

การวิเคราะห์สาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง
ขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC

ANALYSIS OF FAULT TRIP OF CIRCUIT BREAKER DURING
BLACK OUT SIMULATION TEST USING PSCAD/EMTDC

สุระโยธิน เกาะโพธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์สาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง
ขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC

สุระโยธิน เกาะโพธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC
ชื่อ – นามสกุล	นายสุระโยธิน เกาะโพธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง โดยไม่ทราบสาเหตุของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมระยอง ขณะทำการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์กรณีไฟฟ้าดับทั่วประเทศ

การวิเคราะห์โดยทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น โดยรวบรวมข้อมูลและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องมาจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบภาคสนามเพื่อหาสาเหตุและแนวทางการแก้ไข จากการทดสอบพบว่า การเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงและการคิดเฟียของสัญญาณไฟฟ้ามายังจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน กับตัวเหนี่ยวนำแบบไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้าในทันที แต่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ส่วนสาเหตุที่ทำให้สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าทำงานผิดพลาดเกิดจากค่าตัวเก็บประจุแฝงในสายส่งส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันของหม้อแปลงตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าสูงเกิน ทำให้สั่งเปิดวงจรสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้า ทั้งนี้การแก้ไขปัญหามาสามารถทำได้โดยการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในระบบลง

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และจากการทดสอบภาคสนามพบว่า การเพิ่มค่าอินดักทีฟรีแอ็คแตนซ์เข้าในระบบ โดยการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า และให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ในระบบลดลงและสามารถทำให้สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าทำงานได้อย่างถูกต้องขณะทดสอบจำลองเหตุการณ์กรณีไฟฟ้าดับทั่วประเทศ

คำสำคัญ: เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ไฟฟ้าดับทั่วประเทศ ค่าเก็บประจุแฝง

Thesis Title	Analysis of Fault Trip of Circuit Breaker during Black Out Simulation Test Using PSCAD/EMTDC
Name - Surname	Mr. Surayothin Kohpho
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Wanchai Subsingha
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Dr. Thanapongs Suwanasri
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis presents a problematic analysis of the undefined occurrence of malfunction in Rayong Combined Cycle Power Plant during the black-out test of the power system operation.

The strategy of the analysis is collecting the parameter of the electrical equipment in the system in order to simulate such system using PSCAD/EMTP and compare to the experiment field tests. This will proceed to a solution of a systematic problem. By observing, it is found that over-voltage and the waveform distortion are occurred due to ferro-resonance phenomena in such system. This phenomena is overcome due to a grading capacitance of the circuit breaker and a non-linear reactance from an auxiliary transformer. The ferro-resonance phenomenon is not affected in damage to the transformer directly, but degrading such transformer. However, the fault trip of the circuit breaker come from the stray capacitance in the transmission line systems which is resulted in an over-current in the generator's transformer protection system and affected into an open circuit operation of such circuit breaker. Therefore, this specific problem can be solved by reducing of the stray capacitance in the system during the black-out test.

The results from simulation test and experiment field test show that the increasing of inductive reactance in the system by connecting the reserved transformer and the increasing of generator load result in the decreasing of system capacitance. In which, it leads to the completely correct operation of the circuit breaker during the black-out test.

Keywords: ferro-resonance, black out, stray capacitance

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. นัทรชัย ศุภพิทักษ์สกุล ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการสอบ ดร. แคทริยา สุวรรณศรี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่แนะนำความรู้และประสบการณ์ที่เป็นแนวทางในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า รวมทั้งเจ้าหน้าที่สำนักงานบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยเหลือแนะนำ อีกทั้งอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณโรงไฟฟ้าระยอง ที่ให้การสนับสนุนในการทดสอบภาคสนาม ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนให้ใช้โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมทั้งคณาจารย์ อาจารย์ ที่ให้วิชาความรู้อบรมสั่งสอน ขอขอบคุณ ภรรยา และ เพื่อนๆ พี่น้อง ที่ให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุระโยธิน เกาะโพธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	2
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.7 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมทั่วไป.....	4
2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	5
2.3 เฟอโรโรเรโซแนนซ์.....	20
2.4 การเกิดตัวเก็บประจุแฝง.....	25
2.5 Magnetizing Inrush Current.....	30
2.6 โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า.....	31
2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.8 สรุป.....	35
3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	36
3.1 การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น.....	36
3.2 การวิเคราะห์หาสาเหตุเบื้องต้น.....	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การรวบรวมข้อมูล/พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	43
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	47
3.5 สรุป.....	58
4 ผลการทดสอบ.....	59
4.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC.....	59
4.2 ผลการทดสอบภาคสนาม.....	66
4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองระบบไฟฟ้าและผลการทดสอบภาคสนาม.....	73
4.4 ผลการหาแนวทางการแก้ไขโดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม.....	76
4.5 สรุป.....	86
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุป.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 230 kV.....	46
3.2 การตัดสินใจสภาพนวนของหม้อแปลงโดยพิจารณาจากค่า PI.....	53
4.1 ผลการจำลองเมื่อสับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR1 ที่มุม 0-360 องศา.....	62
4.2 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0 และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 50 Hz.....	67
4.3 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0 และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 100 Hz.....	67
4.4 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0 และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 150 Hz.....	68
4.5 ผลค่าความเป็นฉนวนของหม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	68



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 Single Line Diagram โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม 1 ชุด.....	4
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า.....	6
2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส.....	6
2.4 ลักษณะโครงสร้างของ Rotor.....	7
2.5 วงจรอย่างง่ายแสดงการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบ.....	8
2.6 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	8
2.7 โครงสร้างของหม้อแปลง.....	9
2.8 ลักษณะโครงสร้างของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง Gas SF6.....	11
2.9 Circuit Breaker ที่มีการต่อ Resistor ครอบตัว Interrupter.....	12
2.10 การต่อ Grading Capacitor ครอบ Interrupter.....	13
2.11 Circuit Breaker ที่ไม่มี Grading Capacitor ต่ออยู่.....	13
2.12 Circuit Breaker ที่มี Grading Capacitor ต่ออยู่.....	14
2.13 การติดตั้ง Resistor กับ Capacitor.....	16
2.14 รีเลย์ชนิด Electro Mechanical, Solid State และ Digital.....	16
2.15 ลักษณะสมบัติของ Definite Current Over Current Relay.....	17
2.16 ลักษณะสมบัติของ Definite Time Over Current Relay.....	17
2.17 ลักษณะสมบัติของ Inverse Time Over Current Relay.....	18
2.18 ลักษณะสมบัติของ Inverse Definite Minimum Time Over Current Relay.....	18
2.19 Ground Over Current Relay.....	19
2.20 วงจรอนุกรม RLC.....	21
2.21 การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่เกิดจากการเปลี่ยนค่า X_c ในวงจรอนุกรม.....	21
2.22 Permeability ของแกนเหล็กหม้อแปลง.....	22
2.23 การเกิดเรโซแนนซ์วงจร LC แบบเชิงเส้น.....	23
2.24 การเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร LC แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	24
2.25 ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าใดๆ จากจุดศูนย์กลางของสายส่ง.....	26
2.26 แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด P_1 และ P_2	27
2.27 การหาความจุไฟฟ้าของสายส่งสามเฟส.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าของสายส่งสามเฟส.....	29
2.29 ความจุไฟฟ้า C_n ของสายส่ง.....	29
2.30 การเกิด Magnetizing Inrush Current.....	30
2.31 โปรแกรม PSCAD/EMTDC.....	33
3.1 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง.....	36
3.2 แผนที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง.....	37
3.3 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าแรงสูงระยอง 2.....	38
3.4 พื้นที่ที่โรงไฟฟ้าต้องทำหน้าที่เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบ.....	40
3.5 Single Line Diagram ขณะทดสอบ Blackout Restoration.....	41
3.6 Single Line Diagram ขณะทำการจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกย้อนกลับมาที่บัส 230 kV.....	42
3.7 Single Line Diagram กรณีศึกษา.....	43
3.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรงไฟฟ้าระยอง.....	44
3.9 หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	44
3.10 ภาพของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า.....	45
3.11 ภาพของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง.....	45
3.12 Ground Over Current Relay และ Time Curves.....	46
3.13 Block Diagram การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า.....	48
3.14 โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า PSCAD/EMTDC จากวงจรศึกษา.....	48
3.15 วงจรระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current.....	49
3.16 วงจรระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Ferroresonance.....	49
3.17 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิดค่าเก็บประจุแฝง.....	50
3.18 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าวัดดิน.....	51
3.19 วงจรทดสอบค่าความต้านทานฉนวน.....	52
3.20 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า.....	54
3.21 การทดลองต่อตัวต้านทานที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง.....	55
3.22 การทดลองเปลี่ยนค่าเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	56
3.23 การทดลอง Shunt Reactor ที่ระบบ.....	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 แรงดันที่ Main Bus 230 kV.....	59
4.2 ผลการจำลองกระแสเฟส Ia, Ib, Ic และ In ของ Gen Transformer.....	59
4.3 ผลการจำลองกระแสเฟส In ด้าน Secondary ของ RAT.....	60
4.4 แรงดันด้าน 230 kVของหม้อแปลงส่งจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า (RAT).....	60
4.5 แรงดันด้าน 6.9 kV ของหม้อแปลงส่งจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า.....	61
4.6 Harmonic ขณะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์.....	61
4.7 แรงดันด้าน 6.9 kV ของหม้อแปลงส่งจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า.....	61
4.8 รูปแบบของสัญญาณเฟอร์โรเรโซแนนซ์.....	62
4.9 การจำลองระบบไฟฟ้าแบบมีพารามิเตอร์ของสายส่ง.....	64
4.10 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 90 องศาทางไฟฟ้า.....	65
4.11 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 0 องศาทางไฟฟ้า.....	65
4.12 แรงดันที่ Main Bus 230 kV.....	65
4.13 แรงดันที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า.....	66
4.14 อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินและเครื่องมือทดสอบ.....	67
4.15 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องมือทดสอบ.....	68
4.16 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า.....	69
4.17 จุดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า.....	69
4.18 แรงดันที่ RAT เมื่อปรับ Tap จาก 4 มาที่ Tap 5.....	70
4.19 แรงดันที่ RAT เมื่อปรับ Tap จาก 9 มาที่ Tap 10.....	70
4.20 แรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่ RAT เมื่อปิดวงจร BKR 2.....	71
4.21 การทดสอบขั้นตอนที่ 3.....	71
4.22 การทดสอบขั้นตอนที่ 4.....	72
4.23 แรงดันที่ระบบ 230 kV และกระแส In.....	72
4.24 แรงดันที่ RAT.....	73
4.25 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า Ia, Ib, Ic จากการจำลองระบบไฟฟ้า.....	73
4.26 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า In จากการจำลองระบบไฟฟ้า.....	74
4.27 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า Ia, Ib, Ic ได้จากการทดสอบภาคสนาม.....	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.28 กระแสไฟฟ้า In ที่ทำให้ 51 GIN ทำงานจากการจำลองระบบไฟฟ้า.....	74
4.29 กระแสไฟฟ้า In ที่ทำให้ 51 GIN ทำงานจากการทดสอบภาคสนาม.....	74
4.30 สัญญาณเพอร์โรเรโซแนนซ์ที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า.....	75
4.31 สัญญาณเพอร์โรเรโซแนนซ์ที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม.....	75
4.32 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 1 Ω	76
4.33 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 5 Ω	76
4.34 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 100 Ω	76
4.35 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 200 Ω	76
4.36 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 500 Ω	77
4.37 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV.....	77
4.38 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ RAT ด้าน Secondary.....	77
4.39 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF.....	78
4.40 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF.....	78
4.41 แรงดันไฟฟ้าที่ RAT เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF.....	78
4.42 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 1500 pF.....	79
4.43 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ ที่ 1500 pF.....	79
4.44 แรงดันไฟฟ้า RAT เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ ที่ 1500 pF.....	79
4.45 การจำลองโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ของสายส่ง.....	80
4.46 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 90 องศาทางไฟฟ้า.....	81
4.47 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR1 ที่ 0 องศาทางไฟฟ้า.....	81
4.48 แรงดันที่ Main Bus 230 kV.....	81
4.49 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า.....	81
4.50 แรงดันที่ Main Bus 230 kV.....	82
4.51 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า.....	82
4.52 กระแสเฟส In.....	82
4.53 แรงดันที่ Main Bus 230 kV.....	83
4.54 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า.....	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.55 กระแสเฟส In.....	83
4.56 กระแสไฟฟ้าเฟส In.....	84
4.57 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV.....	84
4.58 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ RAT.....	85
4.59 ผลของกระแสไฟฟ้าที่ RAT.....	85



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองขนาด 1,200 MW ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทย และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฉุกเฉินชนิดเครื่องยนต์ดีเซล (Emergency Diesel Generator: EDG) ขนาด 4.0 MW ติดตั้งอยู่สามารถเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เองโดยไม่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ได้ถูกเลือกให้เป็นโรงไฟฟ้าหนึ่งที่ทำหน้าที่เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายโหลด (Black Start) ให้กลับคืนสู่สภาพปกติในพื้นที่ทางภาคตะวันออกเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ (Black Out) ดังนั้นการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์กรณีไฟฟ้าดับ และการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ (Black Out Restoration) จึงได้ถูกบรรจุอยู่ในแผนงานพิเศษของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยทำการสับเปลี่ยนทางเดินไฟฟ้าขนาด 230 กิโลโวลต์ (Switching Bus 230 kV) เพื่อย้ายสถานีบริการ (Station Service) ให้ไปรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าอื่นแทน แล้วจึงทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 หน่วย ขนาด 100 MW จนถึงความเร็วรอบเต็มพิกัดขณะไม่มีภาระ (Full Speed No-Load) โดยอาศัยแหล่งจ่ายจาก EDG ในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 MW จากนั้นให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารับภาระ (Charge) จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสายส่ง 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ ตามที่แผนกำหนด

ในระหว่างการทดสอบพบปัญหาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออก (Trip) ด้วยรีเลย์ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดิน (51GIN) ขณะทำการปิดวงจรสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Close Generator Breaker) เพื่อจ่ายไฟให้กับ ทางเดินไฟฟ้าขนาด 230 กิโลโวลต์ (Bus 230 kV) ในลานไกไฟฟ้า (Switch Yard) จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงกับความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบในกรณีเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและวิธีการแก้ไขที่สามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ โดยทำการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้างกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบภาคสนามเพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ทราบสาเหตุ
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานการทำให้สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงเปิดวงจร (Circuit Breaker Open) ขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ (Black out Restoration) อาจเกิดจากสาเหตุดังนี้

- 1.3.1 รีเลย์ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดิน ทำงานผิดพลาด
- 1.3.2 เกิดความผิดปกติที่ฉนวนไฟฟ้าของหม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.3.3 เกิด Inrush Current ที่หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.3.4 เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferro resonance) ที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า
- 1.3.5 การเกิดค่าเก็บประจุแฝงของระบบสายส่ง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษาวิเคราะห์หาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง
- 1.4.2 ทำการจำลองระบบของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.3 ทำการทดสอบภาคสนามเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.4 วิเคราะห์สรุปผลเสนอแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาปัญหาการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1.5.1 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง
- 1.5.2 รวบรวมข้อมูลหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

1.5.3 จำลองระบบของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองและทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.4 วิเคราะห์เปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบภาคสนามกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.5 สรุปหาแนวทางแก้ไขปัญหา

1.6 ข้อย้ำกัณฑ์ของการวิจัย

การศึกษาวិทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาปัญหาการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง วิทยานิพนธ์นี้ไม่เน้นถึงการพิจารณาในกรณีที่จ่ายไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ

1.7 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีอยู่ด้วยกัน 5 บท คือ บทที่ 1 กล่าวถึงปัญหาความเป็นมาและความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขต และขั้นตอนในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ ตามลำดับ บทที่ 2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางนำมาใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองด้วยการจำลองระบบของโรงไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดสอบภาคสนามเพื่อหาแนวทางการแก้ไข บทที่ 4 เป็นผลการทดลอง และบทที่ 5 การสรุปผล

บทที่ 2

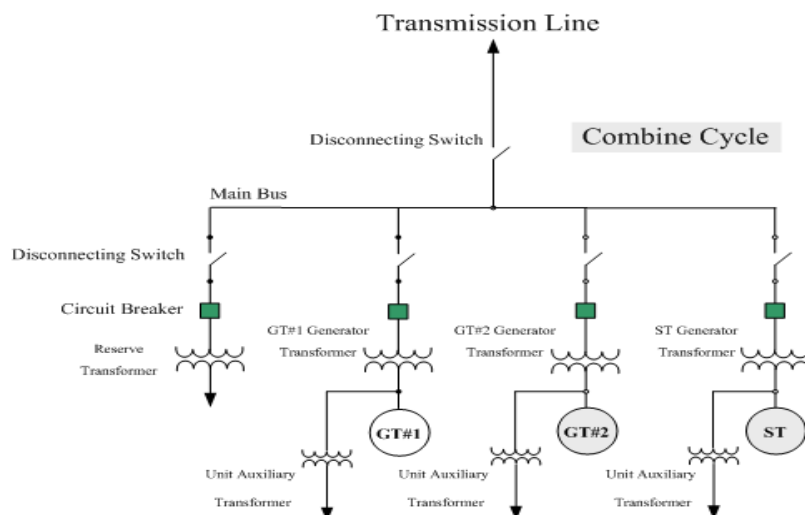
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมโดยทั่วไป อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ปραฏการณั้เพอร์โรเรโซแนนซ์ การเกิดตัวเก็บประจุแฝง โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมทั่วไป

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมทั่วไป 1 ชุด (1 Block) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลัก ดังนี้

2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันก๊าซ (Gas Turbine) จำนวน 2 หน่วย และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) จำนวน 1 หน่วย โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันก๊าซจะผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงประเภทก๊าซธรรมชาติ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันไอน้ำ จะผลิตพลังงานไฟฟ้าจากไอน้ำ โดยอาศัยพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันก๊าซ ทั้ง 2 หน่วย หรือหน่วยใดหน่วยหนึ่งก็ได้ เพื่อใช้ในการต้มน้ำให้ได้ไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อีกต่อหนึ่ง



ภาพที่ 2.1 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม 1 ชุด

2.1.2 หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Transformer) ทำหน้าที่แปลงแรงดันจากแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ให้สูงเท่ากับแรงดันของระบบส่งจ่าย

2.1.3 หม้อแปลงช่วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Auxiliary Transformer) ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงตัวเองโดยแปลงแรงดันไฟฟ้าจากที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ให้ต่ำลง เพื่อจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.4 หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า (Reserve Auxiliary Transformer) จะมีบทบาทเมื่อโรงไฟฟ้าหยุดเดินเครื่องทั้งหมด ทำหน้าที่รับไฟจากระบบส่งจ่ายทางด้านแรงสูงให้เป็นแรงต่ำเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่จำเป็น

2.1.5 ไบมีดตัดตอนไฟฟ้า (Disconnecting Switch) ทำหน้าที่เปิดปิดวงจรไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ โดยผู้ที่ทำหน้าที่การเดินเครื่อง

2.1.6 อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (Circuit Breaker) ทำหน้าที่เปิดปิดวงจรไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ แต่จะทำงานเปิดปิดวงจรแบบอัตโนมัติได้ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้

2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

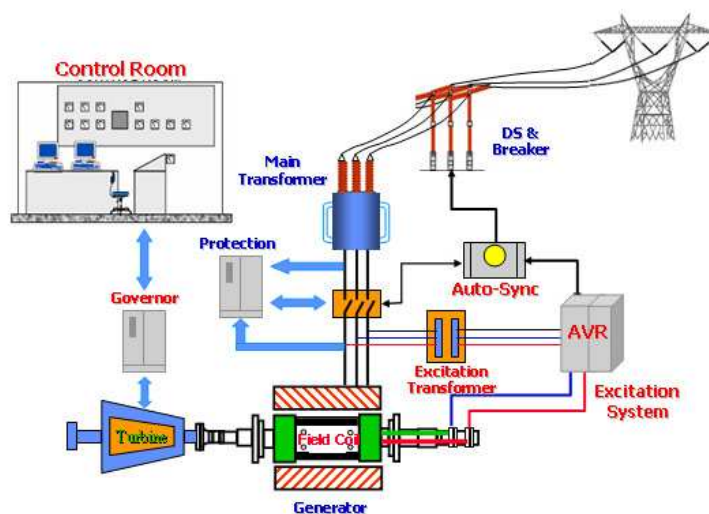
จาก Single Line Diagram ในภาพที่ 2.1 จะพบว่ามีอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายตัวด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) [1]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) แบบ 3 เฟส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเดินเครื่องที่ต้องการความถี่คงที่ที่สถานะโหลดต่างๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ที่ได้รับจากตัวต้นกำลังให้เป็นพลังงานไฟฟ้าจ่ายออกสู่ระบบดังนี้

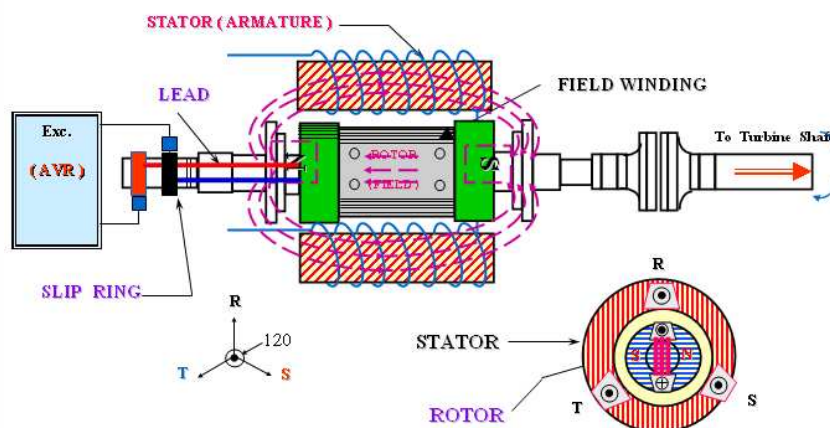
$$\begin{bmatrix} \text{พลังงานจาก} \\ \text{ต้นกำลัง} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{พลังงานที่สูญเสีย} \\ \text{ในส่วนต่างๆ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{พลังงานสู่ส่วนสะสมใน} \\ \text{รูปสนามแม่เหล็กทางกล} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{พลังงานไฟฟ้า} \\ \text{จ่ายออกสู่ระบบ} \end{bmatrix}$$

$$W_m = (W_{ie} + W_{im}) + (W_{fe} + W_{sm}) + W_e \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า [2]

พารามิเตอร์พื้นฐานที่ควรสนใจในด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (V), กระแส (I), ความถี่ (Hz), Real Power (kW), Reactive Power (kVar), Apparent Power (kVA) และองค์ประกอบกำลัง ($\cos\theta$)



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส [2]

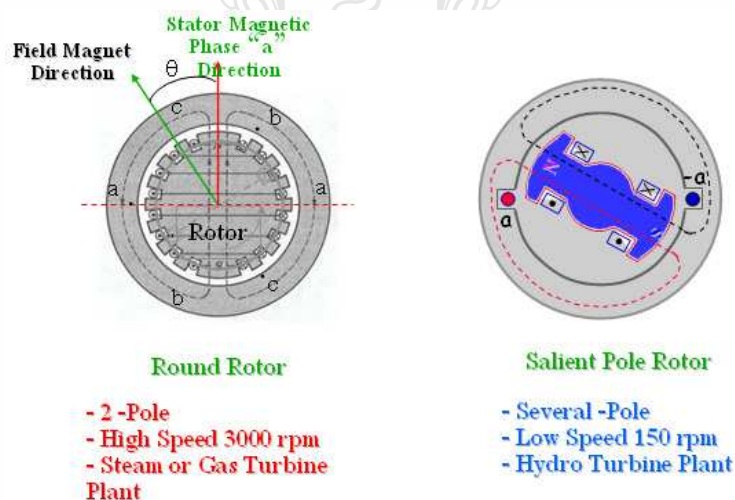
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมีส่วนประกอบพื้นฐานคือ ส่วนที่เป็นขดลวดสร้างแรงดันและส่วนกระตุ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีทั้งแบบที่มีตัวกระตุ้นอยู่กับที่หรือ Stationary

Field และแบบที่พบได้ทั่วไปคือแบบที่ตัวกระตุ้นหมุนหรือ Revolving Field ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยทั่วไป จึงสามารถแบ่งส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่กล่าวถึงเป็น 2 ส่วน คือ Stator เป็นส่วนของ Stationary Armature Winding (Armature Winding หรือ ขดอาร์เมเจอร์ คือ ชุดขดลวดที่ต่อกันเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น) แบบต่างๆ ได้แก่ Lap Winding และ Wave Winding ซึ่งประกอบวางลงในร่อง Slot ของแกนเหล็กที่เป็นแบบ Laminated Core

Rotor เป็นส่วนของ Revolving Field Winding (Field Winding คือ ชุดของขดลวดที่ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก) ดังในภาพที่ 2.4 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ ดังนี้

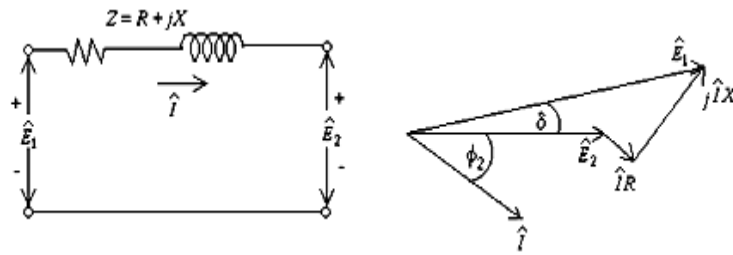
- Salient Rotor เป็นลักษณะ โครงสร้างที่มักพบได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหลายขั้ว รอบในการหมุนต่ำ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ส่วนของแกนเหล็กประกอบจาก Laminate Core มี Damper Winding ประกอบอยู่ที่หน้า Pole

- Cylindrical Rotor เป็นลักษณะที่มักพบได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วมีความเร็วรอบในการหมุนสูง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน และ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนรวมทั่วไป ส่วนของแกนเหล็กเป็นเหล็กตันเซาะร่อง



ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของ Rotor [2]

ค่ากำลังสูงสุดที่จะสามารถจ่ายออกไปได้ของเครื่องจักรซิงโครนัสเกิดขึ้นได้จากแรงบิดสูงสุดที่จะจ่ายได้โดยไม่เกิดสภาวะ Loss of Synchronism กับระบบที่เชื่อมต่ออยู่ พิจารณาวงจรอย่างง่ายในภาพที่ 2.5 สำหรับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Cylindrical Rotor กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ P_2

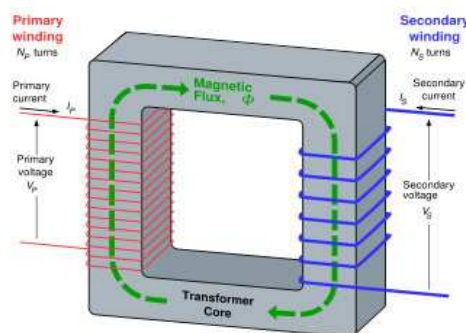


ภาพที่ 2.5 วงจรอย่างง่ายแสดงการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบ [1]

2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) [3]

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง ที่ระดับความถี่เดียวกัน โดยเปลี่ยนแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้า และเปลี่ยนแรงดันให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับระบบจำหน่าย

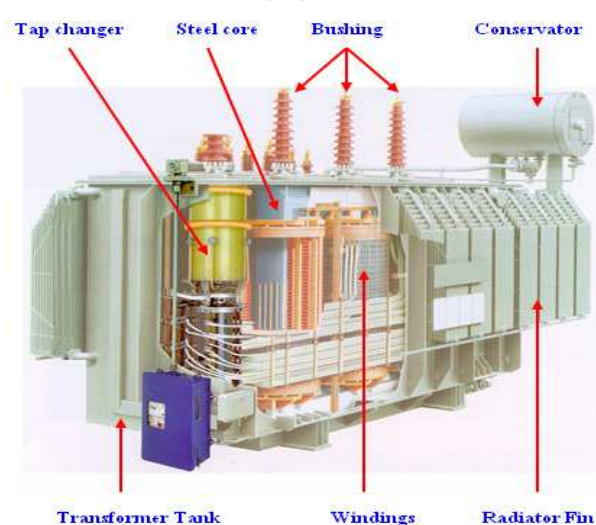
หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสร้างแรงดัน โดยพิจารณาหม้อแปลงเฟสเดียว เพื่อง่ายต่อความเข้าใจ ดังในภาพที่ 2.6 โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยหม้อแปลง 2 ชุด ที่พันอยู่บนแกนเหล็ก ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือชุดไฟเข้าเรียกว่า Primary winding โดยให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมเป็น V_1 อีกชุดหนึ่งต่อไปยัง Load เรียกว่า Secondary winding โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่ Load เป็น V_2 จำนวนรอบของขดลวดทาง Primary และ Secondary มีจำนวนรอบเป็น N_1 และ N_2 ตามลำดับ เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_1 ที่ขด Primary จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_2 ทางด้าน Secondary ถึงแม้ว่าจะไม่มี Load มาต่อก็ตาม ในกรณีเช่นนี้ $V_2 = E_2$



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า [4]

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ดังแสดงในภาพที่ 2.7 สามารถแบ่งโครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้

ถังหม้อแปลง (Transformer Tank) เป็นส่วนที่บรรจุน้ำมันหม้อแปลง Primary and Secondary Winding ขนาดของถังหม้อแปลงนั้นไม่จำกัด ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ โดยปกติแล้วผู้ใช้งานต้องการหม้อแปลงที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก สั่นสะเทือน (Vibration) น้อย ระดับความดังของเสียง (Noise Level) ต่ำ มีความเชื่อถือ (Reliability) สูง และอายุการใช้งานนาน โดยถังหม้อแปลงจะต้องถูกออกแบบให้ทนแรงกดดันของของเหลว (Hydrostatic Pressure)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของหม้อแปลง [4]

น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) น้ำมันหม้อแปลงในหม้อแปลงไฟฟ้ามีหน้าที่ 2 อย่าง คือระบายความร้อน และเป็นฉนวนไฟฟ้า

ห้องรองรับน้ำมัน (Conservator) เป็นที่เก็บน้ำมันหม้อแปลงสำรองสำหรับรองรับการขยายตัวและหดตัวของน้ำมันในหม้อแปลง และจ่ายน้ำมันชดเชยเมื่อหม้อแปลงเกิดรั่วซึม เพื่อให้มีน้ำมันหม้อแปลงอยู่เต็มภายในหม้อแปลงตลอดเวลา โดยทั่วไปจะมีปริมาณประมาณ 10% ของน้ำมันในตัวถังหม้อแปลง

อุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง Tap Changer เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้าน Load ตามต้องการ โดยทั่วไป Tap ของหม้อแปลงจะอยู่ทางด้านขดลวดแรงสูง เพราะมีจำนวนรอบมากและมีกระแสน้อย

อุปกรณ์ระบายความร้อน (Radiator Fin) ทำหน้าที่ รับภาระในการรับความร้อนจากน้ำมันส่งต่อให้แก่อากาศรอบนอก โดยใช้วิธีธรรมชาติ หรือใช้พัดลมเป็นตัวช่วยในการระบายความร้อน

บุชชิ่ง (Bushing) เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ติดอยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับภายนอก บริเวณที่สายตัวนำ (Lead Conductor) ต่อกออกมา

แกนเหล็ก (Steel Core) เป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลง เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดทางปฐมภูมิและขดลวดทางทุติยภูมิ นอกจากนี้แกนเหล็กยังเป็นที่ยึดของขดลวดได้อีกด้วย

ขดลวดหม้อแปลง (Windings) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรไฟฟ้า ประกอบด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม ฉนวน ขั้ว (Terminal) แทป (Tap) วงแหวนป้องกันประจุไฟฟ้า (Capacitive Protection Ring) และเครื่องปิดกั้นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Shield)

2.2.3 สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Circuit Breaker) [5]

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ ตัด/ต่อระบบไฟฟ้าแรงสูงในขณะที่มี Load ในสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบภายในเวลาที่กำหนด ก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิต และอุปกรณ์รอบข้าง โดยมีหน้าที่การทำงานในวงจรไฟฟ้าซึ่งพอสรุปได้ดังนี้คือ

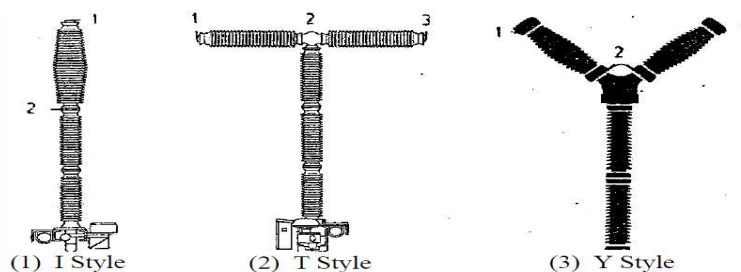
- Normal Switching คือ เปิดปิดวงจรไฟฟ้าของระบบในกรณีปกติ หรือตัดต่ออุปกรณ์บางส่วนออกหรือเข้าสู่ระบบ

- Fault Interruption คือ ตัดวงจรไฟฟ้าออกอัตโนมัติ เมื่อมี Fault เกิดขึ้นในระบบ เช่น สายส่งขาด, Short Circuit หรือเกิด Voltage Surge ขึ้นในระบบ เนื่องจากฟ้าผ่า เป็นต้น

- Circuit Re-closing คือ ปิดวงจรกลับคืนเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไปตามเดิมโดยเฉพาอย่างยิ่ง ในกรณีที่ทำงานอัตโนมัติ เรียกว่า Automatic Re-closing หลังจาก Fault ได้ผ่านพ้นหรือ Clear ออกไปแล้ว

เนื่องจากเป็นสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง การ Arc ที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมาก การดับ Arc ส่วนมากจึงใช้ Gas เป็นตัวดับ Arc เนื่องจากสามารถออกแบบให้ Circuit Breaker มีขนาดเล็ก, เสียงที่เกิดจากการ Operation ไม่ดัง และประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นๆ ที่ระดับแรงดันและกระแสเท่ากัน แก๊สที่ใช้คือ SF₆ เป็นตัวกลางในการดับ Arc เนื่องจากเป็น Gas ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้มีคุณสมบัติสามารถจับตัวกับอิเล็กตรอนอิสระได้อย่างรวดเร็วทำให้อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ได้ช้าลงและไม่สามารถเกิด Ionization เป็นผลให้อัตราการเพิ่มของอิเล็กตรอนอิสระเป็นไปได้ยากหรือช้าลง Gas SF₆ เป็นสารประกอบที่อยู่ตัวไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น การ Arc ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพของแก๊สได้

ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด มีการส่งผ่านความร้อนได้ดี ปัจจุบันนิยมใช้เป็นตัวกลางในการดับ Arc โดยมีลักษณะ โครงร่าง 3 รูปแบบดังในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะโครงร่างของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง Gas SF₆ [6]

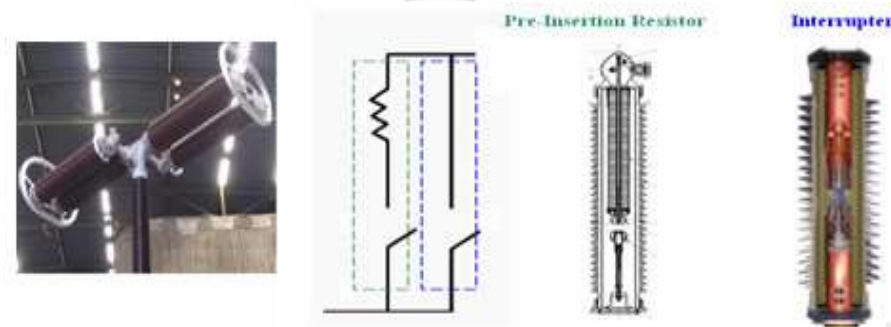
สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ในตำแหน่งปิดวงจร Circuit Breaker ต้องเป็นตัวนำที่ดี และไม่เกิดความร้อนเกินมาตรฐานที่ตัวนำ และฉนวนของ Circuit Breaker

- ในตำแหน่งเปิดวงจร Circuit Breaker ต้องเป็นฉนวนที่ดี
- ในขณะที่ Switching ต้องไม่ทำให้เกิด Over Voltage ขึ้นในระบบ
- ต้องมีความมั่นคงในสภาวะการทำงาน
- ต้องมี Sensitivity ในการตอบสนองต่อคำสั่งที่ได้รับ
- ต้องมี Stability ไม่เปลี่ยนสภาวะอย่างง่าย

การใช้ Circuit Breaker ปิดเปิดวงจรในกรณีปกตินั้น โดยเฉพาะสำหรับการเปิดวงจรมีประเด็นพิเศษที่น่าสนใจอยู่ 2 ประการคือ Inductive Current Switching กับ Capacitive Current Switching

ประการที่ 1 Inductive Current Switching ได้แก่การเปิดวงจรที่มี Inductance อยู่เป็นส่วนใหญ่ เช่น หม้อแปลง หรือ Reactor ที่ลด Load ออกหมดแล้วเป็นต้น ขณะที่ปลด Breaker ออกนั้น พลังงานแม่เหล็กที่มีอยู่ใน Inductance ของวงจร (ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} Li^2$) จะกระจายตัวออกมาในรูปของ Damped High Frequency Oscillation กระทำให้เกิด Transient Voltage ซึ่งมีค่าสูงกว่า Recovery Voltage ตามปกติและอาจสูงกว่า System Voltage ถึงหลายเท่า ในส่วนของไซเคิลแรกหลังจากปลด Breaker ออกนั้น ในขณะต่อมาแม่เหล็กกระแสลดลงมาถึงจุด Zero Current ซึ่งเป็นจุดดับของ Arc แล้วก็ตาม Voltage นี้ก็คงยังสูงอยู่และเป็นต้นเหตุที่จะทำให้เกิด Re-strike ขึ้นได้โดยง่าย เพื่อป้องกันมิให้เกิด Re-strike ดังกล่าวนี้นี้ จึงมีการต่อ Resistor หรือ Pre-insertion Resistor ครอบ Interrupter ไว้เพื่อจะ Damp Over voltage นี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิด Re-strike ขึ้นดังในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 Circuit Breaker ที่มีการต่อ Resistor ครอบตัว Interrupter [6]

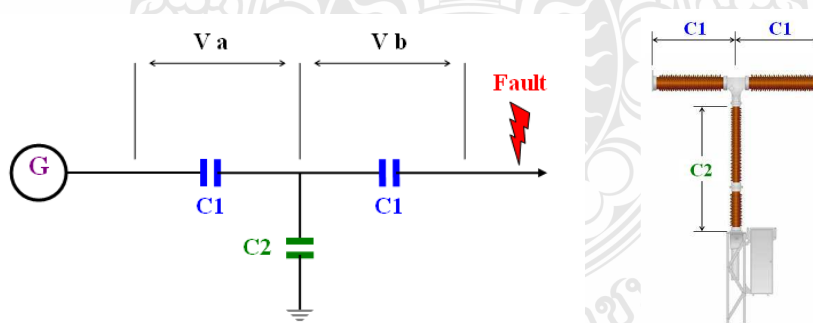
ประการที่ 2 Capacitive Current Switching ได้แก่การเปิดวงจรสายส่งระยะไกล เมื่อปลด Load ออกหมดแล้ว ซึ่งคงจะมีเพียง Line Charging Current ไหลอยู่ หรืออย่างเช่น เปิดวงจร Capacitor ขนาดใหญ่เป็นต้น วงจรประเภทนี้ Current จะ Lead Voltage ประมาณ 90 องศา ฉะนั้นแม้ว่าในขณะที่ Interruption จะเป็นไปในขณะที่ Current Wave เป็นศูนย์ (Zero Current) ก็ตาม แต่ค่าของ Voltage จะยังคงอยู่ประมาณจุดสูงสุดด้วยเหตุนี้ จึงเป็นการเสริมค่าของ Recovery Voltage ให้สูงตามขึ้นไปด้วย Recovery Voltage นี้หลังจาก Interruption ไปแล้ว ประมาณ $\frac{1}{2}$ ไซเคิล จะมีค่าประมาณ 2 เท่า ของ System Voltage ซึ่งอาจทำให้เกิด Re-striking Voltage ได้เหมือนกัน สำหรับการแก้ไขนั้นแม้การติด Resistor ครอบ Interrupter จะช่วย Damp Recovery Voltage ลงไปได้บ้างแต่ก็จำเป็นจะต้องปรับปรุงขบวนการของ Interrupter ให้มีสมรรถนะในการกลับคืนสู่สภาพ Dielectric Strength เดิม หรือเรียกว่า Dielectric Recovery Characteristic โดยเร็วที่สุด ในระหว่างเวลาขณะดับ Arc นั้น เพื่อจะให้ Insulation Level ของ Gap สูงกว่า Recovery Voltage ไว้

สำหรับ High Voltage Circuit Breaker ซึ่งต้อง Interrupt กระแสจำนวนมากๆ นั้นมักจะใช้ Interrupter หลายชุดต่อพ่วงกันเป็นอันดับ โดยมี Resistor กับ Capacitor ต่อक्रमแต่ละชุดไว้ สำหรับ Resistor หรือ Pre-insertion Resistor นอกจากจะทำหน้าที่ Damp Recovery Voltage ดังกล่าวมาแล้ว ยังเป็นตัวแบ่งแรงดันแสรระหว่าง Interrupter แต่ละชุดจะเฉลี่ยกันรับแรงดันที่ Interrupt ไว้เท่าๆ กัน

ส่วน Capacitor หรือ Grading Capacitor ดังแสดงในภาพที่ 2.10 จะทำหน้าที่เฉลี่ยแรงดันตกคร่อม Interrupter แต่ละชุดเท่าๆ กันเหมือนกัน ทั้งนี้แทนที่จะให้ Interrupter ชุดเดียวรับกระแสจำนวนมากและ Voltage สูงๆ ไว้ทั้งหมด



ภาพที่ 2.10 การต่อ Grading Capacitor ครอบ Interrupter [6]



ภาพที่ 2.11 Circuit Breaker ที่ไม่มี Grading Capacitor ต่ออยู่ [6]

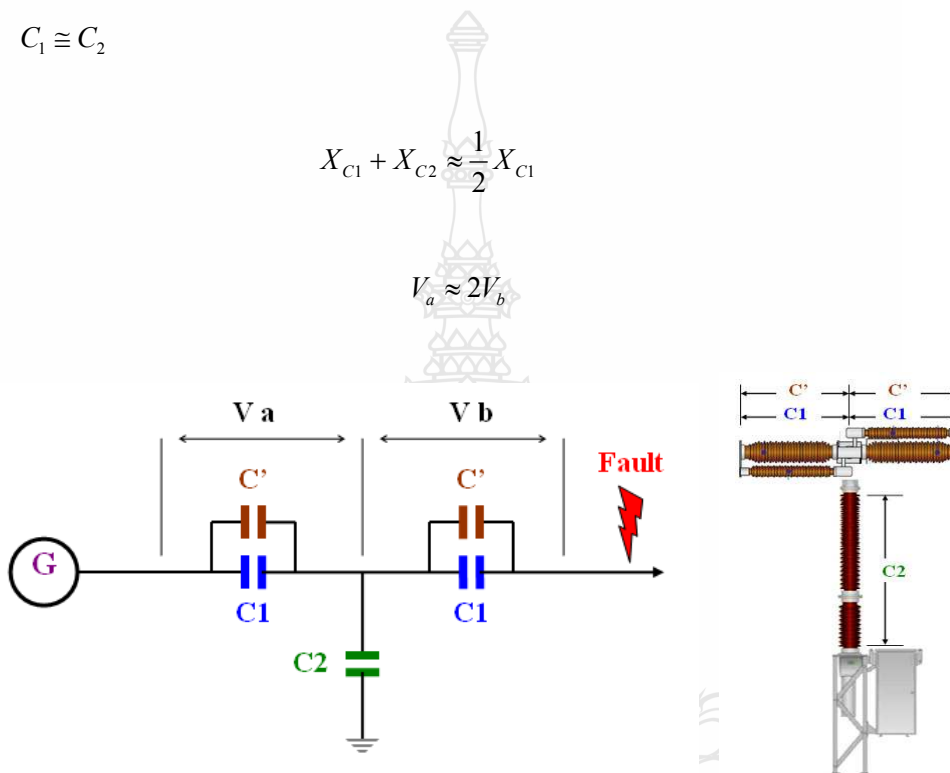
จากภาพที่ 2.11 แสดงการทำงานของ สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงชนิดที่ไม่มีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันต่อक्रम (Grading Capacitor) ในขณะที่เกิด Fault ขึ้นจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่ Interrupter

ไม่เท่ากัน โดยจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 2 เท่า ดังสมการที่ 2.3 ทั้งนี้ขนาดของแรงดันดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ โดยที่ C_1 คือค่าคาปาซิแตนซ์ของ Interrupter และ C_2 คือค่าคาปาซิแตนซ์ของ Support Insulator และ V_a, V_b คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัว Interrupter แต่ละตัว

ให้ $C_1 \cong C_2$

$$X_{C1} + X_{C2} \approx \frac{1}{2} X_{C1} \tag{2.2}$$

$$V_a \approx 2V_b \tag{2.3}$$



ภาพที่ 2.12 Circuit Breaker ที่มี Grading Capacitor ต่ออยู่ [6]

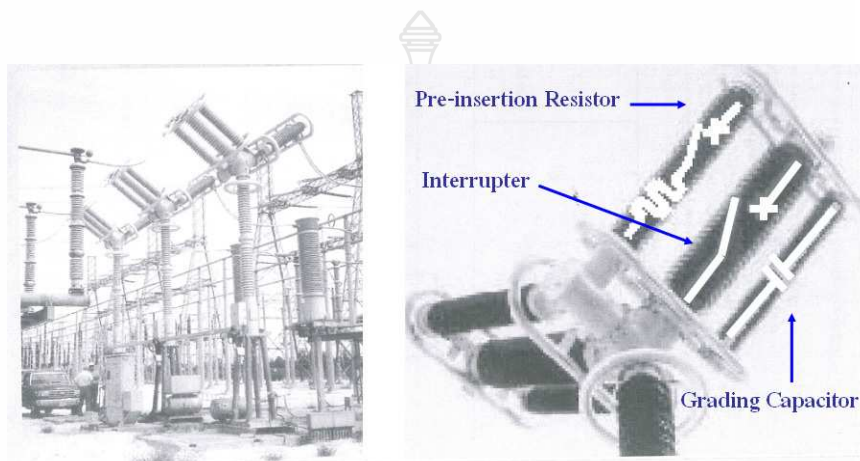
จากภาพที่ 2.8 แสดงการทำงานของ สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงชนิดที่มีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันต่อคร่อม (Grading Capacitor) ในขณะที่เกิด Fault ขึ้นจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่ Interrupter เท่ากัน ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์โดยที่ C คือค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

ให้ $C' \gg C_1, C_2$

$$X_{C'} + X_{C1} + X_{C2} \approx X_{C'} + X_{C1} \tag{2.4}$$

$$V_a \approx V_b \tag{2.5}$$

การใช้ Interrupter หลายชุดทำให้ Circuit Breaker ทำงานได้เรียบร้อยขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Interrupting Chamber มีขนาดจำกัด จึงมักติดตั้งได้อย่างมากเพียง 2 ชุด ต่อเฟสเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 2.13 หากติดตั้งมากกว่านี้ Circuit Breaker จะมีขนาดใหญ่โตขึ้นไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 2.13 การติดตั้ง Resistor กับ Capacitor [6]

2.2.4 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า (Protective Relay) [7]

Protective Relay คืออุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระดับแรงดันสูง (High Voltage) และทำงานสั่งปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดปัญหาออกจากระบบไฟฟ้า โดยเร็วเพื่อมิให้อุปกรณ์เสียหาย รีเลย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้เป็นชนิดต่างๆ ตามหลักการทำงานได้ 3 ชนิด คือ Electromechanical Relay, Solid State Relay และ Digital Relay ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 รีเลย์ชนิด Electro Mechanical, Solid State และ Digital [8, 9]

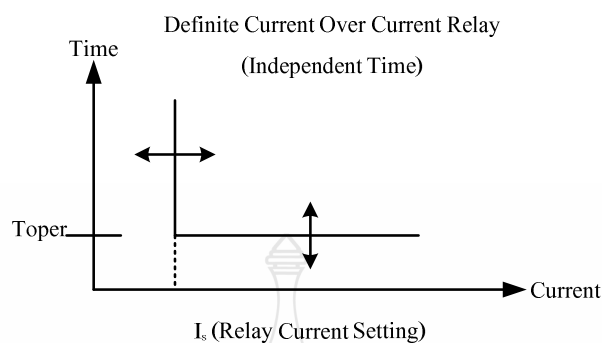
Electromechanical Relay คือ รีเลย์ที่อาศัยกระแสไฟฟ้า สร้างแรงดึงดูดหรือแรงบิดทางแม่เหล็กทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทางกลของหน้าสัมผัส รีเลย์แบบนี้ นับว่าเป็นรีเลย์ที่ใช้กันมาตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบันก็มีใช้อยู่ Electromechanical Relay อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงาน คือ รีเลย์แบบอาศัยแรงดูดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Attraction) และรีเลย์แบบอาศัยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Induction)

Solid State Relay (Static Relay) การขยายตัวอย่างรวดเร็วและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ ทำให้มีความต้องการรีเลย์ป้องกันที่มีคุณภาพดี และสามารถทำงานที่ละเอียดซับซ้อนได้ ความต้องการเหล่านี้เป็นไปได้เนื่องจากมีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ มาใช้ทำรีเลย์ป้องกัน รีเลย์แบบนี้เรียกว่า Solid State Relays หรือ Static Relays หน้าที่การทำงานและลักษณะสมบัติทุกอย่างของรีเลย์ไฟฟ้า สามารถทำได้โดย Static Relays รีเลย์แบบนี้ใช้วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอาจใช้ Discrete Components หรือ Integrated Circuits (IC)

Digital Relay จากการสังเกตพบว่าทั้งรีเลย์แบบ Electromechanical และแบบ Solid State มีลักษณะเหมือนกับ Analog Computer ซึ่งรับสัญญาณเข้าประมวลผลสัญญาณเหล่านั้น แล้วสร้างแรงบิดหรือ Logic Output และทำการตัดสินใจเพื่อให้ Contact ปิด หรือให้ Output Signal ต่อมาเมื่อมีการพัฒนา Microprocessor ซึ่งถูกใช้ใน Digital Computer ก็สามารถทำงานเป็นรีเลย์ป้องกันได้ โดยรีเลย์แบบนี้ถูกเรียกว่า Computer Relays หรือ Digital Relays

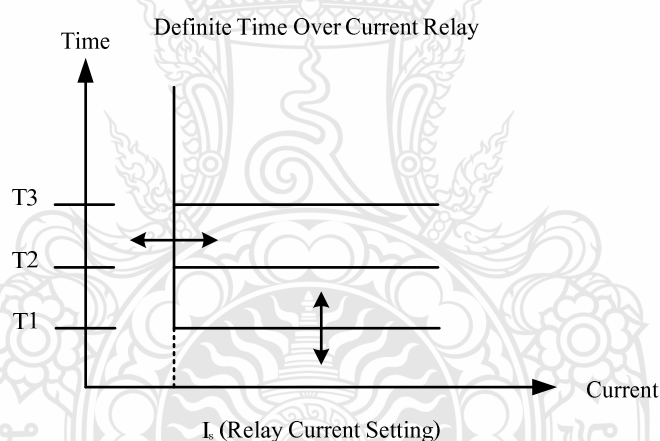
รีเลย์กระแสเกิน (Over Current Relay) เป็นรีเลย์ที่ใช้แพร่หลายมากที่สุดในการป้องกันกระแสเกินที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ รีเลย์จะตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นและจะนำผลที่ได้ไปประมวลผลแล้วสั่งการให้ Circuit Breaker หรือ Switchgear ทำงานเพื่อตัดส่วนที่เกิดความผิดปกติออกไปจากระบบ ขณะที่ส่วนอื่นๆ ของระบบยังทำงานได้ตามปกติ ปริมาณที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นคือ กระแสและเวลา ปริมาณดังกล่าวทำให้รีเลย์กระแสเกินมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ Instantaneous Over Current Relay และ Time Delay Over Current Relay

Instantaneous Over Current Relay รีเลย์นี้ใช้กระแสเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดปกติจะทำงานเมื่อกระแสผิดปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ (Pick up) โดยรีเลย์จะทำงานทันทีไม่ขึ้นกับเวลา โดยเวลาการทำงานอาจจะอยู่ในระหว่าง 10 ms – 40 ms ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ลักษณะสมบัติของ Definite Current Over Current Relay [7]

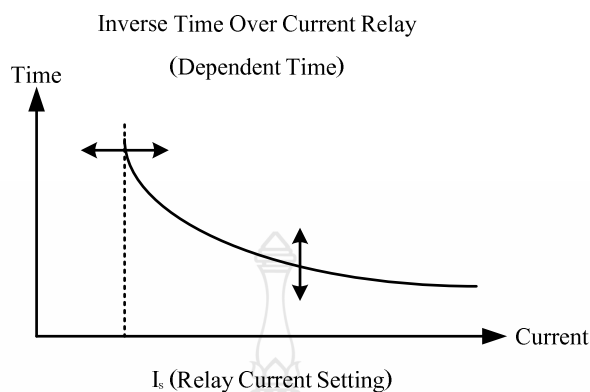
Time Delay Over Current Relay เป็นรีเลย์แบบหน่วงเวลา ซึ่งมีด้วยกัน 3 แบบ คือ Definite Time Over Current Relay, Inverse Time Over Current Relay และ Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Over Current Relay



ภาพที่ 2.16 ลักษณะสมบัติของ Definite Time Over Current Relay [7]

Definite Time Over Current Relay รีเลย์นี้ใช้เวลาเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดปกติ จะทำงานเมื่อกระแสผิดปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ โดยรีเลย์จะทำงานตามเวลาที่ปรับตั้งไว้ หรือเรียกรีเลย์นี้ว่า Definite Time Over Current Relay ดังภาพที่ 2.16

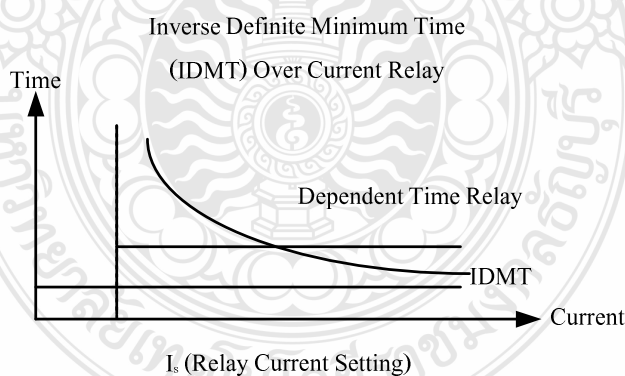
Inverse Time Over Current Relay รีเลย์นี้ใช้กระแสและเวลาเป็นปริมาณในการตรวจจับความผิดปกติจะทำงานเมื่อกระแสผิดปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสที่ปรับตั้งไว้ โดยความเร็วในการทำงานของรีเลย์ขึ้นกับขนาดของกระแสผิดปกติ ยิ่งกระแสผิดปกติมีค่ามาก รีเลย์ยิ่งทำงานเร็ว ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ลักษณะสมบัติของ Inverse Time Over Current Relay [7]

ซึ่งรีเลย์ในลักษณะนี้เราเรียกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา (Time Current Characteristic Curve) แบบนี้ว่า Inverse Time ระดับความโค้งของกราฟมีหลายระดับ แบ่งออกเป็น Standard Inverse, Very Inverse และ Extremely Inverse

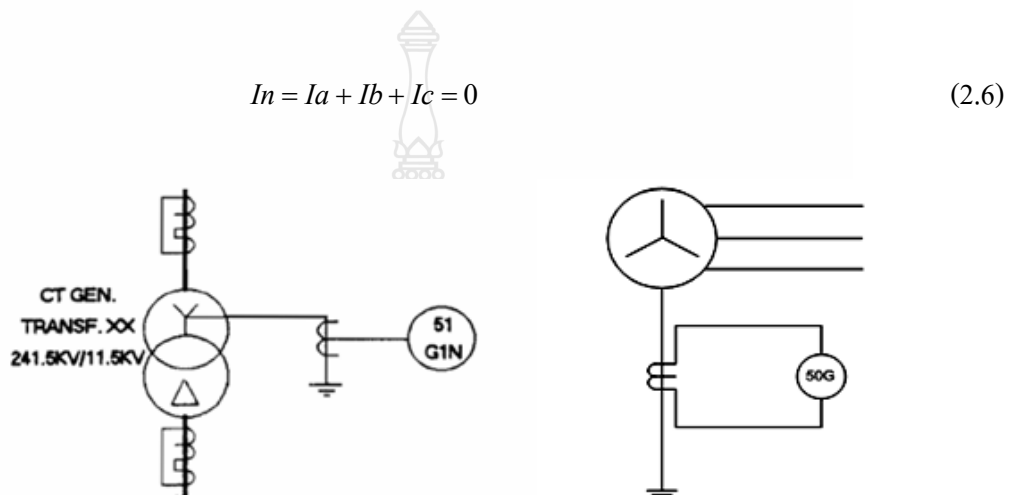
Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Over Current Relay รีเลย์นี้ เป็นการรวมลักษณะการทำงานของรีเลย์แบบ Definite Time Over Current Relay และแบบ Inverse Time Over Current relay เข้าไว้ด้วยกัน คือรีเลย์จะมีช่วงเวลาทำงานของรีเลย์แปรตามขนาดกระแสผิดพลาด และมีช่วงที่รีเลย์ทำงานทันที เมื่อขนาดของกระแสผิดพลาดเป็นไปตามที่กำหนดดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ลักษณะสมบัติของ Inverse Definite Minimum Time Over Current Relay [7]

ในระบบไฟฟ้าทั่วไป เพื่อความปลอดภัยแล้วจะมีการต่อลงดินเพื่อจำกัดกระแสผิดพลาดลงดิน โดยเฉพาะการต่อลงดินผ่านความต้านทานจะทำให้กระแสผิดพลาดลงดินมีขนาดลดลง ดังนั้นรีเลย์

กระแสเกินปกติ จะไม่สามารถตรวจจับกระแสผิดปกติลงดินได้ เราจึงต้องมีรีเลย์ป้องกันกระแสลงดิน ซึ่งจะต้องมีความไวสูง สามารถตรวจจับกระแสผิดปกติขนาดเล็กได้ โดยใช้รีเลย์กระแสเกินปกติต่อเข้ากับจุดร่วมของสายด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบ Y ของหม้อแปลงกระแส ดังภาพที่ 2.19 กระแสที่ผ่านรีเลย์ป้องกันกระแสลงดิน คือผลรวมของกระแสเฟสทั้ง 3 สาย ดังแสดงในสมการที่ 2.6



ภาพที่ 2.19 Ground Over Current Relay [7]

ในขณะที่เกิดกระแสผิดปกติลงดิน จะมีกระแสผิดปกติลงดินไหลกลับมาผ่านสายนิวทรัลที่ลงดินที่หม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นรีเลย์นี้จะสามารถตั้งค่าต่ำมากๆ ได้

กระแส และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามารถแยกออกได้เป็นองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ Positive Sequence Component, Negative Sequence Component และ Zero Sequence Component โดยใช้สมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_A \\ \hat{V}_B \\ \hat{V}_C \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

เมื่อ	\hat{I}_0 และ \hat{V}_0	=	Zero Sequence Component ของกระแส และแรงดันตามลำดับ
	\hat{I}_1 และ \hat{V}_1	=	Positive Sequence Component ของกระแส และแรงดันตามลำดับ
	\hat{I}_2 และ \hat{V}_2	=	Negative Sequence Component ของกระแส และแรงดันตามลำดับ
	\hat{I}_A และ \hat{V}_A	=	เวกเตอร์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ตามลำดับ
	\hat{I}_B และ \hat{V}_B	=	เวกเตอร์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าในเฟส B ตามลำดับ
	\hat{I}_C และ \hat{V}_C	=	เวกเตอร์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าในเฟส C ตามลำดับ
	a	=	เวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 และมีมุม 120 องศา

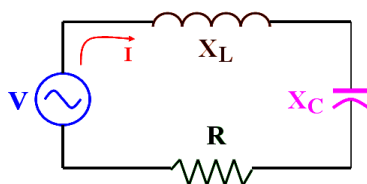
กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สมดุลจะมีแต่ Positive Sequence Component เท่านั้น แต่กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีทั้ง Positive, Negative และ Zero Sequence Component ส่วนระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายที่ไม่มีนิวทรัล กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมี Positive และ Negative แต่ไม่มี Zero Sequence Component ในระบบไฟฟ้าทั่วไป \hat{V}_1 มีค่าค่อนข้างคงที่และมีขนาดใกล้เคียงกับ Line to Ground ของระบบ ดังนั้นระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าจึงขึ้นกับขนาดของ \hat{V}_2 และเป็นผลมาจากกระแส \hat{I}_2 ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ระบบ (System Impedance - Z_{sys}) ดังความสัมพันธ์ดังในสมการที่ 2.9

$$\hat{V}_2 = \hat{I}_2 \times \hat{Z}_{sys} \quad (2.9)$$

หากกระแสไหลใน 3 เฟส (\hat{I}_A , \hat{I}_B และ \hat{I}_C) มีความสมดุลกัน จะมีแต่กระแส \hat{I}_1 ไหลในระบบไฟฟ้าเท่านั้น แต่หากไม่สมดุลจะมีกระแส \hat{I}_2 ไหลในระบบไฟฟ้าด้วย หากกระแสไหลไม่สมดุลเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแส \hat{I}_2 ที่ไหลในระบบไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตาม

2.3 เฟอโรเรโซแนนซ์ [10, 11]

การเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ (Ferro Resonance) เป็นปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Resonance) ของระบบไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ มีตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น แกนเหล็กของหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) เมื่อตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานจะทำให้มีการแกว่งของแรงดันได้หลายๆ รูปแบบซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดเฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า เฟอโรเรโซแนนซ์

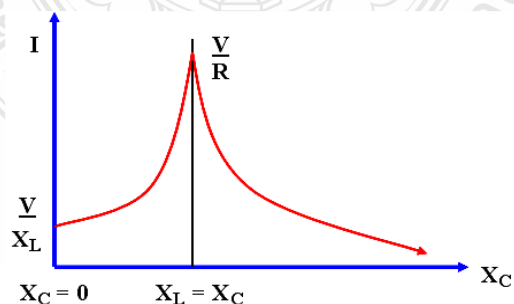


ภาพที่ 2.20 วงจรอนุกรม RLC [10]

จากภาพที่ 2.20 แสดงวงจรอนุกรม RLC โดยปกติแล้วค่าความต้านทาน (Resistance: R) ของระบบไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำของระบบ (Inductive Reactance: X_L) จนอาจจะไม่ต้องนำมาพิจารณาก็ได้ ดังสมการที่ 1 และหากเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitive Reactance: X_C) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ จะได้ว่า $X_C = 0$ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าเท่ากับ $I = \frac{V}{X_L}$ และเมื่อค่า X_C มีค่ามากๆ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าลดลงเกือบเป็นศูนย์ แต่เมื่อค่า $X_C = X_L$ ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเรโซแนนซ์ จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าสูงสุด และจะถูกจำกัดโดยค่าความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้นคือ $I = \frac{V}{R}$ และมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ดังในสมการที่ 2.11 [10]

$$I = \frac{V}{R + X_L - X_C} \cong \frac{V}{X_L - X_C} \quad (2.10)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$



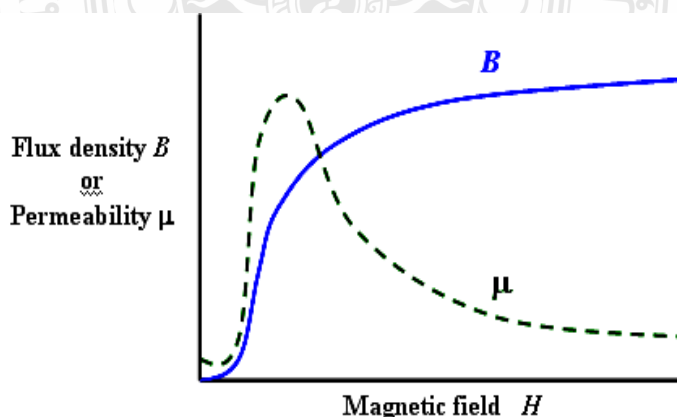
ภาพที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่เกิดจากการเปลี่ยนค่า X_C ในวงจรอนุกรม [10]

จากภาพที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งค่า $X_C = X_L$ ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์นี้จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรอนุกรม RLC มีค่าสูงสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของ R เท่านั้น โดยปกติในระบบไฟฟ้าจะมีค่า X_C น้อยกว่าค่า X_L อยู่มาก ดังนั้นโอกาสเกิดสถานะเรโซแนนซ์จึงเป็นเรื่องที่ยากที่จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปค่า X_C ของระบบจะแปรผันโดยตรงกับค่าความยาวของสายป้อนตัวนำไฟฟ้า คือหากสายป้อนมีระยะทางยาวจะมีค่า X_C มาก สำหรับค่า X_L ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีการเปลี่ยนแปลง หรือมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่นกรณีการอิ่มตัว (Saturated) ของแกนเหล็กซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Materials) ของหม้อแปลงจะส่งผลให้ความเป็นไปได้ของค่า $X_C = X_L$ มีโอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น

การที่จะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้นั้นค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance: L) จะต้องมีค่าลดลงหรือค่า Capacitive Reactance (X_C) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยปกติแล้วค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์จึงเป็นเพราะค่าความเหนี่ยวนำลดลงซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็กของหม้อแปลงดังสมการที่ 2.12 [11]

$$L = \frac{\mu A \times N^2}{\ell} \quad (2.12)$$

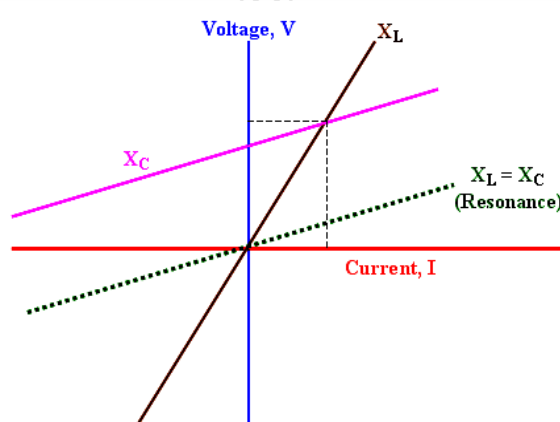
- โดยที่ μ = ค่าความซึมซาบได้ของแกนเหล็กหม้อแปลง
 A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหม้อแปลง
 ℓ = ค่าเฉลี่ยความยาวของแกนเหล็กหม้อแปลง
 N = จำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง



ภาพที่ 2.22 Permeability ของแกนเหล็กหม้อแปลง [11]

จากภาพที่ 2.22 แสดงค่าความซึมซาบได้ของแกนเหล็กหุ้มเปลือก จะเห็นว่าในกรณีที่หม้อแปลงทำงานในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นนั้นค่า Permeability (μ) จะมีค่าสูงแต่ถ้าหม้อแปลงเข้ามาทำงานที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น หรือเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กหุ้มเปลือก (Saturate) ค่า Permeability (μ) จะมีค่าต่ำลงหรือค่าความเหนียวน่ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ และเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ได้ในที่สุด

หากพิจารณาความเป็นไปได้ของค่า X_C ที่จะเท่ากับค่า X_L ในกรณีที่ทั้งสองค่าเป็นแบบคงที่หรือแบบเชิงเส้นดังในภาพที่ 2.23 จะพบว่ามีโอกาสน้อยมาก

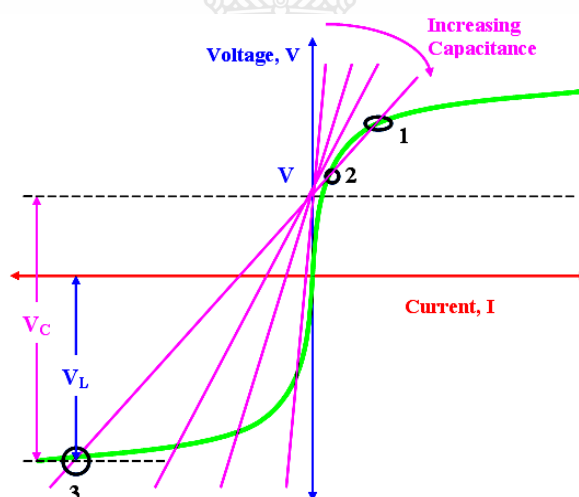


ภาพที่ 2.23 การเกิดเรโซแนนซ์วงจร LC แบบเชิงเส้น [10]

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าหากค่า X_L มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น เช่น กรณีการอิ่มตัวของแกนเหล็กซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Materials) ของหม้อแปลงจะส่งผลให้ความเป็นไปได้ของค่า X_C ที่จะเท่ากับ X_L มีเพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของวงจรที่เป็นเชิงเส้นจะแสดงได้ดังภาพที่ 2.23

จากภาพที่ 2.24 เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าคาปาซิแตนซ์ของวงจร LC แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยกราฟแสดงเส้นทึบใช้แทนคุณลักษณะของสารแม่เหล็ก และกราฟเส้นประใช้แทนคุณลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ที่แตกต่างกันในวงจร โดยค่า C ที่มีค่าน้อย ลักษณะเส้นกราฟจะมีความชันมาก แต่เมื่อ C มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะเส้นกราฟจะมีความชันลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โดยปกติเส้นกราฟของ C สามารถสร้างจุดตัดกับเส้นกราฟได้หลายจุด ทำให้คำตอบของวงจร LC แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดการเรโซแนนซ์ อาจมีมากกว่า 1 ค่า ซึ่งจะเป็นจุดที่มีเสถียรภาพหรือไม่เสถียรภาพได้ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะพบว่า

จุดที่ 1 และ 3 เป็นจุดทำงานที่มีเสถียรภาพ (Stable Operating Point) เนื่องจากกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดัน กล่าวคือ แรงดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นด้วย โดยจุดที่ 1 เป็นจุดทำงานในช่วงของแกนเหล็กที่เป็นเชิงเส้น โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นยังอยู่ในช่วงของการออกแบบ หรือเป็นจุดทำงานปกติและไม่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ส่วนจุดที่ 3 เป็นจุดทำงานที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ที่จุดนี้ฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นอยู่ในช่วงของการอิ่มตัว เนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบจะมีผลโดยตรงกับจุดทำงาน หากพารามิเตอร์ในระบบเปลี่ยนไปจุดทำงานอาจเปลี่ยนตาม สำหรับกรณีที่ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยๆ จะทำให้เส้นตรงของ X_C มีลักษณะที่ชันมาก และจะส่งผลให้เกิดจุดตัดเพียง 1 จุด คือส่วนของกระแสและแรงดันที่เป็นลบ หรือเป็นจุดทำงานในช่วงของแกนเหล็กที่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นจุดที่ไม่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์



ภาพที่ 2.24 การเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร LC แบบไม่เป็นเชิงเส้น [10]

จุดที่ 2 เป็นจุดทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Operating Point) ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสที่แตกต่างจากจุดที่ 1 และ 3 กล่าวคือ เมื่อแรงดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้กราฟของ X_C เลื่อนขึ้นขนานกับเส้นเดิม เมื่อเกิดลักษณะดังกล่าว จุดที่ 2 จะเลื่อนลงหรือค่ากระแสมีค่าลดลง จุดทำงานจุดที่ 2 ในลักษณะดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นในทางกายภาพ ดังนั้น จุดทำงานจึงต้องเปลี่ยนเป็นจุดที่ 1 หรือ 3 ซึ่งอาจจะเกิดหรือไม่เกิดแรงดันเกินเฟอร์โรเรโซแนนซ์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจุดทำงานดังกล่าวจะเป็นแบบสุ่ม ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น และเงื่อนไขของระบบเป็นหลัก

2.4 การเกิดตัวเก็บประจุแฝง [12]

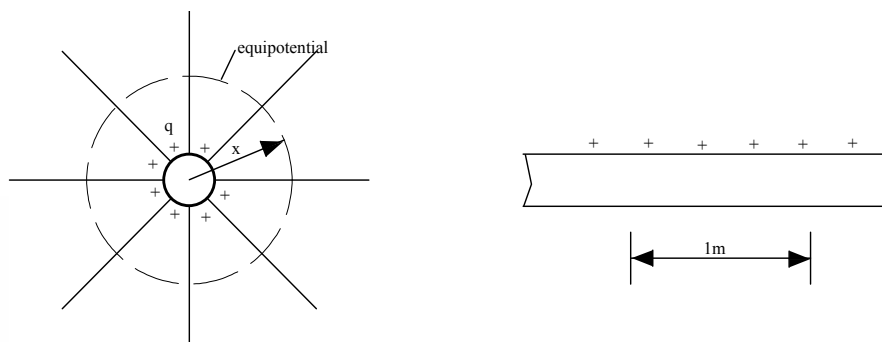
คุณสมบัติความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นกับสายส่งเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างสายส่งด้วยกัน หรือระหว่างสายส่งกับดิน ความจุไฟฟ้าระหว่างสายส่ง หมายถึง จำนวนประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความต่างศักย์ไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.13

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.13)$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้า (ฟารัด)
 Q คือ จำนวนประจุไฟฟ้า (คูลอมป์)
 V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่งประกอบด้วย ความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับสาย และระหว่างสายกับดิน ซึ่งความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับสาย จะมีค่าสูงกว่าความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับดินมาก เนื่องจากสายส่งโดยทั่วไปอยู่สูงเหนือพื้นดินมาก ความจุไฟฟ้าของสายส่งมีผลต่อการส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบมาก เพราะความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่งนี้ทำให้เกิดประจุบนสายส่งเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในสายส่ง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าไปในสายส่งทำให้ประจุบนสายส่งที่จุดใดจุดหนึ่งเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่จุดนั้นๆ ดังนั้นจะทำให้เกิดการไหลของกระแสขึ้น กระแสที่ไหลเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในสายส่งที่เปิดวงจรนั้น เรียกว่า กระแสชาร์จิง ซึ่งกระแสดังกล่าวนี้จะไหลเข้าไปในสายส่ง แม้ว่าด้านปลายของสายส่งจะเปิดวงจร

วิธีการหาความจุไฟฟ้านั้น สามารถหาได้จากหลักการว่า ประจุไฟฟ้าใดๆ สร้างความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดที่จะหาความจุไฟฟ้านั้น มีมากน้อยเพียงใด ซึ่งความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าใดๆ จากจุดศูนย์กลางของสายส่งสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาว่าจุดทุกจุดที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของสายส่งเท่าๆ กัน เป็นจุดที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันและมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าเท่ากัน ดังนั้นทรงกระบอกสมมติที่มีรัศมี X จึงมีแรงดันไฟฟ้าที่ขอบทรงกระบอกเท่ากันและความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกระบอก มีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าต่อความยาวสายหนึ่งเมตรหารด้วยพื้นที่ผิวทรงกระบอกที่มีแกนยาวหนึ่งเมตร



ภาพที่ 2.25 ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าใดๆ จากจุดศูนย์กลางของสายส่ง [12]

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad \text{C/m}^2 \quad (2.14)$$

- เมื่อ D คือ ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (คูลอมป์/เมตร²)
 q คือ ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว (คูลอมป์/เมตร)
 x คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของสายส่ง (เมตร)

ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) ที่จุดใดสามารถหาค่าได้ตามสมการ

$$E = \frac{D}{\epsilon} \quad \text{V/m} \quad (2.15)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \text{F/m} \quad (2.16)$$

- เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร)
 D คือ ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (คูลอมป์/เมตร²)
 ϵ คือ Actual Permittivity of Dielectric (ฟารัด/เมตร)
 ϵ_r คือ Relative Permittivity of Dielectric = 1.00054
 ϵ_0 คือ Permittivity of Free Space = 8.85×10^{-12} (ฟารัด/เมตร)

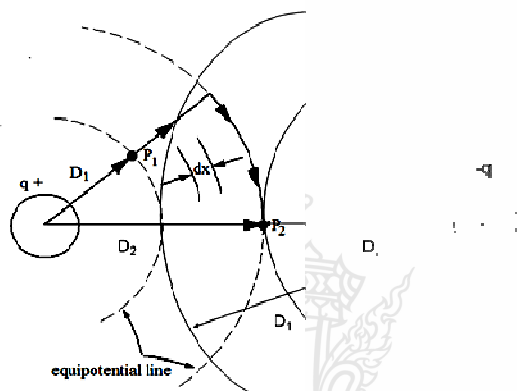
ดังนั้น

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \quad \text{V/m} \quad (2.17)$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด P_1 และ P_2 สามารถหาได้จากสมการ

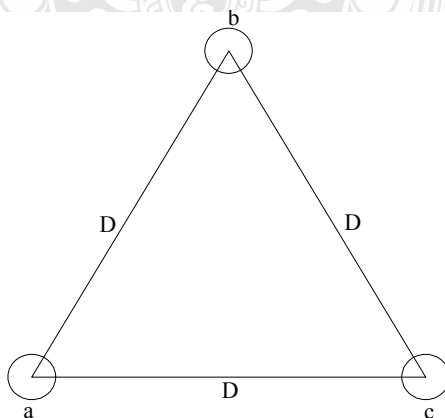
$$V_{12} = V_1 - V_2 = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon x} dx$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \text{V} \quad (2.18)$$



ภาพที่ 2.26 แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด P_1 และ P_2 [12]

การหาความจุไฟฟ้าของสายส่งสามเฟสที่วางห่างเท่ากัน จะหาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส และนิพจน์กับประจุไฟฟ้า ก่อนที่จะหาความจุไฟฟ้า



ภาพที่ 2.27 การหาความจุไฟฟ้าของสายส่งสามเฟส [12]

ความต่างศักย์ระหว่างจุด a และ b อันเนื่องมาจากผลประจุ q_a

$$V_{ab1} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \quad (2.19)$$

ความต่างศักย์ระหว่างจุด a และ b อันเนื่องมาจากผลประจุ q_b

$$V_{ab2} = \frac{q_b}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{D} \quad (2.20)$$

ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด a และ b อันเนื่องมาจากผลของประจุ q_c

$$V_{ab3} = \frac{q_c}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{D} \quad (2.21)$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย V_{ab} และ V_{ac} สามารถหาได้จากแรงดันไฟฟ้าเนื่องจาก q_a, q_b, q_c ของสาย
ส่ง

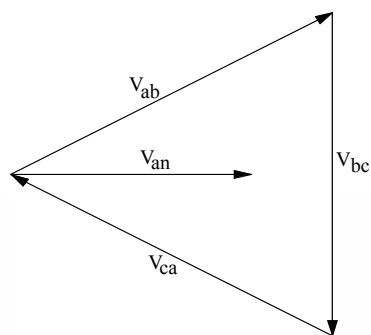
$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} + q_c \ln \frac{D}{D} \right) \quad (2.22)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{D}{D} + q_c \ln \frac{r}{D} \right) \quad (2.23)$$

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[2q_a \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D} \right] \quad (2.24)$$

เนื่องจาก $q_a + q_b + q_c = 0$ ดังนั้น $q_a + q_b = -q_c$

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \quad (2.25)$$



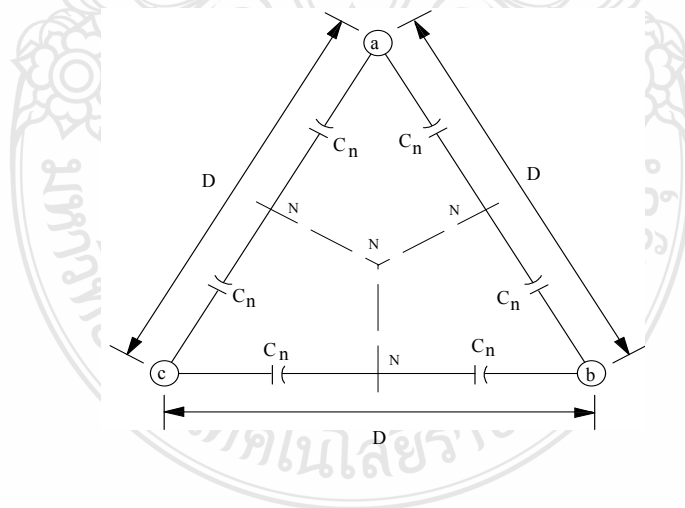
ภาพที่ 2.28 เวกเตอร์โวลเตจของแรงดันไฟฟ้าของสายส่งสามเฟส [12]

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{an} (0.866 + j0.5)$$

$$V_{ac} = -V_{ca} = \sqrt{3}V_{an} (0.866 - j0.5)$$

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$$

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \quad (2.26)$$



ภาพที่ 2.29 ความจุไฟฟ้า C_n ของสายส่ง [12]

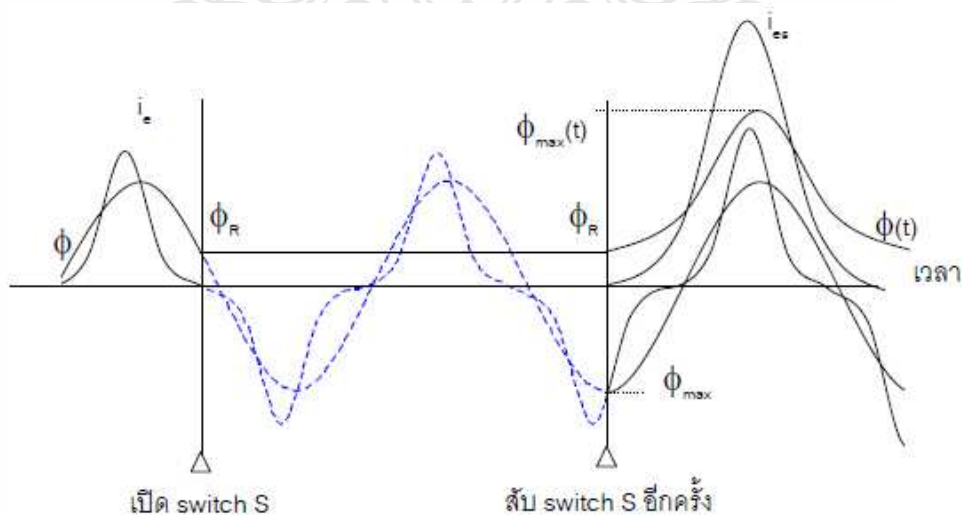
$$C_n = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad \text{ฟารัด/เมตร} \quad (2.27)$$

2.5 Magnetizing Inrush Current [13]

การจ่ายไฟ (Energize) ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะที่ No Load จะมีกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Exciting Current ซึ่งประกอบด้วยกระแสส่วนที่สร้าง Induced Flux เรียกว่า Magnetizing Current และกระแสส่วนที่จ่ายให้ Core Loss เมื่อ Energize หม้อแปลงครั้งแรกจะเกิด Transient Magnetizing Current ไหลจาก Source ไปยัง Winding ชุดที่ Energize จะมีปริมาณสูงหลายเท่าของ Normal Rated Current ปริมาณ และเวลาที่ Inrush Current ไหลในวงจร Energizing จะขึ้นกับหลายอย่างเช่น

- ขนาดของหม้อแปลง
- ขนาดของ Power System
- Resistance ของ Energizing Circuit : System Resistance, Winding Resistance, Core Loss
- ชนิดของเหล็กที่ใช้ทำแกนซึ่งหมายถึงลักษณะของการอิ่มตัว
- ขนาดของ Residual Flux
- ลักษณะการ Energize ที่มุมต่างๆของ Power Source Voltage

อย่างไรก็ตามขณะสับ Switch S ดังภาพที่ 2.30 ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกจังหวะให้เหมาะสมได้ จึงไม่สามารถควบคุมหรือหลีกเลี่ยง Transient Inrush Current ได้



ภาพที่ 2.30 การเกิด Magnetizing Inrush Current [13]

จะเห็นได้ว่า Flux ที่เกิดจากการสับ Switch S เพื่อ Energize มีค่าเป็น 2 เท่าของ ϕ_{max} ปกติ เพราะ Flux จะต้องเริ่มจากสถานะภาพเดิมที่มีอยู่ในแกนก่อนเสมอ จะเปลี่ยนจาก ϕ_R เป็น ϕ_{max} ขณะสับที่ $t=0$ ไม่ได้ ชั้นแรกต้องสร้าง di/dt เพื่อให้เกิดแรงดันเท่ากับ Source (เช่นเดียวกับ กระแสก็เหมือนกับ Flux คือเปลี่ยนทันทีทันใดไม่ได้) กระแสที่สร้าง Flux จึงเกิดเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นกระแสที่มี Oscillation Frequency เท่ากับระบบ และส่วนที่ 2 เป็น DC Component ซึ่งจะมี รูปร่างเป็น Exponential มี Time Constant เป็น L/R กระแสทั้ง 2 ส่วนจะสร้าง Flux ให้ Oscillate โดย เริ่มต้นจาก Residual Flux เมื่อ Flux รวมมีค่าถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็กจะทำให้กระแส Inrush พุ่งขึ้น สูงมาก และค่า Time Constant จะไม่คงที่

การที่ขดลวดของหม้อแปลงถูก Energize เพียงด้านเดียวดังนั้น กระแส Inrush Current จึง ถูกตรวจจับด้วย Current Transformer เพียงด้านเดียวทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดได้ Inrush Current จะมี 2nd Harmonic สูงมาก การป้องกันการดำเนินงานผิดพลาด โดยใช้รีเลย์ที่มี Function Harmonic Blocking ที่ 12 – 15 %

2.6 โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า [14]

การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมตระกูล EMTP จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบจริงมากกว่าการสร้างแบบจำลองโดยการลดรูป วงจรและเขียนความสัมพันธ์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพราะเป็นการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์แต่ละตัวและนำมาต่อกันเป็นวงจรในทาง ทฤษฎีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมตระกูล EMTP จะไม่มีข้อจำกัด ในเรื่องความซับซ้อน ของจำนวนอุปกรณ์ในระบบ จากเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้การประยุกต์ใช้วิธีพลวัตไม่เชิงเส้นแบบ ใหม่กับแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรมตระกูล EMTP เป็นวิธีการที่จะได้รับความนิยมในอนาคตต่อไป

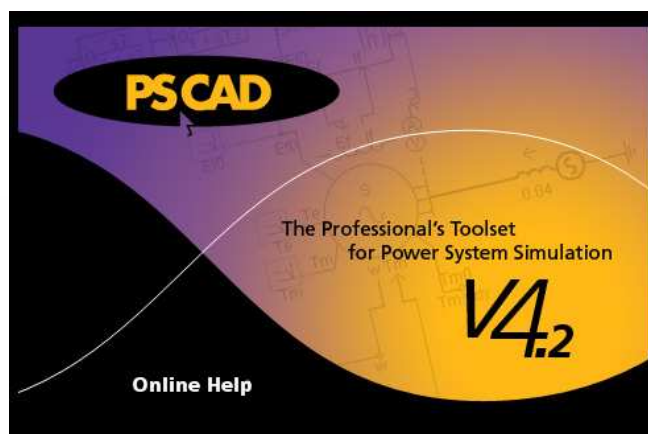
แรงดันเกินที่เกิดจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงอยู่ในระบบซึ่ง เกิดขึ้นได้ทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่าย ในอดีต ด้วยวิธีการฟิสิก การวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ทำได้ก็เฉพาะการอธิบายความแตกต่างระหว่างรีโซแนนซ์เชิงเส้นและเฟอร์โรเรโซแนนซ์

การประยุกต์ใช้วิธีพลวัตไม่เชิงเส้นวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในช่วงถัดมาทำให้มีความ ถูกต้องมากขึ้น แต่เนื่องจากแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนการลดรูปของสมการจึง มีความจำเป็นและนำไปสู่ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนวิธีพลวัตไม่เชิงเส้นแบบเก่าจะพิจารณาระบบเมื่อเข้าสู่ สภาวะคงตัวแล้ว และสมมติคำตอบให้เป็นฟังก์ชันรายคาบค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าสามารถหาได้ด้วย วิธี Harmonic Balance วิธี Galerkin และวิธี Describing Function เป็นต้น ดังนั้นคำตอบที่หาได้จะเป็น คำตอบเฉพาะความถี่ที่สมมติค่าขึ้น ถ้ามีคำตอบที่นอกเหนือจากนี้วิธีดังกล่าวไม่สามารถหาคำตอบได้

จากความสามารถของดิจิทัลคอมพิวเตอร์และเทคนิคเชิงเลขทำให้วิธีพลวัตไม่เชิงเส้นแบบใหม่มีความถูกต้องในการวิเคราะห์ห้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะแผนภาพไบเฟอ์เคชั่นที่แสดงภาพอย่างกว้างของการทำงานในโหมดต่างๆ ของเฟอ์โรเรโซแนนซ์เมื่อตัวแปรอิสระ (เช่นแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่ต้องการ)

การสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมตระกูล EMTP ทำให้ได้แบบจำลองใกล้เคียงความเป็นจริง ซึ่งเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับ วิธีพลวัตไม่เชิงเส้นแบบใหม่ จะทำให้การวิเคราะห์เฟอ์โรเรโซแนนซ์มีความยืดหยุ่นต่อการปรับเปลี่ยนรูปแบบการต่อวงจรในระบบไฟฟ้า และสามารถประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆ ในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ มาช่วยแก้ปัญหาด้านเฟอ์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการแก้ปัญหา นี้ใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ต่างๆ ทางไฟฟ้า ทั้งสถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว โปรแกรมนี้มีชื่อว่า Electro Magnetic Transient Program (EMTP) ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก มีวิวัฒนาการอย่างยาวนานมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 จนกระทั่งปัจจุบัน ซึ่งโปรแกรมคำนวณสถานะชั่วคราวของหลายๆ บริษัท ได้อาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับของทาง EMTP รวมทั้งโปรแกรม Electro-Magnetic Transient in DC Systems (EMTDC) ของ “ศูนย์วิจัยกระแสตรงแรงดันสูงมานิโทบา” (Manitoba HVDC Research Center) เป็นอีกโปรแกรมที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โปรแกรม EMTP รุ่นแรกๆ ถูกพัฒนาโดย เคนนิส วูดส์ฟอร์ด ในปี ค.ศ. 1976 โดยพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC System) จากนั้นได้มีการพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สามารถจำลองเหตุการณ์เพื่อวิเคราะห์ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ และต่อมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับสร้างภาพแบบจำลอง และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานสำหรับโปรแกรม EMTP โดยเฉพาะชื่อว่า PSCAD และได้มีการรวมทั้ง EMTDC และ PSCAD เข้าเป็นชุดโปรแกรมสำเร็จรูปเดียวกัน โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า PSCAD/EMTDC ดังแสดงในภาพที่ 2.31 ซึ่งปัจจุบันพัฒนาการใช้งานอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.31 โปรแกรม PSCAD/EMTDC [14]

การใช้งานโปรแกรม PSCAD/EMTDC ต้องหาหลักการและเหตุผลของเหตุการณ์ การเปลี่ยนแปลงสถานะของอุปกรณ์ในระบบ นั่นคือ การจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ในระบบไฟฟ้า กำลัง ผลลัพธ์ที่ได้สามารถศึกษาได้ทั้งแบบเฉียบพลันในขอบเขตเวลา (Time Domain Instantaneous Values) ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยในขอบเขตเวลา (Time Domain rms Values) และค่าองค์ประกอบความถี่ (Frequency Component) EMTDC เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับจำลองเหตุการณ์แบบค่าฉับพลันในขอบเขตเวลา หรือที่เรียกว่า “ภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า” โดยสามารถจำลองอุปกรณ์ตามตัวอย่างได้ดังนี้

- ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ
- อุปกรณ์ที่มีความเหนี่ยวนำของขดลวด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า
- แบบจำลองการกระจายแบบ ขึ้นกับความถี่ของสายส่ง และเคเบิล
- แหล่งจ่ายกระแส และแหล่งจ่ายแรงดัน
- ตัวตัดวงจร สวิตช์ตัดตอนต่างๆ
- ไดโอด ไทริสเตอร์ ทรานซิสเตอร์
- ฟังก์ชันควบคุมแบบอนาล็อก และแบบดิจิทัล
- เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ
- เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า
- ตัวควบคุมกระแสตรง และตัวควบคุมกระแสสลับ
- ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จุดเด่นของโปรแกรม คือ สามารถสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษาได้อย่างง่าย โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งใช้สร้างแบบจำลอง จำลองเหตุการณ์และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออื่นๆ ต่อไป ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับวิศวกรใช้ในการประยุกต์ใช้งาน ให้คำปรึกษา หรือวิจัยเพื่อการศึกษาในหลายๆแนวทาง ทั้งด้านการวางแผน การออกแบบ การตรวจสอบ การเรียนการสอน และการทำงานวิจัยขั้นสูงต่อไป

2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนแรงสูงและการแก้ปัญหาเฟอร์โรเรโซแนนซ์ด้วยวิธีต่างๆ โดยมีงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องหรือใช้หลักการใกล้เคียงกัน

Bernard C. Lesieutre, Jama A. Moharmed, Aleksander M. Stancovic [15] ได้วิจัยเรื่อง Analysis of Ferroresonance in Three-Phase Transformers นำเสนอเทคนิคในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ โดยหลักการสำคัญเป็นการเกี่ยวข้องกับ Nonlinear System Modeling ในขอบเขตของ Harmonic Variables จากการวิเคราะห์พบว่าโมเดลสามารถใช้งานได้เหมาะสม เนื่องจากเป็น Time Invariant Model และยังสามารถใช้ในการคำนวณ Steady State Behavior, Stability Analysis รวมทั้งการสร้าง Bifurcation Diagram ได้ อย่างง่ายดาย ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสมีความยากในการวิเคราะห์และซับซ้อนมากกว่าในหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว จึงเป็นแนวทางในการศึกษาเนื่องจากอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมีหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่เช่นกัน

Preecha Sakarung [16] ได้วิจัยเรื่อง Nonlinear Analysis of Ferroresonance in Power System ได้นำเสนอคุณลักษณะของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบจำหน่ายและสายส่ง โดยวิจัยการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในลักษณะ Single Phase Switching ในระบบ 3 เฟส การต่อหรือปลดหม้อแปลงไฟฟ้าและในกรณีไม่มีโหลด หรือ โหลดน้อยๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขโดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบภาคสนาม

Zia Emin BSc MSc PhD AMIEE, Yu Kwong Tong Ph MIEE [17] ได้วิจัยเรื่อง Ferroresonance Experience in UK : Simulations and Measurements ได้นำเสนอการคาดการณ์ล่วงหน้าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยใช้ Digital Computer Transient Analysis Program ได้แก่ EMTP/ATP ในกรณีศึกษาของอุปกรณ์ Voltage Transformer และ

Single Phase Traction Supply Transformers ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้มีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบและการปฏิบัติงานในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า จึงใช้เป็นแนวทางในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

David A. N. Jacobson [18] ได้วิจัยเรื่อง Examples of Ferroresonance in A High Voltage Power System นำเสนอตัวอย่างวงจรที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งผลกระทบของการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์มีความแตกต่างกันตั้งแต่ระบบรีเลย์หรือระบบควบคุมทำงานผิดปกติ ไปจนถึงอุปกรณ์ต่างๆ เกิดความเสียหายร้ายแรง การศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ทำให้ตระหนักถึงปัญหาและสามารถออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมก่อนการนำเข้าไปใช้งานจริง ผู้วิจัยได้นำวิธีการแก้ไขมาศึกษาและจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดสอบภาคสนาม

V. Valverde, A. J. MaZon, I. Zomora, G. Buigues [19] ได้วิจัยเรื่อง Ferroresonance in Voltage Transformer Analysis and Simulations ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์โดยใช้ซอฟต์แวร์โมเดลพบว่าในขณะที่หม้อแปลงเข้าใช้งานเป็นเหตุการณ์สำคัญที่เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้น และได้มีการวิเคราะห์ผลกระทบจากการทำสวิตช์ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าคาร์ปาชิตแตนซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้ามีแนวโน้มในการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ในช่วงการสวิตช์ซึ่งที่ 0 องศา ผู้วิจัยนำมาใช้เป็นแนวทางในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการสวิตช์ซึ่งที่ องศาต่างๆ เพื่อหาแนวทางการแก้ไข

2.8 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีของอุปกรณ์ไฟฟ้า การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ การเกิดค่าเก็บประจุแฝง และงานวิจัยข้างต้นที่เกี่ยวข้องและหลักการที่นำมาใช้ในการวิจัย ทำให้เกิดแนวทางการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ โดยทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น รวบรวมข้อมูลและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTP และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม เพื่อหาแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังจะมีขั้นตอนดำเนินการที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ส่วนนี้ กล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหา สมมติฐานในการวิเคราะห์สาเหตุการทำงานผิดปกติของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ โดยศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น วิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นนำวงจรไฟฟ้าที่ศึกษามาจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม และหาแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

3.1 การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น

3.1.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมจังหวัดระยอง

เป็นโครงการเร่งด่วนที่สำคัญโครงการหนึ่งเพื่อสนองความต้องการไฟฟ้าของประเทศที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมในภาคตะวันออกให้มีความมั่นคงยิ่งขึ้น โดยใช้ก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทย เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็น โรงไฟฟ้าแห่งแรก ที่ดำเนินธุรกิจในรูปแบบเอกชน ดังในภาพที่ 3.1



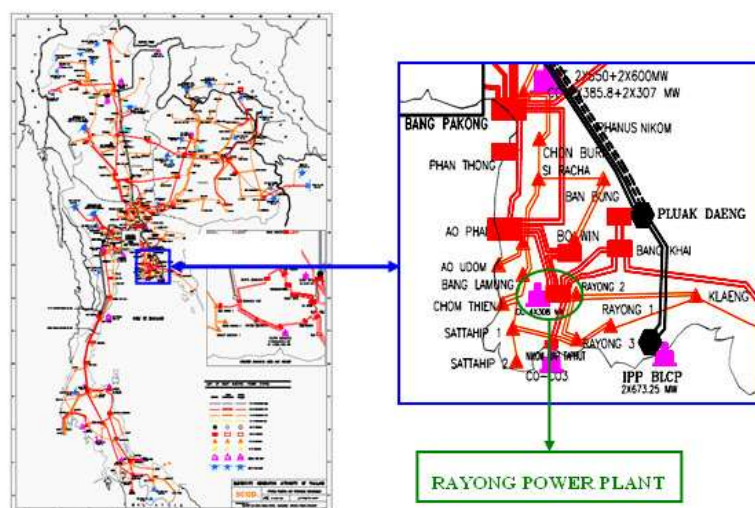
ภาพที่ 3.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมระยอง

รัฐบาลได้กำหนดโครงการพัฒนา พื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกโดยตั้งเป้าหมายให้เขต พื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง เป็นแหล่งพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งในขณะเดียวกันการเป็น แหล่งอุตสาหกรรม ย่อมต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มั่นคงในการดำเนินการ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จึงได้สนองนโยบายรัฐบาล ด้วยการจัดเตรียม แผนพัฒนาการผลิต และจ่ายไฟฟ้าในภาคตะวันออก เพื่อให้สามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ จะเพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ โดยเสนอ โครงการ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองชุดที่ 1-3 กำลังผลิต ชุดละ 308,000 กิโลวัตต์ เพิ่มเติมในแผนกำลังผลิตไฟฟ้าของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ ได้รับอนุมัติจากคณะรัฐมนตรี ให้ดำเนินการก่อสร้าง เมื่อวันที่ 14 มีนาคม 2532 ต่อมาในวันที่ 29 มกราคม 2534 จึงได้รับอนุมัติให้ดำเนินการก่อสร้างเพิ่มเติมอีกหนึ่งชุดคือ โครงการโรงไฟฟ้าพลัง ความร้อนร่วมระยองชุดที่ 4 กำลังผลิต 308,000 กิโลวัตต์

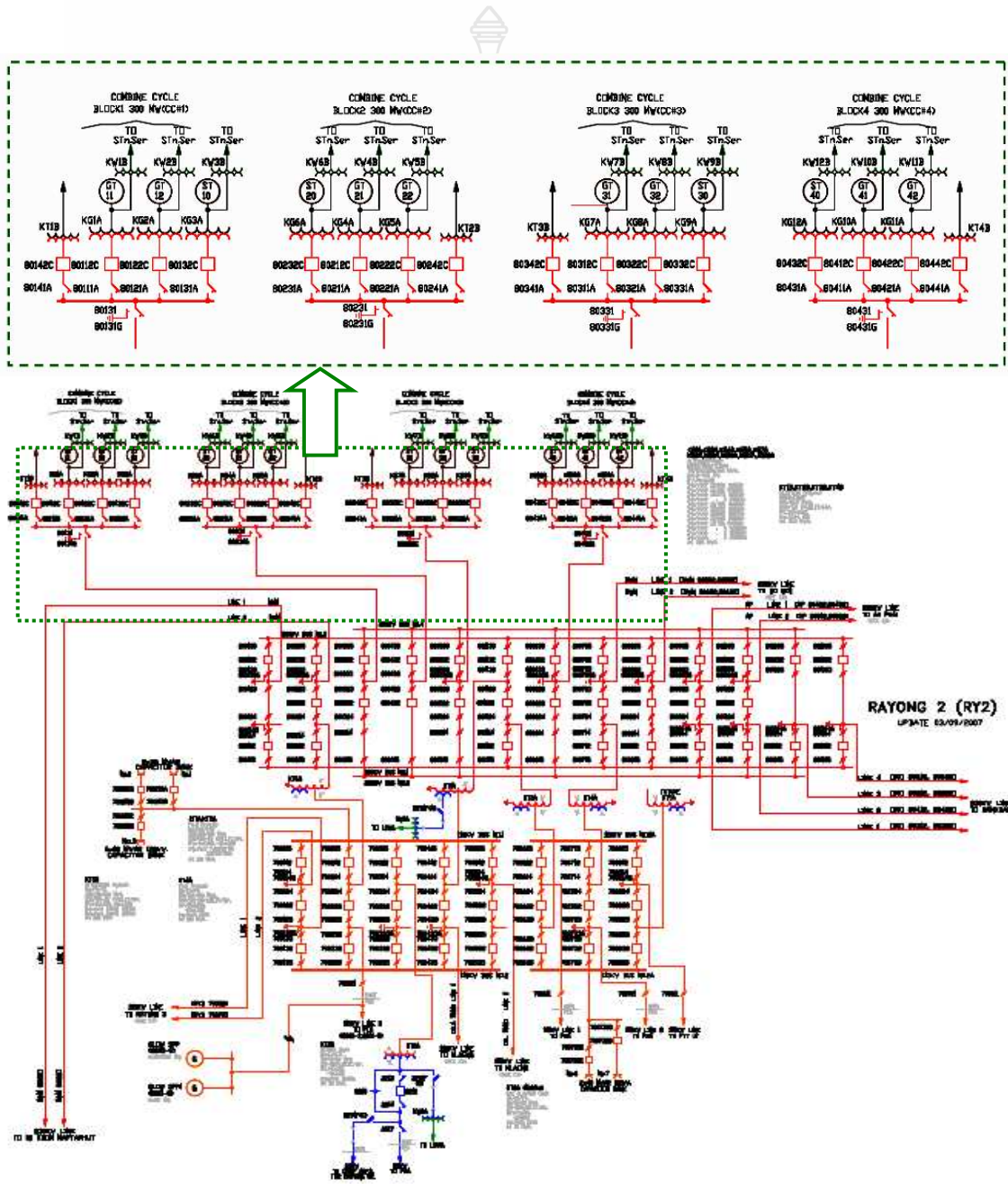
สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้านั้นคือ ก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทย โดยรับจากการ ปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) นำก๊าซส่งผ่านตามท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 นิ้ว มีความ ยาวจากโรงแยกก๊าซถึง โรงไฟฟ้า ประมาณ 4.5 กิโลเมตร และเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันแก๊ส แต่ละเครื่อง สามารถรับก๊าซธรรมชาติได้สูงสุดประมาณวันละ 29 ล้านลูกบาศก์ฟุต

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง ตั้งอยู่บนเนื้อที่ประมาณ 462 ไร่ อยู่ติดกับสถานี ไฟฟ้าแรงสูงระยอง 2 ตำบลห้วยโป่ง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ดังแสดงในแผนที่ ภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แผนที่ตั้งของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม 4 ชุด มีกำลังผลิตชุดละ 308,000 กิโลวัตต์ รวม 1,232,000 กิโลวัตต์ แต่ละชุดประกอบด้วย เครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันก๊าซ 2 เครื่อง กำลังผลิตเครื่องละ 103,000 กิโลวัตต์ และเครื่องผลิตไฟฟ้ากังหันไอน้ำขนาด 102,000 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดง Single Line Diagram ในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าแรงสูงระยอง 2

3.1.2 การนำระบบกลับคืนสู่สภาพปกติ (Blackout Restoration) [20]

Black-Out หมายถึงระบบไฟฟ้าที่มีเหตุผิดปกติเกิดขึ้นจนเป็นเหตุทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทั้งระบบก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน และต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศอย่างมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านธุรกิจอุตสาหกรรม ซึ่งเคยเกิดขึ้นกับประเทศไทยเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2521 ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการวางมาตรการ และจัดทำแผนป้องกัน เพื่อมิให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก จึงมีการทดสอบโรงไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นโรงไฟฟ้า Black Start ให้มีสภาพคล้ายเกิดเหตุการณ์จริงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อม ส่วนสาเหตุต่างๆ ที่จะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ Black-Out ได้มีดังต่อไปนี้

สาเหตุจากภัยธรรมชาติ เป็นสาเหตุที่ไม่สามารถหาทางป้องกันและแก้ไขได้ เพราะไม่ทราบว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไร ที่ไหน และในสถานะเช่นใด เช่นการเกิดพายุ น้ำท่วม และแผ่นดินไหวอย่างรุนแรง เป็นต้น

สาเหตุจากการก่อวินาศกรรม เป็นสาเหตุที่ไม่สามารถหาทางป้องกัน และแก้ไขได้เพราะไม่ทราบว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไร ที่ไหน และในสถานะเช่นใด เช่นการวางระเบิด การเผา และการยึดโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าแรงสูงและศูนย์ควบคุมที่สำคัญๆ เป็นต้น

สาเหตุจากการขาดแคลนเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าในประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นปริมาณมากกว่า 70% ของกำลังผลิตทั้งหมด ซึ่งถ้าแหล่งผลิตไฟฟ้ามีปัญหาอย่างกะทันหันก็จะส่งผลกระทบต่อได้เช่นกัน

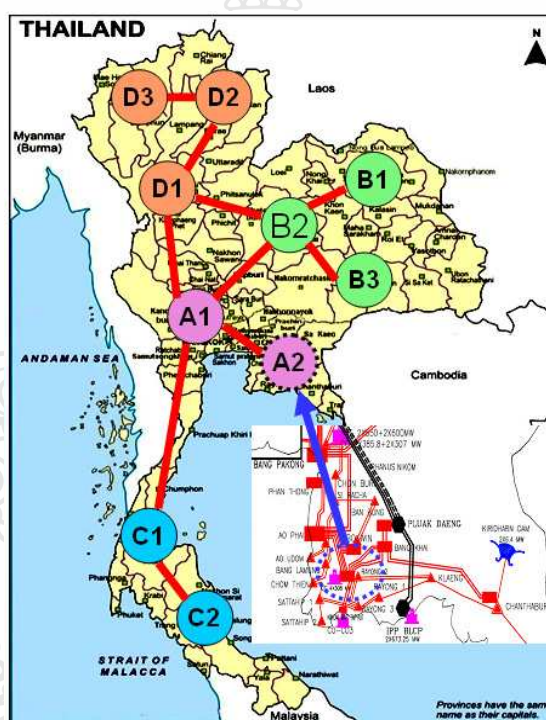
สาเหตุจากการไม่มีระบบป้องกันเมื่อความถี่ต่ำลง โรงไฟฟ้าแต่ละโรงได้ถูกออกแบบมาสำหรับใช้งานภายใต้ขอบเขตที่จำกัด โดยเฉพาะทางด้านความถี่ไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญต่ออุปกรณ์ที่เรียกว่า Turbine Blade ชีตความสามารถของ Turbine Blade ขึ้นอยู่กับ Speed และ Speed ของ Turbine ขึ้นกับความถี่ เมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้าต่ำกว่าที่กำหนดโรงไฟฟ้านั้นก็จะถูกปลดออกจากระบบไป ส่งผลให้ความถี่ของระบบมีค่าต่ำลงไปอีก ซึ่งจะทำให้โรงไฟฟ้าอื่นๆ ถูกปลดตามไป

สาเหตุจากโรงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่หลายๆ และเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ณ จุดเดียวกัน หากมีเหตุผิดปกติขึ้นที่ ณ จุดจ่ายนั้นจะส่งผลให้โรงไฟฟ้าดังกล่าวนั้นหลุดออกจากระบบได้ และจะมีผลกระทบต่อระบบอย่างรุนแรง เนื่องจากระบบขาดแคลนกำลังผลิตเป็นจำนวนมาก

เนื่องจากโรงไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่ Black Start มีอยู่หลายแห่งกระจายทั่วประเทศ จึงมีการแบ่งพื้นที่ทั้งหมดในการทำ Black Start ออกเป็นหลายๆ ส่วน ซึ่งหลังจากการทำ Black Start ได้แล้วจะได้ระบบไฟฟ้าย่อยหลายๆ ระบบ เพื่อรอการเชื่อมโยงเข้าหากัน โดยโรงไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่ Black Start ได้นั้นจะต้องเป็นโรงไฟฟ้าที่มี Emergency Diesel Generator ติดตั้งไว้ ซึ่งพื้นที่

ส่วนภาคตะวันออก (A2) ดังภาพที่ 3.4 กำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง เป็น โรงไฟฟ้า Black Start ตามแผนการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั่วประเทศ ประจำปี พ.ศ. 2546 จัดทำโดยคณะทำงาน Restoration โดยให้โรงไฟฟ้าระยองทำหน้าที่ทยอยจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ในพื้นที่ภาคตะวันออกพร้อมทั้งจ่ายไฟฟ้าให้กับโรงไฟฟ้าบ่อวิน (IPP) และโรงไฟฟ้า IPT (IPP) โดยกำหนดจุดเชื่อมโยงไว้ที่สถานีไฟฟ้าย่อยอ่าวไผ่ (เชื่อมโยงกับพื้นที่ A1)

เมื่อพื้นที่ย่อยแต่ละส่วนสามารถทำการ Black Start ขึ้นมาได้ และสามารถจ่าย Load ได้เป็นปกติในปริมาณ 20-30% ของปริมาณผู้ใช้ไฟฟ้าปกติ ในขั้นตอนต่อไปก็จะเชื่อมโยงระบบย่อยเหล่านั้นเข้าหากันดังภาพที่ 3.4 แสดงพื้นที่ต่างๆของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย โดยพื้นที่แต่ละส่วนจะเชื่อมโยงกันที่สถานีไฟฟ้าย่อยแรงดันสูง 230 kV ซึ่งเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีความมั่นคง

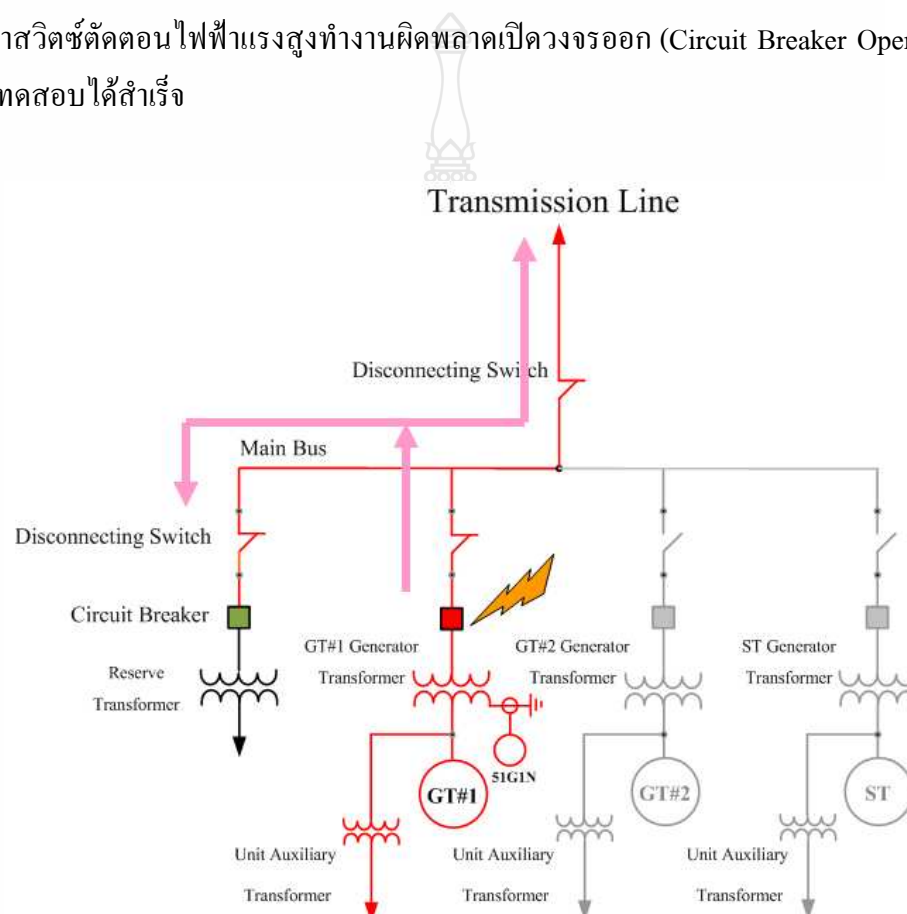


ภาพที่ 3.4 พื้นที่ที่โรงไฟฟ้าต้องทำหน้าที่เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบ [20]

การทดสอบการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ เป็นการจำลองเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบเกิดขึ้น โรงไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่ที่รับผิดชอบจะต้องทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายโหลดให้กลับคืนสู่สภาวะปกติ โดยทำการขนานเข้ากับระบบหลักที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง และเพื่อเป็นการทบทวนขั้นตอนและประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

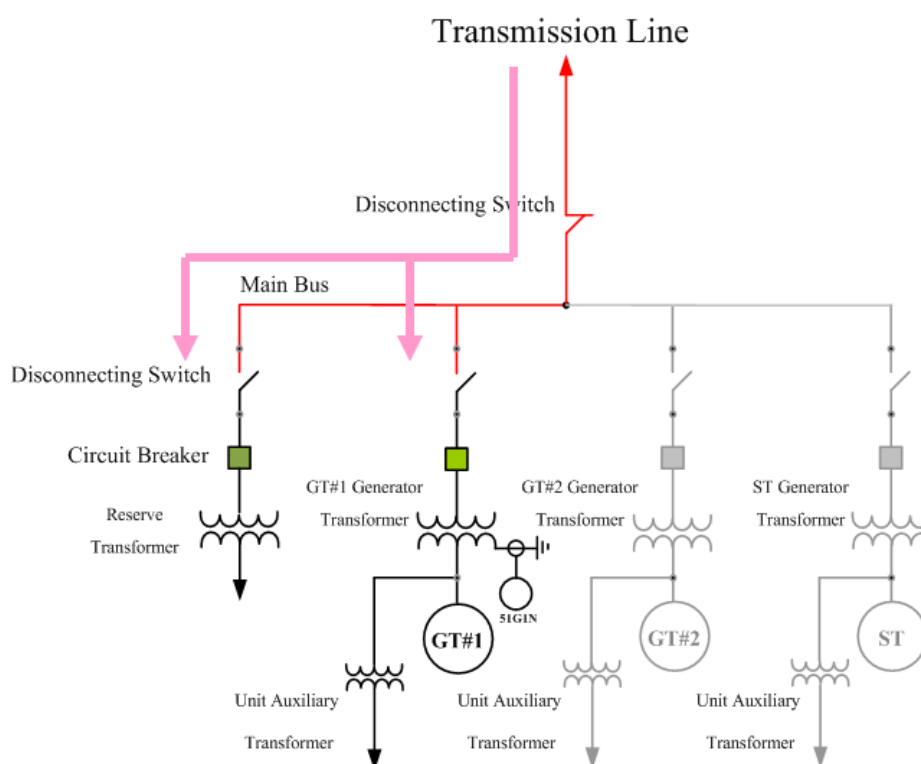
3.1.3 ปัญหาโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมระยอง

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมระยอง ได้มีการจำลองเหตุการณ์นำระบบกลับคืนสู่สภาพปกติ ตามแผนพิเศษของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งระหว่างการทดสอบได้พบปัญหา คือ เมื่อเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัว เพื่อจ่ายไฟขณะ No Load ไปยังสายส่ง 230 kV ดังในภาพที่ 3.5 ปรากฏว่าสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงทำงานผิดพลาดเปิดวงจรออก (Circuit Breaker Open) ทำให้ไม่สามารถทดสอบได้สำเร็จ



ภาพที่ 3.5 Single Line Diagram ขณะทดสอบ Blackout Restoration

จากการตรวจสอบในเบื้องต้นพบรีเลย์ แบบป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน (51GIN) ทำงานสั่งปลดสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงออก และพบว่าขณะทดสอบมีเสียงผิดปกติที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า (Reserve Auxiliary Transformers) ดังนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาสาเหตุเบื้องต้นของปัญหาดังกล่าว โดยให้ปิดวงจรไบมีด (Open Disconnecting Switch) ไว้แล้วทำการจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกย้อนกลับมาที่ บัส 230 kV ดังในภาพที่ 3.6 ปรากฏว่าไม่พบความผิดปกติ จึงคาดว่าปัญหาอาจเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้า



ภาพที่ 3.6 Single Line Diagram ขณะทำการจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกย้อนกลับมาที่บัส 230 kV

3.2 การวิเคราะห์หาสาเหตุเบื้องต้น

จากปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแยกเป็นวงจร และอุปกรณ์ไฟฟ้าดังภาพที่ 3.7 เพื่อรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในเบื้องต้น สาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินทำงานสั่ง สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงเปิดวงจรออกนั้นอาจมาจากหลายสาเหตุด้วยกันคือ

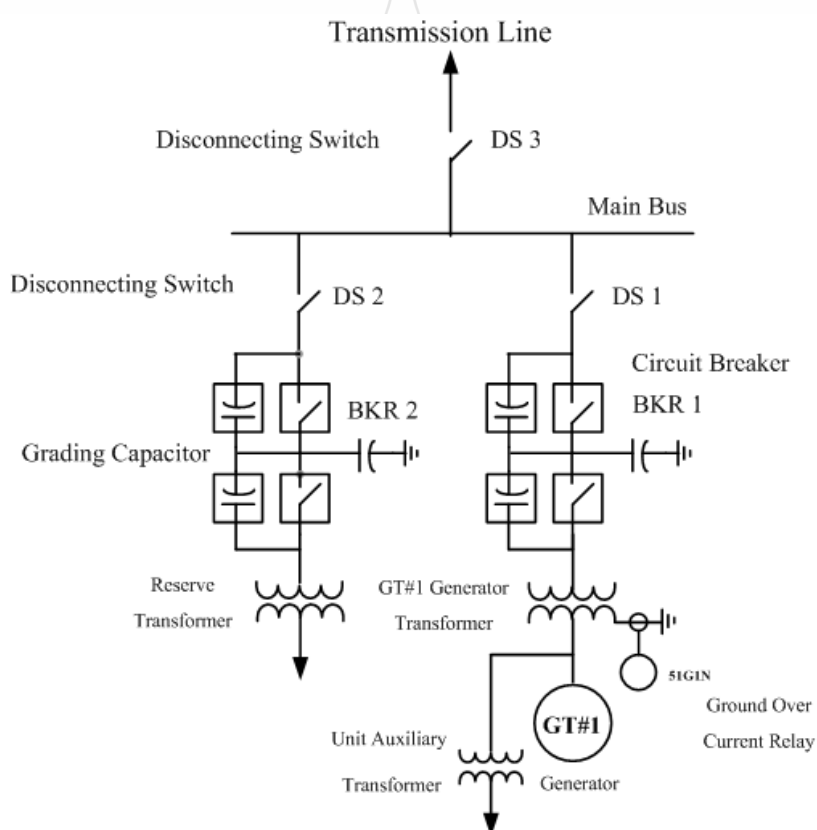
3.2.1 รีเลย์ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดิน (51GIN) ทำงานผิดพลาด อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในตัวรีเลย์ และไม่สามารถ Block 2nd Harmonic ได้ ตรวจสอบโดยการทดสอบภาคสนาม

3.2.2 เกิดความผิดปกติที่ฉนวนไฟฟ้าของหม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Transformer) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลลง Ground ตรวจสอบโดยการทดสอบภาคสนาม

3.2.3 เกิด Inrush Current ที่หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Transformer) ทำให้เกิดกระแสสูงตรวจสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2.4 เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonance) ที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า (Reserve Auxiliary Transformer) ทำให้เกิดแรงดัน และกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงเกิน ตรวจสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2.5 การเกิดค่าเก็บประจุแฝงของระบบสายส่งในกรณีไม่มีโหลดทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูง ตรวจสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.7 Single Line Diagram กรณีศึกษา

3.3 การรวบรวมข้อมูล/พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) Turbine Generator “GEC ALSTHOM” Type T229-320, Rated Speed 3000 rpm, Over Speed 3600 rpm, Active Power 101.37 MW, Power Factor 0.87, Apparent Power 119.26 MVA, Rated Voltage 11.5 kV, Voltage Variation 5 %, Rated Current 5,987 A, Number of Pole 2 Frequency 50 Hz, Resistance 1.12 m Ω , Impedance 0.31 Ω , Capacitance 0.42 μ F ดังแสดงภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรงไฟฟ้าระยอง

3.3.2 หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Transformer) Oil Transformer “GEC ALSTHOM” Rated 125,000 kVA, Voltage 241,500 / 11,500 V, Vector Group YNd1, Impedance 15.60 %, Frequency 50 Hz ดังแสดงภาพของหม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.3.3 หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า (Reserve Transformer) Oil Transformer “GEC ALSTHOM” Rated 12.5 kVA, Voltage 230 / 7.2 kV, Vector Group YNyn0, Impedance 10 %, Type TTHRv, Frequency 50 Hz ดังแสดงภาพของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้าในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ภาพของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

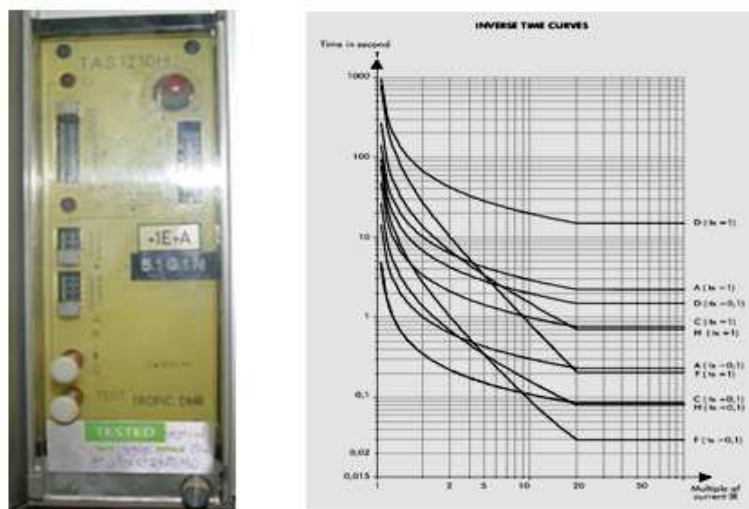
3.3.4 สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Circuit Breaker) SF₆ Circuit Breaker “MERLIN GERIN” Type FA2, Rated Voltage 245 kV, Normal Current 2000 A, Frequency 50 Hz, Insulation Level 425 kV, Impulse 900 kV, Grading Capacitor 2500 pF ดังแสดงภาพของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ภาพของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง

3.3.5 อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Ground over current relay) Ground Over current Relay (51G1N) Type TAS1210H “ALSTOM” Setting $I > = 1.2 \text{ A}$, $t_x = 0.3$ ลักษณะการทำงาน

ตรวจจับกระแสที่ Neutral ของ Transformer ในลักษณะ $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ เวลาในการทำงานเป็นแบบ Inverse Time ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 Ground Over Current Relay และ Time Curves [9]

3.3.6 พารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 230 kV ที่ส่งจากโรงไฟฟ้าระยองไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ เช่น สถานีไฟฟ้าแรงสูงอ่าวไผ่ (AP-B) สถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านค่าย (BKI) และสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่อวิน (BWN) ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 230 kV

From Bus Name	To Bus Name	Id	Line R (pu)	Line X (pu)	Charging (pu)	Rated MVA	Length	ชนิดของสาย
RY2-12 230.00	AP-B 230.00	1	0.005072	0.037799	0.07729	429	51.795	1272 MCM ASCR
RY2-12 230.00	AP-B 230.00	2	0.005072	0.037799	0.07729	429	51.795	1272 MCM ASCR
RY2-12 230.00	BKI 230.00	4	0.00064	0.00703	0.02733	858.9	13.02	2x1272 MCM ASCR
RY2-34 230.00	BKI 230.00	1	0.00064	0.00703	0.02733	858.9	13.02	2x1273 MCM ASCR
RY2-34 230.00	BKI 230.00	2	0.00064	0.00703	0.02733	858.9	13.02	2x1274 MCM ASCR
RY2-34 230.00	BKI 230.00	3	0.00064	0.00702	0.02733	858.9	13.02	2x1275 MCM ASCR
RY2-34 230.00	BWN 230.00	1	0.00437	0.03354	0.06841	429	44.651	1272 MCM ASCR
RY2-34 230.00	BWN 230.00	2	0.00437	0.03354	0.06841	429	44.651	1272 MCM ASCR

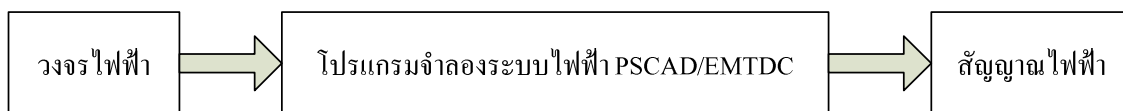
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการนำวงจรไฟฟ้าที่เป็นกรณีศึกษามา และผลจากการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง มาจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และการทดสอบภาคสนามโดยสมมติฐานจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และการวิเคราะห์เบื้องต้น แล้วนำสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้มาวิเคราะห์หาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขมีขั้นตอนดังนี้

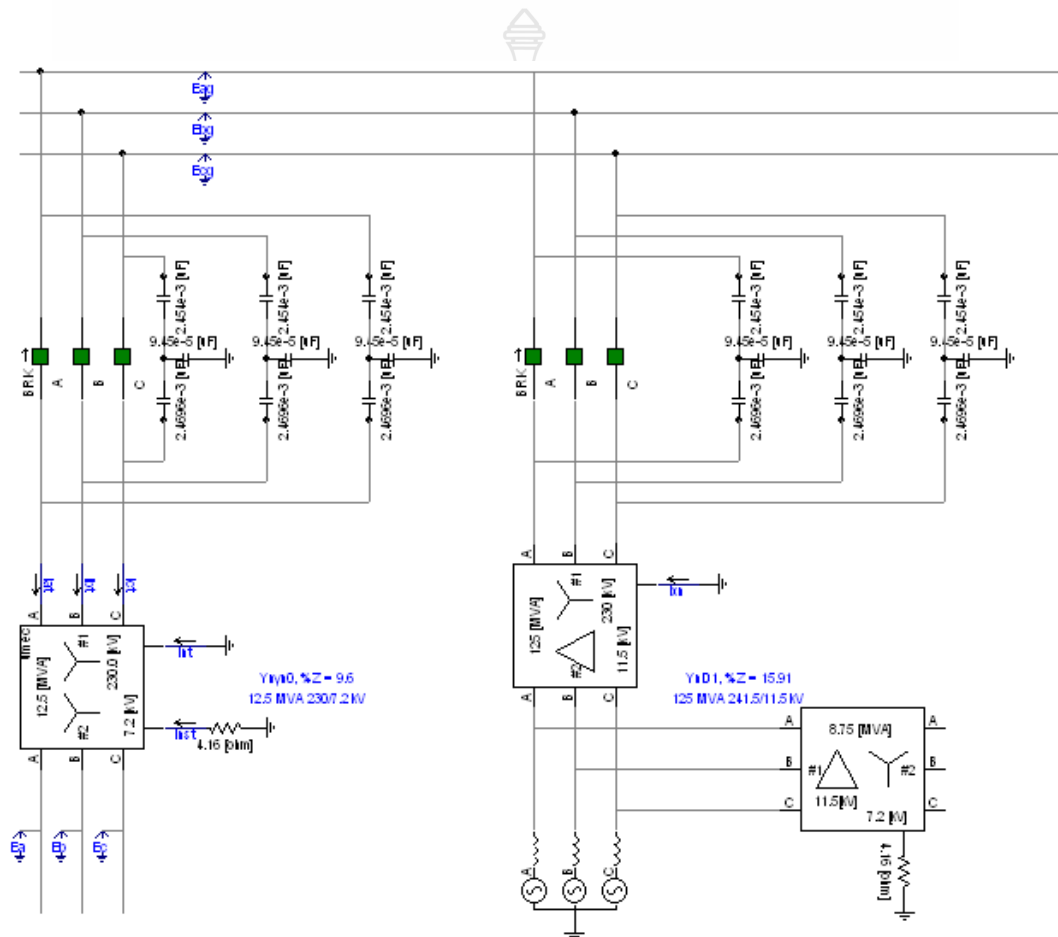
- 1) การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC
 - 1.1) การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current
 - 1.2) การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Ferroresonance
 - 1.3) การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิดค่าเก็บประจุแฝง
- 2) การทดสอบภาคสนาม
 - 2.1) การทดสอบการทำงานของรีเลย์ ป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลลงดิน
 - 2.2) การทดสอบค่าความเป็นฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า
 - 2.3) การทดสอบวัดสัญญาณไฟฟ้าจากการจำลองเหตุการณ์จริง
- 3) การเปรียบเทียบผลการจำลองระบบไฟฟ้าและผลการทดสอบภาคสนาม
 - 3.1) เปรียบเทียบผลของกระแสไฟฟ้า
 - 3.2) เปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้า
- 4) การหาแนวทางการแก้ไขโดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม
 - 4.1) การต่อตัวต้านทานที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง RAT
 - 4.2) การเปลี่ยนค่าเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า
 - 4.3) การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง
 - 4.4) การต่อ Shunt Reactor ที่ระบบ
 - 4.5) การเปลี่ยนขนาดของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า
 - 4.6) การ Closed BKR 2, DS 2, ก่อน Closed BKR 1 และเพิ่มโหลด

3.4.1 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

นำข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง และวงจรที่ศึกษามาจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTP และบันทึกสัญญาณที่ได้ ดัง Block Diagram ดังภาพที่ 3.13 ซึ่งจะได้โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการทดสอบ Blackout Restoration ดังในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.13 Block Diagram การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า



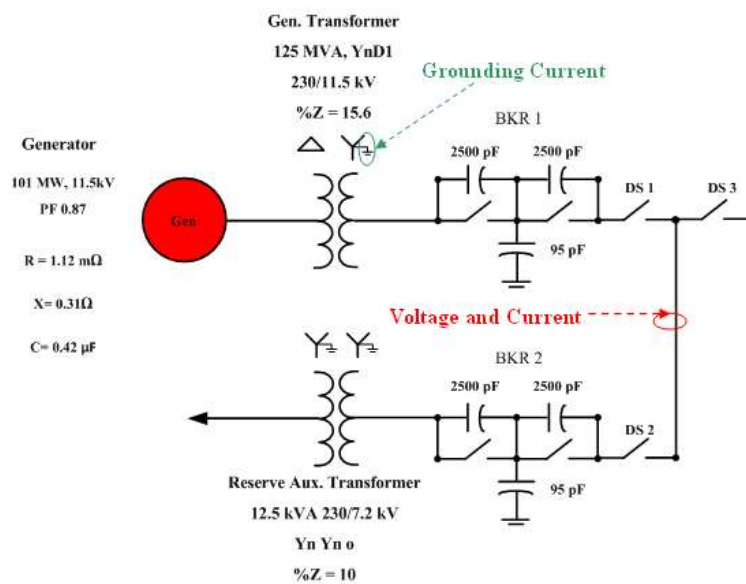
ภาพที่ 3.14 โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า PSCAD/EMTDC จากวงจรศึกษา

3.4.1.1 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current

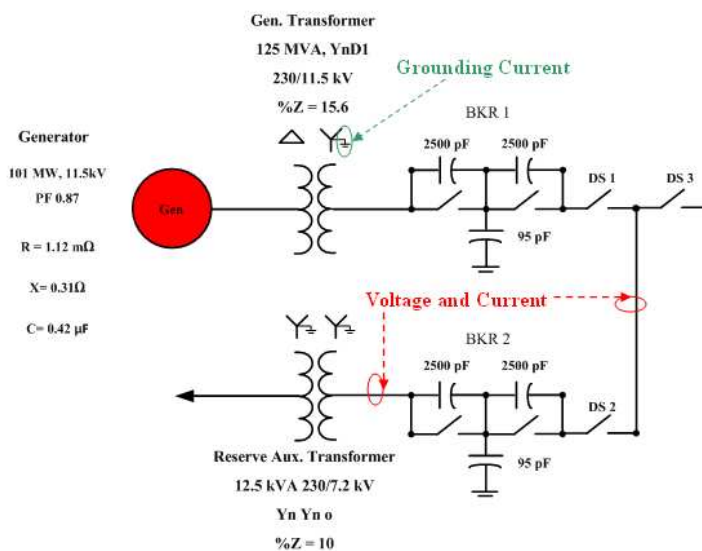
เป็นการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-Load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer ดังในภาพที่ 3.15 โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, DS 3 (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- สั่งปิดวงจร BKR 1 ที่ อองศาทางไฟฟ้าต่างๆ
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้



ภาพที่ 3.15 วงจรระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current



ภาพที่ 3.16 วงจรระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Ferroresonance

3.4.1.2 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Ferroresonance

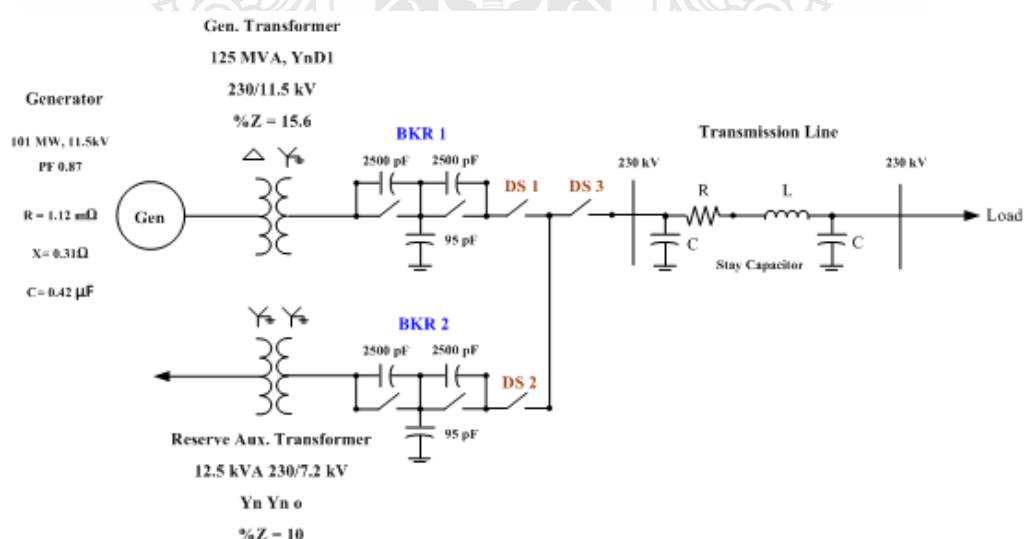
ทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-Load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer ดังในภาพที่ 3.16 โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, DS 3 (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1 ที่ องค์กรทางไฟฟ้าต่างๆ
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้

3.4.1.3 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิดค่าเก็บประจุแฝง

ทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-Load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer แต่จะมีพารามิเตอร์ของสายส่งเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังในภาพที่ 3.17 โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้



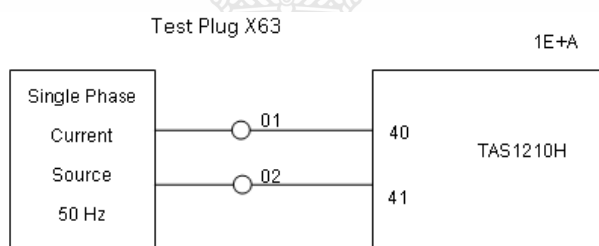
ภาพที่ 3.17 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิดค่าเก็บประจุแฝง

3.4.2 การทดสอบภาคสนาม

เพื่อเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุจากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงต้องให้มีการทดสอบการนำระบบ กลับคืนสู่สภาวะปกติอีกครั้ง ซึ่งจะต้องติดต่อบริษัทงานกับทางโรงไฟฟ้าและศูนย์ควบคุม ซึ่ง จะต้องทำการทดสอบค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมีค่า อยู่ในเกณฑ์ปกติ และในการทดสอบจะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ที่ กำหนดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากจำลองระบบไฟฟ้า

3.4.2.1 การทดสอบการทำงานของรีเลย์ ป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลลงดิน

การทดสอบค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน (Grounding Over Current Relay) 51G1N เป็น Relay ที่ใช้ป้องกัน Transformer Ground ที่ใช้ Time Over Current เป็นตัวป้องกัน โดยมีวงจรการทดสอบดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) Operating Time Test at 50 Hz, 100 Hz, และ 150 Hz
 - 1.1) Inject Current 200% = 2.4 A & 400% = 4.8 A. เข้า ที่ Test Plug X63
 - 1.2) Detect Signal Output Timer ที่ Test Plug X70 No. 03 - 04
 - 1.3) บันทึกผลตามตาราง Data Test Report

Setting ที่ใช้งาน

$$I_D = 1.2 \text{ A.}$$

$$t_x = 0.3 \text{ (Curve H)}$$

การคำนวณหา Time

$$T = \frac{tx13.5}{\left(\frac{I}{IR}\right)^{-1}} + 10ms$$

Test 200%

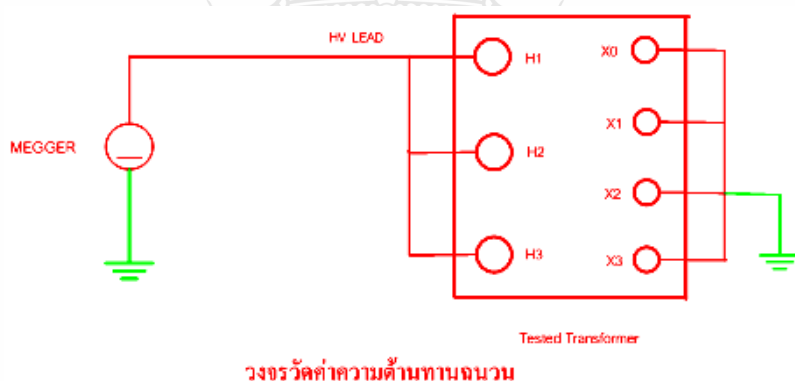
$$T = \frac{0.3 \times 13.5}{\left(\frac{2.4}{1.2}\right) - 1} + 10ms = 4.06Sec$$

Test 400%

$$T = \frac{0.3 \times 13.5}{\left(\frac{4.8}{1.2}\right) - 1} + 10ms = 2.035 Sec$$

3.4.2.2 การทดสอบค่าความเป็นฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นการวัดค่าความต้านทานฉนวนกระแสตรงขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Winding Insulation Resistance Measurement) โดยให้ลัดวงจรของขดลวดในแต่ละชุดของหม้อแปลงเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะให้แรงดันทดสอบมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟสดังแสดงวงจรทดสอบในภาพที่ 3.19



วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน

ภาพที่ 3.19 วงจรทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

- 1) ค่าแรงดันสำหรับทดสอบ กำหนดไว้ดังนี้
 - 1.1) ถ้าขดลวดทดสอบมีแรงดันพิกัดตั้งแต่ 3,300 V ขึ้นไป ให้ทดสอบด้วยแรงดัน 2,500 Vdc. เป็นเวลา 10 นาที และคำนวณค่า PI (Polarization index)
 - 1.2) ถ้าขดลวดทดสอบมีแรงดันพิกัดน้อยกว่า 3,300 V ลงมา ให้ทดสอบด้วยแรงดัน 500 Vdc. เป็นเวลา 1 นาที
- 2) บันทึกค่าอุณหภูมิของขดลวด อากาศ และความชื้นสัมพัทธ์
- 3) ค่าความต้านทานฉนวนต่ำสุดที่ยอมรับได้ คำนวณจากสูตร

$$R_{Min} = \frac{CE}{\sqrt{kVA}} \quad (3.1)$$

- เมื่อ R = ค่าความต้านทานฉนวนที่อุณหภูมิ 20 °C ของขดลวด (MΩ)
 C = 0.8 สำหรับหม้อแปลงบรรจุน้ำมัน
 C = 16.0 สำหรับหม้อแปลง Dry type, Compound filled หรือหม้อแปลงน้ำมันซึ่งยังไม่ได้บรรจุน้ำมัน
 E = แรงดันพิกัดของขดลวด (Volts)
 - ใช้ค่า Line to neutral สำหรับหม้อแปลงที่ต่อแบบ Star
 - ใช้ค่า Line to line สำหรับหม้อแปลงที่ต่อแบบ Delta
 kVA = กำลังพิกัดของหม้อแปลง (kVA)
 PI คือ อัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาที่ที่ 10 ต่อ นาที่ที่ 1

ค่า PI สำหรับตัดสินสภาพของหม้อแปลง พิจารณาได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การตัดสินสภาพฉนวนของหม้อแปลง โดยพิจารณาจากค่า PI

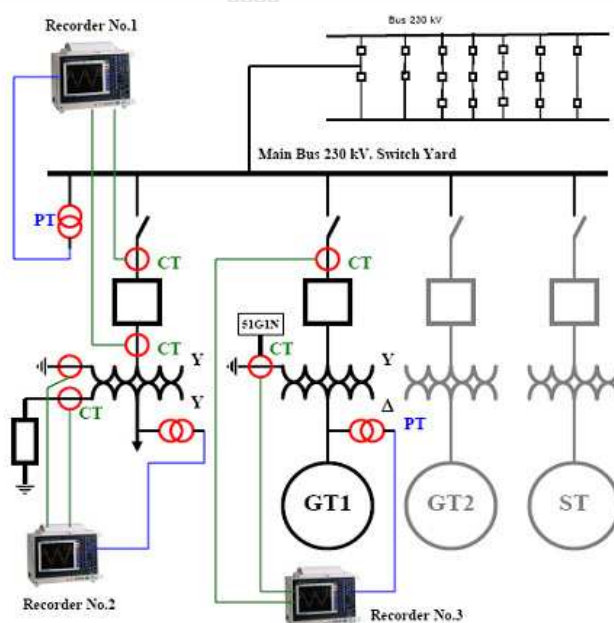
สภาพ	PI
อันตราย	น้อยกว่า 1.0
เลว	1.0 - 1.1
น่าสงสัย	1.1 - 1.25
พอใช้	1.25 - 2.0
ดี	มากกว่า 2.0

3.4.2.3 การทดสอบวัดสัญญาณ ไฟฟ้าจากการจำลองเหตุการณ์จริง

เพื่อเป็นการค้นหาสาเหตุที่เกิดขึ้นจึงต้องมีการทดสอบโดยจำลองเหตุการณ์ให้เหมือนกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง แล้วติดตั้งเครื่องจับสัญญาณเพื่อนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3.20 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลที่จำลองได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ทำการหยุดการเดินเครื่องทั้ง Block แล้วทำการเปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 เพื่อทดสอบ Ferroresonance ที่ หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

- 2) เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัว แล้วทำการเปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 เพื่อทดสอบการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง
- 3) จ่ายไฟจากโรงไฟฟ้าผ่านสายส่งไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยขณะที่ทำการเปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง (Open BKR 2)
- 4) จ่ายไฟจากโรงไฟฟ้าผ่านสายส่งไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยขณะที่ทำการปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง (Close BKR 2)



ภาพที่ 3.20 จุดติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า

3.4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองระบบไฟฟ้าและผลการทดสอบภาคสนาม

เป็นการตรวจสอบผลการจำลองระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบภาคสนามเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และใช้เป็นข้อมูลในการหาแนวทางการแก้ไข

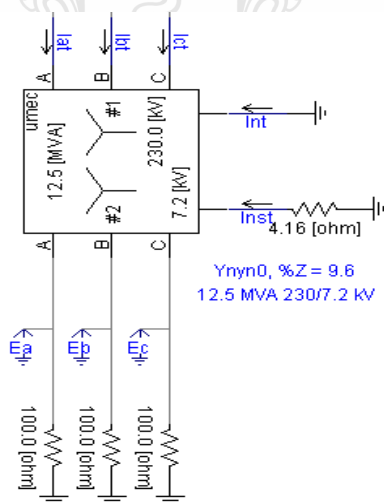
- 1) เปรียบเทียบผลของกระแสไฟฟ้า
- 2) เปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้า

3.4.4 การหาแนวทางการแก้ไขโดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม

นำผลที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบภาคสนามมาศึกษาและทำการทดลองปรับปรุงพารามิเตอร์ของวงจร ปรับปรุงขั้นตอนการทดสอบการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ แล้ววิเคราะห์ผลที่ได้ เพื่อใช้ในการหาแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติโดยมีการทดลองดังนี้

3.4.4.1 การต่อตัวต้านทานที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆ ดังในภาพที่ 3.21 แล้วทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และมีพารามิเตอร์ของสายส่ง โดยที่

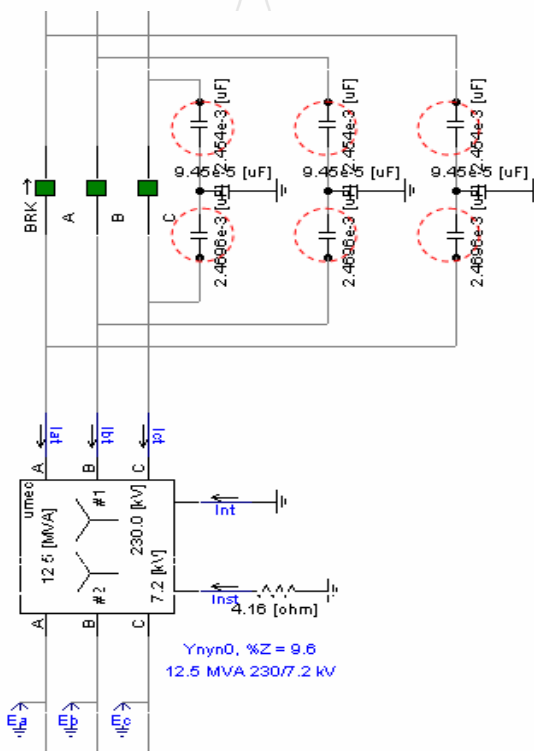
- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- ตั้งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ตั้งปิดวงจร BKR 1
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้



ภาพที่ 3.21 การทดลองต่อตัวต้านทานที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

3.4.4.2 การเปลี่ยนค่าเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 ดังในภาพที่ 3.22 แล้วทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และมีพารามิเตอร์ของสายส่ง โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้



ภาพที่ 3.22 การทดลองเปลี่ยนค่าเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า

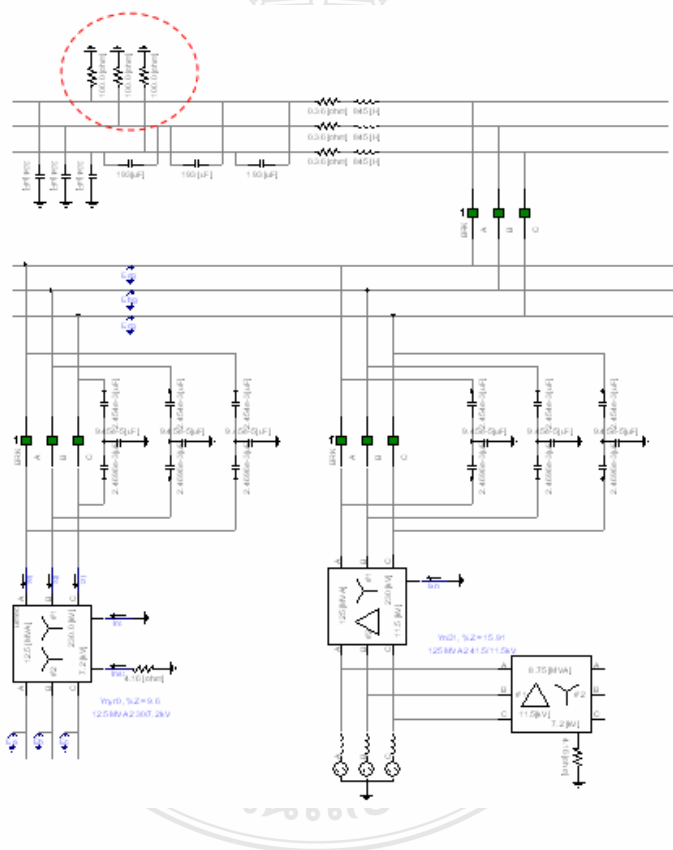
3.4.4.3 การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No - load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในกรณีจ่ายไฟฟ้าผ่านสถานีไฟฟ้าแรงสูงอื่นๆ โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1

- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้

3.4.4.4 การต่อ Shunt Reactor ที่ระบบดังในภาพที่ 3.23 ทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และมีพารามิเตอร์ของสายส่ง โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้



ภาพที่ 3.23 การทดลอง Shunt Reactor ที่ระบบ

3.4.4.5 การเปลี่ยนขนาดของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าแบบไม่รับภาระ (No-load) ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และมีพารามิเตอร์ของสายส่ง โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 (Closed)
- ให้เปิดวงจร BKR 2, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้

3.4.4.6 การปรับขึ้นตอนโดย Closed BKR 2, DS 2, ก่อน Closed BKR 1 ทำการจำลองเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้า ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า Generator Transformer และเพิ่มโหลด โดยที่

- ให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, BKR 2 (Closed)
- ให้เปิดวงจร DS 3, (Open)
- สั่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สั่งปิดวงจร BKR 1
- จ่ายโหลดขนาด 1-2 MW
- ให้ปิดวงจร DS 3, (Closed)
- บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้

3.5 สรุป

ในบทวิทยานิพนธ์นี้ กล่าวถึงการเกิดปัญหาของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมระยอง ในระหว่างการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ พร้อมทั้งกล่าวถึงการวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้น ในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และการทดสอบภาคสนาม ซึ่งจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูล และพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟให้โรงไฟฟ้า สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน และค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ทำการทดสอบตามสมมติฐาน และการหาแนวทางการแก้ไข ซึ่งผลการทดสอบ ดังนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

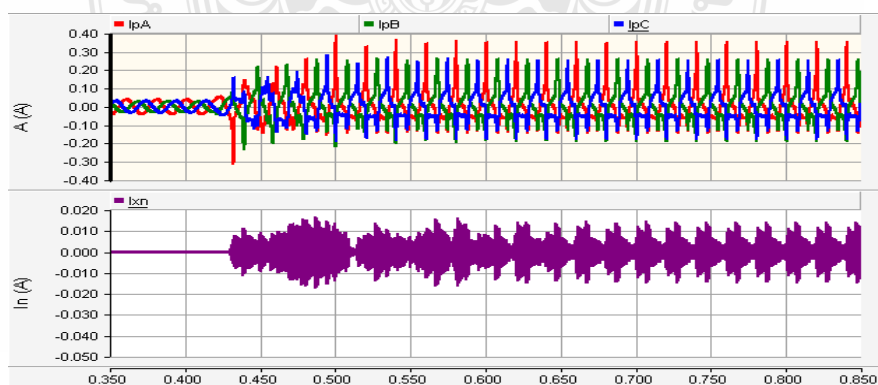
วิทยานิพนธ์ส่วนนี้ กล่าวถึงผลการทดสอบตามวิธีการในบทที่ผ่านมา ซึ่งผู้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ได้ทดสอบเบื้องต้นในบทที่ 3 ซึ่งเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ดังนั้นบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบ ตามวิธีการแก้ปัญหาในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง โดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และการทดสอบภาคสนาม ซึ่งแต่ละวิธีมีผลการทดสอบ ผู้ทำวิทยานิพนธ์จะกล่าวไว้ในเนื้อหาของผลการทดสอบ

4.1 ผลการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

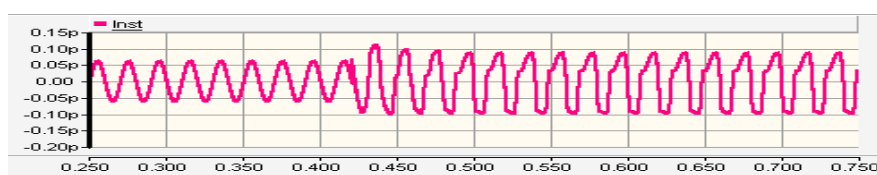
4.1.1 ผลการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current



ภาพที่ 4.1 แรงดันที่ Main Bus 230 kV



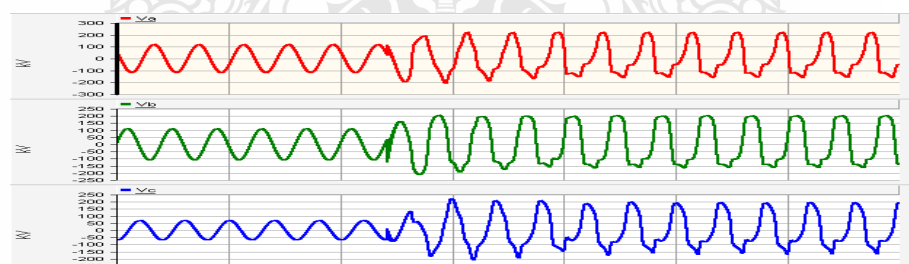
ภาพที่ 4.2 ผลการจำลอง กระแสเฟส Ia, Ib, Ic, และ In ของ Gen Transformer



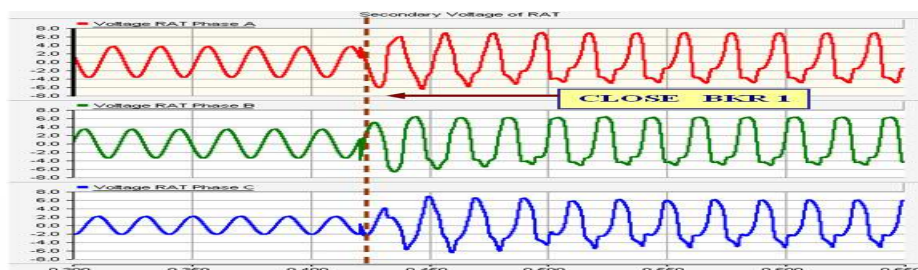
ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองกระแสเฟส In ด้าน Secondary ของ RAT

จากผลการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Inrush Current ผลปรากฏว่าสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่จำลองได้แต่ละจุดดังภาพที่ 4.2-4.4 มีค่าที่ต่ำมาก และจากสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus มีแรงดันไฟฟ้าปรากฏขึ้นที่ประมาณ 90 kV และไม่สมดุลกัน ดังภาพที่ 4.1 แต่เมื่อ Closed Circuit Breaker พบว่ามีค่าปกติ และเมื่อทำการจำลองระบบไฟฟ้าโดยการสั่งปิดวงจร BKR 1 ที่ อังสาทางไฟฟ้าต่างๆ ผลปรากฏว่าไม่พบการเกิด Inrush Current ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อตรงกับหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเหมือนกับเป็นการค่อยๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำแรงดันไฟฟ้าจนถึงแรงดันพิกัดแล้ว จึงสั่ง Closed Breaker ซึ่งเป็นการลด Transient Magnetizing Inrush Current ที่ไหลจาก Source ไปยังขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1.2 ผลการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิด Ferroresonance

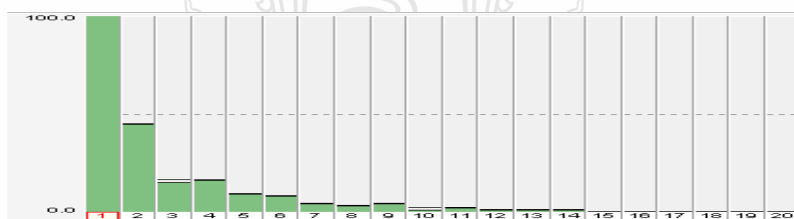


ภาพที่ 4.4 แรงดันด้าน 230 kV ของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า (RAT)

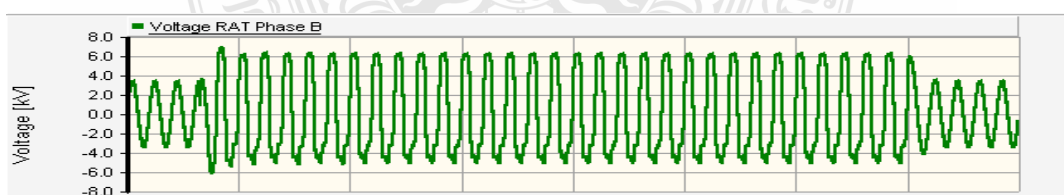


ภาพที่ 4.5 แรงดันด้าน 6.9 kV ของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.5, 4.6 เป็นการแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าทางด้าน 230 kV และทางด้าน 6.9 kV จะมีรูปแบบของสัญญาณที่เหมือนกันแต่จะแตกต่างกันที่ขนาด และเมื่อทำการปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 จะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้น ทำให้เกิดแรงดันสูงเกิน (Over Voltage) และมีรูปแบบที่ไม่เป็นสัญญาณ Sinusoidal เนื่องจากมีฮาร์โมนิก (Harmonic) อันดับอื่นเช่น อันดับที่ 2, 3, 4, 5, และ 6 ปนเปื้อนอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และสัญญาณจะไม่เปลี่ยนรูปแบบเมื่อเวลาผ่านไป ดังในรูปที่ 4.8



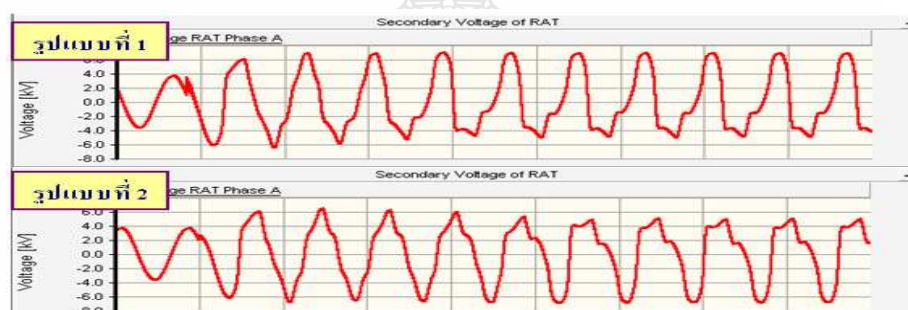
ภาพที่ 4.6 Harmonic ขณะเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์



ภาพที่ 4.7 แรงดันด้าน 6.9 kV ของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

ผลการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยการสับ/ปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุม 0-360 องศาทางไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นดังแสดงใน

ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 และแสดงให้เห็นว่าเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้นที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้าเนื่องจากการต่ออนุกรมกับค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน และเกิดแรงดันสูงเกิน (Over Voltage) ที่ประมาณ 1.5 เท่าของ Rated Voltage และไม่ว่าจะสับ/ปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุมใดๆ ก็เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ขึ้นทุกครั้งซึ่งจะแตกต่างกันที่รูปแบบของสัญญาณ จากผลการจำลองค้นพบว่าสัญญาณของปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 จะเกิดจากการสับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุมระหว่าง 18 – 180 องศาทางไฟฟ้า และรูปแบบที่ 2 จะเกิดจากการสับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุมระหว่าง 198 – 360 องศาทางไฟฟ้า ดังในภาพที่ 4.9

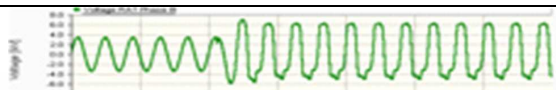


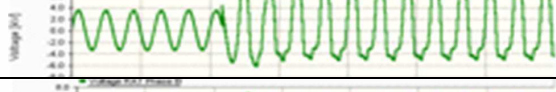
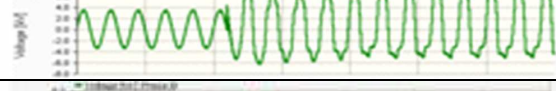
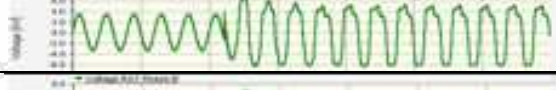

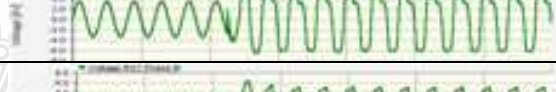
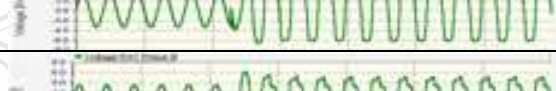
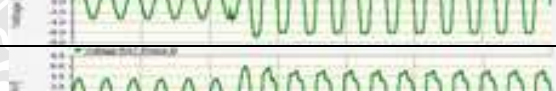
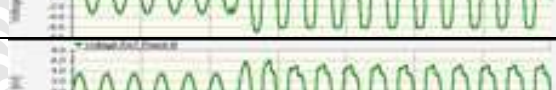
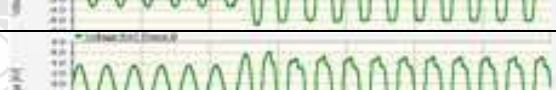


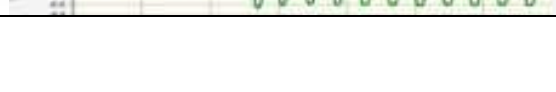


ภาพที่ 4.8 รูปแบบของสัญญาณเฟอร์โรเรโซแนนซ์

ตารางที่ 4.1 การจำลองเมื่อสับสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุม 0-360 องศา

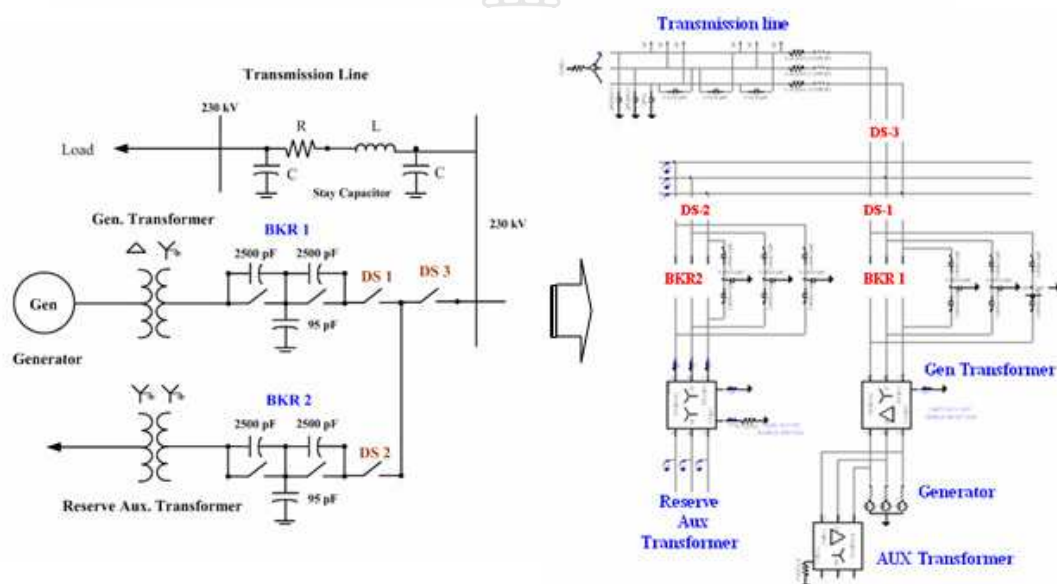
มุมทางไฟฟ้า	เวลา (วินาที)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้า
0	0.400	
18	0.401	
36	0.402	
54	0.403	
72	0.404	
90	0.405	

ตารางที่ 4.1 การจำลองเมื่อสับสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุม 0-360 องศา (ต่อ)

มุมทางไฟฟ้า	เวลา (วินาที)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้า
108	0.406	
126	0.407	
144	0.408	
162	0.409	
180	0.410	
198	0.411	
216	0.412	
234	0.413	
252	0.414	
270	0.415	
288	0.416	
306	0.417	
324	0.418	
342	0.419	
360	0.420	

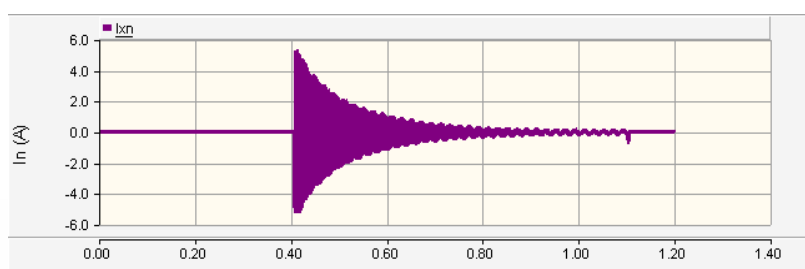
4.1.3 ผลการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเกิดค่าเก็บประจุแฝง

การจำลองระบบไฟฟ้า แบบมีพารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 230 kV และให้ปิดวงจร DS 1, DS 2, DS 3 แต่จะเปิดวงจร BKR 2 ไว้ตลอดเวลา เพื่อเป็นการจำลองเหตุการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า (RAT) ในกรณีจ่ายไฟผ่านสายส่งขนาด 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เกี่ยวข้องกับการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ เช่น สถานีไฟฟ้าแรงสูงอ่าวใต้ (AP-B) สถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านค่าย (BKI) และ สถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่อวิน (BWN) แล้วนำมาจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังภาพที่ 4.9 แล้วตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้าที่สายส่งขนาด 230 kV แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า และค่ากระแสรั่วลงดินที่หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น

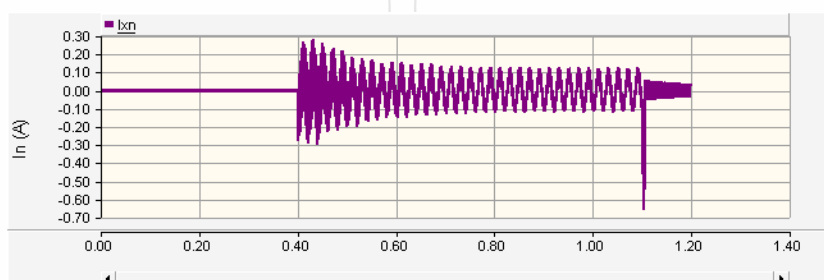


ภาพที่ 4.9 การจำลองระบบไฟฟ้าแบบมีพารามิเตอร์ของสายส่ง

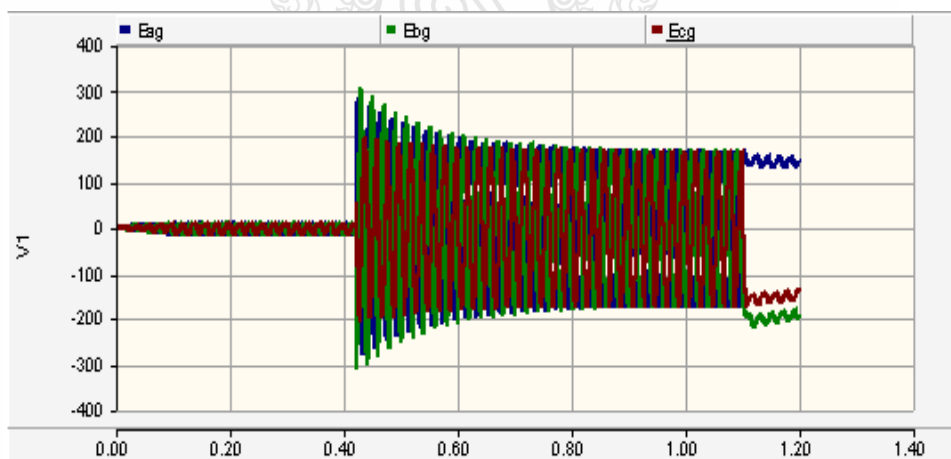
ผลการจำลองระบบไฟฟ้าแบบมีพารามิเตอร์ของสายส่งขนาด 230 kV ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยการสับ/ปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ที่มุม 0-360 องศาทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นดังในภาพที่ 4.10- 4.13



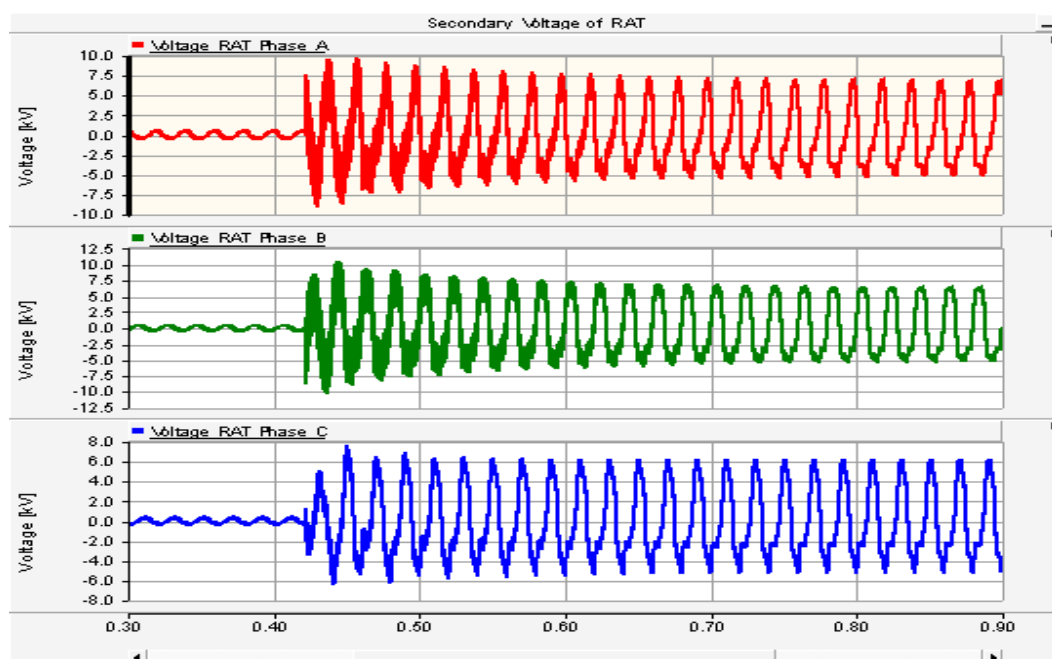
ภาพที่ 4.10 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 90 องศาทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4.11 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 0 องศาทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4.12 แรงดันที่ Main Bus 230 kV



ภาพที่ 4.13 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

จากผลการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังในภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าเมื่อทำการสั่งให้ สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ปิดวงจรที่มุมต่างๆ นั้นมีผลกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าช่วงที่ 0-30 องศาทางไฟฟ้า และช่วงที่ 180-210 องศาทางไฟฟ้า จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ ช่วงที่ 90-120 องศาทางไฟฟ้า และช่วงที่ 270-300 องศาทางไฟฟ้า จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูง และจากภาพที่ 4.12, 4.13 จะเห็นได้ว่าการเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินช่วงเวลาที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า และที่สายส่ง 230 kV

4.2 ผลการทดสอบภาคสนาม

4.2.1 ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ ป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลลงดิน

ผลการทดสอบรีเลย์ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดิน (Transformer Grounding Over Current Relay) 51G1N เป็นแบบ Static Type TAS1210H “ALSTOM” Setting IR ≥ 1.2 A, tx = 0.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ “Double” Type F2253 ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินและเครื่องมือทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3-4.5 แสดงว่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินมีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ และการเกิด Harmonic ไม่มีผลต่อการทำงาน

ตารางที่ 4.2 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0, และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 50 Hz

Phase	Test Setting		Injection Current (A)		Trip Time (Sec.)		
	IR	Tx			Should Be	As Found	Error
N	1.2	0.3	1.3 IR	1.56	13.51	13.46	-0.37%
			2.0 IR	2.40	4.06	4.04	-0.49%
			4.0 IR	4.80	1.36	1.33	-2.20%

ตารางที่ 4.3 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0, และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 100 Hz

Phase	Test Setting		Injection Current (A)		Trip Time (Sec.)		
	IR	Tx			Should Be	As Found	Error
N	1.2	0.3	1.3 IR	1.56	13.51	13.45	-0.44%
			2.0 IR	2.40	4.06	4.03	-0.74%
			4.0 IR	4.80	1.36	1.32	-2.94%

ตารางที่ 4.4 การทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 1.3, 2.0, และ 4.0 เท่าของ IR ที่ความถี่ 150 Hz

Phase	Test Setting		Injection Current (A)		Trip Time (Sec.)		
	IR	Tx			Should Be	As Found	Error
N	1.2	0.3	1.3 IR	1.56	13.51	13.43	-0.59%
			2.0 IR	2.40	4.06	4.01	-1.23%
			4.0 IR	4.80	1.36	1.31	-3.67%

4.2.2 ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของหม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Oil Type “GEC ALSTHOM” Rated 125,000 kVA, Voltage 241,500 / 11,500 V, Vector Group YNd1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ “MEGGER” Type BM21 ดังแสดงในภาพที่ 4.15 โดยการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 2500 Vdc และจากผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้างดตารางที่ 4.6 ผลปรากฏว่าค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ



ภาพที่ 4.15 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นฉนวนของหม้อแปลง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

[✓] INSULATION RESISTANCE MEASUREMENT										
TEST NO.	TEST CONNECTION		TEST VOLTAGE (VDC)	INSULATION RESISTANCE (MΩ)						PI 10/1 MIN
	WINDING ENERGIZE	WINDING EARTH		TIME (MINUTE)						
				1	2	4	6	8	10	
1	HIGH	LOW	2500	21770	22780	25100	26900	28850	30200	1.38
2	LOW	HIGH	2500	9150	9820	12050	13360	14470	15450	1.68
3	HIGH	LOW								

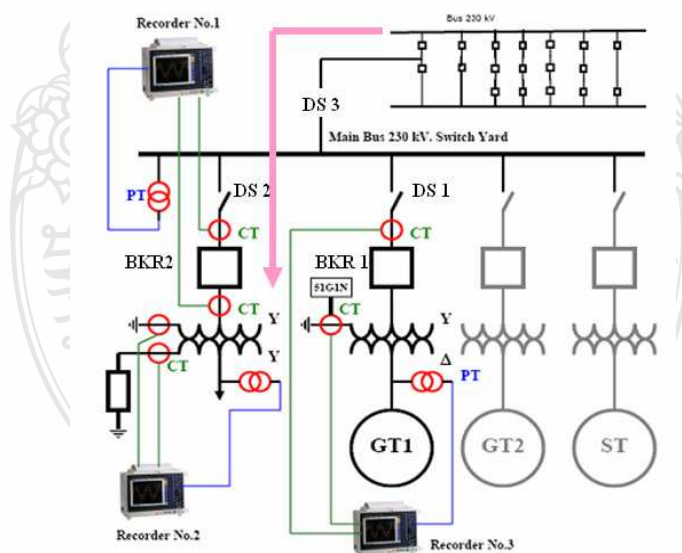
RESULT: Insulation resistance is not less than...315 MΩ ...and PI. Is not less than...1.25...refer to...SD-EMD-21/01...ACCEPTED [✓] YES [] NO

4.2.3 ผลการทดสอบวัดสัญญาณไฟฟ้าจากการจำลองเหตุการณ์จริง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหยุดการเดินเครื่องทั้ง Block แล้วทำการเปิดวงจรของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 โดยให้ปิดวงใบมีด DS 2, DS 3 และให้เปิดวงจร DS 1, BKR 1 ไว้ตลอดเพื่อทดสอบ Ferroresonance ที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า โดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกโรงไฟฟ้าแล้วทำการปรับ Tap ของหม้อแปลงและทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าตามจุดต่างๆ โดยต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า เพิ่มเติม ดังภาพที่ 4.16, 4.17

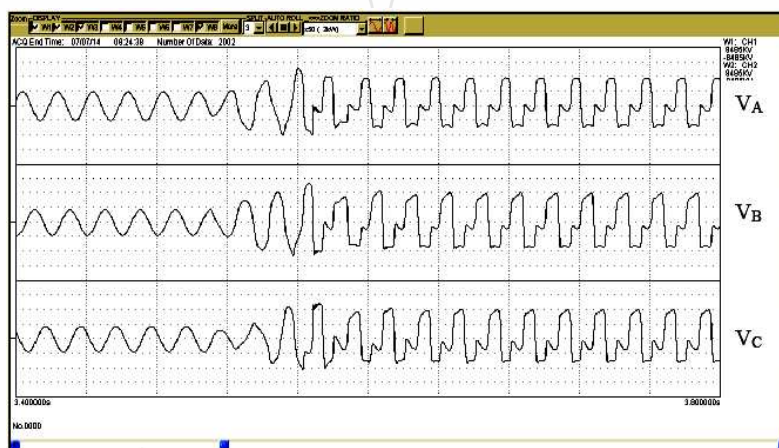


ภาพที่ 4.16 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า

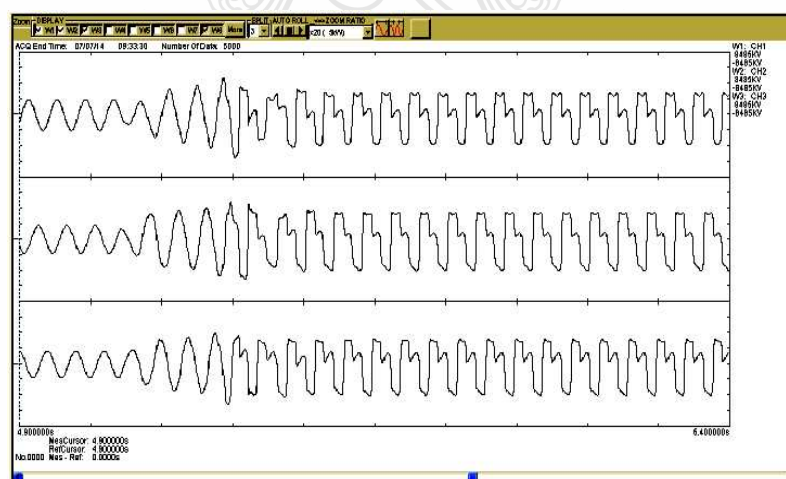


ภาพที่ 4.17 จุดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า

จากผลการทดสอบภาคสนามพบว่าปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์จะไม่เกิดขึ้นกับทุกๆ Tap ของหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า และพบว่ารูปแบบของสัญญาณจะมี 2 รูปแบบดังแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้าในภาพที่ 4.18, 4.19 และยังพบว่าเกิดเสียงฮัมอย่างรุนแรงเมื่อเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งจะมีผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลง

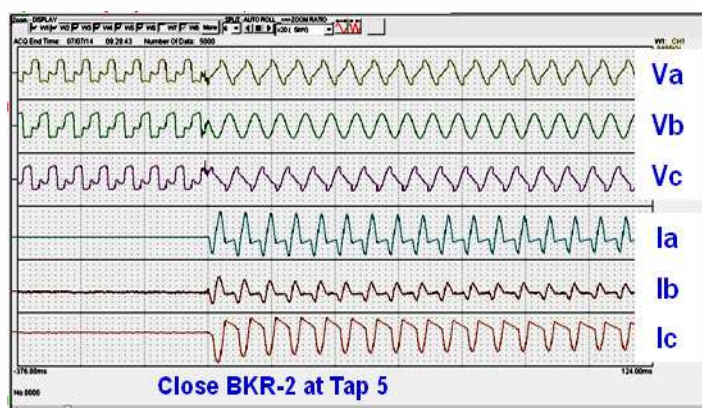


ภาพที่ 4.18 แรงดันที่ RAT เมื่อปรับ Tap จาก 4 มาที่ Tap 5



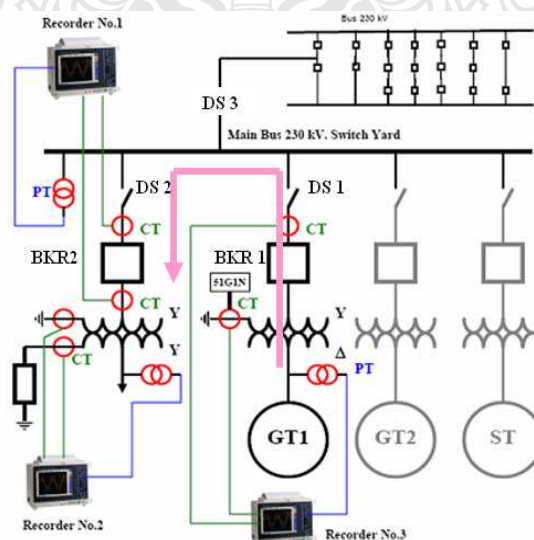
ภาพที่ 4.19 แรงดันที่ RAT เมื่อปรับ Tap จาก 9 มาที่ Tap 10

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบต่อจากครั้งที่ 1 โดยการสั่งให้ปิดวงจรของสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 ที่ Tap 5 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฟร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งพบว่าสัญญาณจะเปลี่ยนรูปร่างกลับมาเป็นตามปกติดังภาพที่ 4.20



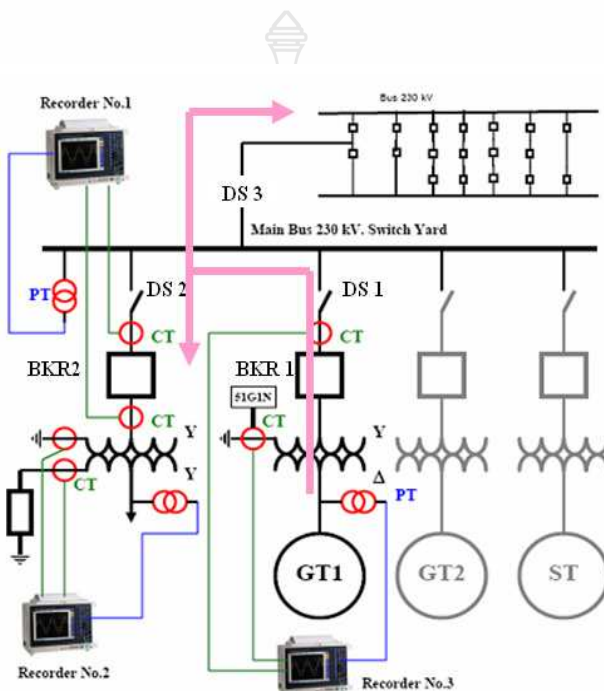
ภาพที่ 4.20 แรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ RAT เมื่อปิดวงจร BKR 2

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดสอบเหมือนกับขั้นตอนที่ 1 จะแตกต่างกันที่อาศัยแหล่งจ่ายไฟจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเองขึ้นมอดังภาพที่ 4.21 โดยให้ทำการเปิดวงจรของสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 ไว้ตลอด ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการทดสอบขั้นตอนที่ 1

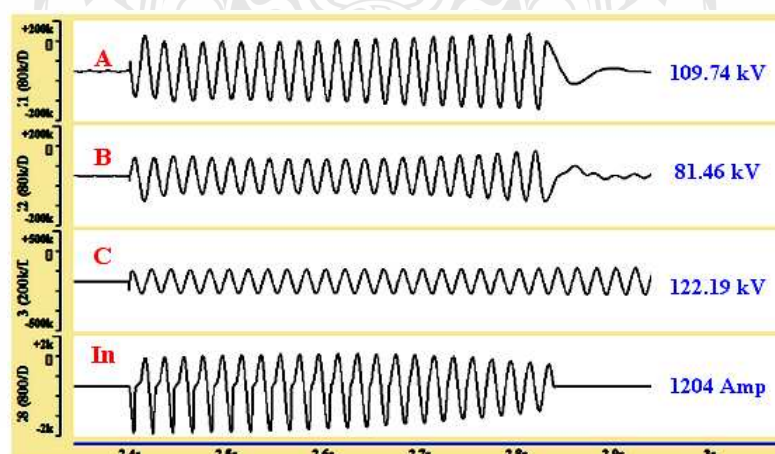


ภาพที่ 4.21 การทดสอบขั้นตอนที่ 3

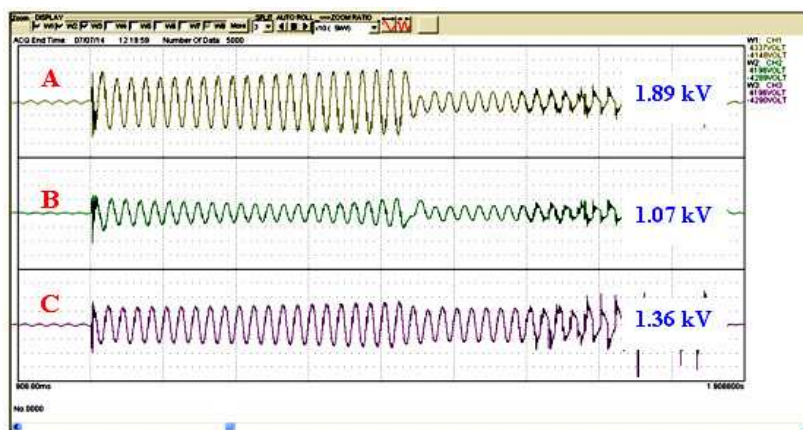
ขั้นตอนที่ 4 เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วจ่ายไฟผ่านสายส่งขนาด 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงวงจรการทดสอบในภาพที่ 4.22 โดยกำหนดให้สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจรตลอดเวลาแล้วทำการวัดสัญญาณที่ได้ ผลปรากฏว่าอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าทำงานสั่งปลดสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 1 ด้วยเวลา 440 m Sec ดังภาพที่ 4.23, 4.24



ภาพที่ 4.22 การทดสอบขั้นตอนที่ 4



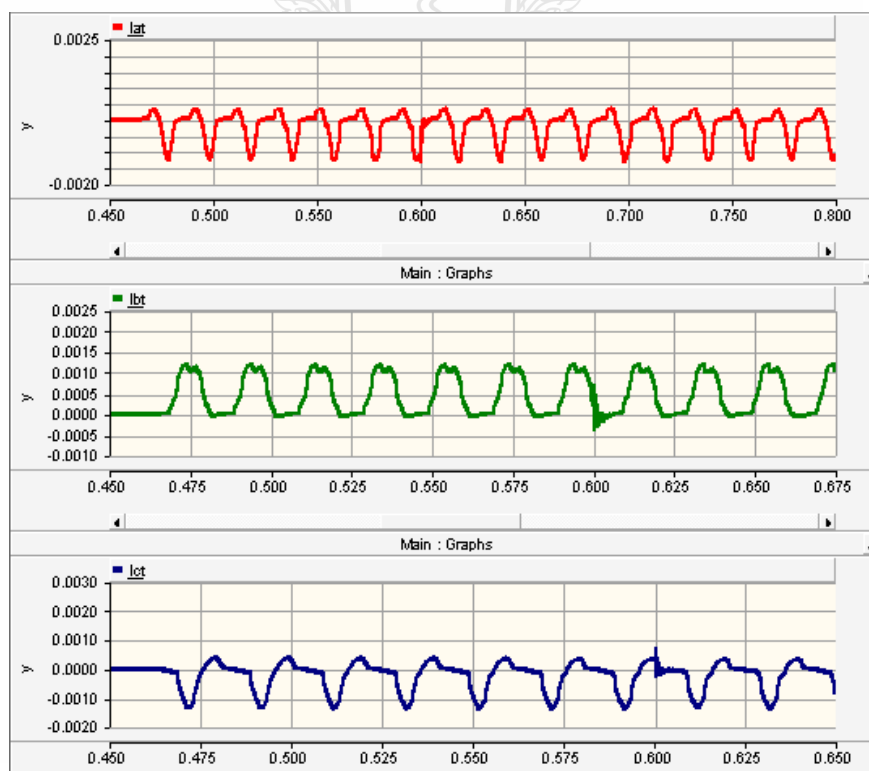
ภาพที่ 4.23 แรงดันที่ ระบบ 230 kV และกระแส In



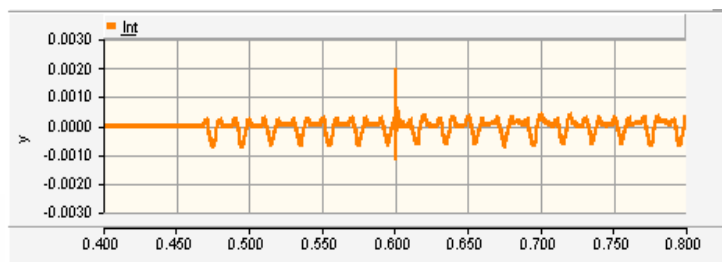
ภาพที่ 4.24 แรงดันที่ RAT

4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองระบบไฟฟ้าและผลการทดสอบภาคสนาม

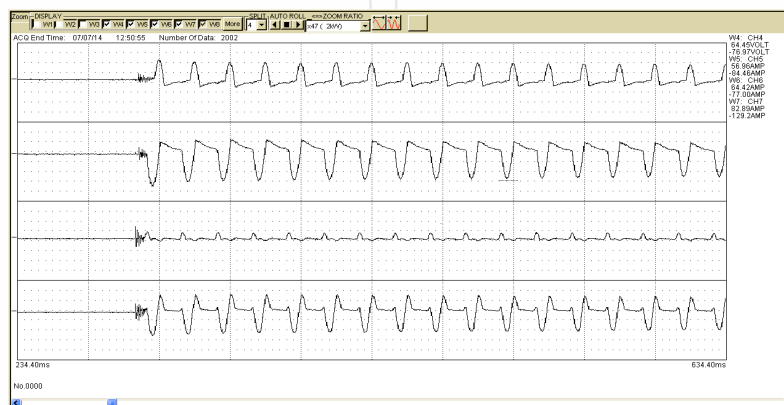
4.3.1 เปรียบเทียบผลของกระแสไฟฟ้า



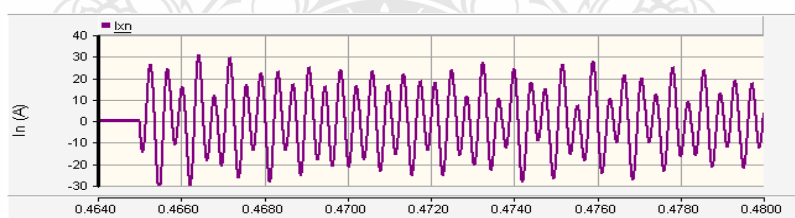
ภาพที่ 4.25 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า Ia, Ib, Ic จากการจำลองระบบไฟฟ้า



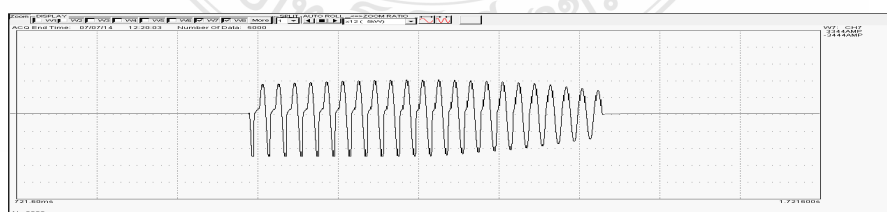
ภาพที่ 4.26 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า I_n จากการจำลองระบบไฟฟ้า



ภาพที่ 4.27 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า I_a , I_b , I_c , I_n ได้จากการทดสอบภาคสนาม

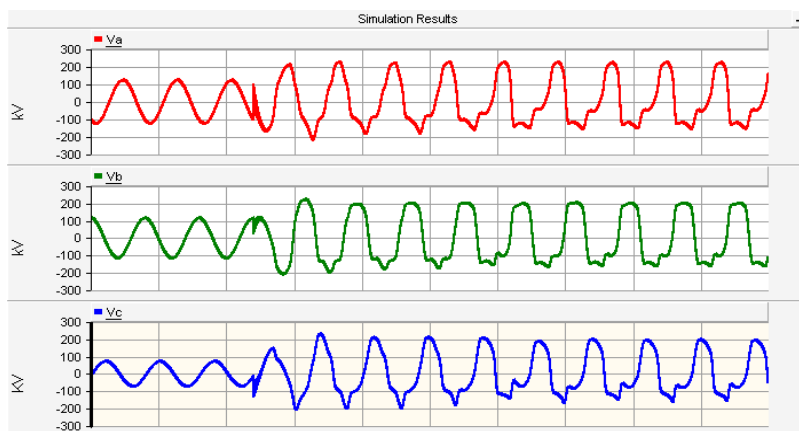


ภาพที่ 4.28 กระแสไฟฟ้า I_n ที่ทำให้ 51G1N ทำงานจากการจำลองระบบไฟฟ้า

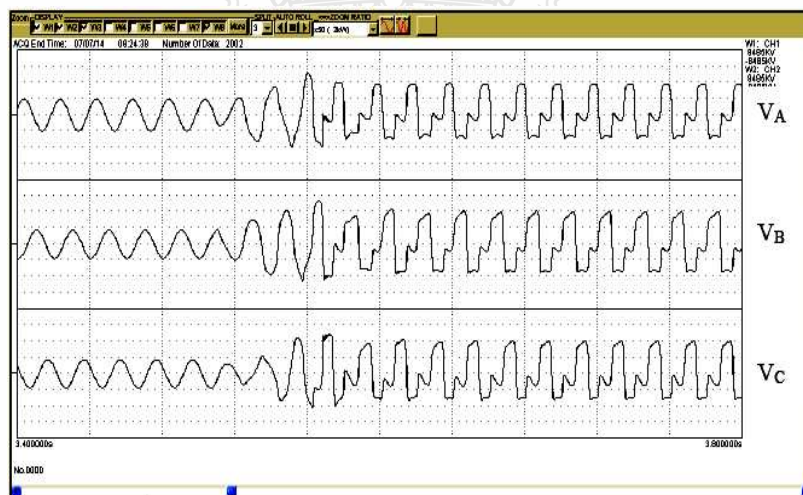


ภาพที่ 4.29 กระแสไฟฟ้า I_n ที่ทำให้ 51G1N ทำงานจากการทดสอบภาคสนาม

4.3.2 เปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 4.30 สัญญาณเฟร์โรเรโซแนนซ์ที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า

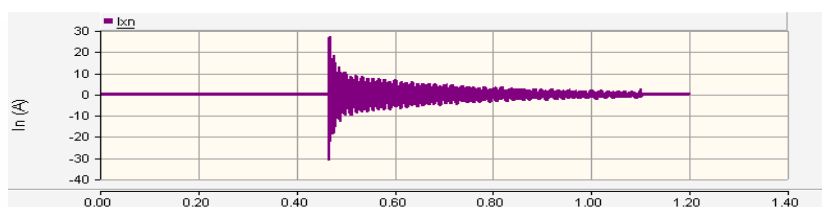


ภาพที่ 4.31 สัญญาณเฟร์โรเรโซแนนซ์ที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม

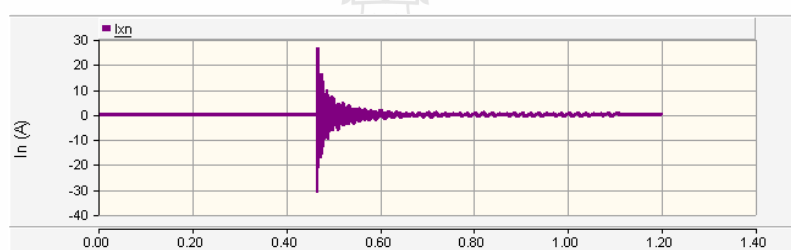
จากภาพที่ 4.25 - 4.31 เป็นการแสดงเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และการทดสอบภาคสนาม ของสัญญาณเฟร์โรเรโซแนนซ์ และสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าผลที่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก แต่การเปรียบเทียบผลของกระแสไฟฟ้า I_m ที่ทำให้ 51GINทำงานให้ผลของสัญญาณแตกต่างกันทั้งนี้อันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

4.4 ผลการหาแนวทางการแก้ไขโดยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม

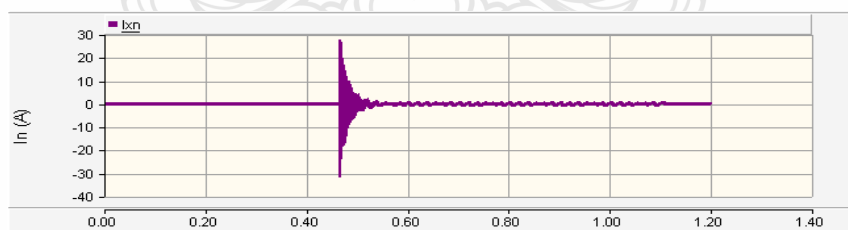
4.4.1 การต่อตัวต้านทานที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง RAT



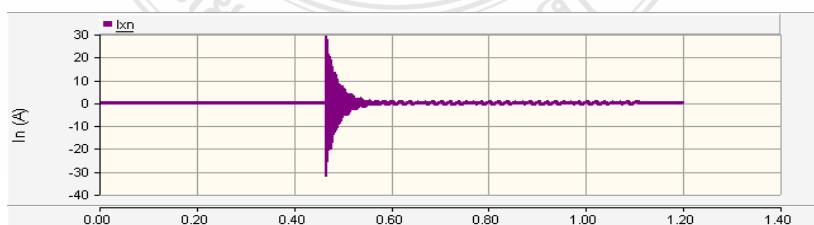
ภาพที่ 4.32 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 1 Ω



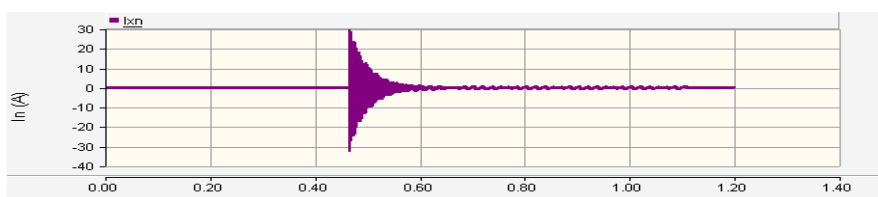
ภาพที่ 4.33 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 5 Ω



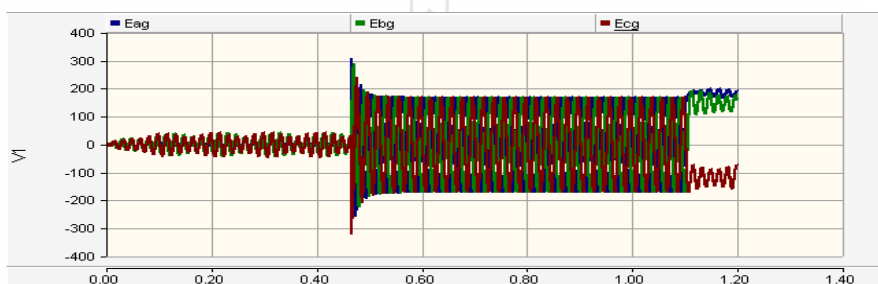
ภาพที่ 4.34 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 100 Ω



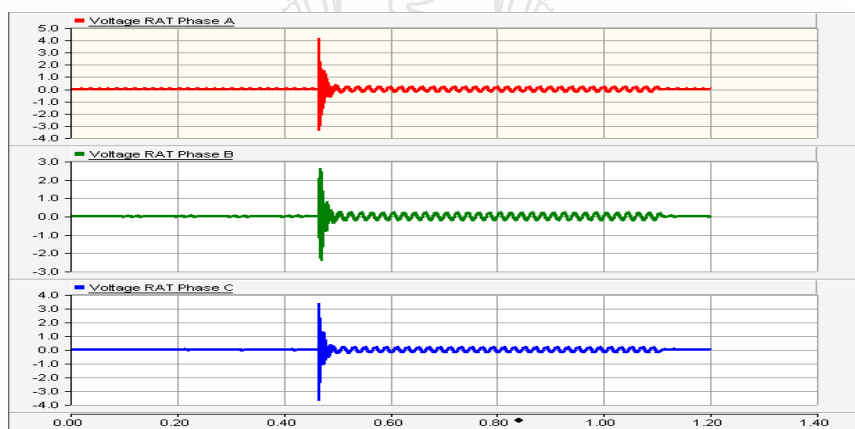
ภาพที่ 4.35 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 200 Ω



ภาพที่ 4.36 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อต่อ Resistor ขนาด 500 Ω



ภาพที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV

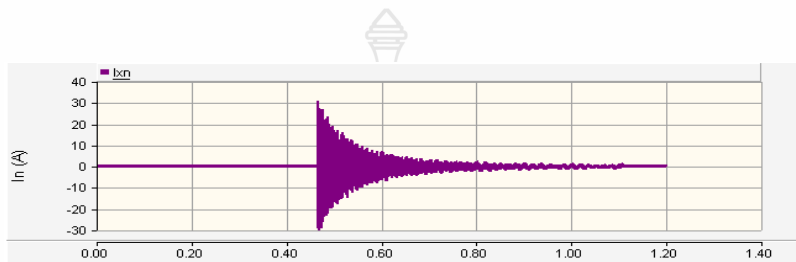


ภาพที่ 4.38 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ RAT ด้าน Secondary

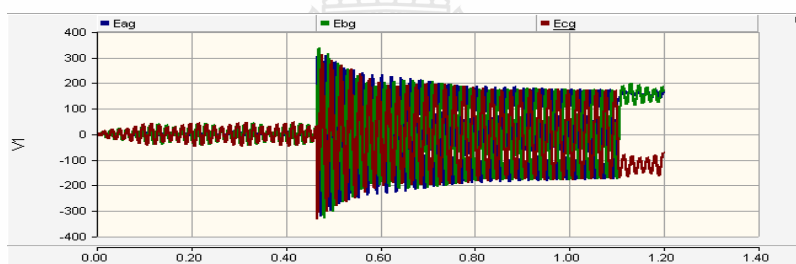
จากผลการจำลองระบบไฟฟ้าโดยการต่อตัวต้านทานไฟฟ้าที่ด้าน 6.9 kV ของหม้อแปลง
 สำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้ารั่วลงดินดังแสดงในภาพที่ 4.32 - 4.36
 ผลที่ได้คือค่าความต้านทานขนาด 100 Ohm สามารถหน่วงให้ค่ากระแสไฟฟาลดลงมาที่ค่าปกติได้เร็ว
 ที่สุด และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สายส่ง 230 kV ที่แสดงในภาพที่ 4.37 ก็ลดลงมาที่ค่าปกติได้เร็ว

เช่นกัน และภาพที่ 4.38 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้าซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถหน่วงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้

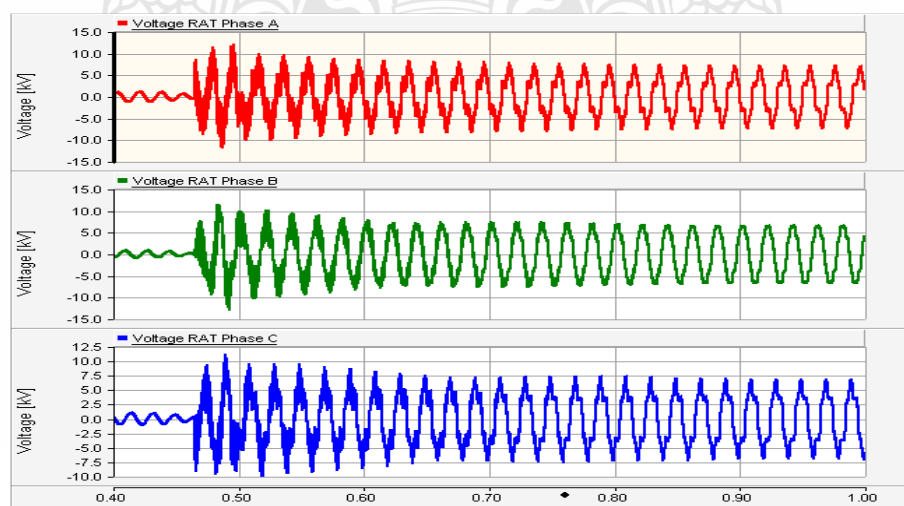
4.4.2 ผลการเปลี่ยนค่าเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า



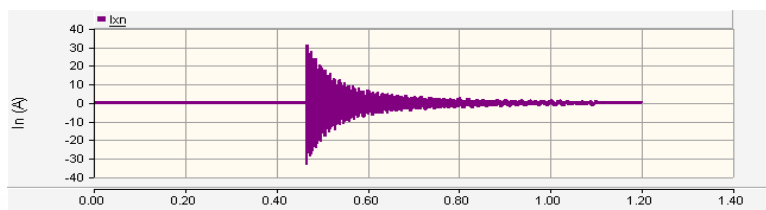
ภาพที่ 4.39 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF



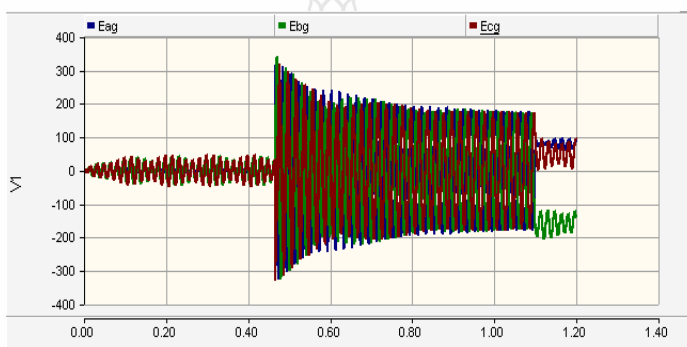
ภาพที่ 4.40 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF



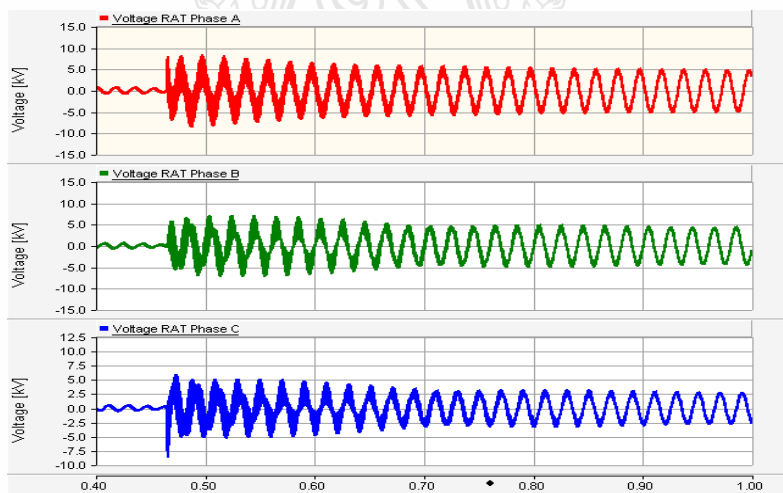
ภาพที่ 4.41 แรงดันไฟฟ้าที่ RAT เมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 3500 pF



ภาพที่ 4.42 กระแสไฟฟ้าเฟส In เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 1500 pF



ภาพที่ 4.43 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 1500 pF



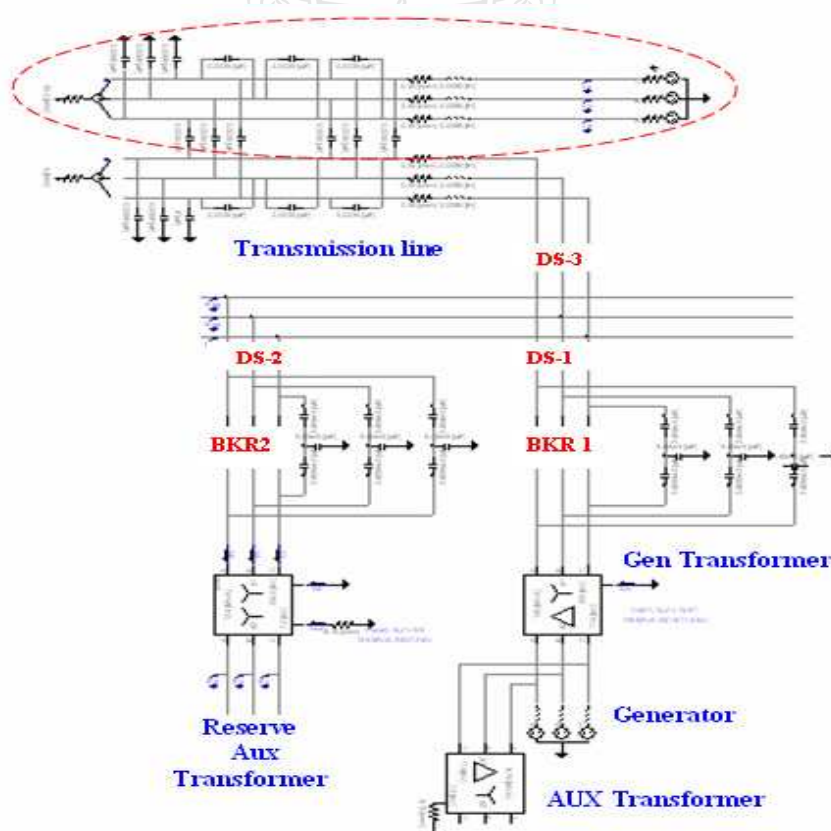
ภาพที่ 4.44 แรงดันไฟฟ้าที่ RAT เมื่อลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 1500 pF

จากภาพที่ 4.39 - 4.44 แสดงถึงผลการจำลอง โดยการทดลองเพิ่ม/ลดค่าคาปาซิแตนซ์ ของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าคาปาซิ

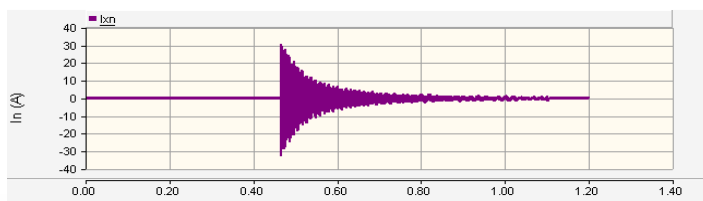
แดนซ์ผลลัพธ์ที่ได้คือค่ากระแสไฟฟ้าที่รั่วลงดินยังคงมีค่าสูงเช่นเดิม และเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่ Main Bus 230 kV ส่วนที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้าก็ยังคงเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ อยู่ ส่วนการลดค่าคาปาซิแตนซ์นั้นให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกับการเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ คือสามารถหน่วงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ ค่าของกระแสไฟฟ้าที่รั่วลงดินยังคงมีค่าสูง และเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่ Main Bus 230 kV เช่นเดิม

4.4.3 การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง

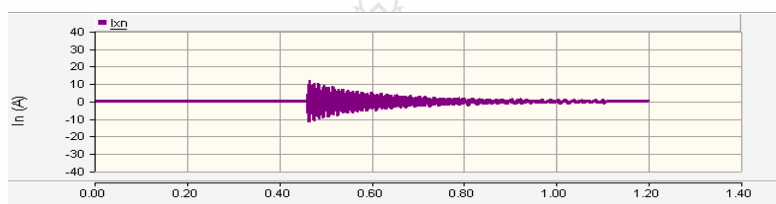
ผลการจำลองโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ของสายส่ง 230 kV โดยเป็นการตั้งสมมุติฐานว่ามีพารามิเตอร์ของสายส่ง 230 kV ของวงจรอื่นที่มาผัดผ่าน กับวงจรที่ทำการทดสอบ แล้วนำข้อมูลมาเขียนในโปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังแสดงในภาพที่ 4.45 ซึ่งเป็นการจำลองหาสาเหตุที่ทำให้รีเลย์ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินทำงาน การจำลองทำโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง แล้วทำการบันทึกผลการจำลองที่ได้โดยเลือกสับ BKR 1 ที่มุม 0, 90 องศาทางไฟฟ้า และให้ DS 1, 2, 3 ปิดวงจรตลอดเวลา ส่วน BKR 2 เปิดวงจรตลอดเวลา



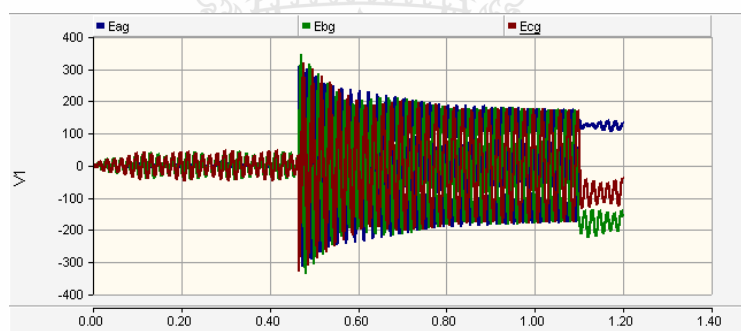
ภาพที่ 4.45 การจำลองโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ของสายส่ง



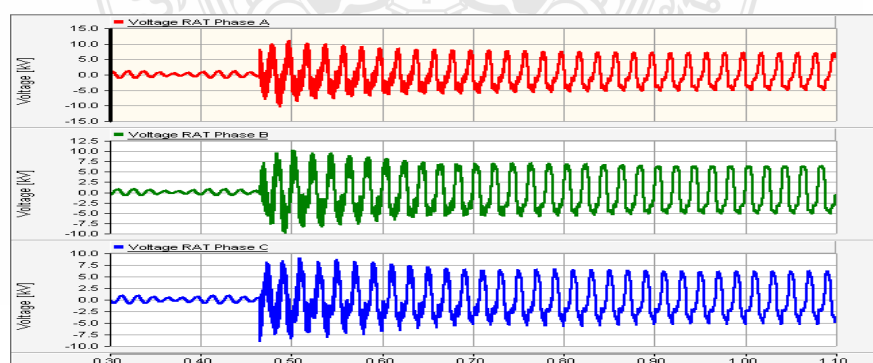
ภาพที่ 4.46 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 90 องศาทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4.47 กระแสเฟส In ขณะสับ BKR 1 ที่ 0 องศาทางไฟฟ้า



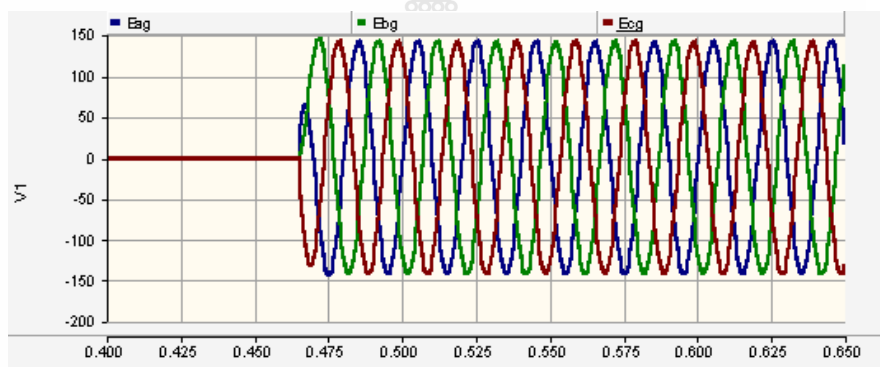
ภาพที่ 4.48 แรงดันที่ Main Bus 230 kV



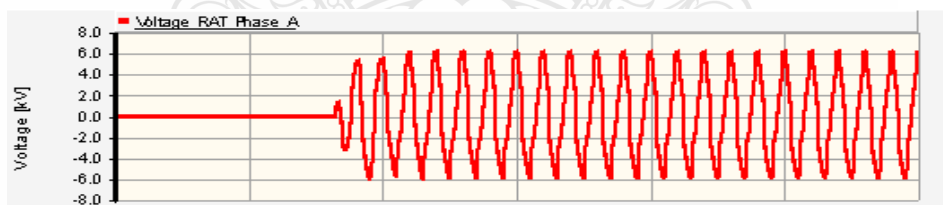
ภาพที่ 4.49 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้า

ผลการจำลองที่ได้จากภาพที่ 4.46 - 4.49 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ของสายส่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่สายส่ง 230 kV และที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟสำหรับโรงไฟฟ้าเกิดแรงดันสูงเกินชั่วขณะ และค่ากระแสไฟฟ้าที่ Grounding Current ที่หม้อแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่าสูงขึ้นอีกประมาณ 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองระบบไฟฟ้าแบบที่ไม่มีวงจรของสายส่งอื่น

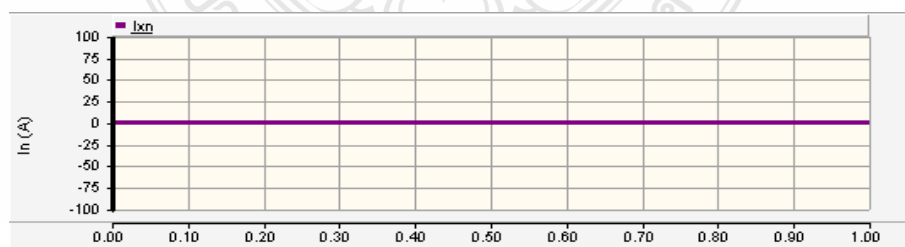
4.4.4 ผลการต่อ Shunt Reactor ที่ระบบ



ภาพที่ 4.50 แรงดันที่ Main Bus 230 kV



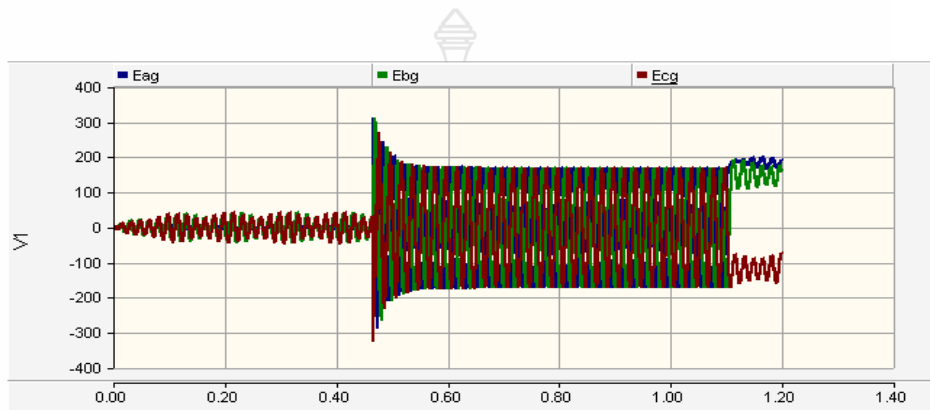
ภาพที่ 4.51 แรงดันที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า



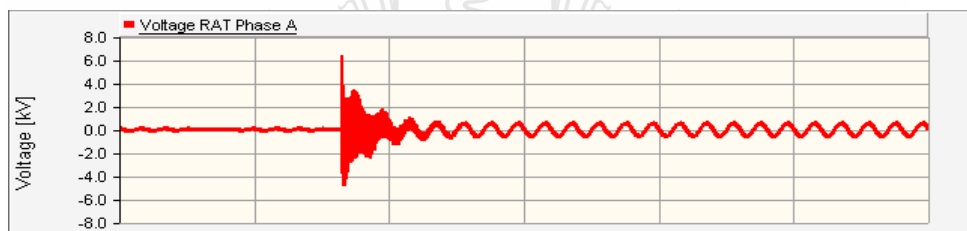
ภาพที่ 4.52 กระแสเฟส In

ผลการต่อ Shunt Reactor ที่ระบบ ปรากฏว่าให้ผลลัพธ์ที่ดี ภาพที่ 4.50-4.52 พบว่าสามารถช่วยหน่วงไม่ให้เกิดสัญญาณเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าแต่ยังเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน และที่กระแส I_n ไม่เกิดค่าสูงเกิน

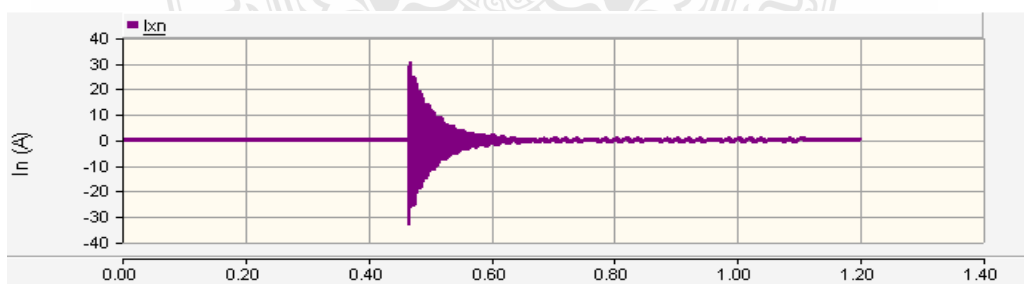
4.4.5 ผลการเปลี่ยนขนาดของหม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า



ภาพที่ 4.53 แรงดันที่ Main Bus 230 kV



ภาพที่ 4.54 แรงดันที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า

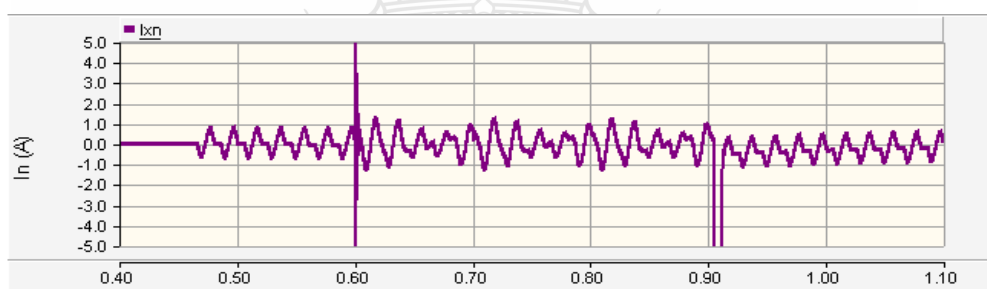


ภาพที่ 4.55 กระแสเฟส I_n

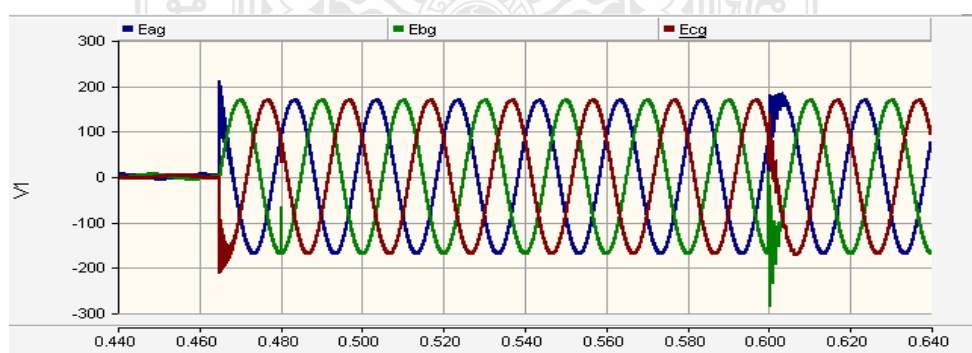
จากภาพที่ 4.53-4.55 แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV และที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า I_n ของการเปลี่ยนขนาดของหม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้นสามารถช่วยหน่วงไม่ให้เกิดเพอร์โรเรโซแนนซ์ ที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าได้ แต่ไม่สามารถหน่วงค่ากระแสไฟฟ้า I_n ที่สูงเกินได้

4.4.6 ผลการ Closed BKR 2, DS 2, ก่อน Closed BKR 1 และจ่ายโหลดเพิ่ม

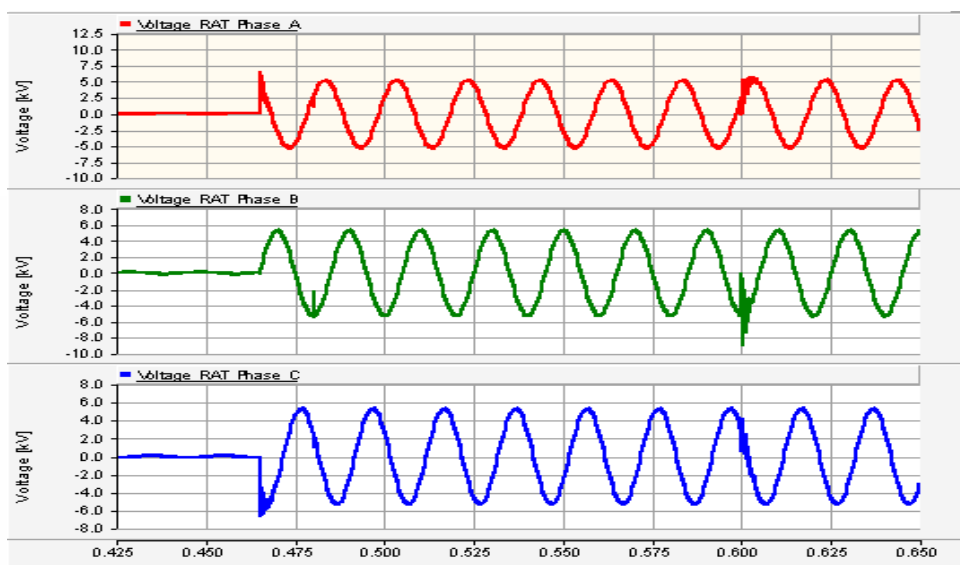
ผลการจำลองระบบไฟฟ้าแบบการหาแนวทางการแก้ไขโดยการสั่งปิดวงจรใบมีด DS 2 และ สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูง BKR 2, และให้ DS 1 ปิดวงจรตลอดเวลา แล้วตั้งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเลือกสับ BKR 1 ที่มุม 90 องศาทางไฟฟ้า จากนั้นให้ทำการจ่ายโหลดให้กับบริเวณรอบโรงไฟฟ้าที่ประมาณ 2 MW แล้วจึงปิดวงจร DS 3 เพื่อจ่ายไฟไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงอื่นและให้จ่ายโหลดเพิ่ม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถลดการเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน และการเกิดกระแสไฟฟ้าสูงเกินดังในภาพที่ 4.56-4.59



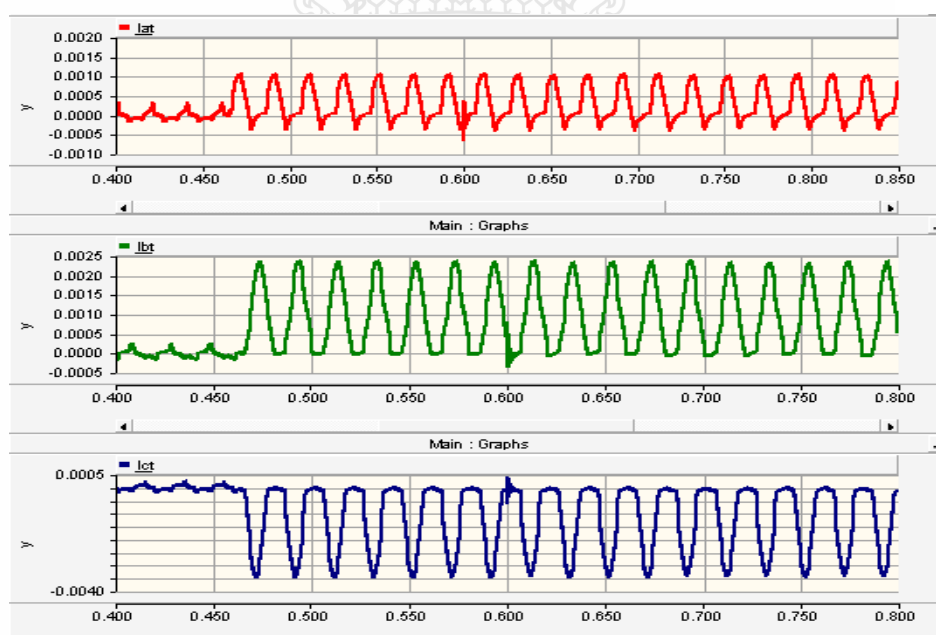
ภาพที่ 4.56 กระแสไฟฟ้าเฟส I_n



ภาพที่ 4.57 แรงดันไฟฟ้าที่ Main Bus 230 kV



ภาพที่ 4.58 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ RAT



ภาพที่ 4.59 ผลของกระแสไฟฟ้าที่ RAT

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า แบบการหาแนวทางการแก้ไขโดยเป็นการปรับขั้นตอนการจ่ายไฟไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลที่ได้คือจะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน และค่ากระแสไฟฟ้ารั่วลงดินก็มีค่าที่ไม่สูงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าทำงานได้

4.5 สรุป

จากผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบจริงในภาคสนาม แก้ปัญหาของการปรับขั้นตอนทดสอบการนำระบบกลับคืนสู่สภาพปกติ ซึ่งทั้งนี้ผลของเฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดกับหม้อแปลงสำรองไม่มีผลต่อปัญหาที่จะทำให้เกิดกระแสสูงที่ Grounding Current โดยพบว่ากระแส Grounding Current มาจากค่าพารามิเตอร์ของสายส่งระบบ 230 kV ที่สูงขึ้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยการหลีกเลี่ยง ด้วยการเพิ่มค่า Inductance เข้าไปในระบบ โดยต่อหม้อแปลงสำรองไฟฟ้าเข้าไปในระบบก่อนทำการ Close BKR1 และค่อยๆ จ่ายโหลดเป็นลำดับไป จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทดลองในภาคสนาม ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้กล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาสาเหตุการทำงานผิดพลาดของสวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงขณะทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง

จากปัญหาดังกล่าวทำให้โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยองไม่สามารถรองรับเหตุฉุกเฉินในกรณีเกิดไฟฟ้าดับ (Black - Out) และทำให้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยลดลง อีกทั้งยังทำให้เกิดความเสียหายต่อธุรกิจอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากจังหวัดระยองมีนิคมอุตสาหกรรมตั้งอยู่มาก จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องวิเคราะห์หาสาเหตุ และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น และสมมติฐานสาเหตุของปัญหาในเบื้องต้น รวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง ทำการจำลองระบบไฟฟ้าโดยเลือกใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC เปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุป

5.1.1 ทำการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุพบการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่หม้อแปลงส่งจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าจากปรากฏการณ์นี้ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่ประมาณ 1.5 เท่าของระดับแรงดันไม่ปกติทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และมีรูปแบบของสัญญาณที่ไม่เป็น Sinusoidal เนื่องจากมีฮาร์โมนิก อันดับ 2, 3, 4 และ 5 ปนอยู่ โดยที่รูปแบบของสัญญาณจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป อีกทั้งยังไม่พบการเกิดกระแสไฟฟ้า Inrush Current เนื่องจากรูปแบบของวงจรไฟฟ้าที่ Generator ต่อตรงกับ Generator Transformer เป็นผลทำให้ลด Transient Magnetizing Inrush Current ที่เกิดขึ้น และเมื่อทำการจำลองระบบไฟฟ้าโดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าลงดินที่หม้อแปลง Gen. Transformer มีค่าสูงขึ้นหลายเท่าจากพิกัดคำสั่ง Closed Breaker ในมุมที่ไม่เหมาะสม

5.1.2 ทำการทดสอบภาคสนามที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมระยอง เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องและทำสอบการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ เพื่อวัดสัญญาณไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุ จากการตรวจสอบการทำงานของรีเลย์ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดิน พบว่าสามารถทำงานได้ตามปกติที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz และ 150 Hz และจากการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของหม้อแปลง Gen. Transformer พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ

เช่นกัน จึงทำการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าเมื่อทดสอบการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ พบการเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ และมีเสียงฮัมอย่างรุนแรงที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า และ Trip ด้วยการทำงานของรีเลย์ 51 GIN สั่ง Open Circuit Breaker ออกจากระบบ จากสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ พบการเกิด Unbalance Voltage และกระแสไฟฟ้าลงดินมีค่าสูง ประมาณ 1,200 Amp

5.1.3 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบภาคสนามโดยการนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และจากผลการทำสอบภาคสนามมาเปรียบเทียบ พบว่ารูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าที่ขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ มีรูปแบบที่เหมือนกัน คือ มีรูปร่างของสัญญาณเป็น 2 รูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมที่ขณะ Closed Circuit Breaker รูปแบบที่ 1 มุมระหว่าง 0 - 180 องศาทางไฟฟ้า รูปแบบที่ 2 มุมระหว่าง 180 - 360 องศาทางไฟฟ้า ส่วนการเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าขณะทำงานผิดพลาด ให้ผลของสัญญาณไฟฟ้าไม่เหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ อีกหลายตัว ที่อยู่นอกโรงไฟฟ้า ซึ่งอยู่นอกขอบเขตของการวิจัย

5.1.4 ทำการศึกษหาแนวทางการแก้ไข โดยวิเคราะห์จากผลที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้า และการทดสอบภาคสนาม ทำการทดลอง ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ทดสอบต่อตัวต้านทานไฟฟ้าที่ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า พบว่าถ้าต่อตัวต้านทานไฟฟ้าขนาด 100 Ohm จะสามารถหน่วงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ และสามารถหน่วงค่ากระแสสูงเกินให้ลดลงมาที่ขนาดปกติ การทดลองเปลี่ยน ค่าคาปาซิแตนซ์ ของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันพบว่าการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า หรือเปรียบเสมือนกับการลดค่าคาปาซิแตนซ์ของวงจรไฟฟ้า สามารถหน่วงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ได้ แต่ไม่สามารถหน่วงค่ากระแสเกินลงดินที่สูงอยู่ได้ การทดลองต่อ Shunt Reactor ที่ระบบ พบว่าสามารถหน่วงไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่ระบบ และสามารถหน่วงไม่ให้เกิดค่ากระแสลงดินสูงเกินได้ แต่ยังคงเกิดแรงดันสูงเกินที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า การทดลองโดยการเพิ่มอินดักทีฟรีแอ็กแตนซ์ ของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า ก่อนทำการสับสวิทช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงและจ่ายโหลดต่างๆ ในบริเวณใกล้เคียงของโรงไฟฟ้าก่อนจ่ายไฟผ่านสายส่ง แล้วให้จ่ายโหลดเพิ่มขึ้น ผลที่ได้พบว่าสามารถหน่วงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ การเกิดแรงสูงเกินที่ระบบ และกระแสลงดินสูงเกินได้

5.1.5 ทำการทดสอบการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ ตามแนวทางการแก้ไข โดยการต่อหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า ปรากฏว่าไม่ Trip และสามารถทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติได้สำเร็จ

5.1.6 สรุปลักษณะที่ทำให้สวิตช์ตัดตอนไฟฟ้าแรงสูงทำงานผิดพลาด เกิดจากการทำงานของรีเลย์ ระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสเกินลงดินตรวจจับกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกำหนด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง และจังหวะในการสับสวิตช์ตัดตอนแรงสูงในมุมทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกได้ แนวทางการแก้ไขที่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติและไม่มีการลงทุนเพิ่มเติม คือการเพิ่มค่าอินดักทีฟรีแอ็คแตนซ์ของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า และให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ของระบบลดลงและทำให้สวิตช์ตัดตอนแรงสูงทำงานถูกต้อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า และตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบเดียวกันนี้ ควรหลีกเลี่ยงการอนุกรมวงจรของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันไฟฟ้า และหม้อแปลง เพราะจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ เพราะอาจทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง

5.2.2 ก่อนการทดสอบจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติที่โรงไฟฟ้าอื่นๆ ควรจำลองระบบไฟฟ้าในหลายๆ ขั้นตอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.2.3 ควรศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างต่อเนื่องในอนาคต เช่นระบบ Ground ไม่แน่น หรือการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ในระบบเปลี่ยนไป การศึกษาข้อมูลพารามิเตอร์ควรเป็นข้อมูลที่ใหม่

รายการอ้างอิง

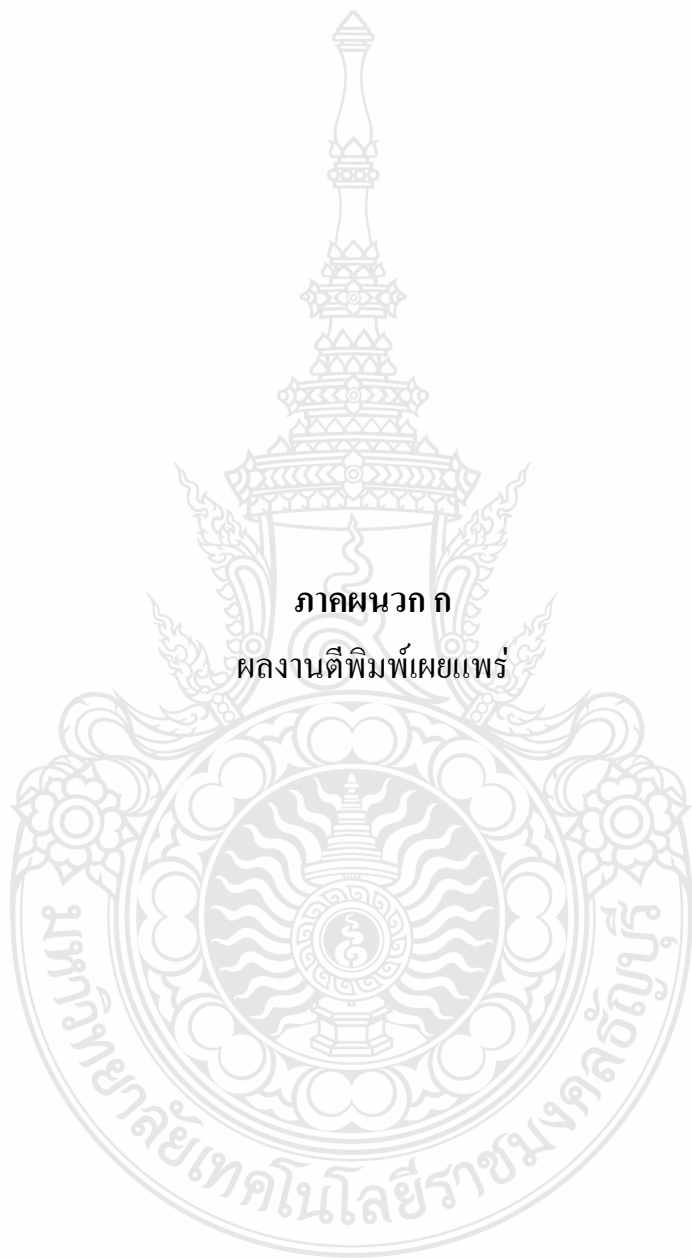
- [1] สัมพันธ์ หาญชเล “เครื่องกลไฟฟ้า 2” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530
- [2] ชนัญ ศรีพรวัฒนา “Maintenance for Industrial Power System” IEEE Thailand Section การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [3] ไสว ฐานิพานิชสกุล “หม้อแปลง” พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร หจก. ฟีนี ฟับบลิชซิง 2552
- [4] Transformer “oknation” website <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=332692>
- [5] ประวิทย์ จันทรเอี่ยม “Basic Knowledge of Circuit Breaker” เอกสารวิชาการของฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [6] “Applications Guide” ABB Circuit Breaker, ABB Co., Ltd
- [7] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช “การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง” บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) 2538
- [8] Instruction Manual Protective Relay “Ground Over Current Relay”, General Electric Co., Ltd
- [9] Instruction Manual Protective Relay “Ground Over Current Relay”, ALSTOM Co., Ltd
- [10] Surya Santoso, Roger C. Dugan, Thomas E. Grebe, Peter Nedwick “Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System” IEEE IPST '01 Rio de Janeiro, Brazil, June 2001, paper 34
- [11] ชาญณรงค์ สอนศิษฐ์ “ปัญหาจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (ตอนที่ 1)” Electricity & Industry, February 2007 หน้า 88-91
- [12] ชำนาญ ห่อเกียรติ “ระบบไฟฟ้ากำลัง” โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548
- [13] สภาวิศวกร “Power Transformer” ปรับปรุงครั้งที่ 1 มกราคม 2547
- [14] คู่มือการใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC “Principle and Applications of PSCAD/EMTD”
- [15] Bernard C. Lesieutre, Jama A. Moharmed, Aleksander M. Stancovic “Analysis of Ferroresonance in Three-Phase Transformer” IEEE POWERCON 2000
- [16] Preecha Sakarung “Nonlinear Analysis of Ferroresonance in Power System” King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, May 2007

- [17] Zia Emin BSc MSc PhD AMIEE, Yu Kwong Tong Ph MIEE “**Ferroresonance Experience in UK : Simulations and Measurements**” International Conference on Power Systems Transients (IPST'01), 24-28 June 2001, Rio de Janeiro, Brazil
- [18] David A. N. Jacobson “**Examples of Ferrorenance in A High Voltage Power System**” Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE
- [19] V. Valverde, A. J. MaZon, I. Zomora, G. Buigues “**Ferroresonance in Voltage Transformer Analysis and Simulations**” International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ07)
- [20] ณัฐพงษ์ ฉลาดคิด “**Blackout Restoration**” เอกสารวิชาการของฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

NET2008 EENET2008 EENET2008 EENET2008



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ประจำปี 2551

ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK 2008

- วิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง
- วิศวกรรมเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- วิศวกรรมการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า
- วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- วิศวกรรมพลังงาน
- วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
- วิศวกรรมโทรคมนาคม
- วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
- บทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า










19-21 พฤศจิกายน 2551 ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

NET2008 EENET2008 EENET2008 EENET2008



EENET 2008

คณะกรรมการจัดงาน

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

คณะกรรมการที่ปรึกษาโครงการ

1. อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		ประธานที่ปรึกษา
2. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย		กรรมการ
3. รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา		กรรมการ
4. ผู้อำนวยการกองคลัง		กรรมการ
5. ผู้อำนวยการกองแผนงาน		กรรมการ
6. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา		กรรมการ
7. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์		กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงาน

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย	หิรัญญา ไรดม	ประธาน
2. นายวันชัย	ทวีพงษ์สิงห์	รองประธาน
3. นายฉัตรชัย	สุกพิทักษ์สกุล	กรรมการ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย	ผดุงศิลป์	กรรมการ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรจิวดี	โสภะเกษตรินทร์	กรรมการ
6. นายสุรินทร์	แหงนงาม	กรรมการ
7. นายจักรี	ศรีนนท์ฉัตร	กรรมการ
8. นายอำนาจ	เรืองวารีย์	กรรมการ
9. นายวิวัฒน์	เจริญสุข	กรรมการ
10. นายศิริชัย	แดงอม	กรรมการ
11. นายพินิจ	จิตจริง	กรรมการ
12. นายสมชาย	เขียนสูงเนิน	กรรมการ
13. นายธีระพล	เหมือนขาว	กรรมการ
14. นายองอาจ	แสงใหม่	กรรมการ
15. นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	กรรมการ
16. นายนิติพงศ์	ปานกลาง	กรรมการ
17. นางชนารัตน์	อุ่นแจ่ม	กรรมการ
18. นางพงษ์ศรี	เต๋าจันทร์	กรรมการ
19. นางสาวพรรณผกา	เพิ่มพูล	กรรมการ
20. นางสาวธาลินี	ใจดี	กรรมการ
21. นายบุญยัง	ปลั่งกลาง	กรรมการและเลขานุการ
22. นายไพศาล	บุญเยี่ยม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

EENET 2008

รายชื่อผู้พิจารณาบทความ



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
กิตติพงษ์	มีสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
เผ่าถัก	ศิริสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
สมยศ	เกียรติวิทวีไล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
เวสิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
บุญเลิศ	สื่อเดช	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
สันติ	อัสวศรีพงษ์ธร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โกสินทร์	จ่านงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อธิคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ณรงค์	บวบทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
พินิจ	เทพสาธร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
วิบูลย์	ชันแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ธนพงศ์	สุวรรณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาทิตย์	โสดรโยม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

EENET 2008



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
เกษม	เนื้อแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
เจษฎา	พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เดิมศักดิ์	แสนเพียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เอกพล	อนุสุเรนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เอกวิทย์	หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ไพศาล	บุญเจียม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กิตติวงศ์	สุธรรมโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ขอบคุณ	ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จงเจริญ	คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จตุรงค์	จตุรเจ็ดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จัตตุฤทธิ์	ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชาญฤทธิ์	ธราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชูศักดิ์	กมลขันดิษฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ฉรงค์	นันทกุศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ฉรงค์ฤทธิ์	พิมพ์คำวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ฉัฐวุฒิ	โสมเกษมศรีรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อุสิทธิ์	อุทิศสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ทง	ลานธราทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ทัศนะ	อมทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ธงชัย	คล้ายคลัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธนวัฒน์	ฉลาดสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ธวัช	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธวัชชัย	สิมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นคร	ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นครินทร์	ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นราวิทย์	กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นรินทร์	หลักทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET2008)
19-21 พฤศจิกายน 2551, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

EENET2008

รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
นิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นิติโรจน์	พรสุวรรณาเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิพนธ์	สุนทรหุต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นิพนธ์	วงศ์ทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
บุญช่วย	เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประเสริฐ	คือนันทน์ไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ประทีป	แสงสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ประวิช	เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปราโมทย์	อนันต์วราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เพ็ญศักดิ์	อังกา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันธ์	พิริยวราธรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พิชัย	อู่เปล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พูนศรี	วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ภาณุมาศ	แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มนตรี	งาเดช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มังกร	ศิริจันทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มาณฑ	ชนะคำดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มีชัย	แจ่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ยุทธนา	ข้าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รัก	สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วันชัย	ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิเชียร	หทัยรัตน์ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิชัย	ผลุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิจิต	สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วินัย	เมธาวิทิศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิรัตน์	นักรองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิวัฒน์	เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วีระ	ธันยภักย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วีระชัย	จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ศรีศักดิ์	น้อยไร่ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

EENE'2008

รายชื่อผู้พิจารณาบทความ



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
ศักดิ์ระวี	ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศิริชัย	แดงอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศิริชัย	ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ศุภวุฒิ	เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมเกียรติ	ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมชัย	หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมชาย	เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมนึก	เครื่องสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สยาม	ประจูดหะศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สรรรพผล	กุ่มทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สันติภาพ	โคตรทะเล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สาคร	ปิ่นดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สามารถ	ยะซียงคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สามารถ	ยะซียงคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สายชล	ซุดจือจิ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สุชุม	จุฬาดุรศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุชาติ	จันทร์จรมานิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุทธินันท์	สันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สุรศักดิ์	อู่สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรสิทธิ์	แสนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สุรียา	แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุวัลยา	ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อโนชา	รุ่งโรจน์วิมลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
องอาจ	แสดใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อนันต์	โสภิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อัศวิน	แก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อากาศพล	มหาวิระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อำนาจ	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อุเทน	ก้านาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อุดม	เครื่องเทพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
อุรา	คันมีแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

PSE06	<p>ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลแบบฝังตัวเพื่อการประมาณตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร</p> <p>วณพันธ์ วิษุฒิ¹ สุขสันต์ นุ่นงาม²</p> <p>¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ</p> <p>²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</p>	25
PSE07	<p>แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโปรแกรม MATLAB-SIMULINK</p> <p>จิระพงศ์ ศรีวิชัย</p> <p>มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี</p>	29
PSE08	<p>Matlab/Simulink Based on $\alpha\beta$ Modeling of Self-Excited Induction Generator</p> <p>Y. Kumsuwan¹ W. Srirattanawichai² S. Premrudeepreechacharn²</p> <p>¹Rajamangala University of Technology Lanna Tak Campus,</p> <p>²Chiang Mai University,</p>	33
PSE09	<p>การวัดสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรม VEE PRO</p> <p>ทินิจ จิตจริง ประพนธ์ ขุมทอง วิรพงษ์ ขุนมนตรี</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p>	39
PSE10	<p>การแก้ปัญหา Ferro Resonance ขณะ Back Start ที่ โรงไฟฟ้าระยอง RY-C Block No. 1</p> <p>สุระ โยธิน เกาะโพธิ์ วันชัย ทรัพย์สิงห์¹ ธนพงศ์ สุวรรณศรี²</p> <p>ไพศาล บุญเยี่ยม¹</p> <p>¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p> <p>²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</p>	43
PSE11	<p>การออกแบบบดนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจิกายางธรรมชาติ</p> <p>พุดพิงษ์ เรืองพิศาล สมชาย เบียนสูงเนิน นิตพิงศ์ ปานกลาง</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p>	47
PSE12	<p>การประมาณสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการติดตั้ง PMU แบบถ่วงน้ำหนักน้อยที่สุด</p> <p>รัฐทาน นามศิริ¹ ไพศาล บุญเยี่ยม¹ สมชัย หิรัญวโรดม¹ ธวัช เกิดชื่น²</p> <p>¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p> <p>²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ</p>	51

การแก้ปัญหา Ferro Resonance ขณะ Back Start ที่ โรงไฟฟ้าระยอง RY-C Block No. 1
Investigation of ferroresonance when back start at Rayong combine cycle power plant RY-C block No. 1

นายสุระโยธิน เกาะโพธิ์¹, ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์², ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี³ นายไพศาล บุญเยี่ยม⁴
¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ³มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
⁴มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าระยองเป็นโรงไฟฟ้าหนึ่งที่ต้อง Back Start และจ่าย โหลดใน Zone ภาคตะวันออก เมื่อเกิดเหตุการณ์ Back-out ดังนั้นการ ทดสอบ Back start และการทำ Back-out restoration จึงได้ถูกบรรจุอยู่ใน แผนงานพิเศษประจำปี 2550 ซึ่งได้ทำการทดสอบกับโรงไฟฟ้าระยอง เมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2550 แต่ปรากฏว่าไม่ผ่านการทดสอบ เนื่องจากเกิด Fault ภายในโรงไฟฟ้า ซึ่งคาดว่าเกิดจากปัญหา Ferroresonance ของ Reserve auxiliary transformer เนื่องจากมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลง ก่อนที่ Ground over current relay ทำงาน เพื่อเป็นการป้องกัน และหา แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการทดสอบอีกครั้ง เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2550 โดยจำลองเหตุการณ์ให้เหมือนกัน ซึ่งในบทความนี้ จะบรรยายถึง การวิเคราะห์สาเหตุ ด้วยโปรแกรมประเภท EMTP ที่ชื่อ PSCAD/EMTDC และ ATP Analyzer, การทดสอบในภาคสนาม, ผลของ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ และแนวทางการแก้ไข จากผลการทดสอบ และ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ พบว่ามีสัญญาณ Ferroresonance ที่ Reserve Auxiliary Transformer จากปัญหาดังกล่าวไม่ได้ทำให้หม้อแปลงเสียหาย ในทันที แต่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง แนวทางการแก้ไขคือ ให้ หลีกเลี่ยงการต่อวงจรในระบบ เพื่อไม่ให้มีพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดสภาวะ Ferroresonance

คำสำคัญ: หม้อแปลงสำรองสำหรับใช้ในโรงไฟฟ้า
เฟอร์โรเรโซแนนซ์, แบคอัพรีสตอเรชัน, ATP/EMTP

Abstract

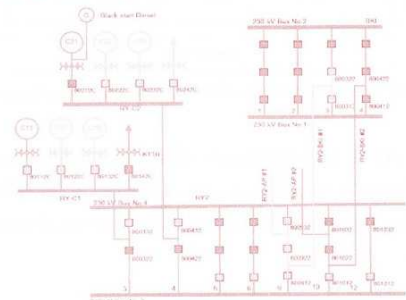
When Back-out is occurred in Eastern zone of Thailand, Rayong Power plant must use Back Start for plant start up and energize load. Test for black start and Back-out restoration is necessary to contain in special work plan in 2007 for Rayong power plant. This test was done on March 11, 2007. Rayong power plant did not pass the test cause of electrical fault. This fault may be happened from Ferroresonance of Reserve auxiliary transformer because there is abnormal humming at the transformer before ground over current relay worked. On July 14, 2007, there was a simulation test to find the way to protect and solve this problem. This proposal explains cause analysis

with program PSCAD/EMTDC and ATP Analyzer, field test, electrical response and solving method. The simulation test shows that there is Ferroresonance at reserve auxiliary transformer. Ferroresonance did not damage transformer immediately but this decreased life time of the transformer. Solving method is to avoid connecting circuit in the system which is consisted of Ferroresonance parameters.

Keyword: Reserve Auxiliary Transformer
Ferroresonance, Back-out restoration, ATP/EMTP

1. บทนำ

จากปัญหาการทดสอบ Back-out restoration ที่โรงไฟฟ้า ระยอง โดยมีเป้าหมายคือ Black Start RY-C21 โดยใช้ Supply จาก Emergency Diesel Generator และจ่ายไฟฟ้าให้ RY-C11 Start-up (Full Speed No Load) จากนั้นให้ RY-C21 Charge Line ผ่านสายส่ง 230 kV ไป สฟ บ้านค่าย (Substation BK1) แล้ว Manual Sync เข้ากับระบบหลัก และทดสอบการจ่ายไฟของ RY-C21 โดย Charge Line ผ่านสายส่ง 230 kV ไป สฟ ระยอง 2 (Substation RY2) แล้วจ่ายให้ สฟ อ่าวไผ่ (Substation AP) และ สฟ บางปะกง (Substation BPK) ดังแสดงในรูปที่ 1 ผลปรากฏว่าไม่สำเร็จเนื่องจาก Plant Trip ไม่สามารถจ่ายโหลดได้ ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ Back-out ขึ้นใน Zone ภาคตะวันออก ขึ้นจริงจะ ส่งผลกระทบโดยตรงกับความมั่นคง และความเชื่อถือได้ เนื่องจากมี โรงงานอุตสาหกรรม อยู่ในจำนวนมาก

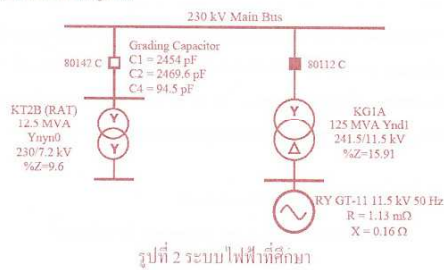


รูปที่ 1 แสดงภาพเส้นเคเบิลของ โรง.ระยอง Block No.1,2 และ Substation

บทความนี้จึงนำเสนอสาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ไขที่สามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ โดยวิธีการทดสอบภาคสนาม และจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP

2. รายละเอียดทางไฟฟ้า และจุดวัดสัญญาณ

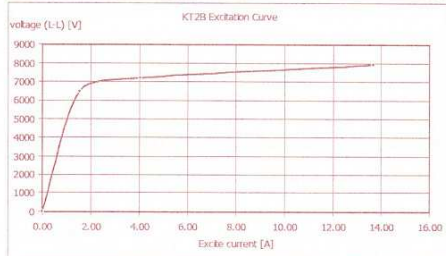
พารามิเตอร์ของระบบที่จะศึกษาแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ในรูปที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ของระบบ และค่า Grading Capacitor ของ Circuit Breaker ส่วนในรูปที่ 3 เป็น V-I Curve ของหม้อแปลง ซึ่งได้จากการทดสอบจากผู้ผลิต



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษา

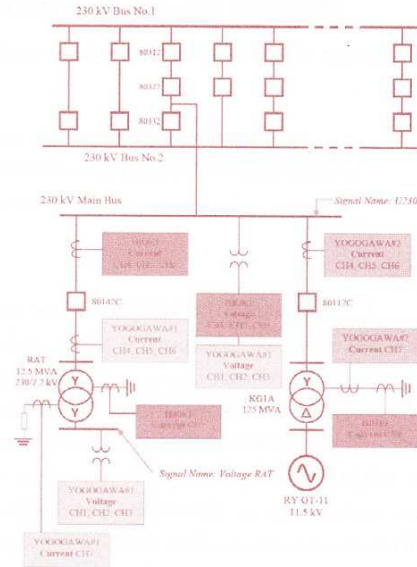
Excitation Test ของหม้อแปลง Reserve Auxiliary Transformer

I [A]	U [pu]	Voltage Line-Line [V]
0.00	0.0	0
1.53	0.9	6480
4.03	1.0	7200
13.67	1.1	7920



รูปที่ 3 V-I Curve ของหม้อแปลง Reserve Auxiliary Transformer

รูปที่ 4 แสดงจุดวัดสัญญาณ เนื่องจากไม่มีหม้อแปลง แรงดันทางด้าน 230 kV ของ Reserve Auxiliary Transformer (RAT) ดังนั้น จึงใช้หม้อแปลงแรงดันด้าน 7.2 kV ในการวัดแรงดันคลกร่วมขั้วของหม้อแปลง



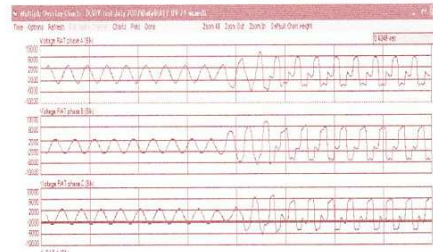
รูปที่ 4 ตำแหน่งจุดวัดสัญญาณแรงดันและกระแส

3. ผลการทดสอบ Ferroresonance และผลการจำลองโดย PSCAD / EMTDC and ATP Analyzer

การทำสอบ (Field Test) ระบบไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าระยอง Unit No.1 สามารถสรุปการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

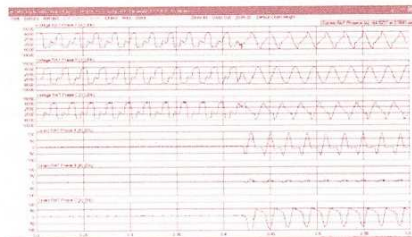
1. การทดสอบ Ferroresonance ที่ Reserve Auxiliary Transformer (RAT) โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 230 kV จากระบบหลัก
2. การทดสอบ Ferroresonance ที่ Reserve Auxiliary Transformer (RAT) โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 230 kV จากโรงไฟฟ้าระยอง RY-C11

ในขั้นตอนทดสอบทั้ง 2 ขั้นตอน จะทำ การเปิดวงจร (Open Circuit Breaker หมายเลข 80142C) เพื่อให้เกิด Ferroresonance ที่ Reserve Auxiliary Transformer (RAT) ในการทดสอบพบว่า Ferroresonance ไม่ได้ เกิดขึ้นทันทีที่มีการเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C แต่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับ Tap ของหม้อแปลงขึ้น ผลการวัด แสดง (วัดทางด้าน 7.2 kV (Secondary) ในรูปที่ 5. ซึ่งเป็น การปรับ Tap หม้อแปลงหลังจากการเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C จาก Tap 4 เป็น Tap 5

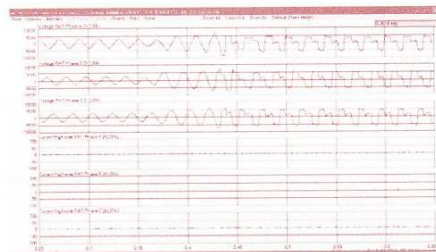


รูปที่ 5. การเกิด Ferroresonance เมื่อมีการปรับ Tap ของหม้อแปลง (Tap 4 ไป Tap 5)

ในรูปที่ 6 เป็นผลการวัดเมื่อเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C ซึ่งจะเห็นเสมือนการจ่ายไฟให้กับ Reserve Auxiliary Transformer (RAT) ดังนั้นจะพบ Inrush Current ของหม้อแปลงนี้ซึ่งมีค่ายอดของกระแสไฟประมาณ 100 A ที่เฟส A และเฟส C รูปที่ 9 เป็นการวัดสัญญาณ ต่อจากเหตุการณ์ในรูปที่ 5 เมื่อเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C อีกครั้ง (ขณะนั้น Tap อยู่ตำแหน่งที่ 5) จะยังไม่มีเกิด Ferroresonance จนมีการปรับ Tap มาที่ตำแหน่งที่ 6 จะเห็นว่า รูปคลื่นแรงดันมีเฟส ตรงข้ามกับรูปที่ 5



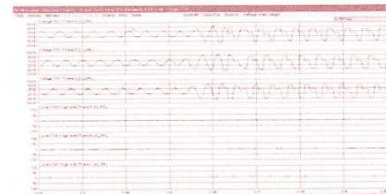
รูปที่ 6. Inrush Current เมื่อปิดวงจรด้วย Circuit Breaker หมายเลข 80142C



รูปที่ 7. การเกิด Ferroresonance เมื่อมีการปรับ Tap ของหม้อแปลง (Tap 5 ไป Tap 6)

ในรูปที่ 8 เป็นผลการวัด เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าที่ 230 kV Main Bus ด้วย RY-GT-11 แล้วเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C เมื่อเปิด Circuit

Breaker จะยังไม่มีเกิด Ferroresonance ทั้งนี้จนกระทั่งมีการปรับ Tap ของหม้อแปลง ในรูปนี้เป็นการปรับ Tap จากตำแหน่งที่ 9 เป็น 10 จะเห็นว่า รูปคลื่นแรงดันคล้ายกับ รูปคลื่นในรูปที่ 7

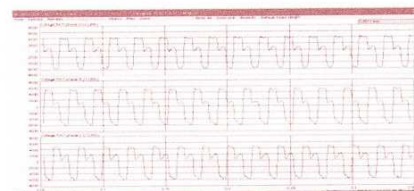


รูปที่ 8. การเกิด Ferroresonance เมื่อมีการปรับ Tap ของหม้อแปลง (Tap 9 ไป Tap 10)

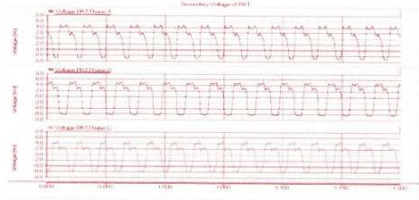
ผลการจำลองระบบไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และ ATP Analyzer พบว่ารูปแบบของรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อม Reserve Auxiliary Transformer (RAT) มีได้ 3 รูปแบบ ประกอบด้วย รูปคลื่นแรงดันลักษณะเหลี่ยมไม่สมมาตร (รูปแบบที่ 1), รูปคลื่นแรงดันลักษณะเหลี่ยมไม่สมมาตรที่มีเฟสตรงข้ามกับแบบที่ 1 (รูปแบบที่ 2) และรูปคลื่นลักษณะคล้าย Sinusoidal ที่มียอดแหลม (รูปแบบที่ 3) รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการวัดและการจำลองในรูปแบบที่ 1 และ 2 แสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 ตามลำดับ สำหรับรูปแบบที่ 3 นั้นพบเห็นขณะทำการวัดแต่ไม่มีการบันทึกข้อมูลไว้ จึงแสดงเฉพาะผลการจำลองไว้ในรูปที่ 11 เท่านั้น



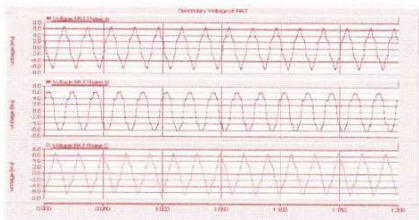
รูปที่ 9. ลักษณะรูปคลื่นแรงดันคร่อมหม้อแปลงรูปแบบที่ 1 ผลการวัด (รูปบน) และผลการจำลองระบบ (รูปล่าง)



รูปที่ 10. รูปคลื่นแรงดันคร่อมหม้อแปลงรูปแบบที่ 2 ผลการวัด (รูปบน)

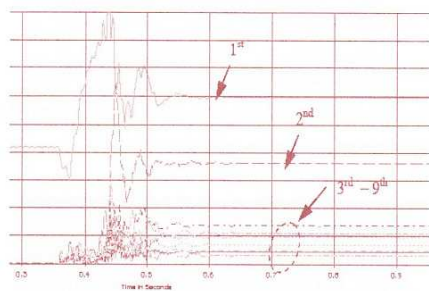


รูปที่ 10. ลักษณะรูปคลื่นแรงดันคร่อมหม้อแปลงรูปเบบที่ 2 ผลการจำลองระบบ (รูปล่าง)

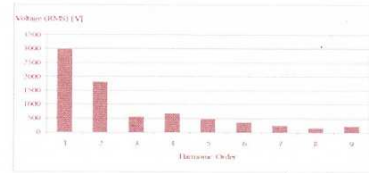


รูปที่ 11. ลักษณะรูปคลื่นแรงดันคร่อมหม้อแปลงรูปเบบที่ 3 (ผลการจำลองระบบ)

เมื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของ Harmonic ต่างๆ ที่อยู่ในรูปคลื่นแรงดันจากการวัดในรูปที่ 5 (เปลี่ยน Tap จากตำแหน่ง 4 เป็น 5) และรูปที่ 9 (เปลี่ยน Tap จากตำแหน่ง 5 เป็น 6) พบว่ามี Harmonic อันดับที่ 2, 3, 4, 5, 6, เป็นจำนวนมากโดย Harmonic อันดับที่ 2 มีค่าประมาณ 2 ใน 3 ของค่า Fundamental เมื่อระบบ เข้าสู่ Ferroresonance แรงดันที่ขั้วหม้อแปลง (Secondary Side) ทั้งสองกรณีมีค่าประมาณ 2 kV เมื่อปลด Circuit Breaker หมายเลข 80142C และเมื่อมีการปรับ Tap Position จากตำแหน่งที่ 4 ไปตำแหน่งที่ 5 (หรือจากตำแหน่ง 5 ไปตำแหน่งที่ 6) จะทำให้แรงดันที่ขั้วหม้อแปลงเพิ่มไปที่ 3 kV และมี Harmonic อื่นๆ ปนอยู่ซึ่งแสดงในรูปที่ 12 และแสดง Spectrum ของ Harmonic ต่างๆ ในรูปที่ 13



รูปที่ 12. Harmonic ของรูปคลื่นแรงดันของ Phase A (Secondary ของ RAT, เฟส A ของรูปที่ 7) เมื่อเปลี่ยน Tap Position จาก 5 ไป 6



รูปที่ 13 Spectrum ของอันดับ Harmonic ของรูปคลื่นแรงดันเฟส A (Secondary ของ RAT) เมื่อเปลี่ยน Tap Position จาก 5 ไป 6

4. สรุป และข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทดสอบภาคสนาม และการจำลองด้วยโปรแกรมให้ผลยืนยันว่า ระบบที่ศึกษาจะเกิดปรากฏการณ์ Ferroresonance ได้ทันที แต่ในทางปฏิบัติพบว่า Reserve Auxiliary Transformer (RAT) จะเกิด Ferroresonance เมื่อมีการปรับ Tap Position อย่างไม่ถูกต้อง ผลการวิเคราะห์ สามารถยืนยันได้ว่าระบบนี้สามารถเกิด Ferroresonance เมื่อมีการเปิด Circuit Breaker หมายเลข 80142C เนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบ (V-I Curve และ Grading Capacitor) ทำให้ระบบไฟฟ้า ทำงานที่จุด Ferroresonance และเมื่อหม้อแปลงเข้ามาทำงานในช่วง Ferroresonance แล้วจะไม่สามารถกลับมาทำงาน ในรูปแบบปกติได้ (Non-Ferroresonance)

วิธีการแก้ไขปัญหานี้ทางปฏิบัติ ที่ไม่ต้องลงทุนเพิ่มเติมคือ ให้พิจารณาหลีกเลี่ยงการ De-energize หม้อแปลงตัวนี้ หากไม่มีความจำเป็น หรือในกรณีที่จำเป็นต้องการใช้ Reserve Auxiliary Transformer จำขั้วกระแสไฟฟ้าให้โรงไฟฟ้าเป็นเวลานาน ให้ปลดไบเมต (Disconnecting Switch) หมายเลข 80141A ตามการปลด Circuit Breaker หมายเลข 80142C จะสามารถป้องกันไม่ให้เกิด Ferroresonance ได้เช่นกัน

ปรากฏการณ์ Ferroresonance ที่เกิดขึ้นทำให้มีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลง แต่ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงอย่างรุนแรง แต่จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงได้ เนื่องจากการสั่นของแกนเหล็ก

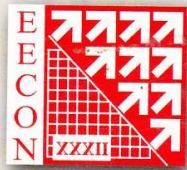
เอกสารอ้างอิง

[1] B.Vahidi, R. Shariati, S. Ghaghaheh Zadeh, E. Abedi "Ferroresonance Overvoltage Investigation in Wye – Wye Transformer on Transmission System by Using MATLAB"

[2] Surya Santoso, Roger C. Dugan, Thomas E. Grebe, Peter Nedwick "Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution" IPST01 Paper034, 2001

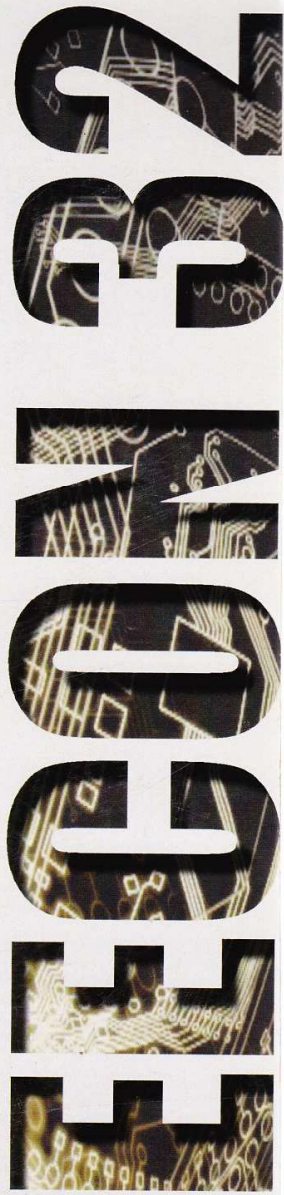
[3] Dr. D. A. N. Jacobson, Dr. R. W. Menzies "Investigation of Station Service Transformer Ferroresonance in Manitoba Hydro's 230-kV Dorsey Converter Station"

[4] M. Sanaye-Pasand, R. Aghazadeh "Capacitive Voltage Substations Ferroresonance Prevention Using Power Electronic Device"



PROCEEDINGS VOL. 2

CM - Communication
EL - Electronics
DS - Digital Signal Processing
PH - Photonics
GN - General Engineering and Science
BE - Biomedical Engineering



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๒
๒๘-๓๐ ตุลาคม ๒๕๕๒ โรงแรมทวารวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี

32nd Electrical Engineering Conference
28-30 October 2009 Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand



จัดการประชุมโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีการจัดการระบบสารสนเทศ
และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32

Reviewers

Adisorn Leelasantitham
 Akekachai Deesiri
 Amnat Suksri
 Amnoiy Ruengwaree
 Anuchit Charean
 Anuree Lorsawatsiri
 Anuwat Jangwanitert
 Aphibal Pruksanubal
 Apichai Bhatranand
 Apirada Namsang
 Apirat Siritaratiwat
 Arkhom Moungkhaodaeng
 Arporn Teeramongkonrasmee
 Arthit Sode-Yome
 Athikom Roeksabutr
 Benjamas Panomruttanarug
 Boonchuay Supmonchai
 Boonlert Suechoey
 Boonruk Chipipop
 Boonsri Kaewkham-ai
 Boonyang Plangklang
 Boonying Knobnob
 Bundhit Eua-arporn
 Bundiit Thipakorn
 Bunlung Neammanee
 Chai Chompoo-inwai
 Chainarong Buttapeng
 Chainarong Klimanee
 Chaiwut Chat-Uthai
 Chaiyo Thammarat R.T.N.
 Chakkaphong Suthaputchakun
 Chanatip Tumrongwittayapak
 Chanchai Thaijiam
 Chanchana Tangwongsan
 Chanin Wissawinthanon
 Chanuan Uakarn
 Chaodit Aswakul
 Charnchai Pluempitiwiriyawej
 Chatchai Neatpisarnvanit
 Chatchai Suppitaksakul
 Chatchai U-thaiwasin
 Chatree Mahatthnajatuphat
 Cherdkul Sopavanit
 Chiranut Sa-ngiamsak
 Chirasak Sinsukudomchai
 Chirasak Songboonkaew
 Chokchai Sangdao

Organizations

University of the Thai Chamber of Commerce
 Sripatum University
 Khon Kaen University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Kasem Bundit University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Khon Kaen University
 Srinakharinwirot University
 Chulalongkorn University
 Siam University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Chulalongkorn University
 South-East Asia University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Chiang Mai University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Chulalongkorn University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 University of the Thai Chamber of Commerce
 Srinakharinwirot University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 South-East Asia University
 Bangkok University
 Kasem Bundit University
 Srinakharinwirot University
 Chulalongkorn University
 Chulalongkorn University
 Kasem Bundit University
 Chulalongkorn University
 Chulalongkorn University
 Mahidol University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 South-East Asia University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Chulalongkorn University
 Khon Kaen University
 South-East Asia University
 Thonburi University
 Mahanakorn University of Technology



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32

Reviewer

Pakorn Kaewtrakulpong
 Panhathai Buasri
 Parnjit Damrongkulkamjorn
 Pasawee Srimode
 Pasu Kaewplung
 Patamaporn Sripadungtham
 Peerapol Jirapong
 Peerapol Yuvapoositanon
 Petch Nantivatana
 Phaiboon Booppha
 Phichet Moungnoul
 Phoemphun Oothongsap
 Phongsuk Amphap
 Phumin Kirawanich
 Pichaya Tandayya
 Pinit Jitjing
 Pinit Kumhom
 Pinit Thepsatorn
 Pisit Wisitmeteeakorn
 Pisit Phokharatkul
 Piya Warabuntaweekun
 Pongsatorn Sedtheetorn
 Poonlap Lamsrichan
 Pornchai Supnithi
 Pornchai Chanyagorn
 Prajuab Pawarangkoon
 Pranchalee Rattanasakornchai
 Prayoot Akkaraekthalin
 Preecha Kocharoen
 Punyaphat Phumiphak
 Rangspan Marukatat
 Ravee Phromloungsri
 Rungsimant Sitdhikorn
 Sakchai Thipchaksurat
 Sallitip Sinthusonthishat
 Samphan Phrompichai
 Samroeng Hintamai
 Sansanee Auephanwiriyaikul
 Sanya Khunkhao
 Sarawan Wongsa
 Sarawuth Chaimool
 Sermsak Uatrongjit
 Sirichai Dangeam
 Siripong Chaysin

Organizations

King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Khon Kaen University
 Kasetsart University
 Sripatum University
 Chulalongkorn University
 Kasetsart university
 Chiang Mai University
 Mahanakorn University of Technology
 Sripatum University
 Kasem Bundit University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Mahidol University
 Prince of Songkla University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Srinakharinwirot University
 Mahanakorn University of Technology
 Mahidol University
 Bangkok University
 Mahidol University
 Kasetsart University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Mahidol University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Sripatum University
 Mahanakorn University of Technology
 Mahidol University
 Udon Thani Rajabhat University
 Mahanakorn university of technology
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Mahanakorn University of Technology
 Mahanakorn University of Technology
 Sripatum University
 Chiang Mai University
 Sripatum University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Chiang Mai University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Srinakharinwirot University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32

Reviewers

Choompol Antarasena
 Chuttchaval Jeraputra
 Chuwong Phongcharoenpanich
 Daranee Hormdee
 Deacha Puangdownreong
 Decha Wilairat
 Dew Koolpiruck
 Duang-arthit Srimoon
 Dulpichet Rerkpreedapong
 Ekachai Leelarasme
 Ekapon Siwapornsathain
 Ekarin Vasansong
 Issarachai Ngamroo
 Ittipong Chaisayun
 Jakkree Srinonchat
 Jirasak Vilasdechanon
 Jukkrit Tagapanij
 Kamon Jirasereeamornkul
 Kanat Poolsawasd
 Kanjana Pattanaworapan
 Keerati Chayakulkheeree
 Khatathap Swatdipisal
 Kitiphon Chitsakul
 Kittiphong Meesawat
 Kittisak Tripatpornchai
 Kobchai Dejhan
 Kosin Chamnongthai
 Kunthphong Srisathit
 Lunchakorn Wuttisittikulij
 Manop Wongsaisuwan
 Miti Ruchanurucks
 Mongkol Konghirun
 Montri Suwanapingkarl
 Montri Karnjanadecha
 Naebboon Hoonchareon
 Narong Buabthong
 Narong Yoothanom
 Nattavut Chayavanich
 Natthaphob Nimpitiwan
 Nimit Boonpirom
 Niruth Prombutr
 Nisachon Tangsangiumvisai
 Noppadol Wanichworanant
 Nopporn Leeprechanon
 Nuntiya Chaiyabut
 Ouen Pinngern
 Paisan Boonchiam

Organizations

Chulalongkorn University
 Mahidol University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Khon Kaen University
 Faculty of Engineering, South-East Asia University
 Mahidol University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Rangsit University
 Kasetsart University
 Chulalongkorn University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 South-East Asia University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Chiang Mai University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Mahidol University
 Bangkok University
 Sripatum University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Khon Kaen University
 Rangsit University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 King MONGKUT'S UNI OF TECH Thonburi
 Mahanakorn University of Technology
 Chulalongkorn University
 Chulalongkorn University
 Kasetsart University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Prince of Songkla University
 Chulalongkorn University
 Thammasat University
 Sripatum University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Bangkok University
 Sripatum University
 Mahidol University
 Chulalongkorn University
 Mahidol University
 Thammasat University
 Bangkok University
 Ramkhamhaeng University
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32

Reviewers

Siroj Sirisukprasert
 Sirivat Poonvasin
 Sirivit Taechajedcadarungsri
 Siriwich Tadsuan
 Somboon Nuchprayoon
 Somchai Biansoongnern
 Somchai Hiranvarodom
 Somchart Chokchaitam
 Somchat Jiriwibhakorn
 Soming Thainirni
 Sommart Sang-Ngern
 Somnida Ratanapanachote
 Somporn Sirisumrannukul
 Somsak Walairacht
 Somyot Kaitwanidvilai
 Songkran Kantawong
 Songphol Kanjanachuchai
 Suchada Tantisatirapong
 Suksun Nungam
 Sulee Bunjongjit
 Sumate Naetiladdanon
 Sumrit Hungsasutra
 Suneat Pranonsatit
 Suntorn Witosurapot
 Supachai Vorapojpisut
 Supakit Chotigo
 Supaporn Kiattisin
 Supatana Auethavekiat
 Surachai Chaitusaney
 Surakarn Duangphasuk
 Surapan Airphaiboon
 Surapol Jantorn
 Suratose Tritilanunt
 Suree Pumrin
 Surin Khomfoi
 Surin Ngaemngam
 Suthee Rukkaphan
 Suwat Pattaramalai
 Tanin Duangjan
 Tasanee Chayavanich
 Tatcha Chulajata
 Teera Rerkmaneewan
 Teeravisit Laohapensaeng
 Teratam Bunyagul

Organizations

Kasetsart University
 Kasetsart University
 Khon Kaen University
 South-East Asia University
 Chiang Mai University
 Rajamangala University of Technology Thayaburi
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Thammasat University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Kasetsart University
 Mahanakorn University of Technology
 Mahidol University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok University
 Chulalongkorn University
 Srinakharinwirot University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Khon Kaen University
 Kasetsart University
 Prince of Songkla University
 Thammasat University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 University of the Thai Chamber of Commerce
 Chulalongkorn University
 Chulalongkorn University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Sripatum University
 Mahidol University
 Chulalongkorn University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Kasem Bundit University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Srinakharinwirot University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Mahidol University
 Kasem Bundit University
 Mahanakorn University of Tecgnology
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32

Reviewers

Thanadol Pritranan
 Thanapat Promwattanapakdee
 Thanaphat Sittithumwat
 Thavatchai Tayjanant
 Theerayod Wangtong
 Thumrongrat Amornraksa
 Toempong Phetchakul
 Umaporn Thongrak
 Vech Vivek
 Veerachai Malyavej
 Viahai Surapatana
 Viboon Chunkag
 Vichai Saelee
 Vijit Kinnares
 Virote Pirajnanchai
 Vorapong Silaphan
 Wanchai Chanlaipol
 Wanchai Chimchavee
 Wanchai Pijitrojana
 Wanchai Subsingha
 Wanchak Lenwari
 Watcharachai Wiriyasuttiwong
 Weerachai Asawamethapant
 Weerapun Rungseevijitprapa
 Wekin Piyarat
 Werapon Chiracharit
 Werasak Kurutach
 Wichit Krueasuk
 Wijitra Petchakit
 Wilaiporn Lee
 Wipavan Narksarp
 Wuthiporn loetwassana
 Wutthichai Polwisate
 Yongyuth Naras
 Youthana Kulvitit

Organizations

Mahidol University
 Sripatum University
 Siam University
 Chulalongkorn University
 Mahanakorn University of Technology
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Sripatum University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Mahanakorn University of Technology
 Kasetsart University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 South-East Asia University
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 Mahanakorn University of Technology
 Sripatum University
 University of the Thai Chamber of Commerce
 Thammasat University, Rangsit Campus
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Srinakharinwirot University
 Thammasat University
 Chulalongkorn University
 Srinakharinwirot University
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Mahanakorn University of Technology
 Sripatum University
 Walailak University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Siam University
 Mahanahorn University of Technology
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
 Siam University
 Chulalongkorn University

สารบัญ

GN 013	ระบบการศึกษาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานอย่างยั่งยืน วันชัย ฉิมฉวี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	1223
GN 014	การระบุขอบเขตหมู่บ้านของระบบสายป้อน 22 kV โดยการจำแนกประเภทจากแถบสีของรูปภาค ศศิยา ลือมงคล และ ธนัชชัช กุลวรวาณิชพงษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	1227
GN 015	การวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดกับหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า สุระโยธิน เกาะโพธิ์, วันชัย ทรัพย์สิงห์ ¹ , ธนพงศ์ สุวรรณศรี ² และ ไพศาล บุญเจียม ¹ ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	1231
GN 016	การประหยัดพลังงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในโมบายโนดไร้สายด้วยโหมดการทำงานแบบไอเดียล ธรรมกร ครองไทรภพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	1235
GN 017	Fabrication of In _{0.15} Ga _{0.85} As Nanohole Templates on GaAs(001) Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow and Somchai Ratanathamphan Chulalongkorn University	1239
GN 018	การแยกแยะชนิดและควบคุมคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้จุกอเล็กทรอนิกส์ระบบเปิด สมชาย เปาะทองคำ, จักรี ศรีนนท์ฉัตร และ ชนะ จันทร์ศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	1243
GN 019	การออกแบบและสร้างเครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิตโดยใช้เทคนิคแรงดันสูงความถี่สูง นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร ¹ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ² ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ² สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	1247

การวิเคราะห์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่เกิดกับหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า

Analysis of Ferroresonance Occurring with Reserve Auxiliary Transformer of Power Plant

สุระ โยธิน เกาะ โห้, วันชัย ทรัพย์สิงห์¹, ธนพงศ์ สุวรรณศรี² ไพศาล บุญเยี่ยม¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพินุลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ขณะทำการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์กรณีไฟฟ้าดับ จากการทดสอบภาคสนาม และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ขณะทำการปิดวงจรสวิตช์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูง และมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของเฟอร์โรเรโซแนนซ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน กับตัวเหนี่ยวนำแบบไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และนำระบบให้กลับคืนสู่สภาวะปกติได้ แนวทางการแก้ไขในทางปฏิบัติทำได้โดยการพิจารณาค่าความเก็บประจุ โดยมีกรเปลี่ยนแปลงค่าเก็บประจุในสภาวะการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นกรลดกระแสที่ไหลผ่านวงจรและการจัดลำดับขั้นตอนของการปฏิบัติงานใหม่

คำสำคัญ: เฟอร์โรเรโซแนนซ์, หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า, การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ, การนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ, ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

Abstract

This article concerns a problematic analysis of combine cycle power plant while performing "black start" and "black out restoration" with unsuccessful testing. Generator was disconnected by electrical protection system. Form field test and computer simulation, the problem was found during closing a circuit breaker to energize a switchyard. This problem leads to over voltage and electrical signal distortion during closing generator circuit breaker. This is caused by a ferroresonance phenomena between a grading capacitor of circuit breaker and non linear reactance of reserve auxiliary transformer resulting in black start failure during black out. The practical solution can be achieved by avoiding capacitance parameters that introducing a ferroresonance. This the procedure of switching operation should be carefully rearranged.

Key words: Ferroresonance, Reserve Auxiliary Transformer, Black Start, Black out restoration, Grading Capacitor

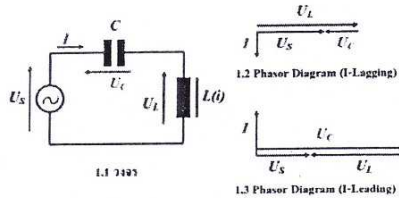
1. บทนำ

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมแห่งหนึ่งขนาด 1200 MW ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยและมี Emergency Diesel Generator (EDG) ติดตั้งอยู่สามารถเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เองโดยไม่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ได้ถูกเลือกให้เป็นโรงไฟฟ้าหนึ่งที่ทำหน้าที่เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายโหลดให้กับกลับสู่สภาพปกติในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ ดังนั้นการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติจึงได้ถูกบรรจุอยู่ในแผนงานพิเศษของโรงไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยการ Switching Bus 230 kV เพื่อย้าย Station Service ไปรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าอื่นแทน แล้วจึงทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนถึง Full Speed No-Load โดยใช้แหล่งจ่ายจาก EDG จากนั้นให้ Charge สายส่ง 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆตามที่แผนกำหนด ในระหว่างการทดสอบพบปัญหาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกด้วยรีเลย์ระบบป้องกันแบบกระแสเกินลงดิน (SIGIN) ขณะทำการปิดวงจรสวิตช์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายไฟให้กับ Bus 230 kV ในลานไฟฟ้าจากเหตุการณ์ที่เกิด ส่งผลกระทบโดยตรงกับความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบในกรณีเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ไขที่สามารถนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ โดยวิธีการทดสอบภาคสนาม และจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. ปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์

เฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจาก เรโซแนนซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Resonance) ของระบบไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นตัวต้านทานขนาน (Shunt Reactor) แบบใช้แกนเหล็ก หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) หรือหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เมื่อตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุและต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานจะทำให้มีการแกว่งของแรงดันได้หลายๆ รูปแบบ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ในวงจรที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ดังรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการแรงดันได้ตาม (1) ซึ่งประกอบด้วยแรงดันจากแหล่งจ่าย (U_s) แรงดันที่ตัวเก็บประจุ (U_C) และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (U_L)



รูปที่ 1 วงจรสมมูล เฟอโรโรโซแนนซ์

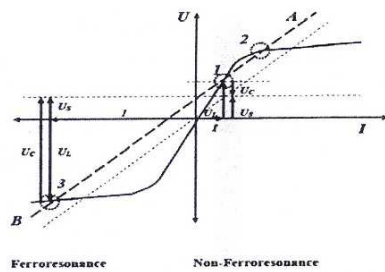
$$\vec{U}_s = \vec{U}_C + \vec{U}_L \quad (1)$$

เมื่อเฟสเซอร์ (Phasor) ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นสมการ $\vec{U}_C = -jX_C \vec{I}$ และเฟสเซอร์แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ ดังนั้น (1) จึงสามารถนำมาเขียนในเทอมของเฟสเซอร์ กระแส (1) ได้ตาม (2)

$$\vec{U}_s = -jX_C \vec{I} + \vec{U}_L \quad (2)$$

เพื่อที่จะหาจุดทำงานบน V-I Curve ของตัวเหนี่ยวนำจึงเขียน (2) ใหม่ให้อยู่ในรูปขนาดของเฟสเซอร์ตาม (3)

$$|\vec{U}_s| + |X_C \vec{I}| = |\vec{U}_L| \quad (3)$$



รูปที่ 2 แผนภาพจุดทำงานของวงจร

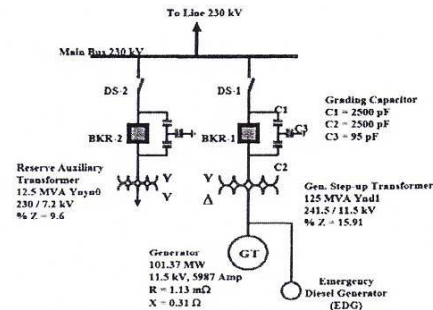
จากรูปที่ 2 เส้นสมการแรงดันของ แหล่งจ่ายกับแรงดันของตัวเก็บประจุ เส้น A-B ที่ตัด V-I Curve ของตัวเหนี่ยวนำจะมีจุดตัดของการทำงานทั้งหมด 3 แห่ง จุดที่ 1 และ 3 เป็นจุดทำงานที่เสถียร (Stable Operating Point) ส่วนจุดตัดที่ 2 เป็นจุดทำงานที่ไม่เสถียร (Unstable Operating Point) ที่จุดทำงานที่ 2 นี้หากมีการรบกวนวงจรเช่นมีกระแสในวงจรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะส่งผลให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นมากกว่า แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ทำให้หาจุดสมดุลของการทำงานไม่ได้เพราะวงจรมีจะไม่สามารถคงสภาพการล้าหลังของกระแสได้ กระแสจึงไหลกลับทิศทางดังแสดงด้วยเฟสเซอร์ ในรูปที่ 1.3 เมื่อวงจรทำงาน

ในรูปแบบเฟอโรโรโซแนนซ์ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำอาจจะสูงกว่าที่คิดหลายเท่าตัว โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจร [1-4]

โดยปกติในระบบจะมีค่า X_C น้อยกว่าค่า X_L อยู่มากดังนั้นโอกาสที่จะเกิดสภาวะเรโซแนนซ์จึงเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นยาก โดย X_C จะแปรผันกับความยาวของสายป้อนตัวนำไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ในระบบ ส่วนค่า X_L ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีลักษณะการเปลี่ยนที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่นการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 3 ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) มีค่าลดลงก็จะส่งผลให้มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์เฟอโรโรโซแนนซ์ได้ง่ายขึ้น

3. กรณีปัญหา

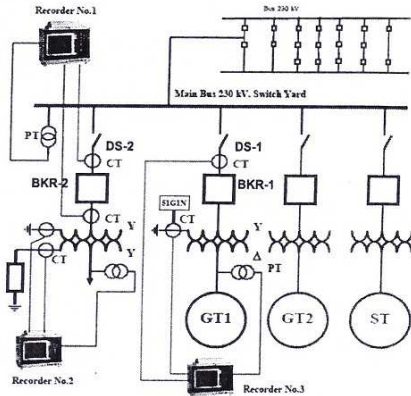
กรณีปัญหาของบทความนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งแรงดัน 230 kV ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมขนาด 1200 MW ในการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และทำการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ ได้กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องขนาด 100 MW เดินเครื่องเพื่อที่จะจ่ายไฟ 230 kV ให้กับลานโกไฟฟ้าและ Charge สายส่ง 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ โดยให้สวิทช์ไบมิด DS-1 และ DS-2 อยู่ที่สภาวะปิดวงจรและสวิทช์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูง BKR-1 และ BKR-2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจรแต่จากการปฏิบัติงานพบว่าหลังจากที่ทำการปิดวงจร BKR-1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดแรงดันสูงและมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกด้วยระบบป้องกันไฟฟ้าโดยมีรายละเอียดและโครงสร้างของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพเส้นเคเบิลของวงจรและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา

4. การทดสอบภาคสนาม

จากการพิจารณาเบื้องต้น ปัญหาอาจจะเกิดจากการเกิดแรงดันสูงเกินพิกัดและมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าเนื่องมาจากปรากฏการณ์เฟอโรโรโซแนนซ์ จนเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถทำการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และทำการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้นเพื่อใหทราบถึงสาเหตุที่แท้จริงจึงทำการทดสอบภาคสนามเพื่อตรวจวัดรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสโดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตำแหน่งจุดวัดสัญญาณของแรงดันและกระแส

เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้กำหนดขั้นตอนการทดสอบเฟอร์โรเรโซแนนซ์ที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้าในรูปที่ 4 เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆดังนี้คือ

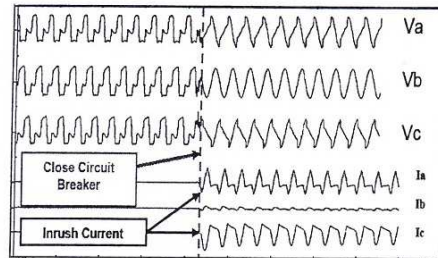
1. หยุดการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดแล้วให้ Main Bus ใช้แรงดัน 230 kV จากระบบหลักโดยให้ DS-2 อยู่ที่สภาวะปิดวงจรและสวิตซ์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูงของหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า BKR-2 อยู่ที่สภาวะทั้งเปิดวงจร และปิดวงจร แล้วให้ทำการปรับ Tap ไปที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำของระบบ
2. เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องแล้วให้ Main Bus ใช้แรงดัน 230 kV จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนโดยที่ BKR-2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจร
3. เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำการ Charge สายส่ง 230 kV จากลานไกไฟฟ้า (Switchyard) ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV ในสภาวะที่ไม่มีโหลด โดยที่ BKR-2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจรเพื่อเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำและค่าเก็บประจุรวมของระบบไฟฟ้า
4. เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำการ Charge สายส่ง 230 kV จากลานไกไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV ในสภาวะที่ไม่มีโหลด แต่ให้ BKR-2 อยู่ที่สภาวะปิดวงจรไว้ก่อนเพื่อกำจัดผลของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

จากผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 1 ให้ BKR-2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจรพบว่าเฟอร์โรเรโซแนนซ์จะไม่เกิดขึ้นทันที แต่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับ Tap ของหม้อแปลงจาก Tap 4 เป็น Tap 5 ในรูปที่ 5 และมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลง



รูปที่ 5 การเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขณะปรับ Tap หม้อแปลงจาก 4 ไป 5

ในรูปที่ 6 เป็นผลของสัญญาณไฟฟ้าเมื่อทำการปิดวงจรของ BKR-2 ในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการจ่ายไฟ 230 kV ให้กับหม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า (RAT) พบว่าเกิด Inrush Current ชั่วขณะประมาณ 100 A ที่เฟส A และเฟส C และสัญญาณเฟอร์โรเรโซแนนซ์ก็จะหมดไปและกลับสู่สภาวะปกติภายใน 4 วินาที



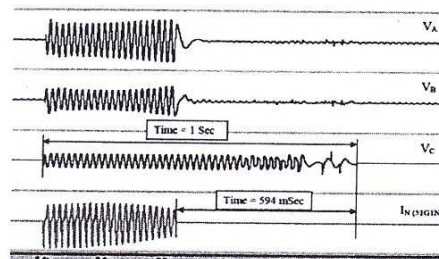
รูปที่ 6 สัญญาณของกระแสและแรงดันขณะปิดวงจร BKR-2

การทดสอบในขั้นตอนที่ 2 จะเหมือนกับขั้นตอนที่ 1 โดยแตกต่างกันที่ Bus 230 kV รับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขณะนั้น Tap ของหม้อแปลงอยู่ที่ Tap 5 พบว่า Ferroresonance จะไม่เกิดขึ้นทันที และเมื่อทำการเปลี่ยน Tap ไปจนถึง Tap 10 ปรากฏว่าเกิด Ferroresonance ดังแสดงในรูปที่ 7 และเมื่อปรับ Tap ไปที่ Tap 11 ปรากฏว่าสัญญาณดังกล่าวจะค่อยๆ หายไปภายใน 4 วินาที



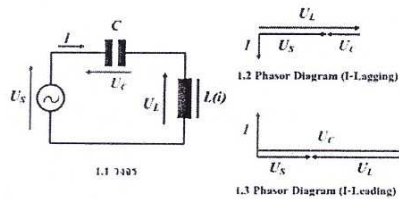
รูปที่ 7 การเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขณะปรับ Tap หม้อแปลงจาก 9 ไป 10

จากผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 3 พบว่าเมื่อทำการปิดวงจรของสวิตซ์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูง BKR-1 แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกด้วยรีเลย์ระบบป้องกันแบกกระแสเกินลนดิน (SIGIN) เนื่องจากเกิดกระแสเกินที่กักขนาด 1252 A ทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง (Gen. Step-up Transformer) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ขณะปรับ Tap หม้อแปลงจาก 9 ไป 10

ดังรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการแรงดันได้ตาม (1) ซึ่งประกอบด้วยแรงดันจากแหล่งจ่าย (U_s) แรงดันที่ตัวเก็บประจุ (U_C) และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (U_L)



รูปที่ 1 วงจรสมมูล เฟอโรโรโซแนนซ์

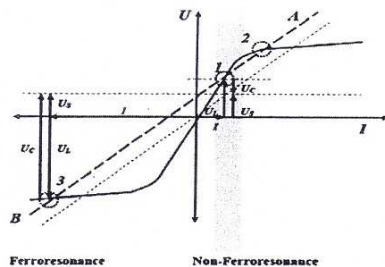
$$\vec{U}_s = \vec{U}_C + \vec{U}_L \quad (1)$$

เมื่อเฟสเซอร์ (Phasor) ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นสมการ $\vec{U}_C = -jX_C \vec{I}$ และเฟสเซอร์แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ (1) จึงสามารถนำมาเขียนในเทอมของเฟสเซอร์ กระแส (1) ได้ตาม (2)

$$\vec{U}_s = -jX_C \vec{I} + \vec{U}_L \quad (2)$$

เพื่อที่จะหาจุดทำงานบน V-I Curve ของตัวเหนี่ยวนำจึงเขียน (2) ใหม่ให้อยู่ในรูปขนาดของเฟสเซอร์ตาม (3)

$$|\vec{U}_s| + |X_C \vec{I}| = |\vec{U}_L| \quad (3)$$



รูปที่ 2 แผนภาพจุดทำงานของวงจร

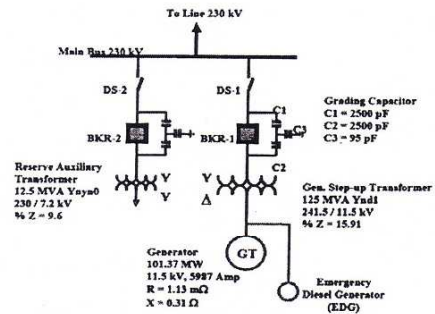
จากรูปที่ 2 เส้นสมการแรงดันของ แหล่งจ่ายกับแรงดันของตัวเก็บประจุ เส้น A-B ที่ตัด V-I Curve ของตัวเหนี่ยวนำจะมีจุดตัดของการทำงานทั้งหมด 3 แห่ง จุดที่ 1 และ 3 เป็นจุดทำงานที่เสถียร (Stable Operating Point) ส่วนจุดตัดที่ 2 เป็นจุดทำงานที่ไม่เสถียร (Unstable Operating Point) ที่จุดทำงานที่ 2 นี้หากมีการบกวนวงจรเช่นมีกระแสในวงจรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะส่งผลให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นมากกว่า แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ทำให้หาจุดสมดุลของการทำงานไม่ได้เพราะวงจรนี้จะไม่สามารถคงสภาพการสั่นของกระแสได้ กระแสจึงไหลกลับทิศทางดังแสดงด้วยเฟสเซอร์ ในรูปที่ 1.3 เมื่อวงจรทำงาน

ในรูปแบบเฟอโรโรโซแนนซ์ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะสูงกว่าที่คิดหลายเท่าตัว โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจร [1-4]

โดยปกติในระบบจะมีค่า X_C น้อยกว่าค่า X_L อยู่มากดังนั้นโอกาสที่จะเกิดสภาวะเรโซแนนซ์จึงเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นยาก โดย X_C จะแปรผันกับความยาวของสายป้อนตัวนำไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ในระบบ ส่วนค่า X_L ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีลักษณะการเปลี่ยนที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่นการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 3 ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) มีค่าลดลงก็จะส่งผลให้มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์เฟอโรโรโซแนนซ์ได้ง่ายขึ้น

3. กรณีปัญหา

กรณีปัญหาของบทความนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่กักแรงดัน 230 kV ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมขนาด 1200 MW ในการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และทำการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ ได้กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องขนาด 100 MW เดินเครื่องเพื่อที่จะจ่ายไฟ 230 kV ให้กับสถานีไฟฟ้าและ Charge สายส่ง 230 kV ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ โดยให้สวิตช์ไบมิด DS-1 และ DS-2 อยู่ที่สภาวะปิดวงจรและสวิตช์ตัดคอนไฟฟ้าแรงสูง BKR-1 และ BKR-2 อยู่ที่สภาวะเปิดวงจรแต่จากการปฏิบัติงานพบว่าหลังจากที่ทำการปิดวงจร BKR-1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดแรงดันสูงและมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกด้วยระบบป้องกันไฟฟ้าโดยมีรายละเอียดและโครงสร้างของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพเส้นเดี่ยวของวงจรและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา

4. การทดสอบภาคสนาม

จากการพิจารณาเบื้องต้น ปัญหาอาจจะเกิดจากการเกิดแรงดันสูงเกินพิกัดและมีเสียงดังผิดปกติที่หม้อแปลงสำรองจ่ายไฟของโรงไฟฟ้า เนื่องจากปรากฏการณ์เฟอโรโรโซแนนซ์ จนเป็นสาเหตุที่ไม่สามารถทำการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ และทำการนำระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุที่แท้จริงจึงทำการทดสอบภาคสนามเพื่อตรวจสอบวงจรจุดเปลี่ยนของแรงดัน และกระแสโดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าในรูปที่ 4

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายสุระโยธิน เกาะโพธิ์
วัน เดือน ปีเกิด	16 พฤศจิกายน 2510
ที่อยู่	126/53 หมู่บ้านนันทนาการเดิน (รังสิต) ซอย 2 ถนน รังสิต – ปทุมธานี ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม ปี พ.ศ. 2536
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2532 – ปัจจุบัน	วิศวกรระดับ 8 ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง ประเทศไทย

