สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์เลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายและศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีต่างชนิด

IMPACT STUDY OF DISTRIBUTION GENERATOR AND TYPE OF GENERATION TECHNOLOGY

โดย

นายภูมิบดินทร์ ภูมิศิริไพบูลย์
นายรัตพงษ์ สุขเกษม
นายปรีชา นูพลกรัง
นายวงศกร มณีวรรณ
นายวรพล พัวรัตนอรุณกร

ปพ
ภ669ก
2550
เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 81798
วัน,เดือน,ปี 24 มิ.ย. 2551
b 11936290
i

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายและศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีต่างชนิด

IMPACT STUDY OF DISTRIBUTION GENERATOR AND TYPE OF GENERATION TECHNOLOGY

โดย

นายภูมิบดินทร์ ภูมิศิริไพบูลย์

นายรัตพงษ์ สุขเกษม

นายปรีชา นูพลกรัง

นายวงศกร มณีวรรณ

นายวรพล พัวรัตนอรุณกร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชาย ชมภูอินไหว

รศ. ศุลี บรรจงจิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์เลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบกระจายและศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีต่างชนิด

ผู้จัดทำ

1. นายภูมิบดินทร์ ภูมิศิริไพบูลย์
2. นายรัตพงษ์ สุขเกษม
3. นายปรีชา นูพลกรัง
4. นายวงศกร มณีวรรณ
5. นายวรพล พัวรัตนอรุณกร

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ศุลี บรรจงจิตร)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กาวิเคราะห์เลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายและศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีต่างชนิด

นายภูมิบดินทร์ ภูมิศิริไพบูลย์
นายรัดพงษ์ สุขเกษม
นายปรีชา นูพลกรัง
นายวงศกร มณีวรรณ
นายวรพล พัวรัดนอรุณกร
รศ. ศุลี บรรจงจิดร อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการติดตั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อแก้ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ ๆ เสี่ยงต่อเสถียรภาพของแรงดันโดยเริ่มต้นวิธีการวิเคราะห์คอนทินเจนซีเพื่อศึกษาหาพื้นที่ๆ จะติดตั้งในเบื้องต้นจากนั้นทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ที่เกิดปัญหา และทำการวิเคราะห์ถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในสภาวะอยู่ตัว และสภาวะชั่วขณะนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนการติดตั้ง และนำเสนอถึงเทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาติดตั้งชนิดต่างๆรวมไปถึงผลที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPACT STUDY OF DISTRIBUTION GENERATOR AND TYPE OF GENERATION TECHNOLOGY

Phumbordin Phumsiriphaibun
Rattaponk Sukkasem
Preecha Noopolkrung
Wongsakorn Maneewan
Vorapol Puawrattanaarunkorn
Asst. Prof Sulee Bunjongjit Supervisor
Dr. Chai Chompoo-inwai Supervisor
2007

ABSTRACT

This thesis is about impact study of generator in distribution network for solve violation problem in weak location and start with contingency analysis to find optimal location in basic then add new generation in this area and analysis for steady-state , dynamic and transient to compare result of violation, under voltage and dynamic performance when we add new generator in this network, finally we propose impact of type generator technology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร. ชาย ชมภูอินไหว และ รศ. ศุลี บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ สำหรับท่านคณาจารย์ ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชา ตั้งแต่เริ่มเข้าการศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่าน นำมาประกอบในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกๆคนในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและนอกภาควิชาที่ให้กำลังใจในการทำงานสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ผู้ที่มอบชีวิต การศึกษา และอนาคตที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้กับคณะผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ....................I
ABSTRACT....................II
กิตติกรรมประกาศ....................III
สารบัญ....................IV
สารบัญภาพ....................VII
สารบัญตาราง....................VIII
บทที่ 1 บทนำ....................1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา....................1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ....................1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน....................1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน....................2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน....................2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย....................3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง....................4
2.1 การรักษาความปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลัง....................4
2.1.1 System monitoring....................4
2.1.2 Contingency analysis....................5
2.1.3 Security-constrained optimal power flow....................5
2.2 การวิเคราะห์การไหลของภาระไฟฟ้า....................5
2.2.1 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง....................5
2.2.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า....................5
2.2.3 แอดมิดแดนซ์เมทริกซ์ของโครงข่ายระบบไฟฟ้า....................7
2.2.4 วิธีการแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน – ราฟสัน........8
2.2.5 แบบจำลองโหลด....................11
2.2.6 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....................14
2.3 ขีดจำกัดการจ่ายโหลดสูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้า....................17
2.3.1 ขีดความสามารถสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง....................17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.3.2 ขีดความสามารถสูงสุดของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า..............................26

2.4 Fault Analysis..27

2.4.1 ลักษณะการเกิด Fault แต่ละประเภท..28

2.4.2 การคำนวณ fault จะมี 3 วิธีคือ...29

2.5 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาวะชั่วครู่..29

2.5.1 สมการ สวิง (Swing Equation)...30

2.5.2 การศึกษาสภาวะชั่วครู่โดยวิธีการทางเวลา 30

บทที่ 3 ออกแบบการทดลอง...33

3.1 ข้อกำหนดการวางแผน..34

3.1.1 การกำหนดหลักเกณฑ์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า.......................34

3.1.2 โครงการร่างการตัดสินใจเลือกข้อกำหนดความเชื่อถือได้
ของระบบไฟฟ้า...34

3.2. การวิเคราะห์สภาวะ Steady-State...38

3.2.1 การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ...........................38

3.2.2 การทดสอบ Single Contingency..38

3.2.3 การวิเคราะห์ Contingency..39

3.2.4 การเลือก Contingency หลายระดับ..44

3.2.5 การประเมินผล Contingency..45

3.2.6 การควบคุมระบบไฟฟ้า...45

3.2.7 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย...47

3.2.8 การเลือก Contingency..47

3.2.9 การเลือกคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์...48

3.2.10 วิธีการแก้ไขปัญหาระดับกระแสฟอลต์เกินขีดจำกัดอุปกรณ์.............49

3.2.11 การแก้ไขปัญหาระบบไฟฟ้าไม่รองรับ N-1 หรือเสริม ความมั่นคงของ
ระบบ...52

3.3 การวิเคราะห์สภาวะ Transient and Dynamic.......................................52

3.3.1 การศึกษา LOAD FLOW ของระบบ..54

3.3.2 การศึกษาการจำลองระบบในสภาวะ DYNAMIC................................54

บทที่ 4 ผลการทดลอง...57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

4.1 การวิเคราะห์ Contingency..........58
4.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..........68
4.3 กระบวนการในการเลือกจุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่..........69
4.4 การศึกษาระบบในสภาวะ steady state..........75
4.5 เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด..........84

บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ..........87
5.1 ที่มาและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..........87
5.2 กระบวนการในการหาจุดติดตั้งที่เหมาะสม..........87
5.3 การศึกษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งใหม่..........88
5.4 ผลการวิเคราะห์..........89
5.5 ข้อเสนอแนะในการแก้ไข..........90
บรรณานุกรม..........91
ภาคผนวก..........92
ประวัติผู้แต่ง..........94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงข้อมูลและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..15
2.2 พิกัดกระแสการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า ขนาด 795MCM ACSR........24
2.3 พิกัดกระแสการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า ขนาด 1272 MCM ACSR..25
3.1 การทดสอบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า...37
4.1 แสดงค่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้า System Voltageและ Voltage Regulation ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค...58
4.2 แสดงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกจากระบบ และผลกระทบจากการหลุดออกของอุปกรณ์...62
4.3 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,SKA 2750, PKC-2 2276 ภายหลังจากการวิเคราะห์ Contingency...66
4.4 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,SKA 2750, PKC-2 2276 ภายหลังจากการวิเคราะห์ Contingency เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว...72
4.5 แสดงผลของจำนวนครั้งที่เกิด Violation ระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 โครงข่ายระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัส i.......7

2.2 วงจรสมมูลซีเควนซ์บวกของโครงข่ายระบบไฟฟ้า Node I.......7

2.3 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส 0069.......8

2.4 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน.......11

2.5 แบบจำลองมาตรฐานการไหลของกำลังไฟฟ้า.......12

2.6 คุณลักษณะของโหลดชนิด MVA คงที่.......12

2.7 Curve แสดงผล กระแส/แรงดัน ของโหลดชนิด MVA คงที่.......12

2.8 คุณลักษณะของโหลดชนิดกระแสคงที่.......13

2.9 Curve แสดงผล MVA/แรงดัน ของโหลดชนิดกระแสคงที่.......14

2.10 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.......15

2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทเวนิน.......16

2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนอร์ตัน.......17

2.13ก. ลัดวงจร three-phase fault แบบไม่ลง Ground.......28

2.13ข. ลัดวงจร three-phase fault แบบลง Ground.......28

2.13ค. ลัดวงจรแบบ Single line fault แบบลง Ground.......28

2.13ง. ลัดวงจรแบบ Line to line fault.......28

2.13จ. ลัดวงจรแบบ Double line fault แบบลง Ground.......28

3.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency.......40

3.2 การปลดสายส่ง AB ออกจากระบบทั้ง 2 วงจร.......51

4.1 แสดงโฟลว์ชาร์ตของกระบวนการทดลอง.......57

4.2 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ contingency แบบ N-1 ของสายส่ง.......59

4.3 กราฟแสดงความถี่ของบัสที่ถูกส่งผลกระทบหลังจากการวิเคราะห์ Contingency.......59

4.4 แสดง single line diagram โครงข่ายระบบไฟฟ้าของบัส PKC-1 2211, SKA 2750,PKC-2 2276 และบริเวณใกล้เคียง.......60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 แสดง power flow ของบัส PKC-1 2211......61

4.6 แสดง power flow ของบัส PKC- 2276......61

4.7 แสดง power flow ของบัส SKA 2750......61

4.8 แสดงตัวอย่างของแรงดันที่บัส PKC-1 2211, PKC-2 2276 และ SKA 2750 เมื่อสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 1 หรือ 2 หลุดออกจากระบบ......67

4.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงกระบวนการเลือกที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......68

4.10 แสดง single line diagram ของระบบหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......70

4.11 แสดง single line diagram ของ Generator และบริเวณใกล้เคียงหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......70

4.12 แสดง power flow ที่ไหลในระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......71

4.13 แสดง power flow ที่ไหลในระบบหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......71

4.14 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,PKC-2 2276 และ SKA 2750 หลังจากที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส test 38033......73

4.15 แสดง power ที่บัส Gen ขณะที่ติดเครื่องกำเนิดขนาด 20 MW เข้าที่บัส 38033......74

4.16 แสดง power ที่บัส Gen ขณะที่ติดเครื่องกำเนิดขนาด 50 MW เข้าที่บัส 38033......74

4.17 ผลการจำลองสภาวะDynamic ในขณะที่ไม่มีสิ่งรบกวน (Normal Condition) ของ Generator ทั้ง 3 ชนิด......76

4.18 (a) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง RRSG ที่บัส Test 38033...... 76

4.18 (b) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง SPSG ที่บัส Test 38033......77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 (c) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง IG ที่บัส Test 38033....................77

4.19 (a) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก.............78

4.19 (b) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก.............78

4.19 (c) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก.............79

4.19 (d) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก.............79

4.20 (a) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033 - 2706 ออก...........80

4.20 (b) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก.............80

4.20 (c) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก.............81

4.20 (d) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก.............81

4.21 (a) เกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก.....82

4.21 (b) แสดงแรงดันเมื่อเกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276-2706 ออก (Induction Generator).............83

4.21 (c) แสดงแรงดันเมื่อเกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276-2706 ออก (Round Rotor).............83

4.21 (d) เกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ออกจากระบบถาวร.............84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากการขยายตัวของชุมชน อุตสาหกรรม และเศรษฐกิจในปัจจุบันนี้ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ การตอบสนองต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นนั้น จำเป็นที่จะต้องเพิ่มแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันนี้ประเทศไทยนั้นใช้ทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้าประเภทถ่านหิน,ก๊าซธรรมและน้ำมันเตาเป็นหลัก ภายในประเทศมีทรัพยากรจำพวกก๊าซธรรมชาติน้อยมากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แต่ในสภาวะการปัจจุบันทรัพยากรประเภทนี้กำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีราคาสูงมากขึ้น ประเทศไทยจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาหาแนวทางในการนำพลังงานหมุนเวียนและวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้เพื่อลดต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small Power Producer, SPP) จึงได้รับความสนใจเนื่องจากโรงไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถใช้วัตถุดิบ ประเภทชีวมวลในการผลิต ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ทั่วไปในประเทศและยังสามารถกระจายตัวอยู่ตามแหล่งชุมชนได้อย่างทั่วถึง การติดตั้งโรงไฟฟ้าจะมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม จึงต้องมีการศึกษาการติดตั้งโรงไฟฟ้า สถานที่ติดตั้ง และขนาดของการติดตั้งเพื่อให้เหมาะสมต่อระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ในชุมชนเพื่อเสถียรภาพที่ดีของระบบไฟฟ้า

ภายในโครงงานฉบับนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาการติดตั้งโรงไฟฟ้าขนาดเล็กไปที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพราะภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโรงไฟฟ้าอยู่น้อยมาก โรงไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากผู้ใช้ไฟฟ้ามากทำให้สายส่งมีระยะไกล ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจึงต้องการโรงไฟฟ้าเพิ่มเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าและเพื่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาหาตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distribution Generator, DG)
2. เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distribution Generator, DG) ต่อระบบไฟฟ้า
3. เพื่อเป็นกรณีศึกษาสำหรับผู้ที่สนใจและเป็นแนวทางในการศึกษาของผู้ที่สนใจที่จะทำการปรับปรุงหรือพัฒนา

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

โครงงานนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generator ,DG) โดยพิจาณาจุดติดตั้งเบื้องต้นจากซึ่งใช้การวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contingency แบบ N-1 โดยจะทำการพิจารณาเฉพาะในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในที่พื้นที่อื่นๆ แล้วทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ในสภาวะ steady state analysis และ dynamic & transient analysis โดยนำโปรแกรม PSS/E และ Powerworld Simulation V.8 มาใช้ในการวิเคราะห์ และระบบไฟฟ้าที่นำมาศึกษาจะเป็นระบบไฟฟ้าทดสอบที่ใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าของประเทศไทยในปี 2550

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาระบบไฟฟ้า Base Case (ระบบไฟฟ้าทดสอบ)
2. การวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 โดยใช้โปรแกรม Powerworld Simulation V.8
3. รวบรวมสถิติของบัสที่ถูกผลกระทบมากที่สุด หลังจากการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1
4. ศึกษาระบบในบริเวณหรือบัสที่ภาวะที่เกิดปัญหาทั้งในสภาวะ steady state โดยใช้โปรแกรม Powedrworld Simulation V.8 และสภาวะ Dynamic โดยใช้โปรแกรม PSS/E
5. ศึกษาระบบไฟฟ้าในพื้นที่ที่พิจารณาหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะ steady state รวมไปถึง การวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1โดยใช้โปรแกรม Powerworld Simulation V.8 และสภาวะ Dynamicโดยใช้โปรแกรม PSS/E
6. ศึกษาเปรียบเทียบระบบไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

เนื้อหางานที่ทำ	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและค้นคว้าข้อมูลที่จะศึกษา										
ศึกษาโปรแกรมและโมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์										
รวยรวมรายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อหางานที่ทำ	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
ทำการรันโปรแกรมและเก็บรวบรวมข้อมูล						X	X	X		
วิเคราะห์ผลการทดลอง							X	X	X	
จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์			X	X	X	X	X	X	X	X

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ความรู้เรื่องการพยากรณ์ผลที่เกิดจากสภาวะการ outage ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ระบบทั้งในสภาวะ steady state และสภาวะ Dynamic ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจริง
3. สามารถทราบถึงปัญหาที่เกิดจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสามารถบอกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใด ที่ส่งผลดีต่อระบบ
4. สามารถบอกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเท่าใดที่เหมาะสมที่สุดในระบบที่ถูกพิจารณา
5. สามารถทราบถึงขั้นตอนที่ควรจะวิเคราะห์ภายหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรักษาความปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัจจัยสำคัญของการออกแบบให้ระบบสามารถคงอยู่ในสภาวะที่ปลอดภัยอยู่ได้ซึ่งเกี่ยวกับการออกแบบในทางปฏิบัติ ให้ระบบยังสามารถทำงานอยู่ได้เมื่อองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งในระบบเกิดล้มเหลวขึ้นตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งอาจจะถูกตัดออกจากระบบเพราะการหลุดออกของอุปกรณ์ป้องกันและเพื่อให้ยังคงมีค่าที่เหมาะสมของพลังงานสำรองหน่วยอื่น ๆ ที่เหลือในระบบจะต้องช่วยจ่ายในส่วนที่ขาดหายไปโดยไม่ทำให้ความถี่ลดต่ำลงไปหรือต้องปลดภาระไฟฟ้าใดภาระไฟฟ้าหนึ่งออกไปแทน ในกรณีเดียวกันสายส่งไฟฟ้ากำลังอาจจะถูกทำให้เสียหายจากพายุหรือถูกปลดโดยอัตโนมัติจากอุปกรณ์ป้องกันอัตโนมัติ สายส่งไฟฟ้าอื่น ๆ ที่เหลือ ต้องสามารถรับภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและยังคงมีการไหลของภาระไฟฟ้าผ่านตัวมันอยู่ในพิกัดที่จะรับได้

เนื่องจากไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าเมื่อใดจะเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งของระบบเกิดล้มเหลวขึ้น ระบบยังต้องทำงานอยู่ตลอดเวลาโดยห้ามให้อยู่ในสภาวะที่อันตราย และเนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังถูกออกแบบให้ทำงานได้ในพิกัดที่แน่นอน อุปกรณ์ส่วนมากจึงมักจะถูกป้องกันโดยอุปกรณ์อัตโนมัติต่าง ๆ อีกทีซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ถูกตัดออกจากระบบเมื่ออุปกรณ์เกิดความรุนแรงถึงค่าพิกัดของมัน ถ้าเกิดเหตุการณ์ขึ้นในระบบซึ่งทำให้การทำงานของระบบยังคงอยู่ในช่วงของความรุนแรงเกินพิกัดเหตุการณ์นั้นอาจจะทำให้เกิดการตัดอุปกรณ์อื่น ๆ ออกจากระบบต่อเนื่องตามไปด้วย ซึ่งถ้ากระบวนการนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ แล้วระบบทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ของระบบจะเกิดการเสียหายอย่างมาก

ส่วนมากระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ มักจะติดตั้งเครื่องมือเพื่อให้เจ้าหน้าที่ควบคุมสังเกตได้ สามารถควบคุมการทำงานของระบบให้อยู่ในสภาวะที่ปลอดภัยได้ตลอดเวลา การรักษาความปลอดภัยของระบบมีหน้าที่สำคัญที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 หน้าที่ใหญ่ ๆ ซึ่งจะถูกดำเนินการในศูนย์ควบคุมการทำงานดังนี้

2.1.1 System monitoring จะมีหน้าที่จัดหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องในลักษณะเวลาจริง ๆ ในสภาวะการทำงานขณะนั้น ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังตลอดเวลาให้แก่เจ้าหน้าที่ควบคุม ซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญที่สุดใน 3 หน้าที่ที่กล่าวถึงโดยเริ่มตั้งแต่เวลาที่มีการจ่ายภาระไฟฟ้าเกิดขึ้น การทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบต้องการค่าต่าง ๆ ที่สามารถส่งผลให้เกิดอันตรายได้ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกวัดและถูกส่งมายังศูนย์กลางการปฏิบัติงาน ระบบที่วัดค่าต่าง ๆ และส่งข้อมูลมานี้เรียกว่าระบบสื่อสารทางไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 Contingency analysis ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถทำให้ระบบรับความผิดปกติในการดำเนินการได้อย่างดีขึ้น ปัญหาหลาย ๆ อย่างที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถก่อให้เกิดความยุ่งยากได้ในเวลาอันสั้น เจ้าหน้าที่ไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ทันซึ่งปัญหาเหล่านี้จะเกิดขึ้นบ่อย ดังนั้นคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันที่ใช้ในการปฏิบัติการจะถูกติดตั้งโปรแกรมการวิเคราะห์คอนทินเจนซี ซึ่งจะจำลองปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบก่อนที่มันจะเกิดขึ้นจริง โปรแกรมนี้จะอยู่บนฐานของแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และถูกใช้เพื่อศึกษาเหตุการณ์หลุดออกหลุดออกของอุปกรณ์ไฟฟ้า (outage) จากนั้นจะส่งสัญญาณเตือนเจ้าหน้าที่เมื่อมีภาระไฟฟ้าเกินพิกัดหรือแรงดันไฟฟ้ากินพิกัดที่อันตรายเกิดขึ้น

2.1.3 Security-constrained optimal power flow ในหน้าที่นี้การวิเคราะห์คอนทินเจนซีจะรวมกับออพติมัลพาวเวอร์โฟลว์ ซึ่งจะค้นหาเพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงการกำเนิดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกับการปรับแต่งอื่น ๆ ดังนั้นเมื่อการวิเคราะห์การรักษาความปลอดภัยนี้ได้ถูกดำเนินการแล้วจะไม่มีผลของคอนทินเจนซีใด ๆ นำไปสู่ความรุนแรงได้

2.2 การวิเคราะห์การไหลของภาระไฟฟ้า

2.2.1 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการจำลองระบบไฟฟ้าตามรูปแบบของโปรแกรม PSS/E สามารถแบ่งประเภทของบัสที่สำคัญๆ ออกเป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ

1. Load Bus เป็นบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดต่ออยู่ ซึ่งจะทราบค่า P_k และ Q_k และต้องการคำนวณหาค่า V_k และ δ_k
2. Generator Bus เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดเชื่อมต่ออยู่
3. Swing Bus ในการจำลองระบบไฟฟ้าจะต้องมี Swing Bus 1 บัส และกำหนดให้เป็นบัสที่ 1 โดยกำหนดขนาดแรงดันมีค่าเท่ากับหนึ่งและมุมของแรงดันเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (2.1)

โดยปกติ Swing Bus จะมีเครื่องกำเนิดต่ออยู่ Swing Bus แตกต่างกับ Generator Bus ที่ Swing Bus สามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟได้อย่างไม่จำกัดจำนวน

$$V_1 = 1\angle 0 \tag{2.1}$$

4. Isolated Bus เป็นบัสที่ไม่ได้ใช้งานอยู่ในระบบ (out of service) และอุปกรณ์ทุกชนิดที่ต่ออยู่กับบัสประเภทนี้ถูกปลดออกจากระบบทั้งหมด รวมทั้งจะต้องไม่มีเครื่องกำเนิดต่ออยู่ ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจะไม่นำบัสประเภทนี้มาคิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นปัญหาอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้า ซึ่งในการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่นำมาใช้ต้องอาศัยเทคนิคต่างๆ การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวจะอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งการทำงานของระบบไฟฟ้าที่อยู่ในสภาวะสมดุล แรงดันซีเควนซ์ลบ และซีเควนซ์ศูนย์จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติจะต้องมีเฉพาะซีเควนซ์บวกเท่านั้น ข้อมูลอินพุทที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ามีดังนี้

1. ค่าอิมพีแดนซ์ และ Charging Admittance ของสายส่งไฟฟ้า
2. ค่าแอดมิดแดนซ์ และ Tap Ratio ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. โหลดในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้า
4. กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือของโรงงานทั้งหมด
5. ขนาดแรงดันที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่อง 6. ความสามารถสูงสุดในการรับ-จ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่อง

ส่วนค่าต่างๆ ที่ต้องคำนวณหาจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามีดังนี้

1. ขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆ ทั้งหมดที่ไม่ได้กำหนดค่าจากข้อมูลอินพุท
2. มุมเฟสของแรงดันที่บัสต่างๆ ทั้งหมด
3. กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ไม่ได้กำหนดค่า
4. กำลังไฟฟ้าจริง กำลังรีแอกทีฟ และกระแสที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ทั้งหมด

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้า ซึ่งในโครงข่ายระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_n = Y_{nn} V_n \tag{2.2}$$

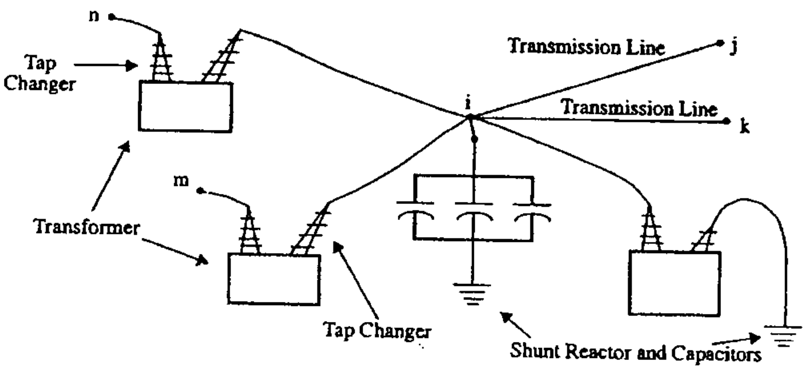
เมื่อ I_n = เวกเตอร์ของกระแสซีเควนซ์บวกที่ไหลเข้า Node (บัส) ของโครงข่าย

V_n = เวกเตอร์ของแรงดันซีเควนซ์บวกที่ Node (บัส) ของโครงข่าย

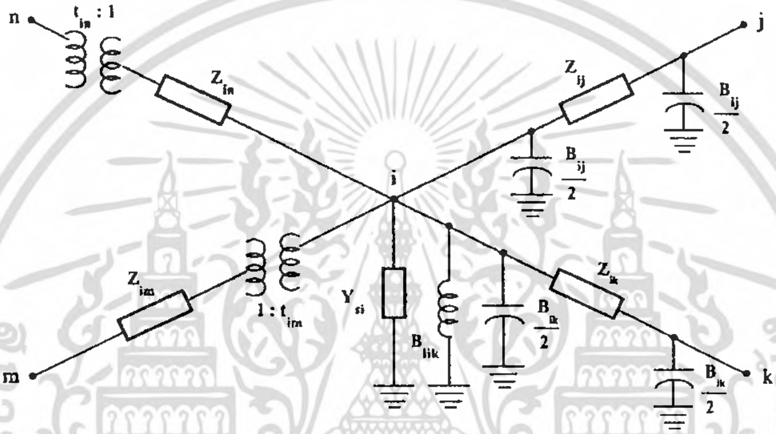
Y_{nn} = แอดมิดแดนซ์เมทริกซ์ของโครงข่ายระบบไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.2) ถ้าเราทราบค่ากระแส I_n หรือแรงดัน V_n จะสามารถคำนวณหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง แต่ในความเป็นจริงจะไม่ทราบค่า I_n และ V_n ดังนั้นถ้าเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีโครงข่ายที่ยุ่งยากซับซ้อนจึงมีความจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาค่าดังกล่าว เนื่องจากการคำนวณโดยใช้เครื่องคำนวณจะใช้เวลานาน และผลที่ได้จะมีว่าถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัส i



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลซีเควนซ์บวกของโครงข่ายระบบไฟฟ้า Node i

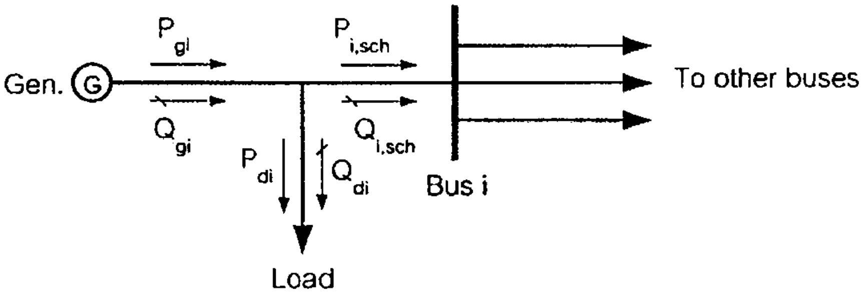
2.2.3 แอดมิดแดนซ์เมทริกซ์ของโครงข่ายระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.1 แสดงโครงข่ายระบบไฟฟ้าที่มีสายส่งไฟฟ้า 2 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้า 1 ชุดมีที่เปลี่ยน Tap อยู่ด้านแรงดันต่ำ และหม้อแปลงอีก 1 ชุดมีที่เปลี่ยน Tap อยู่ด้านแรงดันสูง รวมทั้งมีคาปาซิเตอร์แบบขนานและรีแอกเตอร์แบบขนานเชื่อมต่ออยู่กับบัส i ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ (2.2)

จากรูปที่ 2.2 เมื่อแรงดัน V_i, V_j, V_m และ V_n เป็นแรงดันที่ Node i, j, k, m และ n ตามลำดับ ที่เชื่อมต่อกับ Node i ซึ่งสามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้ารวม i_i ที่ไหลเข้า Node i ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$i_i = v_i Y_{si} + \frac{v_i - v_j}{Z_{ij}} + \frac{v_i B_{ij}}{2} + \frac{v_i - v_k}{Z_{ik}} + \frac{v_i B_{ik}}{2} + v_i B_{lik} + \frac{\left(\frac{v_i}{t_{im}} - v_m\right)}{Z_{im} t_{im}} + \frac{\left(v_i - \frac{v_n}{t_{in}}\right)}{Z_{in}} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส i

จากสมการที่ (2.2) ถ้ามีแอดมิตแตนซ์ จำนวน N เชื่อมต่ออยู่กับ Node i สมการของกระแส I_i ที่ไหลเข้า Node i จะเป็น

$$I_i = \sum_{n=1}^{N} Y_{in} V_i \qquad n = 1, 2, \ldots, N \qquad (2.4)$$

2.2.4 วิธีการแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน – ราฟสัน

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งก็คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นสมการไม่เชิงเส้น และต้องใช้วิธีอิทเทอะเรทีฟ (Iterative) ในการแก้สมการ ซึ่งในโปรแกรม PSS/E มีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ นิวตัน ราฟสัน และเก๊าซ์ไซเดิล ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า [3] รูปที่ 2.3 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i ที่ใช้ในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.3 เมื่อกำหนดให้ $V_i = |V_i| \angle \delta_i, V_n = |V_n| \angle \delta_n$ และ $Y_{in} = |Y_{in}| \angle \theta_{in}$ สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังรีแอกทีฟที่บัส i ได้ดังสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ตามลำดับ

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 1}}^{N} |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \qquad (2.5)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 1}}^{N} |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \qquad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่บัสควบคุมแรงดันโดยจะกำหนดให้บัสอื่นๆ ทั้งหมดในระบบเป็นโหลดบัส (ยกเว้น Swing Bus) ซึ่งทราบค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า P_{di} และ Q_{di} และกำหนดขนาดและมุมของแรงดันที่ Swing Bus เป็น $|V_1|\angle\delta_1$ และที่บัสอื่นๆ ในระบบจะมีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าอยู่ 2 ตัวแปร คือ $|V_i|$ และมุม δ_1 และในการประมาณค่าขนาดและมุมของแรงดันที่โหลดบัส จะมี Power mismatch ดังนี้

$$\Delta P = P_{i,sch} - P_{i,calc} \tag{2.7}$$

$$\Delta Q = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} \tag{2.8}$$

เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น จึงเขียนสมการของ Power mismatch ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ของระบบไฟฟ้าที่มี 3 บัสได้ดังสมการ (2.9) เมื่อบัสที่ 1 เป็น Swing Bus ในการคำนวณจะเริ่มจากบัสที่ 2 เนื่องจาก Swing Bus ได้กำหนดทั้งขนาดและมุมของแรงดันไว้แล้ว

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

ระบบไฟฟ้าแต่ละระบบจะมีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ของระบบไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไป ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

เมื่อ [J] คือจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix)

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันมีขั้นตอนดังนี้

1. สมมุติค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ไม่ทราบค่าทุกบัส โดยการประมาณค่าขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$|V_i|$ และมุม $\delta_i^{(0)}$ ของแรงดันในรอบการคำนวณแรก

2. คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า $P_{i,calc}$ และ $Q_{i,calc}$ จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) Power mismatch ΔP_i และ ΔQ_i จากสมการที่ (2.7) และ (2.8)

3. ตรวจสอบเงื่อนไข

- ถ้า ΔP_i และ $\Delta Q_i \leq \varepsilon$ (Tolerance ε เป็นค่าความคาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอ เช่น 0.0001 p.u.) แล้วให้คำนวณหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เป็นอันสิ้นสุดการคำนวณ

- แต่ถ้า ΔP_i และ $\Delta Q_i \rangle \varepsilon$ ให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 4

4. คำนวณหาค่าจาโคเบียนเมตริกซ์

5. คำนวณหาค่า $\Delta\delta_i$ และ $\Delta|V_i|$ ของรอบการคำนวณถัดไป โดยการอินเวิร์สจาโคเบียนเมตริกซ์ ดังสมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta|V_i| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

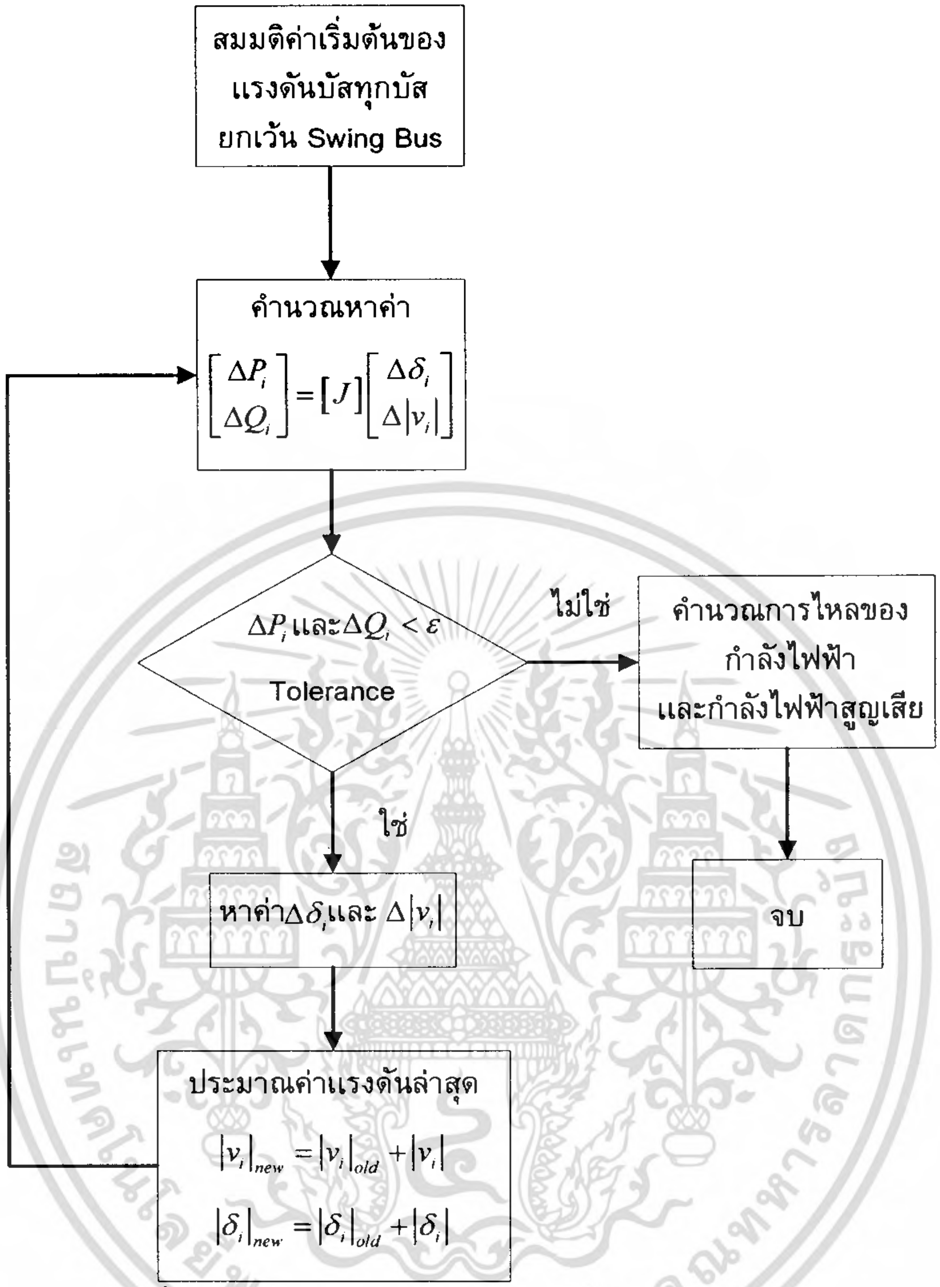
6. คำนวณหาค่าขนาด $|V_i|$ และมุม δ_i ของแรงดันใหม่ล่าสุด (update) โดยใช้ค่า $\Delta|V_i|$ และ $\Delta\delta_i$ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5

$$|V_i|_{new} = |V_i|_{old} + \Delta|V_i| \tag{2.12}$$

$$\delta_{i,new} = \delta_{i,old} + \Delta\delta_i \tag{2.13}$$

7. กลับไปคำนวณซ้ำในข้อที่ 2 โดยใช้ขนาด $|V_i|_{new}$ และมุม $\delta_{i,new}$ ของแรงดันที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 และสามารถเขียน Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดย วิธีการนิวตัน ราฟสัน ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



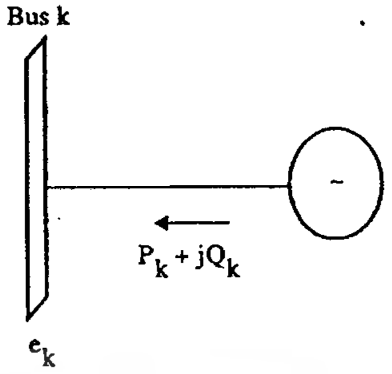
รูปที่ 2.4 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน

2.2.5 แบบจำลองโหลด

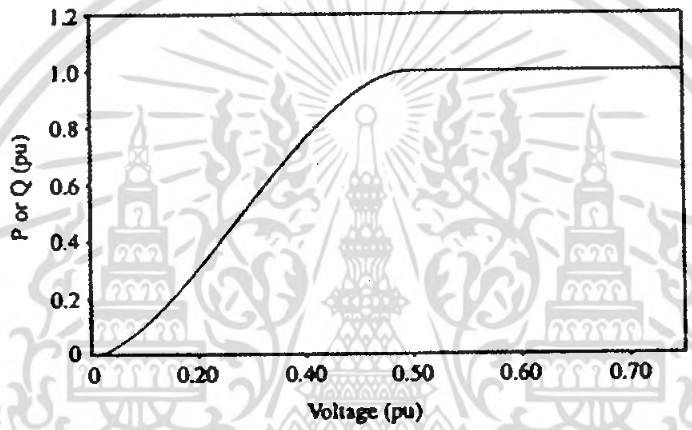
ในการจำลองระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่าโหลดในแต่ละบัส ซึ่งจะประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังรีแอกทีฟ รูปแบบจำลองของโหลดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. แบบจำลองโหลดชนิด MVA คงที่ โดยทั่วไปแบบจำลองของโหลดจะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟตามความต้องการใช้ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองมาตรฐานของการไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.5 สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) เป็นฟังก์ชันของ P_k และ Q_k โดยกำหนดขนาดแรงดันที่บัสได้ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7

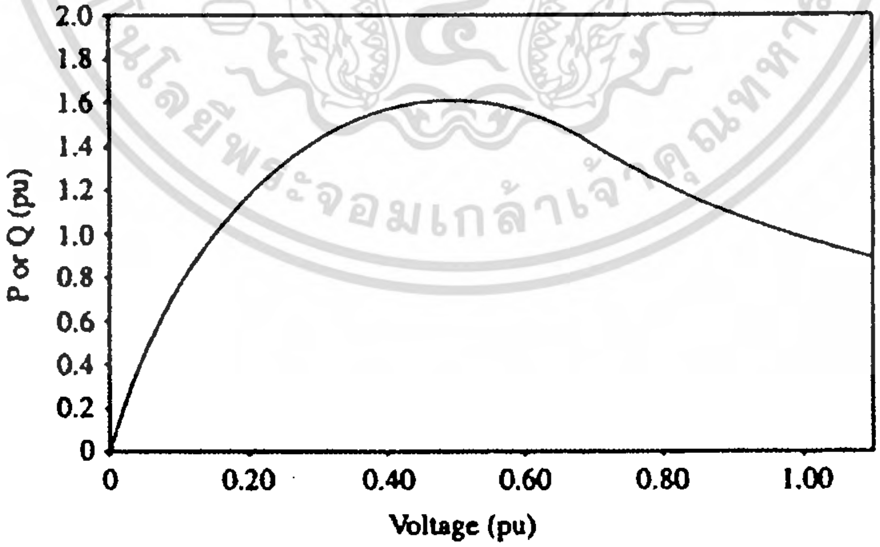
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองมาตรฐานการไหลของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะของโหลดชนิด MVA คงที่



รูปที่ 2.7 Curve แสดงผล กระแส/แรงดัน ของโหลดชนิด MVA คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

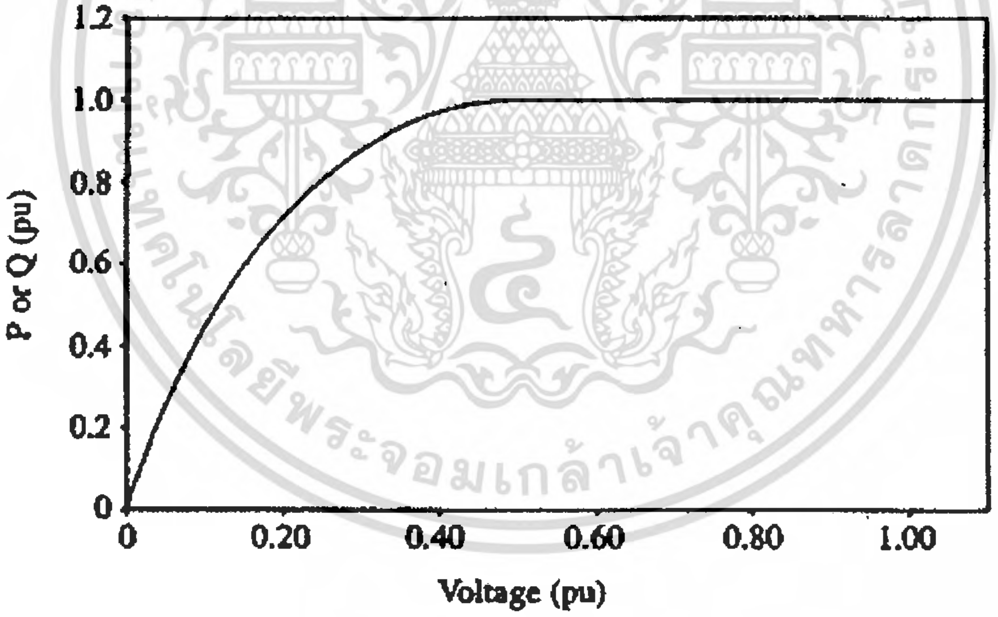
$$Real\ (v_k i_k^*) = -P_k \tag{2.14}$$

$$Imag\ (v_k i_k^*) = -Q_k \tag{2.15}$$

2. แบบจำลองโหลดชนิดกระแสคงที่ แบบจำลองของโหลดจะกำหนดเป็นกระแสใช้งาน (Active Current) หรือกระแสจินตภาพ (Reactive Current) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17) ตามลำดับ ซึ่งในการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าและไดนามิกส์ สามารถดัดแปลงสมการที่ (2.16) และ (2.17) เป็นฟังก์ชันของ I_{pk} และ I_{qk} กับแรงดันV_k ได้ดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9

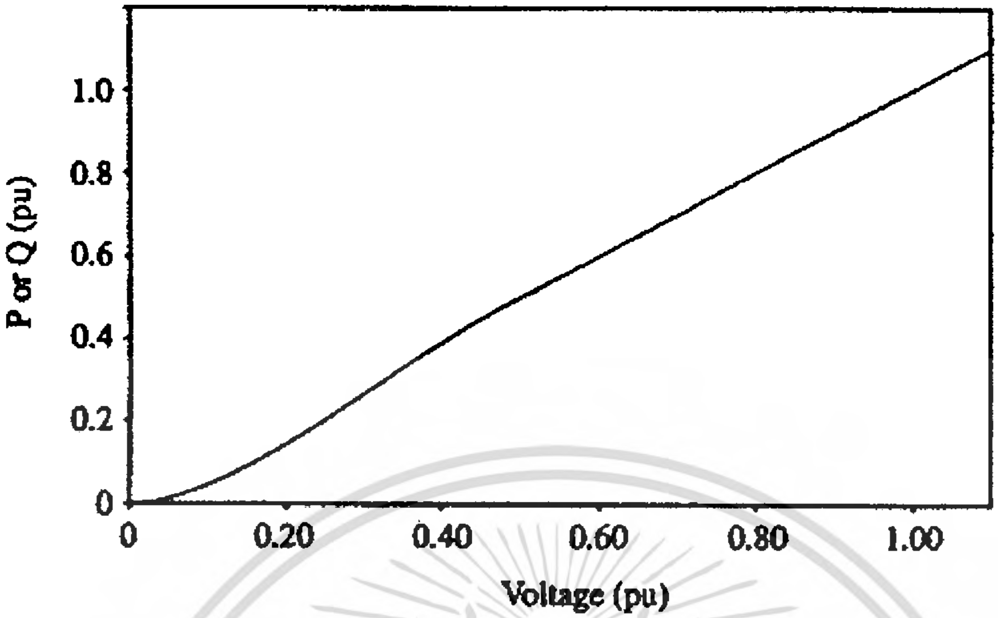
$$\frac{Real(v_k i_k^*)}{|v_k|} = -I_{pk} \tag{2.16}$$

$$\frac{Imag(v_k i_k^*)}{|v_k|} = -I_{qk} \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.8 คุณลักษณะของโหลดชนิดกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Curve แสดงผล MVA/แรงดัน ของโหลดชนิดกระแสคงที่

3. แบบจำลองโหลดชนิดอิมพีแดนซ์คงที่ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นแบบจำลองของชันท์แอดมิตแดนซ์ (Shunt admittance) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.18)

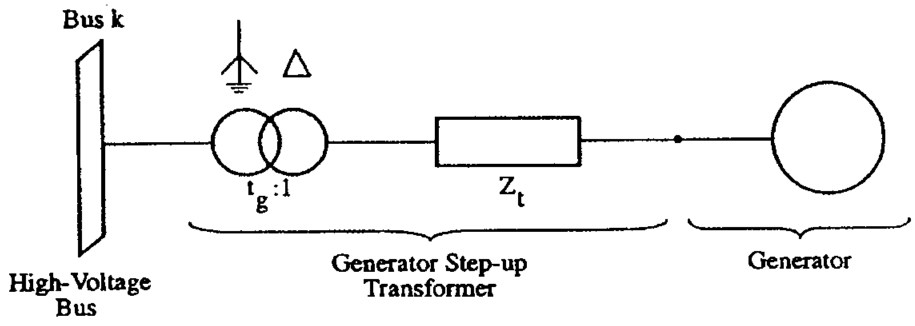
$$\frac{i_k}{v_k} = G_k + jB_k \tag{2.18}$$

3. แบบจำลองโหลดแบบผสม (Composite Load) เป็นแบบจำลองที่ผสมคุณลักษณะของโหลดตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปของแบบจำลองโหลดทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวข้างต้น

2.2.6 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปแบบของโปรแกรม PSS/E สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมีข้อมูลและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้เครื่องกำเนิดต่ออยู่กับบัส k ผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่มีอิมพีแดนซ์ Z_t, $R_t + jX_t$ p.u. ที่ MVA_{base} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกำหนดกำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตที่บัสแรงดันสูงที่บัส k ดังสมการที่ (2.19) รวมทั้งกำหนดขนาดแรงดันโดยไม่จำเป็นจะต้องเป็นบัส k ดังสมการที่ (2.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ปริมาณ	อักษรย่อ	หน่วยวัด
กำลังรีแอกทีฟเอาต์พุทที่บัส k	Q_{gen}	Mvar
กำลังรีแอกทีฟเอาต์พุทสูงสุดที่บัส k	Q_{max}	Mvar
กำลังรีแอกทีฟเอาต์พุทต่ำสุดที่บัส k	Q_{min}	Mvar
Base MVA ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	MBASE	MVA
ตำแหน่ง Tap ของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่อยู่ทางด้านบัส k	GEN_{tap}	Per unit
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน	Z_{tran}	Per unitที่ Base MBASE
Generator Dynamic Impedance	Z_{sorce}	Per unit ที่Base MBASE
Alternative Generator Dynamic Impedance	Z_{pos}	Per unit ที่ Base MBASE
กำลังไฟฟ้าจริงเอาท์พุตสูงสุดที่บัส k	P_{max}	MW
กำลังไฟฟ้าจริงเอาท์พุตต่ำสุดที่บัส k	P_{min}	MW

$$P_k = Real\,(v_k i_k^*) \qquad (2.19)$$

$$|V_i| = V_{sched} \qquad (2.20)$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรักษาระดับแรงดันให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา แต่จะต้องไม่เกิดขีดความสามารถการรับหรือการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.21)

$$Q_{max} \leq Imag(v_k i_k^*) \leq Q_{max\,k} \qquad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.21) สิ่งที่สำคัญคือจะต้องทราบขีดความสามารถกำลังรีแอกทีฟเอาต์พุทสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส k ในการประยุกต์ใช้กำลังรีแอกทีฟเอาต์พุดที่วัดได้ที่บัสด้านแรงดันสูง ซึ่งไม่ใช่ที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ดังนั้นการกำหนด $Q_{min\,k}$ และ $Q_{max\,k}$ จะต้องแยกกำลังรีแอกทีฟที่บัส k สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเพาเวอร์แฟคเตอร์แบบล้าหลัง (lagging) มีค่าเท่ากับขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ลบด้วยกำลังรีแอกทีฟสูญเสียที่กระแสโหลดเต็มพิกัด (Full load) ดังสมการที่ (2.22)

$$Q_{limit\,k} = Q_{limit\,g} - X_t\,MBASE \qquad (2.22)$$

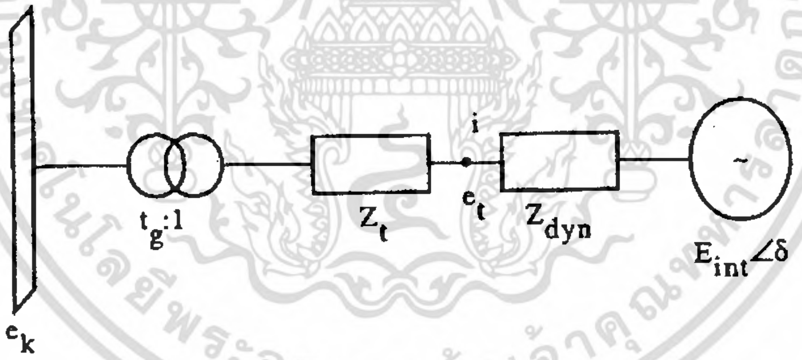
และสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเพาเวอร์แฟคเตอร์แบบนำหน้า (leading) สามารถหาขีดจำกัดของกำลังรีแอกทีฟที่บัส k ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$Q_{limit\,k} = Q_{limit\,g} + X_t\,MBASE \qquad (2.23)$$

เมื่อ X_t = รีแอกแดนซ์ของหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่ Base เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)

$Q_{limit\,g}$ = ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Mvar)

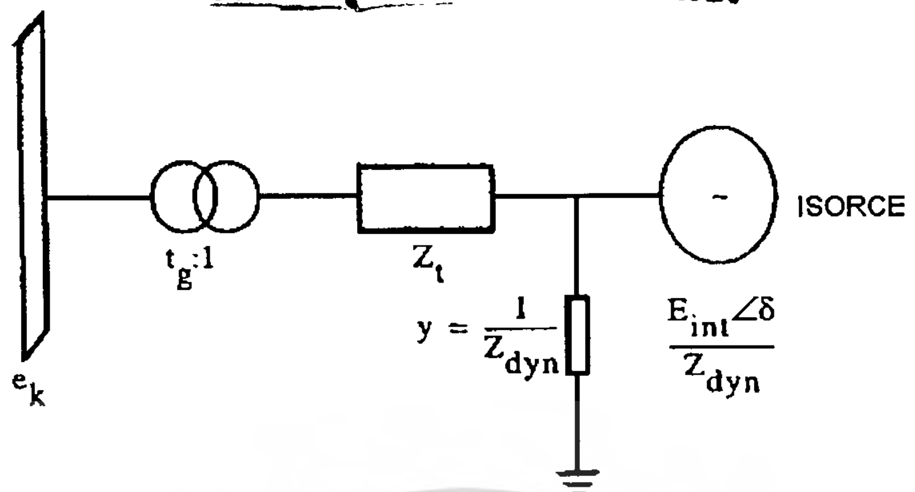
$Q_{limit\,k}$ = ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟสูงสุดหรือต่ำสุดที่บัส k ($Q_{min\,k}$ or $Q_{max\,k}$) (Mvar)



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทเวนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนอร์ตัน

ในการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ไดนามิกส์ และสวิทชิ่งปลด – สับอุปกรณ์ จะต้องเขียนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลแบบเทเวนิน หรือนอร์ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

2.3 ขีดจำกัดการจ่ายโหลดสูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในสภาวะปกติศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าจะควบคุมการจ่ายโหลดของอุปกรณ์ให้อยู่ในพิกัดตลอดเวลา แต่ถ้าควบคุมให้อุปกรณ์ไฟฟ้าจ่ายโหลดอยู่นอกพิกัดจะทำให้อุปกรณ์อาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ โดยทั่ว ๆ ไปพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ พิกัดตามฤดูกาล พิกัดระยะยาว (Long-time rating) และพิกัดระยะสั้น (Short-time rating) ซึ่งขนาดพิกัดของอุปกรณ์จะพิจารณาจากขนาดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความร้อนของอุปกรณ์จะทนได้ หรือความสามารถในการทนความร้อนในระบบส่งอาจจะเกิดข้อขัดข้องขึ้นได้ตลอดเวลา แต่เพื่อรักษาระบบส่งมิให้กระทบกระเทือนถึงผู้ใช้ไฟฟ้าอุปกรณ์ที่เหลืออยู่ในระบบอาจจะต้องจ่ายโหลดเกิดพิกัด แต่ต้องควบคุมปริมาณการจ่ายโหลดเกินพิกัดและเวลาไม่ให้มากจนเกินไป เพื่อรักษาอายุการใช้งานให้ใช้ได้ตามกำหนด ซึ่งตามหลักการวางแผนระบบส่ง อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายโหลดเกินพิกัดได้มี 2 อย่างด้วยกันคือ สายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบส่งจะให้จ่ายโหลดสูงสุดได้ไม่เกินพิกัดของอุปกรณ์ ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการอธิบายขีดจำกัดการจ่ายโหลดสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าพอสังเขป เพื่อเป็นทฤษฎีในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่อไป

2.3.1 ขีดความสามารถสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

การใช้งานสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การใช้งานในกรณีปกติ และการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน เพื่อมิให้สายไฟฟ้าเสียหายเนื่องจากความร้อน อันจะมีผลทำให้อายุการใช้งานของสายส่งลดลงเร็วกว่ากำหนด และโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจเป็นอันตรายต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
81798

ประชาชน จึงต้องมีการกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสายส่งไฟฟ้า ทั้งการใช้งานในกรณีปกติและฉุกเฉินเพื่อให้การใช้งานสายส่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

2.3.1.1 การประเมินขีดความสามารถของสายส่งไฟฟ้า

ขีดความสามารถหรือขีดจำกัดในการใช้งานของระบบส่งไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบไฟฟ้าในชั่วขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาถึงแม้ระบบไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้วก็ตาม ทั้งนี้เป็นไปตามสภาพของการผลิตและการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าในขณะนั้นๆ และขีดความสามารถในการใช้งานของสายส่งไฟฟ้าไม่ได้จำกัดเพียงเฉพาะการใช้งานในสภาวะปกติเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงภาวการณ์ใช้งานทั้งในขณะและหลังจากเกิดข้อขัดข้องในส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้าด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่ระบบฟ้าอยู่สภาวะชั่วครู่เมื่อเกิดเหตุผิดปกติในระบบ (System Disturbance) หรือเกิดข้อขัดข้อง (Fault หรือ Outage) ขึ้นในระบบไฟฟ้า หรืออยู่ในสภาวะชั่วครู่เนื่องจากการตัดตอนวงจรไฟฟ้า (Switching) ขีดความสามารถของระบบไฟฟ้าจะต้องทำให้ระบบไฟฟ้าคงเสถียรภาพต่อไปหรือไม่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลุกลามจนเกิดไฟฟ้าดับไปทั้งระบบ

การประเมินหรือกำหนดขีดความสามารถของระบบส่งไฟฟ้า หรือสายส่งไฟฟ้าชุดใดชุดหนึ่งจึงต้องมีการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะต่างๆ ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาขั้นต้น อาจจะประเมินขีดความสามารถในการส่งไฟฟ้า (Power Transfer Capability) ของสายส่งไฟฟ้าอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้

ขีดความสามารถในการส่งไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าชุดใดชุดหนึ่ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่

1. อุณหภูมิสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ให้ใช้งาน อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับฤดูกาล ความเร็วและทิศทางลม รวมทั้งประสิทธิภาพในการแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์
2. ความยาวของสายส่งไฟฟ้า
3. ระดับแรงดันไฟฟ้า ทั้งแรงดันไฟฟ้าต้นทาง และแรงดันไฟฟ้าปลายทาง
4. มุมของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างแรงดันไฟฟ้าต้นทางและปลายทาง

ปัจจัยบางข้อ เช่น ข้อ 1 และข้อ 2 ก็อาจจะกำหนดได้แน่นอน แต่ปัจจัยข้อ 3 และข้อ 4 เป็นปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้าในชั่วขณะใดขณะหนึ่ง ความสัมพันธ์ของความสามารถในการส่งพลังงานไฟฟ้ากับปัจจัยต่างๆ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} Sin\delta \qquad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = ปริมาณพลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งโดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิใช้งานของสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบตามที่ออกแบบไว้ (MW)

E_1 = แรงดันไฟฟ้าต้นทาง (kV)

E_2 = แรงดันไฟฟ้าปลายทาง (kV)

δ = ผลต่างของมุมของแรงดันไฟฟ้าต้นทาง และปลายทาง

X = ค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของสายส่งไฟฟ้า (Ω)

จากสมการที่ (2.24) จะเห็นว่าในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในภาวะอยู่ตัว ปริมาณพลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะผ่านสายส่งเมื่อมุม δ มีค่า 90 องศา (Sin δ = 1) แต่เนื่องจากปัญหาทางด้านเสถียรภาพของระบบ ในภาวะปกติการควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าจะยอมให้มุม δ มีค่าเข้าใกล้ 90 องศาโดยจะควบคุมให้มุม δ มีค่าไม่เกิน 30 องศา (เป็นค่าที่เผื่อไว้สำหรับการไม่ให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพในขณะระบบไฟฟ้าเกิดเหตุไม่ปกติ) [1] สำหรับการเพิ่มขีดความสามารถของสายส่งในแง่ของปัญหาเสถียรภาพของระบบนั้น จากสมการที่ (2.24) จะเห็นว่าสามารถติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเพื่อเพิ่มขีดจำกัดนี้ได้ เช่น การใช้คาปาซิเตอร์แบบอนุกรมลดค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่งไฟฟ้า นอกจากนั้นหากใช้สายไฟฟ้าหลายเส้นต่อเฟส (Bundled Conductors) จะช่วยเพิ่มขีดจำกัด ตลอดจนการใช้อุปกรณ์พิเศษทางด้านระบบควบคุมอีกหลายอย่าง ช่วยเพิ่มขีดจำกัดในการส่งสายไฟฟ้าต่อเนื่องจากปัญหาเสถียรภาพของระบบขึ้นได้

2.3.1.2 การคำนวณค่าพิกัดกระแสอยู่ตัวของสายส่งไฟฟ้า

ตามธรรมชาติเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสายส่งไฟฟ้าก็จะเกิดความร้อนที่สายไฟฟ้าเนื่องจากสายไฟฟ้ามีความต้านทาน ความร้อนมีค่าเท่ากับขนาดกระแสยกกำลังสองคูณกับขนาดความต้านทาน ($I^2 R$) ถ้าปริมาณของกระแสมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าคงที่ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศด้วนลมและการแผ่รังสี ส่วนความร้อนที่เหลือสะสมอยู่ในสายไฟฟ้าจะทำให้สายไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถูกระบายออกไป อุณหภูมิของสายไฟฟ้าก็จะคงที่

ในการใช้งานสายส่งไฟฟ้าตามปกติ จะต้องมีการควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งไม่ให้มากกว่าที่กำหนด เพราะว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้ามากเกินไปอุณหภูมิของสายไฟฟ้าจะสูงกว่าที่กำหนดจะมีผลทำให้สายมีการหย่อนตัว (Sag) มากขึ้น และสายไฟฟ้าจะสูญเสียความแข็งแรง (Tensile Strengh) ซึ่งจะส่งผลให้สายส่งมีอายุการใช้งานสั้นลง จึงต้องมีการกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดของสายส่งขณะใช้งานปกติ คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายไฟฟ้าและสภาวะของการใช้งานให้เหมาะสม แล้วนำมาใช้กับสมการสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นที่สายไฟฟ้าก็จะสามารถคำนวณหาค่าพิกัดกระแสอยู่ตัว (Steady current rating) ที่ถูกต้องเหมาะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2.1 สมการสมดุลความร้อน

ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้า มีสาเหตุมาจากกระแสที่จ่ายผ่านสายส่งไฟฟ้า และความร้อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งสามารถเขียนสมการการสมดุลของความร้อนที่เกิดขึ้นที่สายไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.24)

$$I^2R + H_S = H_F + H_R \tag{2.24}$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง (A_{rms})

R = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของสายไฟฟ้าที่อุณหภูมิการใช้งานใดๆ(Ω/cm)

H_S = การดูดซับความร้อนจากแสงแดด (W/cm)

H_F = การสูญเสียความร้อนเนื่องจากลม (W/cm)

H_R = การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์ (W/cm)

โดยที่

$$H_S = \alpha S' d \tag{2.25}$$

$$H_F = 13.3 \times 10^{-4} \left(V_d\right)^{0.448} \theta \tag{2.26}$$

$$H_R = \pi d E S\left[\left(\theta + \theta_a + 273\right)^4 - \left(\theta_a + 273\right)^4\right] \tag{2.27}$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดซับแสงแดดของผิวสายไฟฟ้า

S' = ความเข้มของแสงแดด (W/cm^2)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า (cm)

V = ความเร็วลม (cm/s)

θ = อุณหภูมิของสายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (°C)

E = Relative emissivity ของผิวสายไฟฟ้า (ไม่มีหน่วย)

θ_a = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C)

2.3.1.2.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้า แบ่งขั้นตอนการคำนวณออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) การคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของสายไฟฟ้ารูปทรงกระบอกกาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A} \tag{2.28}$$

เมื่อ R_{dc} = ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของสายไฟฟ้า (Ω)

ρ = ค่าความต้านทานำเพาะของวัสดุ (Ω • m)

l = ความยาวของสายไฟฟ้า (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า

นอกจากนี้ค่าความต้านทานของสายไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการ (2.29)

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \tag{2.29}$$

เมื่อ R_{t1} = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ t_1 ใดๆ (Ω)

R_{t2} = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ t_2 (Ω)

T = ค่าคงที่อุณหภูมิของสายไฟฟ้า (°C)

t_1 = อุณหภูมิที่ 1 (°C)

t_2 = อุณหภูมิที่ 2 (°C)

2) การคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

ในระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ความต้านทานของสายส่งจะมีผลจากกระแสที่ไหลตามผิวตัวนำ (Skin effect) กล่าวคือความหนาแน่นของกระแสในแกนกลางของตัวนำจะน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้กับผิวตัวนำ เสมือนว่าเมื่อนำตัวนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจะมีค่าความต้านทานมากกว่าใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง ในบางครั้งจะเรียกค่านี้ว่า “ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ” ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของสายไฟฟ้านี้คำนวณได้จากสมการที่ (2.29) สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$R_o = K_S R_{t2} \tag{2.30}$$

เมื่อ R_0 = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับตอนแรกของสายไฟฟ้าใน Base Case (Ω)

K_S = ค่า Skin effect ของสายไฟฟ้า ซึ่งค่า K_S นี้จะเป็นฟังชันก์กับ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$X = 0.063598\sqrt{\frac{\mu f}{R_{mile}}} \quad (2.31)$$

โดย f = ความถี่มูลฐานของระบบ (50 Hz)

μ = ความซึมทราบ(permeabitity)ของวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (1.0)

R_{mile} = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสดรงของสายไฟฟ้า (Ω / mile)

2.3.1.3 พิกัดกระแสและระยะเวลาใช้งานสายส่งไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน

ในระบบการผลิตและส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า อาจจะเกิดข้อขัดข้องในสายส่งขึ้นได้ตลอดเวลาและมีผลกระทบต่อระบบ แต่เพื่อรักษาระบบการส่งมิให้กระทบกระเทือนจนเป็นเหตุให้ไฟฟ้าดับและผู้ใช้เดือดร้อนน้อยที่สุด สายส่งที่เหลืออาจจะต้องมีการโหลดเกินพิกัดทางความร้อนในช่วงระยะเวลาสั้นๆ แต่ต้องควบคุมปริมาณการจ่ายเกินพิกัดไม่ให้มากจนเกินไป เพื่อรักษาอายุการใช้งานสายส่งให้ได้ตามกำหนด ในทางตรงกันข้ามถ้าแก้ไขเหตุการณ์โดยการปลดสายส่งที่จ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อนออกจากระบบทันที นอกจากจะเป็นผลเสียต่อระบบและผู้ใช้ไฟแล้วยังอาจมีผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหาย เนื่องจากมีการปลดโหลดโดยกะทันหัน ดังนั้นการแก้ไขเหตุการณ์ที่เหมาะสมคือจำเป็นจะต้องยอมให้สายส่งมีการจ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อนในระยะเวลาสั้นๆ จนกว่าจะมีการแก้ไขเหตุการณ์ให้ดีขึ้น

การจ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อนของสายส่งไฟฟ้า จะทำให้สายส่งไฟฟ้าซึ่งถูกแรงดึงอยู่มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าปกติ และมีผลทำให้สายไฟฟ้าได้รับความเสียหาย กล่าวคือสายส่งไฟฟ้าจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงดึงมากกว่าปกติ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิของสายส่งไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเกินพิกัด สายส่งยืดตัวทำให้ความยาวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะการหย่อนของสายส่งไฟฟ้า จะทำให้ระยะห่างระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับพื้นดิน (Ground Clearance) ลดลงจนอาจเป็นอันตรายต่อทรัพย์สินและประชาชนใต้แนวสายส่งไฟฟ้า

1) ข้อกำหนดการจ่ายโหลดเกินพิกัดกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า

เพื่อให้การจ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อนในกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า โดยไม่ทำให้สายไฟฟ้าเสียหายและเป็นอันตรายต่อคนหรือทรัพย์สินที่อยู่ใต้สายส่ง ข้อกำหนดที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติการสูญเสียความแข็งแรงของสายส่งไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้าจะยืดมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าและระยะเวลาการจ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อน ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

1. สายส่งไฟฟ้าที่พาดในอากาศ (Overhead Line) ที่สามารถจ่ายโหลดเกินพิกัดทางความร้อนได้จะต้องเป็นชนิดสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยเสริมแกนเหล็ก (Aluminium Conductor Steel Reinforced; ACSR) เท่านั้น เนื่องจากแกนเหล็กจะช่วยรับแรงดึงได้ดีในขณะที่อุณหภูมิของสายส่งไฟฟ้าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสูญเสียความสามารถในการทนต่อแรงดึงของสายส่งไฟฟ้า (Loss of strength) เมื่อสายส่งไฟฟ้าหมดอายุการใช้งาน จะต้องไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการทนต่อแรงดึงของสายส่งไฟฟ้าเมื่อเริ่มใช้งาน

3. อุณหภูมิสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าจะต้องไม่เกิน 125 องศาเซลเซียส

4. ระยะเวลาของการใช้สายส่งไฟฟ้าจ่ายโหลดเกินพิกัด ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส รวมทั้งหมดแล้วจะต้องไม่เกิน 1,000 ชั่วโมง

2) การคำนวณหาพิกัดกระแสการใช้งานสายส่งไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน

จากสมการการสมดุลของความร้อน

$$P\Delta\theta = \left[\left(I^2R + H_s\right) - \left(H_F + H_R\right)\right]\Delta t$$

ดังนั้นอุณหภูมิของสายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น คือ

$$\Delta\theta = \frac{\left[\left(I^2R + H_s\right) - \left(H_F + H_R\right)\right]}{P}\Delta t \qquad (2.31)$$

โดยที่ $P = 4.186(C_1W_1 + C_2W_2)$

เมื่อ P = พิกัดทางความร้อนของสายไฟฟ้า (J/cm°C)

$\Delta\theta$ = อุณหภูมิของสายส่งไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (°C)

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง (A_{rms})

R = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของสายส่งที่อุณหภูมิใดๆ (Ω/cm)

H_s = การดูดซับความร้อนจากแสงแดด (W/cm)

H_F = การสูญเสียความร้อนเนื่องจากลม (W/cm)

H_R = การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์

Δt = ช่วงระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง (10 วินาที)

C_1 = ค่าความร้อนจำเพาะของอลูมิเนียม (0.215 Cal/g°C)

C_2 = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (0.11 Cal/g°C)

W_1 = น้ำหนักของสายอลูมิเนียม (g/cm)

W_2 = น้ำหนักของแกนเหล็ก (g/cm)

สำหรับค่าของ H_S, H_F, H_R สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.25), (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ และในการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสการใช้งานสายส่งไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน จะต้องกำหนดค่าคงที่ของสายส่งไฟฟ้าแต่ละขนาดได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของสายไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ค่าพิกัดกระแสอยู่ตัวของสายส่งไฟฟ้า รวมทั้งค่าพิกัดทางความร้อนของสายไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพิกัดกระแสการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานสายส่งไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉินของสาย 795 และ 1272 MCM ACSR ได้ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 พิกันกระแสการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า ขนาด 795 MCM ACSR

กระแส(A)	เปอร์เซนต์ของการจ่ายโหลด	เวลาของการจ่ายโหลดเกินพิกัด	หมายเหตุ
n x 899.8	110	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 82.49 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง 45 นาที 39 วินาที
n x 981.6	120	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 90.96 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง 55 นาที 0 วินาที
n x 1063.9	130	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 100.44 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 1 นาที 0 วินาที
n x 1145.2	140	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 111.0 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 4 นาที 50 วินาที
n x 1227.0	150	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 122.67 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 7 นาที 50 วินาที
n x 1308.8	160	21 นาที 9 วินาที	
n x 1390.6	170	13 นาที 49 วินาที	
n x 1472.4	180	10 นาที 19 วินาที	
n x 1554.2	190	8 นาที 19 วินาที	
n x 1636.0	200	6 นาที 50 วินาที	

หมายเหตุ * คือ อุณหภูมิของสายอิ่มตัวก่อนที่จะถึง 125 องศาเซลเซียส

n คือ จำนวนสายไฟฟ้า 1, 2 หรือ 4 เส้นต่อเฟส

อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส,อุณหภูมิเริ่มต้นของการจ่ายโหลดเกินพิกัด 75 องศาเซลเซียส,อุณหภูมิสุดท้ายของการจ่ายโหลดเกินพิกัน 125 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 2.2 กิโลเมตร/ ชั่วโมง,ความเข้มของแสงแดด 0.06 วัตต์/ ตารางเซนติเมตร,สัมประสิทธิ์การดูดซับแสงแดดของผิวสายไฟฟ้า 0.75, Relative Emissivity ของผิวสายไฟฟ้า 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 พิกัดกระแสการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของสายส่งไฟฟ้า ขนาด 1272 MCM ACSR

กระแส(A)	เปอร์เซนต์ของการจ่ายโหลด	เวลาของการจ่ายโหลดเกินพิกัด	หมายเหตุ
n x 1185.8	110	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 82.21 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 10 นาที 10 วินาที
n x 1293.6	120	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 90.38 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 21 นาที 30 วินาที
n x 1401.4	130	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 90.48 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 28 นาที 49 วินาที
n x 1509.2	140	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 109.56 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 33 นาที 10 วินาที
n x 1617.0	150	*	อุณหภูมิของสายอิ่มตัวที่ 120.66 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง 37 นาที 0 วินาที
n x 1724.8	160	30 นาที 9 วินาที	
n x 1832.6	170	18 นาที 50 วินาที	
n x 1940.4	180	13 นาที 49 วินาที	
n x 2048.2	190	11 นาที 0 วินาที	
n x 2156.0	200	9 นาที 0 วินาที	

หมายเหตุ * คือ อุณหภูมิของสายอิ่มตัวก่อนที่จะถึง 125 องศาเซลเซียส

n คือ จำนวนสายไฟฟ้า 1, 2 หรือ 4 เส้นต่อเฟส

อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 35 องศาเซลเซียล, อุณหภูมิเริ่มต้นของการจ่ายโหลดเกินพิกัด 75 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิสุดท้ายของการจ่ายโหลดเกินพิกัน 125 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 2.2 กิโลเมตร/ ชั่วโมง,ความเข้มของแสงแดด 0.06 วัตต์/ ตารางเซนติเมตร ,สัมประสิทธิ์การดูดซับแสงแดดของผิวสายไฟฟ้า 0.75, Relative Emissivity ของผิวสายไฟฟ้า 0.6

จากตารางที่ 2.2 และ 2.3 สามารถสรุปการใช้งานสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยเสริมแกนเหล็กในกรณีฉุกเฉินได้ ดังนี้

1. การจ่ายโหลดของสายส่งไฟฟ้าไม่เกิน 150 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดทางความร้อน อุณหภูมิอิ่มตัวของสายส่งไฟฟ้าจะต่ำกว่า 125 องศาเซลเซียส ดังนั้นการจ่ายโหลดเกินพิกัดด้วยปริมาณนี้สามารถทำได้ ส่วนระยะเวลาของการจ่ายได้นานเพียงไรขึ้นอยู่กับความจำเป็นของระบบและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้เพิ่มแฟคเตอร์ของความปลอดภัยโดยกำหนดให้สายส่งไฟฟ้าจ่ายโหลดได้ไม่เกิน 140 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจ่ายโหลดของสายส่งไฟฟ้าตั้งแต่ 150 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปของพิกัดทางความร้อนอุณหภูมิอิ่มตัวของสายส่งไฟฟ้าจะสูงกว่า 125 องศาเซลเซียส ดังนั้นการจ่ายโหลดเกินพิกัดด้วยปริมาณนี้สายส่งไฟฟ้าสามารถรับได้ในเวลาอันจำกัด ก่อนที่อุณหภูมิสายส่งไฟฟ้าจะถึง 125 องศาเซลเซียส จะต้องลดกระแสที่จ่ายเกินให้ได้ ถ้าลดไม่ได้ให้ดำเนินการปลดสายส่งนั้นออกจากระบบ

การจ่ายโหลดเกินพิกัดของสายส่งไฟฟ้านั้น จะทำให้สายส่งมีอายุการใช้งานลดลง ดังนั้นจะจ่ายโหลดเกินพิกัดเฉพาะในกรณีจำเป็นจริงๆ เท่านั้น โดยควบคุมปริมาณการจ่ายโหลดเกินพิกัดและระยะเวลาให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.3.2 ขีดความสามารถสูงสุดของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า

หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าจะมีขดลวดที่หุ้มด้วยฉนวนและแช่อยู่ในน้ำมัน น้ำมันหม้อแปลงจะมีหน้าที่ที่สำคัญ 2 อย่างคือ เป็นตัวช่วยระบายความร้อนจากขดลวดและแกนเหล็กไปยังอากาศภายนอก และทำหน้าที่เป็นฉนวน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันสารที่เป็นฉนวน (น้ำมันหม้อแปลงและฉนวนหุ้มขดลวด) เกิดความเสียหายอันเนื่องจากความร้อน จึงต้องกำหนดขีดจำกัดการจ่ายโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง การที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะจ่ายเกินพิกัดได้มากและนานเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมาตรฐานความร้อนนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อกระดาษฉนวนในเรื่องของการเสื่อมสภาพ จากมาตรฐาน ANSI C 57-1981 และ IEC 76 (Guide for loading miniral oil immersed power transformer) ได้กำหนดไว้ว่า ถ้าค่า Tensile strength ของกระดาษฉนวนลดลงถึงครึ่งหนึ่งจากของเดิมเมื่อเริ่มนำเข้าใช้งาน ถือว่าหม้อแปลงชุดนั้นหมดสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน

2.3.2.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการจ่ายเกินพิกัด

1) การเกิดความร้อน ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ามาจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือส่วนที่เป็นขดลวดซึ่งมีกระแสไหลผ่านและส่วนที่เป็นโครงโลหะซึ่งมีกระแสไหลวนเนื่องจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Stray flux) โดยปริมาณความร้อนเหล่านี้ต่างก็เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสโหลด

2) ผลกระทบต่อส่วนประกอบของอุปกรณ์หม้อแปลง มีดังนี้

- มีการเสื่อมสภาพทางไฟฟ้าและทางกลของกระดาษฉนวน

- เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าร้อนมากกว่า 140 °C กระดาษฉนวนจะคายความชื้นออกมาในรูปของฟองแก๊ส ซึ่งทำให้ค่า Dielectric Strength ของน้ำมันลดลง

- มีการเสียรูปของขดลวด แกนเหล็ก และส่วนที่เป็นโลหะเนื่องจากการขยายตัว

- กระแสที่ผ่านตัวนำของ Bushing จะมาก ทำให้น้ำมันใน Bushing ขยายตัว มีความดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนอาจมีผลทำให้ประเด็นของ Bushing ทะลุได้

- ค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสของ on load tap changer จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำมันไปเกาะหน้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การสูญเสียอายุการใช้งาน จากมาตรฐาน ANSI C 57-1981 เรื่องจ่ายการโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้กล่าวถึงเรื่องอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยได้คาดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Life expectancy) ด้วยวิธีตาม ANSI C 57.91-1981 หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานประมาณ 7.5 ปี หรือ 6.5×10^4 ชั่วโมง (เสียอายุการใช้งานร้อยละ 0.0369 ต่อวัน) โดยจ่ายโหลดอย่างต่อเนื่องที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่โดยทั่วๆ ไปสภาพการจ่ายโหลดของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและการจ่ายโหลดจะไม่ถึงค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นหม้อแปลงจึงมีโอกาสที่จ่ายเกินพิกัดได้ โดยที่ยังคงเสียอายุการใช้งานตามปกติ ถ้าการจ่ายเกินพิกัดต่อหนึ่งครั้งนั้นเสียอายุการใช้งานไม่เกินร้อยละ 0.1 ต่อวัน

2.4 Fault Analysis

ในระบบการผลิตและการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดสภาวะผิดปกติทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ชำรุด วัสดุปลิวโดนสายส่ง ยานพาหนะรถยนต์ คนสัตว์ ต้นไม้และอื่นๆ ซึ่งระบบป้องกันจะต้องสามารถตัดระบบที่บกพร่องทางไฟฟ้าได้โดยเร็วที่สุด จึงต้องมีการวิเคราะห์ fault ในระบบไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความมั่นคงทางไฟฟ้า จึงต้องเลือกขนาดพิกัด (Interrupting capacity) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ให้เหมาะสม หรือเพื่อทราบค่ากระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือไม่ เพื่อที่จะได้เตรียมการหามาตรการป้องกันและปรับปรุงระบบไฟฟ้าเพื่อบรรเทาผลกระทบให้อยู่ในระดับที่พอยอมรับได้ ตลอดจนใช้ตั้งค่ารีเลย์ในระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 วิธี คือการคำนวณด้วยเครื่องคำนวณหรือการคำนวณโดยใช้มือ ซึ่งใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้าที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก เช่น การจ่ายไฟแบบเรเดียล เป็นต้น และการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีความยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำกว่าการคำนวณโดยใช้มือ

1) Shunt fault คือการเกิดการลัดวงจรที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง

2) Series Fault คือการเปิดการเปิดวงจรที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลัง

ใน Shunt fault จะสามารถแบ่งออกได้คือ

2.1) Balance Fault หรือ Symmetrical Short Circuit

Balance Fault $\rightarrow$ กระแส fault ในช่วง steady state ทั้ง 3ϕ เฟส มีค่าและมุม phase shift = 120° เท่ากันทุกเฟส เรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า Three-phase fault หรือ Three-phase to ground fault

2.2)Unbalance Fault หรือ Asymmetrical Short Circuit

Unbalance Fault $\rightarrow$ กระแสบางเฟสจะมากกว่าเฟสอื่น หรือมุม phase shift $\neq 120^\circ$ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

- Single line to ground fault (SLG)
- Line to line fault (L-L)

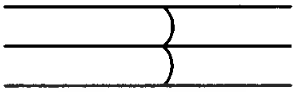
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Double line to ground fault (DLG)

- การเกิดFault อาจเกิดพร้อมกันทีละหลายๆประเภท ก็ได้ หรือเรียกว่า Simultaneous fault

2.4.1 ลักษณะการเกิด Fault แต่ละประเภท

2.4.1.1 Three-phase fault

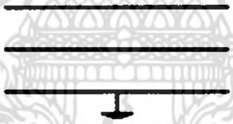


รูปที่ 2.13 ก. ลัดวงจร three-phase fault แบบไม่ลง Ground

2.4.1.2 Three-phase to ground fault

รูปที่ 2.13 ข. ลัดวงจร three-phase fault แบบลง Ground

2.4.1.3 Single line to ground fault (SLG)

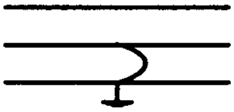


รูปที่ 2.13 ค. ลัดวงจรแบบ Single line fault แบบลง Ground

2.4.1.4 Line to line fault (L-L)

รูปที่ 2.13 ง. ลัดวงจรแบบ Line to line fault

2.4.1.5 Double line to ground fault (DLG)



รูปที่ 4.13 จ. ลัดวงจรแบบ Double line fault แบบลง Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การคำนวณ fault จะมี 3 วิธีคือ

1. ใช้วงจรสมมูลย์ของThevenin → คำนวณกระแสจาก balanced fault เท่านั้น
2. ใช้การคำนวณจาก Z-bus (Impedance matrix)
3. ใช้ Symmetrical component

2.5 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาวะชั่วครู่

เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเป็นคุณสมบัติของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถทำให้เครื่องจักรซิงโครนัส ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนและตอบสนองต่อการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบนอกเหนือจากสภาวะปกติแล้วสามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ใหม่อีกครั้งหนึ่งหลังการเปลี่ยนแปลง การศึกษาเสถียรภาพโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะและความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ความแตกต่างของการศึกษาเสถียรภาพในแบบต่างๆคือ การศึกษาเสถียรภาพช่วงทรานเซียนท์มุ่งศึกษาในการหาว่าระบบจะยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบได้หรือไม่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงเกิดขึ้นในระบบ กรณีที่ต้องศึกษาโดยวิธีทรานเซียนท์ เช่น การเกิดฟอลต์ในสายส่ง การเปลี่ยนโหลดทันทีทันใด การสูญเสียแหล่งจ่ายไฟหรือโรงจักรไฟฟ้า การสวิทซ์ชิ่งสายส่ง เป็นต้น

การศึกษาเสถียรภาพแบบไดนามิกส์และสภาวะคงตัวจะศึกษาเครื่องจักรหนึ่งถึงสามตัวในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบอย่างช้าๆและค่อยเป็นค่อยไป วิธีการศึกษาเสถียรภาพระบบแบบไดนามิกส์และสภาวะคงตัวจะเหมือนกัน จะมีข้อแตกต่างของการศึกษาทั้งสองแบบในรายละเอียดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ศึกษา โดยแบบไดนามิกส์ระบบเอ็กไซเทชั่น และระบบโกฟเวอร์เนอร์ของเทอร์ไบน์จะโมเดลร่วมกับโมเดลเครื่องจักรซิงโครนัส ซึ่งคิดผลการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในช่องอากาศภายในเครื่องจักรด้วย และแบบสภาวะคงตัวโดยใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย โดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนด้วยแหล่งจ่ายไฟคงที่และแสดงการหาคำตอบของการศึกษาเสถียรภาพแบบไดนามิกส์และสภาวะคงตัวก็คือการหาเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงรอบๆจุดสมดุลและสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแทนได้ด้วยชุดของสมการแบบเป็นเชิงเส้นและ วิเคราะห์สมการเหล่านี้เพื่อหาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นจะยังรักษาเสถียรภาพอยู่ได้หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรอบจุดสมดุล

ในปัจจุบันการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาวะไดนามิกส์ และสภาวะอยู่ตัวได้รับความสนใจน้อยลงไปและถูกแทนที่ด้วยการศึกษาเสถียรภาพของระบบในสภาวะชั่วครู่ซึ่งได้รับความสนใจและมีความสำคัญมากกว่าในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 สมการ สวิง (Swing Equation)

การศึกษาเถียรภาพโดยทั่วไป จะศึกษาแบบทรานเซียนท์ และไม่สามารถนำชุดสมาการเชิงเส้นมาใช้ได้ จึงต้องใช้การวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง

สมาการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะอาศัยพื้นฐานจากกฎในเรื่องไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่า ทอร์คเร่งคือผลคูณของโมเมนต์ความเฉื่อย(Moment of inertia) ของโรเตอร์ กับความเร่งเชิงมุม ทำให้สามารถเขียนสมาการสวิงของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดได้เป็น

$$\frac{2H}{\omega_s} * \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \qquad \text{(p.u.)} \qquad (2.32)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} * \frac{d\omega}{dt} = P_a = P_m - P_e \qquad \text{(p.u.)} \qquad (2.33)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s - \omega_s \qquad (2.34)$$

$$\omega_r = \omega - \omega_s \qquad (2.35)$$

โดยที่ H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (inertia constant)

ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า

ω คือ ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า

δ คือ มุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า

P_a คือ กำลังเร่ง (Acceleration power)

P_m คือ กำลังทางกล (Mechanical power)

P_e คือกำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)

T คือ เวลา

ค่าคงที่ความเฉื่อย(H), เวลา (t) มีหน่วยเป็นวินาที และ P_a , P_mและ P_e เป็นค่าเปอร์ยูนิตในฐานเดียวกับ H

2.5.2 การศึกษาสภาวะชั่วครู่โดยวิธีการทางเวลา

วิธีการทางเวลา (Time domain simulation method, TMD) เป็นวิธีการหาคำตอบในการศึกษาเถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแม่นยำและเชื่อถือมากที่สุด ไม่มีข้อจำกัดในการเลือกใช้แบบจำลองของเรื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุม แต่มีข้อด้อยตรงที่ใช้เวลาในการศึกษามาก นอกจากนี้วิธีการทางเวลายังถูกเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากวิธีการอื่นๆ ซึ่งรวมถึงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกด้วย

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วครู่มีหลายวิธีที่สามารถทำได้ เช่น วิธีพื้นที่เท่ากัน วิธีวิเคราะห์ที่ละขั้นตอน แต่ในทางปฏิบัติมุมของโรเตอร์ที่ตรงกับเวลามีความสำคัญมาก เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบป้องกัน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงขอกล่าวถึงการศึกษาโดยวิธีวิเคราะห์ทีละขั้นตอน โดยวิธีนี้เราสามารถแก้สมาการสวิงแล้วจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่ามุมและเวลา ซึ่งนำมาวาดกราฟเรียกว่ากราฟสวิง การแก้สมการนี้คิดค้นโดย Dahl และวิธีนี้ยังเหมาะกับการแก้ปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยและเนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีการเชื่อมโยงกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดจำนวนมากการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขจึงต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม

วิธีวิเคราะห์ทีละขั้นตอนจะเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุมของโรเตอร์กับช่วงเวลาสั้น ๆ โดยในการคำนวณมีข้อสมมติฐาน ดังนี้

1) กำลังไฟฟ้าเร่งที่เริ่มต้นของช่วงเวลาจะพิจารณาให้มีค่าคงที่จากกึ่งกลางของช่วงเวลาที่เพิ่งผ่านไปจนกึ่งกลางของช่วงเวลาที่เราพิจารณา
2) ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาและเราคำนวณที่กึ่งกลางของช่วงเวลานี้

โดยใช้สมการ

$$\omega_{r,n-\frac{1}{2}} - \omega_{r,n-\frac{3}{2}} = \frac{d^2\delta}{dt^2}\Delta t = \frac{180f}{H}P_{a,n-1}\Delta t \tag{2.36}$$

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \times \omega_{r,n-\frac{3}{2}} \tag{2.37}$$

$$\Delta\delta_{n} = \delta_{n} - \delta_{n-1} = \Delta t \times \omega_{r,n-\frac{1}{2}} \tag{2.38}$$

$$\Delta\delta_{n} = \delta_{n-1} + kP_{a,n-1} \tag{2.39}$$

$$k = \frac{180f}{H}(\Delta t)^2 \tag{2.30}$$

การคำนวณหากราฟสวิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กำลังทางกลที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องระหว่างช่วงเวลาทั้งหมดที่คำนวณหากราฟสวิงมีค่าคงที่
2. ไม่พิจารณาถึงกำลังหน่วง (Damping Power)
3. แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องหลังจากรีแอคแตนท์ชั่วครู่มีค่าคงที่
4. มุมโรเตอร์ทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องตรงกับ δ มุมทางไฟฟ้าของแรงดันในข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พิจารณาโหลดทั้งหมดเป็นรีแอคแตนท์ขนานที่ต่อลงดินและมีขนาดเท่ากันกับสภาวะก่อนที่จะเกิดสภาวะชั่วครู่

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมในรูปแบบการศึกษาที่ใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบธรรมดา ซึ่งกำหนดให้แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Internal Voltage ,E') หลังจากรีแอคแตนท์ชั่วครู่ (Transient Reactance , X'_d) มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบจำลองแบบละเอียดและมีความถูกต้องของคำตอบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

เมื่อทำการแก้สมการสวิง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเดอร์ δ และเวลา t เมื่อนำไปเขียนกราฟ ซึ่งกราฟที่ได้จะเรียกว่ากราฟสวิง (Swing Curve) ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมุมโรเดอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากทำการเคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบหากมุมโรเดอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่เปรียบเทียบกับมุมโรเดอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันไม่เกิน 180 องศา และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงจุดคงที่จุดใหม่ (ซึ่งมีความสมดุลของกำลังไฟฟ้า และกำลังทางกล) จะถือว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพในทางตรงข้าม หากมีมุมโรเดอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมุมโรเดอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง ก็จะถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ออกแบบการทดลอง

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศ ไฟฟ้าเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานและมีบทบาทสำคัญ ดังนั้นการวางแผนด้านพลังงานไฟฟ้าจึงต้องดำเนินการให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศชาติโดยเฉพาะบทที่เกี่ยวกับนโยบายการพลังงานของประเทศ

การวางแผนระบบไฟฟ้า คือการกำหนดแผนงาน การวิเคราะห์ การประเมินผลการลงทุนของการเพิ่มหรือปรับปรุงขยายระบบไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยประมาณการจากเป้าหมายตามแผนพัฒนาทางเศรษฐกิจของชาติ การวางแผนระบบไฟฟ้าแบ่งออกเป็น2 ประเภทคือแผนระยะสั้นและแผนระยะยาว แผนระยะสั้นเป็นการวางแผนด้านปฏิบัติการ มีหน้าที่วางแผนการเดินเครื่องและการจ่ายไฟฟ้าในแต่ละวัน กำหนดแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า กำหนดแผนในการใช้เชื้อเพลิงในการจ่ายไฟ และปรับปรุงระบบไฟฟ้าในระยะไม่เกิน 3 ปีขึ้นไป การวางแผนระบบไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์ที่สำคัญดังนี้

- ให้ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีราคาถูก
- ให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีคุณภาพ และมีความมั่นคงของระบบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

การวางแผนการพัฒนาปรับปรุงและขยายระบบไฟฟ้าที่กำหนดขึ้นมาตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้นนั้น จะต้องเป็นแผนที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการที่น้อยที่สุด ทั้งนี้แผนงานที่นำเสนอจะต้องมีการคำนึงถึงหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้ คือ

- ความเป็นไปได้ทางปฏิบัติ
- การแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม
- ฐานะทางการเงิน ความสามารถในการหาแหล่งเงินทุน
- สอดคล้องกับนโยบายการจัดหาและการใช้พลังงานของประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ข้อกำหนดการวางแผน

ข้อกำหนดการวางแผน คือข้อกำหนดทางด้านเทคนิค เพื่อกำหนดคุณภาพ และระดับความมั่นคงหรือความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่ไม่มีความมั่นคงย่อมไม่เป็นที่เชื่อถือของผู้ใช้ไฟฟ้า และเป็นผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศ แต่การจะให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงเชื่อถือได้สูงจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนมากขึ้น และจะทำให้ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีราคาแพงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดระดับการให้บริการ คุณภาพ และระดับความมั่นคงหรือความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ที่เหมาะสมกับสภาพและความสำคัญของผู้ใช้ไฟฟ้า และฐานะทางการลงทุนของการไฟฟ้า ตลอดจนฐานะทางเศรษฐกิจของประเทศ ดังนี้

3.1.1 การกำหนดหลักเกณฑ์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

การกำหนดหลักเกณฑ์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าของแต่ละการไฟฟ้าในแต่ละประเทศจะแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าต่างกัน คุณลักษณะของระบบแตกต่างกัน วิธีการวางแผนต่างกัน รวมทั้งวิธีการวางแผนที่ใช้งานอยู่เดิมต่างกัน ซึ่งคุณลักษณะของระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของโครงข่ายระบบไฟฟ้า สถานที่ตั้งของโรงไฟฟ้า ชนิดของโรงไฟฟ้า ระดับแรงดันและอื่นๆอีกมากมาย ด้วยเหตุนี้เมื่อเกิดเหตุผิดปกติหรือเกิดข้อขัดข้องในระบบไฟฟ้า คุณลักษณะของระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ถึงแม้แนวทางที่เหมาะสมส่วนใหญ่ จะได้ทำการจำแนกการเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดเพื่อทำการวิเคราะห์ เช่น การจ่ายโหลดเกินพิกัด, แรงดันต่ำกว่าปกติ, แรงดันสูงกว่าปกติ, Voltage Collapse, เกิดการ Trip, การแยกระบบ และการไม่มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ข้อกำหนดในการวางแผนระบบไฟฟ้าส่วนมากนั้นจะถูกกำหนดจากข้อกำหนดเดิมของการวางแผนที่ใช้งานอยู่ ผู้เชี่ยวชาญและสถาบันที่กำหนดมาตรฐานทางเทคนิคระดับนานาชาติ เช่น IEEE, CIGRE เป็นต้น ซึ่งการกำหนดหลักเกณฑ์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า มีดังนี้

3.1.2 โครงการร่างการตัดสินใจเลือกข้อกำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

โครงการร่างการตัดสินใจเลือกข้อกำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในอดีตที่สำคัญๆ ดังต่อไปนี้

- การเกิดเหตุการณ์ ผิดปกติหรือข้อขัดข้องในระบบไฟฟ้าที่ผ่านมาในอดีตก่อให้เกิดปัญหาต่างๆในระบบหรือไม่
- ความถี่ของของเหตุการณ์ที่มีความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในระบบ
- ความรุนแรง และระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ต่างๆ

ในการกำหนดแนวทางในการวางแผนเพื่อเตรียมการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้นหรือเกิดปัญหาขึ้นน้อยที่สุดขณะเกิดเหตุผิดปกติในระบบ โดยไม่มีผลกระทบกับผู้ใช้ไฟฟ้า และในกรณีที่เกิดเหตุการณ์รุนแรงมากๆ จะมีไฟฟ้าดับเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่จะต้องไม่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ่อยครั้ง ด้วยเหตุนี้การวางแผนเพื่อเสริมสมรรถนะระบบส่ง ไม่เพียงแต่จะเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดข้อขัดข้องต่างๆในระบบ แต่ยังเป็นการป้องกันไม่ให้ไฟฟ้าดับทั่วประเทศ (Blackout) ได้อีกด้วย

3.1.2.1 การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ Contingency

หลักการพื้นฐานในการวางแผน คือในสภาวะปกติ อุปกรณ์ทุกชนิดจะต้องทำงานอยู่ในพิกัดทางความร้อนและระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้นในระบบ รวมถึงการปลดหรือการเกิด Trip ของอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ (Single Contingency หรือเรียกว่า N-1) ออกจากระบบ อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบจะต้องไม่ทำงานเกินขีดความสามารถการใช้งานฉุกเฉิน และระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่พนักงานศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้ายังไม่ได้ดำเนินการใดๆ ระบบจะต้องรับรองเหตุการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลารวมถึงช่วงเวลาที่พยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งระยะเวลาการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของอุปกรณ์จะต้องสั้นที่สุด เงื่อนไข N–1 นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในสถานะอยู่ตัว และความมีเสถียรภาพของระบบ

นอกจากระบบไฟฟ้าจะต้องมีความสามารถรองรับได้ทั้งในสภาวะปกติ และเมื่อเกิด N-1 แล้วนั้น ระบบจะต้องมีความสามารถที่จะทนทานการเกิดขัดข้องที่รุนแรงที่สุดได้ (มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก) โดยที่ไม่เกิด Voltage Collapse, ไม่เกิดการ Trip ของอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง หรือการไม่มีเสถียรภาพของระบบ วิธีการวางแผนควรเตรียมการจำกัดขอบเขตของผลกระทบของการเกิดข้อขัดข้องที่รุนแรงมากๆ เช่น สายส่ง 500 kV หลายๆวงจร ที่สร้างในเขตเดินสายไฟฟ้าเดียวกัน (Right of way) เกิดข้อขัดข้อง Trip ออกจากระบบทุกวงจร

โดยทั่วไป การทดสอบ Contingency แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ ดังนี้

1. Single Contingency (N-1) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง หม้อแปลงไฟฟ้า 1 ชุด สายส่งไฟฟ้า 1 วงจร Trip ออกจากระบบ ซึ่งการเกิด N-1 จะมีความเป็นไปได้มากกว่าการเกิด Contingency แบบอื่นๆ

2. การทดสอบทางไดนามิก เป็นการทดสอบการเกิดข้อขัดข้องต่างๆตามที่กำหนด

3. Contingency ที่รุนแรงที่สุด (Extreme Contingency) เช่น สายไฟฟ้าที่สร้างในเขตเดินสายไฟฟ้าเดียวกัน เกิดข้อขัดข้อง Trip ออกจากระบบทุกวงจร โรงไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องเกิดข้อขัดข้องหยุดจ่ายไฟฟ้าทั้งหมด สายไฟในระดับแรงดันเดียวกันของสถานีไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้อง Trip ออกจากระบบทุกวงจร หรือการเกิดฟอลท์ที่บัสของสถานีไฟฟ้า

ระบบในสภาวะปกติ อุปกรณ์ทุกชนิดในระบบต้องจ่ายโหลดอยู่ในพิกัดทางความร้อนและระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ในทางตรงกันข้ามถ้าเกิดมีข้อขัดข้องบางส่วนในระบบ (N-1 หรือ N-2) ระดับแรงดันต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และอุปกรณ์ทุกชนิดในระบบจะต้องไม่ทำงานเกินกว่าความสามารถการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งอุปกรณ์มีความสามารถที่จะทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้ในระยะที่จำกัด ดังนั้นพนักงานศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขนำอุปกรณ์ที่ทำงานอยู่ในพิกัดทางความร้อนการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน ให้กลับมาทำงานอยู่ในพิกัดทางความร้อนในสภาวะปกติให้เร็วที่สุดที่จะทำได้

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการทดสอบระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยวิธีการวิเคราะห์สถานการณ์อยู่ตัว (การไหลของกำลังไฟฟ้า) และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า รวมทั้งการทดสอบ Voltage Collapse และจ่ายโหลดเกินพิกัดอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สถานะอยู่ตัว ซึ่งการทดสอบ Contingency มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กำหนดสภาพระบบก่อนที่จะทำการทดสอบ (Base Case)
- กำหนด Contingency หรือเหตุการณ์ผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบ
- กำหนดสภาพระบบที่สามารถยอมรับได้หลังจากเกิดเหตุผิดปกติ หรือเกิด Contingency ขึ้นในระบบ
- กำหนดการควบคุมระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบอัตโนมัติ หรือดำเนินงานโดยพนักงานศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า หรือใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน

การวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องทำการทดสอบทางไดนามิก โดยกำหนดเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบไม่ให้มีข้อจำกัดเมื่อโรงไฟฟ้าทั้งโรงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องเกิดขัดข้องหยุดจ่ายไฟฟ้าทั้งหมด ไม่มีการแยกระบบเนื่องจากเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Swing) ไม่มีแรงดันหรือความถี่กระเพื่อมเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่สำคัญขึ้นซึ่งในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะกำหนดให้ทำการทดสอบทางไดนามิกที่รุนแรงเพื่อเลือกลักษณะการจัดบัสของสถานีไฟฟ้าให้มีความน่าเชื่อถือ

การขยายและปรับปรุงสถานีขนส่งจะอยู่บนพื้นฐานของสภาพระบบในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดข้อขัดข้องบางส่วนในการวางแผนระยะยาว จะต้องมีการทดสอบ Contingency ที่รุนแรงที่สุด เพื่อประเมินความสามารถของระบบว่าสามารถ Contingency ที่รุนแรงที่สุดโดยไม่มีการ Trip อย่างต่อเนื่อง ไม่มีไฟดับเป็นบริเวณกว้าง หรือไม่เกิดไฟฟ้าดับทั่วประเทศ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการทดสอบ Contingency ที่รุนแรงที่สุด เพื่อตรวจสอบความไม่มั่นคงของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิด Contingency ที่รุนแรงที่สุด และประเมินความต้องการใช้ระบบป้องกันชนิดพิเศษ (ปลดโหลดเมื่อความถี่ต่ำ หรือเมื่อแรงดันต่ำกว่าปกติ) หรือนำมาประยุกต์เป็นแนวทางในการแก้ไข เมื่อเกิดข้อขัดข้องในระบบ ถึงแม้ว่า การทดสอบ Contingency รุนแรงที่สุด จะไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดในการศึกษาขยายระบบขนส่ง แต่ผลการศึกษาที่ได้จะมีอิทธิพลต่อการเลือกแนวทางขยายระบบขนส่ง เลือกลักษณะการจัดบัสของสถานี เลือกระบบป้องกัน และกำหนดจำนวนวงจรสูงสุดของสายส่งที่อยู่ในเขตเดินสายไฟฟ้าเดียวกันที่เหมาะสมกับสภาพระบบ

การศึกษาผลการตอบสนองของระบบเมื่อเกิด Contingency ที่รุนแรงที่สุด จะทำให้สามารถเข้าใจถึงลักษณะของการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่เป็นสาเหตุของไฟฟ้าดับทั่วประเทศได้เป็นอย่างดี และด้วยเหตุนี้จึงนำมาใช้วางแผนป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับทั่วประเทศ รวมทั้งวางแผนนำระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งประเทศได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งรูปแบบของวิธีการทดสอบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทดสอบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

	เงื่อนไขการทดสอบ	การวิเคราะห์	สภาพระบบที่ยอมรับได้
หลักเกณฑ์การทดสอบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเพื่อขยาย หรือปรับปรุงระบบไฟฟ้า	ในสภาวะปกติ	การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว	- อุปกรณ์ทำงานอยู่ในพิกัด - แรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด - ความถี่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	Single Contingency (N-1)	การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว	- อุปกรณ์ทำงานไม่เกินขีดความ สามารถการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน - แรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด - ความถี่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	Dynamic Contingencies	สถานะอยู่ตัว	- ไม่มี Voltage Collapse - ไม่มีอุปกรณ์จ่ายโหลดเกินพิกัดอย่างต่อเนื่อง
		ไดนามิก	- ระบบมีความมั่นคงทั้งในสภาวะชั่วครู่และไดนามิก
การทดสอบเพื่อประเมินความเชื่อถือได้ของระบบ	Contingencies	สถานะอยู่ตัวและไดนามิก	- ไม่มีไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง - ไม่มีการ Trip ของอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง - ไม่มีไฟฟ้าดับทั่วทั้งประเทศ

ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ระบบออกเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ที่สภาวะ Steady-State
2. การวิเคราะห์ที่สภาวะ Transient and Dynamic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. การวิเคราะห์สภาวะ Steady-State

3.2.1 การทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ

ทดสอบระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติ มีข้อกำหนดดังนี้

1. อุปกรณ์ทุกชนิดในระบบไม่มีการจ่ายโหลดพิกัด ซึ่งสายส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นชนิดอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยเสริมแกนเหล็ก สามารถจ่ายโหลดอย่างต่อเนื่องจนสายไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงสุด 75 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมจึงแยกพิกัดทางความร้อนของสายไฟฟ้าออกเป็น 2 ค่า คือคิดผลของความร้อนจากแสงแดด และไม่คิดผลของความร้อนจากแสงแดด โดยกำหนดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่มีค่าสูงมากที่ 35 องศาเซลเซียส แต่ก็ไม่ใช่อุณหภูมิที่สูงที่สุดที่จะเกิดขึ้นในฤดูร้อน มีความเร็วลม 2.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนพิกัดการจ่ายโหลดอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า คาปาซิเตอร์ ให้อยู่ในพิกัดที่ระบุ (Normal)

2. ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ที่ ±5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดับปกติ ยกเว้นในกรณีที่ไม่สามารถเปลี่ยน Tap ของหม้อแปลงได้

3. ความถี่ของระบบไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±1 เปอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐาน 50 Hz

3.2.2 การทดสอบ Single Contingency

ระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดข้อขัดข้อง 1 ส่วน (N-1) เช่น สายส่งไฟฟ้า 1 วงจร เกิดข้อขัดข้องไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้โดยกะทันหันหรือนำออกจากระบบ เป็นต้น ระบบไฟฟ้าจะต้องมีระบบรองรับ N-1 ได้ทุกกรณี ในการทดสอบ Single Contingency มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

3.2.2.1 การกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ หลังจากเกิด N-1

การกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ หลังจากเกิด N-1 มีดังนี้

1. ระบบไฟฟ้ายังคงทำงานต่อไปได้และไม่มีไฟฟ้าดับ

2. ระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือและอุปกรณ์ทุกชนิดในระบบจะต้องไม่ทำงานเกินขีดความสามารถการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน สายส่งไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยเสริมแกนเหล็กสามารถจ่ายโหลดในกรณีฉุกเฉินได้อย่างต่อเนื่องจนมีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 125 องศาเซลเซียส ซึ่งยังไม่ถึงจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม แต่การจ่ายโหลดในกรณีฉุกเฉินจะต้องอยู่ในช่วงระยะเวลาที่จำกัด เช่น สายส่งไฟฟ้าขนาด 1272 MCM ACSR สามารถจ่ายโหลดได้ 160 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 นาที สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีระบบระบายความร้อนเป็นแบบ OA/FA/FA หรือ OA/FA/FOA สามารถจ่ายโหลดได้ไม่เกิน 150 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด โดยปกติจะในการวางแผนจะใช้ค่า 120 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมของประเทศสหรัฐอเมริกาจะยอมรับให้หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดเกินพิกัดได้เฉพาะในกรณีที่มีหม้อแปลง Trip ออกจากระบบเท่านั้น แต่ต้องอยู่ในช่วงระยะเวลาที่จำกัด เช่น หม้อแปลงจ่ายโหลดได้ 135 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ภายระยะเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสอยู่ที่ ±5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดับปกดิ ยกเว้นในกรณีที่ไม่สามารถเปลี่ยน Tap ของหม้อแปลงได้

4. ความถี่ของระบบไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±1 เปอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐาน 50 Hz

3.2.2.2 กำหนดวิธีการควบคุมระบบไฟฟ้า หลังจากเกิด N-1

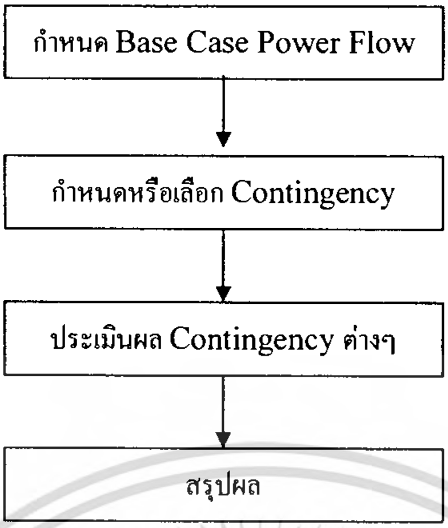
การควบคุมระบบไฟฟ้ามีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือการควบคุมระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบอัตโนมัติ และควบคุมระบบไฟฟ้าโดยพนักงานศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้อง 1 ส่วน กำหนดให้ควบคุมระบบไฟฟ้าโดยพนักงานศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าพิจารณาดำเนินการควบคุมทั้งหมด ยกเว้นให้ใช้ระบบอัตโนมัติเฉพาะในการควบคุมระดับแรงเท่านั้น เช่น การปลดคาปาซิเดอร์เมื่อแรงดันสูงเกิน การเปลี่ยน Tap หม้อแปลงไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ การเพิ่มหรือลดแอกทีฟเพาเวอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติเมื่อแรงดันเบี่ยงเบนจากค่าแรงดันที่กำหนดไว้ เป็นต้น

3.2.3 การวิเคราะห์ Contingency

การวิเคราะห์ Contingency เป็นขบวนการเลือก หรือกำหนดข้อขัดข้องที่เกิดขึ้นในระบบ แล้วประเมินผลข้อขัดข้องที่เกิดขึ้น เพื่อประเมินผลความน่าเชื่อถือได้ของระบบ รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า หรืออาจจะรวมกันเป็นขบวนการที่มีขนาดใหญ่ เช่น การประเมินโหลดหลายๆระดับ การวิเคราะห์ขีดจำกัดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า และการคำนวณค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ขั้นตอนในการวิเคราะห์ Contingency จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งมีสิ่งที่ควรพิจารณา ดังนี้

- ข้อกำหนดความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ามีอะไรบ้าง
- การกำหนด Contingency ต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้ และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากข้อขัดข้องของเหตุการณ์อื่นๆ มีอะไรบ้าง
- ในการเลือกหรือกำหนด Contingency สามารถลดลงได้โดยวิธีคัดกรองและวิธี Ranking มีอะไรบ้าง และ Contingency ที่จะต้องทดสอบมีอะไรบ้าง
- Contingency มีผลกระทบกับระบบอย่างไรบ้าง ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหรือโหลดหาย กำลังไฟฟ้ายังสมดุลอยู่ต่อไปหรือไม่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าใช้วิธีการนำเข้า-ปลดออกคาปาซิเตอร์/รีแอกเตอร์แบบขนาน การเลื่อนเฟสหรือการเปลี่ยน Tap หม้อแปลง
- วิธีที่ใช้แก้สมการ การไหลของกำลังไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับข้อกำหนดอย่างไร
- เวลาไหนที่มีความเหมาะสมที่จะยอมให้มีการปลดโหลดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency

3.2.3.1 ข้อกำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า สำหรับใช้วิเคราะห์

Contingency

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ Contingency เพื่อการตรวจสอบสมรรถนะของระบบที่มีความสัมพันธ์กับข้อกำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ข้อกำหนดที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ Contingency คือ

- โหลดเชิงความร้อนของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า
- ขีดจำกัดในการส่งกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า
- แรงดันที่บัสของสถานีไฟฟ้าสูงเกิน หรือต่ำเกิน
- Voltage Collapse
- การ Trip ของอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง
- ดัชนีชี้วัดสมรรถนะต่าง ๆของระบบ

3.2.3.2 วิธีการเลือก Contingency

- ในแต่ละ Contingency ที่มีความเป็นไปได้ จะมีผลกระทบกับระบบต่างกัน นั่นคือ Contingency ที่ไม่มีผลกระทบกับข้อกำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า จะถือว่า Contingency ที่มีความสำคัญน้อยมากหรือไม่มีความสำคัญ

- จำนวน Contingency เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของระบบ หรือระดับ Contingency ที่ยอมรับได้ จำนวนครั้งในการคำนวณ Contingency จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

โดยทั่ว ๆไปมักจะใช้เหตุผลทั้งสองข้อดังกล่าวขั้นต้นในการเลือก Contingency โดยการจัดลำดับความรุนแรง (Ranking) และการคัดกรอง Contingency วิธี Ranking เป็นขบวนการที่ใช้ในการกำหนดลำดับขั้นความรุนแรงของผลกระทบของ Contingency ที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปได้ โดยการประเมินผลความเป็นจริงด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่ง Contingency ที่มีความรุนแรงที่สุดก็จะส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามากที่สุดเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม Ranking เพียงวิธีการเดียวจะไม่สามารถกำหนดหรือเลือก Contingency ให้ครอบคลุมได้ทั้งหมด

นอกจากนี้ยังมีวิธีการคัดกรอง Contingency อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยเลือกหรือกำหนด Contingency ได้อีกบางส่วน ดังนี้

3.2.3.3 วิธี Ranking

วิธี Ranking ในทางทฤษฎีจะต้องแสดงลำดับขั้นความรุนแรงของ Contingency ซึ่งในการประเมินผล Contingency ควรประเมินเฉพาะContingencyที่รุนแรงมากๆเท่านั้น และกำหนดให้ Contingency ที่มีความรุนแรงน้อยๆ นั้นไม่กระทบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า วิธีRanking นี้สะท้อนให้เห็นถึงสภาพระบบที่เกิดข้อขัดข้องได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจะจัดกลุ่มของข้อขัดข้องทุกเหตุการณ์ แล้วทำการทดสอบ Contingency ที่มีความเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่วิธีการที่เหมาะสำหรับใช้กับเหตุการณ์ที่เกิด N–1(ที่ไม่ได้เป็นผลมาจากข้อขัดข้องของเหตุการณ์อื่นๆ)

3.2.3.4 Overload Ranking

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าให้มีการตรวจสอบ N-1 อุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไม่มีการจ่ายโหลดเกินพิกัด กล่าวคือสายส่งที่ใช้งานอยู่ในระบบ N วงจร เกิดข้อขัดข้อง 1 วงจร สายส่งในระบบจะต้องไม่มีการจ่ายโหลดเกินพิกัด เพื่อป้องกันไม่ให้สายส่งวงจรที่เหลือ Trip ตาม แต่ถ้าหากตรวจสอบ N–1 สายส่งทุกวงจรในระบบ ผลการคำนวณที่ได้จะมีจำนวนมาก ซึ่งในความเป็นจริงมีสายส่งจำนวนมากที่เกิด N–1 แล้วไม่มีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบจ่ายโหลดเกินพิกัด ดังนั้นวิธีการตรวจสอบ N–1 เฉพาะสายส่งที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าสูงๆ เมื่อเทียบกับพิกัด แล้วมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการจ่ายโหลดเกินพิกัดในระบบ เรียกวิธีการนี้ว่า “Overload Ranking โดยดัชนีสมรรถนะ PI (Performance Index) เป็นตัวชี้วัด ดังสมการที่ (3.1) ความสำคัญของวิธีการนี้คือสามารถลดจำนวนการคำนวณลงไปได้มาก

$$PI = \sum_{i=1}^{L} \alpha_i \omega_i \left(\frac{P_i}{\overline{P_i}} \right)^2 \qquad (3.1)$$

เมื่อ

เมื่อ	PI	=	ดัชนีสมรรถนะระบบของการจ่ายโหลดเกินพิกัด
	P_i	=	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง i (MW)
	$\overline{P_i}$	=	พิกัดทางความร้อนของสายส่ง i (MVA)
	α_i	=	จำนวนสายส่งที่ขนานกันของ Branch i
	ω_i	=	weighting factor
	L	=	จำนวน Branch ในโครงข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.1) เมื่อ $P_i/\overline{P_i}$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าในระบบไม่มีการจ่ายโหลดเกินพิกัด ดัชนี PI จะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากมีการจ่ายโหลดเกินพิกัดในระบบ ค่าของ $P_i/\overline{P_i}$ จะมากกว่า 1 และดัชนี PI จะมีค่ามาก ซึ่งผลการวิเคราะห์ดัชนี PI จะเป็นตัวชี้วัดว่าระบบมีความมั่นคงหรือไม่

วิธี Overload Ranking นี้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธี Earlier Ranking Algorithms ซึ่งใช้เกรเดียนต์ (อนุพันธ์อันดับหนึ่ง) ในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของแอดมิดแตนซ์ในระบบ แล้วผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเกิดข้อขัดข้อง (Outage) ต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า เมื่อสายส่ง k เกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ ดัชนี PI ที่เปลี่ยนแปลง [12] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\Delta PI_k = \frac{\partial PI}{\partial B_k}\Delta B_k \tag{3.2}$$

เมื่อ $\Delta B_k = B_k$ เป็นแอดมิดแตนซ์ของสายส่ง k ΔPI_k ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากดัชนี PI ที่มีค่ามากๆ จะแสดงให้เห็นว่ามีความน่าจะเป็นไปได้สูงมาก เมื่อเกิดฟอลท์ในสายส่ง k แล้วจะมีผลทำให้สายส่งที่เหลืออยู่ในระบบจ่ายโหลดเกินพิกัด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า ΔPI_k ได้โดยตรงโดยใช้ผลของการไหลของกำลังไฟฟ้า

หลังจากที่สายส่ง k เกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ จะสมมุติให้การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งวงจรอื่นๆ เป็น P_i' และดัชนีชี้วัดสมรรถนะระบบเป็น PI' ดังสมการที่ (3.3)

$$PI' = \sum_{i=1}^{L}\alpha_i\omega_i\left(\frac{P_i'}{\overline{P_i}}\right)^2 \tag{3.3}$$

ดังนั้น
$$\Delta PI_k = PI' - PI \tag{3.4}$$

นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้วิธี Overload Ranking กับการเกิดข้อขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสมมุติเหตุการณ์ให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง Trip ออกจากระบบ แล้วทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าอื่นๆ เข้าจ่ายไฟแทน ซึ่งมีผลทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเปลี่ยนแปลง ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับการเกิด N–1 ของหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.5 Voltage Collapse Ranking

การเกิดเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลงอย่างรุนแรง เพราะว่าในระบบไฟฟ้าเกิดการขาดแคลนกำลังรีแอกทีฟในระหว่างที่เกิด Contingency เนื่องจากสูญเสียกำลังรีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้น ดัชนีสมรรถนะของ Voltage Collapse จะเป็นตัวชี้วัดการสูญเสียกำลังรีแอกทีฟซึ่งเป็นผลมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ ดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$PI = \sum_{i=1}^{L} X_i P_i^2 \tag{3.5}$$

เมื่อ PI = ดัชนีสมรรถนะระบบของ Voltage Collapse

X_i = รีแอกแตนซ์ของสายส่ง i

P_i = กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง i

L = จำนวนวงจรของสายส่งทั้งหมดในพื้นที่ ที่ทำการศึกษา

เนื่องจากดัชนี PI ของ Voltage Collapse มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับดัชนี PI ของการจ่ายโหลดเกินพิกัด อัลกอริธึมที่ใช้ในการคำนวณจึงคล้ายกัน ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้อนุกรมของเทเลอร์ เพื่อพิจารณาการเกิด Voltage Collapse ในเขตพื้นที่ที่รับผิดชอบหรือระดับแรงดันที่กำหนด หรือในกลุ่มของสายที่สนใจ

3.2.3.6 วิธีการคัดกรอง Contingency

วิธีการคัดกรอง (Screening) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเลือกหรือกำหนด Contingency ได้อีกบางส่วน เพื่อให้ครอบคลุม Contingency ที่สำคัญได้ตามข้อกำหนด โดยใช้วิธีที่ง่าย ๆ หรือสั้น ๆ เช่น ใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นตัวคัดกรองการจ่ายโหลดเกิดพิกัดของการวิเคราะห์ Contingency ที่อยู่บนพื้นฐานไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อดีของการใช้การไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรง คือสามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถภาพต่ำกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้การไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนข้อเสียคือมีความถูกต้องน้อยกว่าและไม่สามารถทำการจำลองรูปแบบผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าได้

วิธี Local เป็นอีกวิธีหนึ่งของการคัดกรอง Contingency ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการไหลของกำลังไฟฟ้าของเกาซ์ไซเดล ครอบคลุมพื้นที่เล็กๆ ที่มีสายส่งเกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบโดยกำหนดสภาพระบบภายนอกเขตพื้นที่ที่เลือกก่อนที่จะเกิด Contingency ขึ้น การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ได้ผลจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่เลือก โดยทั่วไปจะครอบคลุมพื้นที่ 3 สถานที่ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อถึงกันด้วยสายส่งไฟฟ้า

ระดับแรงดันที่บัสของสถานีไฟฟ้าที่คำนวณได้จากวิธี Local เป็นการทดสอบก่อนที่จะกำหนดหลักเกณฑ์การเกิดข้อขัดข้อง เพื่อแยกแยะปัญหาต่างๆ ของแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากเกิด Contingency ขึ้นในระบบไฟฟ้า ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล Contingency ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับอย่างละเอียด (Full) จะใช้ระยะเวลามากกว่าวิธี Local เนื่องจากมีรายละเอียดที่มากกว่า ซึ่งวิธี Local จะกำหนดสภาพระบบภายนอกพื้นที่ที่กำหนดว่าไม่มีผลกระทบเนื่องจากการเกิด Contingency ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีนี้ระดับแรงดันจะเปลี่ยนแปลงได้น้อยกว่าใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับอย่างละเอียด ซึ่งสามารถทำการชดเชยได้โดยใช้ข้อกำหนดการเกิดข้อขัดข้องที่รุนแรงมากกว่า ดังนี้

$$V_{base} - V > k^{*}min\ (V_{base} - V_{low}\ dV) \qquad (3.6)$$

เมื่อ V_{base} = แรงดันที่บัสใน Base Case

V = แรงดันที่คำนวณได้จากวิธีการ Local

V_{low} = ขีดพิกัดแรงดันที่ต่ำบัส

dV = แรงดันที่เบี่ยงเบนได้สูงสุด

k = แฟคเดอร์ที่ใช้ปรับแต่ง

วิธี Local มีความเหมาะสมมากที่สุดในการใช้คัดกรอง Contingency ที่มีผลกระทบของระดับแรงดันเฉพาะในเขตพื้นที่ที่ทำการศึกษา (Local)

3.2.4 การเลือก Contingency หลายระดับ

เพื่อให้กระบวนการประเมินผลมีความคล่องตัว จึงได้แบ่งกลุ่มของ Contingency ที่เป็นไปได้ตามลักษณะความสัมพันธ์ หรือผลกระทบของ Contingency ดังนี้คือ

- Contingency ที่วิกฤติ หรือ Contingency ที่ต้องทำการทดสอบ
- การเกิด N-1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- การเกิดข้อขัดข้องของสายส่ง แล้วมีผลทำให้เกิดการแยกระบบ
- การเกิดข้อขัดข้องของสายส่ง แล้วมีผลทำให้สายส่งในระบบจ่ายโหลดเกินพิกัด
- การเกิดข้อขัดข้องของสายส่ง แล้วก่อให้เกิดปัญหาทางด้านแรงดัน หรือ Voltage Collapse

3.2.5 การประเมินผล Contingency

ในสมัยก่อนเมื่อเกิดข้อขัดข้องขึ้นในระบบจะมีขบวนการประเมินผล Contingency ที่ง่ายโดยแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า แล้วตรวจสอบผลที่คำนวณได้กับข้อกำหนดความเชื่อได้ระบบไฟฟ้า เพื่อให้ผลการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์มีความถูกต้อง จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษต่างๆในการช่วยวิเคราะห์

แนวทางที่ใช้กำหนดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า จะให้ระบบอัตโนมัติทำงานหลังจากประเมิน Contingency แล้วเสร็จ เช่น การเปลี่ยน tap หม้อแปลงโดยอัตโนมัติโดยใช้ OLTC (On Load Tap Changing) การนำเข้า-ปลดออก คาปาซิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้รีเลย์แรงดันการใช้รีเลย์เพื่อเตรียมการลดผลกระทบหลังจากการเกิด Contingency ให้ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งรีเลย์จะทำงานสั่งปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์จ่ายโหลดเกินพิกัด โดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชัน Transfer Trip ของรีเลย์เฝ้าตรวจ (Monitoring) สภาพระบบดังต่อไปนี้

- สายส่งจ่ายโหลดเกิดพิกัด หรือสายส่งเกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ
- หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดเกินพิกัด
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ
- สายส่งที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงๆ เมื่อเทียบกับพิกัด

และเมื่อรีเลย์เฝ้าตรวจสอบสภาพระบบพบเงื่อนไขข้างต้น ก็จะทำงานส่งสัญญาณ Transfer Trip ไปเพื่อ

- ปลดโหลด
- สวิทชิ่งย้ายโหลดไปรับทางสายส่งอื่นแทน
- ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ปลดสายส่งไฟฟ้า
- ปลดหม้อแปลงไฟฟ้า
- ปลด คาปาซิเตอร์/ รีแอกเตอร์

ในการประเมินผล Contingency ของระบบไฟฟ้าที่ยอมให้ระบบอัตโนมัติทำงานได้ จะต้องทำการจำลองสถานการณ์ พร้อมทั้งจำแนกแยกแยะเหตุการณ์ต่างๆ ที่จะต้องให้มีรีเลย์ส่งสัญญาณ Transfer Trip ไปปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ จนเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งในการผลนี้จะครอบคลุมไปถึงการทำงานของระบบอัตโนมัติอีกบางส่วนที่ส่งสัญญาณไปปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าหลังจากที่ระบบอัตโนมัติแรกทำงานไปแล้ว เช่น การเปลี่ยน Tap หรือการเลื่อนเฟสของหม้อแปลงโดยอัตโนมัติ การปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบโดยอัตโนมัติ เป็นต้น โดยจำลองรูปแบบในขบวนการวนซ้ำของนิวตัน-ราฟสัน ในการปลดโหลดบางส่วนและการส่งสัญญาณไปปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบางส่วนนั้นเพื่อลดผลกระทบหลังจากที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหลุดออกจากระบบ ถ้าประเมินแล้วว่ามีผลกระทบต่อระบบก็จะส่งสัญญาณ Transfer Trip ไปปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อรักษาระบบหลักเอาไว้

3.2.6 การควบคุมระบบไฟฟ้า

ในการควบคุมระบบไฟฟ้า พิกัดกำลังไฟฟ้าเชิงความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ จะต้องเพียงพอที่สามารถจะจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ตามการควบคุมแรงดันและกำลังรีแอกทีฟตามที่ต้องการ รวมถึงเพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้คือ

- การเปลี่ยน Tap หม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งในขณะที่หม้อแปลงจ่ายไฟอยู่ (On Load Tap Changing) และประเภทที่ต้องดับไฟหม้อแปลง (Off Load Tap Changing)
- การนำเข้า – ปลดออก คาปาซิเตอร์/ รีแอกเตอร์ แบบขนาน
- การปรับกำลังรีแอกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การปรับแรงดันอ้างอิงของ Static Var Compensator และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์

- การนำเข้า – ปลดออก สายส่งไฟฟ้า

ในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแรงดันต่างๆ โดยใช้วิธี Optimal Power Flow (OPF) ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมแรงดันต่างๆ ร่วมกัน เพื่อรักษาระดับ Voltage Profile ไว้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เช่น ใช้วิธีการเปลี่ยน Tap หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมกับการนำเข้า-ปลดออก คาปาซิเตอร์แบบขนาน เป็นต้น จะต้องแสดงขีดความสามารถในการรับจ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า StaticVar Compensator และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ ดังนั้นในบางสถานการณ์จะต้องมีการกำหนดกำลังรีแอกทีฟสำรองไว้ เพื่อรักษาระบบให้มีเสถียรภาพ ซึ่งต่างจากการสำรองกำลังรีแอกทีฟไว้สำหรับกรณีที่เกิด Contingency ซึ่งในการควบคุมแรงดันและกำลังรีแอกทีฟจะต้องพิจารณาเลือกอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่มีอยู่เดิมก่อน ถ้าไม่เพียงพอจึงจะดำเนินการวางแผนติดตั้งเพิ่มเติม วิธี Optimal PowerFlow ที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากที่สุด มีความผิดพลาดหรือสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้เพิ่มอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเท่าที่จำเป็น โดยทั่วไป Optimal PowerFlow จะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมายที่มีต้นทุนน้อยที่สุด (Minimize a cost Function) และเงื่อนไข (Constrain function) ที่กำหนด ซึ่งรูปแบบฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.7) – สมการที่ (3.9)

Minimiza : f(x) = Shunt Reactive additions (3.7)

Subject to :

Power Flow equations, e(x) = 0 (3.8)

Inequality Constraints, $h(x) \leq 0$ (3.9)

Side Constraints, $x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$ (3.10)

เมื่อ x เป็นเวคเตอร์ของตัวแปรโครงข่ายระบบไฟฟ้า ที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขที่เหมาะสม

สมการ (3.10) เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงขีดจำกัดของตัวแปรที่ใช้หาค่าที่เหมาะสม เช่น ขีดความสามารถการจ่ายไฟฟ้า จริงเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดสูงสุดและต่ำสุด การรับ-จ่ายกำลังรีแอกทีฟเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดต่ำสุดและสูงสุด แรงดันเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดและที่บัสของโหลดสูงสุดต่ำสุด ตำแหน่งของ Tap หม้อแปลงสูงสุดและต่ำสุด ขีดจำกัดการจ่ายโหลดสูงสุดของสายส่งไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ นอกจากนี้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ของความต้านทานของอุปกรณ์ไฟฟ้ากับปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า [ได้ดังสมการที่ (3.11)

$$R_{new} = R_0\left(1+\left(\frac{MVAflow}{Rating * Percentage}-1\right)K\right) \qquad (3.11)$$

R_{new}	= ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับใหม่ล่าสุด (Ω)
R_0	= ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับตอนแรกของอุปกรณ์ไฟฟ้าใน Base Case (Ω)
K	= สเกลลิ่งแฟคเตอร์
MVA flow	= การไหลของกำลังไฟฟ้า (MVA)
Rating	= พิกัดทางความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้า (MVA)
Percentage	= เปอร์เซ็นต์ฐานของขนาดพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กำหนด ค่า R_0

ดังนั้นกำลังไฟสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส จะเป็น

$$P_{loss} = 3I^2R_{new} \qquad (3.12)$$

3.2.8 การเลือก Contingency

การวางแผนระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคงต้องมีการตรวจสอบ N-1 อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าระบบไม่มีการจ่ายโหลดเกินพิกัด กล่าวคือสายส่ง N วงจร เกิดขัดข้อง 1 วงจร สายส่งที่เหลืออยู่ในระบบจะต้องไม่มีการจ่ายโหลดเกินพิกัด เพื่อป้องกันไม่ให้สายส่งวงจรที่เหลือ Trip ตาม แต่ถ้าหากตรวจสอบ N-1 สายส่งทั้งระบบ ผลการคำนวณที่ได้จะมีจำนวนมาก ซึ่งในความเป็นจริงมีสายส่งจำนวนมากที่เกิด N-1 เพื่อตรวจสอบผลกระทบของระดับแรงดันเนื่องจากการเกิด Contingency ว่าเบี่ยงเบนเกินเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ ดังนั้นวิธีการตรวจข้อสอบ N-1 มีหลักการดังนี้

- ตรวจสอบ N-1 เฉพาะสายส่งที่มีเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดสูง ๆ เมื่อเทียบกับพิกัด และมีความน่าจะเป็นที่สายส่งที่เหลืออยู่ในระบบจะจ่ายโหลดเกินพิกัด
- ตรวจสอบ N-1 สายส่งที่มีความน่าจะเป็นที่แรงดันจะเปลี่ยนแปลงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ±5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติ เช่น สางส่งที่เกิด N-1 แล้วมีผลทำให้เกิดการ Break

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loop ระหว่างสถานีไฟฟ้า 2 สถานี สายส่งที่ต่ออยู่กับบัสของสถานีไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันในสภาวะปกติ ค่อนข้างต่ำ เป็นต้น

- ตรวจสอบ N-1 สายเชื่องโยงระหว่างภาคที่มีความยาวมากๆ ที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เข้าใกล้ขีดจำกัดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (Power Transfer Limit) ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดแรงดันต่ำหรือเกิด Contingency เนื่องจากสูญเสียกำลังรีแอกทีฟในสายส่งเพิ่มขึ้นตลอดจนมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power Swing) ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้เกิดการ Trip แยกระบบขึ้นได้

นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้หลักการ N-1 นี้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า SVC คาปาซิเตอร์ เป็นต้น

3.2.9 การเลือกคำนวณหาค่ากระแสฟอลท์

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินขนาดพิกัดกระแสฟอลท์ของเซอร์กิตเบรคเกอร์ แต่ถ้าหากคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ทั้งหมดทุกแบบที่จุดต่าง ๆ ของระบบ ผลการคำนวณที่ได้จะมีจำนวนมาก ดังนั้นต้องมีหลักการเลือกคำนวณหาจุดที่เดฟอลท์และประเภทของกระแสที่มีค่าสูงสุด กล่าวคือจุดที่เกิดฟอลต์แล้วกระแสฟอลต์มีค่าสูง คือที่บัสของสถานีไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้าเนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด โดยทั่ว ๆ ไปในระบบไฟฟ้ากระแสฟอลท์แบบ 3 เฟส จะมีค่ามากกว่ากระแสฟอลท์แบบอื่นๆ จากสมการ (3.2) และสมการ (3.6) เมื่อไม่คิดค่าของฟอลท์อิมพีแดนซ์ Z_f สามารถเขียนสมการกระแสฟอลท์แบบ 3 เฟสและแบบหนึ่งเฟสลงดิน ได้ดังสมการที่ (3.13), (3.14) ตามลำดับ

$$I_{fault3-\phi} = \frac{V_f}{Z_1} \tag{3.13}$$

$$I_{fault1-\phi} = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \tag{3.14}$$

$I_{fault1-\Phi}$ = กระแสลัดวงจร 1 เฟส (A)

$I_{fault3-\Phi}$ = กระแสลัดวงจร 3 เฟส (A)

V_f = แรงดันที่ทำให้เดิกการลัดวงจร (V)

Z_0 = zero อิมพิแดนซ์ (ohm)

Z_1 = positive อิมพิแดนซ์ (ohm)

Z_2 = negative อิมพิแดนซ์ (ohm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.13) และ (3.14) เมื่อค่าของอิมพีแดนซ์ Z_0 มีค่าน้อยกว่า Z_1 (เนื่องจากระบบการต่อลงดิน) แล้วจะมีผลทำให้ค่ากระแสฟอลต์และแบบหนึ่งเฟสลงดินมีค่ามากกว่ากระแสฟอลท์แบบ 3 เฟส หรือแบบหนึ่งเฟสลงดิน แล้วใช้ค่าที่สูงที่สุดในการกำหนดขนาดพิกัดอุปกรณ์ โดยมีหลักการเลือกหรือกำหนด ดังนี้

- ในกรณีของสถานีไฟฟ้าที่ไม่มีโรงไฟฟ้าต่ออยู่ ให้คำนวณหาค่ากระแสฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่บัสของสถานีไฟฟ้าเพื่องจากกระแสฟอลต์แบบ 3 เฟสจะมีค่ามากกว่ากระแสฟอลต์แบบอื่นๆ เพราะว่าค่าของอิมพีแดนซ์ Z_0 มีค่ามากกว่า Z_1

- โรงไฟฟ้าโดยทั่ว ๆ ไป หรือสถานีไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าต่ออยู่ ให้คำนวณหาค่ากระแสฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดินที่บัสของสถานีไฟฟ้าหรือของโรงไฟฟ้า เนื่องจากกระแสฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดินมีค่ามากที่สุด เพราะว่ามีโรงไฟฟ้าหรือของโรงไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าต่ออยู่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่ออยู่กับหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (step-up transformer) ทางด้านแรงดันต่ำที่ต่อแบบเดลต้า ส่วนด้านแรงดันสูงจะต่อแบบสตาร์และที่จุดสตาร์จะมีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly grounded) จึงมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 มีค่าน้อยกว่า Z_1 (ดูหัวข้อ 4.6 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นประกอบคำอธิบาย)

- ในกรณีของโรงไฟฟ้าที่มีการปรับปรุงระบบการต่อลงดิน (โรงไฟฟ้าเก่า) หรือสถานีไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าประเภทนี้ต่ออยู่ ให้คำนวณหาค่ากระแสฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดินหรือแบบ 3 เฟสที่บัสของสถานีไฟฟ้าหรือของโรงไฟฟ้า เนื่องจากกระแสฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดินและแบบ 3 เฟส จะมีค่าเท่ากันโดยประมาณ และมีค่ามากกว่ากระแสฟอลต์แบบอื่น ๆ เพราะว่ามีการปรับปรุงระบบการต่อลงดินโดยการต่อลงดินผ่านรีแอกเตอร์จากจุดสตาร์ของหม้อแปลง เพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 หรือเพื่อลดค่ากระแสเฟสแบบ 1 เฟสลงดิน

3.2.10 วิธีการแก้ไขปัญหาระดับกระแสฟอลต์เกินขีดจำกัดอุปกรณ์

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าต้องคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์สูงสุด ถ้ากระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินขีดจำกัดของเซอร์กิตเบรคเกอร์จะต้องหาวิธีการแก้ไข โดยแผนระยะยาวแก้ไขปัญหาด้วยการเปลี่ยนอุปกรณ์ให้มีขนาด Interrupting Capacity ใหญ่ขึ้น การแยกบัสของสถานีไฟฟ้าตลอดจนการปรับปรุงระบบการต่อลงดิน ซึ่งต้องใช้เวลานานในการจัดหาหรือสั่งซื้ออุปกรณ์ (อุปกรณ์บางส่วนต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ) รวมทั้งการก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ (ไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้) ส่วนแผนระยะสั้นจะทำการปรับปรุงสภาพระบบไฟฟ้าเพื่อบรรเทาผลกระทบให้ลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงการลักษณะการจ่ายไฟที่มีผลทำให้ระบบไฟฟ้ามีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น และสามารถดำเนินการได้ทันทีโดยให้ระยะเวลาไม่นาน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.10.1 การปลดอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในการวางแผนระยะสั้น ถ้าค่ากระแสฟอลท์ที่เกิดขึ้นเกินขีดจำกัดของเซอร์เบรคเกอร์ มีแนวทางในการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าโดยการวางแผนปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกระแสฟอลด์ หรือปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีผลทำให้ค่าระดับกระแสฟอลด์มีค่าลดลง ณ สถานีไฟฟ้าที่มีระดับกระแสฟอลด์เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดสามารถจะทำการปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ตามความเหมาะสมของสภาพระบบ ดังนี้

- วางแผนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาพระบบ โดยปริมาณกระแสฟอลด์ขึ้นอยู่กับจำนวนของเครื่องกำเนิดที่ขนานเข้าระบบ ยิ่งขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบเป็นจำนวนมาก จะมีผลทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าลดลงและเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้นในระบบกระแสฟอลด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องวางแผนการเดินเครื่องในพื้นที่ที่มีระดับกระแสฟอลด์เกินขีดจำกัดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ให้เหมาะสมกับสภาพระบบ เพื่อไม่ให้ระดับกระแสฟอลด์เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ แต่ถ้าขนานเครื่องกำเนิดเข้าระบบจำนวนน้อย ๆ ในเขตศูนย์กลางของการใช้ไฟฟ้า เช่น ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลที่ขาดแคลนกำลังผลิตอยู่แล้ว และกำลังไฟฟ้าที่เหลือจะต้องมาจากแหล่งผลิตไฟฟ้าอื่นๆ ที่อยู่นอกเขตพื้นที่ โดยไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าเชื่อมโยง จึงมีผลทำให้สายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเชื่อมโยง (Tie Transformer) จ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการวางแผนจะต้องให้สายส่งไฟฟ้า หม้อแปลงเชื่อมโยงและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ สามารถรองรับ N-1 ได้ รวมทั้งระดับแรงดันที่บัสต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ ±5 เปอร์เซ็นของแรงดันปรงดันปกติ เมื่อเกิด Contingency ขึ้นในระบบ ตลอดจนการไหลของกำลังไฟฟ้าจะต้องไม่เกินขึ้นจำกัดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าหรือเกิดการ Trip แยกระบบเมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบ

- ปลดสายส่งไฟฟ้าหรือปลดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาเลือกปลดสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้า หรือปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งสองอย่างร่วมกันที่สถานีไฟฟ้าที่มีระดับกระแสฟอลด์เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ที่มีเปอร์เซ็นการจ่ายโหลดน้อย ๆ เมื่อเทียบกับพิกัด และเมื่อเกิด Contingency ขึ้นในระบบอุปกรณ์ที่เหลืออยู่จะต้องสามารถรองรับ N-1 ได้รวมทั้งระดับแรงดันที่บัสต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ ±5 เปอร์เซ็นของแรงดันปกติ

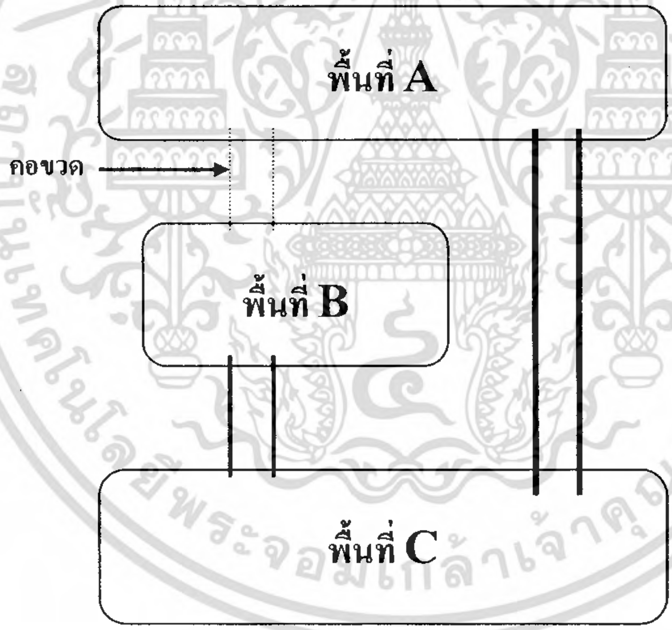
- ปลดสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้า 2 สถานีไฟฟ้าออกจากระบบทั้งหมดทุกวงจร (Break Loop) โดยพิจารณา Break Loop สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าที่มีระดับกระแสฟอลด์เกินขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงที่จ่ายโหลดน้อย ๆ เมื่อเทียบกับพิกัด ซึ่งเมื่อเกิด Contingency ขึ้นในระบบอุปกรณ์ที่เหลืออยู่จะต้องสามารถรองรับ N-1 หรือการจ่ายโหลดเกินพิกัดของสายส่งไฟฟ้าหรือหม้อแปลงเชื่อมโยงที่มีข้อจำกัดของระบบส่งที่มีลักษณะเป็นคอขวด (Bottleneck) ดังรูป 5.3 ส่วนในระบบจะเพิ่มสูงขึ้น และในบางกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการนี้อาจจะทำให้ความมั่นคงของระบบลดลงกว่าเดิม ดังนั้นก่อนที่จะตัดสินใจเลือกวิธีการนี้ควรจะการศึกษาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าให้ครอบคลุมในทุก ๆ ด้าน แล้วพิจารณาผลดี ผลเสีย เพื่อให้การวางแผนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.10.2 การแยกบัส

วิธีการแยกบัส (Split Bus) โดยปลด-สับ (Open-Close) เซอร์กิตเบรคเกอร์และใบมีด เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการลดค่ากระแสฟอลท์ที่เกิดขึ้นให้มีค่าน้อยลงของการแผนระยะสั้นซึ่งลักษณะของการจัดบัสที่สามารถทำวิธีการนี้ได้คือ Double Bus Single Breaker and a Half และ Double Breaker และมีความเหมาะสมที่จะใช้กับสถานีไฟฟ้าที่เป็น GIS (Gac Insulated Substation) เนื่องจากว่ามีโอกาสที่จะเกิดบัสฟอลท์น้อยมาก เมื่อเกิด Contingency ขึ้นในระบบ อุกรณ์ที่เหลืออยู่ในระบบจะต้องสามารถรองรับ N-1 ได้ (ยกเว้นการเกิดบัสฟอลท์) รวมทั้งระดับแรงดันที่บัสต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ ±5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติ



รูปที่ 3.3 การปลดสายส่ง AB ออกจากระบบทั้ง 2 วงจร

3.2.10.3 การเชื่อมต่อสายส่ง

วิธีการต่อสายส่ง (Bypass) เป็นวิธีสุดท้ายที่ใช้ลดค่าระดับกระแสฟอลท์ที่เกิดขึ้นซึ่งต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะเชื่อต่อสายส่ง 2 วงจร เป็น 1 วงจร วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานไม่มาก ผลต่างของมุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสของสายส่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไม่เกิน 30 องศา (เป็นค่าที่เผื่อไว้สำหรับการไม่ให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพในขณะระบบไฟฟ้าเกิดเหตุไม่ปกติ) และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ามีส่วนช่วยเสริมความมั่นคงของระบบ (ทิศของการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับสายส่งข้างเคียง หรือมีทิศทางการไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด) ตลอดจนระบบไฟฟ้าสามารถรองรับ N-1 ได้ดีขึ้น โดยพิจารณาเชื่อมต่อสายส่งข้ามสถานีไฟฟ้าที่มีระดับกระแสฟอลท์เกินขีดกำจัดของอุปกรณ์ หรือสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอุปกรณ์ที่เหลืออยู่ในระบบจะต้องสามารถรองรับ N-1 ได้เมื่อเกิด Contingency ขึ้นในระบบ รวมทั้งระดับแรงดันที่บัสต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ ±5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติ นอกจากนี้ยังนิยมใช้วิธีการนี้เพื่อแก้ปัญหาการไม่รองรับ N-1 หรือจ่ายโหลดเกินพิกัดของสายส่งไฟฟ้า ส่วนข้อดีของวิธีการนี้คือความมั่นคงของระบบไฟฟ้าจะสูงกว่าวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.2.11 การแก้ไขปัญหาระบบไฟฟ้าไม่รองรับ N-1 หรือเสริมความมั่นคงของระบบ

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าระยะสั้น ถ้าหากเกิดข้องขัดข้องขึ้นในระบบแล้วไม่สามารถรองรับ N-1 ได้ มีแนวทางแก้ไขเพื่อเสริมความมั่นคงของระบบดังต่อไปนี้ คือนำหม้อแปลงและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ปลด Cold Standby เข้าจ่ายไฟ, นำหม้อแปลงหรือสายส่งที่ปลดเพื่อลดระดับกระแสฟอลท์เข้าจ่ายไฟ หรือนำสายส่งไฟฟ้าที่ปลดเพื่อลดระดับแรงดันเข้าจ่ายไฟ วางแผนการย้ายโหลด วางแผนการเดินเครื่องให้เหมาะสมกับสภาพระบบ การ Loop บัส ตลอดจนการ Break Loop หรือการเชื่อมต่อสายส่งไฟฟ้า ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการจะเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรือใช้หลายวิธีร่วมกัน ขึ้นอยู่กับสถานการณ์และการนำมาประยุกต์ใช้งานทำให้ความมั่นคงของระบบดียิ่งขึ้น ซึ่งอยู่กับสถานการณ์และการนำมาประยุกต์ใช้งานทำให้ความมั่นคงของระบบดียิ่งขึ้น ซึ่งระดับแรงดันที่บัสต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ ±5 เปอร์เซ็นของแรงดันปกติ ระดับกระแสฟอลท์สูงสุดที่บัสจะต้องไม่เกินพิกัดของอุปกรณ์ รวมทั้งมุมแรงดันไฟฟ้าของสายส่งต้นทางและปลายทางที่ค่าต่างกันไม่เกิน 30 องศา ดังนั้นการวางแผนแก้ปัญหา N-1 ให้ได้ผลต้องศึกษาให้ครอบคลุมในด้านต่างๆ ให้ครบทุกๆ ด้าน มิฉะนั้น อาจจะซ้ำเติมสภาพระบบให้มีความมั่นคงลดลงมากเดิม หรือเกิดการ Trip ของอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง หรือมีไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง เช่น การปลดสายส่ง AB ออกจากระบบทั้ง 2 วงจร (Break Loop) และจะมีผลทำให้ สายส่ง BC จ่ายไฟเป็นแบบเรเดียล ดังนั้นสายส่ง BC ต้องสามารถรองรับความต้องการของไฟฟ้าในพื้นที่ของ B ได้ รวมทั้งรองรับ N-1 ได้ด้วย ดังรูปที่ 3.3

3.3 การวิเคราะห์สภาวะ Transient and Dynamic

เสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้า (Power System Stability) นิยามได้ว่าคุณสมบัติของระบบซึ่งทำให้เครื่องจักรซิงโครนัสของระบบตอบสนองต่อการรบกวน (disturbance) จากเงื่อนไขการทำงานปกติ เพื่อกลับสู่การทำงานปกติอีกครั้งหนึ่งหลังจากการเกิดการรบกวน การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการรบกวนอย่างรุนแรง (Large disturbance) อาจหมายถึงการเกิดฟอลด์อย่างรุนแรง(เช่น 3-ϕ fault) ความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือโหลด ความเสียหาย ของระบบสายส่ง (transmission network) บางส่วนซึ่งจะมีผลต่อระบบกำลังไฟฟ้าทั้งระบบและยังมีผลไปกระทบต่อระบบข้างเคียงด้วย

ดังนั้นในการศึกษาเสถียรภาพ ระบบไฟฟ้ากำลังอาจหมายถึงกลุ่มของเครื่องจักรซิงโครนัสและโหลด ซึ่งต่อเชื่อมกันในระบสายส่ง ในสภาวะการทำงานปกติเครื่องจักรซิงโครนัสจะทำงานที่ความเร็วซิงโครนัสเมื่อเกิดการรบกวนอย่างรุนแรงขึ้น เครื่องจักรซิงโครนัสจะเกิดการแกว่งไกว (swinging) ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น(nonlinear differential equation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลังของแต่ละระบบ วิธีการแก้ปัญหา สมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น โดยทั่วไปมักใช้วิธีการนิวเมอริคอลอินติเกรด ซึ่งเราสามารถวัดความคงทนต่อการรบกวนอย่างรุนแรงได้โดยวัดค่าเวลาเคลียริงวิกฤต ซึ่งเป็นค่าเวลาสูงสุดที่เกิดการรบกวนอย่างรุนแรงโดยยังสามารถกลับมายังสภาวะเสถียรภาพ (steady-state) ได้ดังเดิม โดยแยกพิจารณาเป็น 3 สภาวะ คือ ก่อนการเกิดฟอลด์ ช่วงการเกิดฟอลด์ และหลังการเกิดฟอลด์

วัตถุประสงค์ในการศึกษาเสถียรภาพนั้นเพื่อเป็นการพิจารณา โรเตอร์ของเครื่องจักรที่ถูกรบกวนทำให้เกิดมุมโรเดอร์และกลับไปยังการทำงานที่ความเร็วคงที่

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะทรานเซียนท์

การคำนวณเสถีรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะแบงออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. Round-rotor Synchronous Generator
2. Salient Pole Synchronous Generator
3. Wind Turbine Generator

ในการศึกษาเกี่ยวกับความมั่นคง ความมีเสถีรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลัง มีหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ควรพิจารณาเป็นอันดับต้นๆ คือ พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งเป็นแกนหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้า ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น Round-rotor Synchronous Generator (RRSG) Salient Pole Synchronous Generator (SPSG) Wind Turbine Generator (IG) ซึ่งเครื่องกำเนิดที่กล่าวมานี้ จะมีรูปแบบการควบคุม (Model Control) แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเมื่อเกิดภาวะรบกวนหรือผิดปกติ (fault) ขึ้นที่ระบบก็จะทำให้เกิดผลกระทบตอบสนองของระบบเมื่อเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบ ทั้งในสภาวะปกติ (Normal Condition) และสภาวะเกิดฟอลด์ (Fault Condition) ขึ้นที่ระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มกำลังไฟฟ้านั้นเราต้องมั่นใจได้ว่าเพิ่มไปแล้วจะต้องไม่ส่งผลกระทบทำให้ระบบเสียหาย (System Violation) เช่น เกิดแรงดันเกินที่บัส (High Voltage), แรงดันตก (Low Voltage) ที่บัสหรือกำลังไฟฟ้าไหลเกิน (Line Overload) ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะศึกษาเกี่ยวกับการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ของระบบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่กล่าวมาหลังจากศึกษา Power Flow ของระบบและกำจัดปัญหาแรงดันเกิน,แรงดันตก และกำลังไฟฟ้าไหลเกินในสายส่งแล้ว เราจะยังมั่นใจได้ว่าระบบมีความมั่นคง มีเสถียรภาพเลยไม่ได้จำเป็นต้องการศึกษาระบบในสภาวะการตอบสนองการทำงานแบบชั่วขณะและการทำงานแบบพลวัด(Transient and Dynamic response) ด้วยว่าสามารถทำงานได้อย่างไม่มีปัญหาทั้งในระบบในสภาวะปกติ (Normal condition) และระบบเกิดฟลอต์ (Fault condition) ปริญญานิพนธ์นี้ จะทำการศึกษาผลกระทบต่อระบบ เมื่อมีการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆเข้าไปในระบบทั้งเครื่องกำเนิดชนิด RRSG, SPSG และ Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (IG)

3.3.1 การศึกษา LOAD FLOW ของระบบ

ระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาศึกษาจะเป็นระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ซึ่งมีจำนวนบัสประมาณ 1500 บัส ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 200 ยูนิต พร้อมกับความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดประมาณ 20,000 MW โดยทำการปรับระบบจากกรณี (System Base case) ให้เป็นกรณี ที่มีความเหมาะสมกับการศึกษา (Reasonable case) โดยการกำจัดภาวะผิดปกติต่างๆ (System Violation) ในระบบออก แล้วจึงนำกรณีฐานดังกล่าวมาทำการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (Steady-State Power Flow) จากนั้นจึงได้ทำการสร้างกรณีศึกษาอื่นๆ (Scenarios) เพื่อประกอบการศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดชนิดต่างๆที่กล่าวไปข้างต้นเมื่อนำมาทำการต่อเชื่อม (Interconnection) เข้ากับระบบเดิม (Conventional System)

3.3.2 การศึกษาการจำลองระบบในสภาวะ DYNAMIC

การศึกษาจำลองระบบในสภาวะชั่วขณะและพลวัดนั้น (Transient and Dynamic response) จะศึกษาดูพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะสัมพันธ์กับมุมโรเตอร์ (rotor angle) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามสมการการแกว่งของโรเตอร์ (Swing Equation) คือ

$$\frac{H}{180f_0}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (1)$$

และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_m = \omega_m T_m \quad (2)$$

และ

$$P_e = \omega_s T_s \quad (3)$$

เมื่อ H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (per unit inertia constant)

δ คือ มุมโรเตอร์ (องศา)

f_0 คือ ความถี่ซิงโครนัส (Synchronous frequency)

P_m คือ กำลังทางกล (Mechanical power)

P_e คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)

ซึ่งในระหว่างที่เกิดฟอล์แรงบิตที่โรเตอร์จะเกิดความเร่ง ($T_m > T_s$) หรือความหน่วง ($T_m < T_s$) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าและมุมโรเดอร์จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1, 2 และ 3

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบประกอบด้วยลักษณะโครงข่ายระบบ (System Configuration), ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการปรับตั้ง (Control Parameter and Setting) และชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์เถียรภาพของระบบไฟฟ้า (System Security) ทั้งในการวิเคราะห์ในสภาวะ Dynamic และ Transient

ในการศึกษาครั้งนี้เราจะเฝ้าสังเกตบัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดอยู่ 6 บัส ด้วยกัน ได้แก่ บัส 38033 ซึ่งเป็นบัสเครื่องกำเนิดใหม่ที่จะติดตั้ง ส่วนที่เหลือทั้ง 5 บัส คือ (2007,2008,2021,2023,2041) เป็นบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่มากที่สุด ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน (Local Area) การศึกษาการจำลองระบบในสภาวะ Dynamic นี้จะออกเป็น 3 กรณี คือ

3.3.2.1 การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะที่ไม่เกิดฟอลต์ แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 1.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 1.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033

ซึ่งจากการจำลองระบบเมื่อทำการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละชนิดเข้าไปในระบบทั้ง 3 ชนิดในขณะที่ไม่เกิด fault เพื่อศึกษาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นปกติหรือไม่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นหรือไม่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะที่เกิด fault แบบชั่วคราว (Temporary Fault) โดยจำลองการเกิด fault ขึ้นที่บัส 38033 (บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่) เป็นระยะเวลา 5 cycle แล้วเคลียร์ฟอลต์ออก แบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 2.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 2.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 2.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033

เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อจำลองการเกิดฟอลต์แบบชั่วคราวขึ้นที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ (บัส38033) แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้หรือไม่ เพื่อวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดฟ้าตัวใหม่นี้ด้วย อีกทั้งพิจารณาด้วยว่า เมื่อเกิดฟอลต์ที่บัสนี้แล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงมีการตอบสนองอย่างไร เพื่อเป็นการทดสอบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆอย่างไร

3.3.2.3. การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะเกิดฟอลต์แบบถาวร (Permanent Fault) โดยจำลองการเกิดฟอลต์ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ (บัส38033) เป็นระยะเวลา 5 ไซเคิล แล้วทำการปลด (Trip) สายส่งออก แบ่งการจำลองเป็น 4 กรณี คือ

กรณีที่ 3.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

กรณีที่ 3.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

กรณีที่ 3.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

โดย

L1 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2276

L2 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 38033 ไปยังสายส่งที่บัส 2706

L3 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2211

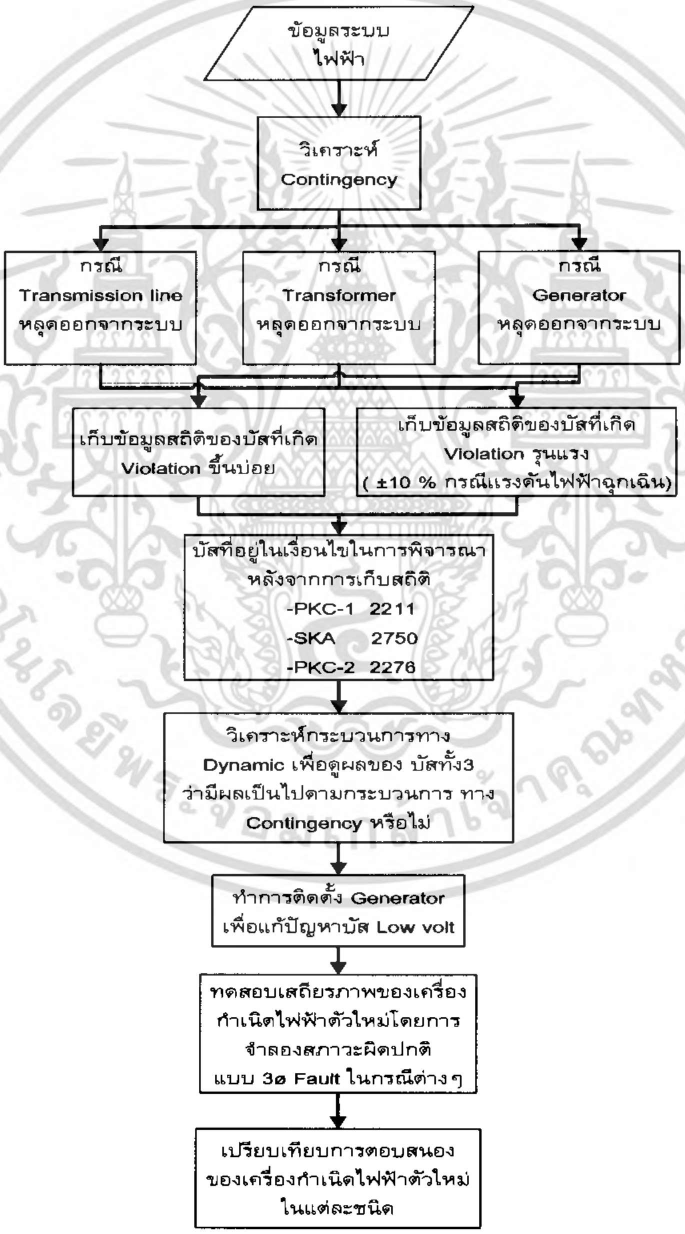
L4 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2705

เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อจำลองการเกิดฟอลต์แบบถาวร (Permanent Fault) ขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ แล้วบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆเกิดผลกระทบอย่างไร และพิจารณาถึงผลของความมีเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นั้น อีกทั้งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ก็ยังคงมีเสถียรภาพด้วยหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ถึงการเลือกสถานที่ที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้หลักการวิเคราะห์ Contingencyแบบ N-1 ซึ่งใช้โปรแกรม Powerworld Simulator V.8 ในการวิเคราะห์และเมื่อเลือกสถานที่ติดตั้งแล้วก็จะทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ดังกล่าวทั้งในสภาวะ steady state และ สภาวะ Dynamic ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PSS/E และทำการวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวกับภาวะหลังจากทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว



รูปที่ 4.1 แสดงโฟลว์ชาร์ตของกระบวนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในการเลือกติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มต้นจากทดลองติดตั้งทั้งหมดทุกบัสที่อยู่ในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับบัสที่ถูกพิจารณา และในแต่ละสถานที่ที่ทำการติดตั้งก็จะทำการเลือกขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย โดยเริ่มตั้งแต่ขนาด 10 MW ขึ้นไป ซึ่งในโครงงานนี้จะแสดงผลที่ได้จากการเลือกสถานที่ติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมแล้ว

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ที่เหมาะสมแล้ว ก็จะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้ง แล้วพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำการติดตั้งมีข้อดีและข้อเสียอย่างไร ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะถูกแสดงผลในบทนี้ ในส่วนของการวิเคราะห์และสรุปผลจะแสดงผลในบทต่อไป

4.1 การวิเคราะห์ Contingency

การวิเคราะห์ Contingency จะเป็นการวิเคราะห์แบบ N-1 โดยจุดประสงค์ของโครงงานจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เพื่อพิจารณาพื้นที่ที่ถูกส่งผลมากที่สุดที่เกิดจากการวิเคราะห์ ซึ่งในการวิเคราะห์ จะประกอบไปด้วยการ contingency เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Powerworld simulator v.8 โดยกำหนดขอบเขตของแรงดันที่ไม่เกิน ± 5% ไว้ดังนี้

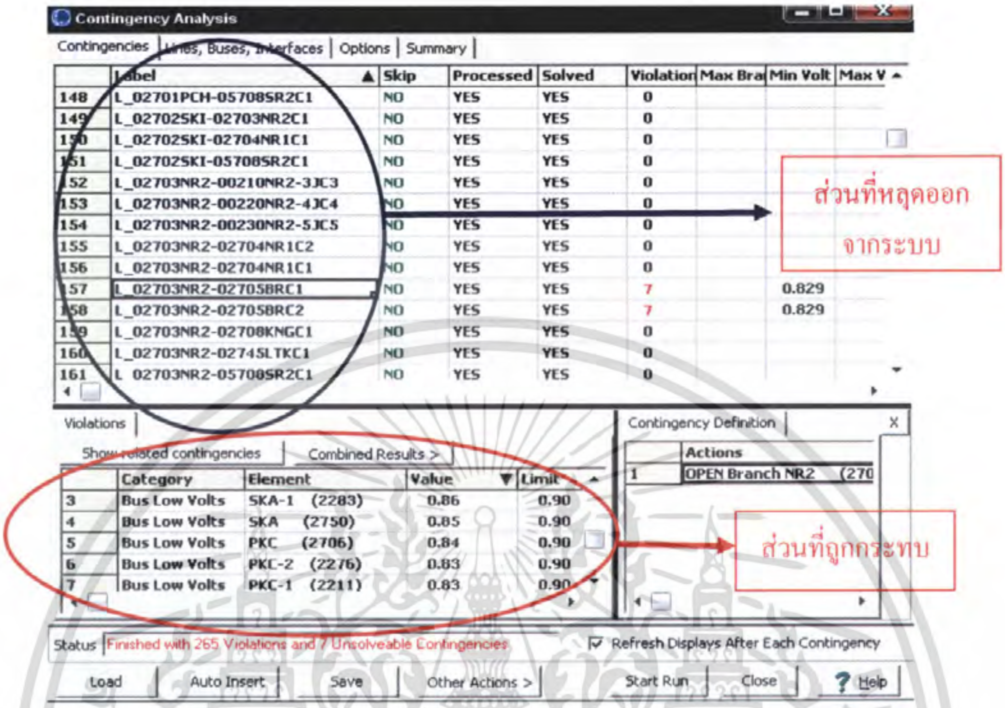
ตารางที่ 4.1 แสดงค่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้า System Voltageและ Voltage Regulation ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Type of Customer	Voltage System (kV.)	Normal Condition		Emergency Condition	
		Maximum (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Minimum (%)
Large Industrial	69, 115 (Line-line)	+ 5 %	- 5 %	+ 10 %	+ 10 %
Medium Industrial	22, 33 (Line-line)	+ 5 %	- 5 %	+ 10 %	+ 10 %
Small Industrial	0.38 (Line-line)	+ 10 %	- 10 %	+ 10 %	+ 10 %
Residential	0.22 (Line-line)	+ 10 %	- 10 %	+ 10 %	+ 10 %

ที่มา : สายใจไฟฟ้ากองประชาสัมพันธ์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคฉบับประจำเดือนธันวาคม 2549

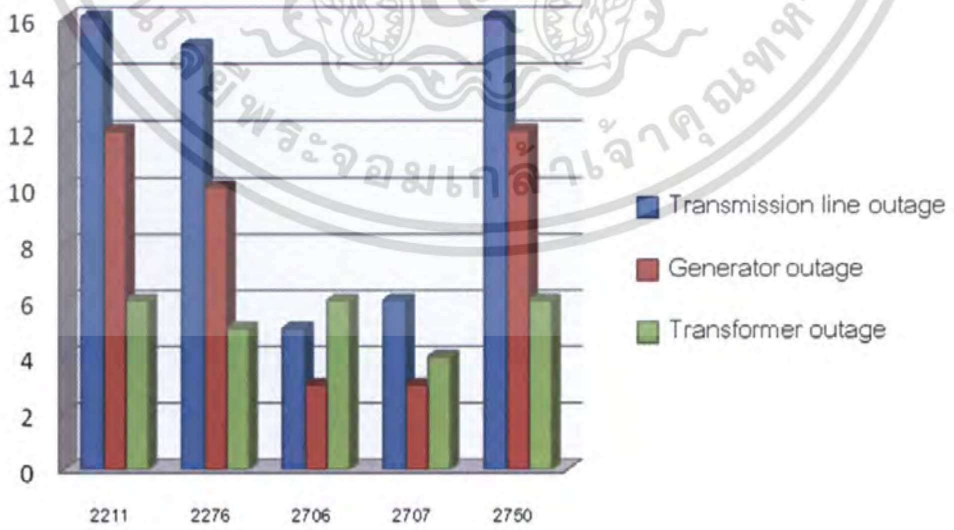
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ contingency แบบ N-1 ของสายส่ง

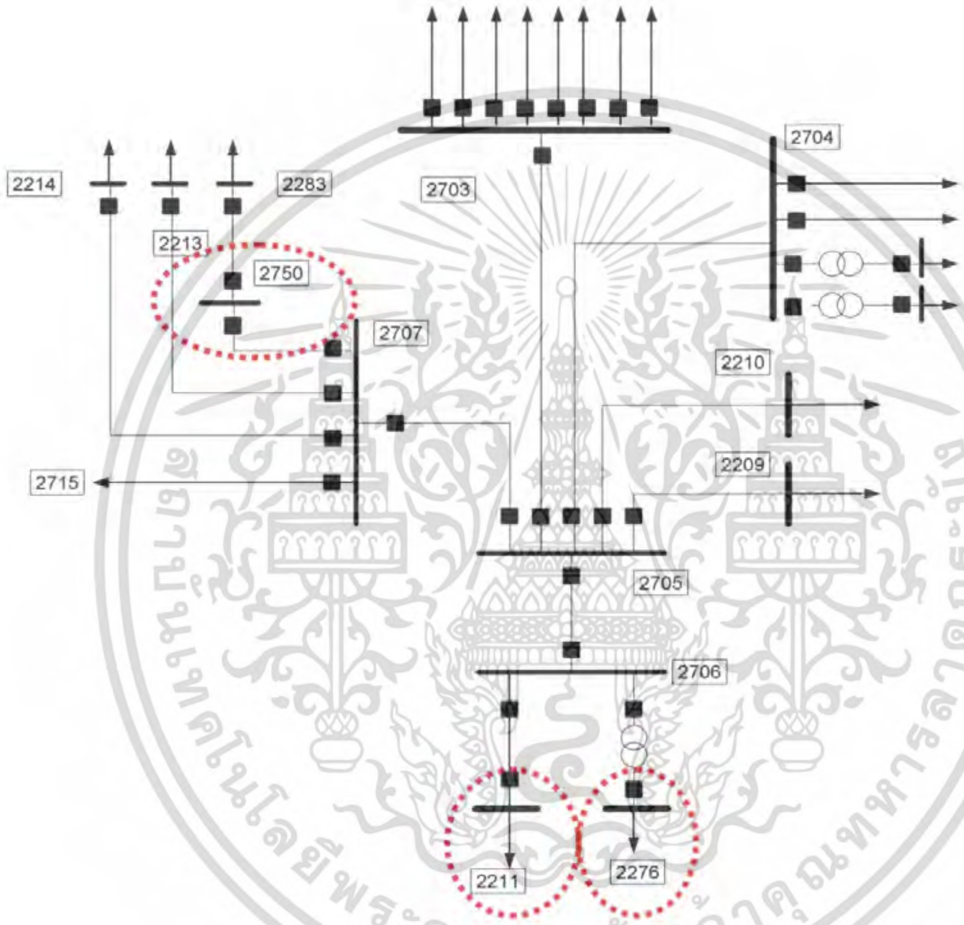
หลังจากที่ทำการวิเคราะห์แล้ว ก็จะได้ผลของแรงดันของบัสที่ถูกส่งผลกระทบบ่อยครั้งที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยกราฟดังนี้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความถี่ของบัสที่ถูกส่งผลกระทบหลังจากการวิเคราะห์ contingency

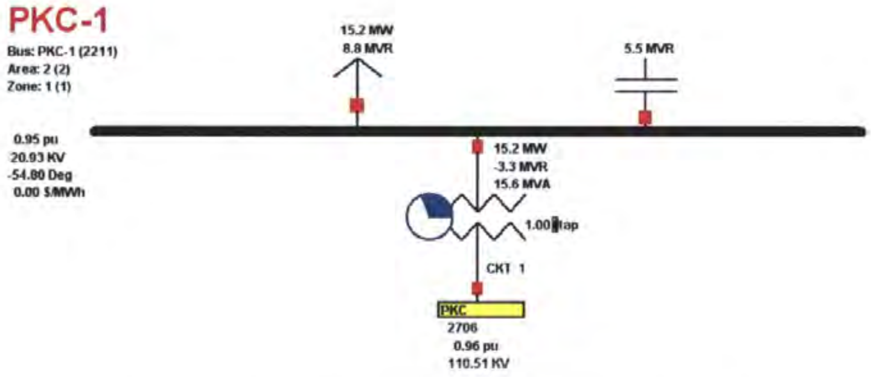
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าบัสที่ถูกส่งผลกระทบบ่อยที่สุดคือ PKC-1 2211, SKA 2750 , PKC-2 2276 ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเป็นผลของแรงดันตกต่ำกว่าค่าแรงดันที่สภาวะฉุกเฉิน เพราะฉะนั้นจะนำบัสเหล่านี้และบัสในบริเวณใกล้เคียงมาทำการศึกษา เพื่อที่จะใช้แนวทางการแก้ไขโดยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

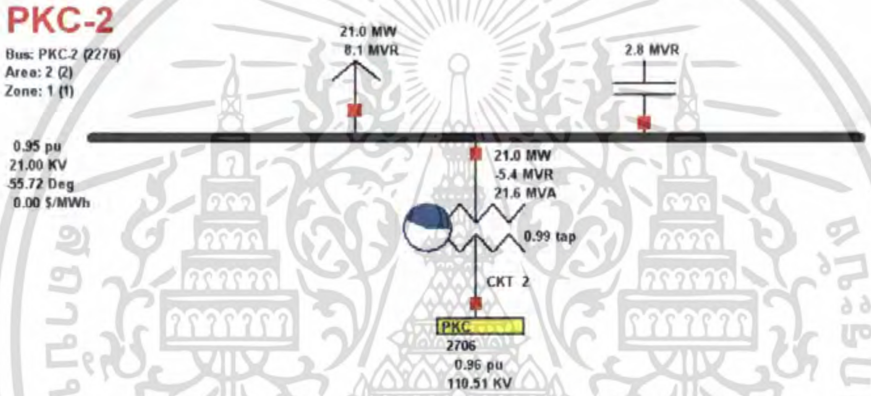


รูปที่ 4.4 แสดง single line diagram โครงข่ายระบบไฟฟ้าของบัส PKC-1 2211,SKA 2750, PKC-2 2276 และบริเวณใกล้เคียง

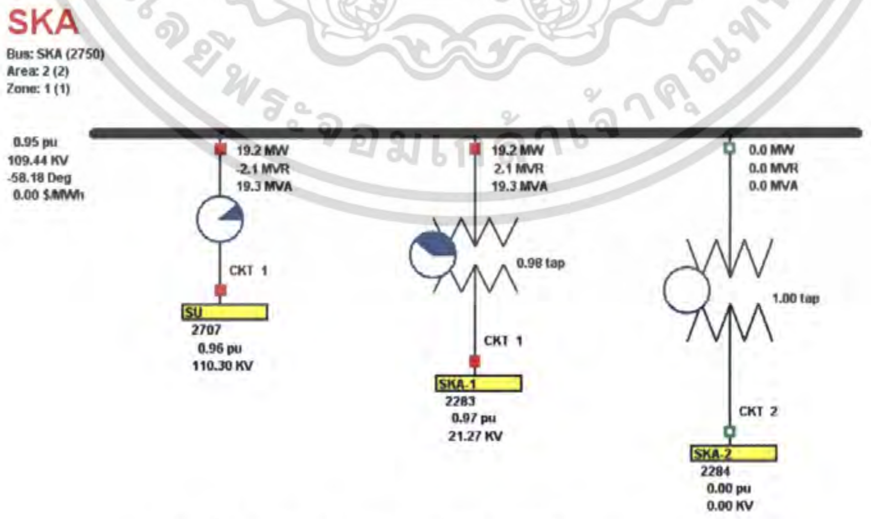
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดง power flow ของบัส PKC-1 2211



รูปที่ 4.6 แสดง power flow ของบัส PKC- 2276



รูปที่ 4.7 แสดง power flow ของบัส SKA 2750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบจากการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1

โดยแสดงผลของบัสที่ถูกผลกระทบที่มีค่าของแรงดันเกินขีดจำกัดของแรงดันในสภาวะฉุกเฉิน คือ ± 10 % (0.90 p.u. – 1.10 p.u.) ภายหลังจากการวิเคราะห์ contingency ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งบัสที่ถูกส่งผลกระทบทั้งหมดล้วนแล้วแต่มาจากการ outage ของสายส่งในระบบ

ตารางที่ 4.2 แสดงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกจากระบบ และผลกระทบจากการหลุดออกของอุปกรณ์

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	**ผลกระทบที่เกิดขึ้นใน area ที่พิจารณา**
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PYK 2715 และ RE-2 2716 หลุดออกจากระบบ 1 วงจร	Low voltage ที่บัส SKA 2750 ที่ระดับแรงดัน 0.85 p.u Low voltage ที่บัส PKC-1 2211 ที่ระดับแรงดัน 0.86 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-2 2276 . ที่ระดับแรงดัน 0.86 p.u Low voltage ที่บัส PYK-2 2248 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u. Low voltage ที่บัส PKC 2706 ที่ระดับแรงดัน 0.86 p.u. Low voltage ที่บัส SU 2707 ที่ระดับแรงดัน 0.86 p.u. Low voltage ที่บัส SKA-1 2283 ที่ระดับแรงดัน 0.85 p.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกจากระบบ และผลกระทบจากการหลุดออกของอุปกรณ์

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ผลกระทบที่เกิดขึ้นใน area ที่พิจารณา
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 หลุดออกจากระบบ 1 วงจร	Low voltage ที่บัส SKA 2750 ที่ระดับแรงดัน 0.85 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-1 2211 ที่ระดับแรงดัน 0.83 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-2 2276 ที่ระดับแรงดัน 0.83 p.u. Low voltage ที่บัส BR 2705 ที่ระดับแรงดัน 0.87 p.u. Low voltage ที่บัส PKC 2706 ที่ระดับแรงดัน 0.84 p.u. Low voltage ที่บัส SU 2707 ที่ระดับแรงดัน 0.86 p.u. Low voltage ที่บัส SKA-1 2283 ที่ระดับแรงดัน 0.83 p.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกจากระบบ และผลกระทบจากการหลุดออกของอุปกรณ์

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ผลกระทบที่เกิดขึ้นใน area ที่พิจารณา
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-1 2704 และ BR 2705 หลุดออกจากระบบ	Low voltage ที่บัส SKA 2750 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-1 2211 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-2 2276 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u. Low voltage ที่บัส PKC 2706 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u.
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส BKN 2740 และ PXN 8705หลุดออกจากระบบ	Low voltage ที่บัส LE 2735 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u. Low voltage ที่บัส NBL-1 2267 ที่ระดับแรงดัน 0.87 p.u. Low voltage ที่บัส LE-2 2270 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u. Low voltage ที่บัส BKN-1 2279 ที่ระดับแรงดัน 0.84 p.u. Low voltage ที่บัส BKN 2740 ที่ระดับแรงดัน 0.84 p.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกจากระบบ และผลกระทบจากการหลุดออกของอุปกรณ์

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ผลกระทบที่เกิดขึ้นใน area ที่พิจารณา
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2801 และ LTK 2807 หลุดออกจากระบบ 1 วงจร	Low voltage ที่บัส SKA 2750 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-1 2211 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u. Low voltage ที่บัส PKC-2 2276 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u. Low voltage ที่บัส PKC 2706 ที่ระดับแรงดัน 0.89 p.u. Low voltage ที่บัส SU 2707 ที่ระดับแรงดัน 0.90 p.u.
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส KK-3 2803 และ RE 2805 หลุดออกจากระบบ	High voltage ที่บัส NN-3 2289 ที่ระดับแรงดัน 1.11 p.u.
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส KL 2714 และ SD 2743 หลุดออกจากระบบ	Low voltage ที่บัส SD 2743 ที่ระดับแรงดัน 0.88 p.u.

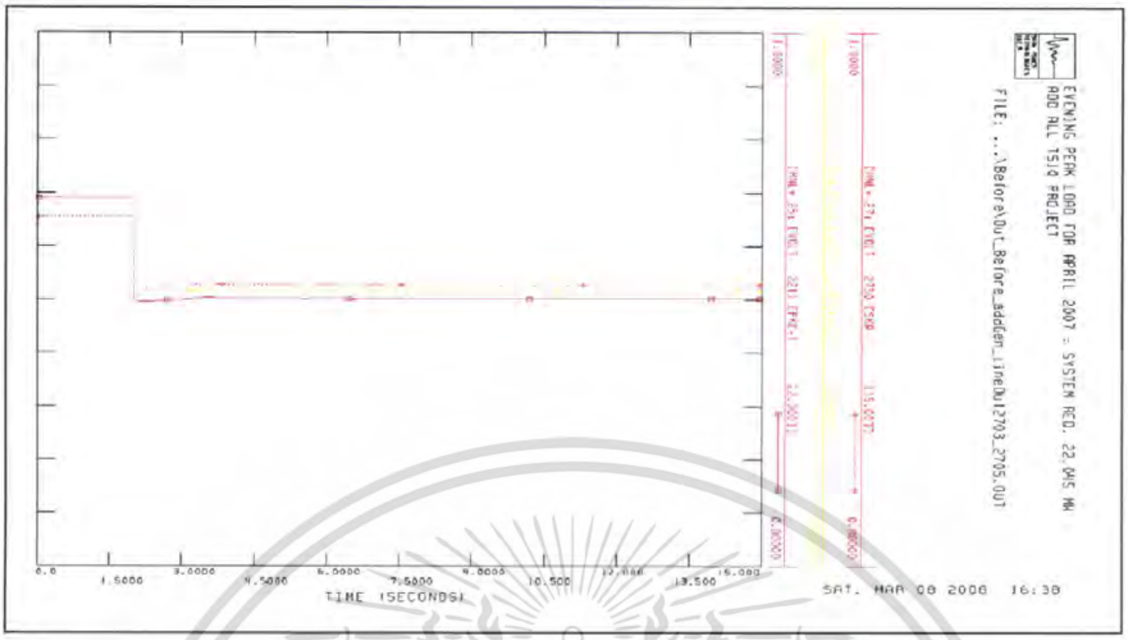
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ Contingency พบว่าแรงดันที่บัส PKC-1 2211, SKA 2750, PKC-2 2276 มีค่าของแรงแรงดันที่เกินกว่าค่าพิกัดของในสภาวะฉุกเฉิน และเกิดความถี่ของการถูกส่งผลกระทบสูงที่สุด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอาจทำไม่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ และอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับในบางพื้นที่ได้ โดยมีระดับแรงดันดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.3 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,SKA 2750, PKC-2 2276 ภายหลังจาก การวิเคราะห์ Contingency

เหตุการณ์	Voltage ที่บัสก่อนการติดตั้ง Gen (p.u.)		
	PKC-1 2211	PKC-2 2276	SKA 2750
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PYK 2715 และ REC-1 2716 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.87	0.87	0.85
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PYK 2715 และ REC-1 2716 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.87	0.87	0.85
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.83	0.83	0.85
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.83	0.83	0.85
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส BKN 2740 และ PXN 8705 หลุดออกจากระบบ	0.92	0.93	0.92
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2801 และ LTK 2807 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.88	0.88	0.89
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2801 และ LTK 2807 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.88	0.88	0.89
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-1 2704 และ BR 2705 หลุดออกจากระบบ	0.88	0.88	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.8 แสดงตัวอย่างของแรงดันที่บัส PKC-1 2211, PKC-2 2276 และ SKA 2750 เมื่อสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 1 หรือ 2 หลุดออกจากระบบ

จากการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 จะพบว่าสายถ้าสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 หลุดออกจากระบบแล้วจะทำให้ บัส PKC-1 2211 ,PKC-2 2276 และ SKA 2750 เกิดปัญหาแรงดันตกและต่ำกว่าค่าที่พิกัดในสภาวะฉุกเฉิน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าแรงดันลดต่ำลงโดยใช้การวิเคราะห์ในสภาวะ Dynamic ได้ดังรูปที่ 4.7

จากการจำลองระบบในสภาวะ Dynamic พบว่าเมื่อมีเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ไฟฟ้าหลุดออกจากระบบไฟฟ้า ที่บัส PKC-1 2211 ,PKC-2 2276 และ SKA 2750 จะได้รับผลกระทบทำให้แรงดันตกและมีค่าต่ำกว่าพิกัดแรงดันในสภาวะฉุกเฉินเช่นเดียวกันกับในสภาวะ steady state (การวิเคราะห์ contingency) ซึ่งค่าของแรงดันภายหลังการจำลองระบบในสภาวะ Dynamic จะมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ Contingency นั่นก็คือค่ายังต่ำกว่าค่าแรงดันในสภาวะฉุกเฉิน

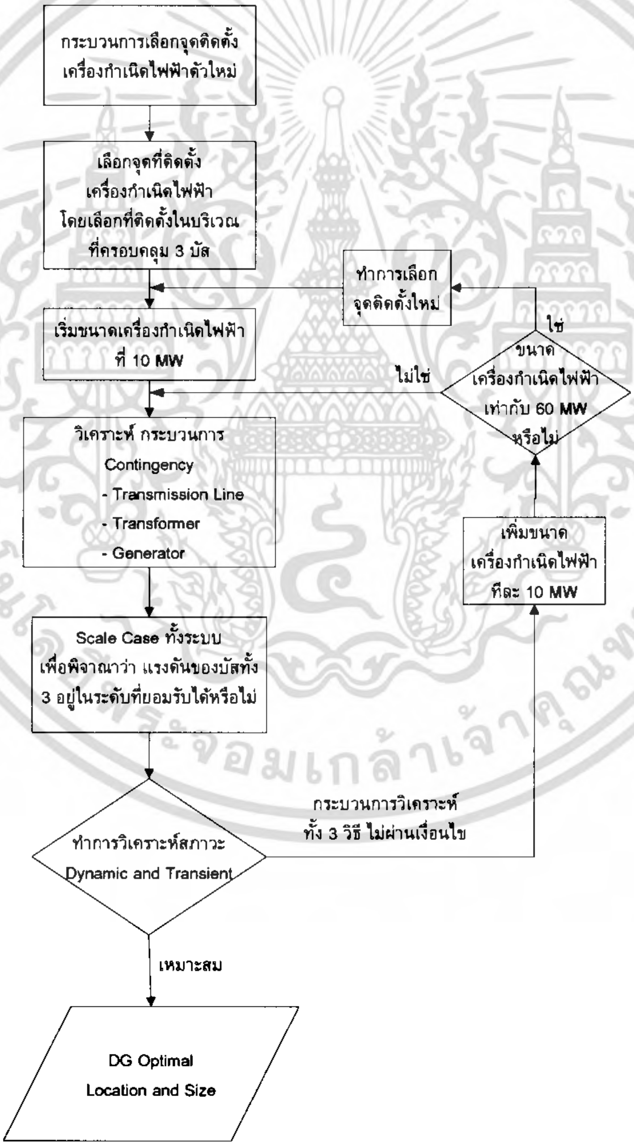
เมื่อการทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาหาจุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเบื้องต้นโดยวิธีการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 แล้ว พบว่ามีบัสที่ถูกผลกระทบอยู่เสมอ คือ บัส PKC-1 2211 , PKC-2 2276 และ SKA 2750 ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อบัสเหล่านี้คือ แรงดันจะตกลงไปจนต่ำกว่าค่าแรงดันที่พิกัดของแรงดันในสภาวะฉุกเฉินที่การไฟฟ้าได้กำหนดไว้ดังตาราง 4.1 เพราะฉะนั้นเราจึงตั้งสมมติฐานการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าว เพื่อช่วยแก้หาปัญหาของแรงดันที่ตกลง ในสภาวะที่เกิดสิ่งผิดปกติในระบบ พร้อมทั้งพิจารณาเลือกขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการติดตั้งเพื่อแก้ไขปัญหาของสภาวะแรงดันที่ต่ำกว่าพิกัดของของบัสที่ได้จากการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 โดยภายหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็จะทำการศึกษาและติดตามผลทั้งในสภาวะ steady state และสภาวะ Dynamic โดยในสภาวะ Dynamic นี้จะทำการจำลองระบบสภาวะผิดพร่อง (fault) ให้เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำการติดตั้งเข้าไปใหม่

สำหรับในการเลือกติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มต้นจากทดลองติดตั้งทั้งหมดทุกบัสที่อยู่ในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับบัสที่ถูกพิจารณา และในแต่ละสถานที่ที่ทำการติดตั้งก็จะทำการเลือกขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย โดยเริ่มตั้งแต่ขนาด 10 MW ขึ้นไป ซึ่งในโครงงานนี้จะแสดงผลที่ได้จากการเลือกสถานที่ติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมแล้ว ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงกระบวนการเลือกที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการในการเลือกจุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่

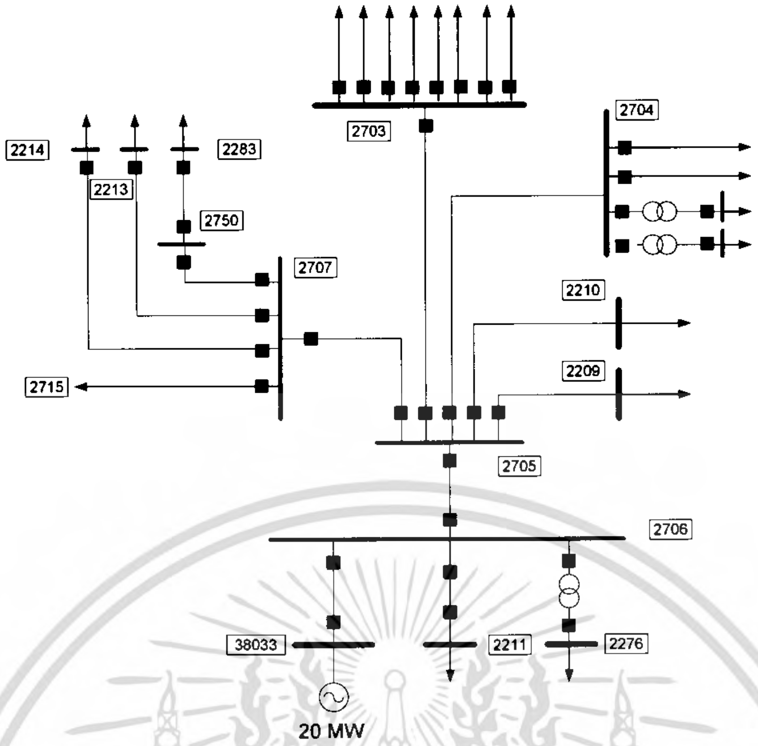
กระบวนการในการเลือกจุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่เข้าสู่ระบบ โดยพิจารณาบริเวณที่จะสามารถยกระดับแรงดันให้บัสที่มีแรงดันตกมาก ๆ ได้ และบริเวณใกล้เคียงโดยทำในลักษณะเดียวกันและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยเราจะติดเครื่องกำเนิดกำเนิดไฟฟ้าเริ่มจากขนาด 10 MW ไปจนถึงขนาดที่ระบบไม่มีเสถียรภาพ เมือติดไปแล้วทำการวิเคราะห์ตามกระบวนการดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์ Contingency เพื่อดูว่าจำนวน Violation นำไปเปรียบเทียบกับระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. จากนั้นทำการเพิ่ม Scale Load ทั้งระบบ แล้วดูว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าสู่ระบบนั่นจะช่วยให้แรงดันที่บัส 2211 ,2276 และ 2750 อยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งจุดมุ่งหมายของการเพิ่ม Scale Load นั่นก็เพื่อที่จะพิจารณาว่าถ้าหากความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอนาคต แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ติดให้ระบบจะยังคงช่วยให้แรงดันที่บัสยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง
3. แล้วทำศึกษา Dynamic Performance ระบบที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปใหม่เพื่อดูค่าการแกว่งของ power ที่บัส Gen ว่าถ้าหาเกิดฟอลด์ขึ้น Gen จะกลับสู่สภาวะปรกติได้หรือไม่

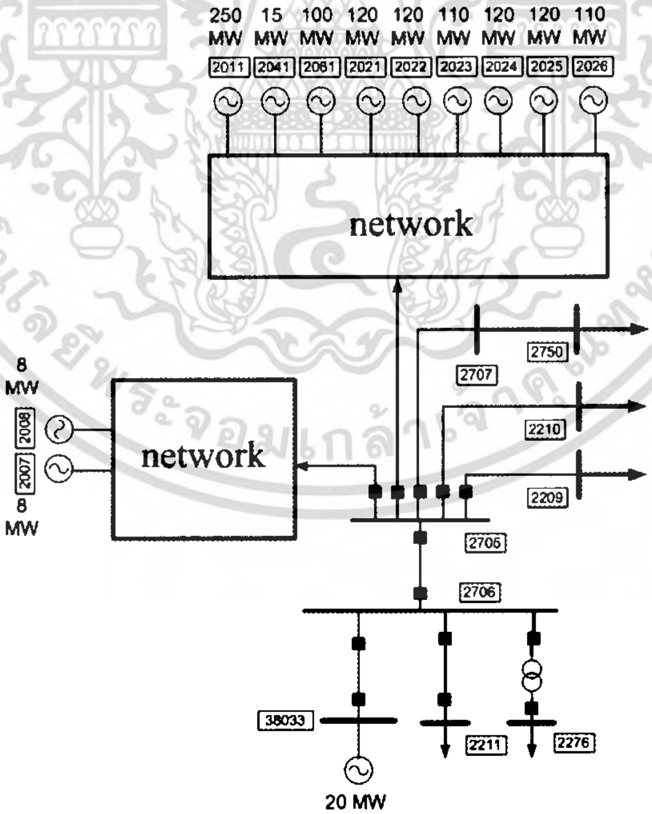
หลังจากที่ได้เพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ขนาด 20 MW เข้าไปในระบบซึ่งในขั้นต้นเราจะทำการศึกษาระบบไฟฟ้าในสภาวะ steady state จากโปรแกรม Powerworld Simulator V.8 ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนการติดตั้งและรูปที่ 4.13 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าหลังการติดตั้ง โดยก่อนการติดตั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบัส BR 2705 ไปยัง PKC 2706 มีค่าเท่ากับ 36.2 MW แต่หลังจากที่ติดตั้ง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลจะลดลงเหลือ 16.2 MW ส่วนในค่ากำลังของสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PKC-1 2211 กับ PKC 2706 และ PKC-2 2276 กับ PKC 2706 จะมีค่าคงที่ที่ 15.2 MW และ 21.0 MW

และในส่วนของผลการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 ภายหลังจากการติดเครื่องแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ก่อนการติดตั้งในตารางที่ 4.3 ค่าของแรงดันจะเพิ่มขึ้นและอยู่ในพิกัดค่าแรงที่สภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



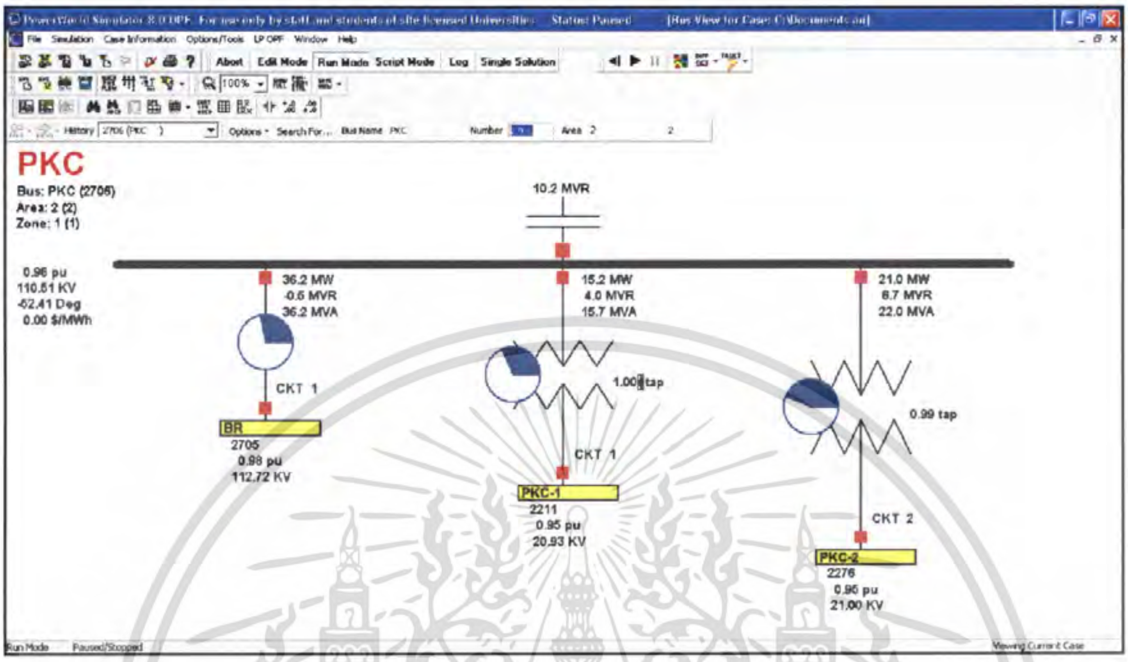
รูปที่ 4.10 แสดง single line diagram ของระบบหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



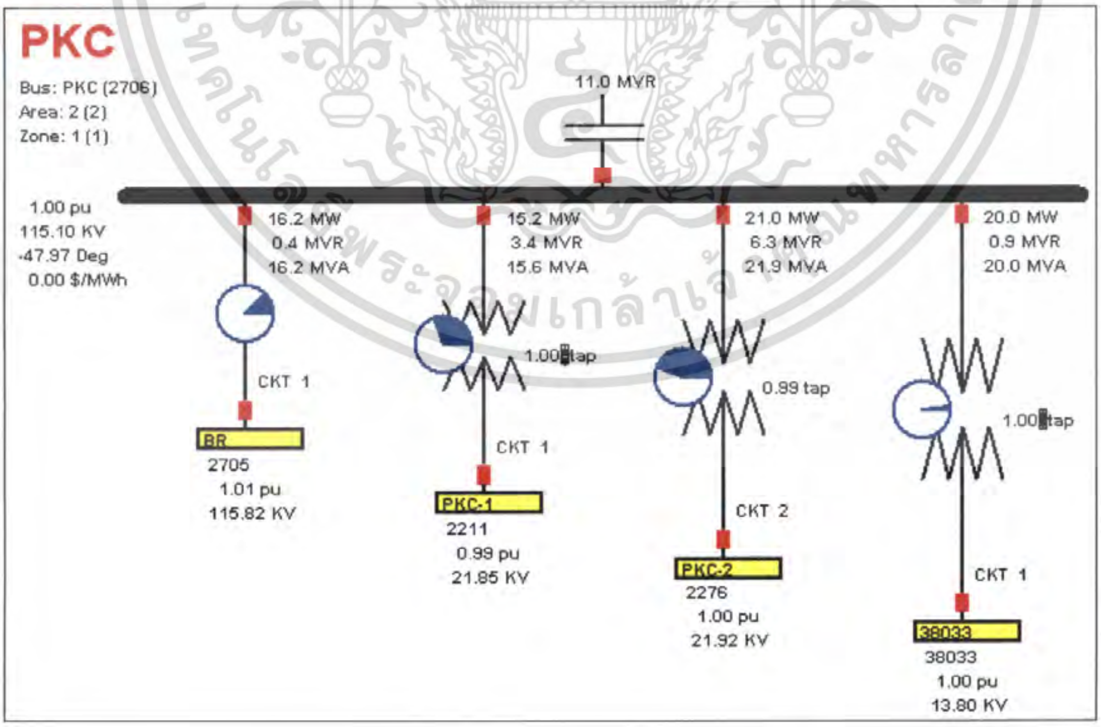
รูปที่ 4.11 แสดง single line diagram ของ Generator และบริเวณใกล้เคียงหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Flow ที่ไหลในระบบ



รูปที่ 4.12 แสดง power flow ที่ไหลในระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 แสดง power flow ที่ไหลในระบบหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

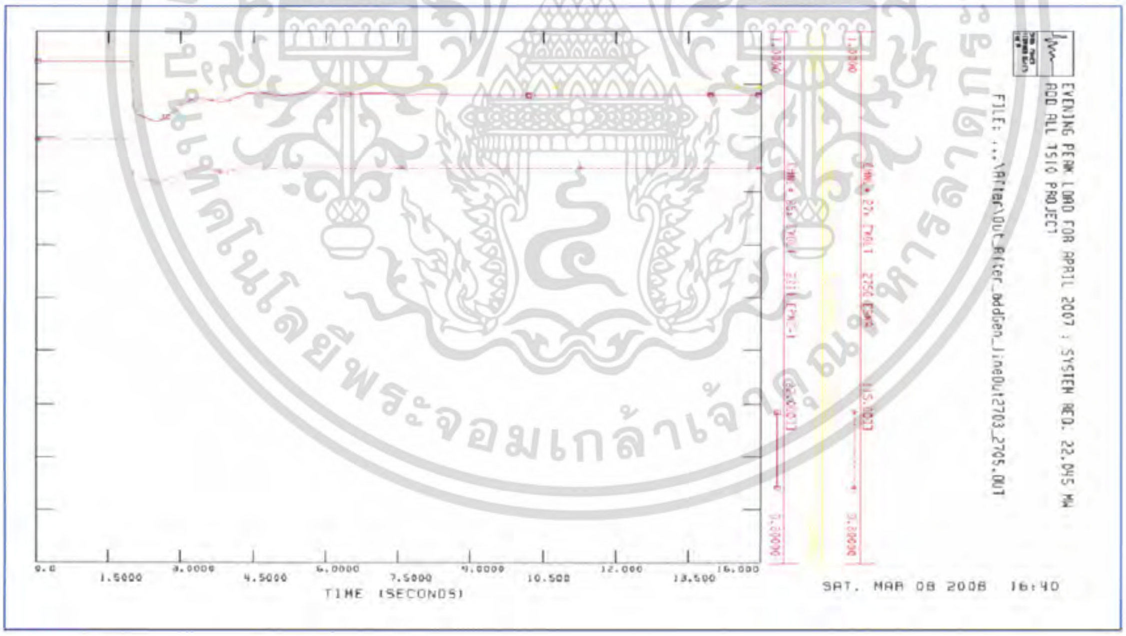
ตารางที่ 4.4 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,SKA 2750, PKC-2 2276 ภายหลังจากการวิเคราะห์ Contingency เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว

เหตุการณ์	Voltage ที่บัสก่อนการติดตั้ง Gen (p.u.)		
	PKC-1 2211	PKC-2 2276	SKA 2750
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PYK 2715 และ REC-1 2716 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.97	0.98	0.93
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส PYK 2715 และ REC-1 2716 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.97	0.98	0.93
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.98	0.98	0.96
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2703 และ BR 2705 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.98	0.98	0.96
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส BKN 2740 และ PXN 8705 หลุดออกจากระบบ	0.99	0.99	0.96
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2801 และ LTK 2807 วงจรที่ 1 หลุดออกจากระบบ	0.97	0.98	0.95
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-2 2801 และ LTK 2807 วงจรที่ 2 หลุดออกจากระบบ	0.97	0.98	0.95
สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส NR-1 2704 และ BR 2705 หลุดออกจากระบบ	0.98	0.99	0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

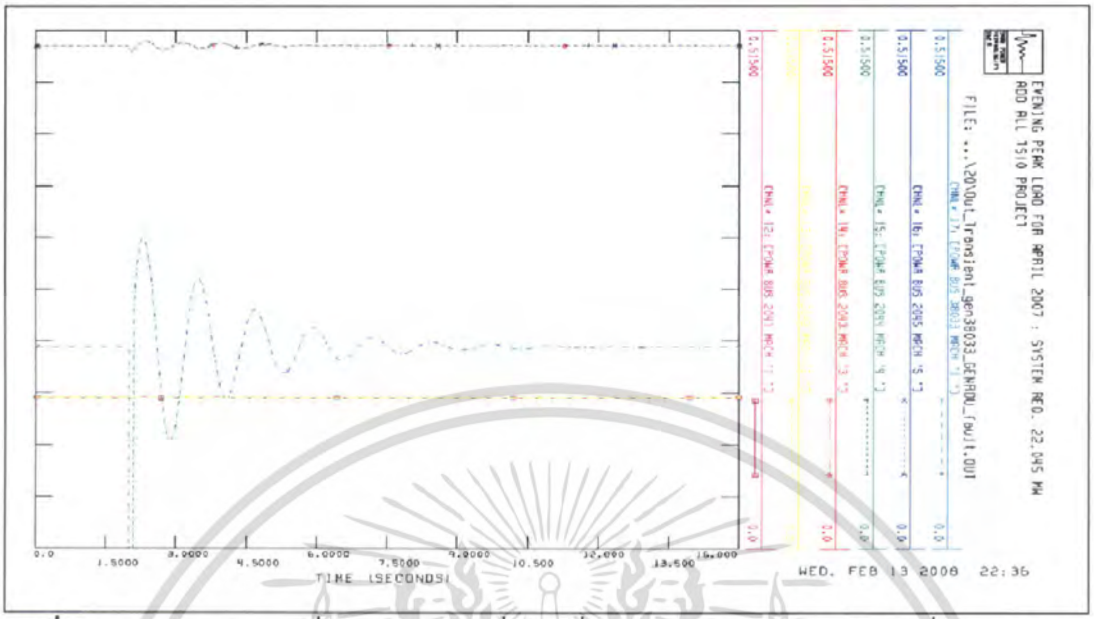
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของจำนวนครั้งที่เกิด Violation ระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Contingency	จำนวน Violation ก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ครั้ง)	จำนวน Violation หลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 MW ที่บัส 2706 (ครั้ง)	จำนวน Violation หลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 MW ที่บัส 2706 (ครั้ง)	จำนวน Violation หลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 30 MW ที่บัส 2706 (ครั้ง)
สายส่งหลุดออกจากระบบ	1820	2460	1200	1980
หม้อแปลงไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ	1181	3093	931	1932
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ	343	740	175	407

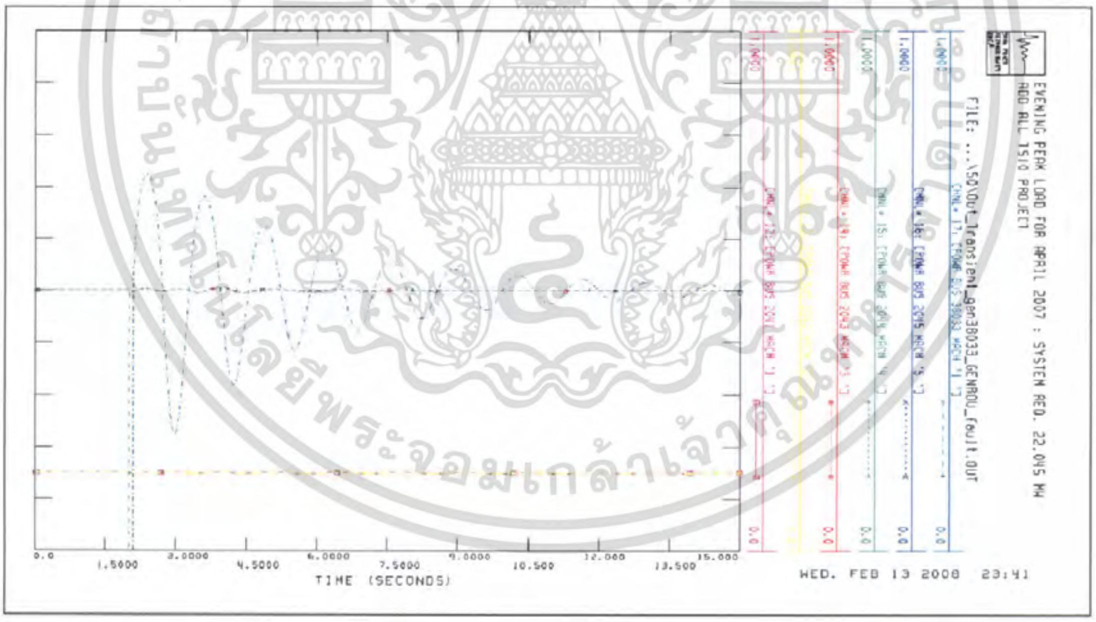


รูปที่ 4.14 แสดงระดับแรงดันที่บัส PKC-1 2211,PKC-2 2276 และ SKA 2750 หลังจากที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส test 38033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดง power ที่บัส Gen ขณะที่ติดเครื่องกำเนิดขนาด 20 MW เข้าที่บัส 38033



รูปที่ 4.16 แสดง power ที่บัส Gen ขณะที่ติดเครื่องกำเนิดขนาด 50 MW เข้าที่บัส 38033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาระบบในสภาวะ steady state

การศึกษาระบบในสภาวะ Dynamic หลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขั้นต้นจะทำการศึกษาผลของการแก้ปัญหาแรงดันที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และสำหรับในการวิเคราะห์ จะทำการศึกษาและเฝ้าสังเกตบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง จำนวน 5 บัส คือ บัส UR-H2 2007 , UR-H3 2008 , NPO2-C11 2021 , NPO2-C10 2023 NNG-H1 2041 และบัสที่ทำการติดตั้ง Test 38033 โดยการศึกษาระบบในสภาวะ Dynamic จะแบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี คือ

1. การจำลองระบบในสภาวะปกติไม่เกิดสิ่งรบกวน (Normal Condition)
2. การจำลองระบบในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบชั่วคราว (Temporary Fault)
3. การจำลองระบบในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบถาวร (Permanent Fault)

ซึ่งในแต่ละสภาวะของการจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้าจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะใช้ในการติดตั้ง ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในจำลองมีดังนี้

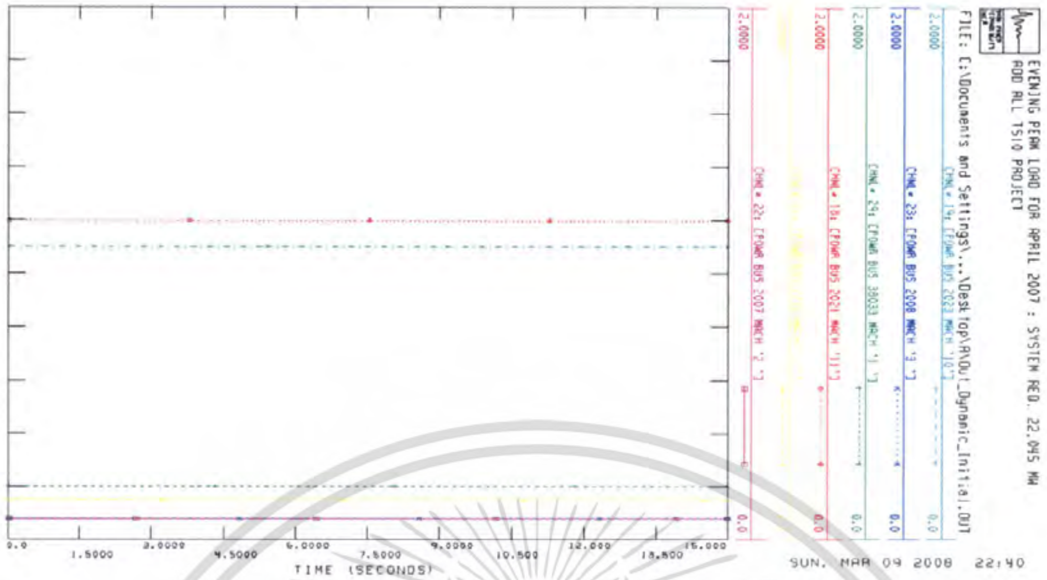
- Round-rotor Synchronous Generator (RRSG)
- Salient Pole Synchronous Generator(SPSG)
- Induction Generator (IG)

การจำลองระบบในสภาวะปกติไม่เกิดสิ่งรบกวน (Normal Condition)

- Round-rotor Synchronous Generator (RRSG)
- Salient Pole Synchronous Generator(SPSG)
- Induction Generator (IG)

สำหรับผลของการจำลองระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดในสภาวะ Dynamic ขณะที่ไม่เกิดสิ่งรบกวน โดยจะทำการศึกษาค่าของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงซึ่งจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด จะให้ผลของในลักษณะเดียวกัน ดังรูป

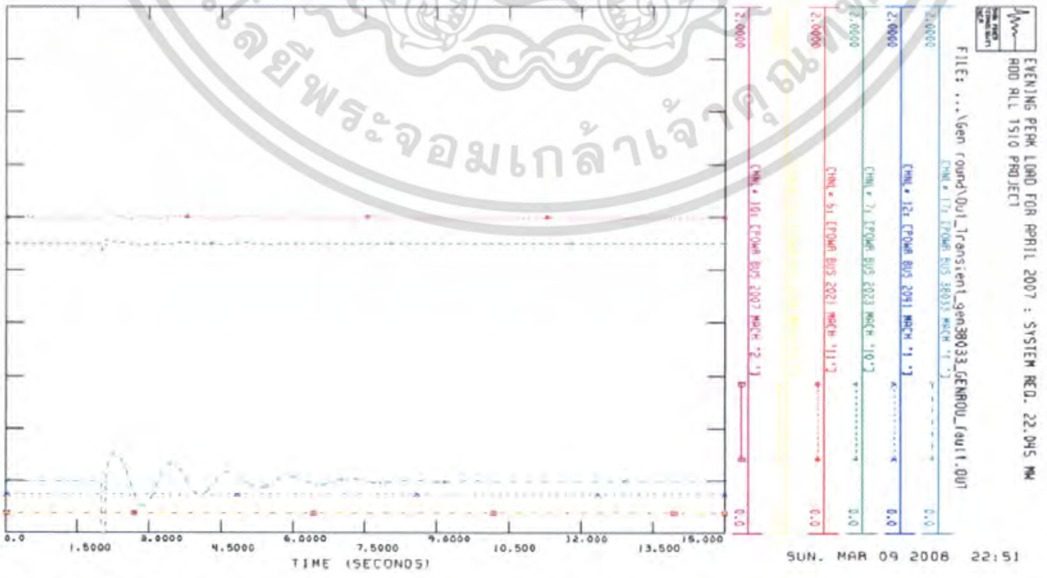
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสภาวะDynamic ในขณะที่ไม่มีสิ่งรบกวน (Normal Condition) ของ Generator ทั้ง 3 ชนิด

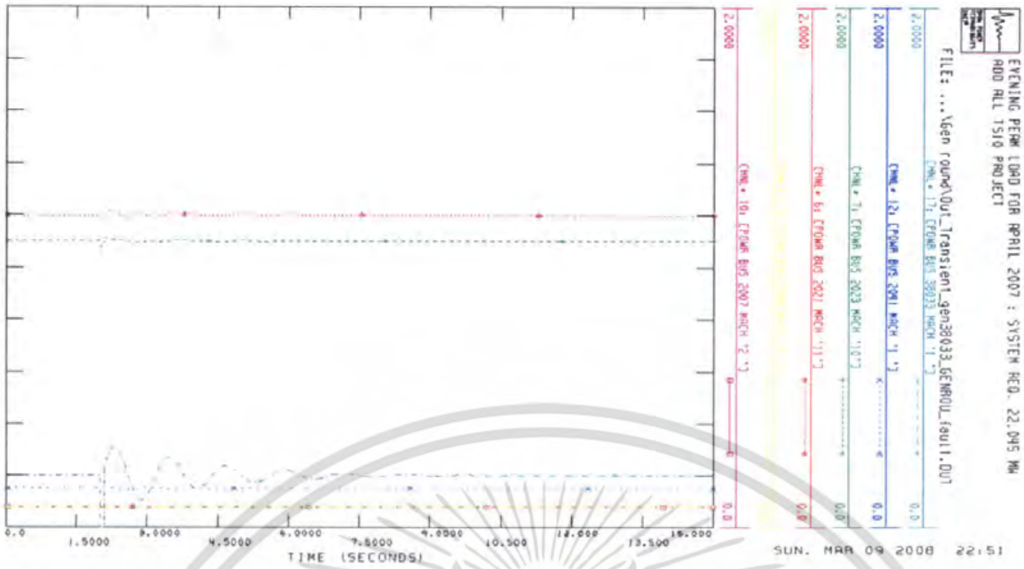
การจำลองระบบในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบชั่วคราว (Temporary Fault)

- Round-rotor Synchronous Generator (RRSG) รูปที่ 4.13 (a)
- Salient Pole Synchronous Generator(SPSG) รูปที่ 4.13 (b)
- Induction Generator (IG) รูปที่ 4.13 (c)



รูปที่ 4.18 (a) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง RRSG ที่บัส Test 38033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



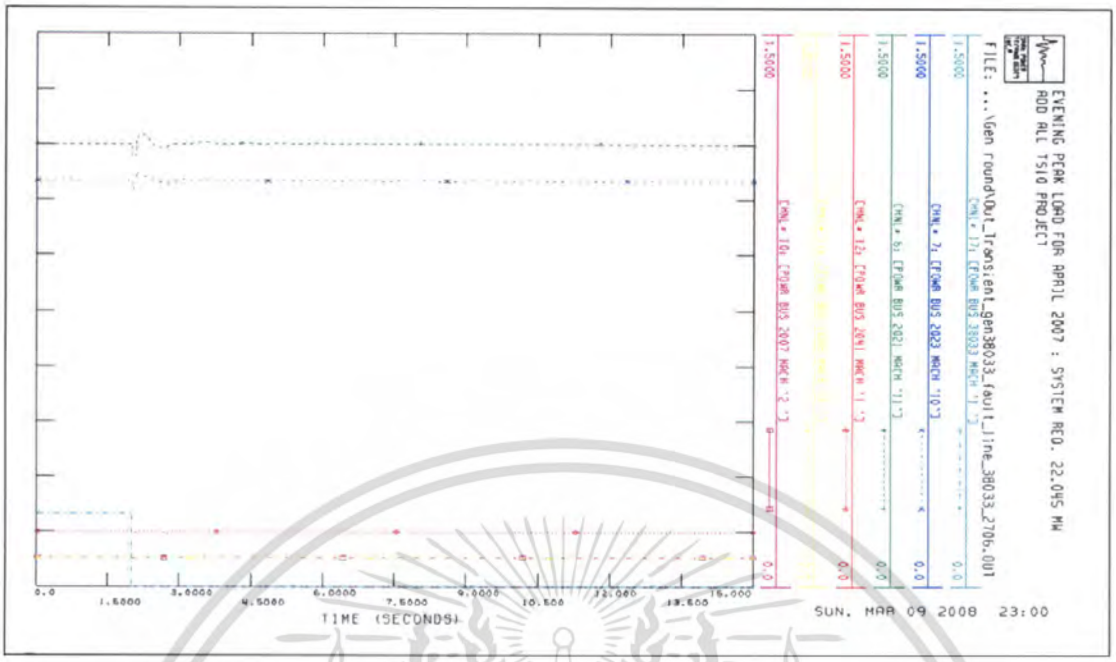
รูปที่ 4.18 (b) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง SPSG ที่บัส Test 38033

รูปที่ 4.18 (c) ผลการจำลอง Dynamic ในขณะที่เกิดสิ่งรบกวนแบบชั่วคราวเมื่อติดตั้ง IG ที่บัส Test 38033

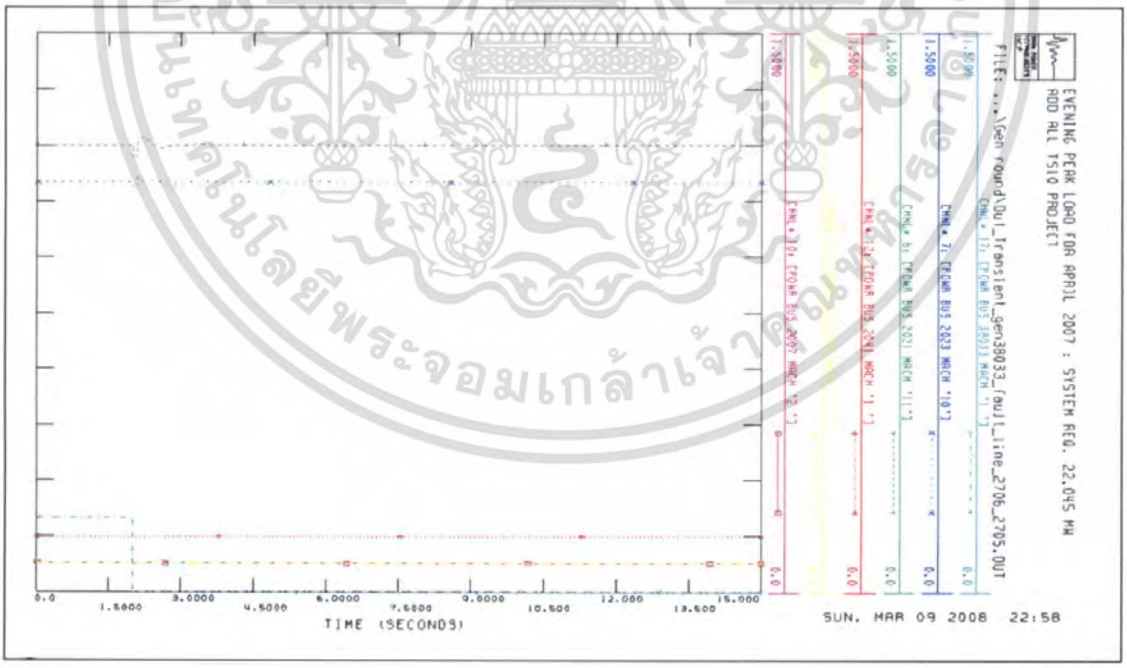
การจำลองระบบในสภาวะที่เกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบถาวร (Permanent Fault)

- Round-rotor Synchronous Generator (RRSG) รูปที่ 4.16
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

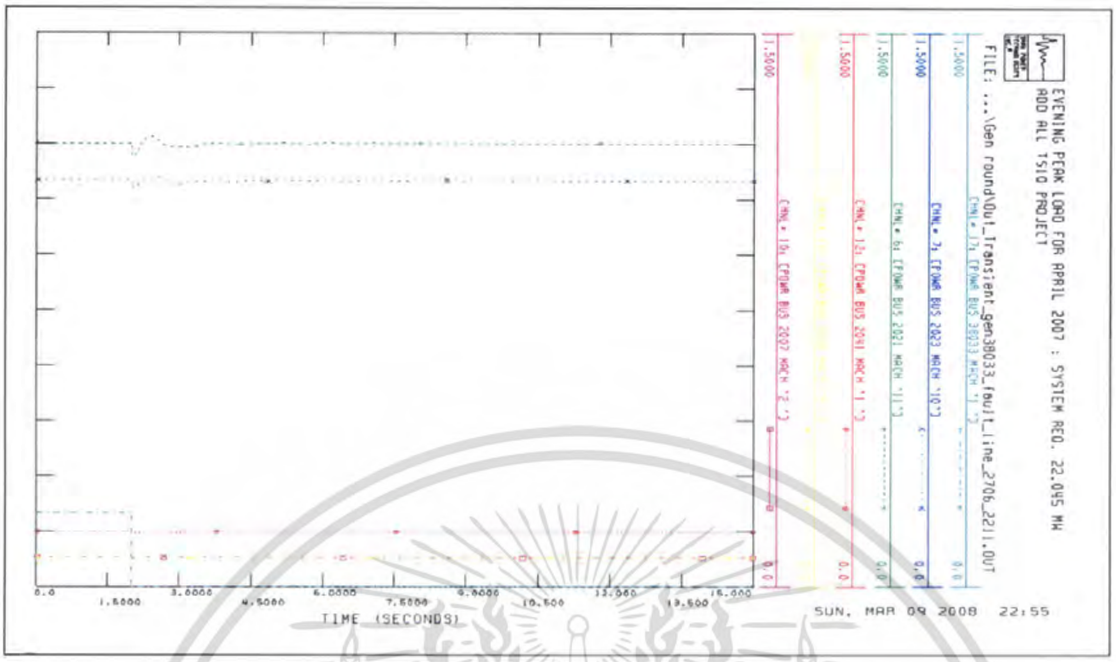


รูปที่ 4.19 (a) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก

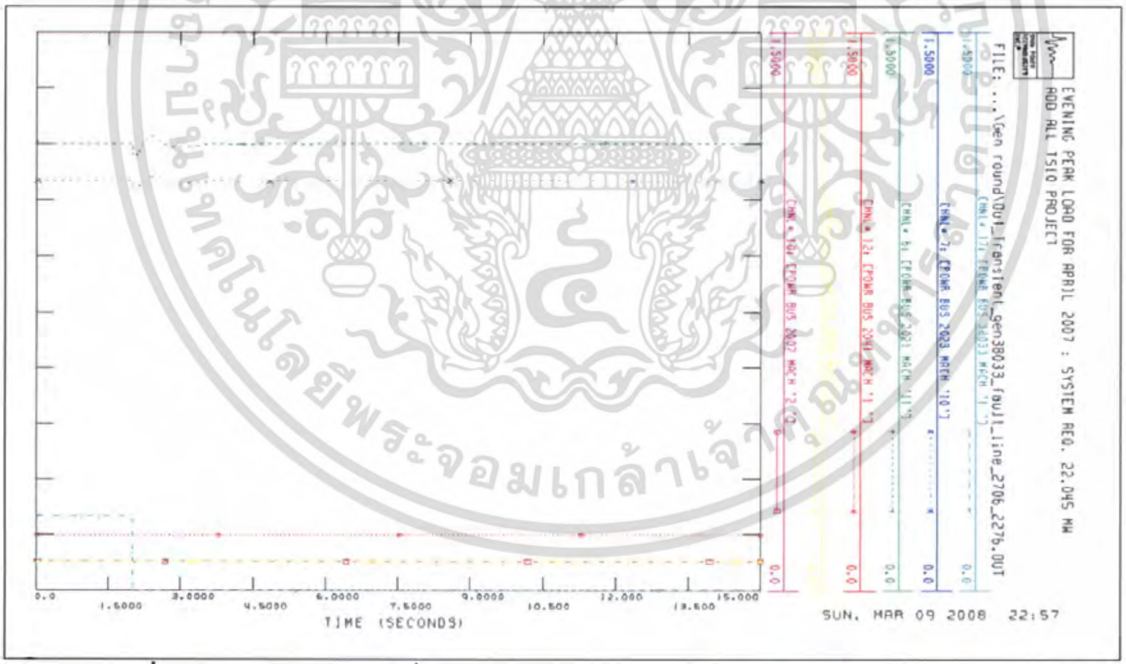


รูปที่ 4.19 (b) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



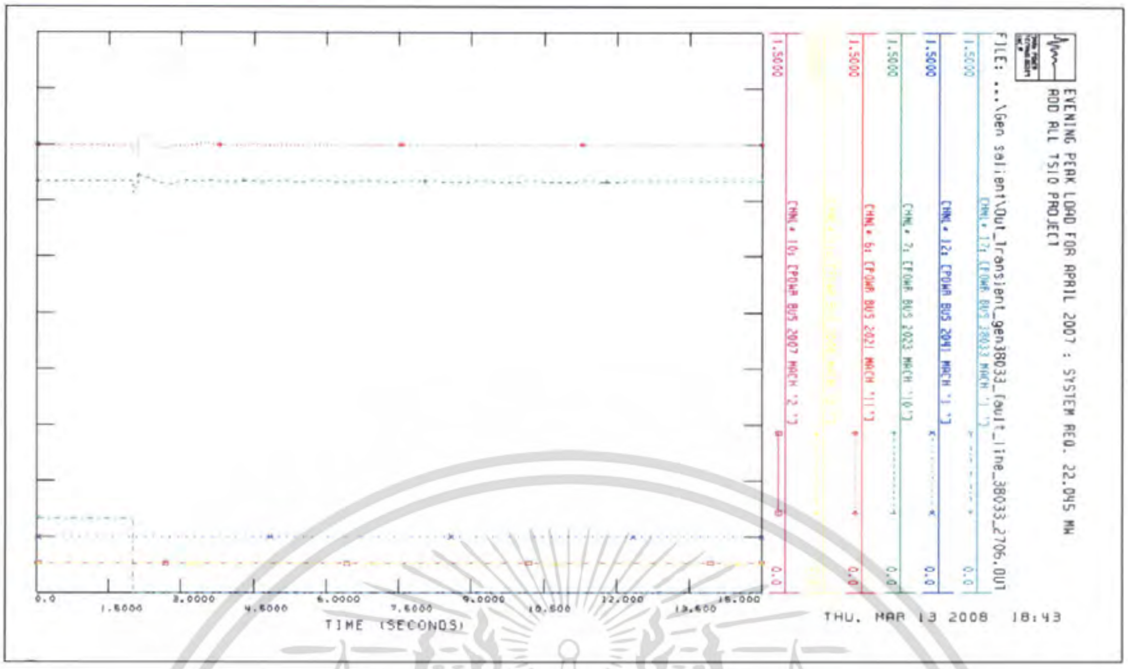
รูปที่ 4.19 (c) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก



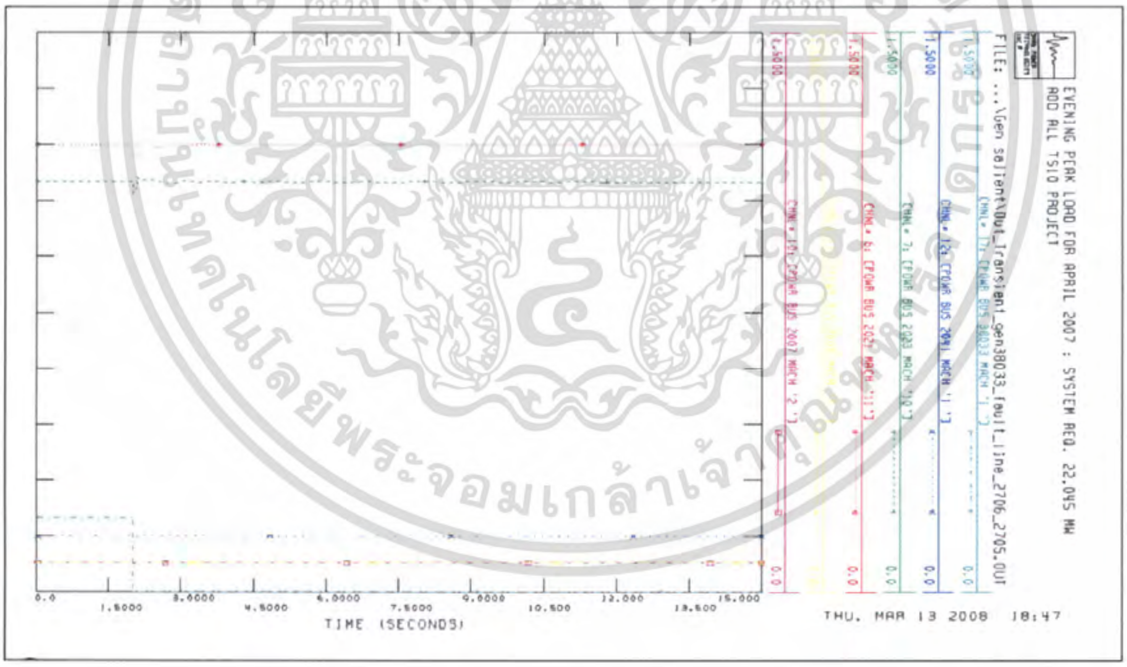
รูปที่ 4.19 (d) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก

- Salient Pole Synchronous Generator(SPSG) ดังรูปที่ 4.17
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

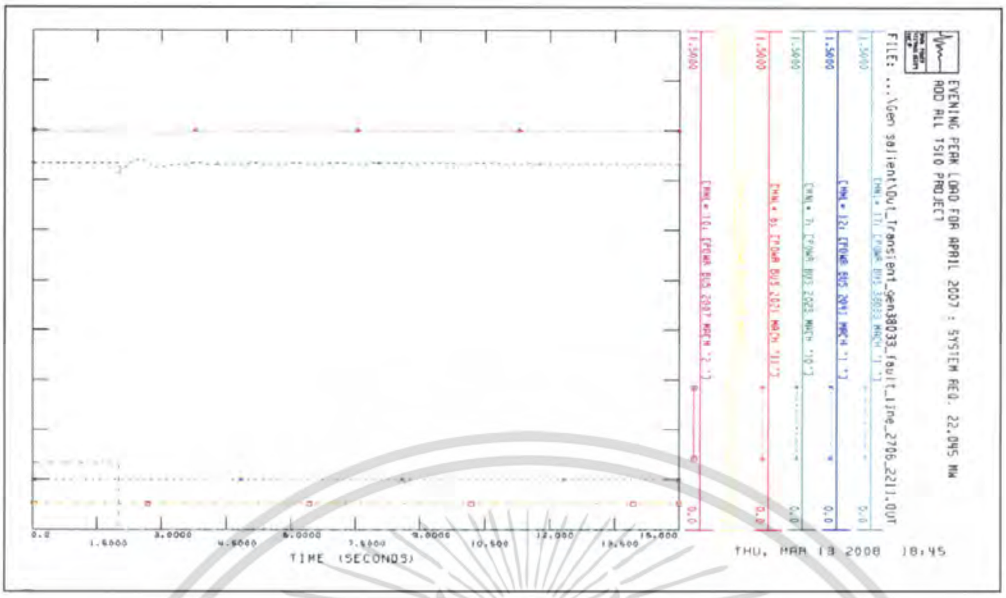


รูปที่ 4.20 (a) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033 - 2706 ออก



รูปที่ 4.20 (b) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



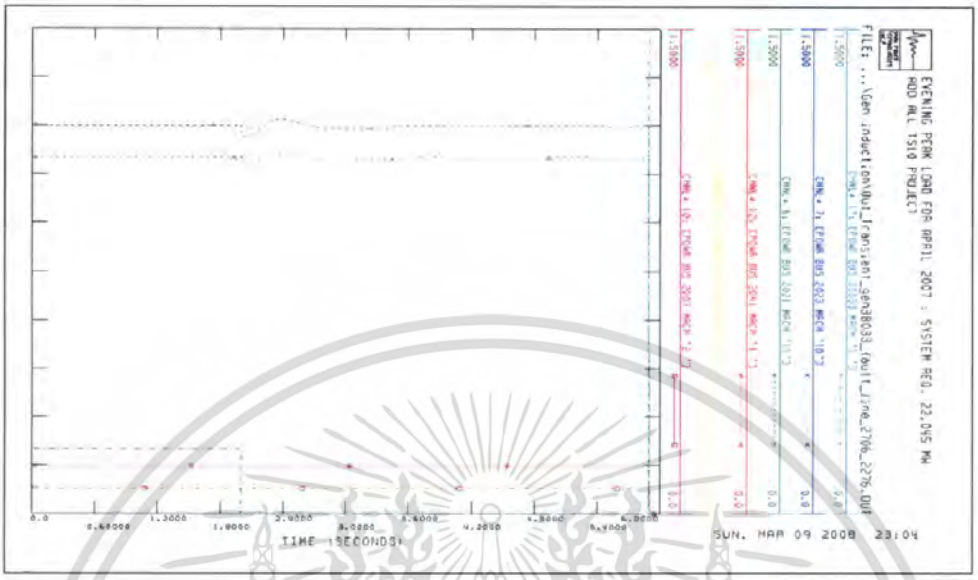
รูปที่ 4.20 (c) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2211 - 2706 ออก

รูปที่ 4.20 (d) เกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก

- Induction Generator (IG) รูปที่ 4.18
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 38033-2706 ออก
  - กรณีเกิด Fault ที่บัส test 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276 - 2706 ออก

สำหรับในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator การจำลองระบบจะสามารถทำได้เพียง 2 กรณีข้างต้น กรณีที่ 1 (รูปที่ 4.18 (a)) จะเห็นว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งใหม่แล้ว Trip line 2276 – 2706 ออกจากระบบ ระบบไม่สามารถกลับเข้าสภาวะปกติได้ กรณีที่ 2 (รูปที่ 4.18 (b)) เป็นการแก้ไขปัญหาจากการเกิดความผิดปกติที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งใหม่ โดยให้ปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นออกจากระบบไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

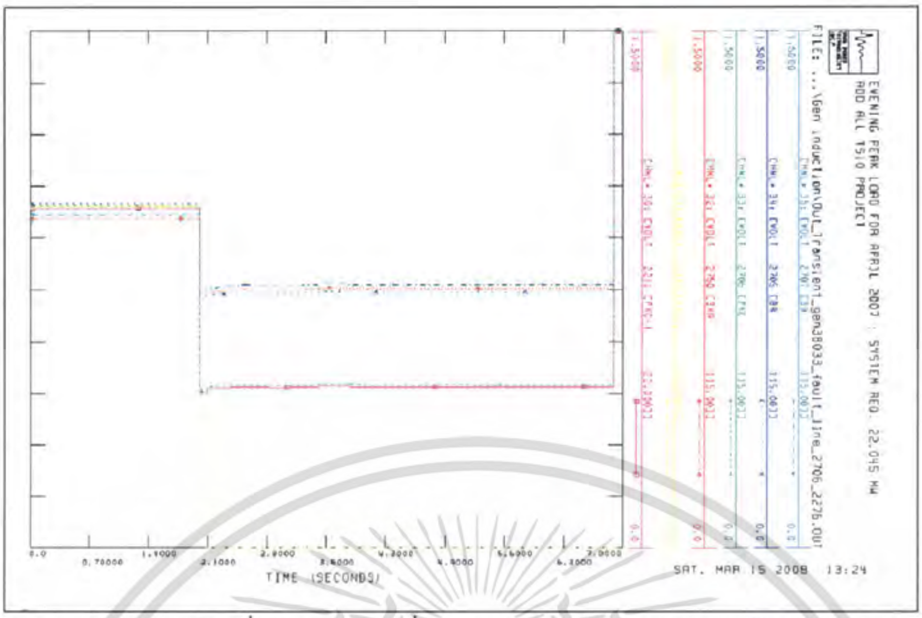


รูปที่ 4.21 (a) เกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276-2706 ออก

ส่วนในกรณี การศึกษาการติดตั้งเครื่องกำเนิดชนิด IG ขนาด 20 MW ที่บัส 38033 แล้วเกิด Fault ที่บัส test 5 cycles แล้วทำการ Trip line 2705 - 2706 , Trip line 2211 - 2706 ออก ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการเกิดฟอลต์ที่บัส 38033 แล้วปลดสายส่งจากบัส PKC 2706 ไปยังบัสดังกล่าว จะทำให้ระบบล่ม ไม่สามารถแสดงผลได้

จากการจำลองสภาวะเกิดสิ่งรบกวนหรือผิดปกติ (fault) แบบเกิดสิ่งรบกวนแบบถาวร เมื่อทำการปลดสายส่ง 2276-2706 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพได้ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังผลิตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator จะทำการดึงกำลังงานเสมือน (reactive power) เป็นจำนวนมากกว่าชนิดอื่นๆ จึงทำให้ได้ข้อสมมติฐานได้ว่า แรงดันบัสข้างเคียงที่อยู่ใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะตกลงมาก ซึ่งจะทำการแก้ไขข้อสมมติฐานได้ดังนี้

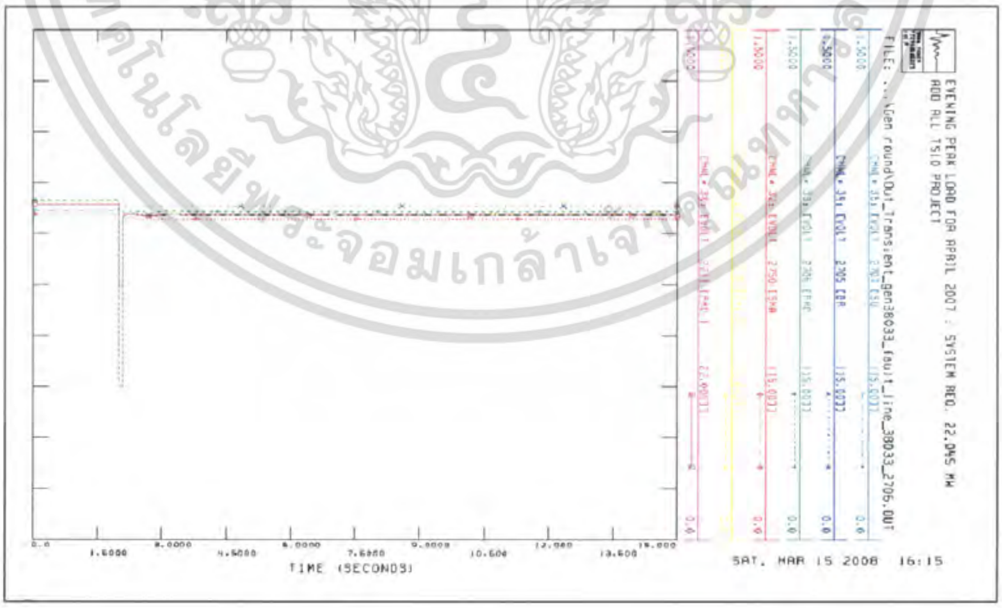
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 (b) แสดงแรงดันเมื่อเกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276-2706 ออก (Induction Generator)

จากผลการสมดิฐาน ยืนยันได้ว่า แรงดันที่บัสข้างเคียงตกลงอย่างมาก เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator ได้ดึงกำลังงานเสมือน (reactive power) มาก

เพื่อยืนยันผลในกรณีที่ Induction Generator ทำให้แรงดันที่บัสข้างเคียงตกมาก เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Round Rotor ว่าเกิดแรงดันตกที่บัสเคียงหรือไม่



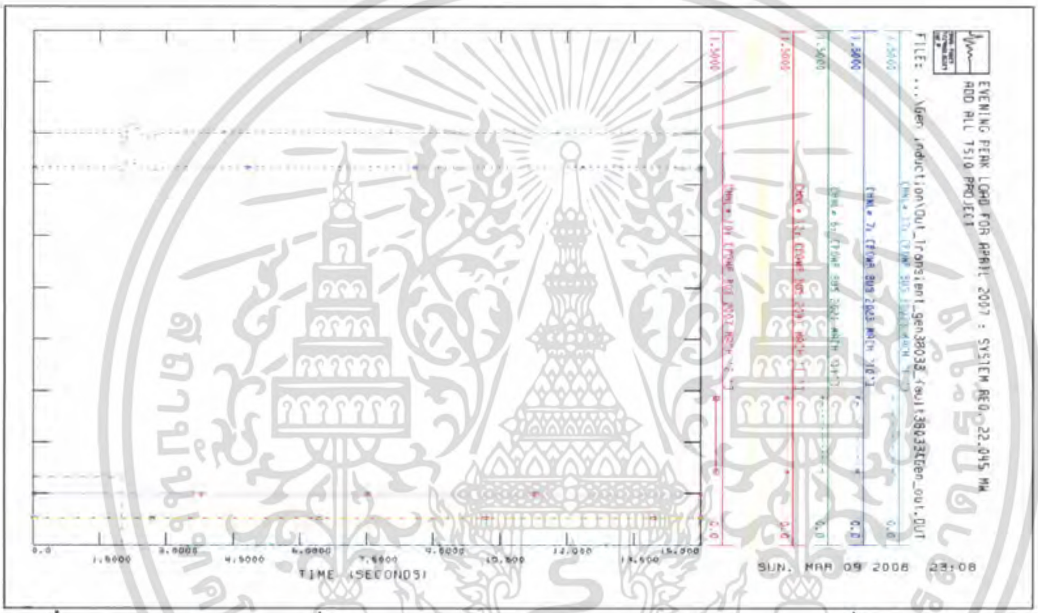
รูปที่ 4.21 (c) แสดงแรงดันเมื่อเกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการ Trip line 2276-2706 ออก (Round Rotor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง แรงดันที่บัสใกล้เคียงกรณีเครื่องกำเนิดฟ้าชนิด Round Rotor เกิดแรงดันตกไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator

แนวทางแก้ไข

แนวทางในการแก้ไขได้ทำการแก้ไขด้วยการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน ให้ตัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 38033 ออกจากระบบหากมีการเกิดฟอลต์ขึ้นที่บัส 38033 จะทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้



รูปที่ 4.21 (d) เกิด Fault ที่บัส test 38033 5 Cycles แล้วทำการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ออกจากระบบถาวร

4.5 เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด

พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งเป็นแกนหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้า ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น Round-rotor Synchronous Generator (RRSG) Salient Pole Synchronous Generator (SPSG) Wind Turbine Generator (IG) ซึ่งเครื่องกำเนิดที่กล่าวมานี้ จะมีรูปแบบการควบคุม (Model Control) แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเมื่อเกิดภาวะรบกวนหรือผิดปกติ (fault) ขึ้นที่ระบบก็จะทำให้เกิดผลกระทบตอบสนองของระบบเมื่อเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบ ทั้งในสภาวะปกติ (Normal Condition) และสภาวะเกิดฟอลต์ (Fault Condition) ขึ้นที่ระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรงไฟฟ้าในประเทศไทย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Round-rotor Synchronous Generator ได้แก่ โรงไฟฟ้าจำพวก
   - โรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal Plant)
   - โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Plant)
   - โรงไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ (Biomass)

เนื่องจากโรงไฟฟ้าเหล่านี้ใช้ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ Round-rotor Synchronous Generator ซึ่งในการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะใช้ตัว Governor เป็นตัวควบคุมวาล์ว คือ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วรอบตก ตัว Governor จะเปิดวาล์ว เพื่อให้ steam ไปขับ Turbine เพิ่มมากขึ้น ทำให้รักษาความเร็วรอบให้คงที่ กล่าวคือ ตัว Governor จะเป็นตัวที่พายามรักษาความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Round-rotor นี้ มีตัว Exciter ซึ่งเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นให้กับขดลวด Field ที่ Rotor ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือ ตัว Exciter คือตัวที่พยายามรักษาแรงดันให้คงที่ (AVR : automatic voltage regulator) ซึ่งจุดเด่นของ Round-rotor Synchronous Generator เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็ว Rotor หมุนที่ความเร็วสูงๆ เช่น Thermal , Gas turbine และจำพวก Biomass เป็นต้น

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Salient Pole Synchronous Generator ได้แก่ โรงไฟฟ้าจำพวก
   - โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Power Plant)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Salient Pole Synchronous Generator (SPSG) เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็ว Rotor ไม่สูงเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Round-rotor และมีจำนวนขั้วแม่เหล็กมากกว่าชนิด Round-rotor ซึ่งหลักการควบคุมเหมือนกับชนิด Round-Rotor คือ มีตัว Governor เป็นตัวคอยรักษาความถี่ และตัว Exciter เป็นตัวคอยรักษาระดับแรงดัน

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator ได้แก่ โรงไฟฟ้าจำพวก
   - โรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Induction Generator จะแตกต่างจาก 2 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันลมซึ่งตัวแปรที่สำคัญก็คือความเร็วลม ซึ่งแต่ละสถานที่หรือสถานที่เดียวกันก็ตามนั้นจะมีค่าความเร็วลมไม่คงที่ในแต่ละเวลา จึงต้องมีการแปลงแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (rectifier) ก่อนแล้วจากนั้นจึงแปลงไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งหนึ่ง (inverter) แต่ Induction Generator มีข้อดีที่ไม่ต้องการตัว Exciter และ Governor เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา การลงทุนต่ำ สามารถติดตั้งในพื้นที่ที่ห่างไกล เช่น ภูเขา ทะเล ได้โดยไม่ต้องการแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปใช้ ดังเช่น Salient Pole Synchronous และ Round-rotor Synchronous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 ที่มาและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากการขยายตัวของชุมชน อุตสาหกรรม และเศรษฐกิจในปัจจุบันนี้ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ การตอบสนองต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจำเป็นที่จะต้องเพิ่มแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าการติดตั้งโรงไฟฟ้าจะมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม จึงต้องมีการศึกษาการติดตั้งโรงไฟฟ้า สถานที่ติดตั้ง และขนาดของการติดตั้งเพื่อให้เหมาะสมต่อระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ในชุมชนเพื่อเสถียรภาพที่ดีของระบบไฟฟ้า

5.2 กระบวนการในการหาจุดติดตั้งที่เหมาะสม

กระบวนการในการเลือกจุดติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่เข้าสู่ระบบโดยพิจารณาบริเวณที่จะสามารถยกระดับแรงดันให้บัสที่มีแรงดันตกมาก ๆ ได้ และบริเวณใกล้เคียงโดยทำในลักษณะเดียวกันและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันโดยเราจะติดเครื่องกำเนิดกำเนิดไฟฟ้าเริ่มจากขนาด 10 MW ไปจนถึงขนาดที่ระบบไม่มีเสถียรภาพ เมื่อติดไปแล้วทำการวิเคราะห์ตามกระบวนการดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์ Contingency เพื่อดูว่าจำนวน Violation นำไปเปรียบเทียบกับระบบก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. จากนั้นทำการเพิ่ม Scale Load ทั้งระบบ แล้วดูว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าสู่ระบบนั่นจะช่วยให้แรงดันที่บัส 2211 ,2276 และ 2750 อยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งจุดมุ่งหมายของการเพิ่ม Scale Load นั่นก็เพื่อที่จะพิจารณาว่าถ้าหากความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอนาคต แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ติดให้ระบบจะยังคงช่วยให้แรงดันที่บัสยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง
3. แล้วทำศึกษา Dynamic Performance ระบบที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปใหม่เพื่อดูค่าการแกว่งของ power ที่บัส Gen ว่าถ้าหาเกิดฟอลต์ขึ้น Gen จะกลับสู่สภาวะปรกติได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การศึกษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งใหม่

ในการวิเคราะห์ในสภาวะ Dynamic และ Transient ในการศึกษาครั้งนี้เราจะเฝ้าสังเกตบัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดอยู่ 6 บัสด้วยกัน ได้แก่ บัส 38033 ซึ่งเป็นบัสเครื่องกำเนิดใหม่ที่จะติดตั้ง ส่วนที่เหลือทั้ง 5 บัส คือ(2007,2008,2021,2023,2041) เป็นบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่มากที่สุดที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน (Local Area) การศึกษาการจำลองระบบในสภาวะ Dynamic นี้จะออกเป็น 3 กรณี คือ

1) การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะที่ไม่เกิดฟอลต์ แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 1.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 1.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033

ซึ่งจากการจำลองระบบเมื่อทำการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละชนิดเข้าไปในระบบทั้ง 3 ชนิดในขณะที่ไม่เกิด fault เพื่อศึกษาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นปกติหรือไม่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นหรือไม่ด้วย

2) การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะที่เกิด fault แบบชั่วคราว (Temporary Fault) โดยจำลองการเกิด fault ขึ้นที่บัส 38033 (บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่) เป็นระยะเวลา 5 cycle แล้วเคลียร์ฟอลต์ออก แบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 2.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 2.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033

กรณีที่ 2.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033

เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อจำลองการเกิดฟอลต์แบบชั่วคราวขึ้นที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ (บัส38033) แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้หรือไม่ เพื่อวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดฟ้าตัวใหม่นี้ด้วย อีกทั้งพิจารณาด้วยว่า เมื่อเกิดฟอลต์ที่บัสนี้แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงมีการตอบสนองอย่างไร เพื่อเป็นการทดสอบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่นๆ อย่างไร

3) การจำลองระบบในสภาวะ Dynamic ในขณะเกิดฟอลต์แบบถาวร (Permanent Fault) โดยจำลองการเกิดฟอลต์ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ (บัส38033) เป็นระยะเวลา 5 ไซเคิล แล้วทำการปลด (Trip) สายส่งออก แบ่งการจำลองเป็น 4 กรณี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3.1 ติดตั้ง RRSG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

กรณีที่ 3.2 ติดตั้ง SPSG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

กรณีที่ 3.3 ติดตั้ง IG ที่บัส 38033 (ปลด L1 L2 L3 และ L4ทีละเส้น)

โดย L1 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 38033 ไปยังสายส่งที่บัส 2706

L2 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2705

L3 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2211

L4 คือ สายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2706 ไปยังสายส่งที่บัส 2276

เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อจำลองการเกิดฟอลต์แบบถาวร (Permanent Fault) ขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ แล้วบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆเกิดผลกระทบอย่างไร และพิจารณาถึงผลของความมีเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่น ๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นั้น อีกทั้งบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ก็ยังคงมีเสถียรภาพด้วยหรือไม่

5.4 ผลการวิเคราะห์

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ตามกระบวนการที่นำเสนอ พบว่าบริเวณที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ คือ บัส PKC 2706 ที่ขนาด 20 MW เนื่องจากผลการวิเคราะห์ contingency และการวิเคราะห์สภาวะ transient and dynamic และได้ผลที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือค่า violation ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลง ค่าของแรงดันที่ทำการศึกษาและได้จากการวิเคราะห์ contingency แบบ N-1 ภายหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่เข้าไปในระบบจะอยู่เงื่อนไขของค่าพิกัดแรงดันในสภาวะฉุกเฉิน ในส่วนของการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ในสภาวะDynamic นี้ ผลที่ได้คือเมื่อทำการวิเคราะห์ที่สภาวะที่เกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบชั่วคราว (temporary fault) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่ทั้ง 3 ชนิด คือ แบบ RRSG, SPSG และแบบ IG สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้หลังจากการเคลียร์สภาวะที่เกิดสิ่งรบกวนออกจากระบบ และไม่ส่งผลกระทบต่อบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่น ๆที่อยู่ในบริเวณเดียวกันกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ที่สภาวะเกิดสิ่งรบกวน (Fault Condition) แบบถาวร (permanent fault) พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ RRSGและแบบ SPSG สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ และไม่ส่งผลกระทบต่อบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวอื่น ๆ แต่ถ้าหากชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ IG แล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้จะไม่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ เนื่องจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Induction Generator จะต้องการ Reactive Power กระบวนการทำงาน ทำให้แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัสใกล้เคียงตกลง หากติดตั้งในจุดที่ระบบที่ไม่มั่นคง อาจทำให้แรงดันตก (Voltage Collapse) จนระบบล่มได้

จากการวิเคราะห์พบว่า ในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ที่ บัส 2706 ซึ่งอยู่ในตะวันออกเฉียงเหนือควรจะเลือกใช้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด RRSG เนื่องจากเหมาะกับวัตถุดิบที่มีอยู่ในพื้นที่

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากเนื้อหาโครงงานจะเป็นการวิเคราะห์ระบบโดยเลือกศึกษาเฉพาะพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งไม่พิจารณาพื้นที่อื่นและการพิจารณาระบบหลังจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่เป็นแบบชนิด IG นั้นผลที่ได้ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่นี้จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพดังนั้นผู้จัดทำจึงขอเสนอแนะให้ผู้ที่สนใจ ได้ศึกษาถึงวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวซึ่งอาจเกิดประโยชน์ขึ้นได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Jan Machowski, Janusz W. Bialek and James R. Bumby "Power System Dynamic and Stability", John Wiley & Sons, 1997.

[2] Haddi Sadat, "Power System Analysis",McGrawHill,2006

[3] K.R. Padiyar, "Power System Dynamics Stability and Control", John Wiley & Sons, 1997.

[4] Chai Chompoo – inwai, Wei – Jen Lee, Pradit Fuangfoo, Mitch Williams, James Liao, "System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System " University of Texas at Arlington, 2004.

[5] เชาวฤทธิ์ ธรรมเพียร, "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSS/E เพื่อใช้วางแผนระยะสั้นในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ", ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

[6] รัชชะ สัดยสมบูรณ์, วรวัฒน์ ถาวรไพศาลกุล,"การรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังโดยเจเนติกอัลกอริที่ม",ปริญญานิพนธ์, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
รายชื่อสถานีไฟฟ้าแรงสูง เขตปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

สถานีไฟฟ้าแรงสูง นครราชสีมา1	บัส 2704 NR1 แรงดัน118KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูง นครราชสีมา2	บัส 2703 NR2 แรงดัน118KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูง บุรีรัมย์	บัส 2705 BR แรงดัน115KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูง สุรินทร์	บัส2707 SU แรงดัน115KV
สถานีไฟฟ้าประโคนชัย	บัส 2276 PKC-2 แรงดัน22KV
สถานีไฟฟ้าประโคนชัย	บัส 2211PKC-1 แรงดัน22KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูงประโคนชัย	บัส 2276 PKC-2 แรงดัน22KV
สถานีไฟฟ้าบุรีรัมย์	บัส 2209 BR-1 แรงดัน22KV
สถานีไฟฟ้าบุรีรัมย์	บัส 2210 BR-2 แรงดัน22KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูงสุรินทร์	บัส 2707 SU แรงดัน115KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูงสังขะ	บัส 2750 SKA แรงดัน115KV
สถานีไฟฟ้าสุรินทร์	บัส 2213 SU-1 แรงดัน 22KV
สถานีไฟฟ้าสุรินทร์	บัส 2214 SU-2 แรงดัน 22KV
สถานีไฟฟ้าแรงสูงพังโคน	บัส 2715 PYK แรงดัน 115KV
โรงไฟฟ้า 20 MW ที่ติดตั้งใหม่	บัส 38033 แรงดัน 22KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
สถานีแรงสูงและสายส่งในระบบ กฟผ.

ขนาดแรงดันไฟฟ้า(kV)	สถานีไฟฟ้าแรงสูง		สายส่ง
	จำนวน(แห่ง)	ขนาดหม้อแปลง 1/	(วงจร-กิโลเมตร)
เขตนครหลวง			
500	2	3450.0	411.1
230	12	14200.0	805.0
115	-	25.0	-
รวม	14	17675.0	1216.1
ภาคกลาง			
500	5	5200.0	1878.8
230	21	11893.3	4006.1
115	45	5614.8	2851.0
69	1	33.0	46.1
รวม	72	22741.1	8781.9
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ			
230	12	4100.0	2050.7
115	37	3913.0	5286.0
รวม	49	8013.0	7336.7
ภาคใต้			
230	12	4366.7	2637.9
132	- /2	133.4	8.7 3/
115	18	2379.0	2719.8
300 (HVDC)	- /2	348.2	23.0 3/
รวม	30	7227.3	5389.3
ภาคเหนือ			
500	2	3800.0	1143.0
230	7	3900.0	3295.1
115	31	2959.5	2935.3
รวม	40	10659.5	7373.4
รวมทุกภาค			
500	9	12450.0	3432.9
230	64	38460.0	12794.8
132	-	133.4	8.7
115	131	14891.2	13792.0
69	1	33.0	46.1
300 (HVDC)	-	348.2	23.0
รวมทั้งหมด	205	66315.8	30097.5

หมายเหตุ 1/ ไม่รวมหม้อแปลงที่รับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดและหม้อแปลงที่จ่ายไฟฟ้าเพื่อใช้งานในโรงไฟฟ้า

2/ สฟ.สะเดา และ สฟ.คลองแงะ ได้นับรวมใน สฟ. ขนาดแรงดัน 115 kV และ 230 kV แล้ว

3/ ความยาวสายส่งจาก สฟ. ไปถึงชายแดน ไทย-มาเลเซีย

แหล่งที่มา : ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายภูมิบดินทร์ ภูมิศิริไพบูลย์ (ปั๋ม)
เกิดวันที่ 10 มิถุนายน 2528
ที่อยู่ 39/1 ถ. รามัญ ต.บ่อยาง อ. เมือง จ. สงขลา 90000
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียน มหาวชิราวุธ จ. สงขลา
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียน มหาวชิราวุธ จ. สงขลา
e-mail shaman_king104@hotmail.com tel. 083-0718004

นายรัตพงษ์ สุขเกษม (ป้อม)
เกิดวันพุธที่ 11 กันยายน 2528
ที่อยู่ 50 ม.12 ต.ชุมแสง อ.สตึก จ.บุรีรัมย์ 31150
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนประสาทวิทยาคาร จ.สุรินทร์
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนประสาทวิทยาคาร จ.สุรินทร์
e-mail pomnocoke@hotmail.com tel. 087-8766656

นายปรีชา นูพลกรัง (ป้อม โค้ช)
เกิดวันพุธที่ 13 มีนาคม 2528
ที่อยู่ 83 หมู่ 1 ต.หนองจะบก อ.เมือง จ. นครราสีมา 30000
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จ.นครราชสีมา
e-mail porm_dna@hotmail.com tel. 086-6070141

นายวงศกร มณีวรรณ (เบน)
เกิดวันจันทร์ ที่ 23 ธันวาคม 2528
ที่อยู่ 888/67 หมู่ 4 หมู่บ้านรุ่งกิจการ์เด้นโฮม แขวงคลองสามประเวศ เขต ลาดกระบัง กทม. 10520
จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จาก โรงเรียน สาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง กทม.
e-mail animation_ccsben@hotmail.com tel. 089-1083344

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้