\omega_o = \dot{\delta}_o = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i \quad (2.12)$$

กำหนดให้

$$M_i = 2H_i / \omega_R \quad (2.13)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2.14)$$

เมื่อ δ_o คือมุมศูนย์กลางความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ω_o คือความเร็วศูนย์กลางความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

M_i คือค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

M_T คือค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 สมการพลวัตของระบบไฟฟ้าในรูปศูนย์กลางความเฉื่อย

จากสมการ (2.9) เมื่อนำศูนย์กลางความเฉื่อยใช้จะได้สมการดังนี้

$$M_T \dot{\omega}_o = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) = \sum_{i=1}^n P_i - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} \cong P_{COI}$$

$$\dot{\delta}_o = \omega_o \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

และกำหนดให้มุมและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับ COI ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \delta_i - \delta_o \\ \tilde{\omega}_i &= \dot{\delta}_i - \dot{\delta}_o \end{aligned} \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.13) จะได้

$$\dot{\omega}_o = \frac{P_{COI}}{M_T} \quad (2.18)$$

ทำการจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดโดยเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยดังนี้

$$\begin{aligned} M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= M_i (\dot{\omega}_i - \dot{\omega}_o) \\ &= M_i \dot{\omega}_i - M_i \dot{\omega}_o \\ &= M_i \dot{\omega}_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \end{aligned} \quad (2.19)$$

แทนค่า $M_i = 2H_i / \omega_R$ ลงในสมการ (2.9) และแทนค่า $M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}$ ในสมการ (2.9)

ลงในสมการ (2.17) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยดังนี้

$$\begin{aligned} M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= P_{mi} - P_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \dot{\theta}_i &= \tilde{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.6 การคำนวณพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า

สำหรับการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าตามสมการ (2.20) โดยใช้แบบจำลองระบบเป็นแบบดั้งเดิม นั้นต้องการค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังนี้[4] คือ

- แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด EMF ก่อนเกิดฟอลต์ ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า
- มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์
- กำลังกล (Prime Mover) ทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า
- อิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า

ขั้นตอนการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า EMF และมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

1. จากโพลดิโพล์คำนวณค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการ

$$I_i \angle \varphi_i = (P_{Gi} - jQ_{Gi}) / V_i \angle (-\beta_i) \quad (2.21)$$

เมื่อ I_i คือขนาดกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

φ_i คือมุมกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

P_{Gi} คือกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

Q_{Gi} คือกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

V_i คือขนาดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

β_i คือมุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

2. จากค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $I_i \angle \varphi_i$ ทำการคำนวณหาขนาดแรงดันไฟฟ้า Electromotive Force (E_i) และมุมโรเตอร์ δ_i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการ

$$E_i \angle \delta_i = V_i \angle \beta_i + jX'_{di} \cdot I_i \angle \varphi_i \quad (2.22)$$

เมื่อ E_i คือขนาดแรงดันไฟฟ้า Electromotive Force ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

δ_i คือมุมแรงดันไฟฟ้า Electromotive Force ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

X'_{di} คือ ทราจันเชียนรีแอดแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

3. กำหนดให้ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\omega_i = \omega_s \quad (2.23)$$

เมื่อ ω_i คือความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

ω_i คือความเร็วซิงโครนัสของระบบ

นั่นคือความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดมีค่าเท่ากับความเร็วของระบบหรือความเร็วซิงโครนัส

4. กำลังกล (Prime Mover) ทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_{mi} ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า ค่ากำลังกลสามารถคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดเพราะที่สภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังกลเท่ากับกำลังไฟฟ้า จากสมการ (2.5) จะได้

$$P_{mi} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.24)$$

5. อิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณแอดมิตแตนซ์เมื่อทราบแรงดันที่บัสของโหลดจากการหาโหลดโพลาร์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์ ในกรณีที่โหลดเป็นแบบค่าแอดมิตแตนซ์คงที่จากความสัมพันธ์ตามสมการ

$$G_{Lk} = P_{Lk} / V_k^2 \quad (2.25)$$

$$B_{Lk} = - Q_{Lk} / V_k^2 \quad (2.26)$$

2.6 แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยวิธีทางโดเมนเวลา

ในแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีทางโดเมนเวลาสามารถทำได้โดยการจำลอง (Simulation) ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในขั้นตอนหลักมีดังต่อไปนี้ [4]

1. การจำลองระบบก่อนเกิดฟอลต์ ซึ่งในรายละเอียดแบบจำลองของระบบนั้นแทนด้วยสมการสถานะ (State Equation) ของสมการพลวัตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขั้นตอนนั้นจะเริ่มจากการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเกิดฟอลต์เป็นไปเพื่อนำค่าต่างๆ เป็นค่าเริ่มต้นของการจำลองระบบขณะเกิดฟอลต์
2. การจำลองระบบขณะที่ระบบเกิดฟอลต์ การจำลองในกระบวนการนี้จะทำสมมุติให้ระบบเกิดความผิดปกติในระยะเวลาใดๆ เพื่อเป็นการจำลองเทียบกับการเกิดฟอลต์ในสภาวะจริง แบบจำลองของระบบในขณะนี้มีก็มีความสำคัญเช่นกัน กล่าวคือ เพื่อที่จะเลียนแบบระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัตินั้นโดยที่สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์หรือเงื่อนไขต่างๆ นั้น สามารถแทนแบบจำลองของระบบไฟฟ้าเพื่อให้มีความเหมาะสมกับช่วงเวลาการตอบสนองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจริง เช่น แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของโหลด แบบจำลองของต้นกำลัง เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เวลาสุดท้ายของการเกิดฟอลต์จะเป็นค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเวลากำจัดฟอลต์นั่นเอง
3. การจำลองระบบหลังจากการกำจัดฟอลต์ ในขั้นตอนนี้จะทำการจำลองระบบไฟฟ้าจนกระทั่งระบบไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะสุดท้ายซึ่งอาจจะเป็นไปได้ทั้งกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังยังคงมีเสถียรภาพและระบบไฟฟ้ากำลังไม่มีเสถียรภาพ ในการจำลองนี้จะนำเอาค่าพารามิเตอร์ที่เวลากำจัดฟอลต์มาใช้เป็นค่าเริ่มต้น

จากกระบวนการดังกล่าวจะพบว่าในการวิเคราะห์ว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพชั่วคราวหรือไม่นั้น ต้องทำการลองผิดลองถูกในส่วนของการจำลองขณะเกิดฟอลต์ โดยการลองเปลี่ยนค่าเวลากำจัดฟอลต์นั่นเอง

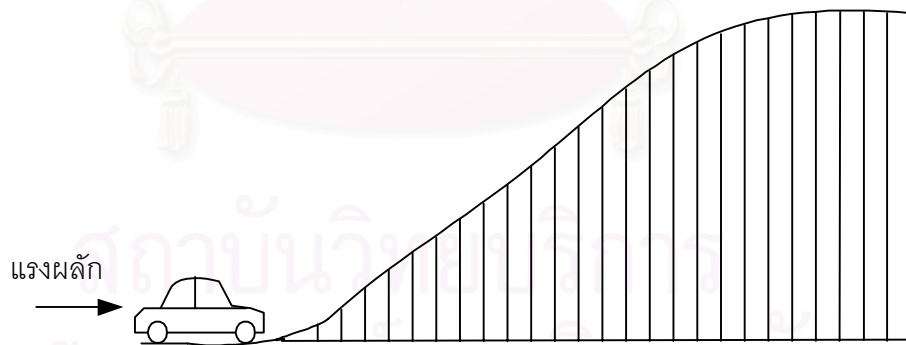
บทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว โดยวิธีฟังก์ชันพลังงาน

3.1 หลักการเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวโดยวิธีฟังก์ชันพลังงานนั้น ใช้หลักการพลังงานของระบบที่จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นซึ่งเรียกพลังงานที่จุดนั้นว่าพลังงานวิกฤต เมื่อทราบพลังงานวิกฤตแล้วจึงสามารถคำนวณย้อนกลับมาเป็นค่าเวลาวิกฤตที่ระบบจะทำการสะสมพลังงานจนถึงค่านี้ได้ แสดงว่าเราสามารถทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในอุปกรณ์ป้องกันให้ระบบไฟฟ้ากำลังให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพชั่วคราวได้

ในแนวทางที่อธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราวโดยวิธีฟังก์ชันพลังงานนั้น พิจารณารูปที่ 3.1 สามารถเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่อยู่ตำแหน่งต่ำสุดของเนินเขาด้วยสภาวะหยุดนิ่ง แล้วทำการผลักดันด้วยพลังงานค่าหนึ่ง ถ้าหากว่าพลังงานที่ผลักดันมีค่ามากพอรถยนต์ก็จะสามารถผ่านเนินเขาไปและตกลงมาฝั่งได้ซึ่งกรณีกำหนดให้เป็นกรณีการไม่มีเสถียรภาพ เช่นกันหากผลักรถยนต์ด้วยพลังงานที่น้อยกว่านั้นรถยนต์จะเคลื่อนที่ไม่ถึงเนินเขาและจะถอยกลับลงมาที่พื้นล่างเช่นเดิม



รูปที่ 3.1 แสดงการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านเนินเขาเมื่อได้รับแรงผลักดัน

จากตัวอย่างที่กล่าวไปแล้วนั้นหากมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เช่น น้ำหนักของรถยนต์ ความสูงของเนินเขา ขนาดของแรงที่กระทำต่อรถยนต์ ผลลัพธ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นสามารถคำนวณหาจาก 2 กรณี คือ

- ทำการคำนวณและตรวจสอบเมื่อเวลาผ่านไปแต่ละช่วงเวลานั้นรถยนต์มีตำแหน่งอยู่ ณ ที่ใด

- ทำการคำนวณหาพลังงานที่จะต้องผลิตใส่รถยนต์ และเปรียบเทียบกับพลังงานที่จะทำให้รถยนต์ข้ามเนินเขาไปได้

ในตัวอย่างทีกล่าวไปนั้นเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงแนวทางในการคำนวณหาเสถียรภาพระหว่างวิธีทางโดเมนเวลา กับวิธีการวิเคราะห์โดยฟังก์ชันพลังงาน

3.2 ฟังก์ชันพลังงาน

ฟังก์ชันพลังงาน[6] คือ ฟังก์ชันที่แสดงค่าถึงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว สมการฟังก์ชันพลังงานสามารถพิสูจน์ได้โดยตรงจากสมการพลวัตของระบบไฟฟ้า พิจารณาสมการพลวัตของระบบไฟฟ้าต่อไปนี้

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (3.1)$$

$$\dot{\theta}_i = \dot{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

สมการพลวัตของระบบไฟฟ้านี้เป็นสมการพลวัตของระบบไฟฟ้าหลังจากการกำจัดกรอบกวนออกแล้ว ในการพิสูจน์ฟังก์ชันพลังงานของระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- ทำการคูณสมการสมการ (3.4) ด้วย $\dot{\theta}_i$ และทำการรวมผลบวกจะได้

$$\sum_{i=1}^n \left[M_i \dot{\omega}_i - P_{mi} + P_{ei} + \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \right] \dot{\theta}_i \quad (3.2)$$

- แทนค่าของ P_{ei} จากสมการ (2.5) ซึ่งอยู่ในรูปของการรวมผลบวก

$$\sum_{i=1}^n \left[M_i \dot{\omega}_i - P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_{ij} \sin \theta_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n D_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \right] \dot{\theta}_i \quad (3.3)$$

- จากความสัมพันธ์ $C_{ij} = C_{ji}$ และ $D_{ij} = D_{ji}$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ จะได้

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_{ij} \sin \theta_{ij} \dot{\theta}_i = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \sin \theta_{ij} \dot{\theta}_{ij} \quad (3.4)$$

และ

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n D_{ij} \cos \theta_{ij} \dot{\theta}_i = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \theta_{ij} (\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_j) \quad (3.5)$$

- แทนสมการ (3.7) และสมการ (3.8) ลงในสมการ (3.6) และทำการอินทิเกรตผลลัพธ์เทียบกับเวลาที่ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ t^s ซึ่งค่าความเร็วเชิงมุม $\dot{\omega}(t^s) = 0$ และค่ามุมสมดุลเสถียรภาพโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังกำจัดความผิดพลาด $\theta(t^s) = \theta^{s2}$ จะได้

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^{s2}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^{s2}) - \int_{\theta_i^{s2} + \theta_j^{s2}}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3.6)$$

จะพบว่าผลการอินทิเกรตเทอมสุดท้ายของสมการ (3.6) มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจาก

$$\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \dot{\theta}_i = P_{COI} \sum_{i=1}^n \frac{M_i \dot{\theta}_i}{M_T} = 0 \quad (3.7)$$

3.3 การอธิบายส่วนประกอบของฟังก์ชันพลังงาน

ในส่วนประกอบของฟังก์ชันพลังงานสามารถอธิบายในเชิงกายภาพได้ดังนี้ การอธิบายฟังก์ชันพลังงานซึ่งเป็นผลของการอินทิเกรตสมการพลวัตของระบบไฟฟ้านั้นเทียบกับจุดสมดุลเสถียรภาพหลังกำจัดความผิดพลาด สามารถอธิบายสมการ (3.6) แยกเป็นส่วนๆ ส่วนประกอบแรกวิเคราะห์ได้ตามนี้

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\omega_i - \omega_o)^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\omega_i^2 - 2\omega_i \omega_o + \omega_o^2) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \omega_o \sum_{i=1}^n M_i \omega_i + \omega_o^2 \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \omega_o (M_T \omega_o) + \frac{1}{2} M_T \omega_o^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \frac{1}{2} M_T \omega_o^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

นั่นคือส่วนแรกนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของโรเตอร์เครื่องกำเนิดสัมพันธ์กับศูนย์กลาง ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของของโรเตอร์เครื่องกำเนิดทั้งหมดในระบบไฟฟ้าลด้วยพลังงานจลน์ศูนย์กลางความเฉื่อยของระบบไฟฟ้า และในส่วนประกอบที่สองของสมการ (3.6) สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^{s2}) = \sum_{i=1}^n P_i (\delta_i - \delta_i^{s2}) - \left[\sum_{i=1}^n P_i \right] (\delta_o - \delta_o^{s2}) \quad (3.9)$$

จากสมการข้างบนสำหรับส่วนที่สองของสมการ (3.6) นั้นแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ทั้งหมดในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดในระบบไฟฟ้าสัมพันธ์กับศูนย์กลางความเฉื่อย ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานศักย์ทั้งหมดในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดในระบบไฟฟ้าลกับพลังงานศักย์ศูนย์กลางความเฉื่อยของระบบไฟฟ้า และส่วนประกอบที่สามของสมการ (3.6) ซึ่งมีส่วนย่อยสองส่วนสำหรับส่วนแรกที่เป็นเทอมผลรวมนั้น

$$C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^{s2})$$

ส่วนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงของการสะสมพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายส่งระหว่างบัส i กับ j และส่วนที่สองที่มีเทอมของการอินทิเกรตอยู่นั้น

$$\int_{\theta_i^{s2} + \theta_j^{s2}}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)$$

ส่วนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานของสายส่งระหว่างบัส i กับ j

3.4 การประเมินเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราวโดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ (PEBS)

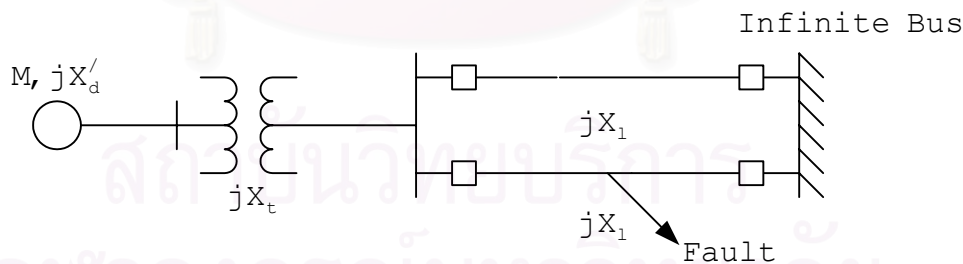
การประเมินเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราวโดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์มีหลักการคือ ณ จุดสมดุลเสถียรภาพคงตัวของระบบหลังกำจัดฟอลต์เป็นจุดที่มีพลังงานศักย์ต่ำสุดรอบๆ จุดสมดุลนี้กำหนดให้เป็นผิวของระดับพลังงานศักย์หลายมิติ จำนวนมิติเท่ากับจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าพิจารณาจากพลังงานขณะกำจัดฟอลต์มีค่าไม่เกินพลังงานวิกฤต ดังนั้นในวิธีการนี้จะทำการหาค่าพลังงานศักย์สูงสุดที่เกิดขึ้นครั้งแรกเพื่อเป็นพลังงานวิกฤตในการกำจัดฟอลต์ วิธีนี้นำเสนอโดย คากิโมโตะ และอาเทย์ [6] วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์นี้ต้องการเพียงการเปลี่ยนแปลงโรเตอร์และความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วง

การเกิดฟอลต์สำหรับการคำนวณหาพลังงานวิกฤตที่จะเป็นค่าพลังงานมากที่สุดของระบบไฟฟ้าที่จะสามารถเกิดขึ้นขณะเกิดฟอลต์

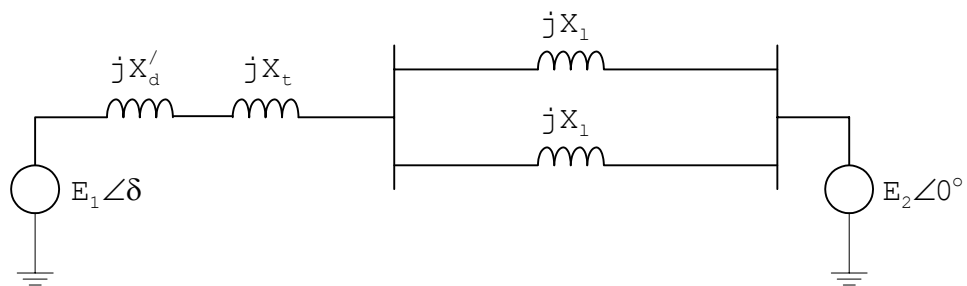
3.4.1 วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ (PEBS) กับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์ในรูปที่ 3.2 สายส่งแบบขนานมีค่ารีแอกแตนซ์ในแต่ละเส้นเท่ากับ X_1 ต่ออยู่กับหม้อแปลงที่มีค่ารีแอกแตนซ์ X_t และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่าทรานเซียนรีแอกแตนซ์ X'_d กำหนดให้บัสอนันต์มีแรงดัน $E_2 \angle 0^\circ$ กำหนดให้เกิดฟอลต์แบบสามเฟสที่กึ่งกลางสายส่งเส้นล่าง ณ เวลา $t = 0$ และกำจัดฟอลต์โดยการปลดสายส่งที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ ณ เวลา $t = t_{cr}$ โดอะแกรมสายเดี่ยวของระบบก่อนเกิดฟอลต์ขณะเกิดฟอลต์ และหลังกำจัดฟอลต์แสดงในรูปที่ 9.4 ถึงและ 9.6 ค่าของกำลังไฟฟ้า P_e ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ ขณะเกิดฟอลต์ และหลังกำจัดฟอลต์ มีค่าเท่ากับ $\frac{E_1 E_2}{X^I} \sin \delta, \frac{E_1 E_2}{X^F} \sin \delta$ และ $\frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta$ ตามลำดับ เมื่อ X^I คือค่ารีแอกแตนซ์สำหรับระบบก่อนเกิดฟอลต์ และ X คือค่ารีแอกแตนซ์สำหรับระบบหลังกำจัดฟอลต์

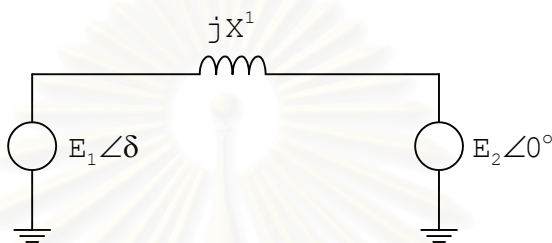
ระบบในรูปที่ 3.2 คำนวณหาค่า X^F ค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างบัสเครื่องกำเนิดกับบัสอนันต์สำหรับระบบขณะเกิดฟอลต์นั้นใช้การแปลง $Y - \Delta$ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทำการกำหนดหมายเลขบัสให้กับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.5 และกำหนดให้บัส 4 เป็นบัสเกิดฟอลต์ ค่าของ $X_g = X'_d + X_t$



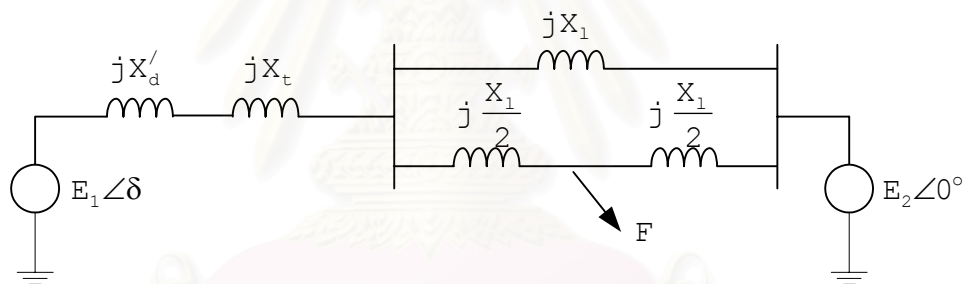
รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



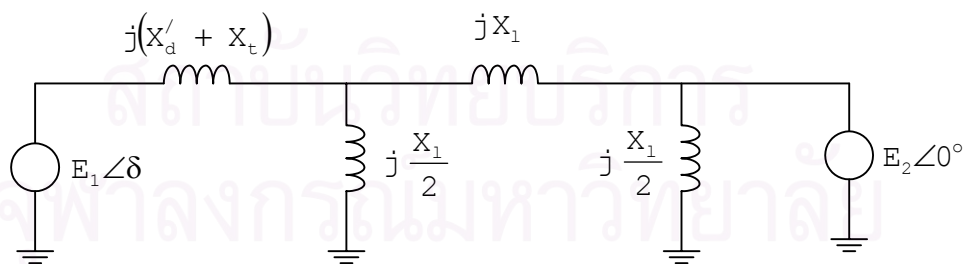
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรก่อนเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



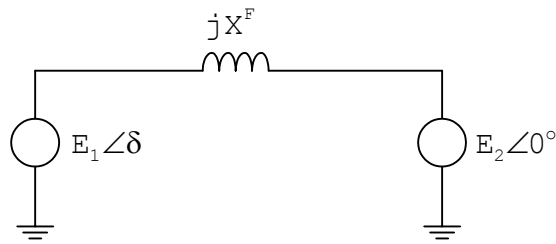
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรสมมูลก่อนเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



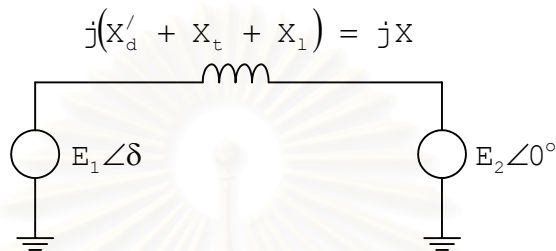
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



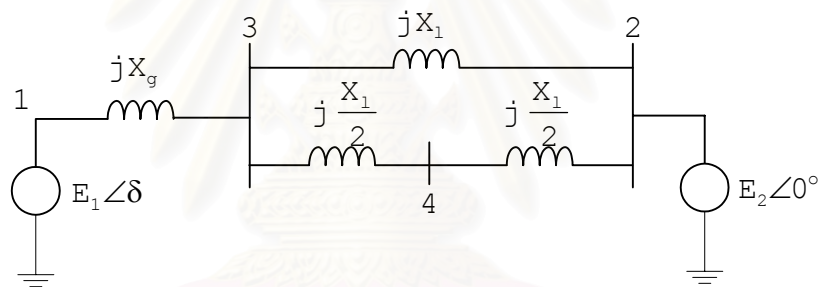
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสมมูลขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลหลังกำจัดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรขณะเกิดฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์

พิจารณารูปที่ 3.9 พบว่าบัสที่มีการจ่ายกระแสคือบัส 1 2 และ 4 เขียนสมการของโหนดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} & 0 \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ 0 & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

กำหนดให้บัส 4 เกิดฟอลต์ด้วยขนาดอิมพีแดนซ์เท่ากับศูนย์จะได้ขนาดแรงดันที่บัส 4 เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถลดแถวที่ 4 และคอลัมน์ที่ 4 ได้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) สามารถกำจัดโหนดที่ 3 โดยการแสดงแรงดัน E_3 ในรูปของแรงดัน E_1 และ E_2 จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} - Y_{13}Y_{33}^{-1}Y_{31} & -Y_{13}Y_{33}^{-1}Y_{32} \\ -Y_{23}Y_{33}^{-1}Y_{31} & Y_{22} - Y_{23}Y_{33}^{-1}Y_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

X^F สามารถคำนวณจากค่า Off-diagonal

$$\frac{1}{jX^F} = Y_{13}Y_{33}^{-1}Y_{32} \quad (3.11)$$

ซึ่ง

$$Y_{13}Y_{33}^{-1}Y_{32} = \left(\frac{-1}{jX_g} \right) \left(\frac{1}{jX_g} + \frac{1}{jX_1} + \frac{1}{j\frac{X_1}{2}} \right)^{-1} \left(\frac{-1}{jX_1} \right)$$

$$\therefore X^F = X_1 + 3X_g \quad (3.11)$$

3.4.2 พลังงานสำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อบัสบนันต์

สำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อบัสบนันต์สามารถเขียนสมการพลวัตได้ดังนี้

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e^{\max} \sin \delta \quad (3.12)$$

$$\text{เมื่อ } P_e^{\max} = \frac{E_1 E_2}{X}$$

δ คือมุมของแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดเทียบกับบัสบนันต์และ $\frac{d\delta}{dt} = \omega$ คือความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดสัมพันธ์กับบัสบนันต์จากสมการ (3.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

– $\frac{\partial V_{PE}}{\partial \delta}$ เมื่อกำหนดให้

$$V_{PE}(\delta) = -P_m \delta - P_e^{\max} \cos \delta \quad (3.13)$$

คุณสมการ (3.12) ด้วย $\frac{d\delta}{dt}$ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left[\frac{M}{2} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + V_{PE}(\delta) \right] &= 0 \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{M}{2} \omega^2 + V_{PE}(\delta) \right] &= 0 \\ \frac{d}{dt} [V(\delta, \omega)] &= 0\end{aligned}\quad (3.14)$$

นั่นคือจะได้ว่าฟังก์ชันพลังงานเท่ากับ

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M\omega^2 + V_{PE}(\delta) \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.14) แสดงว่าปริมาณ $V(\delta, \omega)$ เป็นค่าคงที่ และค่าของเสถียรภาพสมดุลสำหรับสมการพลวัตหาได้จากการแก้สมการ

$$P_m - P_e^{\max} \sin \delta = 0 \quad (3.16)$$

$$\text{จะได้ } \delta^s = \sin^{-1} \left(\frac{P_m}{P_e^{\max}} \right)$$

จุดนี้เป็นจุดสมดุลเสถียรภาพ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยจุดสมดุลไม่เสถียรภาพสองจุดคือ

$$\delta^u = \pi - \delta^s \text{ และ } \delta^u = -\pi - \delta^s$$

เรากำหนดให้ $V_{PE} = 0$ ที่จุด $\delta = \delta^s$ แทนจุดนี้ในสมการ (3.15) จะได้

$$V_{PE}(\delta, \delta^s) = -P_m(\delta - \delta^s) - P_e^{\max}(\cos \delta - \cos \delta^s) \quad (3.17)$$

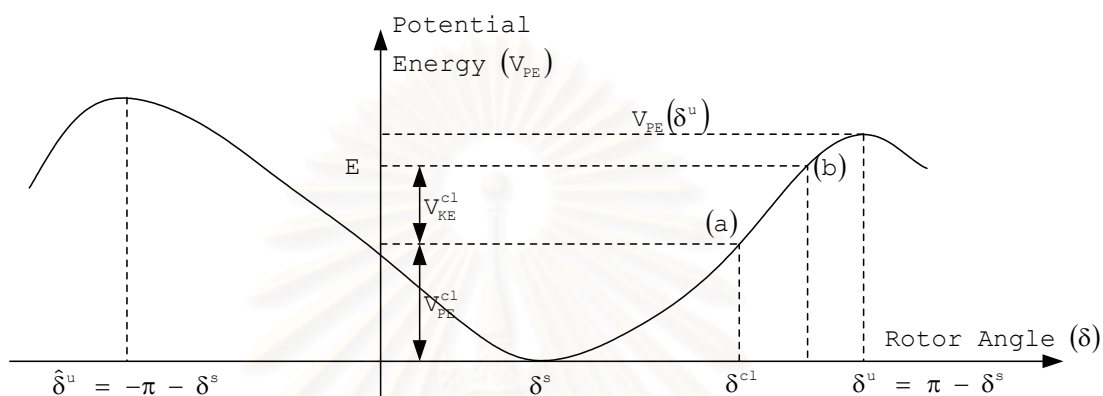
นั่นคือสามารถเขียนสมการพลังงานใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}V(\delta, \omega) &= \frac{1}{2} M\omega^2 - P_m(\delta - \delta^s) - P_e^{\max}(\cos \delta - \cos \delta^s) \\ &= V_{KE} + V_{PE}(\delta, \delta^s)\end{aligned}\quad (3.18)$$

เมื่อ $V_{KE} = \frac{1}{2} M\omega^2$ คือพลังงานจลน์

$V_{PE}(\delta, \delta^s) = -P_m(\delta - \delta^s) - P_e^{\max}(\cos \delta - \cos \delta^s)$ คือพลังงานศักย์

จากสมการ (3.14) ที่กล่าวว่า เป็นค่าคงที่แสดงว่าผลรวมของพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์เป็นค่าคงที่ตลอดเวลาเมื่อฟอลต์ถูกกำจัดแล้ว จะได้ว่าระบบมีการอนุรักษ์พลังงาน[4] ค่าของ $V(\delta, \omega)$ ที่คำนวณ ณ เวลา $t = t_{cr}$ เป็นค่าของพลังงานรวมของระบบ E พลังงานนี้จะถูกดูดซับเข้าไปในระบบอีกครั้งหากระบบมีเสถียรภาพ ค่าพลังงานจลน์ V_{KE} มีค่าเป็นบวกเสมอและเป็นผลต่างของพลังงานรวม E กับพลังงานศักย์ V_{PE}



รูปที่ 3.10 แสดงขอบเขตพลังงานศักย์สำหรับการพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพ

ที่จุดสมดุลเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์ $\delta = \delta^s$ กำหนดให้พลังงานศักย์และพลังงานจลน์มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจาก $\omega = 0$ และ $\delta = \delta^s$ ณ เวลากำจัดฟอลต์ $t = t_{cr}$ กำหนดให้มุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\delta = \delta^{c1}$ และความเร็วของโรเตอร์เท่ากับ ω^{c1} จะได้

$$\begin{aligned} V^{c1}(\delta^{c1}, \omega^{c1}) &= \frac{1}{2} M\omega^{c1^2} - P_m(\delta^{c1} - \delta^s) - P_e^{\max}(\cos \delta^{c1} - \cos \delta^s) \\ &= V_{KE}^{c1} + V_{PE}^{c1} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ค่าของพลังงานศักย์ V_{PE} สูงสุดที่จะทำให้ระบบยังมีสมดุลเกิดขึ้นสองค่าที่จุดสมดุลไม่เสถียรภาพ $\delta^u = \pi - \delta^s$ และ $\delta^u = -\pi - \delta^s$ แต่สำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสบนนั้นระบบจะสูญเสียเสถียรภาพโดยผ่านจุด $\delta^u = \pi - \delta^s$ ก่อนเสมอ การพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบ SIMB นั้นพิจารณาจากการที่พลังงานรวมที่กำจัดฟอลต์นั้นมีค่าไม่เกินค่าพลังงานศักย์สูงสุดนั่นเอง โดยที่ค่าพลังงานสูงสุดหาได้จาก

$$V_{PE}(\delta^u) = -P_m(\pi - 2\delta^s) + 2P_e^{\max} \cos \delta \quad (3.19)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับหลักการของจุดเสถียรภาพเมื่อเกิดการรบกวนระบบนั้น สามารถใช้ความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\partial v_{PE}(\delta)}{\partial \delta} \quad (3.20)$$

สมการ (3.20) สามารถกระจายเทอมทางขวามือโดยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's Series) รอบจุดสมดุล δ^* กำหนดให้ $\delta = \delta^* + \Delta\delta$ จะได้

$$M \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = \left. \frac{\partial^2 v_{PE}(\delta)}{\partial \delta} \right|_{\delta^*} \Delta\delta \quad (3.21)$$

หรือ

$$M \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \left. \frac{\partial^2 v_{PE}(\delta)}{\partial \delta} \right|_{\delta^*} \Delta\delta = 0 \quad (3.22)$$

ถ้า $\left. \frac{\partial^2 v_{PE}}{\partial \delta^2} \right|_{\delta^*} < 0$ ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ $\left. \frac{\partial^2 v_{PE}}{\partial \delta^2} \right|_{\delta^*} > 0$ ระบบจะแกว่งอยู่รอบ δ^* และมีเสถียรภาพ[4] หลักการฟังก์ชันพลังงาน และวิธีพิจารณาของไลออปูนอฟ[4]มีความเหมือนกันในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์ แต่สำหรับระบบที่มีหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นระบบจะไม่ใช่ระบบที่อนุรักษ์(Conservation System)พลังงาน กล่าวคือลักษณะของผลรวมของพลังงานรวมที่ได้จากพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์มีค่าไม่คงที่ ซึ่งการคำนวณหาค่าพลังงานวิกฤตในแต่และวิธีสำหรับหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเป็นวิธีที่ประมาณพลังงานเพื่อใช้ในการหาขอบเขตของพลังงานเพื่อกำหนดเสถียรภาพของระบบนั่นเอง

พิจารณาระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์มีสมการหลังกำจัดพอลต์ดังนี้

$$0.2 \frac{d^2\delta}{dt^2} = 1 - 2 \sin \delta - 0.02 \frac{d\delta}{dt}$$

$$\text{จะได้จุดสมดุล } \delta^s = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2}\right) \therefore \delta^s = \frac{\pi}{6} \quad \delta^u = \pi - \frac{\pi}{6} = \frac{5\pi}{6} \text{ และ } \delta^u = -\frac{7\pi}{6}$$

วิเคราะห์ระบบรอบๆ จุดสมดุล "o" จะได้

$$0.2 \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -2 \cos \delta^\circ \Delta \delta - 0.02 \frac{d \Delta \delta}{dt}$$

เขียนสมการให้อยู่ในรูปของ State-Space โดยกำหนดตัวแปรคือ $\Delta \delta$ และ $\Delta \dot{\omega} = \Delta \dot{\delta}$ จะได้

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10 \cos \delta^\circ & -0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$$

เมื่อแทน $\delta^\circ = \delta^s = \frac{\pi}{6}$

จะได้ค่า Eigenvalue ของเมทริกซ์คือ $\lambda_{1,2} = -0.05 \pm j2.942$ เมื่อแทน $\delta^\circ = \delta^u$ หรือ δ^u จะได้ค่า Eigenvalue ของเมทริกซ์คือ $\lambda_1 = 2.993$ และ $\lambda_2 = -2.893$ ซึ่งเป็นระบบไม่มีเสถียรภาพ

จากระบบในตัวอย่างสามารถสร้างฟังก์ชันสำหรับระบบที่ไม่การหน่วง โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การหน่วง $\frac{d\delta}{dt}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ กำหนดให้

$$M = 0.2 \quad P_m = 1 \quad P_e^{\max} = 2 \quad \text{และ} \quad \delta^s = \frac{\pi}{6}$$

สามารถสร้างฟังก์ชันพลังงานได้

$$\begin{aligned} v(\delta, \omega) &= \frac{1}{2} (0.2)\omega^2 - 1\left(\delta - \frac{\pi}{6}\right) - 2\left(\cos \delta - \cos \frac{\pi}{6}\right) \\ &= 0.1\omega^2 - \left(\delta - \frac{\pi}{6}\right) - 2(\cos \delta - 0.866) \end{aligned}$$

$$V_{PE}(\delta, \delta^s) = -\left(\delta - \frac{\pi}{6}\right) - 2(\cos \delta - 0.866)$$

$$\frac{\partial^2 V_{PE}(\delta, \delta^s)}{\partial \delta} = 2 \cos \delta$$

ที่ $\delta = \delta^s = \frac{\pi}{6}$ สามารถพิจารณาได้ว่า $2 \cos \delta > 0$ ดังนั้น δ^s เป็นจุดสมดุลเสถียรภาพ

สำหรับ $\delta = \delta^u = \frac{5\pi}{6}$ และ $\delta^u = -\frac{7\pi}{6}$ นั้นทำให้ค่าของ $2 \cos \delta < 0$ ซึ่งระบบจะไม่มีเสถียรภาพที่จุดนี้

3.4.3 หลักการพื้นที่เท่ากันในการวิเคราะห์เสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องกับบัสอนันต์

พิจารณาเครื่องไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่ออยู่กับบัสอนันต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 กำหนดให้เครื่องกำเนิดมีแบบจำลองเป็นแบบดั้งเดิม จะได้ว่าสมการพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างี้

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_i - P_m \sin(\delta - \gamma) \quad (3.23)$$

เมื่อ

$M =$ ค่าความเฉื่อยคงที่

P_i, P_m และ γ เป็นค่าคงที่

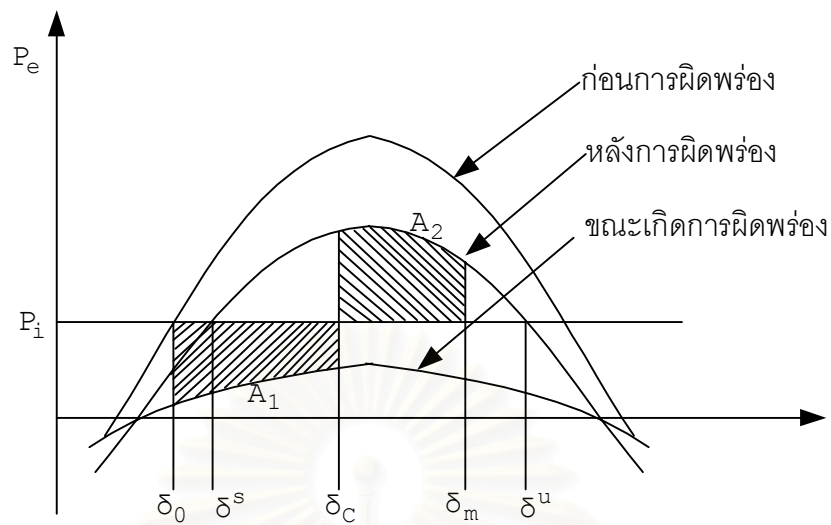
ทำการคูณสมการ (3.23) ทั้งสองข้างด้วย $\frac{d\delta}{dt}$ จากนั้นทำการอินทิเกรตและจาก $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ จะได้ว่า

$$\int M\omega \frac{d\omega}{dt} dt = \int [P_i - P_m \sin(\delta - \gamma)] \frac{d\delta}{dt} dt \quad (3.24)$$

จากการอินทิเกรตสมการ (3.24) จะได้

$$\frac{1}{2} M\omega^2 \Big|_{\omega_1}^{\omega_2} = P_i \delta \Big|_{\delta_1}^{\delta_2} + P_m \cos(\delta - \gamma) \Big|_{\delta_1}^{\delta_2} \quad (3.25)$$

ในการพิจารณาพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการผิดพลาดมารบกวนนั้น จำเป็นต้องดูที่ผลทางพลวัตของระบบหลังการกำจัดความผิดพลาดออกไป โดยที่สภาวะเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง $(\delta_1 = \delta_0, \omega_1 = \omega_0)$ และที่จุดวิกฤตกำจัดความผิดพลาด $(\delta_2 = \delta_c, \omega_2 = \omega_c)$ เราสามารถพิจารณาสมการ(3.25) ได้ดังนี้ ทางด้านซ้ายมือของสมการคือ พลังงานจลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อการผิดพลาดถูกกำจัดออก ซึ่งเป็นพื้นที่ A_1 ในรูปที่ 3.11 ณ ที่จุดเริ่มต้นเป็นจุดกำจัดความผิดพลาด $(\delta_1 = \delta_c, \omega_1 = \omega_c)$ นั้นจะได้ค่ามุมแกว่งมากที่สุดค่าหนึ่ง $(\delta_2 = \delta_m, \omega_2 = \omega_m)$ ซึ่งเป็นพื้นที่ A_2 ในรูปที่ 3.11 ณ ที่มุม δ_m ค่าของ ω_m มีค่าเป็นศูนย์หมายความว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ นั่นคือพื้นที่ A_1 และ A_2 ในรูปที่ 3.11 มีค่าเท่ากันนั้น



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมการพิจารณาหลักการพื้นที่เท่ากัน

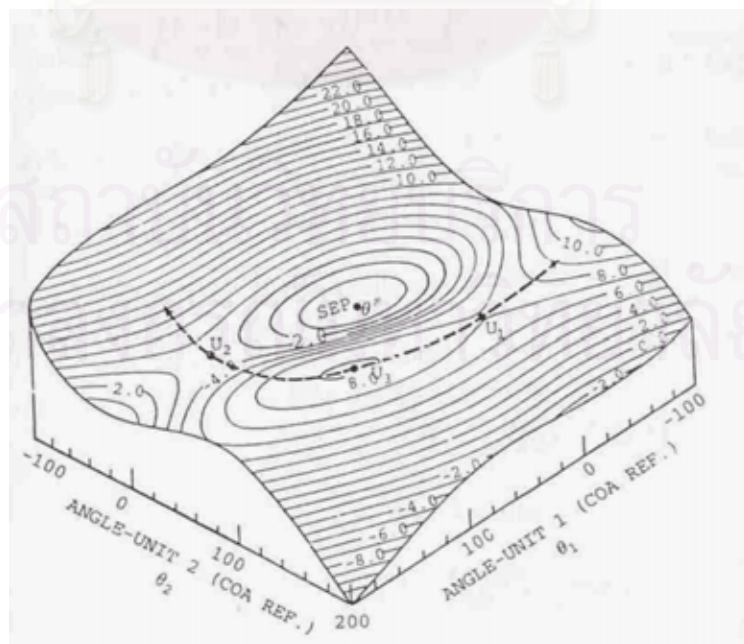
จากรูปที่ 3.11 จะพบว่าขนาดของมุม δ_m ขึ้นอยู่กับพื้นที่ A_1 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ในช่วง δ_0 ถึง δ_c และขนาดของมุม δ_m มีค่ามากที่สุดเท่ากับมุม δ^u ซึ่งเป็นมุมที่โรเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงสามารถลดลงเมื่อกำจัดความผิดปรองออกจากระบบซึ่งเป็นกรณีของการมีเสถียรภาพในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นพื้นที่ที่มากที่สุดของ A_2 จะเกิดขึ้นที่มุม δ_m เท่ากับ δ^u และสามารถอธิบายให้อยู่ในรูปของพลังงานได้ตามนี้ พื้นที่ A_1 คือพลังงานจลน์ทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและพื้นที่ A_2 คือพลังงานศักย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมุมโรเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากการเกิดการผิดปรองนั้นพลังงานจลน์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีค่าพลังงานศักย์มากที่สุดอยู่ค่าหนึ่งที่สามารถรองรับการเปลี่ยนของพลังงานจลน์ได้ ที่ค่าพลังงานสูงสุดค่านี้จะถูกกำหนดให้เป็นค่าพลังงานนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4 วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ (PEBS) กับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง

ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเครื่องต่อกับบัสอนันต์นั้น วิธีการพิจารณาเสถียรภาพโดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์นั้นพิจารณาพลังงานวิกฤต $V_{cr} = V_{PE}(\delta^u)$ ซึ่งจุด δ^u นั้นเป็นจุดสมดุลไม่เสถียรภาพควบคุม (Controlling Unstable Equilibrium Point) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง ตำแหน่งของการเกิดฟลลต์ในระบบมีผลต่อการสูญเสียเสถียรภาพหรือการหลุดซิงโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างกันไป กล่าวคืออาจเป็นการหลุดซิงโครไนซ์จากระบบเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดียว หรืออาจเป็นการหลุดซิงโครไนซ์พร้อมกันหลายเครื่อง สำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องนั้นเมื่อเกิดฟลลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ นั้นจะมีการจัดเป็นกลุ่มของการไม่มีเสถียรภาพ[3] (Mode of Instability) และในแต่ละกลุ่มของการไม่มีเสถียรภาพนั้นจะมีจุดสมดุลไม่มีเสถียรภาพควบคุมเฉพาะของตัวเอง ดังนั้นสำหรับจุดสมดุลเสถียรภาพคงตัวของระบบหลังกำจัดฟลลต์จุดหนึ่งนั้นจะถูกล้อมรอบด้วยจุดสมดุลไม่เสถียรภาพจำนวนมาก ขอบเขตผิวพลังงานศักย์มีมิติของมุมโรเตอร์ที่ซับซ้อนและมีจุดสมดุลไม่เสถียรภาพล้อมรอบจุดสมดุลเสถียรภาพของระบบหลังกำจัดฟลลต์

พิจารณารูปที่ 3.11 แสดงขอบเขตผิวพลังงานศักย์สำหรับระบบ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อแกนอนนั้นเป็นแกนของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด 1 และแกนของโรเตอร์เครื่องกำเนิด 2 เทียบกับมุมศูนย์กลางความเฉื่อย ในแกนตั้งเป็นค่าของพลังงานศักย์ ในแต่ละเส้นแสดงถึงแนวของพลังงานศักย์ที่เท่ากัน ขอบเขตผิวของพลังงานศักย์นั้นจะเป็นจุดที่เป็นจุดเชื่อมกันระหว่างจุดสมดุลไม่มีเสถียรภาพควบคุมที่ล้อมรอบจุดสมดุลเสถียรภาพอยู่นั่นเอง



รูปที่ 3.11 แสดงขอบเขตผิวพลังงานศักย์สำหรับระบบ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในแนวทางการประเมินเสถียรภาพโดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานนี้เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งใด ๆ จะการหาจุดสมดุลเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์และทำการหากลุ่มของการไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งจะทำให้รู้ว่าจุดสมดุลไม่มีเสถียรภาพควบคุม แล้วพิจารณาแนวทางเดินของมุมโรเตอร์หรือแนวทางเดินของพลังงานศักย์ซึ่ง ทำการหาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถผ่านเนินพลังงานที่จุดสมดุลไม่มีเสถียรภาพได้หรือไม่ ซึ่งในการจำลองระบบเพื่อการคำนวณนั้นจะทำการหาพลังงานสูงสุดค่าแรก ถือว่าเป็นจุดที่ตัดผ่านที่ขอบเขตผิวพลังงานศักย์สูงสุดนั่นเอง ค่าพลังงานสูงสุดค่าแรกจะถูกกำหนดให้เป็นค่าพลังงานวิกฤตในการหาเวลาในการกำจัดฟอลต์ต่อไป

3.5 การคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์โดยวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์

ในการคำนวณหาเวลาของการโดยฟังก์ชันพลังงานนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาวิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ มาใช้ ในส่วนของกระบวนการหาค่าเวลาวิกฤตสามารถหาได้โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้ [4]

- 1.หาจุดเสถียรภาพคงตัวหลังการกำจัดฟอลต์ $(\theta^s, \tilde{\omega}^s)$ ซึ่งจุดเสถียรภาพคงตัวหลังการกำจัดฟอลต์หาได้จากสมการของระบบดังนี้

$$f_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} = 0 \quad (3.22)$$

- 2.คำนวณหาแนวทางเดินของฟอลต์โดยใช้สมการ

$$\begin{aligned} M_i \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= f_i^F(\theta) \quad 0 < t \leq t_{c1} \\ \frac{d\theta_i}{dt} &= \tilde{\omega} \quad , i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3.23)$$

- 3.ทำการคำนวณค่าฟังก์ชันพลังงานในแต่ละช่วงเวลาย่อย หาจุดตัดผ่านที่ $\theta = \theta^*$ ณ เวลาจุดนั้นกำหนดให้เป็น $t = t^*$ ในการหาจุดตัดผ่านพลังงานสูงสุดทำได้โดยใช้สมการ

$$f^T(\theta) \cdot (\theta - \theta^s) = 0 \quad (3.24)$$

ค่าพลังงานสูงสุด $V_{PE}(\theta^*)$ ที่มุมโรเตอร์ $\theta = \theta^*$ กำหนดให้เป็นพลังงานวิกฤตของการกำจัดฟอลต์ V_{cr}

4. ทำการคำนวณหาเวลาวิกฤตในการกำจัดพอลต์ t_{cr} จากเส้นทางเดินของพอลต์โดย
คำนวณค่าฟังก์ชันพลังงานเทียบกับสมดุลหลังการกำจัดพอลต์ โดยที่เวลาวิกฤตในการ
กำจัดพอลต์คือจุดเวลาที่ $v(\theta, \tilde{\omega}) = v_{cr}$ นั้นเอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการ Simulation ของระบบตัวอย่าง

4.1. ผลการ Simulation เทียบกับ Time Domain ของระบบตัวอย่างที่ 1

การคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์ ในตัวอย่างนี้เป็นระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า[3] ซึ่งมีไดอะแกรมสายเดี่ยวดังรูปที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. และพารามิเตอร์ดังตารางที่ ก.1 และ ก.2 ในกรณีศึกษานี้กำหนดให้เกิดฟอลต์ที่บัส 7 และกำจัดฟอลต์โดยปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 ขึ้นตอนในการจำลองระบบเพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว เริ่มจากการหาโหนดโพลาร์ของระบบไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ดังแสดงในตารางที่ ก.3

สำหรับการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า นั้นในเริ่มต้นของการหาพารามิเตอร์เริ่มต้นสามารถหาได้จากการคำนวณดังต่อไปนี้

1. จากโหนดโพลาร์จากตารางที่ ก.3 คำนวณค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการ (2.21) ได้ตามนี้

$$I_1 \angle \phi_1 = \frac{0.7164 - j0.2705}{1.04 \angle 0} = 0.7363 \angle -20.68^\circ \text{ A}$$

$$I_2 \angle \phi_2 = \frac{1.6300 - j0.0654}{1.025 \angle -9.28} = 1.5916 \angle 6.94^\circ \text{ A}$$

$$I_3 \angle \phi_3 = \frac{0.8500 + j0.1086}{1.025 \angle -4.66} = 0.8360 \angle 11.95^\circ \text{ A}$$

2. จากค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $I_i \angle \phi_i$ ทำการคำนวณหาขนาดแรงดันไฟฟ้า Electromotive Force (E_i) และมุมโรเตอร์ δ_i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการ (2.22)

$$\begin{aligned} E_1 \angle \delta_1 &= 1.04 \angle 0^\circ + j0.0608 \cdot 0.7363 \angle -20.68^\circ \\ &= 1.0566 \angle 2.27^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_2 \angle \delta_2 &= 1.025 \angle 9.28^\circ + j0.1198 \cdot 1.5916 \angle 6.94^\circ \\ &= 1.0502 \angle 19.73^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_3 \angle \delta_3 &= 1.025 \angle 4.66^\circ + j0.1813 \cdot 0.8360 \angle 11.95^\circ \\ &= 1.0170 \angle 13.16^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

3. ค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดให้มีค่ากับความเร็วของกรอบอ้างอิง (Reference Frame) หรือความเร็วของระบบ ระบบทดสอบเป็นระบบมีความถี่ 60 เฮิรตซ์ จะได้ว่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 $\omega_1 = 2\pi f = 377.14 \text{ rad/s}$ เท่ากับค่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 และค่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ด้วย
4. กำลังกล (Prime Mover) ทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_{mi} ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า ค่ากำลังกลสามารถคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดหรืออ่านได้จากข้อมูลของโหลดโพลาร์ จากตารางที่ ก.3 อ่านค่ากำลังกล $P_{m1} = 0.7164 \text{ p.u.}$ $P_{m2} = 1.6300 \text{ p.u.}$ และ $P_{m3} = 0.8500 \text{ p.u.}$ ตามลำดับ

การคำนวณข้างต้นเป็นการแสดงถึงรายละเอียดในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการใช้ในการจำลองพลวัตของระบบ และได้แสดงค่าของพารามิเตอร์เริ่มต้นในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้นของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

G_i	E'_i (p.u.)	δ_i (degree)	P_{mi} (p.u)	ω_i (rad/s)
1	1.0566	2.2716	0.7164	377.14
2	1.0502	19.7316	1.6300	377.14
3	1.0170	13.1664	0.8500	377.14

ในการจำลองพลวัตระบบในขณะเกิดฟอลต์นั้นใช้การอินทิเกรตสมการอนุพันธ์ซึ่งแทนพลวัตของระบบในสมการ (3.1) หลักการอินทิเกรตนั้นอธิบายในภาคผนวก ค. พิจารณาสมการ (3.1) ค่ามุมและความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อย ดังนั้นค่าในตารางที่ 4.1 จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปศูนย์กลางความเฉื่อยด้วย จากสมการ (2.17) ทำการคำนวณมุมและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อย COI ได้ดังนี้

คำนวณมุมและความเร็วศูนย์กลางความเฉื่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta_o &= \frac{[23.64 \times 2.2716 + 6.4 \times 19.7316 + 3.01 \times 13.1664]}{(23.64 + 6.4 + 3.01)} \\ &= 6.6449^\circ \\ \omega_o &= \frac{[23.64 \times 377.14 + 6.4 \times 377.14 + 3.01 \times 377.14]}{(23.64 + 6.4 + 3.01)} \end{aligned}$$

$$= 377.14 \text{ rad / s}$$

นั่นคือจะได้มุมและความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยดังนี้

$$\theta_1 = 2.2716^\circ - 6.6449^\circ = -4.3733^\circ$$

$$\theta_2 = 19.7316^\circ - 6.6449^\circ = 13.0867^\circ$$

$$\theta_3 = 13.1664^\circ - 6.6449^\circ = 6.5215^\circ$$

$$\tilde{\omega}_1 = \tilde{\omega}_2 = \tilde{\omega}_3 = 0 \text{ rad / s}$$

มุมและความเร็วมุมและความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยที่หาได้นี้ใช้เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการจำลองระบบพลวัตในช่วงเกิดฟอลต์ต่อไป และในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการจำลองค่าของมุมและความเร็วศูนย์กลางความเฉื่อยนั้นจะมีค่าเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) และ (2.14) สำหรับการจำลองพลวัตของระบบในช่วงเกิดฟอลต์สำหรับระบบในสมการ (3.1) ตลอดจนการคำนวณฟังก์ชันพลังงานนั้นต้องมีการคำนวณหาค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบทั้งสามกรณีคือ คำนวณหาค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์ ค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์ และค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ ซึ่งค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์ ค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์ และค่าบัสแอมิทิตแดนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 และในการหาค่าของฟังก์ชันพลังงานนั้นต้องทำการเปรียบเทียบกับจุดสมดุลเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์ ซึ่งคือค่าของมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังกำจัดฟอลต์จากตารางที่ ก.4 แสดงค่าจากการรันโพลีโพลีของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับ 7 สามารถคำนวณหาค่ามุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังกำจัดฟอลต์ได้ดังนี้

$$\delta_1^s = 2.4680^\circ \quad \delta_2^s = 40.5132^\circ \quad \delta_3^s = 25.3609^\circ$$

คำนวณมุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศูนย์กลางความเฉื่อยและมุมของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยของระบบหลังกำจัดฟอลต์ได้ดังนี้

$$\delta_0^s = 11.9290^\circ$$

$$\theta_1^s = -9.4523^\circ$$

$$\theta_2^s = 28.5930^\circ$$

$$\theta_3^s = 13.4406^\circ$$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์

บัส	(1)	(2)	(3)
(1)	0.8455 - 2.9883i	0.2871 + 1.5129i	0.2096 + 1.2256i
(2)	0.2871 + 1.5129i	0.4200 - 2.7239i	0.2133 + 1.0879i
(3)	0.2096 + 1.2256i	0.2133 + 1.0879i	0.2770 - 2.3681i

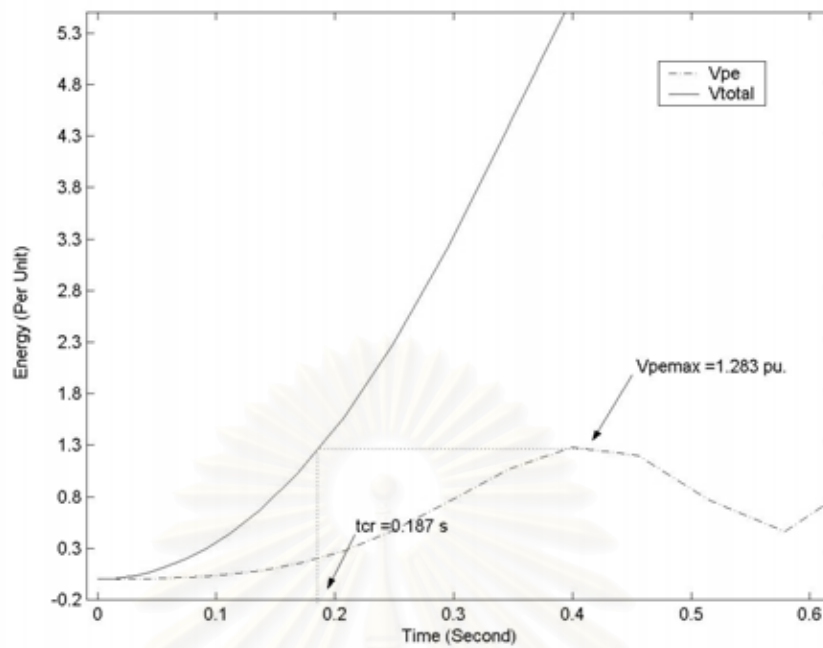
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์

บัส	(1)	(2)	(3)
(1)	0.6568 - 3.8160i	0	0.0701 + 0.6306i
(2)	0	- 5.4855i	0
(3)	0.0701 + 0.6306i	0	0.1740 - 2.7959i

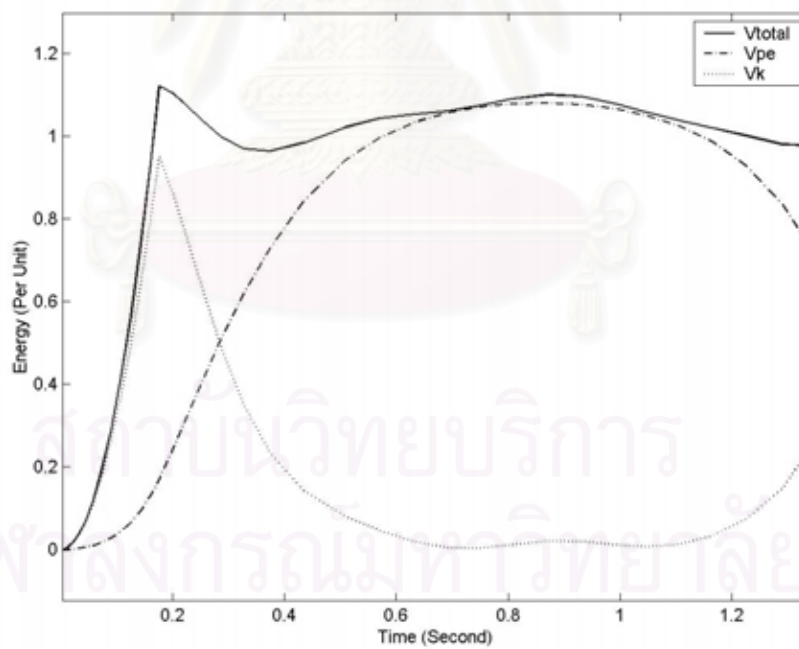
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าบัสแอดมิตแตนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์

บัส	(1)	(2)	(3)
(1)	1.2024 - 2.3827i	0.1409 + 0.6922i	0.1988 + 1.0441i
(2)	0.1409 + 0.6922i	0.3821 - 2.0216i	0.1986 + 1.2006i
(3)	0.1988 + 1.0441i	0.1986 + 1.2006i	0.2757 - 2.3582i

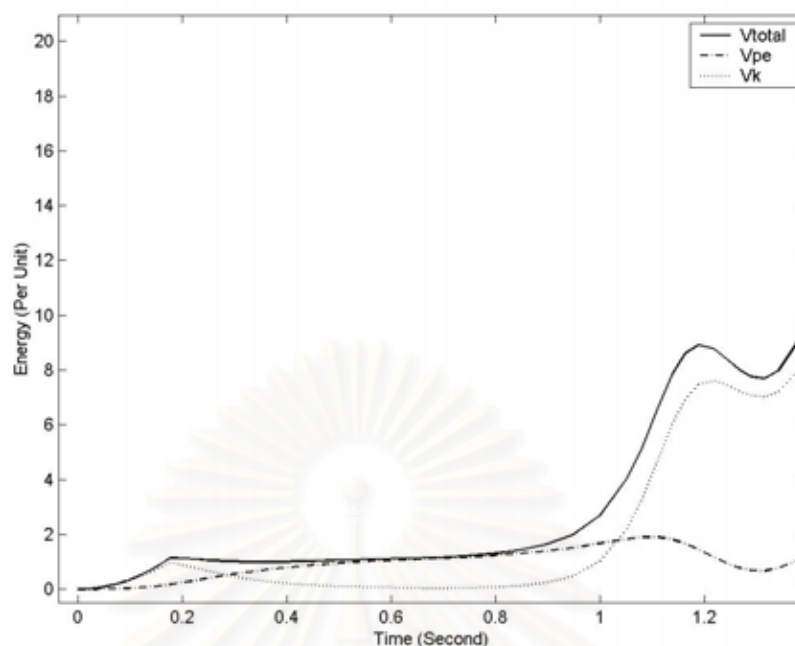
ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าของบัสแอดมิตแตนซ์ขณะเกิดฟอลต์ถูกใช้ในการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าในช่วงเกิดฟอลต์ ส่วนค่าพารามิเตอร์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ถูกใช้ในการคำนวณฟังก์ชันพลังงาน ในการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าจะต้องมีการคำนวณหาค่าของพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานรวมในแต่ละช่วงเวลาขณะเกิดฟอลต์ โดยพลังงานเหล่านี้จะเปรียบเทียบกับจุดสมดุลเสถียรภาพของระบบหลังการกำจัดฟอลต์ โดยค่าพลังงานศักย์ที่มากที่สุดค่าแรกจะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดเป็นค่าพลังงานวิกฤตที่ใช้ในการคำนวณเวลาของการกำจัดฟอลต์ ซึ่งจะเป็นการคำนวณย้อนกลับขณะที่ค่าฟังก์ชันพลังงานมีค่าเท่ากับพลังงานวิกฤตนั่นเอง ผลการจำลองพลวัตของระบบและคำนวณค่าของพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานรวมเพื่อใช้ในการหาพลังงานวิกฤตที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าเวลาของการกำจัดฟอลต์แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงพลังงานศักย์กับพลังงานของระบบรวม



รูปที่ 4.2 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ที่ฟังก์ชันพลังงานเท่ากับพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.187 \text{ s}$)

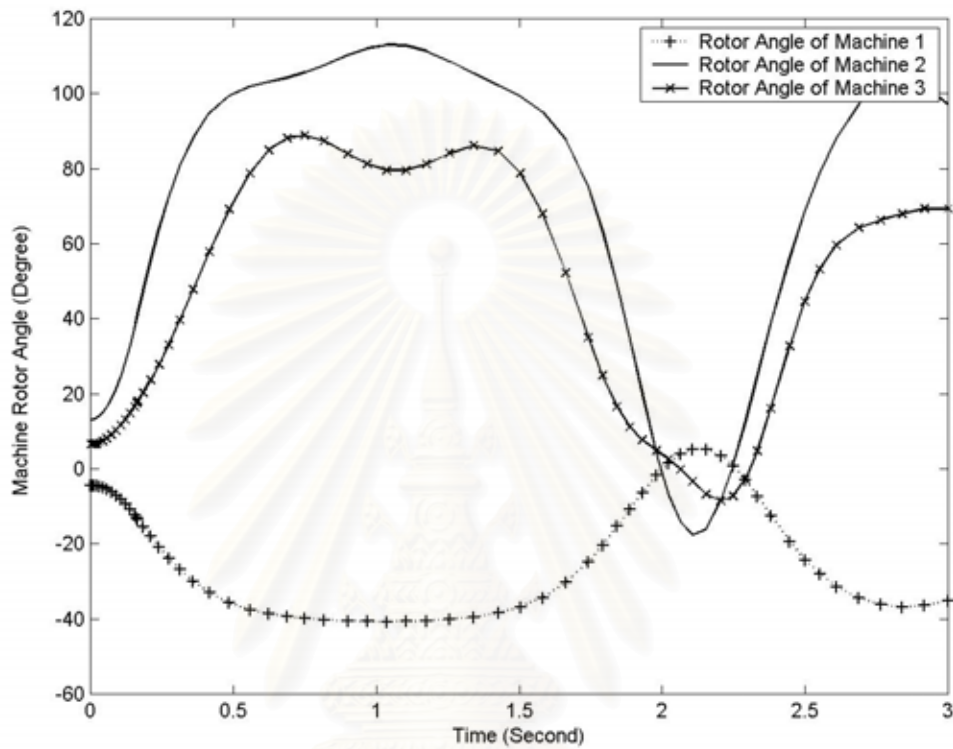


รูปที่ 4.3 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ที่ฟังก์ชันพลังงานมากกว่าพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.188$ s)

สำหรับค่าพลังงานวิกฤตในรูปที่ 4.1 นั้น เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ที่ค่าพลังงานวิกฤตจากการจำลองพลวัตของระบบและตรวจสอบค่าฟังก์ชันพลังงานพบว่าค่าของพลังงานมีค่าที่คงที่ กล่าวคือ การกำจัดฟอลต์ภายในขอบเขตพลังงานวิกฤตนั้นระบบยังสามารถที่จะมีพลังงานที่จำกัด ซึ่งระบบจะสามารถดูดซับพลังงานเหล่านี้ได้เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ระบบจะเข้าสู่จุดเสถียรภาพใหม่ ซึ่งก็คือจุดเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์นั่นเอง ในรูปที่ 4.1 พลังงานศักย์สูงสุดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.283 Per Unit ถูกกำหนดให้เป็นค่าของพลังงานวิกฤต และนำไปคำนวณหาเวลาในการกำจัดฟอลต์โดยคิดที่พลังงานรวมเท่ากับพลังงานวิกฤต ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 0.187 วินาที นั้นหมายความว่าหากเกิดฟอลต์เกิดขึ้นที่บัส 7 แล้วทำการกำจัดฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 จะต้องทำการปลดสายส่งช้าที่สุดเป็นเวลาเท่ากับ 0.187 วินาที เพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าในตัวอย่างนี้ยังคงมีเสถียรภาพในช่วงชั่วคราวอยู่ ในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบฟังก์ชันพลังงานสำหรับกรณีการกำจัดฟอลต์ที่ทำให้มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพตามลำดับ

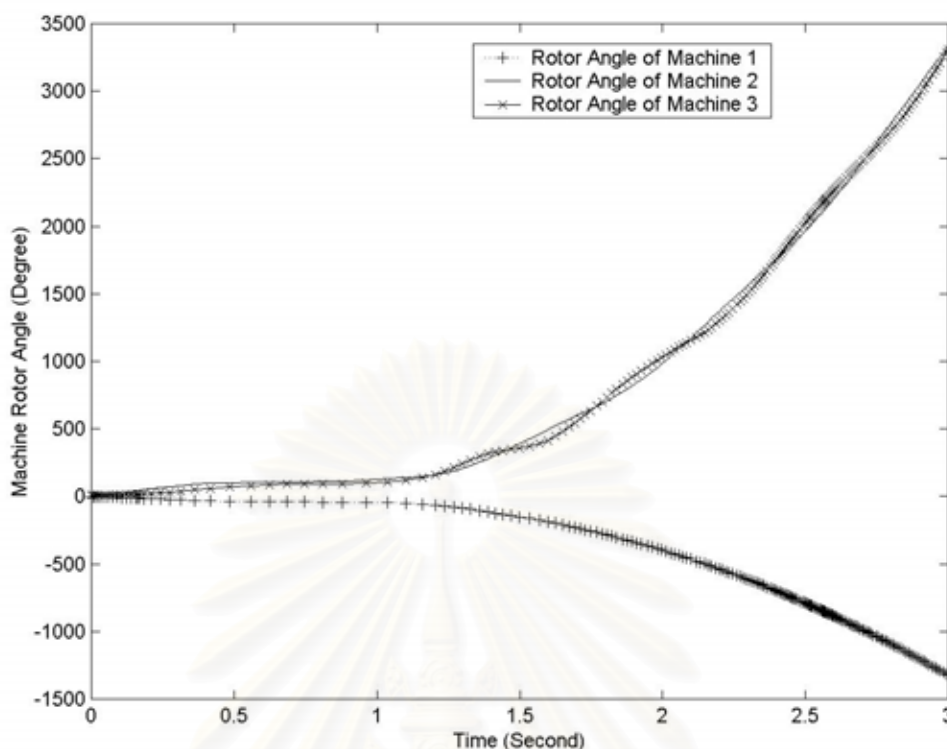
ในการตรวจสอบถึงแนวความคิดการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันพลังงานที่นำเสนอ นั้นนั้นได้ทำการตรวจสอบ โดยใช้โปรแกรมที่ใช้ในหลักการโดเมนทางเวลาตรวจสอบ ซึ่งจากการทดสอบที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน คือกำหนดให้เกิดฟอลต์ที่บัส 7 แล้วทำการกำจัดฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับบัส 7 ได้ค่าเวลาการกำจัดฟอลต์จากวิธีทางโดเมนเวลาเท่ากับ 0.162

วินาที รูปที่ 4.4 ผลจากโปรแกรมทางโดเมนเวลาที่กำจัดฟอลต์ในกรณีที่มีระบบไฟฟ้ายังคงมีเสถียรภาพและ รูปที่ 4.5 ผลจากโปรแกรมทางโดเมนเวลาที่กำจัดฟอลต์ในกรณีที่มีระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.4 แสดงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 3 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.162 วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 แสดงมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 3 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.163 วินาที

พบว่าเวลาของการกำจัดฟอลต์โดยสองวิธีนี้มีค่าไม่ตรงกันในจุดนี้ผู้เขียนขอเสนอให้ถือ
ว่าเวลาที่ได้จากวิธีของโดเมนทางเวลาเป็นค่าที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามนั้นค่าเวลาของการ
กำจัดฟอลต์ที่ได้จากการคิดโดยวิธีฟังก์ชันพลังงานนั้นเป็นค่าเวลาที่คำนวณได้ในครั้งเดียวซึ่งมี
ความรวดเร็วว่าการลองผิดลองถูกในขั้นตอนการหาเวลาวิกฤตสำหรับวิธีของโดเมนทางเวลา ใน
ส่วนของความคลาดเคลื่อนนั้นซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2. ผลการ Simulation เทียบกับ Time Domain ของระบบตัวอย่างที่ 2

การคำนวณหาเวลาของการกำจัดพอลต์ในตัวอย่างที่ 2 ทดสอบสำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่กว่าระบบในตัวอย่างที่ 1 เพื่อเป็นการตรวจสอบถึงวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางวิธีฟังก์ชันพลังงานกับวิธีทางโดเมนทางเวลาในกรณีทีระบบใหญ่ขึ้น สำหรับระบบในตัวอย่างที่ 2 เป็นระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า[5] ซึ่งมีไดอะแกรมสายเดี่ยวดังรูปที่ ข.1 ในภาคผนวก ข. และพารามิเตอร์ดังตารางที่ ข.1 และ ข.2 ในกรณีศึกษานี้กำหนดให้เกิดพอลต์ที่บัส 24 และกำจัดพอลต์โดยปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับบัส 24 ขั้นตอนในการจำลองระบบเพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าช่วงชั่วคราว เริ่มจากการหาโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้าก่อนเกิดพอลต์ดังแสดงในตารางที่ ข.3

สำหรับการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2 นั้นในเริ่มต้นของการหาพารามิเตอร์เริ่มต้นสามารถหาได้จากการคำนวณดังต่อไปนี้

5. จากโหลดโพลาร์จากตารางที่ ข.3 คำนวณค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการ (2.21) ได้ตามนี้

$$I_1 \angle \phi_1 = \frac{5.5202 - j1.6182}{0.982 \angle 0^\circ} = 5.8579 \angle 16.34^\circ \text{ A}$$

$$I_2 \angle \phi_2 = 9.9541 \angle 23.72^\circ \text{ A}$$

$$I_3 \angle \phi_3 = 6.8241 \angle 11.99^\circ \text{ A}$$

$$I_1 \angle \phi_1 = 5.2470 \angle 13.81^\circ \text{ A}$$

$$I_2 \angle \phi_2 = 6.3932 \angle 3.36^\circ \text{ A}$$

$$I_3 \angle \phi_3 = 6.7488 \angle 18.18^\circ \text{ A}$$

$$I_1 \angle \phi_1 = 5.6913 \angle 14.31^\circ \text{ A}$$

$$I_2 \angle \phi_2 = 5.2608 \angle 1.08^\circ \text{ A}$$

$$I_3 \angle \phi_3 = 8.1066 \angle -3.43^\circ \text{ A}$$

$$I_3 \angle \phi_3 = 2.9626 \angle 40.34^\circ \text{ A}$$

6. จากค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $I_i \angle \phi_i$ ทำการคำนวณหาขนาดแรงดันไฟฟ้า Electromotive Force (E_i) และมุมโรเตอร์ δ_i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการ (2.22)

$$\begin{aligned} E_1 \angle \delta_1 &= 0.982 \angle 0^\circ + j0.0647 \times 0.7363 \angle -20.68^\circ \\ &= 1.0566 \angle 2.27^\circ \end{aligned}$$

$$E_2 \angle \delta_2 = 1.0286 \angle -7.77^\circ$$

$$E_3 \angle \delta_3 = 1.1288 \angle 20.46^\circ$$

$$E_4 \angle \delta_4 = 1.1616 \angle 19.73^\circ$$

$$E_5 \angle \delta_5 = 1.0701 \angle 19.15^\circ$$

$$E_6 \angle \delta_6 = 1.2231 \angle 19.87^\circ$$

$$E_7 \angle \delta_7 = 1.1974 \angle 20.43^\circ$$

$$E_8 \angle \delta_8 = 1.0852 \angle 17.86^\circ$$

$$E_9 \angle \delta_9 = 1.1555 \angle 31.05^\circ$$

$$E_{10} \angle \delta_{10} = 1.0545 \angle -3.49^\circ$$

7. ค่าความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดให้มีค่ากับความถี่ของกรอบอ้างอิง (Reference Frame) หรือความเร็วของระบบ ระบบทดสอบตัวอย่างที่ 2 เป็นระบบมีความถี่ 60 เฮิรตซ์ จะได้ว่าความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องทุกเครื่องเท่ากับ $\omega_1 = 2\pi f = 377.14 \text{ rad / s}$

8. กำลังกล (Prime Mover) ทางเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_{mi} ซึ่งกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้า ค่ากำลังกลสามารถคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดหรืออ่านได้จากข้อมูลของโหลดโพลาร์ จากตารางที่ ก.3 ในภาคผนวก

การคำนวณข้างต้นเป็นการแสดงถึงรายละเอียดในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองพลวัตของระบบ และได้แสดงค่าของพารามิเตอร์เริ่มต้นในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะเริ่มต้นของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

G_i	E'_i (p.u.)	δ_i (degree)	P_{mi} (p.u.)	ω_i (rad/s)
1	1.1430	18.47	5.5536	377.14
2	1.0286	-7.77	8.4239	377.14
3	1.1288	20.46	6.5914	377.14
4	1.1616	19.73	5.0934	377.14
5	1.0701	19.15	6.3472	377.14
6	1.2231	19.87	6.5276	377.14
7	1.1974	20.43	5.6216	377.14
8	1.0852	17.86	5.4801	377.14
9	1.1555	31.05	8.3179	377.14
10	1.0546	-3.49	2.9486	377.14

ในการจำลองพลวัตระบบในขณะที่เกิดฟอลต์นั้นใช้การอินทิเกรตสมการอนุพันธ์ซึ่งแทนพลวัตของระบบในสมการ (3.1) หลักการอินทิเกรตนั้นอธิบายในภาคผนวก ค. พิจารณาสมการ (3.1) ค่ามุมและความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อย ดังนั้นค่าในตารางที่ 4.5 จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปศูนย์กลางความเฉื่อยด้วย คำนวณมุมศูนย์กลางความเฉื่อยและมุมของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยได้ดังนี้

$$\delta_0 = 1.34^\circ$$

$$\theta_1 = 17.13^\circ$$

$$\theta_2 = -9.12^\circ$$

$$\theta_3 = 18.39^\circ$$

$$\theta_4 = 17.81^\circ$$

$$\theta_5 = 17.25^\circ$$

$$\theta_6 = 18.52^\circ$$

$$\theta_7 = 19.09^\circ$$

$$\theta_8 = 16.52^\circ$$

$$\theta_9 = 29.71^\circ$$

$$\theta_{10} = -4.83^\circ$$

มุมของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยที่หาได้นี้ใช้เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการจำลองระบบพลวัตในช่วงเกิดฟอลต์ต่อไป และในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการจำลองค่าของมุมและความเร็วศูนย์กลางความเฉื่อยนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) และ (2.14) สำหรับการจำลองพลวัตของระบบในช่วงเกิดฟอลต์

สำหรับระบบในสมการ (3.1) ตลอดจนการคำนวณฟังก์ชันพลังงานนั้นต้องมีการคำนวณหาค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบทั้งสามกรณีคือ คำนวณหาค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์ ค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์ และค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ ซึ่งค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบก่อนเกิดฟอลต์ ค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์ และค่าบัลลแอมิทิตแดนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 และในการหาค่าของฟังก์ชันพลังงานนั้นต้องทำการเปรียบเทียบกับจุดสมดุลเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์ ซึ่งคือค่าของมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังกำจัดฟอลต์ จากตารางที่ ข.4 แสดงค่าจากการรันโพลดิโพลาร์ของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับ 24 สามารถคำนวณหาค่ามุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังกำจัดฟอลต์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta_1^s &= 18.50^\circ & \delta_6^s &= 25.15^\circ \\ \delta_2^s &= -7.96^\circ & \delta_7^s &= 27.69^\circ \\ \delta_3^s &= 20.21^\circ & \delta_8^s &= 17.60^\circ \\ \delta_4^s &= 19.52^\circ & \delta_9^s &= 30.77^\circ \\ \delta_5^s &= 18.89^\circ & \delta_{10}^s &= -3.65^\circ \end{aligned}$$

คำนวณมุมโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศูนย์กลางความเฉื่อยและมุมของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับศูนย์กลางความเฉื่อยของระบบหลังกำจัดฟอลต์ได้ดังนี้

$\delta_0^s = 1.65^\circ$	
$\theta_1^s = 16.85^\circ$	$\theta_6^s = 23.50^\circ$
$\theta_2^s = -9.60^\circ$	$\theta_7^s = 26.04^\circ$
$\theta_3^s = 18.56^\circ$	$\theta_8^s = 15.95^\circ$
$\theta_4^s = 17.87^\circ$	$\theta_9^s = 29.13^\circ$
$\theta_5^s = 17.25^\circ$	$\theta_{10}^s = -5.30^\circ$

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าบัลแอดมิตแตนซ์ของระบบก่อนเกิดฟลัด

บัล	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
(1)	0.4159 - 9.3361i	0.6962 + 2.3051i	0.4055 + 1.6921i	0.1561 + 0.2602i	0.2368 + 0.4666i
(2)	0.6962 + 2.3051i	10.0678 - 21.789i	0.7144 + 2.2837i	0.3069 + 0.5217i	0.4643 + 0.9346i
(3)	0.4055 + 1.6921i	0.7144 + 2.2837i	0.5272 - 10.6313i	0.1960 + 0.3647i	0.2927 + 0.6510i
(4)	0.1561 + 0.2602i	0.3069 + 0.5217i	0.1960 + 0.3647i	0.8019 - 8.5926i	0.6774 + 2.9317i
(5)	0.2368 + 0.4666i	0.4643 + 0.9346i	0.2927 + 0.6510i	0.6774 + 2.9317i	1.0175 - 12.1738i
(6)	0.2300 + 0.4407i	0.4513 + 0.8829i	0.2852 + 0.6153i	0.3198 + 0.7448i	0.4593 + 1.3200i
(7)	0.1921 + 0.3651i	0.3769 + 0.7316i	0.2383 + 0.5100i	0.2674 + 0.6173i	0.3847 + 1.0943i
(8)	0.1303 + 0.3343i	0.2139 + 1.6666i	0.1544 + 0.4127i	0.1323 + 0.2364i	0.1987 + 0.4226i
(9)	0.1708 + 0.2737i	0.3782 + 0.9431i	0.2092 + 0.3555i	0.1891 + 0.2865i	0.2904 + 0.5159i
(10)	0.5339 + 1.3363i	1.4331 + 7.2919i	0.6147 + 1.6296i	0.4132 + 0.8310i	0.6095 + 1.4796i
บัล	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
(1)	0.2300 + 0.4407i	0.1921 + 0.3651i	0.1303 + 0.3343i	0.1708 + 0.2737i	0.5339 + 1.3363i
(2)	0.4513 + 0.8829i	0.3769 + 0.7316i	0.2139 + 1.6666i	0.3782 + 0.9431i	1.4331 + 7.2919i
(3)	0.2852 + 0.6153i	0.2383 + 0.5100i	0.1544 + 0.4127i	0.2092 + 0.3555i	0.6147 + 1.6296i
(4)	0.3198 + 0.7448i	0.2674 + 0.6173i	0.1323 + 0.2364i	0.1891 + 0.2865i	0.4132 + 0.8310i
(5)	0.4593 + 1.3200i	0.3847 + 1.0943i	0.1987 + 0.4226i	0.2904 + 0.5159i	0.6095 + 1.4796i
(6)	0.6620 - 11.3074i	0.5207 + 2.8823i	0.1934 + 0.3994i	0.2815 + 0.4869i	0.5952 + 1.3991i
(7)	0.5207 + 2.8823i	0.5747 - 9.9174i	0.1616 + 0.3309i	0.2349 + 0.4034i	0.4977 + 1.1596i
(8)	0.1934 + 0.3994i	0.1616 + 0.3309i	0.7454 - 10.3178i	0.4256 + 0.9063i	0.1914 + 4.5428i
(9)	0.2815 + 0.4869i	0.2349 + 0.4034i	0.4256 + 0.9063i	1.4070 - 7.8216i	0.6076 + 2.2519i
(10)	0.5952 + 1.3991i	0.4977 + 1.1596i	0.1914 + 4.5428i	0.6076 + 2.2519i	2.7501 - 24.8869i

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าบัลแอดมิตแตนซ์ของระบบขณะเกิดฟอลต์

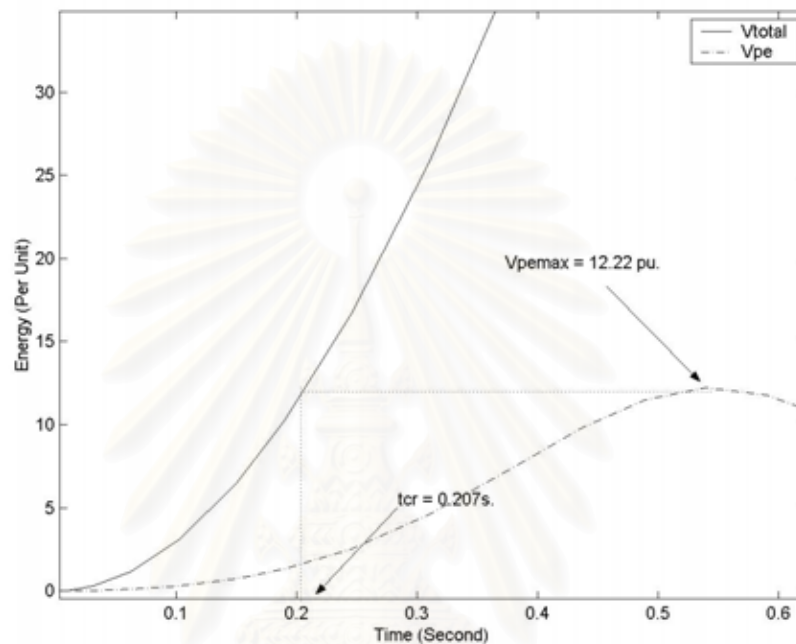
บัล	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
(1)	0.1192 -10.1553i	0.1695 + 1.0254i	0.0745 + 0.7293i	0.0148 + 0.0419i	0.0204 + 0.0739i
(2)	0.1695 + 1.0254i	9.1447 -23.7839i	0.1236 + 0.7785i	0.0678 + 0.1849i	0.0941 + 0.3263i
(3)	0.0745 + 0.7293i	0.1236 + 0.7785i	0.1590 -11.7625i	0.0351 + 0.1069i	0.0474 + 0.1881i
(4)	0.0148 + 0.0419i	0.0678 + 0.1849i	0.0351 + 0.1069i	0.7462 - 8.6466i	0.5881 + 2.8321i
(5)	0.0204 + 0.0739i	0.0941 + 0.3263i	0.0474 + 0.1881i	0.5881 + 2.8321i	0.8761 -12.3561i
(6)	0.0202 + 0.0700i	0.0930 + 0.3090i	0.0471 + 0.1782i	0.2339 + 0.6511i	0.3230 + 1.1483i
(7)	0.0169 + 0.0580i	0.0780 + 0.2562i	0.0396 + 0.1478i	0.1958 + 0.5398i	0.2711 + 0.9522i
(8)	0.0074 + 0.0246i	-0.0021 + 1.184i	0.0169 + 0.0485i	0.0758 + 0.1546i	0.1115 + 0.2750i
(9)	0.0125 + 0.0277i	0.1102 + 0.5635i	0.0289 + 0.0651i	0.1266 + 0.2256i	0.1902 + 0.4035i
(10)	0.0224 + 0.0899i	0.5364 + 5.3490i	0.0411 + 0.1636i	0.1808 + 0.5029i	0.2497 + 0.8870i
บัล	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
(1)	0.0202 + 0.0700i	0.0169 + 0.0580i	0.0074 + 0.0246i	0.0125 + 0.0277i	0.0224 + 0.0899i
(2)	0.0930 + 0.3090i	0.0780 + 0.2562i	-0.0021 + 1.184i	0.1102 + 0.5635i	0.5364 + 5.3490i
(3)	0.0471 + 0.1782i	0.0396 + 0.1478i	0.0169 + 0.0485i	0.0289 + 0.0651i	0.0411 + 0.1636i
(4)	0.2339 + 0.6511i	0.1958 + 0.5398i	0.0758 + 0.1546i	0.1266 + 0.2256i	0.1808 + 0.5029i
(5)	0.3230 + 1.1483i	0.2711 + 0.9522i	0.1115 + 0.2750i	0.1902 + 0.4035i	0.2497 + 0.8870i
(6)	0.5306 -11.4689i	0.4113 + 2.7485i	0.1090 + 0.2601i	0.1851 + 0.3813i	0.2470 + 0.8400i
(7)	0.4113 + 2.7485i	0.4835 -10.0281i	0.0911 + 0.2156i	0.1547 + 0.3159i	0.2072 + 0.6965i
(8)	0.1090 + 0.2601i	0.0911 + 0.2156i	0.6949 -10.4348i	0.3622 + 0.8141i	-0.0184 + 4.072i
(9)	0.1851 + 0.3813i	0.1547 + 0.3159i	0.3622 + 0.8141i	1.3368 - 7.8903i	0.3470 + 1.8821i
(10)	0.2470 + 0.8400i	0.2072 + 0.6965i	-0.0184 + 4.072i	0.3470 + 1.8821i	1.8792 -26.7792i

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าบัลแอดมิตแตนซ์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์

บัล	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
(1)	0.4260 - 9.3343i	0.7186 + 2.3170i	0.3913 + 1.6526i	0.1500 + 0.2512i	0.2274 + 0.4504i
(2)	0.7186 + 2.3170i	10.1156 -21.744i	0.6913 + 2.1806i	0.2946 + 0.4972i	0.4462 + 0.8910i
(3)	0.3913 + 1.6526i	0.6913 + 2.1806i	0.5109 -10.5037i	0.1998 + 0.3980i	0.2951 + 0.7089i
(4)	0.1500 + 0.2512i	0.2946 + 0.4972i	0.1998 + 0.3980i	0.8050 - 8.5845i	0.6817 + 2.9462i
(5)	0.2274 + 0.4504i	0.4462 + 0.8910i	0.2951 + 0.7089i	0.6817 + 2.9462i	1.0231 -12.1485i
(6)	0.2210 + 0.4254i	0.4336 + 0.8417i	0.2881 + 0.6703i	0.3240 + 0.7585i	0.4649 + 1.3440i
(7)	0.1845 + 0.3525i	0.3621 + 0.6974i	0.2409 + 0.5555i	0.2709 + 0.6287i	0.3894 + 1.1142i
(8)	0.1344 + 0.3396i	0.2216 + 1.6829i	0.1557 + 0.3835i	0.1309 + 0.2289i	0.1972 + 0.4096i
(9)	0.1714 + 0.2730i	0.3796 + 0.9425i	0.2087 + 0.3510i	0.1888 + 0.2854i	0.2900 + 0.5138i
(10)	0.5599 + 1.3606i	1.4868 + 7.3695i	0.5969 + 1.4856i	0.4000 + 0.7957i	0.5910 + 1.4172i
บัล	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
(1)	0.2210 + 0.4254i	0.1845 + 0.3525i	0.1344 + 0.3396i	0.1714 + 0.2730i	0.5599 + 1.3606i
(2)	0.4336 + 0.8417i	0.3621 + 0.6974i	0.2216 + 1.6829i	0.3796 + 0.9425i	1.4868 + 7.3695i
(3)	0.2881 + 0.6703i	0.2409 + 0.5555i	0.1557 + 0.3835i	0.2087 + 0.3510i	0.5969 + 1.4856i
(4)	0.3240 + 0.7585i	0.2709 + 0.6287i	0.1309 + 0.2289i	0.1888 + 0.2854i	0.4000 + 0.7957i
(5)	0.4649 + 1.3440i	0.3894 + 1.1142i	0.1972 + 0.4096i	0.2900 + 0.5138i	0.5910 + 1.4172i
(6)	0.6676 -11.2846i	0.5255 + 2.9012i	0.1918 + 0.3870i	0.2811 + 0.4850i	0.5770 + 1.3399i
(7)	0.5255 + 2.9012i	0.5787 - 9.9018i	0.1602 + 0.3207i	0.2346 + 0.4018i	0.4824 + 1.1106i
(8)	0.1918 + 0.3870i	0.1602 + 0.3207i	0.7460 -10.3129i	0.4260 + 0.9062i	0.1990 + 4.5679i
(9)	0.2811 + 0.4850i	0.2346 + 0.4018i	0.4260 + 0.9062i	1.4075 - 7.8224i	0.6095 + 2.2522i
(10)	0.5770 + 1.3399i	0.4824 + 1.1106i	0.1990 + 4.5679i	0.6095 + 2.2522i	2.8102 -24.7649i

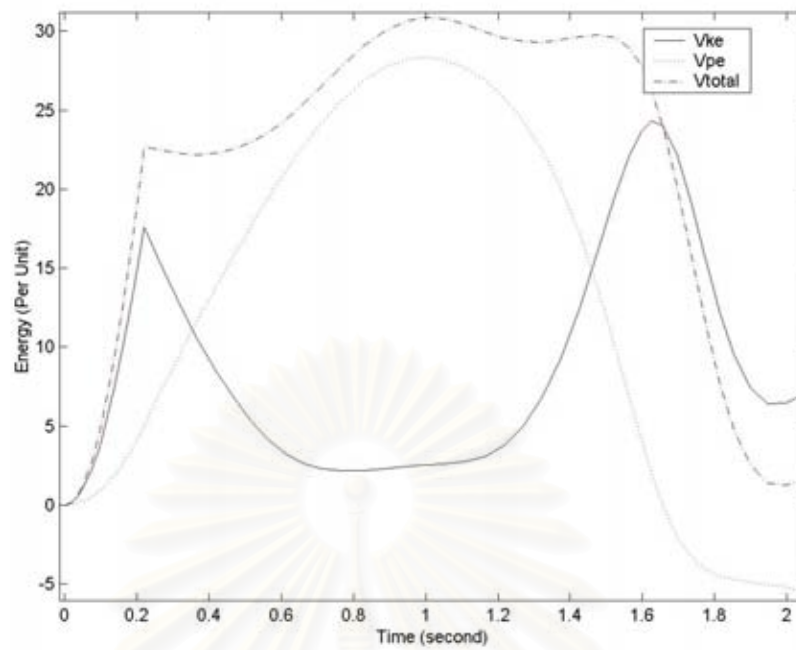
ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าของบัลแอดมิตแตนซ์ขณะเกิดฟอลต์ถูกใช้ในการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าในช่วงเกิดฟอลต์ ส่วนค่าพารามิเตอร์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์ถูกใช้ในการคำนวณฟังก์ชันพลังงาน ในการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าจะต้องมีการคำนวณหาค่าของพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานรวมในแต่ละช่วงเวลาขณะเกิดฟอลต์ โดยพลังงานเหล่านี้จะเปรียบเทียบกับจุดสมดุลเสถียรภาพของระบบหลังการกำจัดฟอลต์ โดยค่าพลังงานศักย์ที่มาก

ที่สุดค่าแรกจะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดเป็นค่าพลังงานวิกฤตที่ใช้ในการคำนวณเวลาของการกำจัดฟอลต์ ซึ่งจะเป็นการคำนวณย้อนกลับขณะที่ค่าฟังก์ชันพลังงานมีค่าเท่ากับพลังงานวิกฤตนั่นเอง สำหรับตัวอย่างที่ 2 ผลการจำลองพลวัตของระบบและคำนวณค่าของพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานรวมเพื่อใช้ในการหาพลังงานวิกฤตที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าเวลาของการกำจัดฟอลต์แสดงในรูปที่ 4.6

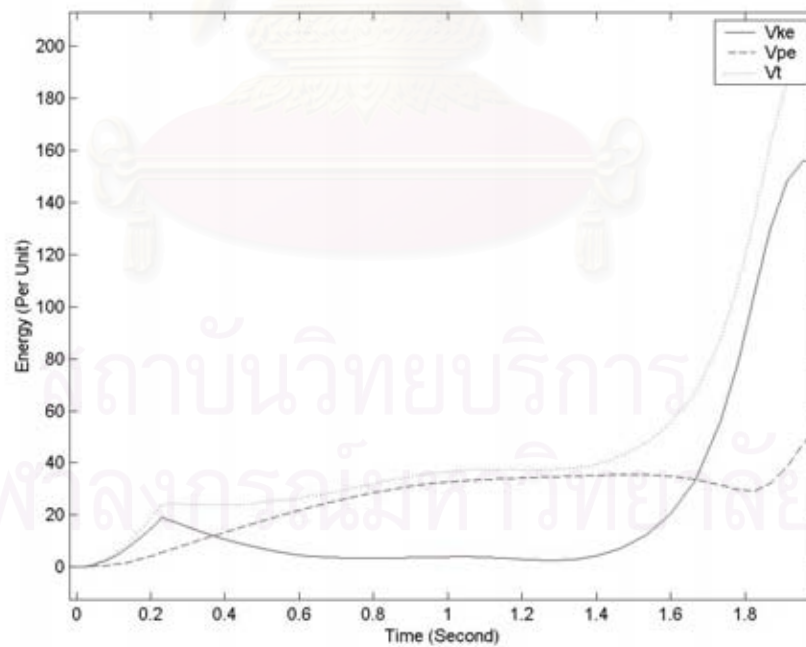


รูปที่ 4.6 แสดงพลังงานศักย์กับพลังงานรวมของระบบ

สำหรับค่าพลังงานวิกฤตในรูปที่ 4.6 นั้น เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ที่ค่าพลังงานวิกฤตจากการจำลองพลวัตของระบบและตรวจสอบค่าฟังก์ชันพลังงานพบว่าค่าของพลังงานมีค่าที่คงที่ กล่าวคือ การกำจัดฟอลต์ภายในขอบเขตพลังงานวิกฤตนั้นระบบยังสามารถที่จะมีพลังงานที่จำกัด ซึ่งระบบจะสามารถดูดซับพลังงานเหล่านี้ได้เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ระบบจะเข้าสู่จุดเสถียรภาพใหม่ ซึ่งก็คือจุดเสถียรภาพหลังกำจัดฟอลต์นั่นเอง ในรูปที่ 4.6 พลังงานศักย์สูงสุดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ Per Unit ถูกกำหนดให้เป็นค่าของพลังงานวิกฤต และนำไปคำนวณหาเวลาในการกำจัดฟอลต์โดยคิดที่พลังงานรวมเท่ากับพลังงานวิกฤต ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 0.207 วินาที นั้นหมายความว่าหากเกิดฟอลต์เกิดขึ้นที่บัส 24 แล้วทำการกำจัดฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับบัส 24 จะต้องทำการปลดสายส่งช้าที่สุดเป็นเวลาเท่ากับ 0.207 วินาที เพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าในตัวอย่างนี้ยังคงมีเสถียรภาพในช่วงชั่วคราวอยู่ ในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการตรวจสอบฟังก์ชันพลังงานสำหรับกรณีการกำจัดฟอลต์ที่ทำให้มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพตามลำดับ

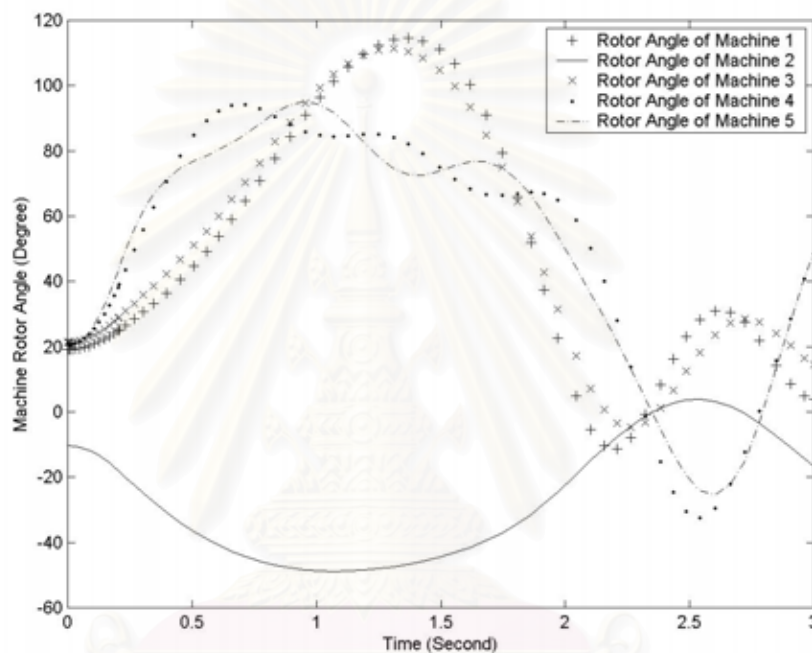


รูปที่ 4.7 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ที่ฟังก์ชันพลังงานเท่ากับพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.207$ s)



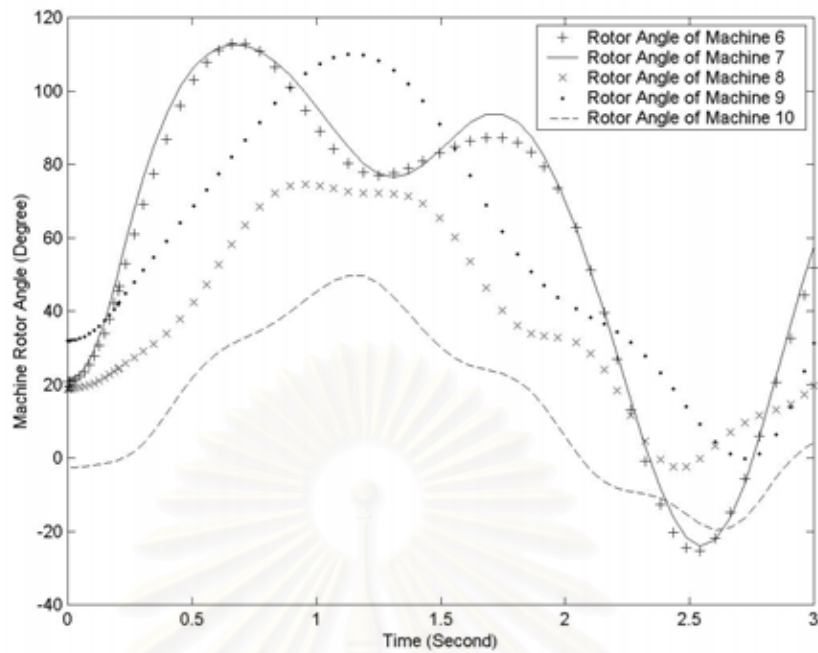
รูปที่ 4.8 แสดงค่าฟังก์ชันพลังงานในช่วงการจำลองพลวัตของระบบเมื่อกำจัดฟอลต์ที่ฟังก์ชันพลังงานมากกว่าพลังงานวิกฤต ($t_{cr} = 0.208$ s)

ในการตรวจสอบถึงแนวคิดการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันพลังงานที่นำเสนอ นั้นได้ทำการตรวจสอบ โดยใช้โปรแกรมที่ใช้ในหลักการโดเมนทางเวลามาตรวจสอบ ซึ่งจากการทดสอบที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน คือกำหนดให้เกิดฟอลต์ที่บัส 24 แล้วทำการกำจัดฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับบัส 24 ได้ค่าเวลาการกำจัดฟอลต์จากวิธีทางโดเมนเวลาเท่ากับ 0.202 วินาที รูปที่ 4.9 ผลจากโปรแกรมทางโดเมนเวลาที่กำลังจัดฟอลต์ในกรณีที่มีระบบไฟฟ้ายังคงมีเสถียรภาพและ รูปที่ 4.10 ผลจากโปรแกรมทางโดเมนเวลาที่กำลังจัดฟอลต์ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ

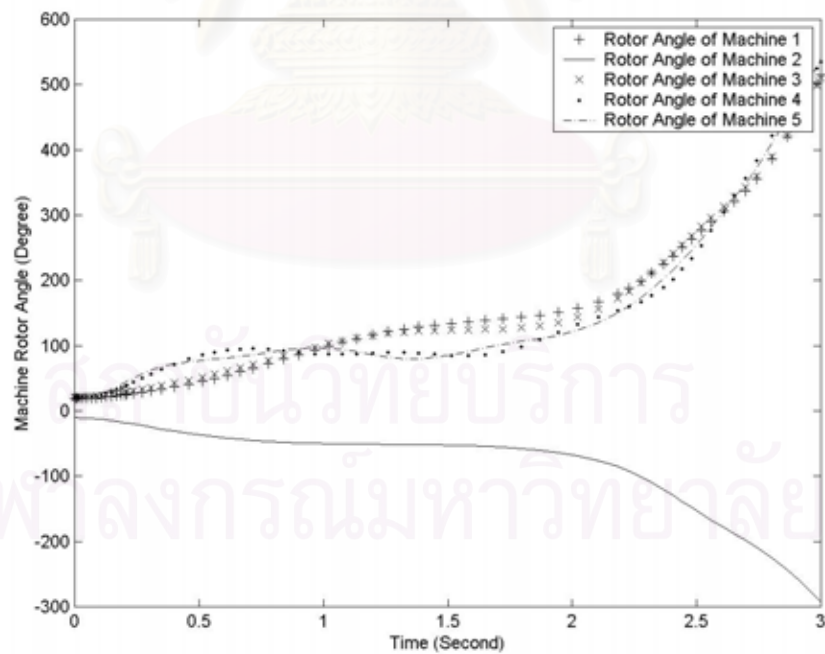


รูปที่ 4.9 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 5 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.202 วินาที

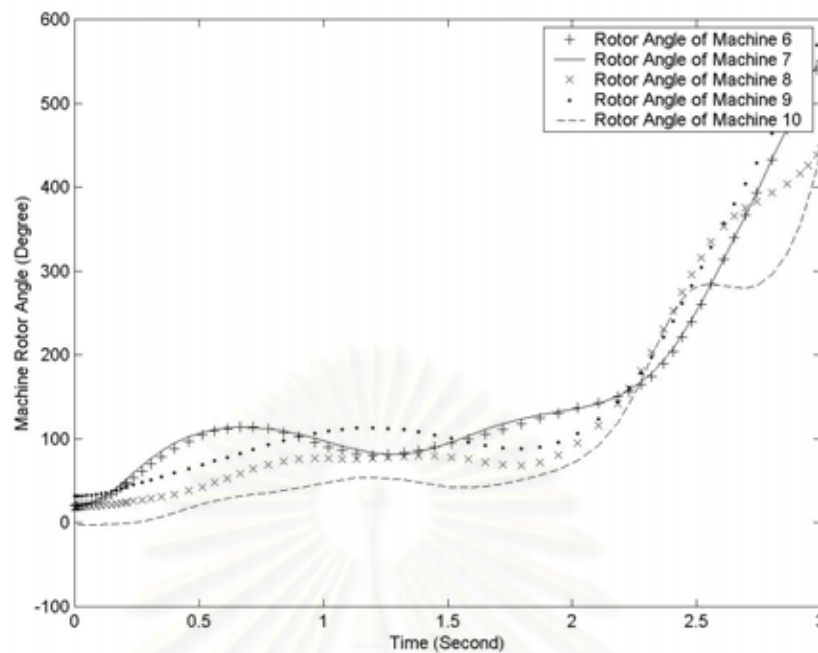
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 6 ถึงเครื่องที่ 10 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.202 วินาที



รูปที่ 4.11 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ถึงเครื่องที่ 5 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.203 วินาที



รูปที่ 4.12 แสดงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 6 ถึงเครื่องที่ 10 เมื่อทำการกำจัดฟอลต์ ณ เวลา 0.203 วินาที

พบว่าเวลาของการกำจัดฟอลต์โดยสองวิธีนี้มีค่าไม่ตรงกันในจุดนี้ผู้เขียนขอเสนอให้ถือ
ว่าเวลาที่ได้จากวิธีของโดเมนทางเวลาเป็นค่าที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามนั้นค่าเวลาของการ
กำจัดฟอลต์ที่ได้จากการคิดโดยวิธีฟังก์ชันพลังงานนั้นเป็นค่าเวลาที่คำนวณได้ในครั้งเดียวซึ่งมี
ความรวดเร็วว่าการลองผิดลองถูกในขั้นตอนการหาเวลาวิกฤตสำหรับวิธีของโดเมนทางเวลา ใน
ส่วนของความคลาดเคลื่อนนั้นซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการใช้ฟังก์ชันพลังงานในการคำนวณหาเวลาวิกฤตของการกำจัดฟอลต์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในช่วงชั่วคราว เมื่อกำหนดให้เกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า และทำการคำนวณหาเวลาของการกำจัดฟอลต์โดยอาศัยหลักการของฟังก์ชันพลังงาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีขอบเขตผิวพลังงานศักย์ เป็นวิธีวิเคราะห์หาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีหลักการได้ใกล้เคียงกับหลักการวิเคราะห์พื้นที่เท่ากัน ในขั้นตอนที่สำคัญคือการคำนวณพลังงานวิกฤตที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์ ซึ่งพลังงานวิกฤตได้จากการตรวจสอบหาพลังงานศักย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดที่มีค่าสูงสุดในช่วงแรก ค่าของพลังงานศักย์ดังกล่าวคำนวณจากค่ามุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้าในช่วงพลวัตเทียบกับค่าของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะคงตัวหลังกำจัดฟอลต์แล้ว จากค่าพลังงานวิกฤตนำไปสู่การหาเวลาในการกำจัดฟอลต์โดยการนำค่าพลังงานวิกฤตไปเปรียบเทียบกับพลังงานรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งหาจากฟังก์ชันพลังงาน โดยมีค่าของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์เป็นฟังก์ชันพลังงาน ณ เวลาที่ทำให้พลังงานวิกฤตเท่ากับพลังงานรวมจะเป็นเวลาที่ใช้กำจัดฟอลต์นั่นเอง

ในขั้นตอนการจำลองระบบไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ในช่วงพลวัตนั้น ทำโดยการเลียนแบบสมการทางพลวัตของระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการเลียนแบบระบบพลวัตไฟฟ้านั้นต้องอาศัยเทคนิคต่างๆ ทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยผู้เขียนได้ศึกษาและได้ประยุกต์เทคนิคดังกล่าว โดยเฉพาะในเครื่องมือที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีอยู่อย่างเพียงพอ ในขั้นตอนการคำนวณฟังก์ชันพลังงานนั้นมีประเด็นที่น่าสนใจอยู่จุดหนึ่ง คือการคำนวณในส่วนพลังงานศักย์ที่มีเทอมของการอินทิเกรต ซึ่งการเป็นการอินทิเกรตที่ขึ้นอยู่กับเส้นทาง ในการวิเคราะห์นั้นสามารถมองเป็นจุดที่อาจคลาดเคลื่อนได้ของค่าพลังงานศักย์ ทำให้ค่าของพลังงานวิกฤตและเวลาการกำจัดฟอลต์อาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปด้วย อย่างไรก็ตามค่าเวลาของการกำจัดฟอลต์ที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเวลาการกำจัดฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพทางเวลาแล้วมีความใกล้เคียงกัน ในจุดนี้บ่งชี้ว่าวิธีการคำนวณหาเวลาวิกฤตของการกำจัดฟอลต์โดยวิธีที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแบบออนไลน์ได้เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองระบบเป็นค่าในเชิงทฤษฎีเท่านั้นไม่ได้รับประกันค่าทางระบบจริงๆ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือการ

จำลองระบบให้ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุดเพื่อใช้ในการกำหนดอุปกรณ์ป้องกันในการป้องกันความเสียหายจากฟอลต์นั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในช่วงครู่โดยฟังก์ชันพลังงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถเพิ่มเติมให้มีดีขึ้นโดยการเพิ่มเติมเทคนิคต่างๆ เข้าช่วยได้ เช่นการประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เช่น วิธี Controlling UEP เป็นต้นในการหาค่าที่เป็นพลังงานวิกฤต เพื่อให้การคำนวณหาค่าพลังงานวิกฤตมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น เทคนิคการจำลองระบบให้ใกล้เคียงระบบจริงมากขึ้นเช่นการเพิ่มความละเอียดของแบบจำลองเพื่อให้ระบบที่จำลองนั้นมีความใกล้เคียงกับระบบที่เป็นอยู่จริงมากยิ่งขึ้น เทคนิคการอินทิเกรตในส่วนของพลังงานศักย์ที่มีเทอมการอินทิเกรตที่เหมาะสมเพื่อให้ความถูกต้องในค่าที่คำนวณ และเทคนิคการจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้าในช่วงชั่วคราวที่เหมาะสม เพื่อจัดการกับลักษณะของการไม่เชิงเส้นของระบบซึ่งจะเกิดขึ้นมากหากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง

รายการอ้างอิง

1. Anderson, M. Paul, Fouad, A.A. Power System Control and Stability. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994.
2. Vidalinc, A. On-Line Transient Stability Analysis of a Multi-Machine Power System Using the Energy Approach. Master Thesis, The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute And State University, 1997.
3. Fouad, A. A., Vittal, V. Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Function Method. New Jersey. Prentice Hall, 1992.
4. Peter W. Sauer, Pai, M. A. Power System Dynamics and Stability. New Jersey. Prentice Hall. 1998.
5. Padiyar, K.R. Power System Dynamics : Stability and Control. Singapore. John Wiley and Sons, 1996.
6. Pai, M. A. Energy Function Analysis for Power System Stability. Boston. Kluwer Academic, 1989.
7. John R. Rice. Numerical Methods, Software, and Analysis. New York. Academic Press, 1993.

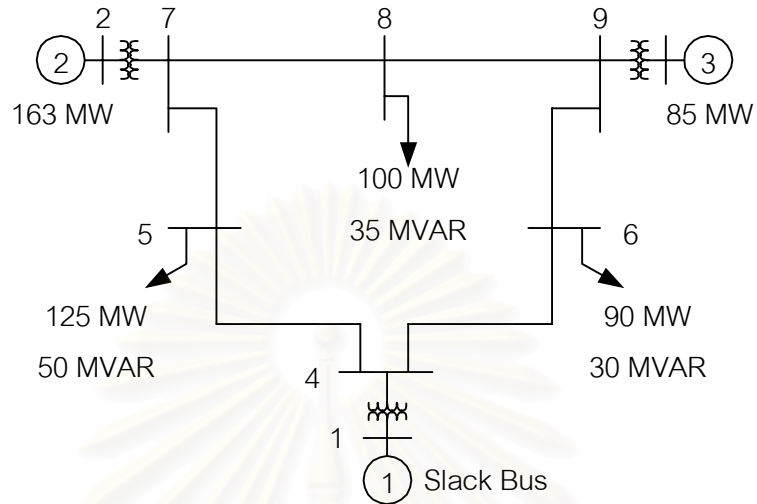
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลระบบทดสอบตัวอย่างที่ 1



รูปที่ ก.1 แสดงรูปไดอะแกรมสายเดี่ยวของระบบทดสอบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Gen.	Ra	Xd'	H
1	0	0.0608	23.64
2	0	0.1198	6.4
3	0	0.1813	3.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus No.		R_L	X_L	B_C
From	From			
1	4	0.0000	0.0576	0.0000
2	7	0.0000	0.0625	0.0000
3	9	0.0000	0.0586	0.0000
4	5	0.0100	0.0850	0.0880
4	6	0.0170	0.0920	0.0790
5	7	0.0320	0.1610	0.1530
6	9	0.0390	0.1700	0.1790
7	8	0.0085	0.0720	0.0745
8	9	0.0119	0.1008	0.1045

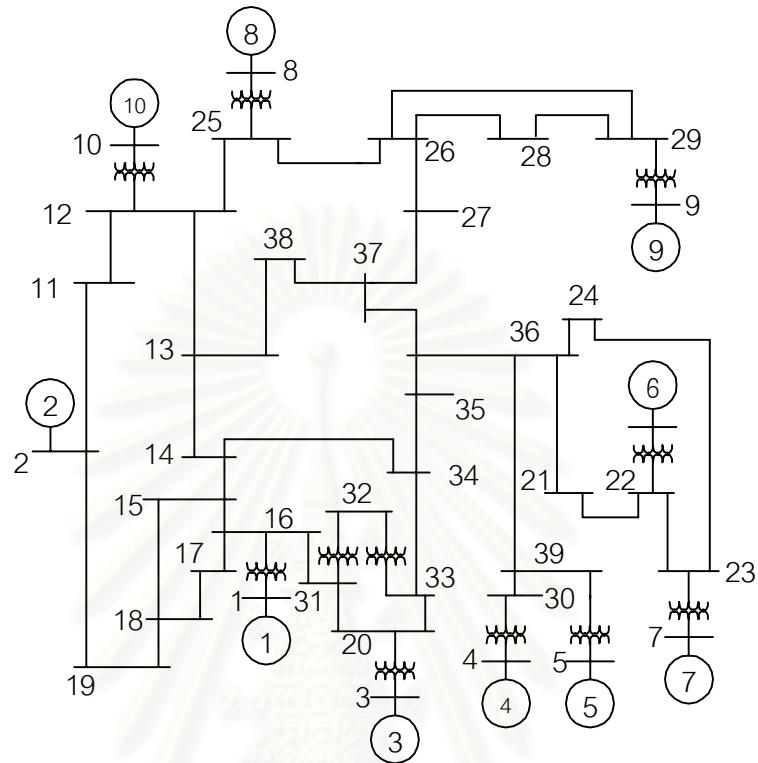
ตารางที่ ก.3 แสดงค่าจากโหลดไฟลร์ของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	Mvar	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.641	27.046	0.000
2	1.025	9.280	0.000	0.000	163.000	6.654	0.000
3	1.025	4.665	0.000	0.000	85.000	-10.860	0.000
4	1.026	-2.217	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.996	-3.989	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.013	-3.687	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.026	3.720	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.016	0.728	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.641	22.840	0.000

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าจากโหนดโพลีของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 5 กับ 7

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	80.208	81.975	0.000
2	1.025	30.226	0.000	0.000	163.000	21.059	0.000
3	1.025	17.193	0.000	0.000	85.000	12.722	0.000
4	0.996	-2.557	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.938	-8.829	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	0.975	0.310	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.017	24.617	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.001	18.059	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.019	14.459	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	328.208	115.756	0.000

ภาคผนวก ข
ข้อมูลระบบทดสอบตัวอย่างที่ 2



รูปที่ ข.1 แสดงรูปไดอะแกรมสายเดี่ยวของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

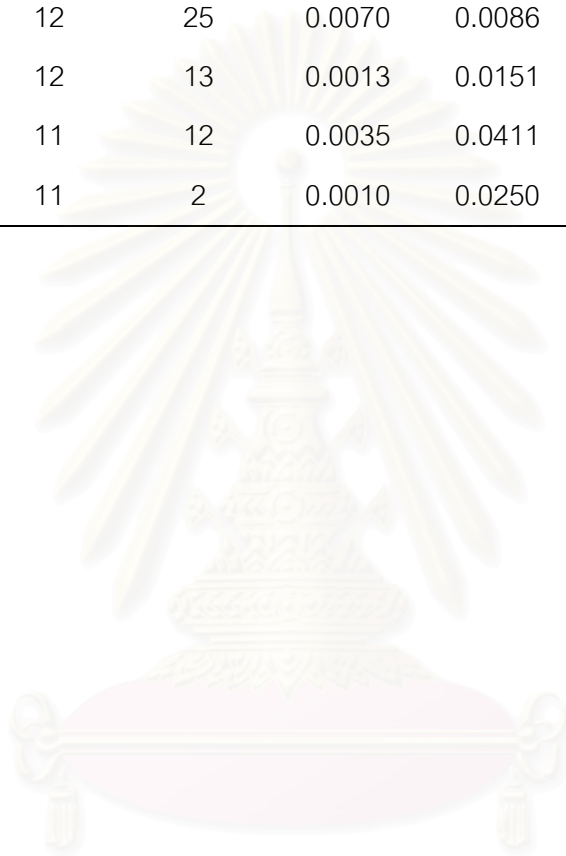
Gen	Ra	Xd'	H
1	0.00	0.0647	30.0000
2	0.00	0.0060	500.0000
3	0.00	0.0531	35.8000
4	0.00	0.0660	26.0000
5	0.00	0.0436	28.6000
6	0.00	0.0500	34.8000
7	0.00	0.0490	26.4000
8	0.00	0.0570	24.3000
9	0.00	0.0570	34.5000
10	0.00	0.0040	42.0000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus No.		R_L	X_L	B_C
From	To			
37	27	0.0013	0.0173	0.32
37	38	0.0007	0.0082	0.13
36	24	0.0003	0.0059	0.07
36	21	0.0008	0.0135	0.25
36	39	0.0016	0.0195	0.30
36	37	0.0007	0.0089	0.13
35	36	0.0009	0.0094	0.17
34	35	0.0018	0.0217	0.37
33	34	0.0009	0.0101	0.17
28	29	0.0014	0.0151	0.25
26	29	0.0057	0.0625	1.03
26	28	0.0043	0.0474	0.78
26	27	0.0014	0.0147	0.24
25	26	0.0032	0.0323	0.51
23	24	0.0022	0.0350	0.36
22	23	0.0006	0.0096	0.18
21	22	0.0008	0.0135	0.25
20	33	0.0004	0.0043	0.07
20	31	0.0004	0.0043	0.07
19	2	0.0010	0.0250	1.20
18	19	0.0023	0.0363	0.38
17	18	0.0004	0.0046	0.08
16	31	0.0007	0.0082	0.13
16	17	0.0006	0.0092	0.11
15	18	0.0008	0.0112	0.15
15	16	0.0002	0.0026	0.04
14	34	0.0008	0.0129	0.14

Bus No.		R_L	X_L	B_C
From	To			
14	15	0.0008	0.0128	0.13
13	38	0.0011	0.0133	0.21
13	14	0.0013	0.0213	0.22
12	25	0.0070	0.0086	0.15
12	13	0.0013	0.0151	0.26
11	12	0.0035	0.0411	0.70
11	2	0.0010	0.0250	0.75



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงของระบบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus No.		R_L	X_L	B_C	Tab
From	To				
39	30	0.0007	0.0138	0.00	1.00
39	5	0.0007	0.0142	0.00	1.00
32	33	0.0016	0.0435	0.00	1.00
32	31	0.0016	0.0435	0.00	1.00
30	4	0.0009	0.0180	0.00	1.00
29	9	0.0008	0.0156	0.00	1.00
25	8	0.0006	0.0232	0.00	1.00
23	7	0.0005	0.0272	0.00	1.00
22	6	0.0000	0.0143	0.00	1.00
20	3	0.0000	0.0200	0.00	1.00
16	1	0.0000	0.0250	0.00	1.00
12	10	0.0000	0.0181	0.00	1.00

ตารางที่ ๑.4 แสดงค่าจากโหลดโพลาร์ของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus No.	Voltage	Angle	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	0.982	0.000	9.200	4.600	552.018	161.823	0.000
2	1.030	-10.969	1104.000	250.000	1000.000	226.232	0.000
3	0.983	2.341	0.000	0.000	650.000	166.044	0.000
4	1.012	3.166	0.000	0.000	508.000	155.101	0.000
5	0.997	4.190	0.000	0.000	632.000	83.805	0.000
6	1.049	5.198	0.000	0.000	650.000	281.043	0.000
7	1.063	7.992	0.000	0.000	560.000	229.668	0.000
8	1.028	1.842	0.000	0.000	540.000	27.568	0.000
9	1.027	7.544	0.000	0.000	830.000	59.696	0.000
10	1.048	-4.007	0.000	0.000	250.000	183.871	0.000
11	1.035	-9.320	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.017	-6.443	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.986	-9.441	322.000	2.400	0.000	0.000	0.000
14	0.950	-10.372	500.000	184.000	0.000	0.000	0.000
15	0.951	-9.119	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.952	-8.346	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.944	-10.803	233.800	84.000	0.000	0.000	0.000
18	0.945	-11.366	522.000	176.000	0.000	0.000	0.000
19	1.007	-11.184	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.958	-5.589	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.985	-4.340	274.000	115.000	0.000	0.000	0.000
22	1.015	0.191	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	1.012	-0.082	274.500	84.660	0.000	0.000	0.000
24	0.973	-6.802	308.600	92.200	0.000	0.000	0.000
25	1.026	-4.974	224.000	47.200	0.000	0.000	0.000

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
26	1.012	-6.209	139.000	17.000	0.000	0.000	0.000
27	0.992	-8.330	281.000	75.500	0.000	0.000	0.000
28	1.016	-2.468	206.000	27.600	0.000	0.000	0.000
29	1.019	0.458	283.500	26.900	0.000	0.000	0.000
30	0.984	-2.019	628.000	103.000	0.000	0.000	0.000
31	0.955	-6.529	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
32	0.935	-6.513	7.500	88.000	0.000	0.000	0.000
33	0.956	-6.378	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
34	0.955	-8.216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.957	-8.535	320.000	153.000	0.000	0.000	0.000
36	0.974	-6.892	329.400	32.300	0.000	0.000	0.000
37	0.981	-8.101	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38	0.981	-9.086	158.000	30.000	0.000	0.000	0.000
39	0.985	-1.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			6124.500	1593.360	6172.018	1574.852	0.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าจากโหลดโพลาร์ของระบบทดสอบ 39 บัส 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปลดสายส่งระหว่างบัส 23 กับบัส 24

Bus No.	Voltage	Angle	-----Load-----		---Generation---		Injected
	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	0.982	0.000	9.200	4.600	558.099	177.353	0.000
2	1.030	-11.152	1104.000	250.000	1000.000	237.146	0.000
3	0.983	2.256	0.000	0.000	650.000	185.787	0.000
4	1.012	3.117	0.000	0.000	508.000	172.914	0.000
5	0.997	4.162	0.000	0.000	632.000	122.583	0.000
6	1.049	10.639	0.000	0.000	650.000	308.984	0.000
7	1.063	15.154	0.000	0.000	560.000	210.393	0.000
8	1.028	1.683	0.000	0.000	540.000	40.123	0.000
9	1.027	7.414	0.000	0.000	830.000	73.070	0.000
10	1.048	-4.172	0.000	0.000	250.000	201.610	0.000
11	1.034	-9.504	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.014	-6.615	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.979	-9.628	322.000	2.400	0.000	0.000	0.000
14	0.944	-10.546	500.000	184.000	0.000	0.000	0.000
15	0.947	-9.257	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.948	-8.473	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.940	-10.953	233.800	84.000	0.000	0.000	0.000
18	0.941	-11.522	522.000	176.000	0.000	0.000	0.000
19	1.006	-11.357	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.955	-5.708	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.971	-1.621	274.000	115.000	0.000	0.000	0.000
22	1.011	5.613	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	1.017	7.115	274.500	84.660	0.000	0.000	0.000

Bus No.	Voltage	Angle	-----Load-----		---Generation---		Injected
	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
24	0.951	-8.142	308.600	92.200	0.000	0.000	0.000
25	1.023	-5.148	224.000	47.200	0.000	0.000	0.000
26	1.006	-6.377	139.000	17.000	0.000	0.000	0.000
27	0.983	-8.513	281.000	75.500	0.000	0.000	0.000
28	1.013	-2.616	206.000	27.600	0.000	0.000	0.000
29	1.017	0.320	283.500	26.900	0.000	0.000	0.000
30	0.981	-2.076	628.000	103.000	0.000	0.000	0.000
31	0.951	-6.651	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
32	0.930	-6.637	7.500	88.000	0.000	0.000	0.000
33	0.951	-6.504	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
34	0.948	-8.367	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.943	-8.704	320.000	153.000	0.000	0.000	0.000
36	0.957	-7.012	329.400	32.300	0.000	0.000	0.000
37	0.969	-8.264	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38	0.971	-9.270	158.000	30.000	0.000	0.000	0.000
39	0.979	-1.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			6124.500	1593.360	6178.099	1729.961	0.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์

การจำลองพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นต้องอาศัยวิธีการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายระบบไฟฟ้ากำลัง รูปแบบโดยทั่วไปเป็นตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u) \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ u เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรป้อนเข้า ซึ่งมีค่าคงที่หรืออาจเป็นฟังก์ชันของเวลา เช่น แรงดันไฟฟ้า หรือ ความเร็วของกรอบอ้างอิง (Reference Frame) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องเป็นต้น

สำหรับค่าเริ่มต้นของตัวแปร x ณ ที่เวลาเริ่มต้น t_0 (โดยทั่วไปกำหนดให้เวลาเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$) สามารถหาได้โดยการแทนค่าหรือกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสมการ(ค.1) แต่ปัญหาก็คือการหาค่าตัวแปร x ณ ที่เวลาผ่านไป ในบางครั้งพบว่าค่าเริ่มต้นของตัวแปร x มีความสำคัญในการหาผลลัพธ์ เนื่องจากลักษณะของสมการ (ค.1) มีผลเฉลยมากกว่าหนึ่งค่าในช่วงเวลา $t_0 < t < t_{\max}$ เมื่อ $t_{\max} \rightarrow t_{\infty}$ และโดยแท้จริงแล้วหากฟังก์ชัน f สอดคล้องกับเงื่อนไข ลิบชิตซ์ (Lipschitz Condition) [7]

$$|f(x, u) - f(x^*, u)| \leq L|x - x^*| \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ L คือค่าคงที่ลิบชิตซ์ (Lipschitz Constant) จะรับรองการมีผลเฉลยหนึ่งค่าสำหรับค่าเริ่มต้นของตัวแปร $x(t_0) = x_0$

มีอยู่สองหลักการในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ หลักการแรกคือ การหาผลเฉลยในรูปแบบของผลบวกจำกัดของฟังก์ชันตั้งฉาก (Orthogonal Function) เช่น การแทนในรูปแบบของอนุกรมผลบวก หรือ ผลบวกของฟังก์ชันตั้งฉากเป็นต้น หลักการที่สองคือ การหาผลเฉลยในลักษณะการประมาณในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ พิจารณาเวลาที่ $t_k = kh$ ($t_0 = 0$) เมื่อ h คือระยะห่างระหว่างจุดเวลา อย่างไรก็ตามนั้นขนาดระยะห่าง (Step Size) ของ h นั้นส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน (Error) ในการประมาณค่าผลเฉลย

อย่างไรก็ตามในส่วนของความคลาดเคลื่อนจากการประมาณผลเฉลยนั้นแบบเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. Truncation Error เป็นความคลาดเคลื่อนของค่าจริงของผลเฉลยกับค่าประมาณของผลเฉลย

2. Round-off Error ความคลาดเคลื่อนจากการไม่สามารถแทนค่าจริงของตัวแปรใน
วิธีการประมาณผลเฉลย

วิธีรุงเง-คูตดา

วิธีรุงเง-คูตดา เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์โดยให้
ความเที่ยงตรงสูง

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (\text{ค.3})$$

First Order:

Forward Euler

$$x_k = x_{k-1} + hf(x_{k-1}, t_{k-1}) \quad (\text{ค.4})$$

Backward Euler

$$x_k = x_{k-1} + hf(x_k, t_k) \quad (\text{ค.5})$$

Second Order

Trapezoidal

$$x_k = x_{k-1} + \frac{h}{2} [f(x_k, t_k) + f(x_{k-1}, t_{k-1})] \quad (\text{ค.6})$$

Modified Euler-Cauchy Algorithm

$$x_k = x_{k-1} + hf\left(x_{k-1} + \frac{h}{2} f(x_{k-1}, t_{k-1}), t_{k-1} + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{ค.7})$$

Modified Euler-Heun Algorithm

$$x_k = x_{k-1} + \frac{h}{2} [f(x_{k-1}, t_{k-1}) + f(x_{k-1} + hf(x_{k-1}, t_{k-1}), t_k)] \quad (\text{ค.8})$$

Fourth Order

$$k_1 = f(x_{k-1}, t_{k-1}) \quad (\text{ค.9})$$

$$k_2 = f\left(x_{k-1} + \frac{h}{2} k_1, t_{k-1} + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{ค.10})$$

$$k_3 = f\left(x_{k-1} + \frac{h}{2} k_2, t_{k-1} + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{ค.11})$$

$$k_4 = f(x_{k-1} + hk_3, t_k) \quad (\text{ค.12})$$

รูปแบบของการคำนวณคือ

$$x_k = x_{k-1} + \frac{h}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \quad (\text{ค.13})$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง หลักการของไลอະพูนอฟ

ในปี 1892 เอ เอ็ม ไลอະพูนอฟ ได้นำเสนอการหาจุดสมดุลเสถียรภาพสำหรับระบบพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$\dot{x} = f(x), \quad f(0) = 0 \quad (\text{ง.1})$$

นิยาม เสถียรภาพ

ที่จุดสมดุล $x = 0$ ในสมการ (ง.1) จะมีเสถียรภาพตามแนวคิดของไลอະพูนอฟ ถ้าทุกค่าจริง $\varepsilon > 0$ และเวลาเริ่มต้น $t_0 > 0$ มีจำนวนจริง $\delta(\varepsilon, t_0) > 0$ ซึ่งทุกค่าเริ่มต้นนั้นสอดคล้องกับสมการ

$$\|x(t_0)\| = \|x_0\| < \delta \quad (\text{ง.2})$$

และการเคลื่อนที่สอดคล้องกับ

$$\|x(t)\| < \varepsilon \quad \text{สำหรับทุกค่า } t \geq t_0 \quad \text{สัญลักษณ์ } \|\cdot\| \text{ แทนค่านอร์ม}$$

การหาจุดสมดุลเสถียรภาพของระบบพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถหาได้โดยไม่ต้องมีการอินทิเกรต ถ้ามีฟังก์ชันสเกลาร์ $V(x)$ สำหรับสมการ (ง.1) ที่เป็น Positive Definite และอนุพันธ์ $\dot{V}(x) < 0$ แล้วจะเกิดสมดุลอะซิมโทติก (Asymptotically Stable) $\dot{V}(x) < 0$ นั้นหาได้จาก

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \dot{x}_i &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i(x) \\ &= \nabla V^T \cdot f(x) \end{aligned} \quad (\text{ง.3})$$

นั่นคือสามารถหาค่า $\dot{V}(x)$ จากการคำนวณจาก $f(x)$ โดยตรง ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ฟังก์ชันไลอະพูนอฟหรือฟังก์ชันพลังงาน $V(x)$ โดยทั่วไปนั่นคือ ผลรวมของพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์ของระบบหลังกำจัดฟอลต์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอุดมการณ์ สมานมิตร เกิดวันที่ 25 ตุลาคม 2519 จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย