

การศึกษาความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดิน  
ที่ติดตั้งภายในสถานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A STUDY OF NEUTRAL GROUNDING RESISTOR FAILURES  
IN PEA'S SUBSTATION



๒๕๕๓ ๒๕๕๓  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMUTL-2009-EN-M-020-117

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดิน  
ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A STUDY OF NEUTRAL GROUNDING RESISTOR FAILURES  
IN PEA'S SUBSTATION



บัวเรียน ชาลี  
BUARIAN CHALEE

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....105463  
วัน,เดือน,ปี..... 24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-020-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF NEUTRAL GROUNDING RESISTOR FAILURES  
IN PEA'S SUBSTATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL-2009-EN-M-020-117**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การศึกษาความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดินที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

**Thesis Title** A Study of Neutral Grounding Resistor Failures in PEA's Substation

**นักศึกษา** นายบัวเรียน ชาติ

**รหัสประจำตัว** 49060270

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.มณฑล ทีลาจินดาไกรฤกษ์

**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2009-EN-M-020-117

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรรุ	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
ดร.ศุภกิตติ์	โชติโก	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
รศ.มณฑล	ทีลาจินดาไกรฤกษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดินที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นักศึกษา	บัวเรียน ชาลี
รหัสนักศึกษา	49060270
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดิน(NGR) ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยการเก็บข้อมูลความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดินภาคสนามและจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จากข้อมูลภาคสนามพบว่าสาเหตุความเสียหายของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดินเกิดจากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกลงพื้น และผลที่ได้จากการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบว่าขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสจะมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลผ่านขดลวดของตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดิน ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นและระยะเวลาการเกิดมากเกินกว่าพิกัดการทำงานต่อเนื่องสูงสุดจะทำให้ตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดินได้รับความเสียหาย วิธีการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติทำได้โดยการจัดลำดับอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานสัมพันธ์กัน เลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับระบบ และบำรุงรักษาระบบให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม

<b>Thesis Title</b>	A Study of Neutral Grounding Resistor Failures in PEA's Substation
<b>Student</b>	Mr. Buarian Chalee
<b>Student ID.</b>	49060270
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrailerk

### ABSTRACT

This thesis presents the study of neutral grounding resistor (NGR) failures in Provincial Electricity Authority's substation (PEA). By collecting data of neutral grounding resistor failures in the field and simulation with ATP-EMTP program, the results obtained from the field survey show that a single line to ground fault causing the failure of neutral grounding resistor. Also the result of simulation with ATP-EMTP program show that while single line to ground fault is happening, the fault current will run over the resistance coil of neutral grounding resistor. Then, if the volume of current and time of short circuit are higher than the rate of maximum continuous operating of neutral grounding resistor, the failure may occur. The proposed practical solution is the arrangement of co-ordination of protective devices, corrective equipment and usually maintenance.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และขัดเกลาในการทำงานวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ของท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณมูลนิธิทุนเล่าเรียนหลวงกาญจนาภิเษกที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา ตลอดระยะเวลา 12 ปี และทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ ตลอดจนทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณกิตติ เลียงเครือ เจ้าหน้าที่กองวิจัย และคุณเรืองศักดิ์ พรหมจันทร์ เจ้าหน้าที่กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความอนุเคราะห์ความรู้และคำแนะนำตลอดจนข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสถานีไฟฟ้าแรงดัน 1 สถานีไฟฟ้าแรงดัน 3 จังหวัดปทุมธานี, สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา และสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล จังหวัดนครราชสีมา ที่อำนวยความสะดวกในการศึกษาข้อมูลภาคสนามตลอดจนข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภูจิต บุญโท และสกลวุฒิ ภูผาสุข เพื่อนที่ให้คำแนะนำต่างๆตลอดจนช่วยเหลือทุกอย่างเสมอมา เป็นซึ่งแรงผลักดันในการศึกษาเล่าเรียนและทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ อุไร จันทร์หนองสรวง ที่คอยให้กำลังใจ และอยู่เคียงข้างเสมอมา

ขอขอบคุณ ฤทัยรัตน์ ชาลี น้องสาวของข้าพเจ้า ที่อาสาทำหน้าที่แทนข้าพเจ้าอย่างขยันขันแข็งและเป็นกำลังใจเสมอมาในยามที่รู้สึกท้อ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ พ่อทอง และแม่เสียน ชาลี บิดามารดาของข้าพเจ้า และแม่เจียง เรืองศรี ยายของข้าพเจ้า ที่เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าอย่างดีมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บัวเรียน ชาลี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ข้อมูล และทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2.1 สถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	4
2.1.1 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ.....	5
2.1.2 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนก๊าซ.....	6
2.2 โครงสร้างระบบจำหน่ายและสายไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้งาน.....	6
2.2.1 สายอะลูมิเนียมเปลือย.....	8
2.2.2 สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด.....	8
2.2.3 สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด.....	9
2.2.4 สายเคเบิลใต้ดินแบบหุ้มฉนวนด้วยครอสลิงค์โพลีเอทิลีน.....	9
2.3 รูปแบบการต่อลงดินในระบบไฟฟ้า.....	10
2.4 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า.....	11
2.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	13
2.5.1 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลาสั้น.....	14
2.5.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลายาว.....	16
2.5.3 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะเนื่องจากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูง.....	18
2.7 การเสียหายการฉนวน.....	21
2.8 โครงการควบคุมการจ่ายไฟแบบอัตโนมัติ.....	23
2.9 การติดตั้ง NGR ในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	24
2.10 การปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายก่อนการติดตั้ง NGR.....	28
2.11 ผลหลังการนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ.....	28
บทที่ 3 การเก็บข้อมูลภาคสนาม.....	31
3.1 การเก็บข้อมูลสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่ NGR ชำรุดเสียหาย.....	31
3.2 การตรวจสอบความเสียหายทางกายภาพของ NGR.....	32
3.3 การเก็บค่าความต้านทานขดลวดของ NGR.....	40
3.4 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ในสภาวะการทำงานปกติ.....	44
3.5 การตรวจหาความร้อนที่ขดลวด NGR ในสภาวะการทำงานปกติ.....	45
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า.....	48
4.1 โปรแกรม ATP-EMTP.....	48
4.2 การสร้างแบบจำลองและพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า.....	50
4.3 สภาวะปกติของระบบจากการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP.....	54
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียงของแหล่งจ่าย และพารามิเตอร์ของระบบ.....	56
4.4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ.....	56
4.4.2 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร.....	57
4.4.3 ตัวอย่างกรณีศึกษา.....	61
4.4.4 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP.....	63
4.5 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้าที่ NGR ชำรุดเสียหาย.....	66
4.6 ผลการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้าที่ NGR ชำรุดเสียหาย.....	67
4.7 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส.....	72
4.8 วิเคราะห์ผลการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า.....	76

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. ข้อมูลและสัญลักษณ์การจำลองระบบในโปรแกรม ATP-EMTP.....	83
ภาคผนวก ข. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	87
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนด้วยซอฟต์แวร์ของกล้อง ถ่ายภาพความร้อนผลิตภัณฑ์ FLUKE รุ่น Ti 45 ที่สถานีไฟฟ้าแรงดัน 1	91
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	111

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังการรับและจ่ายกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าระบบ 115- 22 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	4
2.2 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ.....	5
2.3 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนกึ่ง.....	6
2.4 โครงสร้างระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	7
2.5 ลักษณะการวางสายตัวนำไฟฟ้าบนลูกถ้วยและลูกถ้วยแยกสาย.....	7
2.6 สายอะลูมิเนียมเปลือย.....	8
2.7 สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด.....	8
2.8 สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด.....	9
2.9 สายหุ้มฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีน.....	9
2.10 รูปแบบการต่อลงดินแบบต่าง ๆ.....	11
2.11 การลัดวงจรสามเฟส.....	12
2.12 การลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส.....	12
2.13 การลัดวงจรสองเฟส.....	13
2.14 การลัดวงจรสองเฟสลงดิน.....	13
2.15 ระยะเวลาการเกิดแรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน และไฟฟ้าดับช่วงเวลาสั้น ๆ.....	14
2.16 ขั้นตอนการทำงานรี โคสเซอร์ในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	16
2.17 การเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเนื่องจากงูขึ้นเสาไฟฟ้า และกิ่งไม้สัมผัสสายไฟฟ้า.....	17
2.18 การเกิดอาร์กเนื่องจากสายตัวนำขาดและตกลงพื้นหญ้า.....	18
2.19 ระดับกระแสไฟฟ้าในเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดกับสายป้อนของระบบจำหน่าย.....	19
2.20 รูปคลื่นการเกิดลงดินหนึ่งเฟสที่รีเลย์สามารถตรวจจับได้.....	20
2.21 ลูกถ้วยระเบิดเนื่องจากถูกฟ้าผ่าโดยตรง.....	21
2.22 เซอร์คิตเบรกเกอร์เกิดการอาร์กเนื่องจากสั้ว.....	22
2.23 เซอร์คิตเบรกเกอร์ระเบิดเนื่องจากเกิดอาร์กจากการลัดวงจร.....	22
2.24 แผนภาพของระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรงและผ่านความต้านทาน.....	24
2.25 แผนภาพเส้นเดียววงจรติดตั้ง NGR ภายในสถานีไฟฟ้า.....	26
2.26 ตำแหน่งตู้ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้า.....	27
2.27 ตำแหน่งการต่อลงดินที่จุดนิวทอลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	27

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เฟส C	29
2.29 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เฟส B	29
2.30 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เฟส A	30
3.1 สภาพปกติภายนอกของตู้ NGR	33
3.2 สภาพภายนอกของตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	33
3.3 สภาพปกติภายในของตู้ NGR	34
3.4 สภาพภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	34
3.5 สภาพปกติของขดลวด NGR	35
3.6 ขดลวด NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	35
3.7 สภาพปกติลูกถ้วยที่ติดตั้งภายในตู้ NGR	36
3.8 ลูกถ้วยที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	36
3.9 สภาพปกติของหม้อแปลงกระแสที่ติดตั้งภายในตู้ NGR	37
3.10 หม้อแปลงกระแสที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	37
3.11 สภาพปกติของ Cable Riser ที่ติดตั้งภายในตู้ NGR	38
3.12 Cable Riser ที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย	38
3.13 สภาพปกติของ Name Plate ของ NGR	39
3.14 ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้ Name Plate อะลูมิเนียมหลอมละลาย	39
3.15 วงจรการต่อชุดขดลวดของ NGR	40
3.16 การวัดค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ชุดที่ได้รับความเสียหาย	41
3.17 การวัดค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ชุดที่ไม่ได้รับความเสียหาย	41
3.18 NGR ชุดที่ได้รับความเสียหายถูกปลดออกจากระบบ	42
3.19 ค่าความต้านทานของ NGR ที่วัดได้	42
3.20 ค่ากระแสที่ไหลผ่าน NGR ขณะติดตั้งใช้งานในระบบ	44
3.21 หน้าต่างของโปรแกรมของกล้องถ่ายภาพความร้อน	46
3.22 รายละเอียดภาพถ่ายที่ได้จากโปรแกรมของกล้องถ่ายภาพความร้อน	46
3.23 อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้	47
4.1 Supporting Program	48
4.2 Module ที่รองรับการใช้งาน โปรแกรม ATP-EMTP	49
4.3 วงจรการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในโปรแกรม ATP-EMTP	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติ	55
4.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR ในสภาวะปกติ	55
4.6 Sequence Circuit กรณีลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่ BUS 22 kV	59
4.7 Sequence Circuit การลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ที่ BUS 22 kV หลังติดตั้ง NGR	61
4.8 แสดงพื้นที่และตำแหน่งที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดกึ่งเกิดรอยไฟไหม้	62
4.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่ได้จากการจำลองระบบของสถานีไฟฟ้า เขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง	64
4.10 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ไหลผ่าน NGR ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR ที่ได้จากการจำลองระบบ	64
4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ไหลผ่าน NGR ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR และมีค่าความต้านทานของตำแหน่งลัดวงจร ที่ได้ จากการจำลองระบบ	65
4.12 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย	66
4.13 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้านนทรี	66
4.14 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล	67
4.15 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง	67
4.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย 6 กิโลเมตร	68
4.17 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย 6 กิโลเมตร	68
4.18 รูปแรงดันไฟฟ้า กรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้านนทรี 8 กิโลเมตร	69
4.19 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้านนทรี 8 กิโลเมตร	69
4.20 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส B ห่างจากสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล 7 กิโลเมตร	70
4.21 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส B ห่างจากสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล 7 กิโลเมตร	70
4.22 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า กรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส C ห่างจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง 7 กิโลเมตร	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส C ห่างจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง 7 กิโลเมตร.....	71
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับระยะทางที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง.....	73
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับปริมาณโหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส.....	74
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับความต้านทานที่ตำแหน่งลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส.....	75



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระยะเวลาการเกิดแรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน และไฟฟ้าดับช่วงเวลาสั้นๆ.....	15
2.2 ระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับ แรงดันไฟฟ้าตก และแรงดันไฟฟ้าเกิน ที่มีช่วงระยะเวลายาว.....	16
2.3 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	19
2.4 คุณสมบัติของ NGR ตามข้อกำหนดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	25
2.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะหลังนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ.....	28
2.6 ขนาดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้ง NGR.....	29
2.7 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้ง NGR.....	29
3.1 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง ชุดที่ไม่ได้รับความเสียหาย.....	43
3.2 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง ชุดที่ได้รับความเสียหาย.....	43
3.3 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าห้วยทะเลชุดที่ได้รับความเสียหาย.....	43
3.4 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ขณะติดตั้งใช้งาน.....	45
4.1 ข้อมูล Factory Test ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 50 MVA.....	50
4.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายตัวนำไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	51
4.3 ค่าความต้านทานพื้นผิวที่ได้จากพื้นผิวดังชนิดเมื่อสายตัวนำไฟฟ้าขาดตก.....	53
4.4 ข้อมูลสถานีไฟฟ้าเขาย้อย.....	58
4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสาย PIC ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร.....	61
4.6 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อยที่ได้จากการคำนวณและจำลองระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP.....	65
4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จากสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่ NGR เกิดความเสียหาย.....	72
4.8 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ตำแหน่งเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ห่างจากสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ระยะต่าง ๆ.....	73
4.9 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ปริมาณไหลในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสค่าต่างๆ.....	74
4.10 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ความต้านทานลัดวงจรลงดินค่าต่าง ๆ.....	75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากปัจจุบันกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทันสมัย มีเทคโนโลยีที่สูงขึ้น มีความไว (Sensitive) ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าที่มากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เช่น คอมพิวเตอร์ Programmable Logic Controller (PLC) อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjust Speed Drive Motor) เป็นต้น

แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) เป็นอีกหนึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรม สาเหตุส่วนใหญ่มีผลสืบเนื่องมาจากการเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย โดยความรุนแรงนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าของความผิดปกติ ประเภทของความผิดปกติ รูปแบบการต่อลงดินของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นความน่าสนใจของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะนั้นจะอยู่ที่การแก้ปัญหาเพื่อลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

โดยปกติแล้ว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต่อจุดนิวทรัล (Neutral) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้าเป็นแบบลงดินโดยตรง (Solidly Ground) เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินมีค่าสูงมาก เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะในเฟสที่เกิดการลัดวงจรและเฟสเดียวกันของวงจรอื่น ๆ ที่ได้รับไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องเดียวกัน เกิดผลกระทบกับอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากเฟสที่เกิดการลัดวงจรหรือมอเตอร์แบบสามเฟสที่รับกระแสไฟฟ้าจากวงจรดังกล่าวปลดตัวออกจากระบบ ส่งผลต่อกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานหลอมเหล็กที่กำลังหลอมเหล็ก โรงงานรถยนต์ที่กำลังชุบสีรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตเกิดการหยุดชะงัก ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบของผู้ใช้ไฟได้รับความเสียหาย ปัญหาดังกล่าวในเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเองได้รับเรื่องร้องเรียนจากผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งตัวต้านทานต่อนิวทรัลลงดิน (Neutral Grounding Resistor, NGR) ขนาด 12.7 โอห์ม [1, 2] ที่จุดนิวทรัลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้ลดลงเกินร้อยละ 20 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสให้มีขนาดไม่เกิน 1,000 แอมแปร์

ปัจจุบันเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสจากสายตัวนำไฟฟ้าจากตกลงพื้น จะทำให้ NGR เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง จนสามารถใช้งานไม่ได้และต้องทำการปลดออกจากระบบ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหายของ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นำเสนอสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ทำให้ NGR เกิดความเสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามของ NGR ที่ชำรุดเสียหายและทำการจำลองวิเคราะห์ระบบ (Simulation) ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อศึกษาสาเหตุและวิเคราะห์หากลไกความเสียหายที่สามารถเป็นไปได้ที่ส่งผลให้ NGR ได้รับความเสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส รวมทั้งวิเคราะห์หาแนวทางป้องกันและแก้ไข เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

## 1.3 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หากลไกความเสียหายของ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามจากสถานีไฟฟ้าที่ NGR เกิดการชำรุดเสียหาย และจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP-EMTP สำหรับเหตุการณ์ที่ทำให้ NGR เกิดการชำรุดเสียหายนำผลการจำลองวิเคราะห์ระบบที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและกลไกความเสียหายของ NGR ที่เป็นไปได้ พร้อมทั้งเสนอแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหา

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาโครงสร้างสถานีไฟฟ้าและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
2. ศึกษารูปแบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
3. ศึกษาผลจากการติดตั้ง NGR เพิ่มเติมภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
4. เก็บรวบรวมข้อมูลความเสียหายทางกายภาพของ NGR ที่ชำรุดเสียหาย
5. ตรวจสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ในสภาวะการทำงานปกติ
6. ตรวจสอบอุณหภูมิของ NGR ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Viewer) ในสภาวะการทำงานปกติ
7. จำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อศึกษาลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR และแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส
8. นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมภาคสนามและการจำลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและกลไกความเสียหายของ NGR ที่เป็นไปได้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์

1. ทราบถึงสาเหตุและกลไกที่ทำให้ NGR เกิดการชำรุดเสียหาย
2. ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันการชำรุดเสียหายของ NGR
3. ผู้ผลิตหรือผู้ออกแบบ สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ NGR ให้มีประสิทธิภาพและทนต่อสภาวะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้มากขึ้น
4. ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการออกแบบข้อกำหนดสำหรับการเลือกใช้พิกัดของ NGR ให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและทนต่อสภาวะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ข้อมูล และทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ NGR โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของสถานีไฟฟ้าและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รูปแบบการต่อลงดิน ความผิดปกติจากการลัดวงจรลงดินในระบบไฟฟ้า การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูง ความเป็นมาของการนำระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานมาใช้งาน และข้อกำหนดของ NGR ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิกานำมาใช้งาน ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและการจำลองวิเคราะห์ระบบ เพื่อศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ NGR

### 2.1 สถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3]

สถานีไฟฟ้าเป็นสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าและอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลง และติดตั้งอุปกรณ์ของระบบป้องกันเพื่อตรวจจับหรือตัดวงจร เมื่อความผิดปกติขึ้นในระบบ และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น โดยจะเชื่อมต่อกันระหว่างโรงผลิตไฟฟ้าหรือระหว่างสถานีไฟฟ้าเอง โดยผ่านระบบสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



สถานีไฟฟ้า กพผ.

สถานีไฟฟ้า กพภ.

รูปที่ 2.1 แผนผังการรับและจ่ายกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าระบบ 115 - 22 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผู้ใช้ไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะรับแรงดันไฟฟ้า 115 kV จากสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยหรือสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเอง และทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าลงเหลือ 22 kV จากนั้นจึงส่งไปยังระบบจำหน่ายไฟฟ้าต่อไป

ปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีแผนงานที่จะดำเนินการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ เพื่อรองรับปริมาณผู้ใช้ไฟที่เพิ่มขึ้น ลดหน่วยการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้า และเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า รูปแบบของสถานีไฟฟ้าสามารถแบ่งออกตามชนิดของระบบการฉนวนได้ 2 แบบ คือ

### 2.1.1 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation, AIS)

เป็นรูปแบบที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากอุปกรณ์มีราคาถูก แต่จะต้องใช้พื้นที่การก่อสร้างมาก ราคาที่ดินต้องไม่แพง สภาพแวดล้อมเหมาะสม โดยออกแบบให้อุปกรณ์หลักต่าง ๆ ประกอบและติดตั้งอยู่บนโครงเหล็ก ใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างตัวนำแต่ละเฟส และระหว่างตัวนำกับดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการออกแบบระบบการฉนวนนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ คือ ความดันบรรยากาศ ความชื้น อุณหภูมิ ความเปรอะเปื้อน ฝุ่นละออง เป็นต้น ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องจะต้องจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปมักติดตั้งอยู่กลางแจ้ง ทำให้ต้องมีระยะห่างทางไฟฟ้า (Electrical Clearance) และการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงหรือผลสืบเนื่องอื่น ๆ จากฟ้าผ่าด้วย

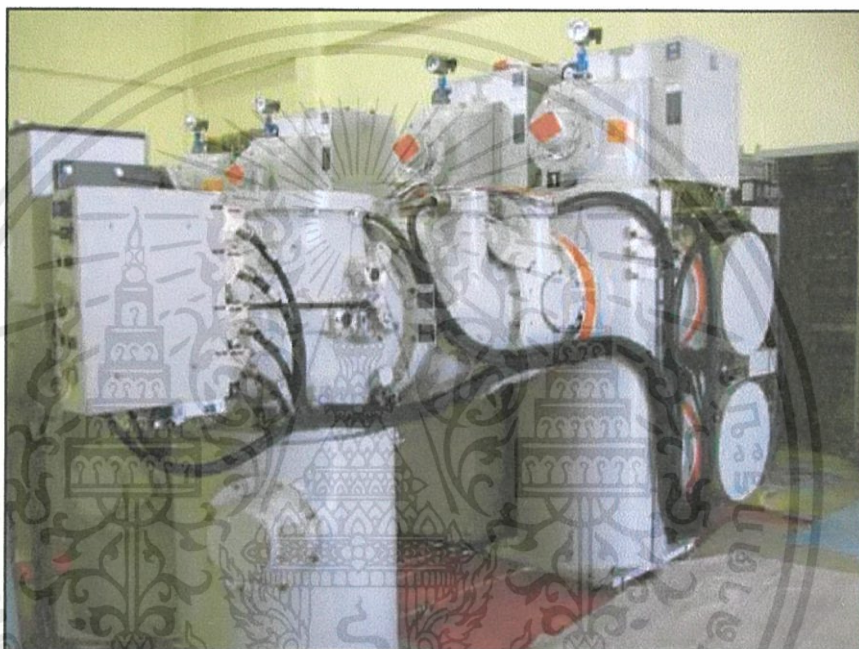


รูปที่ 2.2 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation, GIS)

เป็นรูปแบบของสถานีไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ ติดตั้งอยู่ภายในท่อโลหะ ที่มีแก๊สอัดก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride, SF<sub>6</sub>) เพื่อเป็นฉนวนไว้ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้ลดระยะห่างทางไฟฟ้าลงได้ ส่งผลให้สถานีไฟฟ้ามีขนาดเล็กกว่าสถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศ สถานีไฟฟ้างี้สามารถออกแบบให้ติดตั้งกลางแจ้งหรือภายในอาคารก็ได้ โดยทั่วไปจะพิจารณาตามวัตถุประสงค์หลักของการใช้งาน เช่น ต้องการความเชื่อมั่นสูง พื้นที่มีจำกัด ภาระการบำรุงรักษา เป็นต้น



รูปที่ 2.3 สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนก๊าซ

### 2.2 โครงสร้างระบบจำหน่ายและสายตัวนำไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีใช้งาน

ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมี 2 ระดับ คือ แรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV การจัดวางสายตัวนำไฟฟ้าเป็นแบบขึงในอากาศ โดยทั่วไปจะพาดบนฉนวน เช่น ลูกถ้วย (Insulator) ลูกถ้วยแยกสาย (Spacer) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งลักษณะการติดตั้งใช้งานจะแตกต่างกันไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม จำนวนวงจรของระบบจำหน่าย เงินลงทุน เป็นต้น

การพาดสายตัวนำไฟฟ้าบนลูกถ้วยและลูกถ้วยแยกสาย จะติดตั้งโดยวางสายตัวนำบนลูกถ้วยที่ติดตั้งบนคอนกรีตหรือคอนกรีตอัดแรง แล้วพันสายตัวนำไฟฟ้าเข้ากับลูกถ้วยด้วยลวดอลูมิเนียมหรือห้วงยางรัดสาย โดยมีตัวอย่างการพาดสายตัวนำไฟฟ้าบนลูกถ้วยและลูกถ้วยแยกสาย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 2.5 ลักษณะการวางสายตัวนำไฟฟ้าบนลูกถ้วยและลูกถ้วยแยกสาย

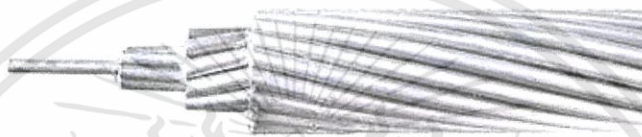
สำหรับสายไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเลือกใช้งานมีจำนวน 4 ชนิด คือ สายอะลูมิเนียมเปลือย (Bare Aluminium Conductor) สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด (Partial Insulated Cable, PIC) สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด (Spaced Aerial Cable, SAC) และสายเคเบิลใต้ดินแบบหุ้มฉนวนด้วยครอสลิงก์โพลีเอทิลีน (Cross Link Poly Ethylene, XLPE) นอกจากนี้ยังมีสายล่อฟ้า (Over Head Ground Wire, OHGW) พาดอยู่เหนือสายไฟฟ้า เพื่อป้องกันฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าโดยตรงและผลจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่า

สำหรับขนาดของสายตัวนำที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เลือกใช้โดยทั่วไปจะมี 3 ขนาด คือ 50, 120 และ 185 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 สายอะลูมิเนียมเปลือย

สายเปลือยที่ใช้งานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ สายอะลูมิเนียมเปลือย (Bare Aluminium) สายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (Aluminium Conductor Steel Reinforce) และสายอะลูมิเนียมเจือ (Aluminium Alloy Conductor) ซึ่งสายอะลูมิเนียมเปลือยใช้งานพื้นที่ทั่วไป ส่วนสายอะลูมิเนียมแกนเหล็กจะใช้ในระบบจำหน่ายที่มีระยะห่างระหว่างเสามากกว่า 50 เมตร เช่น ช่วงข้ามแม่น้ำหรือทางรถไฟ เป็นต้น และในบริเวณที่ห่างจากชายทะเลมากกว่า 1 กิโลเมตร และสายอะลูมิเนียมเจือจะใช้ในบริเวณที่ห่างจากชายทะเลน้อยกว่า 1 กิโลเมตร ตัวอย่างของสายอะลูมิเนียมเปลือยที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สายอะลูมิเนียมเปลือย

### 2.2.2 สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด

สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดหมายถึงสายตัวนำที่หุ้มด้วยไดอิเล็กตริกที่มีพิกัดต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรที่นำไปใช้งาน โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้นำมาใช้แทนสายเปลือยเพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบจำหน่าย และป้องกันการลัดวงจรชั่วคราว ที่มีสาเหตุมาจากกิ่งไม้แตะสายไฟฟ้า และใช้กับระบบจำหน่ายที่มีระยะห่างระหว่างเสาไม่เกิน 50 เมตร สำหรับตัวอย่างของสายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด

### 2.2.3 สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด

สำหรับการใช้งานสายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด จะใช้งานแทนสายเปลือยเช่นเดียวกับสายหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัด แต่มีข้อจำกัด คือ สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัดนี้ไม่เหมาะแก่การใช้งานบริเวณที่สัมผัสกับโลหะ หรือบริเวณที่มีการต่อลงดินเป็นเวลานาน เพราะบริเวณจุดสัมผัสจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าจุดอื่น ๆ เนื่องจากสายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด ไม่มีชีลด์หุ้ม ดังนั้นจึงไม่สามารถป้องกันสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนำสายไฟฟ้างดกล่ามาใช้เพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบจำหน่าย โดยเล็งเห็นข้อดีในการเพิ่มความปลอดภัยให้กับบุคคลหรือสิ่งก่อสร้างในพื้นที่ที่มีระยะห่างทางไฟฟ้าสำหรับพาดสายไฟฟ้าจำกัด เช่น บริเวณสะพานลอย บริเวณใกล้แนวอาคาร เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของสายตัวนำชนิดสายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัดที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สายหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัด

### 2.2.4 สายเคเบิลใต้ดินแบบหุ้มฉนวนด้วยครอสลิงค์โพลีเอทิลีน

สายเคเบิลใต้ดินแบบหุ้มฉนวนด้วยครอสลิงค์โพลีเอทิลีน ใช้กับระบบจำหน่ายใต้ดิน ตัวนำไฟฟ้าเป็นทองแดงหุ้มด้วยฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีน มีชีลด์ป้องกันสนามไฟฟ้าและมีเทปกันน้ำพัน โดยรอบ ส่วนชั้นนอกสุดหุ้มด้วยเปลือกฉนวนโพลีเอทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สายหุ้มฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีน

## 2.3 รูปแบบการต่อลงดินในระบบไฟฟ้า [4,5]

การต่อลงดินหมายถึง การต่อจุดนิวทรัลของหม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงดิน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อจำกัดแรงดันเกิน (Overvoltage) ในระบบไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดจาก ฟิวส์ เป็นต้น
- เพื่อให้แรงดันระหว่างสายไฟกับกราวด์ในสภาวะการทำงานมีค่าคงตัว
- เพื่อใช้ในระบบป้องกัน เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติในระบบจะใช้การป้องกัน

แบบตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับและกำจัดความผิดปกติได้รวดเร็ว

ทั้งนี้ในแต่ละรูปแบบของการต่อลงดิน จะมีวงจรสมมูลย์เป็นอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ซึ่งการต่อลงดินนั้นจะพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น พิกัดอุปกรณ์ในระบบ ระบบของอุปกรณ์ป้องกัน เป็นต้น โดยรูปแบบการต่อลงดินมีจำนวน 5 รูปแบบ คือ

1. ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน (Ungrounded System) เป็นระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน แต่ในความเป็นจริงแล้วระบบนี้จะต่อลงดินโดยผ่านตัวเก็บประจุแฝง (Stray Capacitance) ที่เกิดขึ้นระหว่างสายตัวนำและกราวด์

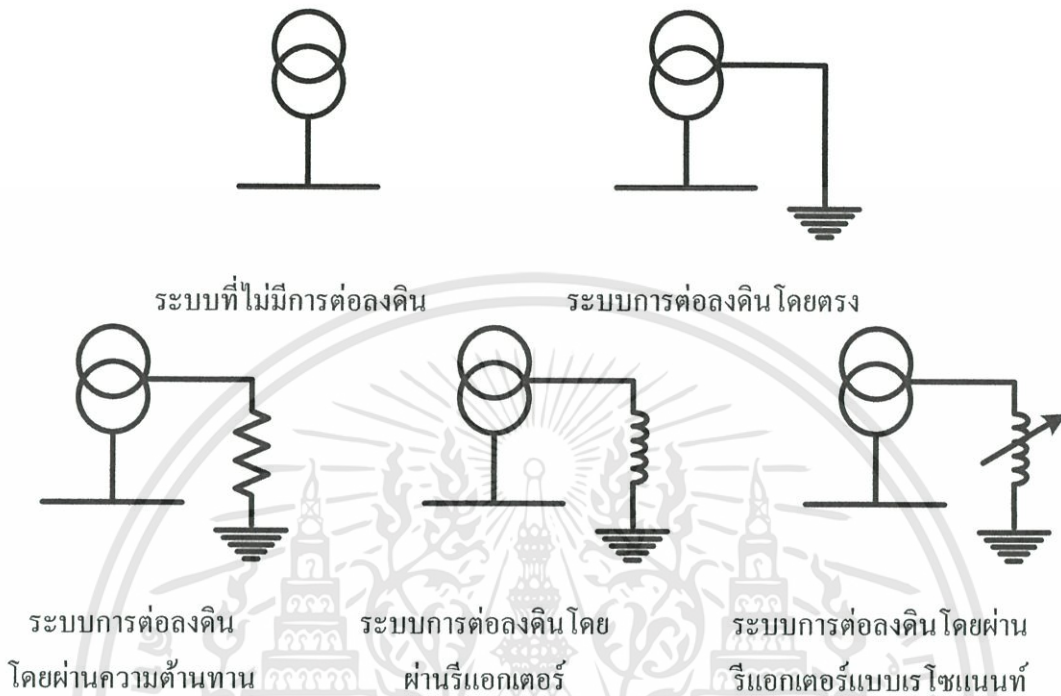
2. ระบบการต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding) เป็นวิธีการต่อลงดินที่ง่ายที่สุดและมีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่ง โดยจะทำการต่อจุดนิวทรัลทางด้านทุติภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังลงดินโดยไม่ผ่านอินพีแดนซ์ใดๆ

3. ระบบการต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน (Neutral Resistance Grounding, NGR) โดยต่อจุดนิวทรัลทางด้านทุติภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังลงดินผ่านความต้านทาน ทั้งนี้เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าน้อยกว่าแบบต่อลงดินโดยตรงและสามารถจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ด้วยขนาดของความต้านทาน การต่อลงดินผ่านความต้านทานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ตามขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร คือ การต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำ (Low Resistance Grounding) จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรประมาณ 100 – 1000 แอมแปร์ และการต่อลงดินผ่านความต้านทานสูง (High Resistance Grounding) จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรประมาณ 10 – 100 แอมแปร์

4. ระบบการต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์ (Reactance Grounding) โดยต่อจุดนิวทรัลทางด้านทุติภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังลงดินโดยผ่านตัวรีแอกเตอร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าอยู่ในช่วง 25 – 100 % ของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3 เฟส ซึ่งจะจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ให้มีค่าสูงกว่าการต่อลงดินแบบผ่านความต้านทาน

5. ระบบการต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์แบบเรโซแนนท์ (Resonant Grounding) เป็นการต่อลงดินโดยติดตั้งตัวหักล้างการลัดวงจร (Ground Fault Neutralizer or Petersen Coil) ซึ่งจะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างนิวทรัลกับดิน โดยค่ารีแอกแตนซ์จะถูกทำการปรับค่าเทียบกับกระแสไฟฟ้าอัดประจุ (Charging Current) ของระบบเพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าต่ำ

ในการออกแบบระบบการต่อลงดินนั้น จะไม่สามารถออกแบบให้ใช้การต่อลงดินสองรูปแบบพร้อมกันได้ เพราะจะกระทบต่อการปรับตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices) สำหรับรูปแบบการต่อลงดินในระบบไฟฟ้าทั้ง 5 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการต่อลงดินแบบต่าง ๆ

## 2.4 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า [4,6]

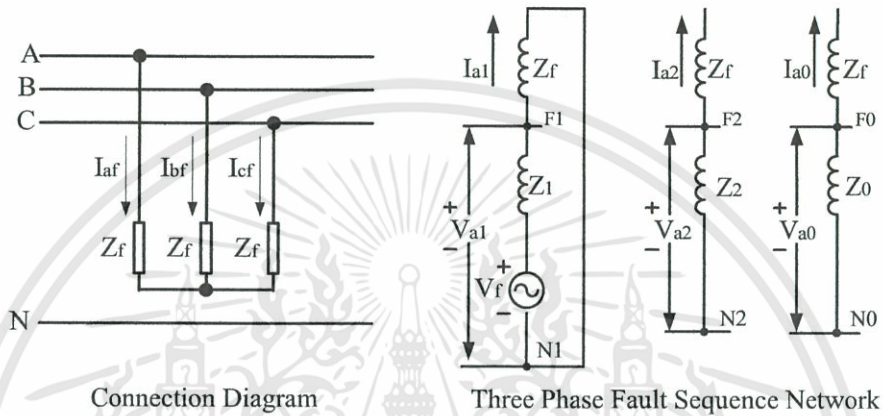
ในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากส่วนต่าง ๆ ไหลไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะมีสูงกว่าพิกัดกระแสไฟฟ้า (Rated Current) หลายเท่า ดังนั้นการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่คำนวณได้นั้น จะนำไปใช้ในการเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน และกำหนดค่าปรับตั้งการทำงานของรีเลย์ได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถแบ่งประเภทของการลัดวงจรออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การลัดวงจรสามเฟส (Three Phase Fault) เป็นการลัดวงจรแบบสมมาตร มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วมักจะเป็นการลัดวงจรที่รุนแรงที่สุด โดยมี Connection Diagram และ Sequence Network ดังแสดงในรูปที่ 2.11

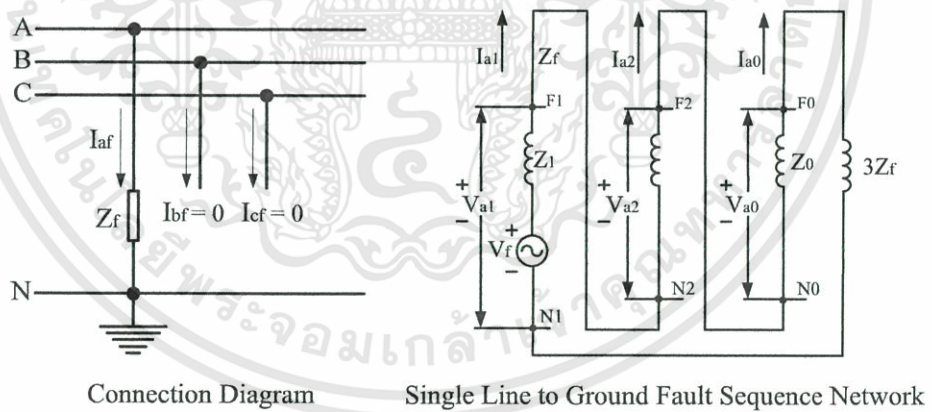
2. การลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส (Single Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรเกิดขึ้นเมื่อสายไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าถูกลัดวงจรลงดินเพียงหนึ่งเส้น โดยมี Connection Diagram และ Sequence Network ดังแสดงในรูปที่ 2.12

3. การลัดวงจรสองเฟส (Line to Line Fault) เป็นการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร เกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำคู่ใดคู่หนึ่งของระบบไฟฟ้าสัมผัสกัน โดยมี Connection Diagram และ Sequence Network ดังแสดงในรูปที่ 2.13

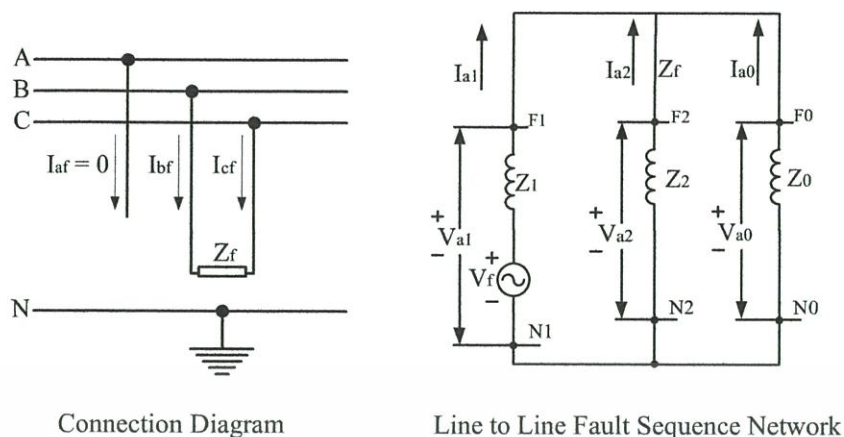
4. การลัดวงจรสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) เป็นการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร เกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำของระบบไฟฟ้าถูกลัดวงจร โดยมี Connection Diagram และ Sequence Network ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.11 การลัดวงจรสามเฟส



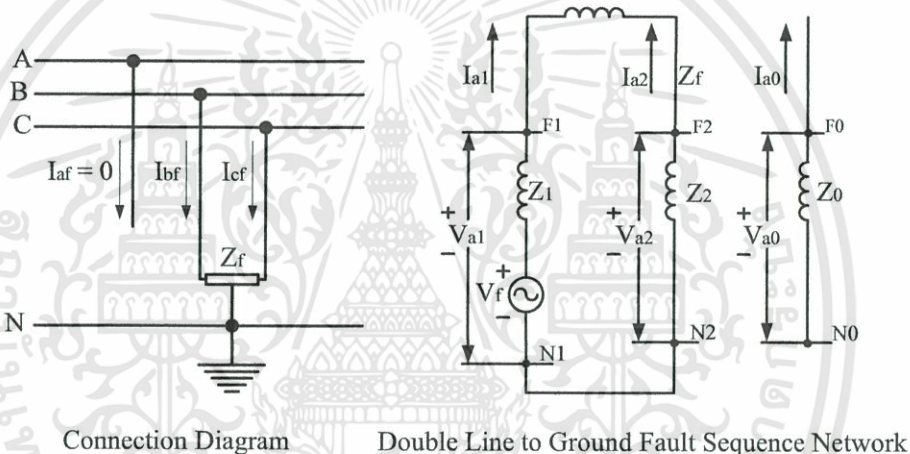
รูปที่ 2.12 การลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส



Connection Diagram

Line to Line Fault Sequence Network

รูปที่ 2.13 การลัดวงจรสองเฟส



Connection Diagram

Double Line to Ground Fault Sequence Network

รูปที่ 2.14 การลัดวงจรสองเฟสลงดิน

## 2.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้าหมายถึง คุณลักษณะกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการเสียหายขึ้น เหตุผลหลักที่ทำให้มีการพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า ดังนี้

- เนื่องจากในปัจจุบันกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นซึ่งจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ เช่น PLC อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ และรีเลย์บางชนิด เมื่อระบบไฟฟ้ามีปัญหาจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตไปด้วย

- ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น และนำปัญหาดังกล่าวมาร่วมกันวิเคราะห์หาแนวทางป้องกัน รวมทั้งแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกับส่วนที่เกี่ยวข้อง

- ระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อถึงกัน หากส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ก็จะทำส่วนอื่น ๆ ของระบบได้รับผลกระทบ

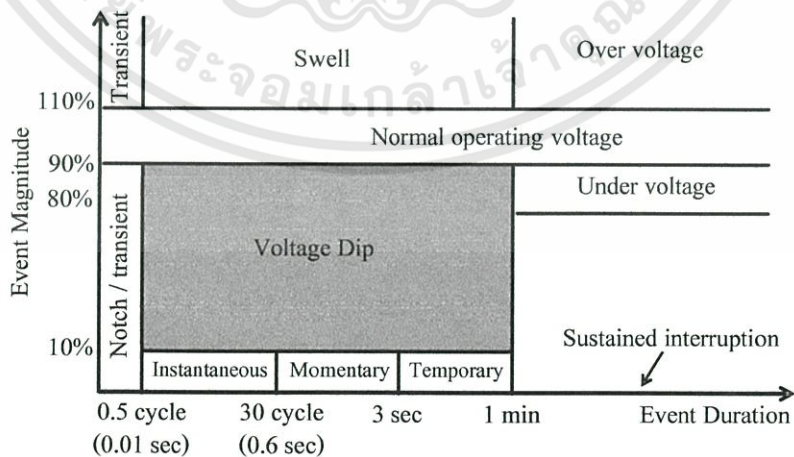
ทั้งนี้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่ คือ

- ปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ไฟผ่า
- การเกิดสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- การทำสวิตซ์อุปกรณ์ในระบบจากการตัดจ่ายระบบไฟฟ้า
- การใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม
- การต่อลงดินที่ไม่เหมาะสม

แนวทางการแก้ไข้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องได้รับความร่วมมือกันระหว่างการผลิตไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น ในส่วนของการไฟฟ้าจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไข้คุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในส่วนของผู้ใช้ไฟต้องมีการควบคุมปัญหากำลังคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าจากผู้ใช้ไฟเอง และนำข้อมูลทางไฟฟ้าและปัญหาต่าง ๆ มาร่วมปรึกษากันเพื่อพิจารณาระดับการทำงานที่สัมพันธ์กันของอุปกรณ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งจะช่วยลดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าลงได้

**2.5.1 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลาสั้น**

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 นาที สาเหตุส่วนใหญ่เนื่องจากเกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาดเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15



**รูปที่ 2.15** ระยะเวลาการเกิดแรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน และไฟฟ้าดับ

มาตรฐาน IEEE Std.1159-1995 [7] มีการเรียกชื่อแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดขึ้นดังนี้ แบบทันทีทันใด (Instantaneous) เกิดในช่วงเวลา 0.5-30 ลูกคลื่น, แบบชั่วคราว (Momentary) เกิดในช่วงเวลา 30 ลูกคลื่น- 3 วินาที และแบบชั่วคราว (Temporary) เกิดในช่วงเวลา 3 วินาที- 1 นาที ดังแสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ระยะเวลาการเกิด แรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน และไฟฟ้าดับช่วงเวลาที่สั้นๆ [7]

Short duration variations		Typical duration	Typical voltage magnitude
1. Instantaneous	1.1 Sag	0.5-30 cycles	0.1- 0.9 pu
	1.2 Swell	0.5 - 30 cycles	1.1- 1.8 pu
2. Momentary	2.1 Interruption	0.5 cycles-3 s	< 0.1 pu
	2.2 Sag	30 cycles-3 s	0.1-0.9 pu
	2.3 Swell	30 cycles-3 s	1.1-1.4 pu
3. Temporary	3.1 Interruption	3 s - 1 min	< 0.1 pu
	3.2 Sag	3 s - 1 min	0.1-0.9 pu
	3.3 Swell	3 s - 1 min	1.1-1.2 pu

- แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 เปรอ์ยูนิต ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากความผิดปกติทางไฟฟ้า เช่น การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ มีผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแหล่งจ่ายของไฟฟ้า มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงานได้

- แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 เปรอ์ยูนิต ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบ ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงานได้เช่นกัน

- แรงดันไฟฟ้าหายชั่วขณะ (Voltage Interruption) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 เปรอ์ยูนิต ในช่วงระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสถานะความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบ

## 2.5.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะเวลายาว

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีระยะเวลาเกิน 1 นาที สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่ ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาดเปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถแบ่งได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

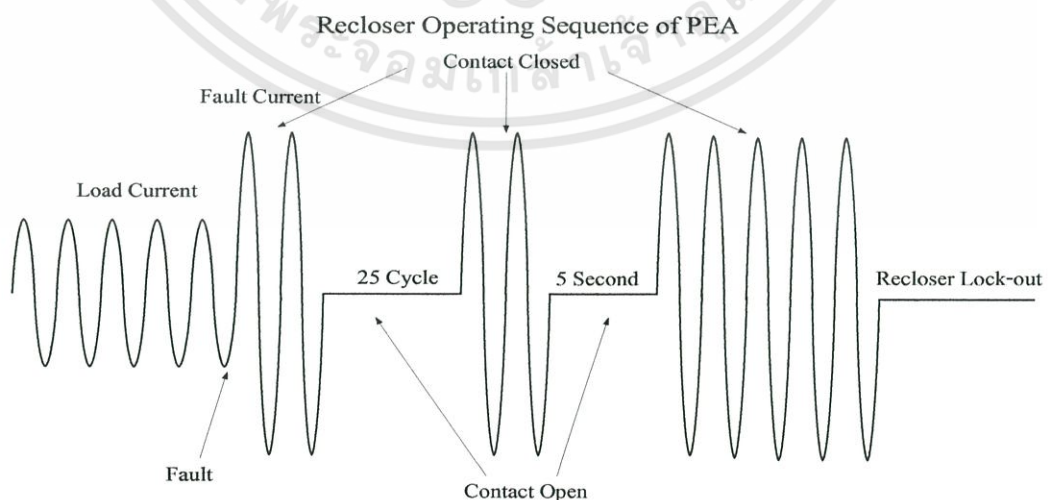
ตารางที่ 2.2 ระยะเวลาการเกิด ไฟฟ้าดับ แรงดันไฟฟ้าตก และแรงดันไฟฟ้าเกิน ช่วงระยะเวลายาว[7]

		Typical duration	Typical voltage Magnitude
Long duration variations	1. Interruption, sustained	> 1 min	0.0 pu
	2. Undervoltages	> 1 min	0.8-0.9 pu
	3. Overvoltages	> 1 min	1.1-1.2 pu

- แรงดันไฟฟ้าตก (Undervoltage) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 เปรี่ยูนิตในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุมาจากผลของการสวิตซ์ซึ่งโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบไฟฟ้าหรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ

- แรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 เปรี่ยูนิตในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบไฟฟ้า หรือมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์เข้าระบบ หรือการปรับแทปหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งอาจส่งผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกินได้

- ไฟฟ้าดับ (Voltage Interruption) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าลดลงเหลือ 0.0 เปรี่ยูนิตในช่วงเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกถาวร ดังรูปที่ 2.16 แสดงการเกิดไฟดับจากรีโคสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบถาวร (Lock-out) เมื่อสภาวะความผิดปกติยังอยู่ในระบบไฟฟ้าเป็นผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน

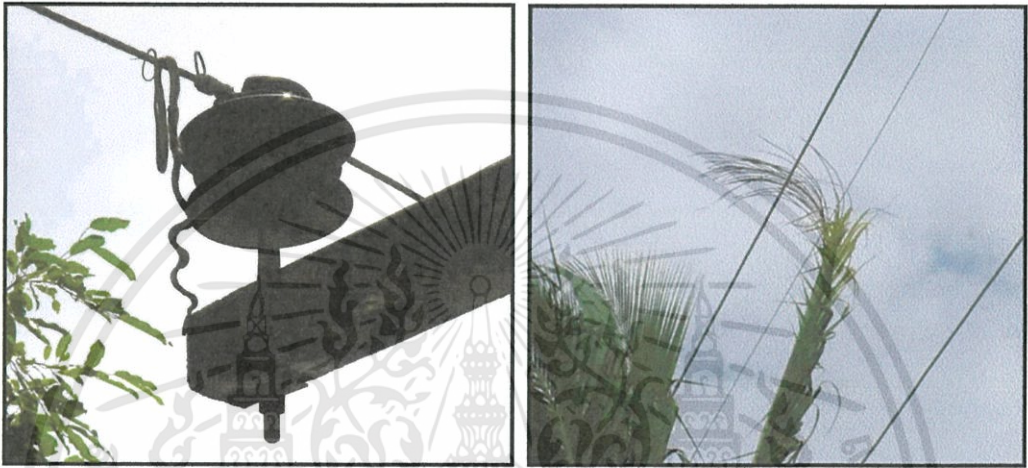


รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการทำงานของรีโคสเซอร์ในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะเนื่องจากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

แรงดันตกไฟฟ้าชั่วขณะเนื่องจากการเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นมากที่สุดในระบบไฟฟ้า จึงทำให้แต่ฝ่ายที่เกี่ยวข้องให้ความสำคัญกับการแก้ปัญหาดังกล่าวเป็นอย่างมาก แต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นเรื่องที่กระทำได้ยากเนื่องจากระบบจำหน่ายโดยส่วนใหญ่เป็นระบบสายไฟฟ้าเหนือดิน จึงมีโอกาที่จะเกิดลัดวงจรลงดินได้ง่าย รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เกิดจากสัตว์และต้นไม้ที่อยู่ใกล้ระบบไฟฟ้า

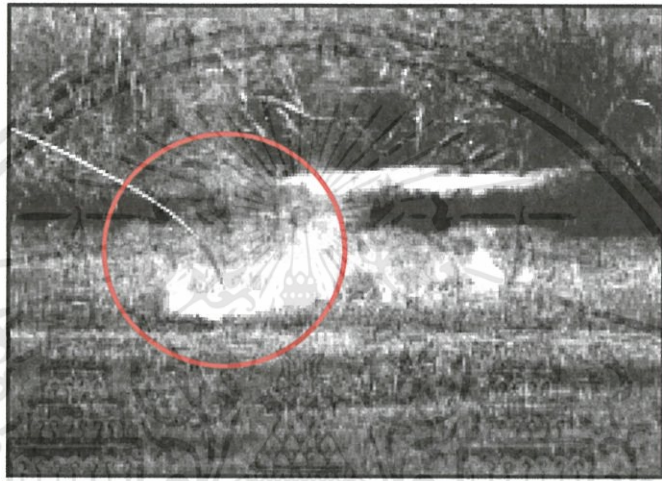


รูปที่ 2.17 การเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเนื่องจากงูขึ้นเสาไฟฟ้า และกิ่งไม้สัมผัสสายไฟฟ้า การป้องกันและแก้ไขปัญหาก็สามารถดำเนินการได้ทั้งใน ส่วนของผู้จำหน่ายกระแสไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าเอง ดังนี้

- ติดตั้ง Shield Wire และ ลดค่าความต้านทานดินของเสา
- ติดตั้งกับดักเสิร์จ (Surge Arrester)
- ตัดแต่งต้นไม้ที่อยู่ในบริเวณสายจำหน่าย
- การบำรุงรักษาอุปกรณ์ระบบการฉนวน เช่น ลูกถ้วย Spacer ให้ใช้งานได้ดีอยู่เสมอ
- ใช้สายหุ้มฉนวน หรือ สายเคเบิลใต้ดิน
- การแก้ไขปัญหาการเกิดแรงดัน ไฟฟ้าตกชั่วขณะด้วยการลดขนาดของกระแสไฟฟ้า ลัดวงจรโดยติดตั้งระบบการต่อลงดินที่เหมาะสม
- ป้องกันสัตว์เลื้อยคลานเข้าในระบบไฟฟ้าทั้งสถานีไฟฟ้าและระบบจำหน่าย

## 2.6 การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Faults)

การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงจะเกิดขึ้นเมื่อสายไฟฟ้าขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า ขาดและตกลงสู่พื้นหรือสัมผัสกับวัตถุที่อยู่บนพื้น เช่น พื้นดิน พื้นหญ้า ถนนยางมะตอย คอนกรีต เป็นต้น ซึ่งมีค่าความต้านทานสูง ทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าต่ำ ไม่เพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เช่น ฟิวส์รีโกลสเซอร์ หรือรีเลย์ทำงานได้ ส่งผลให้เกิดการอาร์กและเกิดเพลิงไหม้ได้ ดังรูปที่ 2.18 แสดงการเกิดอาร์กเนื่องจากการลัดวงจรจากสายตัวนำขาดและตกลงพื้นหญ้าทดสอบที่มหาวิทยาลัยเท็กซัสเอแอนด์เอ็ม (TAMU)[8]



รูปที่ 2.18 การเกิดอาร์กเนื่องจากการลัดวงจรจากสายตัวนำขาดและตกลงพื้นหญ้า

การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงจะเป็นการลัดวงจรที่มีรูปคลื่นไม่แน่นอน ขึ้นกับสภาวะพื้นผิวของสายไฟฟ้าและพื้นผิววัตถุที่สายไฟฟ้าสัมผัส ในขณะที่เกิดการลัดวงจร เมื่อเกิดเหตุการณ์สายไฟฟ้าขาด ผู้ปฏิบัติงานด้านรีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันส่วนใหญ่เชื่อว่าจะมีเปอร์เซ็นต์น้อยมากที่รีเลย์ป้องกันกระแสเกินจะไม่ทำงาน ทำให้การตรวจบันทึกจำนวนครั้งการเกิดสายไฟฟ้าขาดจากสถานีไฟฟ้าบางครั้งไม่ตรงกับความเป็นจริง บางครั้งต้องได้รับแจ้งจากผู้พบเห็นเหตุการณ์ ทำให้ต้องมีการพิจารณาถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่ออัตราการเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงด้วย

ค่ากระแสไฟฟ้าในขณะที่เกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงจะมีช่วงตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ในการบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเท็กซัสเอแอนด์เอ็ม ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 75 แอมแปร์ โดยพบว่า ชนิดของดิน ความชื้นดิน และวัตถุที่อยู่บริเวณพื้นดินนั้นที่พบโดยบังเอิญ เช่น ท่อน้ำ วัสดุโลหะ กิ่งไม้ หรือรากต้นไม้ ต่างมีส่วนทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ณ จุดที่สายไฟฟ้าสัมผัสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยตารางที่ 2.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับพื้นผิวที่สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัส

ตารางที่ 2.3 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินที่เกิดในพื้นที่ที่มีลักษณะต่างกัน [8]

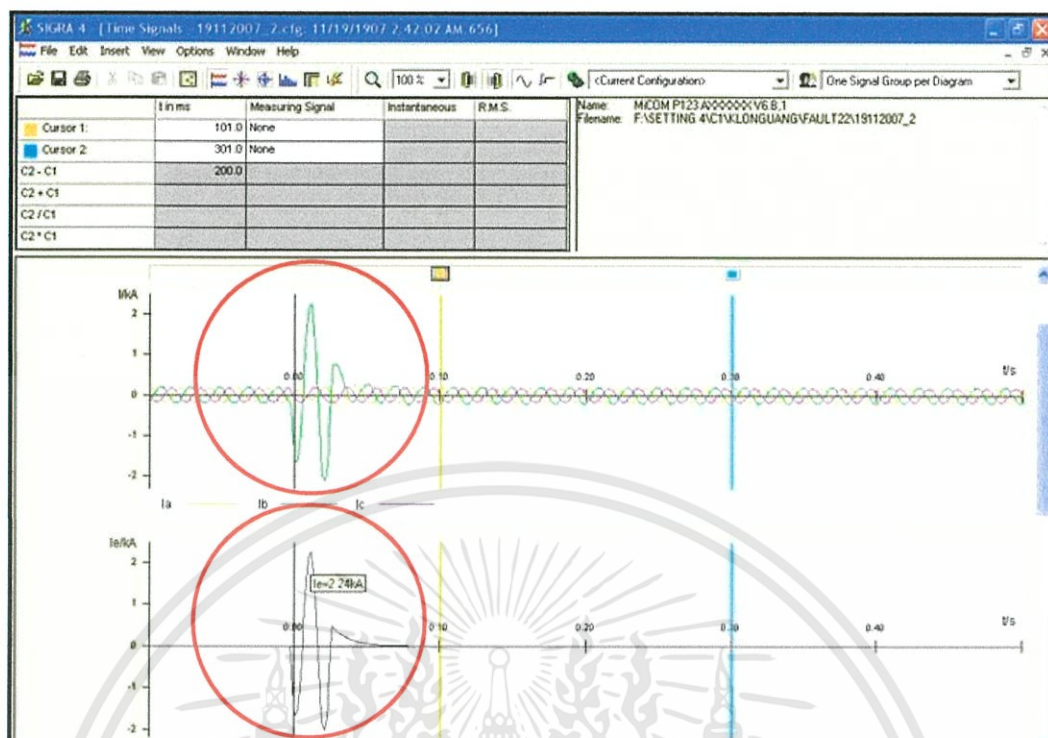
พื้นผิว	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)
ยางมะตอยแห้ง	0
คอนกรีตไม่อัดแรง	0
ทรายแห้ง	0
ทรายเปียก	15
ดินแห้ง	20
หญ้าแห้ง	25
ดินเปียก	40
หญ้าเปียก	50
คอนกรีตอัดแรง	75

รูปที่ 2.19 แสดงระดับกระแสไฟฟ้าในเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดกับระบบจำหน่าย ซึ่งโดยทั่วไป จะให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินป้องกันสายป้อน ทำให้พบปัญหาการป้องกันในช่วงที่การ ลัดวงจรมีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ เมื่อพิจารณาที่รีเลย์ของสถานีไฟฟ้าต้นทาง อุปกรณ์ป้องกันสายป้อน จะทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีระดับเกินกว่าค่าปรับตั้งของรีเลย์ โดยมีข้อกำหนดว่า ค่าปรับตั้งกระแสเริ่มทำงานจะต้องมีค่าสูงกว่ากระแสไหลสูงสุดของสายป้อน จากรูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ตรวจวัดได้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าปรับตั้งของรีเลย์ ทำให้รีเลย์สามารถตรวจจับเหตุการณ์ได้ และส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ป้องกันทำงาน แต่หากเกิดการลัดวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าค่าปรับตั้งการ ทำงานของรีเลย์ จะส่งผลให้รีเลย์ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้า เกินจึงไม่ทำงาน โดยทั่วไปการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงที่เกิดขึ้นบนสายป้อน จะมีค่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าค่าปรับตั้งการทำงานของรีเลย์ ดังแสดงในพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ระดับกระแสไฟฟ้าในเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดกับสายป้อนของระบบจำหน่าย [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่รีเลย์สามารถตรวจจับได้

(การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, สถานีไฟฟ้าคลองขวาง วันที่ 19 พ.ย. 2550.)

ในสถานีไฟฟ้าบางแห่งความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าพิกัดของ อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น การเปลี่ยนอุปกรณ์อาจต้องใช้เงินลงทุนสูงจึงมีหลายแนวทางในการพิจารณาเพื่อลดความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เช่น

- Bus-Splitting เป็นวิธีการแยกบัสออกเป็นสองส่วน ทำให้ความรุนแรงของฟอลต์ในแต่ละบัสลดลงได้เนื่องจากจำนวนไลน์ที่ต่อเข้าบัสแต่ละชุดลดลงทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบที่มองจากแต่ละบัสมีค่ามากขึ้น แต่วิธีนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้าหรือความน่าเชื่อถือในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้

- ใช้ Tie-Bus Circuit Breaker วิธีนี้จะใช้เงินลงทุนน้อย โดยจะออกแบบให้ Tie-Bus Circuit Breaker ทำงานก่อนเพื่อลดความรุนแรงของความผิดปกติ และเซอร์คิตเบรกเกอร์ที่จะกำจัดความผิดปกติจะทำงานภายหลัง

- ใช้ Series Reactor ในไลน์ วิธีนี้จะลงทุนสูงเนื่องจาก Reactor ต้องมีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับขนาดกระแสไฟฟ้าในไลน์ และอาจเกิดปัญหาเรื่อง VAR Compensate ขึ้น

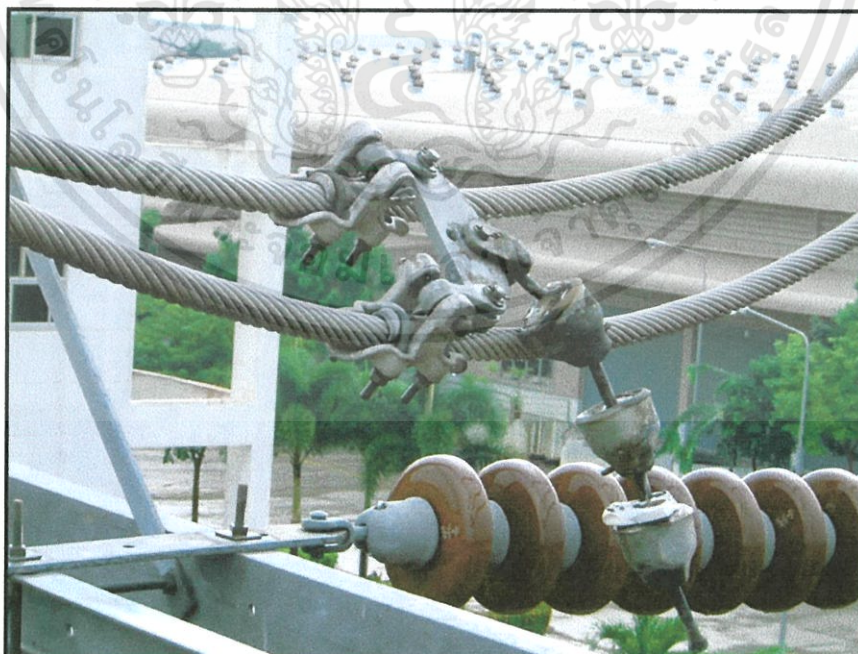
- ใช้ Neutral Impedance ต่อที่จุดนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถลดค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสได้ ซึ่งเป็นวิธีการไฟฟ้าส่วนภูมิกานำมาติดตั้งใช้งานในสถานีไฟฟ้า

## 2.7 การเสียสภาพการฉนวน [9]

ในบางครั้งนอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ฉนวนยังต้องทำหน้าที่รับแรงทางกลและต้องทนต่อพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าด้วย การเสียสภาพการฉนวนนั้นหมายถึง การที่ฉนวนนั้นเปลี่ยนสภาพไปสู่สภาพนำไฟฟ้า หรือเกิดการชำรุดเสียหายซึ่งอาจเกิดจากความเครียดของสนามไฟฟ้า แรงกลหรือความร้อน สำหรับการเสียสภาพการฉนวนแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

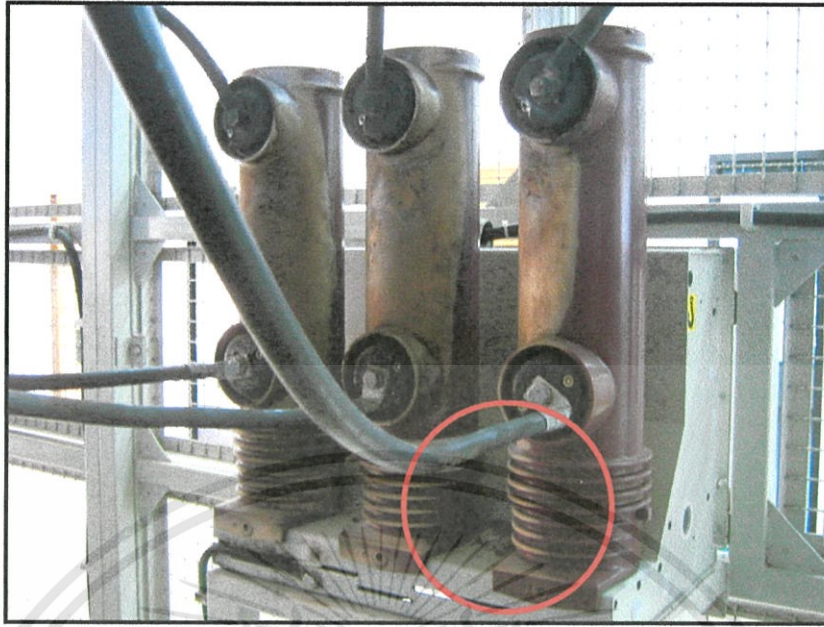
1. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากผลทางไฟฟ้า
  - การเกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเกินจากฟ้าผ่า การสวิตชิง
  - การเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเกิน การเกิดวาวไฟตามผิว หรือเจาะทะลุ
2. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากแรงกล
  - ฉนวนรับแรงกด แรงกุด แรงบิด
  - แรงระเบิดเนื่องจากการขยายตัวของวัสดุจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
3. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากความร้อน
  - ความร้อนจากแสงแดด
  - ความร้อนสะสมจากพลังงานที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรตลอดเวลา
  - ความร้อนจากพลังงานที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

สำหรับรูปที่ 2.21-2.23 แสดงให้เห็นถึงระบบการฉนวนของอุปกรณ์ที่ได้รับความเสียหาย ส่งผลให้ระบบการฉนวนล้มเหลว ทำให้ฉนวนดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้

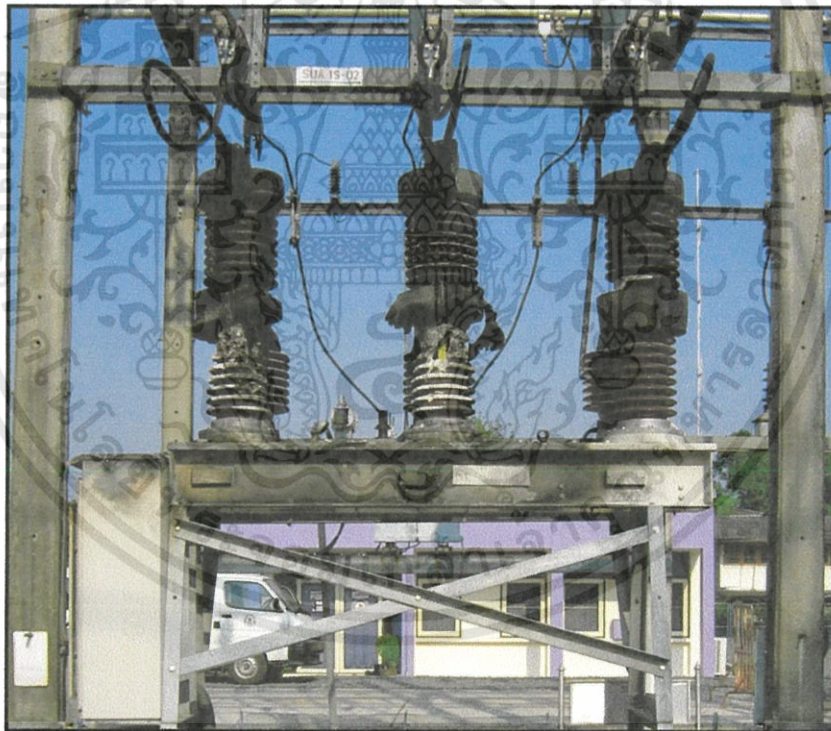


รูปที่ 2.21 ลูกถ้วยระเบิดเนื่องจากถูกฟ้าผ่าโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 เซอร์คิตเบรกเกอร์เกิดการอาร์กเนื่องจากสั้ว



รูปที่ 2.23 เซอร์คิตเบรกเกอร์ระเบิดเนื่องจากเกิดอาร์กจากการลัดวงจร

สำหรับการเสียดสภาพการฉนวนเนื่องจากความร้อนนั้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดเป็นพลังงานความร้อน ถึงแม้ว่าช่วงระยะเวลาการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าจะสั้นมากก็ตาม หากเกิดการสะสมความร้อนมากพอ ก็จะทำให้โลหะหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายและก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุที่ติดไฟได้ พลังงานความร้อนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$W = \int_0^{\infty} i dt = U_{A-K} Q \quad 2.1$$

เมื่อ  $U_{A-K}$  คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแอมโตน-แคโทด ตรงจุดที่ไฟฟ้าตกกระทบ  
 $Q$  คือ ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมแปร์-วินาที)

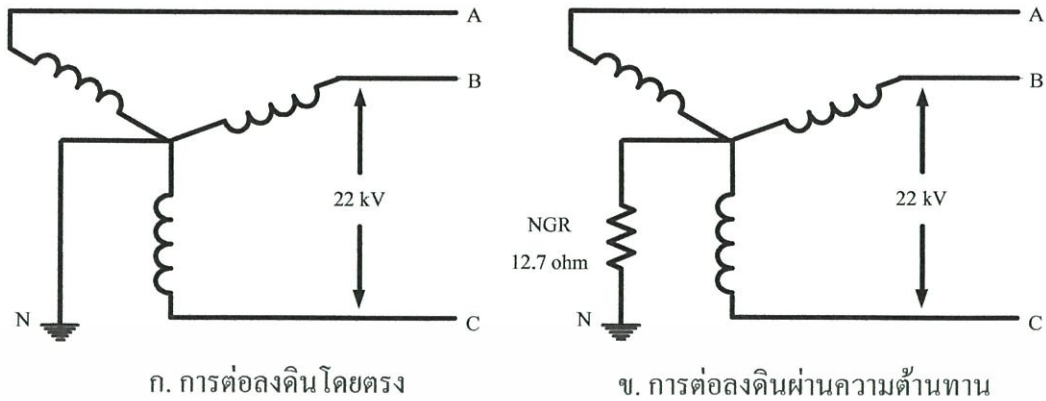
ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฉนวนนอกจากจะเกิดความร้อนแล้วในขณะเดียวกันก็จะเกิดแรงบิตขึ้นสองแบบคือ

1. เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำแล้วจะทำให้เกิดแรงบิตขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก โดยขนาดของแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง ( $I^2$ )
2. กรณีกระแสไฟฟ้าไหลบนวัสดุฉนวนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีน้ำหรือความชื้นก็จะเปลี่ยนเป็นไอ จนทำให้เกิดการระเบิดได้

## 2.8 โครงการควบคุมการจ่ายไฟแบบอัตโนมัติ (Distribution Automation System) [1]

เนื่องจากในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้ระบบการต่อลงดินที่จุดนิวทรัลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นแบบต่อลงดินโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 24.4 ก. ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่ใช้รีเลย์กระแสเกิน รีโคลสเซอร์และฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกัน แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินจะทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่ามาก ส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงได้ศึกษาการต่อลงดินที่จุดนิวทรัลแบบอื่นๆ เพื่อนำมาติดตั้งใช้งานแทนระบบการต่อลงดินโดยตรงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้รับความช่วยเหลือจากประเทศญี่ปุ่นผ่านทางสถาบัน JICA ในการดำเนินงานตามโครงการควบคุมการจ่ายไฟแบบอัตโนมัติ ซึ่งตามโครงการดังกล่าวจะมีการติดตั้งสวิตช์ควบคุมการ ปิด-เปิด วงจร (Remote Terminal Unit, RTU) และระบบคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการจ่ายไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ ดังนั้นถ้าเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสขึ้นในระบบจำหน่าย ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าสั้นลง และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะในวงจรที่รับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องเดียวกัน ส่งผลให้ RTU และระบบคอมพิวเตอร์ทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นในการนำระบบควบคุมการจ่ายไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเข้ามาติดตั้งใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาเปลี่ยนระบบการต่อลงดินที่จุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้าใหม่ เพื่อลดปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ



รูปที่ 2.24 แผนภาพของระบบที่มีการต่อลงดิน โดยตรงและผ่านความต้านทาน

ปี 2538 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทดลองติดตั้งใช้งาน NGR ตามคำแนะนำของ โครงการ DAS เพื่อลดผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะจากการเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่สถานีไฟฟ้าแรงดัน 1 และแรงดัน 2 ภายในนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จังหวัดปทุมธานี โดยติดตั้ง NGR ขนาด 12.7 โอห์ม ที่จุดนิวทรัลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังดังแสดงในรูปที่ 2.24 ข. และได้ติดตามผลการทดลองนำระบบ NGR ใช้งาน โดยการตรวจบันทึกเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบ ขณะเกิดการลัดวงจรด้วยเครื่อง Disturbance Recorder เป็นเวลา 10 เดือน และติดตามผลจากปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องจากผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม ซึ่งสรุปได้ว่าการติดตั้ง NGR สามารถลดความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสและทำให้คุณภาพการจ่ายกระแสไฟฟ้าดีขึ้น จำนวนครั้งที่กระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากสาเหตุการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมลดลง และในปี 2542 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อนุมัติการติดตั้ง NGR ขนาด 12.7 โอห์ม สำหรับสถานีไฟฟ้าในพื้นที่อุตสาหกรรม จำนวน 10 สถานี และปี 2543 อีกจำนวน 20 สถานี ปัจจุบันมีสถานีไฟฟ้าที่ติดตั้ง NGR ทั้งหมด 30 สถานี และ NGR เสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ จำนวน 7 สถานี

## 2.9 การติดตั้ง NGR ในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

สำหรับแนวทางการออกแบบมาตรฐานและข้อกำหนด NGR ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นั้นได้ทำการอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEEE Std. 32-1990 [10] โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์อื่น ๆ เพิ่มเติม ได้แก่

1. ติดตั้งสวิตช์บายพาสขนาดฟลักซ์ 24 kV 1,200 A จำนวน 2 ชุด เพื่อทำการ By Pass วงจรในกรณีที่ต้องการซ่อมบำรุงรักษา NGR หรือปลด NGR ออกจากระบบในกรณีที่เกิดความเสียหาย

2. ติดตั้งหม้อแปลงกระแสจำนวน 2 ชุด สำหรับ Ground relay (51N) และสำหรับ Restricted earth fault relay (87N) เพื่อทำการตรวจจับกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน NGR และป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในกรณีเกิดการลัดวงจร

3. ติดตั้ง Ground relay (51N) เพื่อตรวจจับกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน NGR

4. ติดตั้ง Restricted Earth Fault Relay (87N) เพื่อทำการตรวจจับในกรณีที่เกิดความผิดปกติแบบอิมพีแดนซ์สูงในโซนการป้องกันที่ตั้งไว้ ซึ่งโดยปกติจะตั้งไว้เพื่อป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

5. ติดตั้งอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ดังนี้

- Underground cable เป็นสายเคเบิลที่ต่อจากจุดนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมายังตัว NGR

- Control cable เป็นสายเคเบิลสำหรับอุปกรณ์ควบคุมและป้องกัน เช่น สายเคเบิลจากหม้อแปลงกระแสมายังรีเลย์ที่อยู่อาคารควบคุม

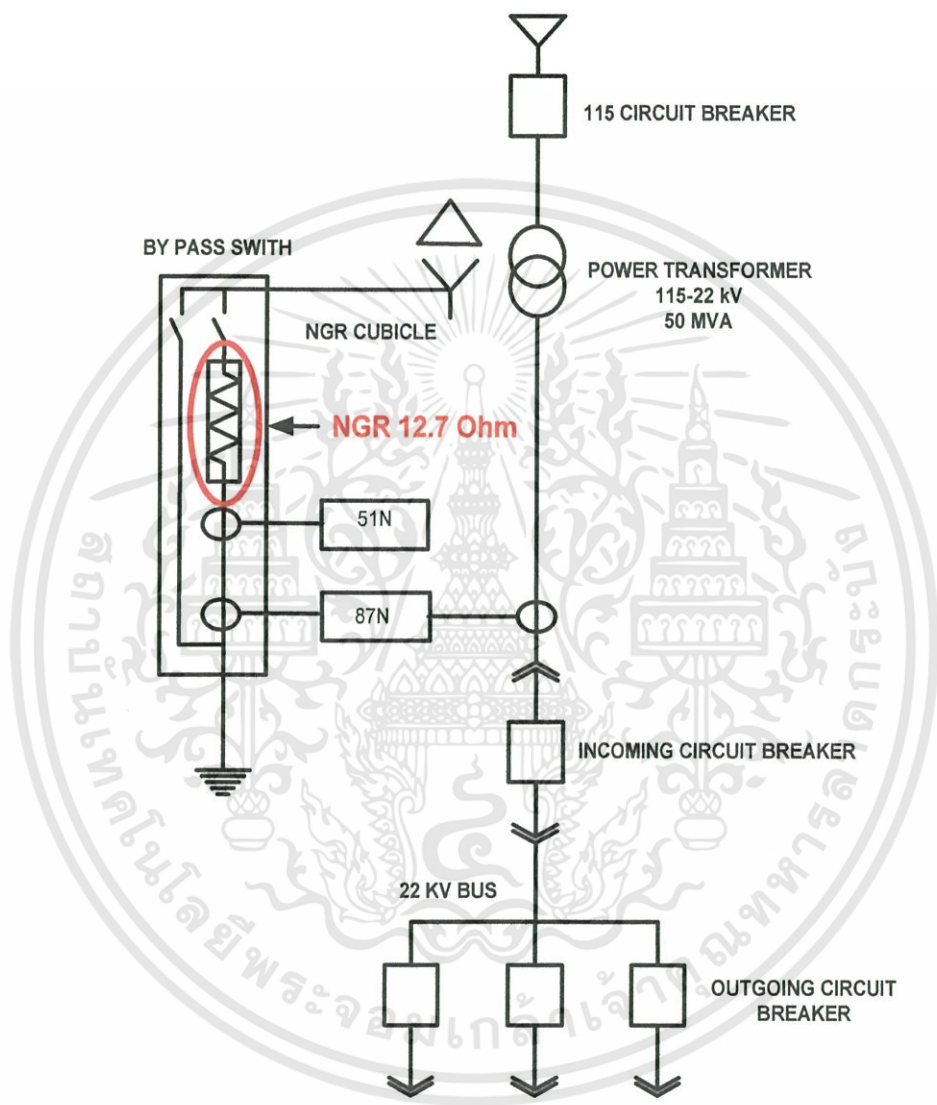
- ระบบแสงสว่าง ให้แสงสว่างเพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าตรวจสอบหรือบำรุงรักษา

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของ NGR ตามข้อกำหนดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [2]

Description	unit	22 kV system
Enclosure		
1. Cubicle type		Metal enclosed, air insulated
2. sheet steel thickness		at least 12 AWG or 2.0 mm
3. Degree of Protection		IP 44 or better
Resistor assembly		
4. Applied standard		IEEE standard 32 or equivalent
5. Rated voltage	kV	12.7
6. Rated current	A	1,000
7. Rated frequency	Hz	50
8. Basic Impulse Insulation Level (BIL)	kV	150
9. Resistance	$\Omega$	$12.7 \pm 10\%$
10. Temperature coefficient of resistivity	-	not more than 0.00031 per °C
11. Rated time	sec	10
12. Temperature rise	°C	760

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการติดตั้ง NGR ที่จุดนิวทรัลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในภายในสถานีไฟฟ้า 115-22 kV ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 2.25 โดยทำการติดตั้งในลานไกใกล้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 2.26 และ 2.27 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง NGR ภายในสถานีไฟฟ้าและจุดต่อลงดินที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังรวมทั้งการเดินสายเคเบิลใต้ดินไปยังตู้ NGR ตามลำดับ

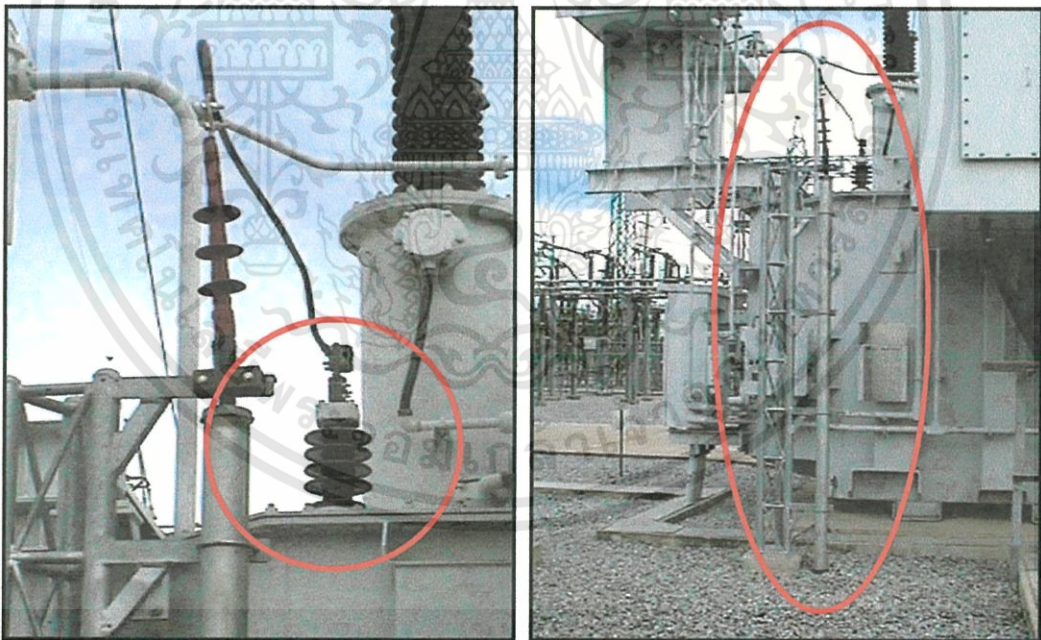


รูปที่ 2.25 แผนภาพเส้นเดียววงจรการติดตั้ง NGR ภายในสถานีไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ตำแหน่งตู้ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้า



ต่อลงดินที่จุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การเดินสายเคเบิลใต้ดินไปยังตู้ NGR

รูปที่ 2.27 ตำแหน่งการต่อลงดินที่จุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายก่อนการติดตั้ง NGR

เมื่อติดตั้ง NGR เข้าใช้งานในระบบที่สถานีไฟฟ้าแล้ว จำเป็นต้องมีการปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายเพื่อให้การทำงานมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

1. เปลี่ยนล่อฟ้าแรงสูงทั้งหมดในระบบจำหน่ายให้มีพิคัดสูงขึ้น โดยเปลี่ยนเป็นล่อฟ้าแรงสูงแบบ Metal-Oxide-Varistor พิกัด 24 kV (จากเดิมที่เป็นล่อฟ้าแบบ Silicon-Carbide พิกัด 20-21 kV และแบบ Metal-Oxide-Varistor พิกัด 20-21 kV )
2. เปลี่ยนหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Potential Transformer) ในระบบให้ใช้ Voltage Factor (V<sub>p</sub>) ที่สูงขึ้น จากเดิมที่ 1.5 เป็น 1.9 ซึ่งหากเลือกค่า V<sub>p</sub> ที่ต่ำเกินไปเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้นในระบบอาจทำให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัว (Saturate) เป็นผลให้อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าผิดพลาดได้
3. เปลี่ยนรีเลย์กระแสเกินให้เป็นชนิด Static Relay ทั้งด้านเฟสและกราวด์ เนื่องจากอุปกรณ์เดิมเป็นชนิด Electromechanical Relay ซึ่งมีระยะเวลาการคืนตัวช้า
4. ปรับตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ใหม่ เพื่อให้ระบบป้องกันทำงานสัมพันธ์กัน

## 2.11 ผลหลังการนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ [1]

หลังจากติดตั้ง NGR เข้าใช้งานในระบบแล้ว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการติดตามและเก็บรวบรวมข้อมูลผลที่เกิดขึ้นหลังการติดตั้ง NGR เข้าในระบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งใช้งาน NGR มีรายละเอียดดังนี้

### 1. แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

หลังนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะนั้นตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้คือไม่เกินร้อยละ 20 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟสใดเฟสหนึ่งของระบบจำหน่าย

ตารางที่ 2.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะหลังนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ

ชนิดของความผิดปกติ	Max. % Voltage Dip (Phase to Phase Voltage)	หมายเหตุ
Short Circuit Fault (P-P)	98.12 %	-
Single Line to Ground Fault (SLG)	20 %	ตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

### 2. แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ

ในส่วนของการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะนั้น จะเกิดในเฟสที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจรโดยวัดค่าเทียบกับกราวด์ (Phase to Ground Voltage) จะมีค่าดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ขนาดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังติดตั้ง NGR

สถานะ	Max. % Voltage Increase ของ Phase to Ground Voltage
ก่อนการติดตั้ง NGR	0 %
หลังการติดตั้ง NGR	77.8 %

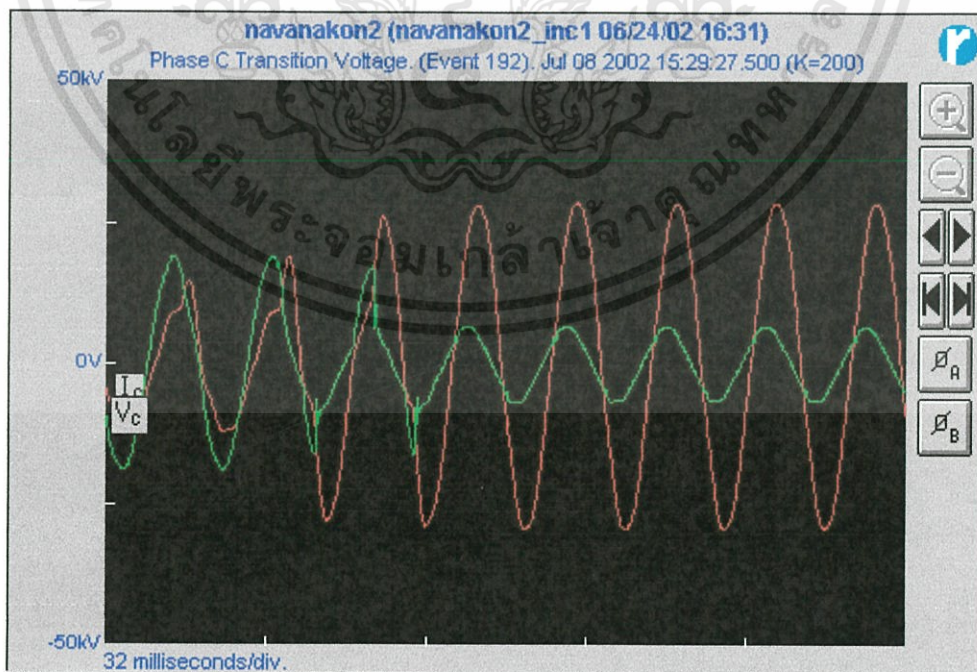
### 3. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส เมื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างก่อนและหลังติดตั้ง NGR จะมีค่าดังตารางที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าหลังการนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบ จะทำให้กระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสลดลงเหลือ 924 แอมแปร์ ซึ่งใกล้เคียงกับเป้าหมายที่โครงการ DAS ตั้งไว้ คือไม่เกิน 1,000 แอมแปร์

ตารางที่ 2.7 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้ง NGR

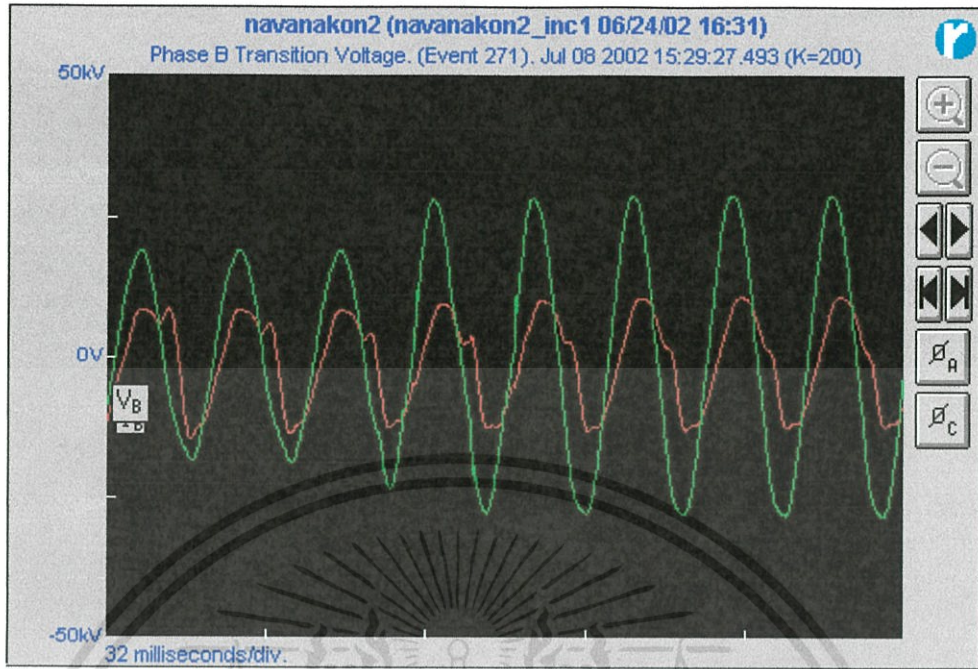
สถานะ	Max. Ground Fault Current (A)
ก่อนการติดตั้ง NGR	มากกว่า 2,000
หลังการติดตั้ง NGR	924

4. ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการบันทึกของเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า (Disturbance Record) เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส หลังการติดตั้งใช้งาน NGR ในระบบ ที่สถานีไฟฟ้าวนคร 2 จังหวัดปทุมธานี เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2545 เวลา 15.29 น. โดยเกิดการลัดวงจรลงดินที่เฟส C

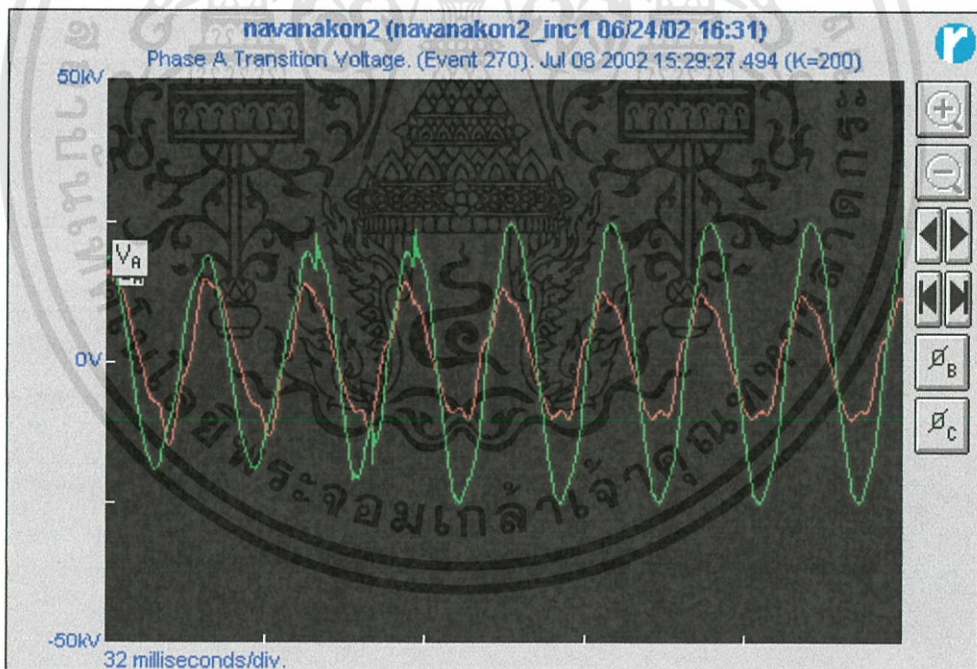


รูปที่ 2.28 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส B



รูปที่ 2.30 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส A

จากรูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินที่เฟส C แรงดันไฟฟ้าที่เฟส C จะลดลง จากสภาวะปกติ แต่กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ในส่วนของเฟส B และ A นั้นกระแสไฟฟ้าจะเป็นปกติแต่ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะขึ้นทั้งสองเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.29-2.30 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลภาคสนามที่ได้จากการเข้าตรวจสอบภายในสถานีไฟฟ้า โดยจะทำการตรวจสอบทางกายภาพของ NGR ที่ชำรุดเสียหาย เช่น วัดค่าความต้านทานของ NGR ที่ชำรุดเสียหายและผ่านการใช้งาน ตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ขณะติดตั้งใช้งานในระบบ และสุดท้ายคือการตรวจสอบความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ขดลวดของ NGR ในสภาวะการทำงานปกติ

#### 3.1 การเก็บข้อมูลสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่ NGR ชำรุดเสียหาย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบข้อมูลสถานีไฟฟ้าที่ NGR ชำรุดเสียหายโดยรวม ข้อมูลจากบันทึกที่สถานีไฟฟ้าแจ้งปัญหาการชำรุดไปยังกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และอีกส่วนได้จากการสอบถามจากเจ้าหน้าที่ประจำสถานีไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดต่าง ๆ เช่น วันที่เกิดการชำรุดเสียหาย สาเหตุความเสียหาย เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### - สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี [11]

วันที่ 13 กรกฎาคม 2548 เวลา 0.00-03.00 น. ได้เกิดฝนตกฟ้าคะนองอย่างหนักในพื้นที่อำเภอเขาย้อย ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากสายไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดวงจรที่ 10 ที่รับกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย ขาดตกลงบนถนน บริเวณใกล้เคียงกับศาลคอม จำกัด ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อยประมาณ 6 กิโลเมตร เนื่องจากถูกฟ้าผ่า ส่งผลให้พื้นผิวถนนเกิดการลุกไหม้ และ NGR ติดตั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องที่ 2 (TP2) ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อยเกิดการชำรุดเสียหาย เบื้องต้นสันนิษฐานว่าเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าต่ำไม่ถึงค่าปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย กระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงคงอยู่ในระบบเป็นเวลานาน

##### - สถานีไฟฟ้านนทรี จังหวัดปราจีนบุรี (บันทึกเหตุการณ์ประจำวันสถานีไฟฟ้านนทรี)

วันที่ 18 เมษายน 2548 เวลา 18.50 น. ฟ้าผ่าสายหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัด เฟส A วงจรที่ 1 ขาดตกลงพื้น หน้าร้านดวงมณีเครื่องเย็น สี่แยกไฟแดงบ้านโคก ห่างจากสถานีไฟฟ้านนทรีประมาณ 8 กิโลเมตร แต่พบว่าสายขาดตกพื้นตั้งแต่ 18.00 น. เนื่องจากชาวบ้านเห็นไฟลุกไหม้พื้นถนนคอนกรีตไหม้เป็นหลุมเป็นเวลานาน จึงโทรศัพท์แจ้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบิรินทร์บุรีสั่งให้สถานีไฟฟ้านนทรีปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์วงจรที่ 1

- สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล จังหวัดนครราชสีมา [12]

วันที่ 24 มีนาคม 2550 เวลา 13.30 น. แผนกควบคุมการจ่ายไฟ กองควบคุมและบำรุงรักษา ได้รับแจ้งว่า บริษัท คาวาซุมิ จำกัด มีสายไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดเฟส B เกิดอาร์กและขาดที่ สวิตช์ใบมีดเสาต้นที่ติดตั้งมิเตอร์แรงสูงในสภาพลงดินซึ่งรับกระแสไฟฟ้าจากวงจรที่ 5 สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล ห่างจากสถานีไฟฟ้า ประมาณ 7 กิโลเมตร ช่วงเวลาเดียวกันนั้นศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟ จังหวัดนครราชสีมา แจ้งว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์วงจรที่ 5 สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล Trip Lockout, Over Current Relay แสดงเฟส G-time และ NGR เกิดการระเบิดและลูกไหม้เงินชำรุดเสียหาย

- สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา [13]

วันที่ 29 มิถุนายน 2550 เวลา 18.51 น. วงจรที่ 8 สถานีไฟฟ้าคลองขวาง มีสายไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดเฟส C ขาด บริเวณไลน์แยกวัดน้ำใส ห่างจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง ประมาณ 7 กิโลเมตร ตรวจพบกระแส Unbalance เซอร์กิตเบรกเกอร์ Trip Lockout, Over Current Relay แสดงเฟส G-time และ NGR เกิดการระเบิดและไฟไหม้เงินชำรุดเสียหาย สาเหตุเบื้องต้นคาดว่า เกิดจากจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ Trip ชั่ว

### 3.2 การตรวจสอบความเสียหายทางกายภาพของ NGR

งานวิจัยนี้ได้เข้าทำการเก็บรวบรวมข้อมูล NGR ที่ได้รับความเสียหายที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา และสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล ภายในนิคมอุตสาหกรรมสุนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งสถานีไฟฟ้าแต่ละแห่งติดตั้ง NGR จำนวน 2 ชุด และ NGR ได้เกิดการชำรุดเสียหายจำนวน 1 ชุด

จากการเข้าตรวจสอบความเสียหายเบื้องต้นพบว่า NGR ที่ได้รับความเสียหาย เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง มีการลุกไหม้และติดไฟ ระบบการฉนวนจำพวกลูกถ้วยเสียหายทั้งหมดไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ อุปกรณ์ภายในตู้ NGR ทั้งหมดได้รับความเสียหายอย่างรุนแรง โลหะจำพวกอะลูมิเนียมหลอมละลาย ขดลวดความต้านทานของ NGR สูญเสียสภาพทางกล หม้อแปลงกระแสของเครื่องวัดได้รับความเสียหายจากการไหม้เงินไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ สภาพความเสียหายของ NGR ทั้งสองสถานีมีสภาพใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ NGR เกิดการชำรุดเสียหาย โดยสภาพก่อนและหลังได้รับความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 3.1-3.14



รูปที่ 3.1 สภาพปกติภายนอกของตู้ NGR



รูปที่ 3.2 สภาพภายนอกของตู้ NGR ภายหลังจากได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สภาพปกติภายในของตู้ NGR



รูปที่ 3.4 สภาพภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 สภาพปกติของขดลวด NGR



รูปที่ 3.6 ขดลวด NGR หลังได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สภาพปกติลูกถ้วยที่ติดตั้งภายในตู้ NGR



รูปที่ 3.8 ลูกถ้วยที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 สภาพปกติของหม้อแปลงกระแสที่ติดตั้งภายในตู้ NGR



รูปที่ 3.10 หม้อแปลงกระแสที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

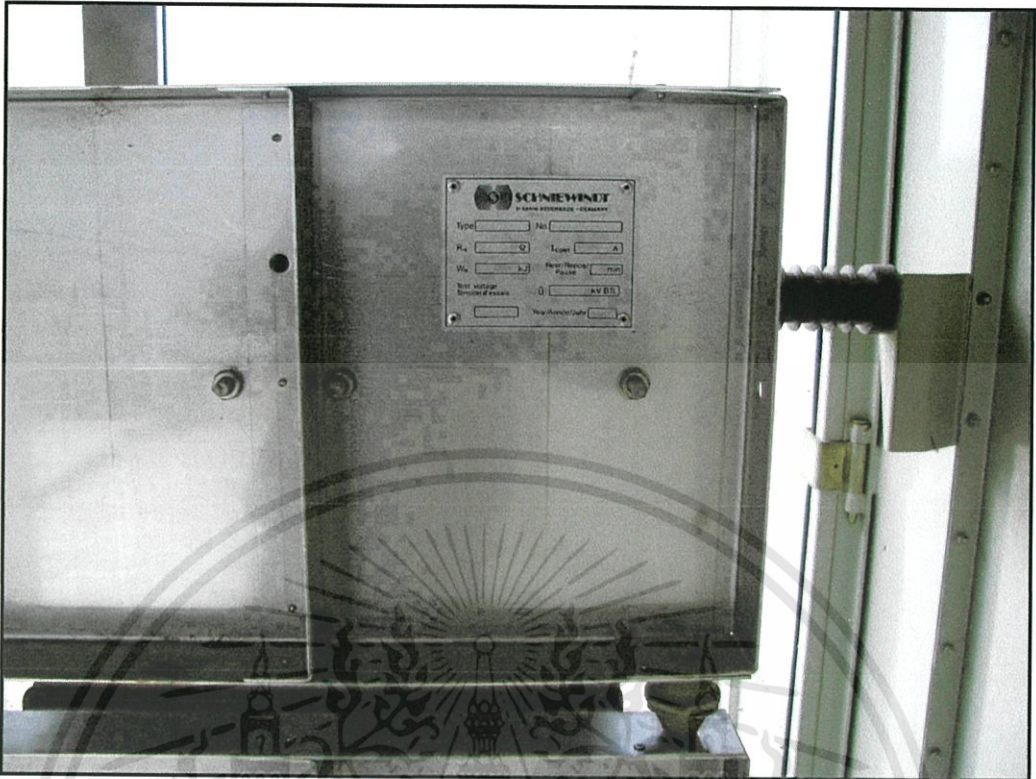


รูปที่ 3.11 สภาพปกติของ Cable Riser ที่ติดตั้งภายในตู้ NGR

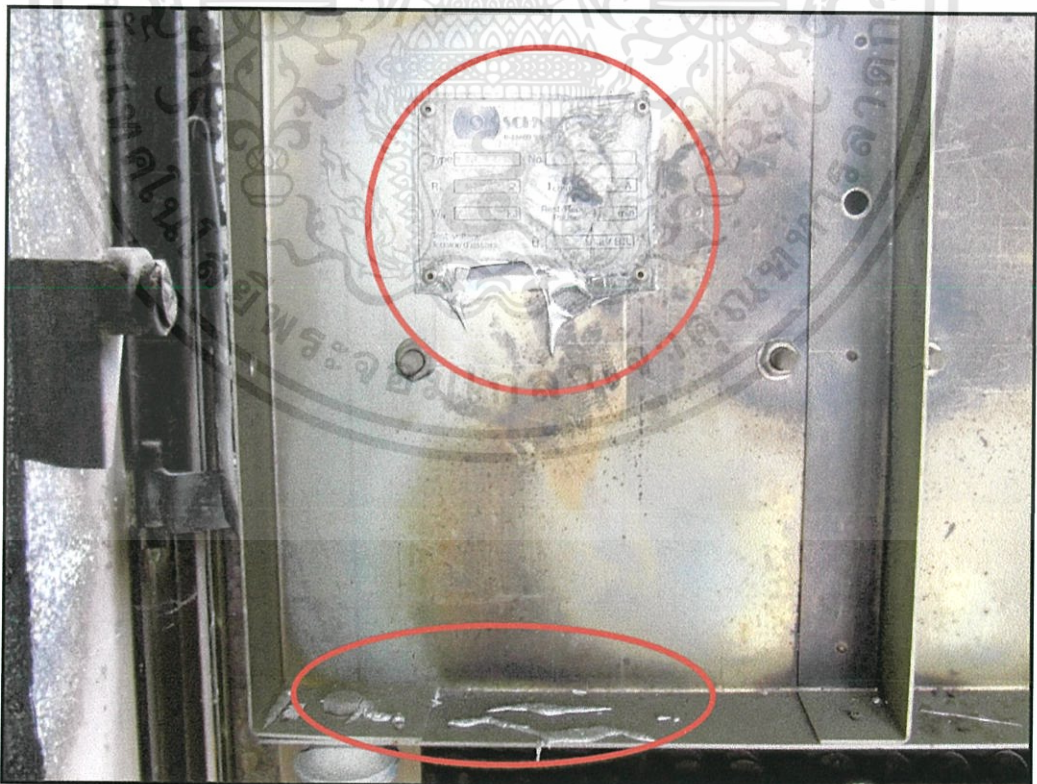


รูปที่ 3.12 Cable Riser ที่ติดตั้งภายในตู้ NGR ภายหลังได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 สภาพปกติของ Name Plate ของ NGR

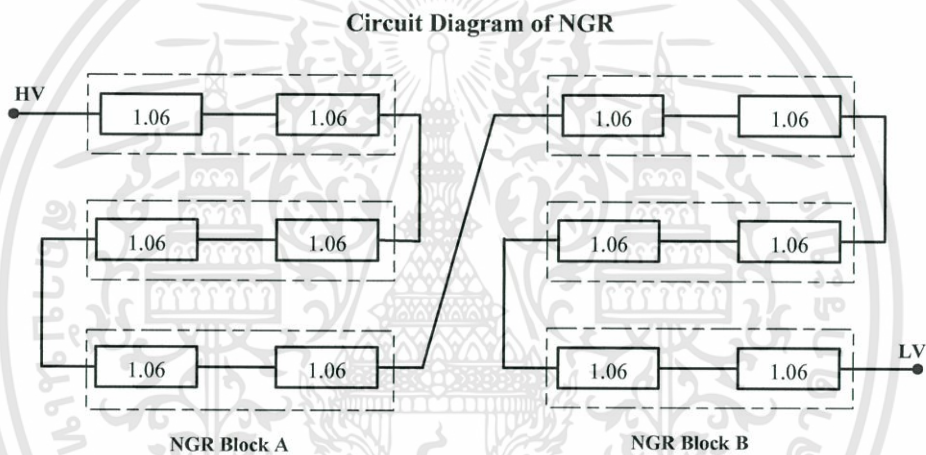


รูปที่ 3.14 ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้ Name Plate อะลูมิเนียมหลอมละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเก็บค่าความต้านทานขดลวดของ NGR

การเก็บค่าความต้านทาน NGR นั้น ผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง Digital Micro Ohmmeter ผลิตภัณฑ์ MEGABRAS รุ่น MPK-2000e ทำการเก็บค่าความต้านทานของ NGR โดยวัดค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ชุดที่ชำรุดเสียหายและชุดที่ยังไม่ชำรุดเสียหายแต่ผ่านการใช้งานมาแล้ว วิธีวัดค่าความต้านทานของขดลวด NGR จะวัดทีละขดลวดซึ่งมีทั้งหมด 12 ขดลวดดังแสดงในรูปที่ 3.15 และวัดรวมทั้ง 2 Block (Block A และ Block B) หลังจากนั้นจึงวัดรวมทั้งชุดอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้ก่อนวัดค่าความต้านทาน ควรทำความสะอาดจุดที่จะทำการวัดก่อนทุกครั้ง เช่น ขัดด้วยแปรงทองเหลือง เนื่องจากขดลวดของ NGR มีคราบสนิมและคราบขี้เถ้าที่เกิดจากไฟไหม้ติดอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อให้ค่าที่ได้จากการวัดมีความถูกต้องมากที่สุด โดยมีรายละเอียดผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวด NGR แสดงดังตารางที่ 3.1-3.3



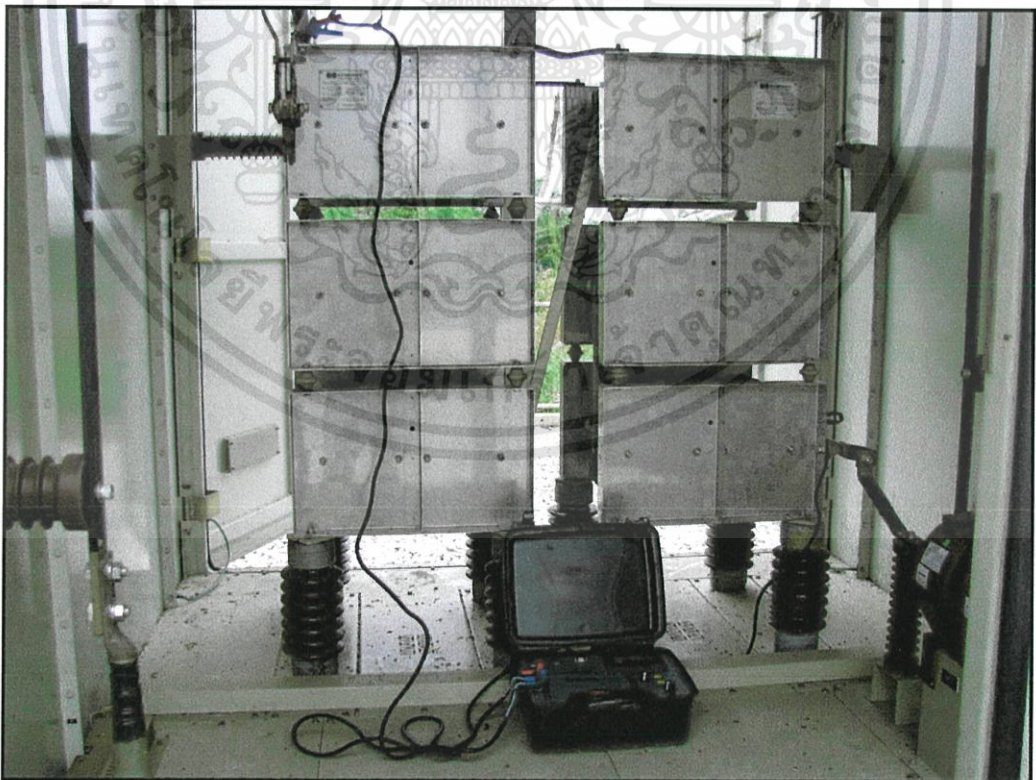
รูปที่ 3.15 วงจรการต่อชุดขดลวดของ NGR [13]

ข้อปฏิบัติกรณีการเข้าเก็บข้อมูลภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต้องได้รับการอนุญาตจากเจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก่อนทุกครั้ง และขณะปฏิบัติงานจะต้องมีเจ้าหน้าที่คอยกำกับดูแลอย่างใกล้ชิด เนื่องจากมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลาและมีระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV สำหรับการวัดค่าความต้านทานของ NGR ที่ยังไม่ชำรุดเสียหายนั้น ให้ทำการตรวจสอบว่า NGR ชุดดังกล่าวได้ทำการปลดออกจากระบบแล้วหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 หากยังไม่ปลดออกจากระบบจะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้ เพราะอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานได้ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบขณะที่เรากำลังทำการวัดค่าความต้านทาน เนื่องจากจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดของ NGR

ในการวิจัยนี้ได้เข้าทำการเก็บข้อมูลค่าความต้านทานของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา และสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 3.16 - 3.19

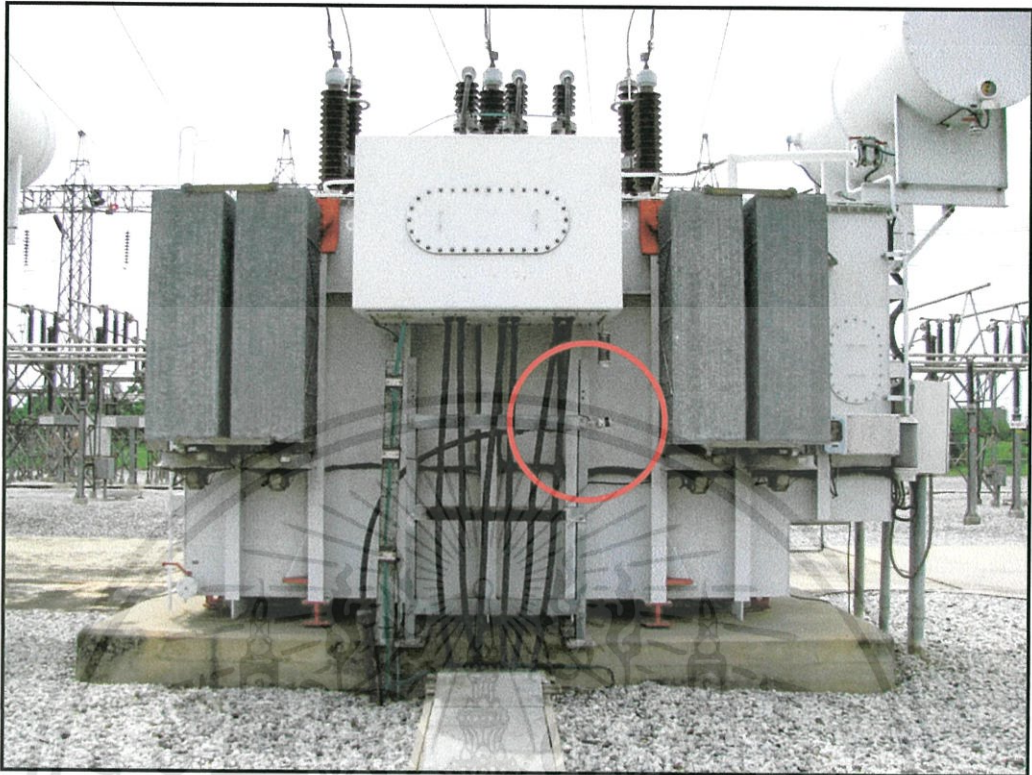


รูปที่ 3.16 การวัดค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ชุดที่ได้รับความเสียหาย



รูปที่ 3.17 การวัดค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ชุดที่ไม่ได้รับความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 NGR ชุดที่ได้รับความเสียหายถูกปลดออกจากระบบ



รูปที่ 3.19 ค่าความต้านทานขดลวดของ NGR ที่วัดได้  
(สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง ชุดที่ไม่ได้รับความเสียหาย

Terminal	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)				Terminal
HV	(1) 1.12	(2) 1.09	(7) 1.06	(8) 1.10	
	(4) 1.11	(3) 1.12	(10) 1.11	(9) 1.12	
	(5) 1.12	(6) 1.04	(11) 1.10	(12) 1.05	LV
	Block A = 6.90		Block B = 6.89		
	HV-LV = 13.91				

ตารางที่ 3.2 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง ชุดที่ได้รับความเสียหาย

Terminal	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)				Terminal
HV	(1) วัดค่าไม่ได้	(2) 0.91	(7) 0.76	(8) 1.08	
	(4) 1.09	(3) 0.94	(10) 0.85	(9) 1.09	
	(5) 1.09	(6) 1.09	(11) 1.07	(12) 0.45	LV
	Block A = 4.42		Block B = 4.04		
	HV-LV = 9.40				

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล ชุดที่ได้รับชำรุดเสียหาย

Terminal	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)				Terminal
HV	(1) 1.10	(2) 1.14	(7) 0.94	(8) วัดค่าไม่ได้	
	(4) 1.00	(3) 1.10	(10) 1.00	(9) 1.05	
	(5) 1.15	(6) 1.14	(11) 1.17	(12) 1.15	LV

สำหรับสถานีไฟฟ้าห้วยทะเลนั้นไม่สามารถทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแต่ละ Block ได้เนื่องจาก NGR เสียหายอย่างหนัก บริเวณจุดต่อของขดลวดแต่ละชุดนั้นเสียหายจากไฟไหม้และการระเบิดอย่างรุนแรง ทำให้สามารถวัดค่าความต้านทานของขดลวด NGR ได้เพียงแต่ละขดลวดเท่านั้น ในส่วน NGR ชุดที่ 2 (NGR-02) ไม่สามารถเข้าทำการเก็บข้อมูลได้เพราะปัจจุบันได้นำเข้าใช้งานในระบบตามเดิมแล้ว เนื่องจากได้รับการร้องขอจากผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม เรื่องคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะขึ้นบ่อยครั้งหลังทำการปลด NGR ออกจากระบบ

สำหรับการวัดค่าความต้านทานของขดลวด NGR ที่ชำรุดเสียหายนั้น พบว่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสียหายทางกล สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับขดลวดนั้น เราจะพบว่าความร้อนที่เกิดจากการระเบิดและไฟไหม้นั้นทำให้ขดลวดย่อยของ NGR แต่ละชุดนั้นเกิดการลัดวงจรและเปิดวงจรได้ เช่น ขดลวดความต้านทานที่วัดค่าได้น้อยกว่าค่าปกติจะเกิดจากการลัดวงจรที่จุดต่อ เนื่องจากการหลอมละลายของขั้วต่อทำให้ลดค่าความต้านทานลงได้ ในส่วนของค่าความต้านทานที่เพิ่มมากขึ้นหรือไม่สามารถวัดค่าได้นั้นเกิดจากการเปิดวงจรเนื่องจากไฟไหม้และแรงระเบิด ส่งผลให้ขดลวดย่อยไม่ต่อถึงกัน หรือถึงกันแต่พื้นที่สัมผัสมีความต้านทานสูง

### 3.4 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ในสภาวะการทำงานปกติ

สำหรับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ในสภาวะการทำงานปกตินั้น จะต้องทำการวัดจาก NGR ที่ติดตั้งและใช้งานในระบบ โดยผู้วิจัยได้เข้าทำการเก็บค่าและรวบรวมข้อมูลจากส่วนเกี่ยวข้อง ซึ่งมีทั้งหมด 12 สถานี สำหรับเครื่องมือวัดค่ากระแสไฟฟ้านั้น ผู้วิจัยได้ใช้ Power Meter ผลิตภัณฑ์ FLUKE รุ่น 41B ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และมีผลการตรวจสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ของแต่ละสถานีไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.20 ค่ากระแสที่ไหลผ่าน NGR ขณะติดตั้งใช้งานในระบบ (สถานีไฟฟ้านคร 1 วันที่ 6 ธันวาคม 2550 เวลา 10.05 น.)

ตารางที่ 3.4 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ขณะติดตั้งใช้งาน

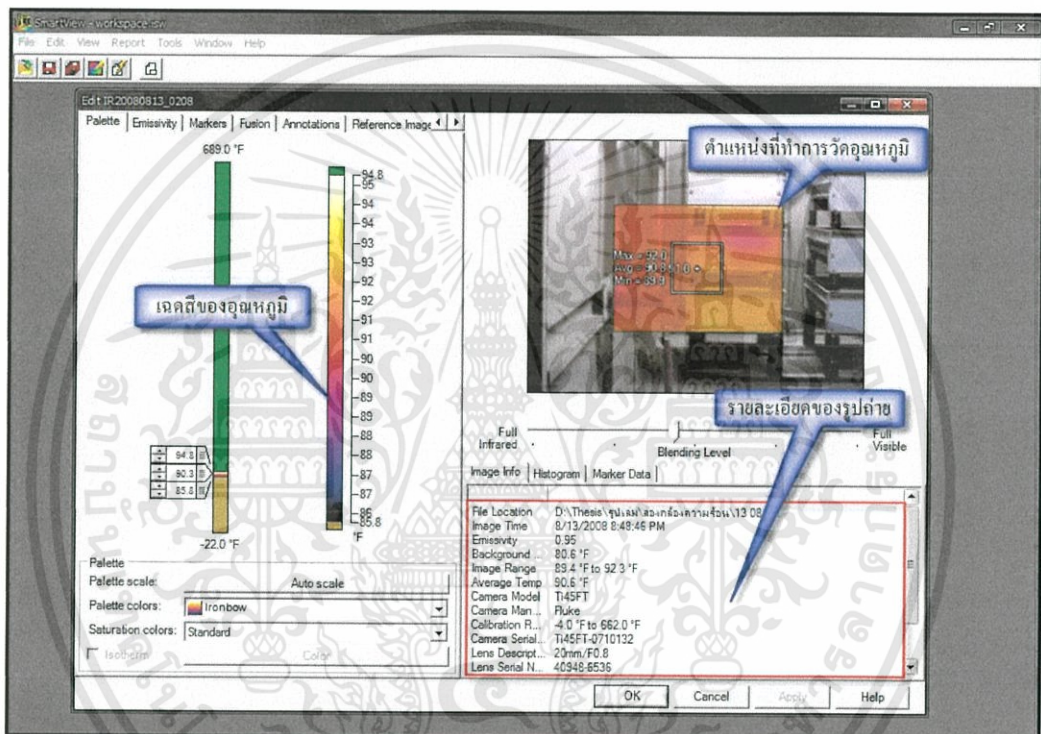
ลำดับที่	สถานีไฟฟ้า	NGR – 01 (TP1)	NGR – 02 (TP2)
		กระแสไฟฟ้า (A)	
1	โรจนะ	0.33	0.1
2	บางกระสั้น	0.08	0.09
3	บางพระครู	0.05	2.4
4	บ้านเลน	0.13	0.12
5	บางกระดี	0.08	0.09
6	กบินทร์บุรี	-	0.24
7	นนทบุรี	5.35	0.51
8	หนองปลิง	0.14	0.08
9	โคกเข้	3.34	0.17
10	นวนคร 1	0.14	0.10
11	นวนคร 2	0.21	0.07
12	นวนคร 3	0.16	0.14
13	ห้วยทะเล	-	0.34

### 3.5 การตรวจหาความร้อนที่ขดลวด NGR ในสภาวะการทำงานปกติ

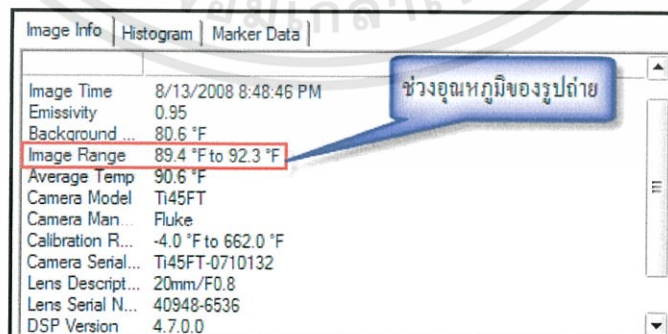
การตรวจหาจุดร้อน เป็นการตรวจสอบหาความผิดปกติทางไฟฟ้าเพื่อให้สามารถวางแผนการแก้ไขปัญหาที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าดับล่วงหน้าได้ เช่นเมื่อตรวจสอบพบจุดที่เกิดปัญหา ร้อนผิดปกติ ผู้รับผิดชอบจะนำปัญหาอุปสรรคและความจำเป็นมาพิจารณา สำหรับจัดเตรียม อุปกรณ์เครื่องมือสำหรับแก้ไขความผิดปกติ เพื่อให้มีระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบนั้นจะใช้ กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imager)

สำหรับการตรวจหาจุดร้อนที่ขดลวด NGR เป็นการตรวจสอบหาความร้อนสะสมซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดของ NGR ในสภาวะปกติ เพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานเบื้องต้นที่ระบุว่าความร้อนสะสมดังกล่าวเป็นสาเหตุหรือมีส่วนที่ทำให้ขดลวดของ NGR ชำรุดเสียหาย โดยผู้วิจัยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนผลิตภัณฑ์ FLUKE รุ่น Ti45 ในการถ่ายภาพความร้อนและเก็บข้อมูลที่สถานีไฟฟ้า นวนคร 1, สถานีไฟฟ้านวนคร 3 และสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล

จากการเข้าตรวจสอบพบว่าความร้อนเป็นปกติ และขณะเปิดประตูตู้ออกก็ไม่พบว่ามี ความร้อนแผ่ออกมาแต่อย่างใด และจากการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ของกล้องถ่ายภาพความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.21 พบว่าอุณหภูมิของขดลวด NGR อยู่ในช่วงระหว่าง 88-92 องศาฟาเรนไฮต์ (31.11-33.33 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่ามี การติดตั้ง Heater ไล่ความชื้น เพื่อให้ตู้ NGR นั้นแห้งอยู่เสมอ แต่ก็ไม่พบว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ขดลวดของ NGR มีความร้อนสูงขึ้นจนผิดปกติ สำหรับความร้อนสูงสุดที่วัดได้ที่ขดลวดของ NGR ในการเก็บข้อมูล คือ 92 องศาฟาเรนไฮต์ (33.33 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หน้าต่างของ โปรแกรมของกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLUKE รุ่นTi45)



รูปที่ 3.22 รายละเอียดภาพถ่ายที่ได้จาก โปรแกรมของกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLUKE รุ่นTi45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้

จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ตลอดเวลานั้นไม่สามารถก่อให้เกิดความร้อนสะสมจนเป็นสาเหตุหรือปัจจัยที่จะทำให้ NGR เกิดการระเบิดหรือไฟไหม้ได้และข้อสังเกตจาก Name Plate อะลูมิเนียมที่หลอมละลายนั้น ทำให้เราทราบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับ NGR เมื่อเกิดการระเบิดและไฟไหม้นั้น จะต้องสูงกว่า 660 องศาเซลเซียส เพราะสามารถทำให้อะลูมิเนียมหลอมละลายได้ (จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม 660.45 องศาเซลเซียส [14]) และจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมในภาคสนามนั้น จะพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้ NGR เกิดความเสียหายนั้นเกิดจากการลัดวงจรลงดินในระบบจำหน่ายที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกลงพื้น ดังนั้นในการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จะนำเหตุการณ์ที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกลงพื้นมาพิจารณา ดังจะกล่าวในบทต่อไป

## บทที่ 4

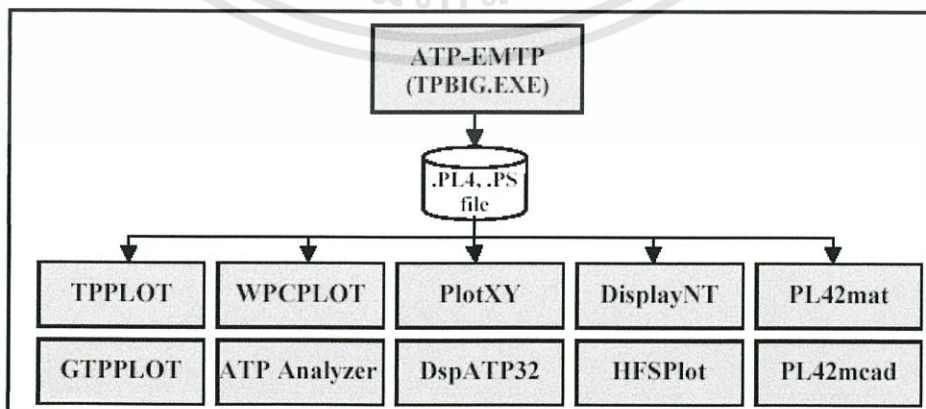
# การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ และการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรมเพื่อผลของระบบในสถานะปกติ และตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ใช้ป้อนในโปรแกรม หลังจากนั้น จะทำการจำลองวิเคราะห์ระบบเหตุการณ์กรณีตัวอย่างที่ทำให้ NGR ได้รับความเสียหาย และทำการจำลองการเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสในระบบไฟฟ้าเมื่อระบบมีปัจจัยที่แตกต่างกัน ต่อจากนั้น จะนำผลการจำลองระบบที่ได้ทั้งหมด มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากภาคสนามเพื่อหาสาเหตุที่สามารถเป็นไปได้ที่ส่งผลให้ NGR เกิดความเสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสขึ้น

### 4.1 โปรแกรม ATP-EMTP

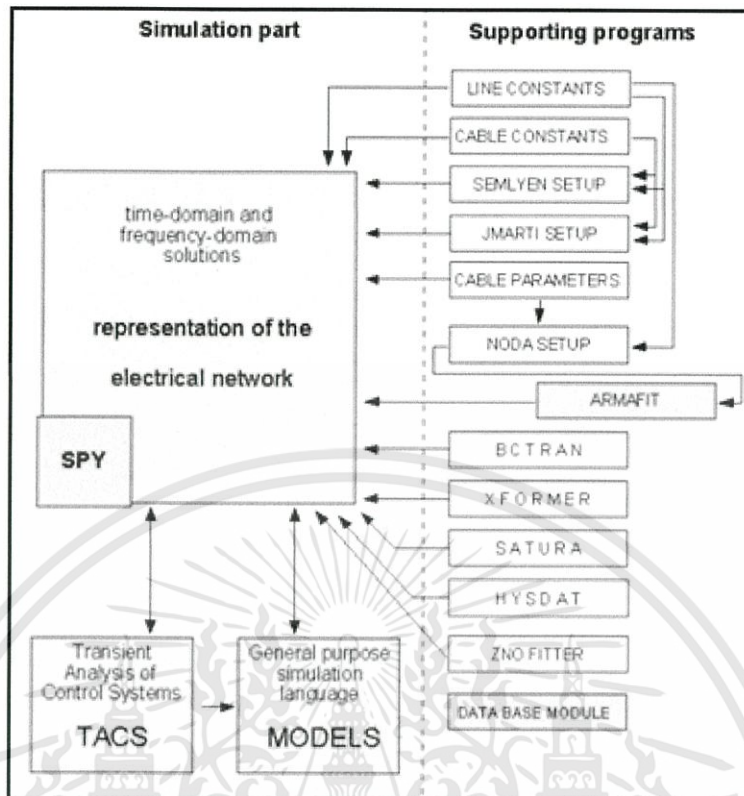
โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transients Program version of Electro Magnetic Transients Program) [15] เป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองวิเคราะห์เหตุการณ์ Electromagnetic Transients ในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยแก้ปัญหาทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะ ประกอบด้วย Module ที่รองรับการใช้งาน ซึ่งใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้าประกอบการจำลองวิเคราะห์ เช่น พารามิเตอร์ของสาย หรือพัฒนาการของเมตริก RL ที่ใช้แทนสายหลายเฟส หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีหลายขดลวด ในกรณีเป็นการจำลองวิเคราะห์เหตุการณ์ที่พิจารณาทางด้านเวลา (Time Domain) ลักษณะ Module ในการจำลองวิเคราะห์เหตุการณ์และส่วนที่รองรับการใช้งานจะเป็นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

ทฤษฎีการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม ATP-EMTP ประกอบไปด้วยการพิจารณาทางด้านเวลา (Time Domain) และด้านความถี่ (Frequency Domain) โดยจะเป็นการวิเคราะห์ในลักษณะของ Numerical Modeling



รูปที่ 4.1 Supporting Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 Module ที่รองรับการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP

1. ทฤษฎีการคำนวณที่พิจารณาทางด้านเวลา

ระบบไฟฟ้าที่อธิบายในโปรแกรม ATP-EMTP ใช้สมการจุด (Node Equation) ของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรที่ต้องการหา ในรูปฟังก์ชันของ Node Voltage การคำนวณสำหรับในแต่ละส่วนเมื่อพิจารณาทางด้านเวลาเป็นลักษณะของเวลาที่แบ่งเป็นช่วง ๆ ค่าที่ได้ของตัวแปรในระบบที่เวลา  $t$  จะสามารถหาได้จากการทราบค่าของตัวแปรที่เวลา  $t-\Delta t$  ซึ่งช่วงเวลา  $\Delta t$  ถูกกำหนดให้มีขนาดเล็ก สำหรับใช้ใน Differential Equation ซึ่งเป็นการประมาณค่าโดยความแตกต่างของสมการ

2. ทฤษฎีการคำนวณที่พิจารณาทางด้านความถี่

ทฤษฎีการคำนวณที่พิจารณาทางด้านความถี่ ที่ใช้ในโปรแกรม ATP-EMTP จะมีพื้นฐานมาจากกระบวนการในสถานะคงตัวของไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น Nodal Equations จะเขียนโดยใช้คุณสมบัติของ Complex Phasor สำหรับกระแสไฟฟ้าและโหนดของแรงดันไฟฟ้าหลายๆชนิด ซึ่งมี  $n$  โหนด

## 4.2 การสร้างแบบจำลอง และพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เพื่อใช้ในโปรแกรม ATP-EMTP แบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

### 1. แหล่งจ่าย 3 เฟส 115 kV 50 Hz (Source)

การจำลองแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า เป็นการจำลองวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าคงที่ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV และความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของคลื่นไซน์ ที่ระดับความถี่ 50 Hz โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์คือค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบกับกราวด์ ดังนั้นในการจำลองวิเคราะห์แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ตามสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} V_{\text{Peak}} &= V_{\text{Bus}} \times \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \\ &= 115 \times 10^3 \times \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \\ &= 93,897.11 \text{ V} \end{aligned} \quad 4.1$$

เมื่อ  $V_{\text{Bus}}$  คือ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

### 2. หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer)

การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับการจำลองวิเคราะห์นั้น จะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมัน ขนาด 50 MVA 3 เฟส แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 115 kV และแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 22 kV ความถี่ 50 Hz โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูล Factory Test ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 50 MVA

Base on	50 MVA
Loss	22.427 kW
Load Loss	128.938 kW
Impedance	14.59 %

### 3. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV (Distribution System)

การสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ประเภท คือ พารามิเตอร์ที่คงที่และพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นการเลือกแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ได้ผลการจำลองวิเคราะห์ที่ถูกต้องหรือมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

ในการจำลองวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ต้องทำการตรวจสอบโครงสร้างของระบบจำหน่ายก่อน เนื่องจากโครงสร้างแต่ละรูปแบบมีจะพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับการจำลองวิเคราะห์ในโปรแกรมนั้นจะใช้แบบจำลองสายเคเบิลอากาศแบบ 3 เฟส ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร ติดตั้ง 2 วงจรบนเสาหนึ่งต้น มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ของสายตัวนำไฟฟ้าระบบจำหน่าย [16]

Circuit Name	52241M0	
Conductor Type	185PIC25	
Code Conductor	5GD185PICS	
$R_1$	0.210656	Ohm/km
$X_1$	0.414406	Ohm/km
$R_0$	0.409841	Ohm/km
$X_0$	1.616029	Ohm/km

### 4. ตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank)

โดยทั่วไปในการสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุจะใช้ลักษณะของการจำลองแบบ Lumped Capacitance เป็นลักษณะการต่ออนุกรมกันของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ สำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ ของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ (MVar) แรงดันของระบบและลักษณะการต่อกันของตัวเก็บประจุ สำหรับตัวเก็บประจุภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีขนาด 2.4 MVar ต่อชุด มีทั้งหมดจำนวน 3 ชุด พิกัดแรงดัน 22 kV โดยสามารถหาค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$X_c = \frac{[(kV)^2]}{MVar} \quad 4.2$$

$$= \frac{(22)^2}{2.4}$$

$$= 201.67 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} \quad 4.3$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 50 \times 201.67}$$

$$= 15.78 \mu F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. ตัวต้านทานต่อลงดิน (NGR)

สำหรับ NGR ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ จะใช้ความต้านทานขนาด 12.7 โอห์ม โดยไม่พิจารณาถึงค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งการหาค่าความต้านทานของ NGR จะเป็นไปตามสมการ 4.4 [5]

$$V_{\phi} = I_{\text{Limit}} \times R_{\text{NGR}} \quad 4.4$$

$$\frac{22}{\sqrt{3}} \times 1000 = 1000 \times R_{\text{NGR}}$$

$$R_{\text{NGR}} = 12.7 \Omega$$

เมื่อ  $V_{\phi}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบจำหน่าย  
 $I_{\text{Limit}}$  คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินที่จำกัดไว้  
 $R_{\text{NGR}}$  คือ ค่าความต้านทานของ NGR

### 6. โหลด (Load)

โหลดทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV เป็นการจำลองในลักษณะของความต้านทานต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำแบบเดลต้า (Delta) ซึ่งรวมถึงการพิจารณาผลของ Power Factor ด้วย โดยค่าของความต้านทานกับความเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะโหลดทั่วไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งในการหาค่าจะเป็นไปตามสมการที่ 4.5 – 4.7

$$Z_{\text{base}} = \frac{kV_{\phi}^2}{\text{MVA}_{\phi}} \quad 4.5$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(22/\sqrt{3})^2}{(8/3)}$$

$$= 60.48 \Omega$$

$$R = Z_{\text{base}} \times \text{P.F.} \quad 4.6$$

$$= 60.48 \times 0.85$$

$$= 51.41 \Omega$$

$$X_L = \sqrt{Z_{\text{base}}^2 - R^2} \quad 4.7$$

$$= \sqrt{60.48^2 - 51.41^2}$$

$$= 31.86 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \times 50}$$

$$= 101.47 \text{ mH}$$

\* กำหนดให้ค่า Power Factor มีค่าเท่ากับ 0.85

\*\* กำหนดให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจ่ายโหลดร้อยละ 80 ต่อวงจร เท่ากับ 8 MW/วงจร

### 7. ค่าพารามิเตอร์ความต้านทานพื้นผิวลวดวงจรลงดิน (Ground Resistance)

ค่าพารามิเตอร์ความต้านทานพื้นผิวลวดวงจรลงดินที่จะนำไปใช้ป้อนให้กับโปรแกรม ATP-EMTP ในงานวิจัยนี้ได้จากผลการทดสอบประลองเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดจริงที่ทดสอบโดย Lazkano และคณะ [17] โดยระบบที่ทำการทดสอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของสายป้อนในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นอกจากนี้ภูมิภาคและภูมิภาคก็มีความใกล้เคียงกับประเทศไทยด้วย ค่าความต้านทานพื้นผิวจากผลการประลอง จำนวนได้จากสมการ 4.8 และมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3

$$R_{SF} = \frac{V_{L-L_{rms}} \times \sqrt{3}}{I_{rms}} \quad 4.8$$

เมื่อ  $R_{SF}$  คือ ความต้านทานพื้นผิว (โอห์ม)  
 $V_{L-L_{rms}}$  คือ แรงดันอาร์เอ็มเอสระหว่างสาย (โวลต์)  
 $I_{rms}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอสในสายที่เกิดฟอลต์ (แอมแปร์)

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานพื้นผิวที่ได้จากพื้นผิวต่างชนิดเมื่อสายตัวนำไฟฟ้าขาดตก [17]

พื้นผิว	ความต้านทานพื้นผิว ( $R_{SF}$ , โอห์ม)
ยางมะตอยแห้ง	120357
ลูกรังอัดแน่นแห้ง	100847
ทรายแห้ง	1296
ดินแห้ง	1098
ต้นสนแห้ง	512
ทรายเปียก	450
ลูกรังบางแห้ง	400
ลูกรังอัดแน่นเปียก*	370
คอนกรีตแห้ง*	360
ดินเปียก	247
หญ้าเปียก*	202
คอนกรีตเปียก*	184
ดินเลน	70

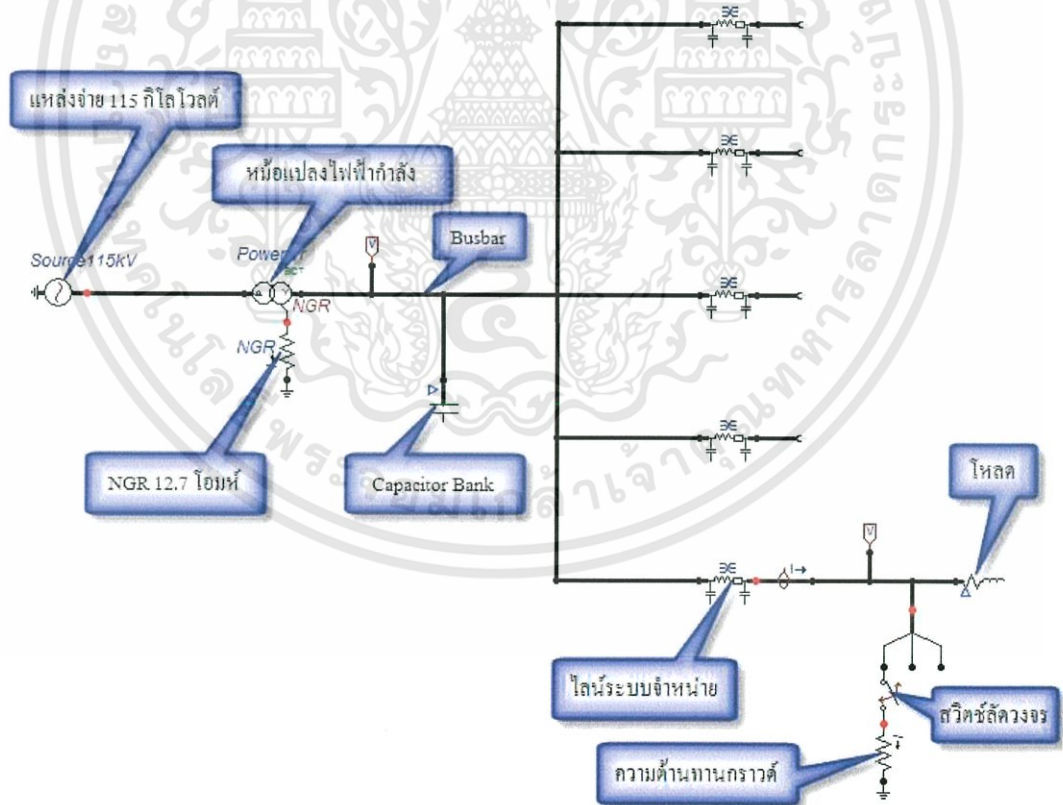
หมายเหตุ \* คือ ค่าที่นำมาใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบ

### 8. สวิตช์

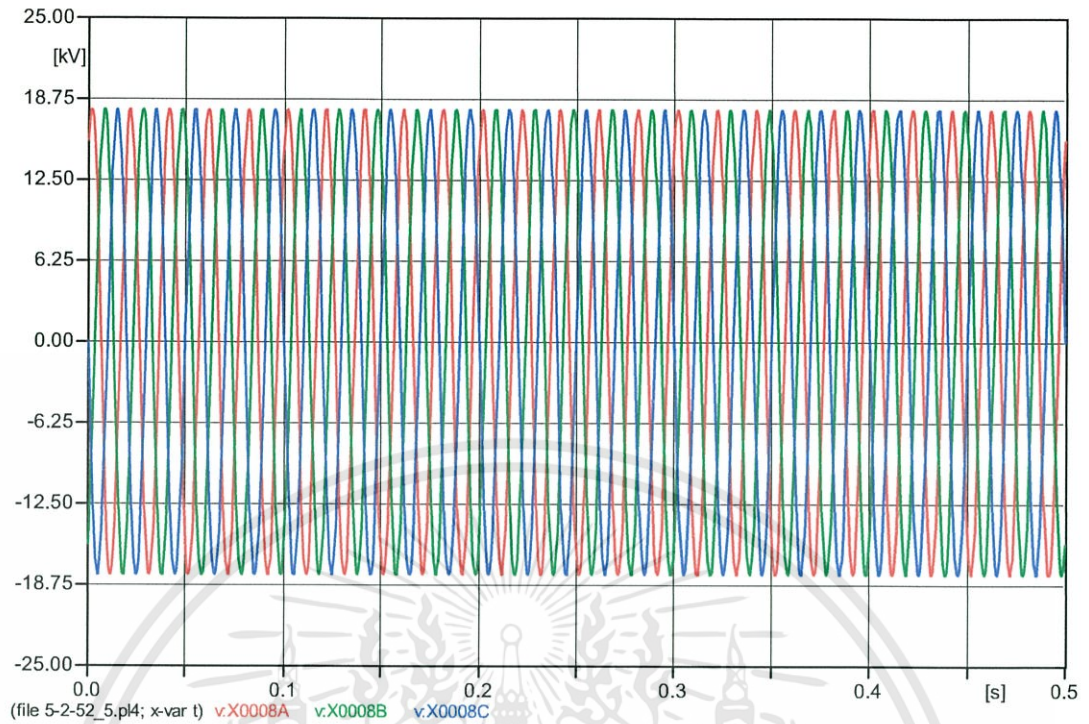
โดยทั่วไปพบว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อสวิตช์อยู่ในสถานะปิดวงจร และมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสถานะเปิดวงจร สำหรับการโมเดลสวิตช์ในระบบจำหน่ายเป็นการแทนด้วยสวิตช์ชนิดที่ทำงานโดยควบคุมด้วยเวลา เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีโคสเซอร์ แอร์เบรกสวิตช์และฟิวส์ สำหรับลักษณะการทำงานจะปิดวงจรเมื่อ  $t = T_{CLOSE}$  และเปิดวงจรอีกครั้งที่  $t \geq T_{OPEN}$  ในการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า จะกำหนดช่วงเวลาลัดวงจรลงดินที่เวลา  $t = 0.2 - 0.4$  s

### 4.3 สถานะปกติของระบบจากการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

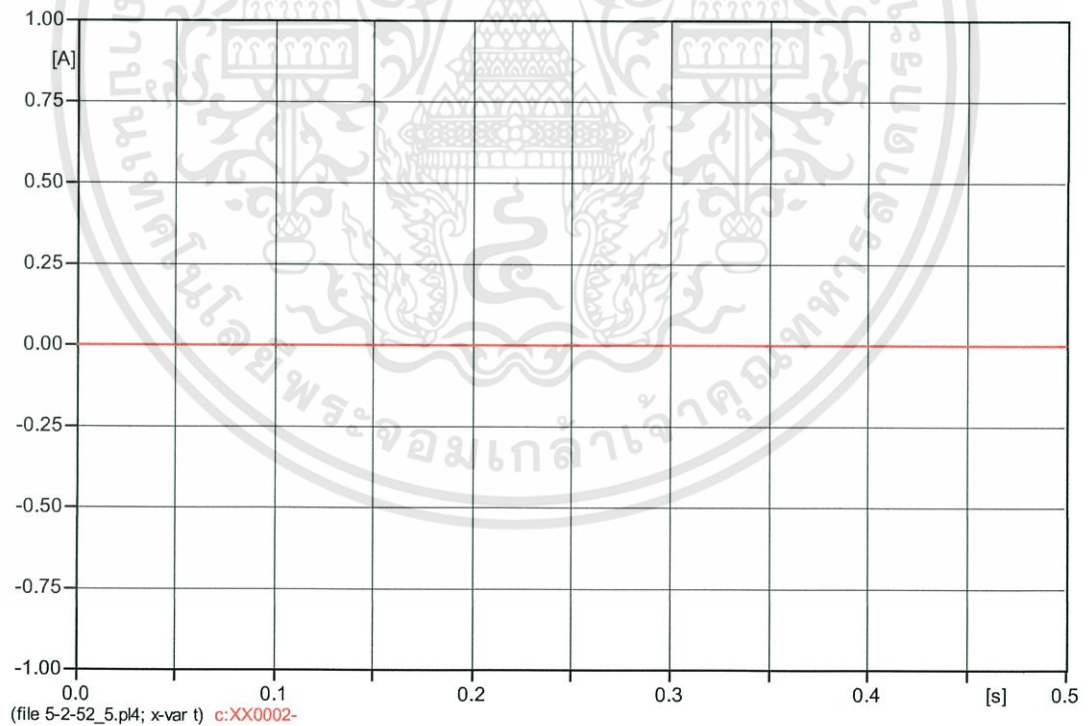
จากข้อมูลที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.2 เราจะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบในโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งจะได้วงจรการจำลองระบบดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยมีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ในสถานะปกติดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 วงจรการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในโปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติ



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR ในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียงของแหล่งจ่าย และพารามิเตอร์ของระบบ

ในการศึกษาและวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสด้านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้น จะให้ระบบต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 115-22 kV จากสถานีไฟฟ้าไปยังระบบจำหน่าย โดยจะให้แบบจำลองในโปรแกรมใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียง จะเริ่มด้วยการคำนวณหากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยทำการลัดวงจรที่แหล่งจ่ายต้นกำลังและนำผลที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้จากการจำลองการเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสในโปรแกรม ATP-EMTP

##### 4.4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current) ได้จากสมการ 4.9

$$I_r = \frac{3E}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_r} \quad 4.9$$

เมื่อ

$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

$$R_0 = R_{T0} + R_{L0}$$

$$X_0 = X_{T0} + X_{L0}$$

$$Z_r = R_{NGR} + R_{SF}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$R_1 = R_{S1} + R_{T1} + R_{L1}$$

$$X_1 = X_{S1} + X_{T1} + X_{L1}$$

โดยที่

- $I_r$  คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
- $Z_1$  คือ อิมพีแดนซ์ลำดับบวกที่มองจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร
- $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ที่มองจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร
- $V_n$  คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำเฟสกับดินขณะที่อยู่ในสภาวะปกติ
- $R_{T0}$  คือ ความต้านทานลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $X_{T0}$  คือ รีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $R_{L0}$  คือ ความต้านทานลำดับศูนย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

$X_{L0}$	คือ	รีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
$R_{NGR}$	คือ	ความต้านทานของ NGR
$R_{SF}$	คือ	ค่าความต้านทานของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงดิน
$R_{SI}$	คือ	ความต้านทานลำดับบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
$R_{TI}$	คือ	ความต้านทานลำดับบวกของหม้อแปลงไฟฟ้า
$R_{LI}$	คือ	ความต้านทานลำดับบวกของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
$X_{SI}$	คือ	รีแอกแตนซ์ลำดับบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
$X_{TI}$	คือ	รีแอกแตนซ์ลำดับบวกของหม้อแปลงไฟฟ้า
$X_{LI}$	คือ	รีแอกแตนซ์ลำดับบวกของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

#### 4.4.2 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current Calculation)

สำหรับกรณีศึกษาของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะใช้ระบบของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งเป็นสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV โดยจะทำการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยใช้ข้อมูลของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กำหนดให้บัส 115 kV เป็นแหล่งจ่าย แบ่งการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรออกเป็นกรณีย่อยดังนี้

- 1) การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง
- 2) การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR
- 3) การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR และมีค่าความต้านทานของตำแหน่งลัดวงจร

**วิธีคำนวณ** แปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในฐาน (Base) เดียวกัน โดยให้ฐานของระบบมีค่าเท่ากับ 100 MVA (Base MVA) และ แรงดันไฟฟ้าฐาน (Base kV) เท่ากับ 22 kV สามารถหาค่า  $Z_{base}$  และค่ากระแสไฟฟ้าฐาน (Base A) ได้จากสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

$$Z_{base} (22 \text{ kV}) = \frac{(\text{Base kV})^2}{(\text{Base MVA})} \quad 4.10$$

$$= \frac{(22)^2}{100}$$

$$= 4.84 \text{ ohm}$$

$$I_{base} (22 \text{ kV}) = \frac{\text{Base MVA}}{\sqrt{3} \times \text{Base kV}} \quad 4.11$$

$$= \frac{100}{\sqrt{3} \times 22}$$

$$= 2.62432 \text{ kA}$$

แหล่งจ่าย (สถานีไฟฟ้าเขาย้อย) มีข้อมูลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลสถานีไฟฟ้าเขาย้อย [18]

บัส (kV)	หม้อแปลง (MVA)	$R_1$ pu.	$X_1$ pu.	$R_0$ pu.	$X_0$ pu.
115	50	0.01338	0.09619	0.05715	0.37175

จาก  $R_1 = 0.01338$  pu. และ  $X_1 = 0.09619$  pu.

หา  $Z_1$  ได้จาก

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \\ &= \sqrt{(0.01338)^2 + (0.09619)^2} \\ &= 0.097116 \text{ pu.} \end{aligned}$$

จาก  $R_0 = 0.05716$  pu. และ  $X_0 = 0.37175$  pu.

หา  $Z_0$  ได้จาก

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \\ &= \sqrt{(0.05716)^2 + (0.37175)^2} \\ &= 0.376119 \text{ pu.} \end{aligned}$$

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (115-22 kV, 50 MVA, Dyn 115-23.1 kV, %Z = 14.59 Base on 50 MVA)

$$\begin{aligned} Z \text{ (System Base)} &= 0.1459 \times \left(\frac{100}{50}\right) \times \left(\frac{23.1}{22}\right)^2 \\ &= 0.3217095 \text{ pu.} \end{aligned}$$

โดยมี Full Load Loss = 129 kW สามารถหาค่า R ได้โดย

$$3I^2R = 129 \text{ kW}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} I \text{ (50 MVA)} &= \frac{50}{\sqrt{3} \times 23.1} \\ &= 1.25 \text{ kA} \end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned} R &= \frac{129,000}{3 \times (1250)^2} \\ &= 0.02752 \text{ ohm} \\ R \text{ (System Base)} &= \frac{0.02752}{4.84} \\ &= 0.005685 \text{ pu.} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

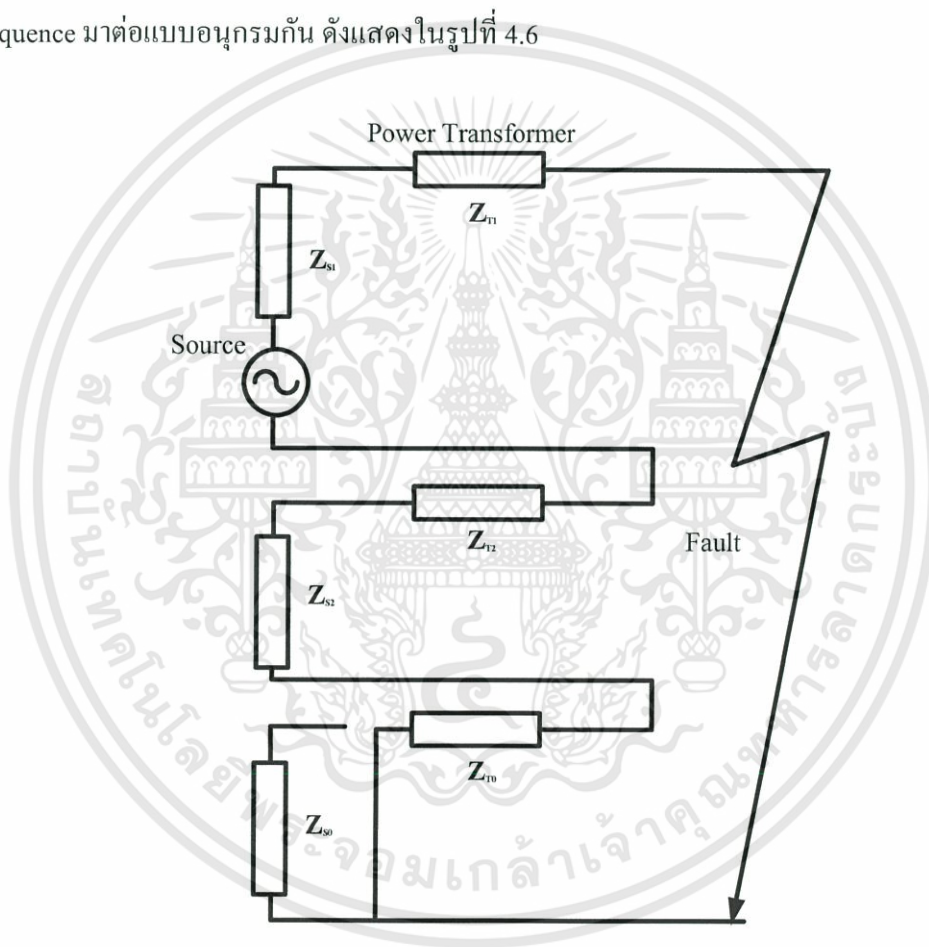
ดังนั้น

$$\begin{aligned} X &= \sqrt{Z^2 - R^2} \\ &= \sqrt{(0.3217095)^2 - (0.00568595)^2} \\ &= 0.321659 \text{ pu.} \end{aligned}$$

$$\therefore R_1 = R_0 = 0.005685 \text{ pu.}$$

$$\therefore X_1 = X_0 = 0.321659 \text{ pu.}$$

กรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส Sequence Circuit จะเกิดจาก Positive, Negative และ Zero Sequence มาต่อแบบอนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Sequence Circuit กรณีลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่บัส 22 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดลัดวงจรแบบลงดินหนึ่งเฟส ที่บัส 22 kV จะได้

$$\begin{aligned}
 I_{\text{fault}} &= \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\
 &= \frac{E}{2Z_1 + Z_0} \\
 &= \frac{3E}{2(R_{S1} + X_{S1} + R_{T1} + X_{T1}) + R_{T0} + X_{T0}} \\
 &= \frac{3(1)}{\left( \frac{2(0.01338 + j0.09619 + 0.005685 + j0.321659)}{+0.005685 + j0.321659} \right)} \\
 &= \frac{3}{0.043815 + j1.157357} \\
 &= 2.590257 \text{ pu.} \\
 &= 2.590257 \times 2624.319 \text{ A} \\
 &= 6,797.66 \text{ A}
 \end{aligned}$$

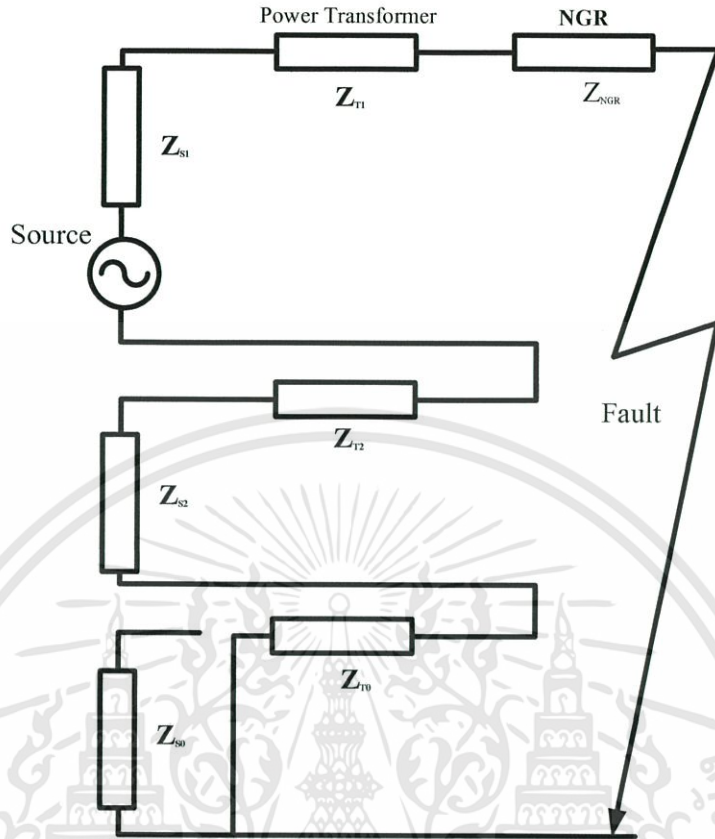
เมื่อนำ NGR ขนาด 12.7 โอห์ม เข้าติดตั้งในระบบจะทำให้อิมพีแดนซ์ขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส (Short Circuit Impedance) เปลี่ยนไป

$$\text{จะได้ } R_{\text{NGR}} (\text{System Base}) = \frac{12.7}{4.84} = 2.62 \text{ pu.}$$

สามารถนำมาเขียนเป็น Sequence Circuit เพื่อค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ดังรูปที่ 4.7 และคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{\text{fault}} &= \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \\
 &= \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_{\text{NGR}}} \\
 &= \frac{E}{2Z_1 + Z_0 + 3R_{\text{NGR}}} \\
 &= \frac{3E}{2(R_{S1} + X_{S1} + R_{T1} + X_{T1}) + R_{T0} + X_{T0} + 3R_{\text{NGR}}} \\
 &= \frac{3}{0.043815 + j1.157357 + 3(2.62)} \\
 &= \frac{3}{7.903815 + j1.157357} \text{ pu.} \\
 &= 0.375588 \text{ pu.} \\
 &= 0.375588 \times 2.624319 \text{ kA} \\
 &= 0.985663 \text{ kA} \\
 &= 985.66 \text{ A}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 Sequence Circuit การลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ที่บัส 22 kV หลังติดตั้ง NGR

ซึ่งเราจะเห็นว่าเมื่อนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในระบบจะทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าไม่เกิน 1,000 แอมแปร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

#### 4.4.3 ตัวอย่างกรณีศึกษา

การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ที่เกิดขึ้นในกรณีของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย ซึ่งสายไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดขาด ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อยประมาณ 6 กิโลเมตรนั้น เราจะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของสายระบบจำหน่ายในการคำนวณ โดยมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสาย PIC ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร [12]

ระยะทาง (กิโลเมตร)	อิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)			
	$R_1$	$X_1$	$R_0$	$X_0$
1.0	0.210656	0.414406	0.409841	1.616029
6.0	1.263936	2.486436	2.459046	9.696174



รูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่และตำแหน่งที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกซึ่งเกิดรอยไฟไหม้

#### ค่าพารามิเตอร์ความต้านทานพื้นผิว

ข้อมูลที่ได้จากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย จากกรณีศึกษาพบสายตัวนำไฟฟ้าขาดและตกลงที่บริเวณพื้นผิวถนนที่เป็นดินลูกรังอัดแน่นในสภาวะเปียก ซึ่งเราจะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการหาค่าความต้านทานของพื้นผิวที่สายตัวนำขาดตกสัมผัส โดยจะใช้ค่าความต้านทานที่มีการตรวจวัดได้จากต่างประเทศในตารางที่ 4.3 โดยมีค่าความต้านทานประมาณ 370 โอห์ม (Lazkano et al., 2000) ซึ่งจะใช้ค่าความต้านทานพื้นผิวในช่วงดังกล่าวในการคำนวณและป้อนให้กับโปรแกรม ATP-EMTP

เมื่อแปลงค่าความต้านทานขนาด 370 โอห์ม ให้เป็นเปอร์ยูนิต (pu.) เพื่อใช้ในการคำนวณจะได้ อิมพีแดนซ์ขณะเกิดฟอลต์ (Fault Impedance) ดังนี้

$$R_{SF} (\text{System Base}) = \frac{370}{4.84} = 76.45 \text{ pu.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ระยะทางห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย 6 กิโลเมตร ได้ดังนี้

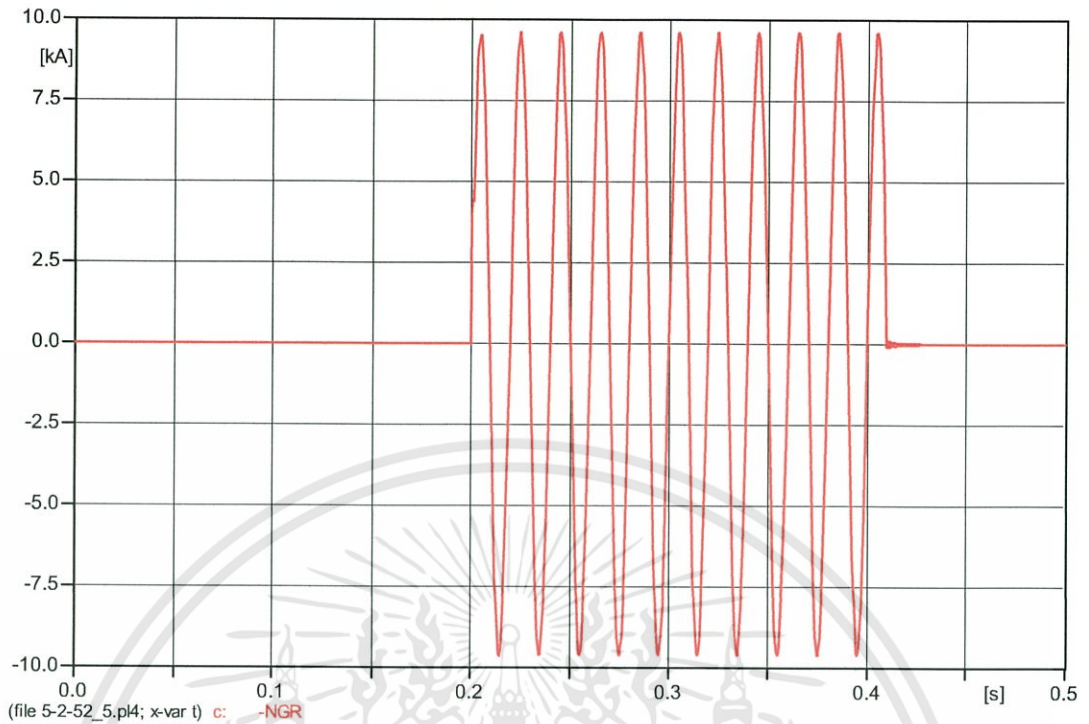
$$\begin{aligned}
 I_{\text{fault}} &= \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \\
 &= \frac{3E}{2Z_1 + Z_0 + 3(R_{\text{NGR}} + R_f)} \\
 &= \frac{3E}{\left( 2(R_{S1} + X_{S1} + R_{T1} + X_{T1} + R_{L1} + X_{L1}) + R_{T0} + X_{T0} \right. \\
 &\quad \left. + R_{L0} + X_{L0} + 3(R_{\text{SF}} + R_{\text{NGR}}) \right)} \\
 &= \frac{3(1)}{\left( 2(0.01338 + j0.09619 + 0.005685 + j0.321659 \right. \\
 &\quad \left. + 1.263936 + j2.486436) + 0.005685 + j0.321659 \right. \\
 &\quad \left. + 2.459046 + j9.696174 + 3(76.45 + 2.62) \right)} \\
 &= \frac{3}{\left( (2.566002 + j5.80857) + (2.464731 + j10.017833) \right. \\
 &\quad \left. + 3(76.45 + 2.62) \right)} \\
 &= \frac{3}{5.030733 + j15.826403 + 3(79.07)} \\
 &= \frac{3}{242.240733 + j15.826403} \\
 &= 0.012331737 \text{ pu.} \\
 &= 0.012331737 \times 2,624.319 \text{ A} \\
 &= 32.36 \text{ A}
 \end{aligned}$$

#### 4.4.4 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

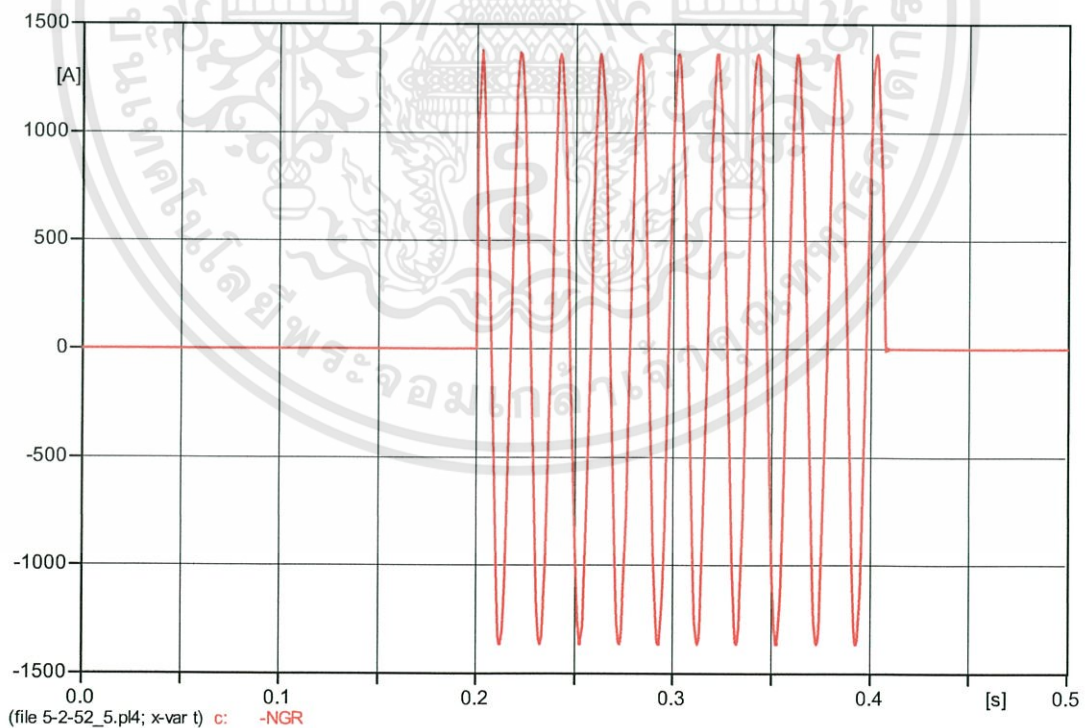
จำลองวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้จากการจำลองวิเคราะห์ระบบในโปรแกรมไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียงของแหล่งจ่าย และพารามิเตอร์ของระบบที่ป้อนในโปรแกรม ซึ่งแบ่งการจำลองวิเคราะห์ระบบออกเป็นกรณีย่อยดังนี้

- 1) การจำลองการเกิดลัดวงจร กรณีไม่ได้ติดตั้ง NGR
- 2) การจำลองการเกิดลัดวงจร กรณีติดตั้ง NGR
- 3) การจำลองการเกิดลัดวงจร กรณีติดตั้ง NGR และมีค่าความต้านทานของตำแหน่งลัดวงจร

โดยใช้วงจรการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.3 และได้ผลการจำลองระบบดังแสดงในรูปที่ 4.9 - 4.11

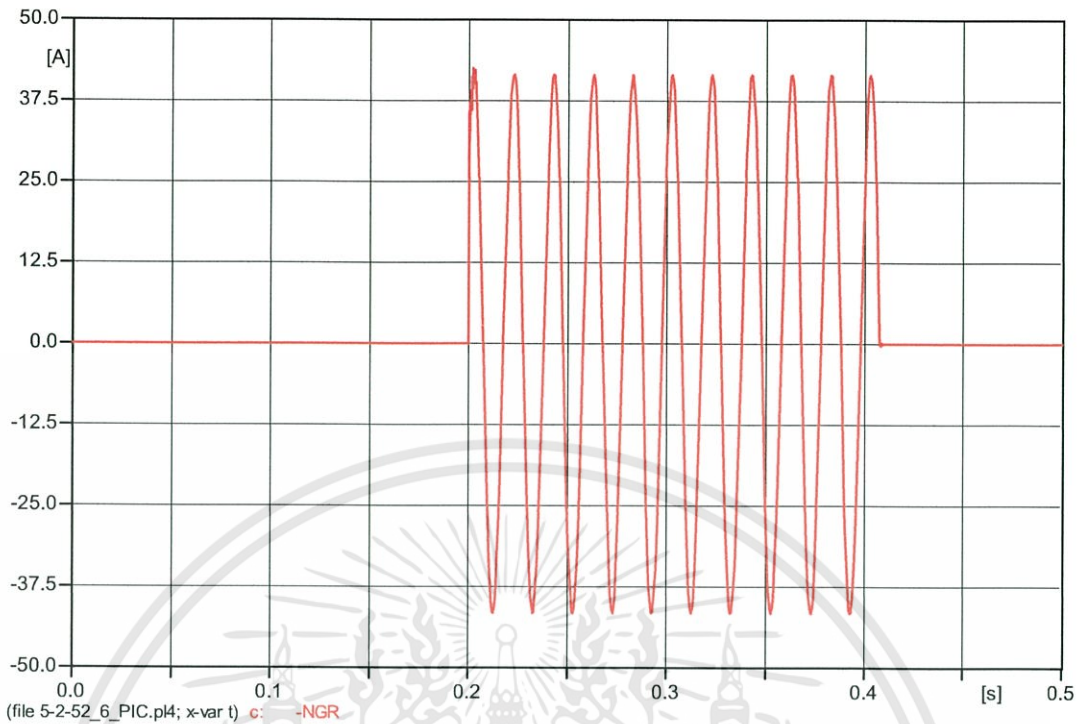


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่ได้จากการจำลองระบบของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ไหลผ่าน NGR ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR ที่ได้จากการจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ไหลผ่าน NGR ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR และมีค่าความต้านทานของตำแหน่งลัดวงจร ที่ได้จากการจำลองระบบ

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ของสถานีไฟฟ้าเขาย้อย ที่ได้จากการคำนวณและจำลองระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

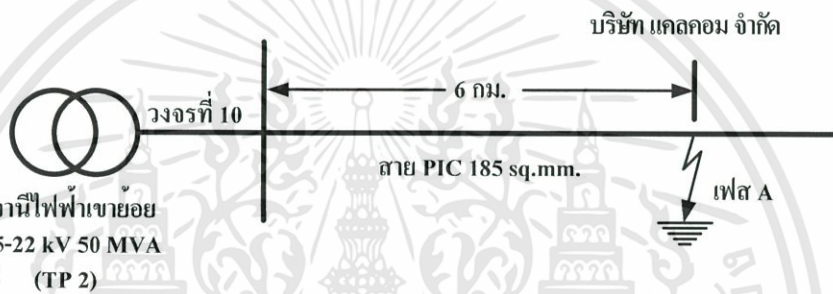
สถานีไฟฟ้าเขาย้อย ด้านระบบจำหน่าย 22 kV		
กรณี	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร <sub>RMS</sub> (แอมแปร์)	
	คำนวณ	โปรแกรม ATP-EMTP
กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง	6,797.66	6,805.90
กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR	985.66	972.98
กรณีต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่าน NGR และมีค่าความต้านทานของตำแหน่งลัดวงจร	32.36	29.38

จากตารางที่ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการจำลองวิเคราะห์ระบบโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียงของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบในโปรแกรม ATP-EMTP นั้น มีความถูกต้อง

### 4.5 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้าที่ NGR ชำรุดเสียหาย

จากข้อมูลการชำรุดเสียหายของ NGR ที่ได้จากการรวบรวมในบทที่ 2 นั้น เราจะนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อตรวจสอบลักษณะแรงดันไฟฟ้าของระบบและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR ขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยค่าความต้านทานพื้นผิวที่ของวัสดุที่สายไฟตกสัมผัสนั้น จะใช้ค่าที่ได้จากตารางที่ 4.3 โดยทั้ง 4 สถานีไฟฟ้างดกล่าวมี Single Line Diagram เหตุการณ์การเกิดความเสียหายของ NGR ดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.15

#### สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี

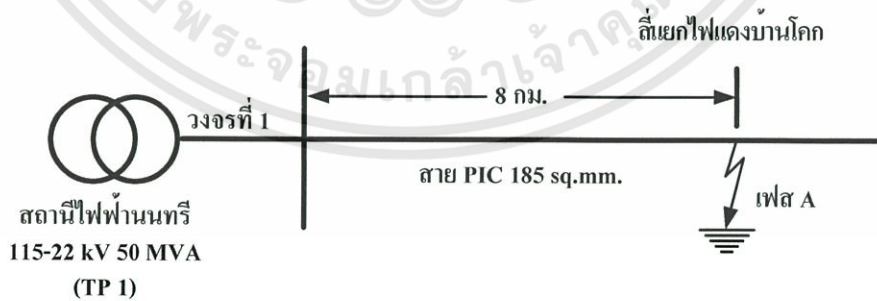


รูปที่ 4.12 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย

โดยมีข้อมูลดังนี้

ระยะทางจากสถานีต้นทาง	6 กิโลเมตร
ค่าความต้านทานพื้นผิว	370 โอห์ม (ดินลูกรังอัดแน่นในสภาวะเปียก)

#### สถานีไฟฟ้านนทบุรี จังหวัดปราชญ์บุรี

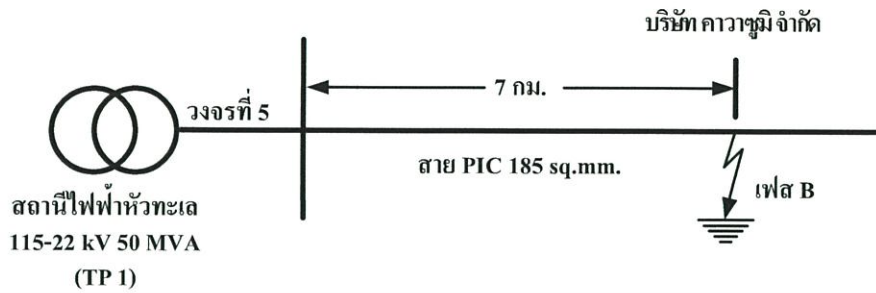


รูปที่ 4.13 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้านนทบุรี

โดยมีข้อมูลดังนี้

ระยะทางจากสถานีต้นทาง	8 กิโลเมตร
ค่าความต้านทานพื้นผิว	184 โอห์ม (คอนกรีตในสภาวะเปียก)

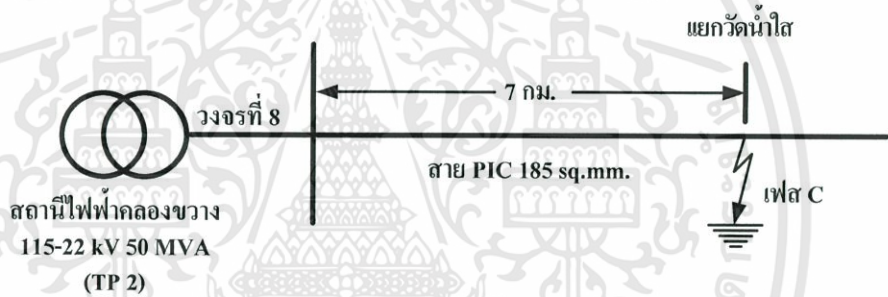
### สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 4.14 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าห้วยทะเล โดยมีข้อมูลดังนี้

ระยะทางจากสถานีต้นทาง	7 กิโลเมตร
ค่าความต้านทานพื้นผิว	360 โอห์ม (คอนกรีตในสถานะแห้ง)

### สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา

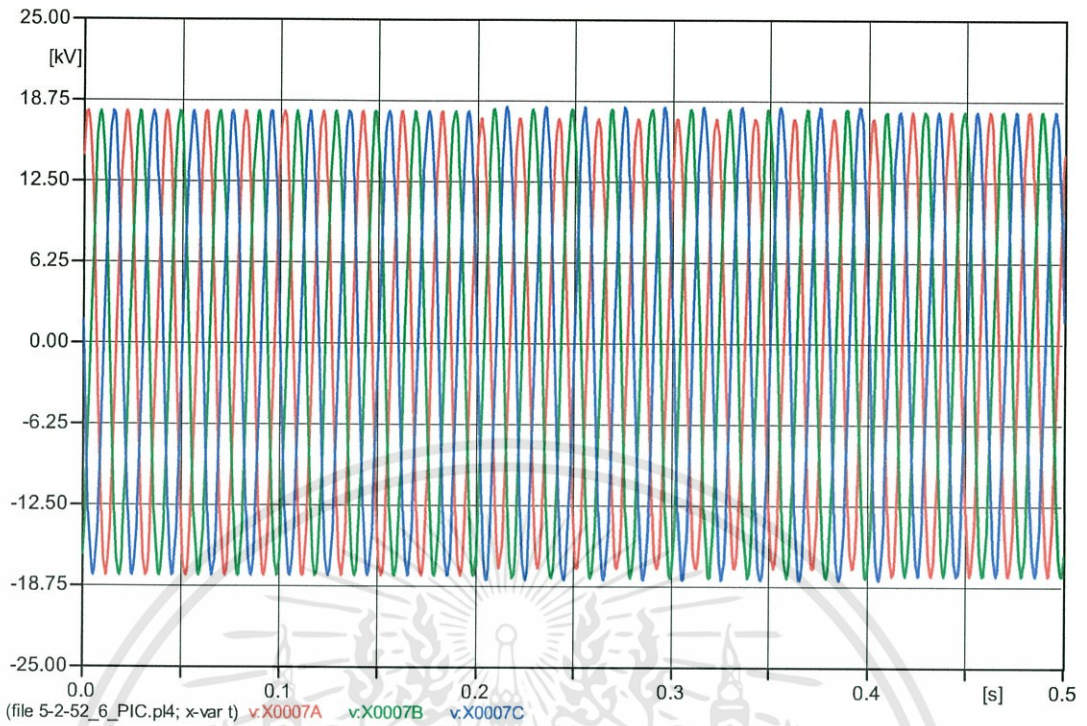


รูปที่ 4.15 Single Line Diagram การเกิดความเสียหายของ NGR ที่สถานีไฟฟ้าคลองขวาง โดยมีข้อมูลดังนี้

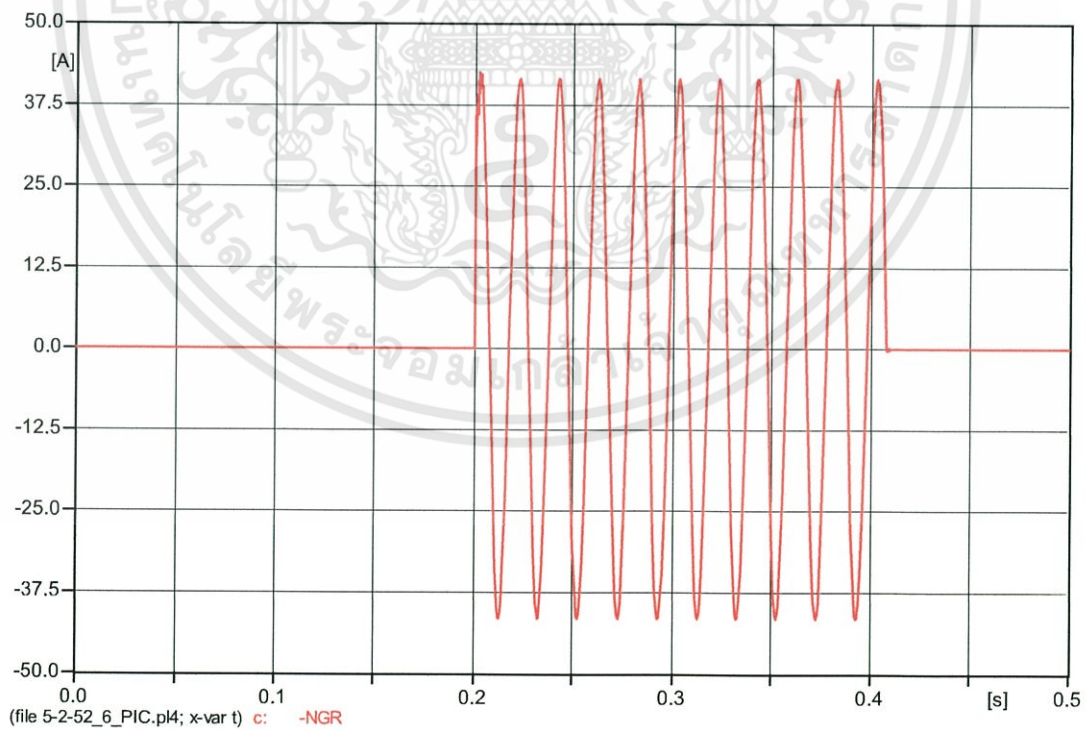
ระยะทางจากสถานีต้นทาง	7 กิโลเมตร
ค่าความต้านทานพื้นผิว	202 โอห์ม (หญ้าในสถานะเปียก)

## 4.6 ผลการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้าที่ NGR ขำรุคเสียหาย

ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR ของทั้ง 4 สถานีไฟฟ้างวดแสดงในรูปที่ 4.16-4.23 และสรุปค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR ได้ดังตารางที่ 4.7

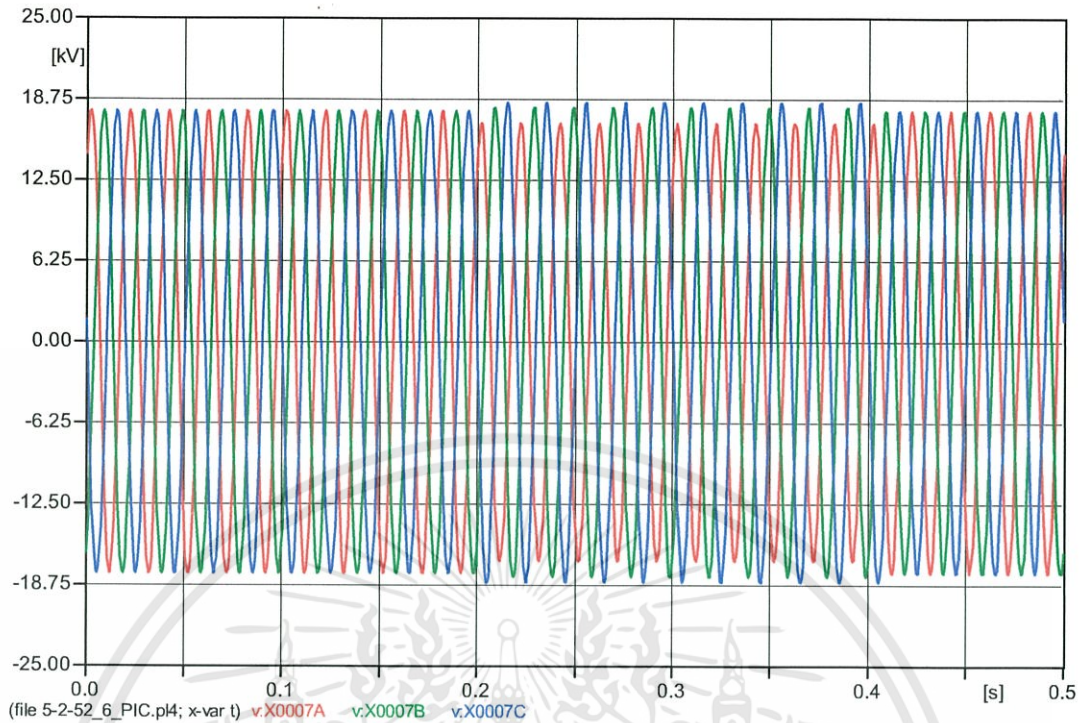


รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย 6 กิโลเมตร

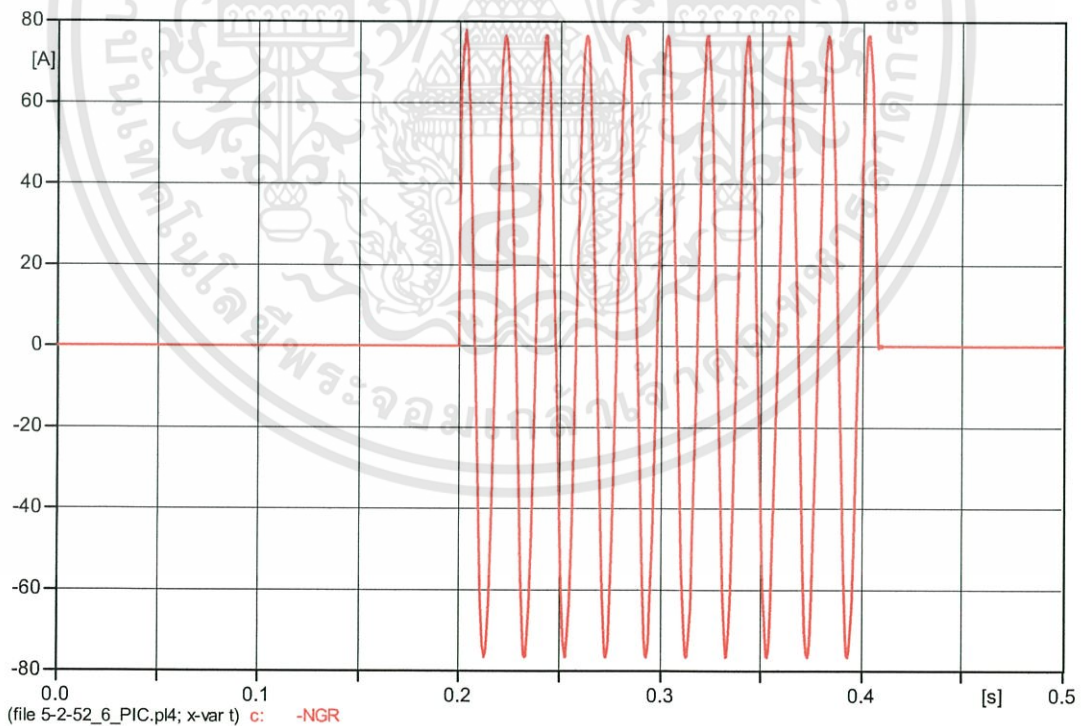


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าเขาย้อย 6 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

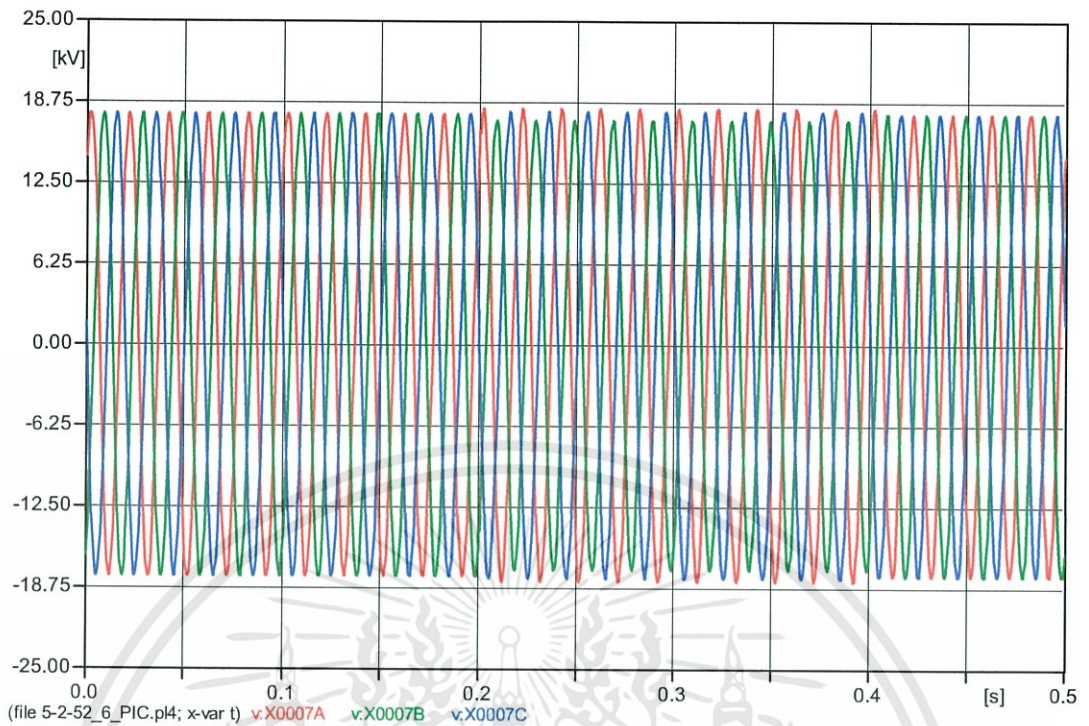


รูปที่ 4.18 รูปแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าแรงดัน 8 กิโลเมตร

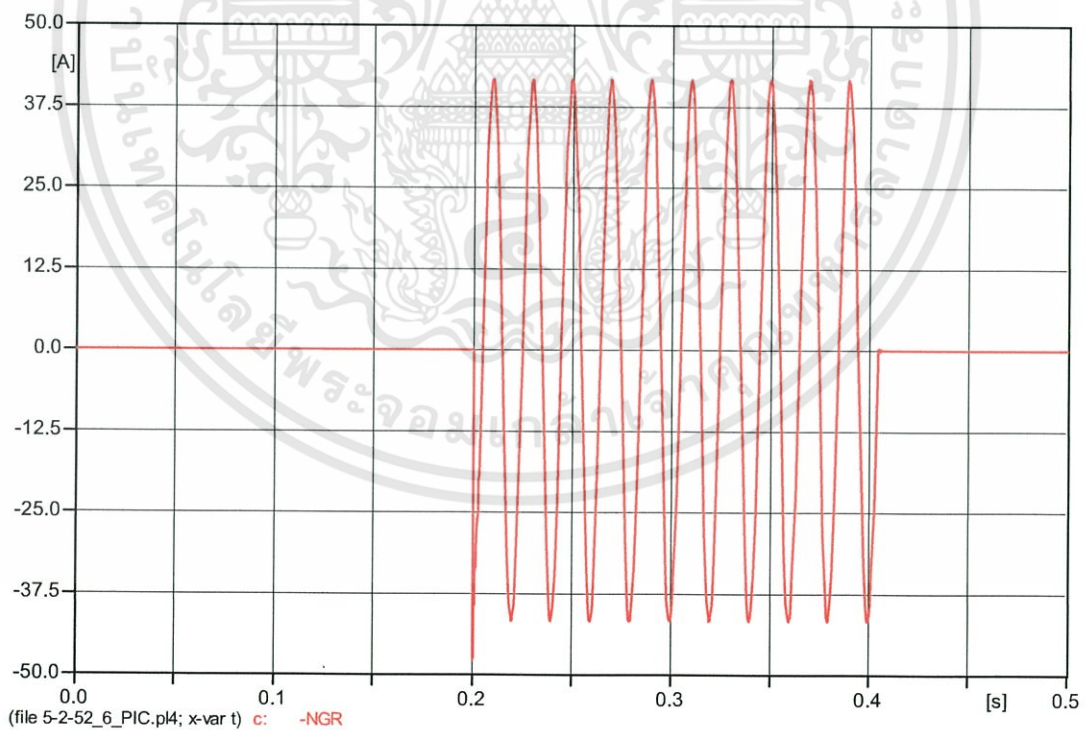


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่เฟส A ห่างจากสถานีไฟฟ้าแรงดัน 8 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

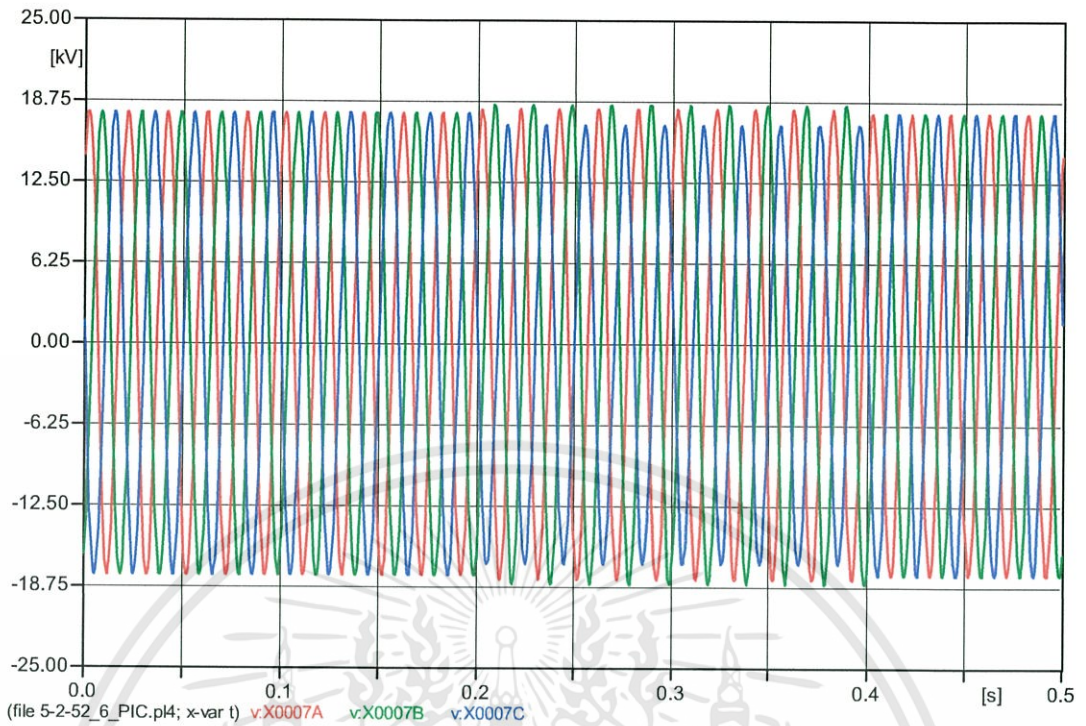


รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส B ห่างจากสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล 7 กิโลเมตร

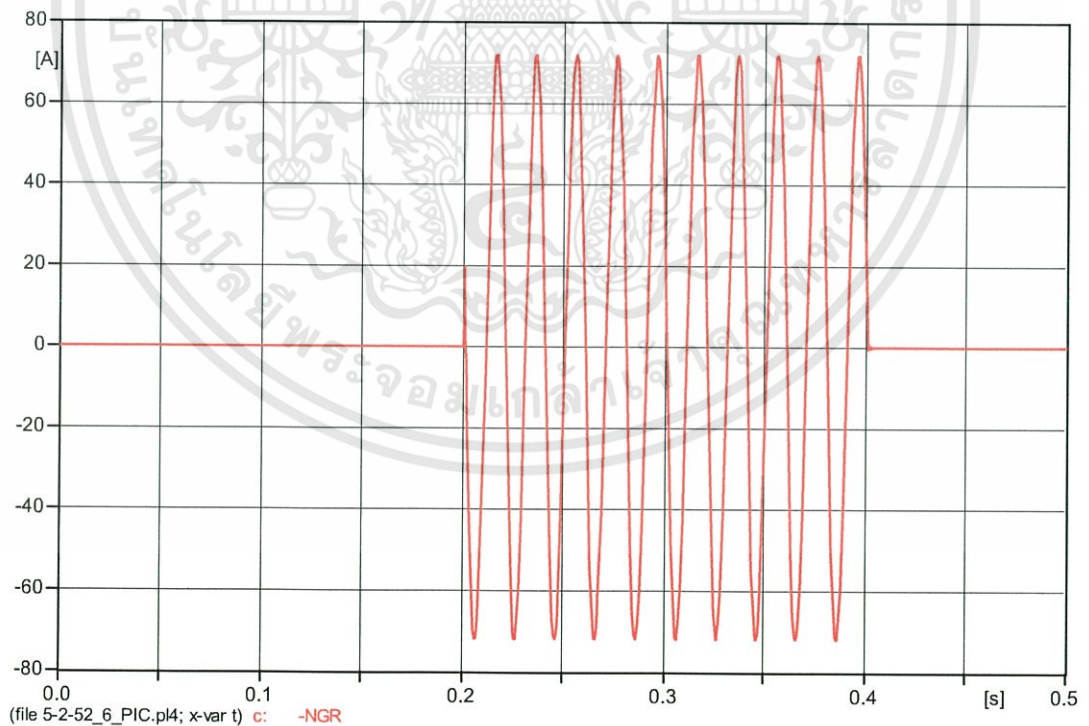


รูปที่ 4.21 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส B ห่างจากสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล 7 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส C  
ห่างจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง 7 กิโลเมตร



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส C  
ห่างจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง 7 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จากสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่ NGR เกิดความเสียหาย

สถานีไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า (kV)			กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR (A)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
เขาย้อย	<b>17.367</b>	18.080	18.253	41.56
นนทรี	<b>16.858</b>	18.114	18.537	76.64
หัวทะเล	18.231	<b>17.333</b>	18.034	41.72
คลองขวาง	18.151	18.505	<b>16.954</b>	70.00

จากค่าที่ได้ในตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าที่สถานีไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่บัสในเฟสที่เกิดการลัดวงจรลดลงน้อยที่สุดคือ สถานีไฟฟ้าเขาย้อย และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน NGR จะมีค่าน้อยที่สุดเช่นกันถึงแม้ว่าระยะทางที่เกิดการลัดวงจรจะมีค่าน้อยที่สุด แต่เนื่องจากค่าความต้านทานพื้นผิวของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรนั้นมีค่ามากที่สุด ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสมีค่ามาก

#### 4.7 การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

การจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเพื่อทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบปัจจัย และเงื่อนไขเหตุการณ์การเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส เพื่อศึกษาถึงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยใช้วงจรการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะแยกกรณีการศึกษาที่เกิดขึ้นได้เป็น 3 กรณีย่อย ดังนี้

กรณีที่ 1 จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางของการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ตำแหน่งแตกต่างกันจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง

กรณีที่ 2 จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณของโหลดที่แตกต่างกันในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

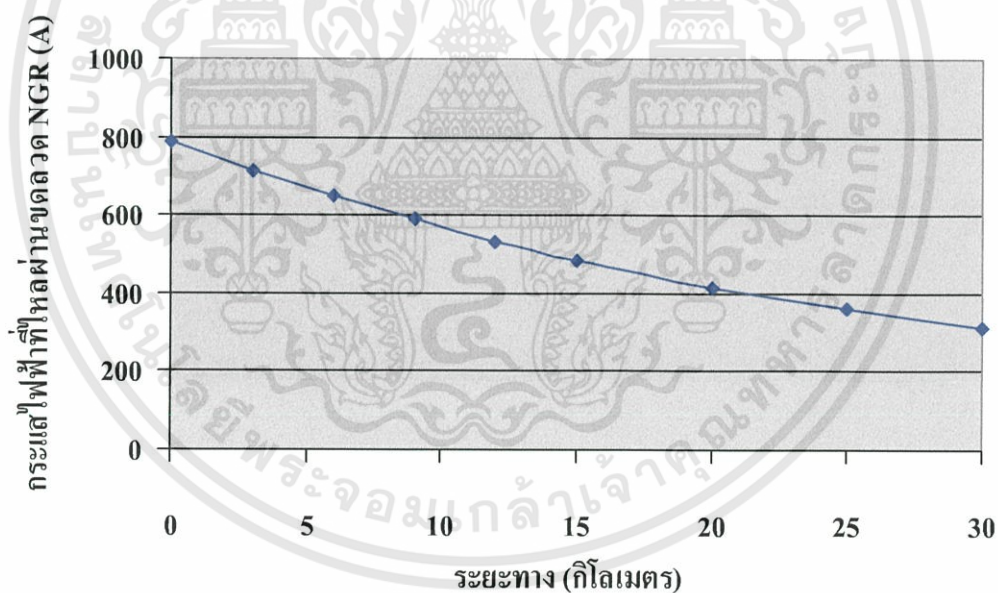
กรณีที่ 3 จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความต้านทานลัดวงจรลงดินที่มีค่าแตกต่างกันที่ตำแหน่งการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

**กรณีศึกษาที่ 1** จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางของการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่ตำแหน่งแตกต่างกันจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง เพื่อพิจารณาผลของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสกับระยะทางจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง ต่อลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวด NGR โดยกำหนดให้โหลดมีปริมาณร้อยละ 80 และความต้านทานที่ตำแหน่งลัดวงจรมีค่า 10 โอห์ม

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR เทียบกับระยะทางที่เกิดการลัดวงจรห่างสถานีไฟฟ้าสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 และเมื่อวิเคราะห์ในรูปกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสห่างจากสถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR มีค่าลดลง

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ตำแหน่งเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสห่างจากสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ระยะต่าง ๆ

ระยะทาง(กม.)	0	3	6	9	12	15	20	25	30
ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR (A)	787	714	648	588	534	486	417	361	315



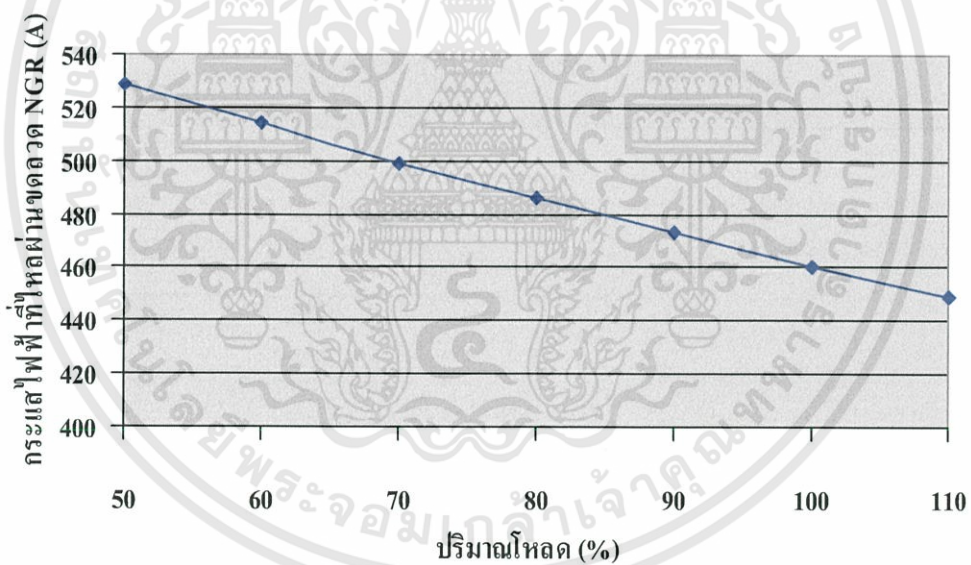
**รูปที่ 4.24** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับระยะทางที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง

กรณีที่ 2 จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณ โหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส เพื่อพิจารณาผลของปริมาณโหลดต่อลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวด NGR โดยกำหนดตำแหน่งการเกิดลัดวงจรลงดินห่างจากสถานีไฟฟ้า 15 กิโลเมตร และความต้านทานที่ตำแหน่งลัดวงจรมีค่า 10 โอห์ม

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR เทียบกับปริมาณโหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส สรุปได้ดังตารางที่ 4.9 และเมื่อวิเคราะห์ในรูปกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อปริมาณ โหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.9 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ปริมาณ โหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสค่าต่างๆ

ปริมาณ โหลด (%)	50	60	70	80	90	100	110
ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR (A)	529	514	499	486	473	460	449



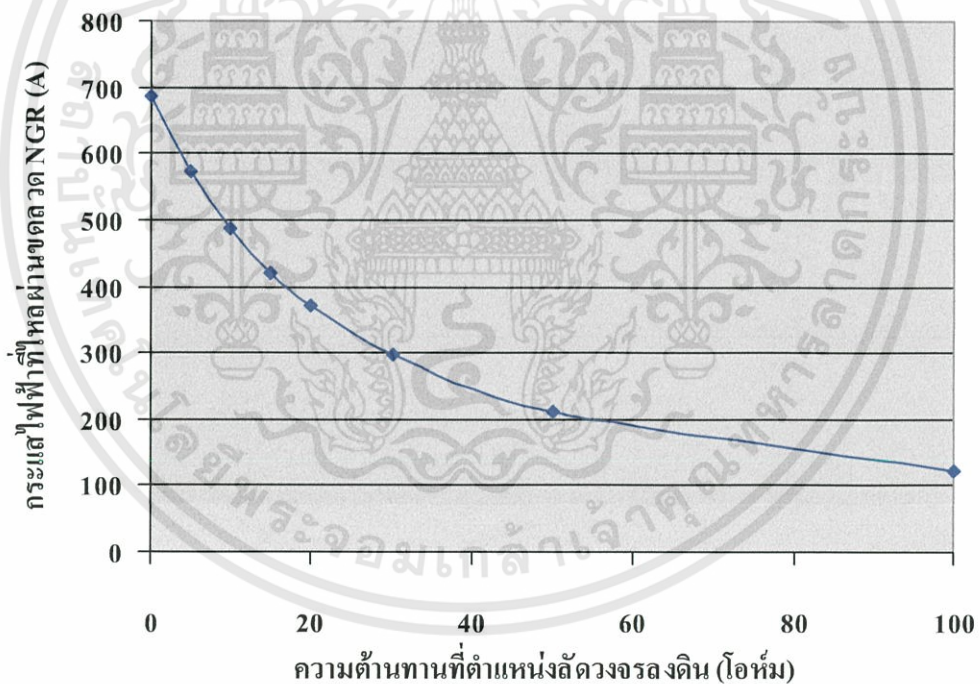
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับปริมาณโหลดในวงจรที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

กรณีที่ 3 จำลองวิเคราะห์เปรียบเทียบความต้านทานลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรที่มีค่าแตกต่างกันออกไป เพื่อพิจารณาผลของความต้านทานลัดวงจรลงดินต่อลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวด NGR โดยมีปริมาณไหลคร้อยละ 80 และตำแหน่งการเกิดลัดวงจรห่างสถานีไฟฟ้า 15 กิโลเมตร

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR เทียบกับความต้านทานลัดวงจรลงดินสรุปได้ดังตารางที่ 4.10 และเมื่อวิเคราะห์ในรูปกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อความต้านทานที่ตำแหน่งลัดวงจรลงดินเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.10 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ที่ความต้านทานลัดวงจรลงดินค่าต่าง ๆ

ค่าความต้านทานกราวด์ (โอห์ม)	0	5	10	15	20	30	50	100
ปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านขดลวด NGR (A)	686	572	486	421	370	297	212	122



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เทียบกับความต้านทานที่ตำแหน่งลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

#### 4.8 วิเคราะห์ผลการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

ผลการจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่ NGR ชำรุดเสียหายทั้ง 4 สถานีด้วยโปรแกรม ATP-EMTP จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าปรับตั้งการทำงานของรีเลย์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มทำงานของรีเลย์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยทั่วไปนั้นด้านเฟสจะเท่ากับ 600 A และค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มทำงานของรีเลย์ด้านกราวด์จะเท่ากับ 180 A (0.3 ของด้านเฟส) ซึ่งจากสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ระบบกรณีเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ชนิดอิมพีแดนซ์สูงที่เกิดจากสายตัวนำไฟฟ้าขาดตก ทั้ง 4 สถานีตัวอย่าง พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จะมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มทำงานของรีเลย์ทั้งทางด้านเฟสและด้านกราวด์แม้ตำแหน่งการเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสจะอยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้าต้นทางเพียง 6-8 กิโลเมตรก็ตาม ทำให้ความผิดปกติอยู่ในระบบเป็นเวลานาน ส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด NGR ตลอดเวลา จนกว่าจะมีการพบเห็นเหตุการณ์และแจ้งไปยังเจ้าหน้าที่เพื่อทำการแก้ไข ซึ่งปัญหาจากสายตัวนำไฟฟ้าขาดตก โดยเฉพาะสายหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดนับเป็นปัญหาสำคัญที่พบบ่อยครั้งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [19] ทั้งนี้เราจะพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรคือค่าความต้านทานพื้นผิวของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร โดยจะมีค่าแตกต่างกันไปตามวัสดุที่สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกสัมผัส ซึ่งจะส่งผลให้อิมพีแดนซ์ขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเปลี่ยนแปลงไป

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวด NGR พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้างดกล่าวมีค่าน้อยกว่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวด NGR ตามตารางที่ 2.4 ซึ่งระบุว่า ขดลวด NGR มีความคงทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 1,000 A เป็นระยะเวลา 10 วินาที จึงสามารถสรุปได้ว่าขดลวด NGR สามารถคงทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ ได้ แต่ความเสียหายของ NGR ที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากปริมาณความร้อนสะสมที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงมากจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่มีความถี่สูง [20] และไหลผ่านเป็นเวลานาน ก่อให้เกิดการระเบิดและไฟไหม้ตามมา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของสถานีไฟฟ้าตามข้อ 3.1 ที่ระบุว่าเกิดการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินเป็นระยะเวลาสั้น จนส่งผลให้ขดลวด NGR เกิดความเสียหาย

นอกจากนี้การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ในข้อ 4.6 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสพบว่า ระยะทางที่เกิดการลัดวงจรจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง ปริมาณโหลด และความต้านทานพื้นผิวที่ตำแหน่งลัดวงจรลัดวงจร ล้วนมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของ NGR เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เนื่องจากปัจจุบันระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคส่วนมากจะเป็นแบบสายตัวนำไฟฟ้าซึ่งในอากาศ เมื่อมีการเกิดเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดตกลงพื้น อันอาจเกิดเนื่องจาก ฝนตก ฟ้าผ่า ภัยธรรมชาติ ความผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบ ความประมาทเลินเล่อของบุคคล รวมถึงอุบัติเหตุต่างๆ บางครั้งมีการตกลงบนวัตถุที่เป็นทางผ่านลงดินซึ่งโดยทั่วไปพื้นผิวที่สายตัวนำเหล่านี้ตกลงสัมผัสจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ทำให้เกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูง การติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ได้ จึงถือเป็นเรื่องสำคัญ แต่บางครั้งการลัดวงจรชนิดนี้อาจไม่ได้มีสาเหตุมาจากสายตัวไฟฟ้านำขาดเพียงอย่างเดียว จะรวมถึงกรณีฉนวนของสายตัวนำไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัดเกิดการชำรุดบริเวณหัวเสาที่สายตัวนำสัมผัสกับลูกถ้วยก็ได้ ซึ่งจะส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินตลอดเวลา และกลับไปยังจุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงได้ จึงต้องได้รับพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อกำหนดถึงปัจจัยอื่นๆด้วย

จากการเก็บข้อมูลความเสียหายทางกายภาพของ NGR จะเห็นว่า NGR ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงจากไฟไหม้และการระเบิดจนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก ทั้งขดลวดความต้านทานระบบการฉนวน และอุปกรณ์ประกอบ นอกจากนี้พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ในภาวะปกติ เมื่อเทียบกับข้อกำหนดของพิกัด NGR ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่าไม่สามารถทำให้เกิดความเสียหายแก่ NGR ได้

การจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวด NGR มีปริมาณน้อยกว่าข้อกำหนดของ NGR ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นั่นหมายถึงขดลวด NGR สามารถทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เกิดขึ้นได้ แต่ความเสียหายของขดลวด NGR ที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากปริมาณความร้อนสะสมในกรณีที่มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลผ่านเป็นระยะเวลาาน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของสถานีไฟฟ้าในขั้นตอนของการเก็บข้อมูลภาคสนาม ที่ระบุว่าเกิดการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินเป็นระยะเวลาาน ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากมีปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าค่าปรับตั้งของรีเลย์ป้องกัน รีเลย์ดังกล่าวจึงไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติในกรณีนี้ได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลผ่านขดลวด NGR เป็นระยะเวลาาน จนเกิดความร้อนสะสมที่ขดลวด NGR และภายในตู้ และด้วยคุณสมบัติของตู้ NGR กำหนดเป็น IP 44 ซึ่งไม่สามารถระบายความร้อนได้ จึงอาจก่อให้เกิดความร้อนสะสมสูงในเวลาอันรวดเร็วและมากพอที่จะทำให้ NGR เกิดการระเบิดและไฟไหม้

ซึ่งสาเหตุดังกล่าวคาดว่าจะป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการชำรุดเสียหายของ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

จากรายละเอียดการชำรุดเสียหายของ NGR ข้างต้น สามารถสรุปแนวทางการป้องกันการชำรุดเสียหายของ NGR ได้ดังนี้

1. ติดตั้งรีเลย์ ที่มีการปรับตั้งค่าในระดับต่ำเพื่อให้สามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงได้ โดยรีเลย์ดังกล่าวจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือนให้เจ้าหน้าที่ประจำสถานีไฟฟ้าทราบว่าการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูง และจะได้จัดส่งเจ้าหน้าที่เข้าตรวจสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อแก้ไขการลัดวงจรที่เกิดขึ้น มิให้ NGR ได้รับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเป็นระยะเวลานาน
2. พิจารณาถึงคุณสมบัติระยะเวลาความคงทนต่อกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง (Rate Time Current Continuous) ของ NGR ให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด NGR ได้เป็นระยะเวลานานขึ้น
3. พิจารณาถึงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ของวัสดุที่นำมาทำ NGR ให้มีค่าน้อยลง เพื่อให้สามารถทนต่อความร้อนได้สูงมากขึ้น
4. ปรับปรุงระบบระบายอากาศของตู้ NGR เพื่อให้สามารถระบายความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในภาวะปกติหรือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้
5. ควรปรับปรุงอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR เช่น โคมไฟ รางเดินสายเคเบิล เป็นต้น เพื่อไม่ให้ป็นวัสดุที่อาจติดไฟได้ในขณะที่ NGR มีความร้อนสะสม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการติดตั้ง NGR ที่จุดนิวทรอลของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้านั้น จะช่วยปรับปรุงคุณภาพการจ่ายไฟให้ดีขึ้น ซึ่งจะเน้นในเฉพาะพื้นที่อุตสาหกรรม ซึ่งต้องการความมั่นคงและคุณภาพกำลังไฟฟ้าสูง โดยสามารถแก้ไขเฉพาะกรณีที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสเท่านั้น แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการลัดวงจรรูปแบบอื่น ดังนั้นจึงควรมีมาตรการอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อลดโอกาสของการเกิดการลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้น โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดลัดวงจรลงดิน เช่น การเลือกสายหุ้มฉนวนทองแดง
2. ปรับปรุงระบบจำหน่ายเพื่อลดโอกาสของการเกิดการเกิดลัดวงจร เช่น การตรวจสอบการหุ้มฉนวนของจุดต่อ การตัดกิ่งไม้ พุ่มไม้ที่มีโอกาสสัมผัสกับสายจำหน่ายตลอดแนวพื้นที่จ่ายกระแสไฟฟ้า การป้องกันสัตว์เลื้อยคลานขึ้นเสาไฟฟ้า เป็นต้น
3. แยกวงจรที่ต้องการคุณภาพไฟฟ้าสูงไว้ที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องเดียวกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันและการจัดการระบบจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หลีกเลี่ยงการจ่ายไฟฟ้าออกนอกพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม หรือ พื้นที่อุตสาหกรรม ให้จ่ายไฟฟ้าเฉพาะภายในพื้นที่อุตสาหกรรม เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรขึ้นและสามารถดูแลจัดการระบบได้ง่ายขึ้น

5. ในงานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาความเสียหายของ NGR ที่เกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่ง เฟสเนื่องจากสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกเท่านั้น ในอนาคตควรมีการเก็บข้อมูลของ NGR ที่ชำรุดเสียหายเพิ่มเติมและพิจารณาการเกิดลัดวงจรลงดินรูปแบบอื่นๆด้วย

อย่างไรก็ตามการนำ NGR เข้าติดตั้งใช้งานในสถานีไฟฟ้าเป็นการลงทุนที่สูง เนื่องจากต้องปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายทั้งหมดให้สามารถรองรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขณะลัดวงจร เช่น กัปคัพฟ้าผ่า ฟิวส์ เป็นต้น ดังนั้นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับ NGR จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้ระบบทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพของ NGR ในส่วนการเลือกใช้การป้องกันความเสียหายของ NGR ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ควรพิจารณาถึงพื้นฐานความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ความเหมาะสมกับระบบประสิทธิภาพการแก้ปัญหาและค่าใช้จ่ายในการลงทุนประกอบกัน

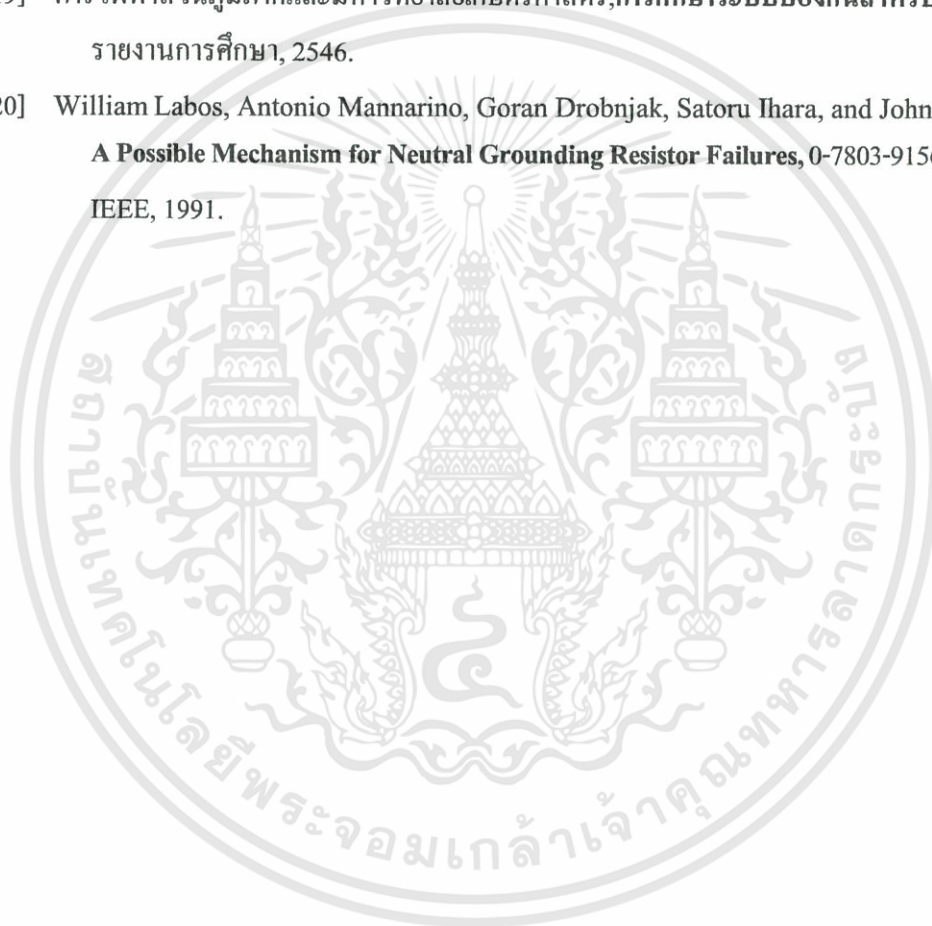


## เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **สรุปรายงานผลการวิเคราะห์การทำงานของ NGR โครงการ DAS**, รายงานการวิจัย, 2540.
- [2] Provincial Electricity Authority, **Specification No. R-909/2543 Material, equipment, and specifications for Neutral Grounding Resistors, for 22 kV 50 Hz Distribution System**, 2543.
- [3] กองฝึกอบรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **การออกแบบสถานีไฟฟ้า 115 kV**, เอกสารฝึกอบรม, 2543.
- [4] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **การป้องกันระบบไฟฟ้า**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์เอ็มแอนดีอี, 2545.
- [5] Yoshidide Hase, **Handbook of Power System Engineering**, John Wiley & Son, Ltd., 2007.
- [6] John J. Grainger and William D. Stevenson, JR., **Power System Analysis**, Electrical Engineering Series. McGraw-Hill International Editions, 1994.
- [7] IEEE std.1159-1995, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 1995.
- [8] B.M.Aucoin and R.H.Jones, **High Impedance Fault Implementation Issues**. IEEE Transactions on Power Delivery, January 1996, Volume 11, Number 1, pp 139-148.
- [9] ส้ารวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [10] IEEE Std. 32-1990, **IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices**, 1990.
- [11] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **บันทึกเลขที่ วต.1-คฟ.00556 ลว.14 ก.ค. 2548**, รายงานเหตุการณ์ผิดปกติ, 2548.
- [12] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **บันทึกเลขที่ วฉ.3-ปค(คร.)คฟ-606/2550 ลว. 26 มี.ค. 2550**, รายงานเหตุการณ์ผิดปกติ, 2550.
- [13] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **บันทึกเลขที่ วก.2-คร(คฟ.)-2379/2550 ลว.5 ก.ค. 2550**, รายงานเหตุการณ์ผิดปกติ, 2550.
- [14] Jame P. Shhaffer, et al, **The Science and Design of Engineering Materials**, 2<sup>nd</sup> Ed. Mechanical Engineering Series. McGraw-Hill International, 1990.
- [15] H.W. Dommel. **EMTP Theory**. 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ค่าพารามิเตอร์ของสายระบบจำหน่าย หรือระบบสายส่ง, รายงานการวิจัย, 2550.
- [17] Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, L.A. Leturiondo and J.A. Gonzalez, “**Study of High Impedance Fault Detection in Levante Area in Spain**”, Ninth International Conference, 2000, Vol.3: Page 1011-1016.
- [18] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, รายงานค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2550 (2007), รายงานการวิจัย, 2550.
- [19] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, การศึกษาระบบป้องกันสำหรับสาย PIC, รายงานการศึกษา, 2546.
- [20] William Labos, Antonio Mannarino, Goran Drobnjak, Satoru Ihara, and John Skliutas, **A Possible Mechanism for Neutral Grounding Resistor Failures**, 0-7803-9156-X/05, IEEE, 1991.




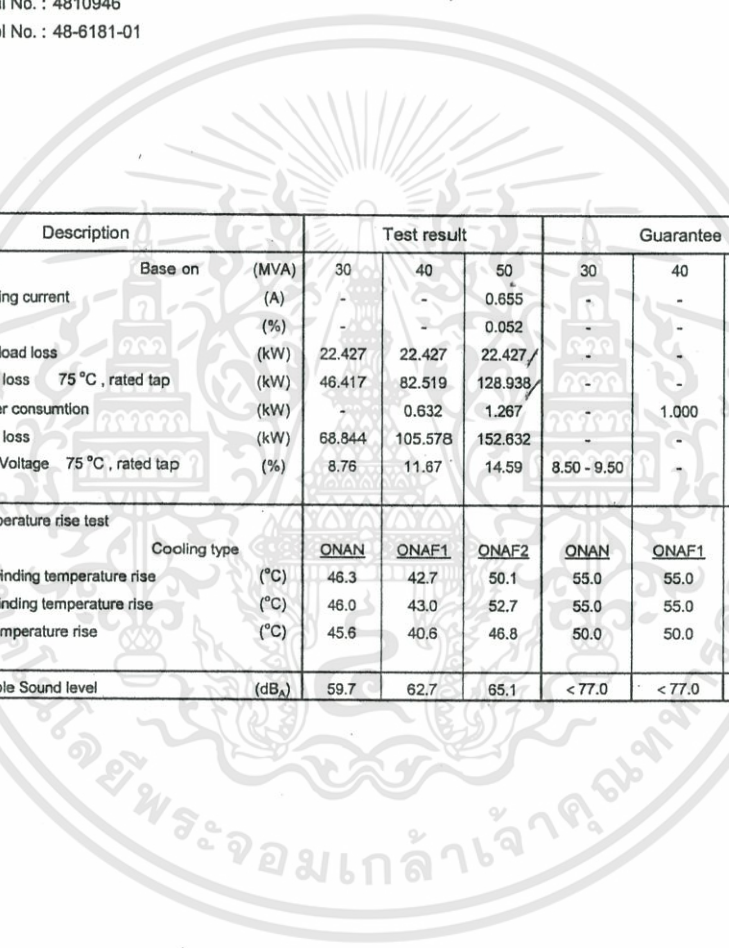


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1. ข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 50 MVA ที่ติดตั้งภายในสถานี ไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลิตภัณฑ์ ธิรไทย

 <b>บริษัท ธิรไทย จำกัด (มหาชน)</b> TIRATHAI PUBLIC COMPANY LIMITED		516/1 หมู่ 4 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ต.แพรงษา อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280 516/1 Moo 4 Bangpoo Industrial Estate Samutprakam 10280 Tel. (66 2) 709-4499, 323-0818 Fax. (66 2) 323-0910, 709-3236 e-mail address : <a href="mailto:contact@tirathai-transformer.com">contact@tirathai-transformer.com</a> <a href="http://www.tirathai-transformer.com">http://www.tirathai-transformer.com</a>						
		<b>Transformer Test Results</b>						
Lab. 2							Sheet 4 / 50	
Transformer : 30 / 40 / 50 MVA 3 Phase 50 Hz 115000 - 23100 V Serial No. : 4810946 Control No. : 48-6181-01								
Description		Test result			Guarantee			Tolerance
Base on (MVA)		30	40	50	30	40	50	-
1. Exciting current	(A)	-	-	0.655	-	-	0.580	+30%
	(%)	-	-	0.052	-	-	-	-
2. No - load loss	(kW)	22.427	22.427	22.427	-	-	23.000	-
3. Load loss 75 °C , rated tap	(kW)	46.417	82.519	128.938	-	-	133.000	-
4. Power consumption	(kW)	-	0.632	1.267	-	1.000	2.000	-
5. Total loss	(kW)	68.844	105.578	152.632	-	-	-	-
6. Imp. Voltage 75 °C , rated tap	(%)	8.76	11.87	14.59	8.50 - 9.50	-	-	-
7. Temperature rise test								
	Cooling type	ONAN	ONAF1	ONAF2	ONAN	ONAF1	ONAF2	
HV winding temperature rise	(°C)	46.3	42.7	50.1	55.0	55.0	55.0	-
LV winding temperature rise	(°C)	46.0	43.0	52.7	55.0	55.0	55.0	-
Oil temperature rise	(°C)	45.6	40.6	46.8	50.0	50.0	50.0	-
8. Audible Sound level	(dB <sub>A</sub> )	59.7	62.7	65.1	< 77.0	< 77.0	< 77.0	-
								
The above results are valid exclusively for test samples as mention in this report Publicity of the test reports except in full is prohibited unless written permission is obtained from the governor of TIRA THAI Laboratory.								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลทางเทคนิคของคาปาซิเตอร์แรงสูงที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลิตภัณฑ์ ABB



Packing List of Local Part  
For 22 kV, 3x2.4 Mvar Automatic Switching Capacitor Bank

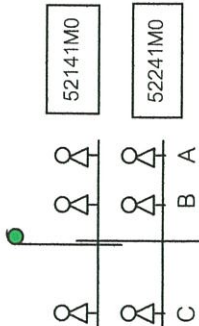
Shipper : ABB LIMITED, Power Product Division

Item No.	Description	Total Qty of units	Qty of Case	DIM / Case LxWxH (cm.)	Weight / Case (kgs.)
1	Capacitor Unit 2GUA, 12.7kV, 200kvar, 50Hz, 1Ph	36	3	120x100x95	420
2	Vacuum Circuit Breaker VD4, 24kV, 630A, 125kV BIL	3	3		
3	Current Limiting Reactor SA24, 22kV, 100uF, 150A, 50Hz, 1Ph	9	1	120x80x55	
4	Unbalance Current Transformer CB120, 24kV, 10/5, 15VA, CL1	3			
5	Fuse Link, CXP and K type, 16.6kV, 15A	36	1		15
6	Surge Arrester MWD17	9			
7	Central Control Cabinet c/w relay and control wiring	1	1	76x100x110	120
8	Insulator TR 208	9	1	100x100x60	138
9	Main Copper Busbar (No. 12, 13, 14)	3	1	10x10x450	70
10	Accessories BOX		1	100x100x100	250
	<b>1 Copper Bus Bar Comprises of</b>				
1.1	Copper Adapter for Fuse Rail (No.15)	18			
2.1	Copper Ground Busbar (No.16)	2			
3.1	Copper Adapter for Surge Arrester (No.17)	9			
4.1	Copper Adapter for Reactor Pad (No.18)	18			
5.1	Copper Adapter for incoming (No.33)	3			
	<b>2 Insulator For Indoor 24 kV</b>	12			
	<b>3 Copper conductor Comprises of</b>				
3.1	THW 150 SQ.MM.	27 m.			
3.2	THW 50 SQ.MM.	27 m.			
3.3	THW 70 SQ.MM. (Green)	22 m.			
3.4	Flexible wire green/yellow VCT 2.5 mm2	8 m.			
3.5	Control Cable 3C-2.5 SQ.MM. CVV-S	20 m.			
3.6	Control Cable 16C-2.5 SQ.MM. CVV-S	29 m.			
3.7	Flexible Ground Wire 25 CM Length ( for VCB windows and main door )	4			
	<b>4 Terminal Lug</b>				
4.1	150-12 , 1 hole flat	45			
4.2	150-12 , 1 hole 90 (L)	9			
4.3	50-12 , 1 hole flat	15			
4.4	50-10 , 1 hole flat	38			
4.5	70-12 , 1 hole flat for ground	6			
4.6	CL70-12, 1 hole for ground	1			
4.7	CL70-8, 1 hole for ground	1			
4.8	RF 2-8 : Insulated terminal ring type	15			
4.9	RF 2-6 : Insulated terminal ring type	15			
4.10	CE 2.5-8 : Cord -end terminal	140			
	<b>5 Fixing Bolt &amp; Nut</b>				
5.1	B01 EG M12x35 (B,TLW)	14			
5.2	B02 SS M12x30 (B,SW,FW)	20			
5.3	B03 EG M10x20 (B,SW,FW)	14			
5.4	B04 SS M12x35 (B,SW,2FW,N)	11			
5.5	B05 EG M12x30 (B,SW,2FW,N)	14			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของสายระบบจำหน่ายหรือระบบสายส่ง

Parameter												Structure Name : 521C1C000000		
No.	CircuitName	CondType	Code Cond	R1 Ohm / km	X1 Ohm / km	R0 Ohm / km	X0 Ohm / km	G1 uS / km	B1 uS / km	G0 uS / km	B0 uS / km			
1	52141M0	185A	5CD185A_S	0.176353	0.409091	0.389713	1.606211	0.000000	3.531000	0.000000	1.919000			
2	52241M0	185A	5GD185A_S	0.176349	0.409092	0.375632	1.610685	0.000000	3.531000	0.000000	1.825000			
1	52141M0	185A	5CD185A_S	0.176353	0.409091	0.389713	1.606211	0.000000	3.530000	0.000000	1.908000			
2	52241M0	240A	5GD240A_S	0.135139	0.400071	0.333970	1.601805	0.000000	3.633000	0.000000	1.834000			
1	52141M0	185A	5CD185A_S	0.176353	0.409091	0.389713	1.606211	0.000000	3.537000	0.000000	1.989000			
2	52241M0	185AA	5GD185AA_S	0.212023	0.409092	0.413029	1.610146	0.000000	3.531000	0.000000	1.894000			
1	52141M0	185A	5CD185A_S	0.176353	0.409091	0.389713	1.606211	0.000000	3.536000	0.000000	1.983000			
2	52241M0	185/30ACSR	5GD185ACRS	0.177271	0.422422	0.378061	1.623544	0.000000	3.591000	0.000000	1.902000			
1	52141M0	185A	5CD185A_S	0.176353	0.409091	0.389713	1.606211	0.000000	3.531000	0.000000	1.919000			
2	52241M0	185PIC25	5GD185PICS	0.210656	0.414406	0.409841	1.616029	0.000000	3.601000	0.000000	1.839000			
X - Y Coordinate														
No.	CircuitName	XA mm	YA mm	XB mm	YB mm	XC mm	YC mm	XG mm	YG mm	Sep cm	Ang deg	Cond		
1	52141M0	1150	12205	400	12205	-1150	12205	-90.5	13650	0	0	1		
2	52241M0	1150	10205	400	10205	-1150	10205	-90.5	13650	0	0	1		



[0,0]

Reference : Assembly No. 8245



ภาคผนวก ข.

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP  
แล้วยังมีเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม ดังนี้



DIGITAL MICRO-OHMMETER ยี่ห้อ MEGABRAS รุ่น MPK-2000e

#### คุณสมบัติ

- Microprocessor controlled
- 0,1 $\mu\Omega$  resolution
- 0,10% basic accuracy
- Kelvin-type (4-wires) measurement
- 4 ½ digits reading
- Alphanumerical display
- Rechargeable battery
- Resistance reading up to 200  $\Omega$
- RS-232 data output
- Offset free reading
- IP-54 protection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### Power Meter ผลิตภัณ์ที่ FLUKE รุ่น 41B

คุณสมบัติ
• True-rms current from 1A to 500A (1000A with optional probe)
• Total harmonic distortion (%THDF and %THDR)
• Active power from 10W to 300 kW (600 kW with optional probe)
• Total power factor (PF)
• K-factor
• Displacement power factor (DPF)
• Frequency from 6 Hz-99.9 Hz (fundamental)
• Harmonics to 31st
• Waveform and spectrum displays
• True - RMS voltage from 5.0V to 600V
• Peak, DC, and Crest Factor
• Phase angle of fundamental and harmonics
• Record mode - MIN, MAX and AVG
• Apparent power (kVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กล้องถ่ายภาพความร้อน ผลิตภัณฑ์ FLUKE รุ่น Ti45

คุณสมบัติ		
<b>Temperature measurement</b>	Calibrated temperature range	-20 °C to 600 °C in 3 ranges
		Range 1 = -20 °C to 100 °C
		Range 2 = -20 °C to 350 °C
		Range 3 = 250 °C to 600 °C
	Optional - High temperature	Up to 1200 °C
		Range 4 = 500 °C to 1200 °C
Accuracy	±2 °C or 2%	
Measurement modes	Centerpoint, center box (area min/max, average), Defined field/text annotations, isotherms, Automatic hot and cold point detection, visible color alarm above and below	
Emissivity correction	0.1 to 1.0 (0.01 increments)	
<b>Environmental and mechanical design</b>	Operating temperature	-10 °C to +50 °C
	Storage temperature	-40 °C to +70 °C
	Water and dust resistant	IP54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Provincial Electrical Authority (PEA)**  
Navanakon 1 Substation

## Neutral Grounding Resister

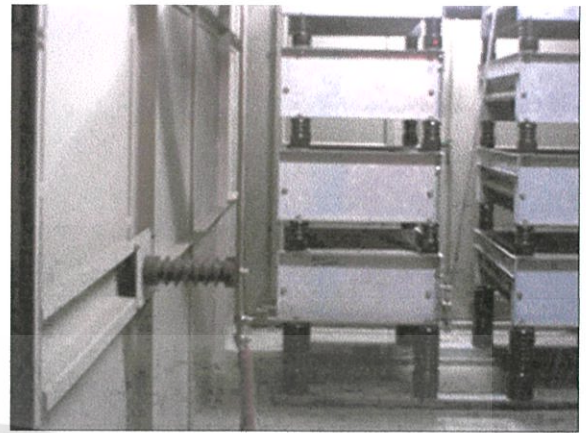
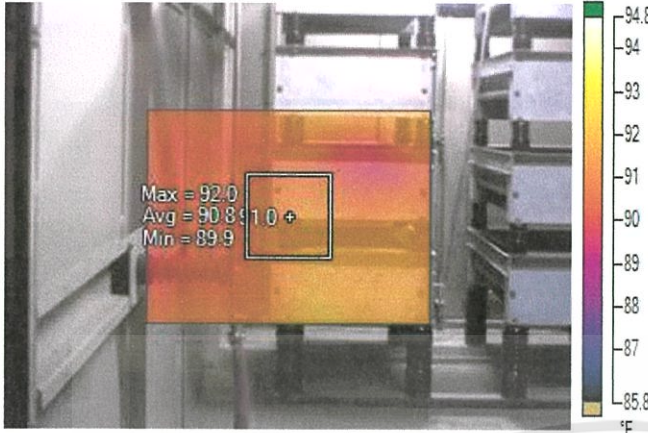
### Thermal Viewer



Prepared for:

**Buarian Chalee's Master Thesis**

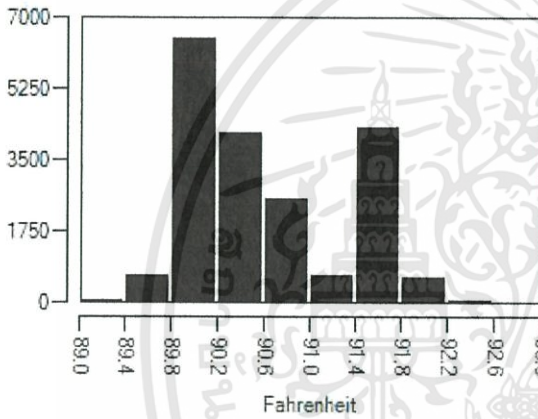
Kingmongkut's Institute of Technology Ladkrabang



IR20080813\_0208.is2

IR20080813\_0208.is2

8/13/2008 8:48:46 PM



**Histogram**

**Image Info**

Emissivity	0.95
Background	80.6 °F
Average Temperature	90.6 °F
Calibration Range	-4.0 °F to 662.0 °F
Camera Model	Ti45FT
File Location	D:\Thermal Imager\IR20080813_0208.is2
Image Range	89.4 °F to 92.3 °F
Image Time	8/13/2008 8:48:46 PM
Lens Description	20mm/F0.8
Lens Serial #	40948-6536
Manufacturer	Fluke
OCA Version	3.0.6.12
DSP Version	4.7.0.0
Camera Serial Number	Ti45FT-0710132

## Markers

Label	Average	Minimum	Maximum	Emissivity	Background	Std. Dev.
Center Box	90.8 °F	89.9 °F	92.0 °F	0.95	80.6 °F	0.250

Label	Temperature	Emissivity	Background
Center Point	91.0 °F	0.95	80.6 °F





ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บัวเรียน ชาลี , นรเศรษฐ พัฒนเดช และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ , “การสร้างแบบจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม EMTP เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของ NGR” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา หน้า 223, 14-15 มีนาคม 2551.
2. บัวเรียน ชาลี , นรเศรษฐ พัฒนเดช และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ , “การวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหายของ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒและมหาวิทยาลัยศรีปทุม, หน้า 41-44, 29-31 ตุลาคม 2551.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**P-054****EMTP MODEL FOR ANALYSIS OF NEUTRAL  
GROUNDING RESISTER FAILURES****Buarian Chalee<sup>1,2</sup> Norasege Pathanadej<sup>2</sup> Mothon  
Leelachindakaileak<sup>2</sup>**1. Director of Substation and Transmission Line Project Office,  
Provincial Electricity Authority, Bangkok, 10900, Thailand2. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

---

This paper presents the study of neutral grounding resister failures dued to the single line to ground faults. Neutral grounding resister is installed in the secondary of power transformer of Provincial Electricity Authority's substation 115-22 kV system. The results of field survey and simulation with ATP/EMTP program show that the over voltage of the other phase with are not subjected and high fault current flow in neutral grounding resister. Consequently the neutral grounding resister failures. The practical solutions with is introduced to solve this problem are the suitable co-ordination of protective device, or selecting the corrective equipment for avoidance of single line to ground faults.

---

**Keywords:**Neutral Grounding Resister/ Single Line To Ground Fault/ Power Transformer/  
ATP/EMTP

## การสร้างแบบจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม EMTP เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของ NGR

### EMTP Model for Analysis of Neutral Grounding Resister Failures

บัวเรียน ชาลี<sup>1,2</sup> นรเศรษฐ พัฒนเดช<sup>2</sup> มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์<sup>2</sup>

1. สำนักงานโครงการสถานีไฟฟ้าและสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 200 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

2. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Buarian Chalee<sup>1,2</sup> Norasege Pathanadej<sup>2</sup> Mothon Leelachindakaileak<sup>2</sup>

1. Director of Substation and Transmission Line Project Office, Provincial Electricity Authority, Bangkok, 10900, Thailand

2. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาถึงความเสียหายของตัวต้านทานต่อลงดิน ขณะเกิดลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ตัวต้านทานต่อลงดินจะติดตั้งที่จุดนิวทรัลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) จากการเก็บข้อมูลความเสียหายของตัวต้านทานต่อลงดินภาคสนามและจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP พบว่าขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเกินในเฟสที่เหลือของหม้อแปลงเครื่องเดียวกัน และมีกระแสสูงไหลผ่านตัวต้านทานต่อลงดิน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวต้านทานต่อลงดิน วิธีการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติทำได้โดยการจัดลำดับอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานสัมพันธ์กันและเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการลัดวงจรลงดิน

คำสำคัญ: ตัวต้านทานต่อลงดิน/ ลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส/ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง/ โปรแกรม ATP/ EMTP

#### บทนำ

โดยปกติแล้ว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต่อสายนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใน สถานีไฟฟ้าเป็นแบบลงดินโดยตรง (Solidly Ground) เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน กระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงมาก และเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) ในเฟสเดียวกันของวงจรอื่นๆ ที่ได้รับไฟจากหม้อแปลงเครื่องเดียวกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อพวกรูปกรณ์จำพวก ASD, PLC, คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันปลดตัวออกจากระบบ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งตัวต้านทาน (NGR) ขนาด 12.7 โอห์มทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตก รักษาแรงดันไม่ให้ลดลงเกิน 20 % ของแรงดันปกติ และจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสให้มีขนาดไม่เกิน 1,000 แอมป์

จากการติดตั้งตัวต้านทานดังกล่าว เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินเฟสเดียวจะทำให้เกิดแรงดันเกินร้อยละ 77.8 ของแรงดันปกติในเฟสที่เหลือ และมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานต่อลงดิน ส่งผลให้ตัวต้านทานต่อลงดินได้รับความเสียหาย

บทความงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอสาเหตุของปัญหาและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวต้านทานต่อลงดิน (NGR) โดยการเก็บข้อมูลภาคสนามและการจำลองผลด้วยโปรแกรม ATP/EMTP

### วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส
- 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของตัวต้านทานต่อลงดิน ตามมาตรฐาน IEEE 32
- 3) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์กลไกความเสียหายของตัวต้านทานต่อลงดิน ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 4) เพื่อศึกษาแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหาความเสียหายของตัวต้านทานต่อลงดิน เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

### วิธีการวิจัย

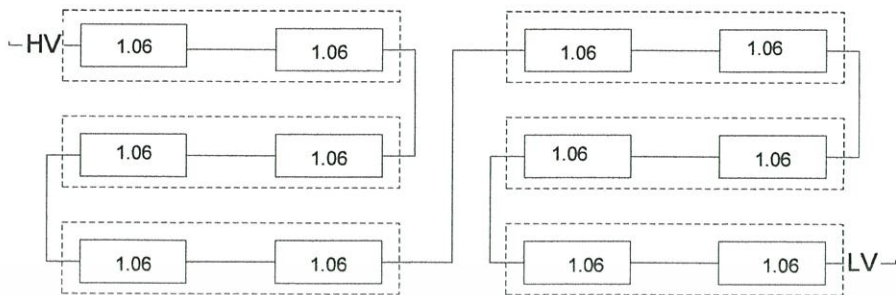
การวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเก็บข้อมูลภาคสนามจากสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา และการจำลองผลด้วยโปรแกรม ATP/EMTP แล้วนำผลที่ได้จากทั้งสองกรณี มาวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหาย

### ข้อกำหนดทางไฟฟ้าของตัวต้านทานต่อลงดิน

ข้อกำหนดทางไฟฟ้าของตัวต้านทานต่อลงดินที่การไฟฟ้าส่วนภูมิกษานำมาติดตั้งนั้นจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 32 มีข้อกำหนดตามตารางที่ 1. ขดลวดของตัวต้านทานต่อลงดินทำจากวัสดุผสมจำพวกนิโครม (NiCr 3020) โดยจะมีความต้านทานขนาด 1.06 โอห์ม จำนวน 12 ตัวต่ออนุกรมกัน รูปที่ 3. แสดงให้เห็นถึง แผนภาพเส้นเดียวของตัวต้านทานต่อลงดินขนาด 12.7 โอห์ม โดยด้าน HV จะต่อกับจุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และ ด้าน LV จะต่อลงดิน

ตารางที่ 1. ข้อกำหนดทางไฟฟ้าของ NGR ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิกษาคิดตั้งใช้งาน [2]

ค่าความต้านทาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	12.7 โอห์ม $\pm$ 10 %
พิกัดกระแสต่อเนื่อง	10 แอมป์
พิกัดกระแสลัดวงจร	1000 แอมป์ สำหรับ 10 วินาที
แรงดันระบบ	22 กิโลโวลต์
ระดับการฉนวน (BIL 1.2/50 us)	150 กิโลโวลต์



รูปที่ 3 แผนภาพเส้นเดียวของตัวค้ำทานต่อลงดินขนาด 12.7 โอห์ม

**1) การเก็บข้อมูลภาคสนาม**

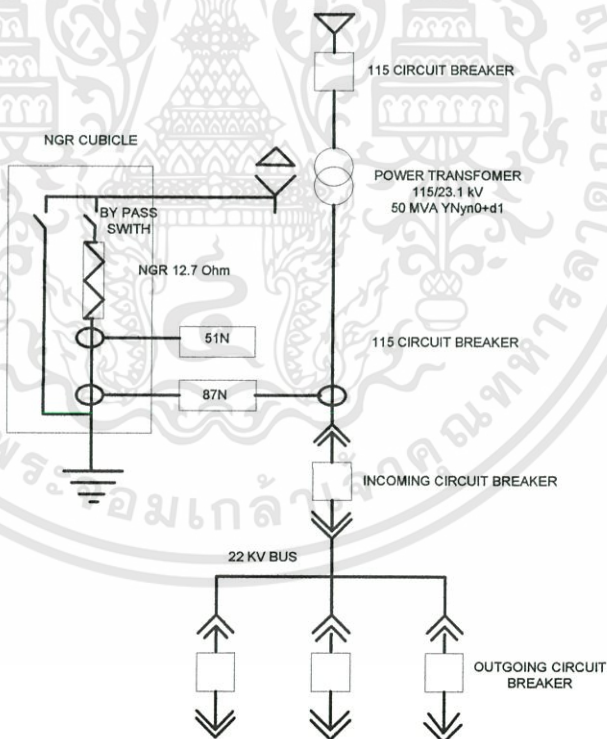
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการติดตั้งตัวค้ำทานต่อลงดินที่จุดนิวทรอลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า ดังรูปที่ 4. และติดตั้งรีเลย์ป้องกันจำนวน 2 ตัวคือ 51N (Over Current Relay) และ 87N (Differential Relay) จากการเก็บข้อมูลภาคสนามที่สถานีไฟฟ้า นวนคร 1 และนวนคร 2 จังหวัดปทุมธานี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เบื้องต้นพบว่ามิกระแสไหลผ่านตัวค้ำทานต่อลงดินตลอดเวลาประมาณ 0.10 – 0.13 แอมป์จากโหลดไม่สมดุล จากการสังเกตสภาพของตัวค้ำทานต่อลงดินหลังเกิดความเสียหายและตรวจสอบจากบันทึกประจำวันของพนักงานประจำสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา พบสาเหตุการระเบิดของตัวค้ำทานต่อลงดินนั้นมาจากการที่ฟ้าผ่าของอุปกรณ์ป้องกันทำให้มีกระแสสูงไหลผ่านตัวค้ำทานต่อลงดินเป็นเวลานาน ความเสียหายของ ตัวค้ำทานต่อลงดิน แสดงดังรูปที่ 5. และ 6. ซึ่งจะเห็นว่าระบบการฉนวน และขดลวดตัวค้ำทานนั้นเสียหายจากการระเบิดอย่างรุนแรง จนสูญเสียสภาพทางกล จากการสังเกตสภาพของตู้ของตัวค้ำทานต่อลงดินที่เกิดความเสียหาย พบว่าสภาพตู้มีรอยไฟไหม้อย่างรุนแรง ลูกถ้วยฉนวนนั้นแตกออกเป็นชิ้น ขดลวดความค้ำทานนั้นไหม้จนเป็นสีดำและเสียหายทางกล หม้อแปลงกระแสทั้งสองตัวได้รับความเสียหายจากไฟไหม้ สวิตช์ไม่มีคัททั้งสองชุดชำรุดเสียหาย อุปกรณ์ทุกชนิดแทบไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ จากการสำรวจสภาพตู้พบว่าระบบระบายอากาศนั้นมีเพียงรูเล็กๆด้านล่างสุดของตู้เพียงไม่กี่จุดเท่านั้น

**2) การจำลองระบบด้วยโปรแกรม ATP/AMTP**

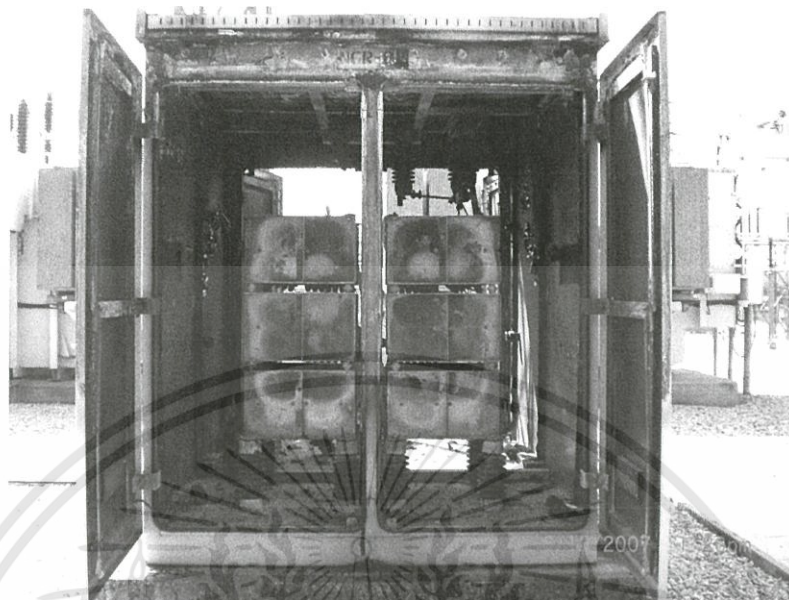
จากสมมติฐานและข้อมูลต่างๆ ของสถานีไฟฟ้าระบบ 115 – 22 กิโลโวลต์ และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อทำการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/AMTP จะได้วงจรดังรูปที่ 8. โดยให้สถานีไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน 115 กิโลโวลต์ จะมีหม้อแปลง 115/23.1 กิโลโวลต์ ขนาด 50 MVA 1 เครื่อง ต่อแบบ Dyn0 ด้านนิวทรอลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงต่อค้ำทาน ขนาด 12.7 โอห์ม ระบบจำหน่ายเป็นสายเคเบิล ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร ติดตั้งบนสเปเซอร์แบบวงจรคู่ ให้สวิตช์ที่ทำการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสที่เฟส A ช่วง 2-4 วินาที โดยทำการจำลองลัดวงจรลงดินที่เฟส A ระยะทางห่างจากสถานีไฟฟ้า 15 กิโลเมตร พบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส เฟสที่เกิดการลัดวงจรนั้นแรงดันจะลดลง เกิดแรงดันเกินภายในเฟสอื่น และมีกระแสสูงไหลผ่านตัวค้ำทานต่อลงดินช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจร

ตารางที่ 2. ข้อมูลระบบที่ใช้ในการจำลองระบบ

Source	แหล่งจ่ายแรงดัน 115 kV
Power Transformer	Ratio 115/23.1 kV HV winding resistance = 746.766 mOhm LV winding resistance = 20.485 mOhm
Space Aerial Cable (ASC 185 mm <sup>2</sup> )	$R_1 = 0.210660 \text{ Ohm/km}$ $X_1 = 0.298585 \text{ Ohm/km}$ $R_0 = 0.434688 \text{ Ohm/km}$ $X_0 = 1.841270 \text{ Ohm/km}$
ความต้านต่อลงดิน (NGR)	12.7 Ohm



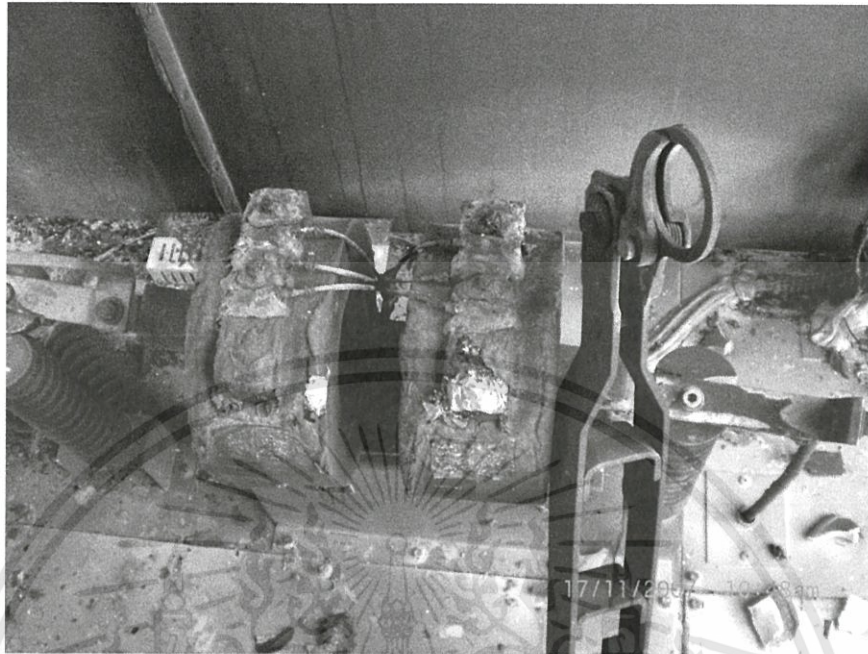
รูปที่ 4 แผนภาพเส้นเดียวของบริเวณที่ติดตั้งตัวต้านทานต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้า



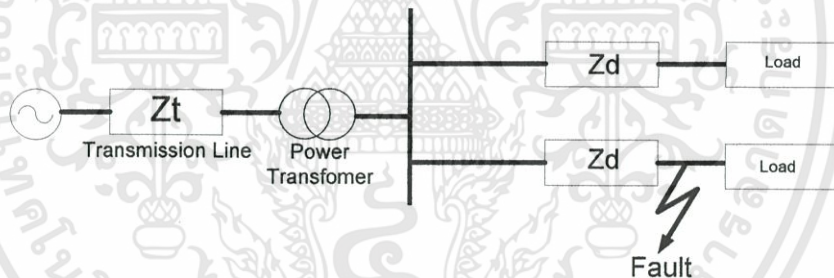
รูปที่ 5 ความเสียหายของตัวด้านทานต่อลงดินจากการระเบิดและไฟไหม้สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา



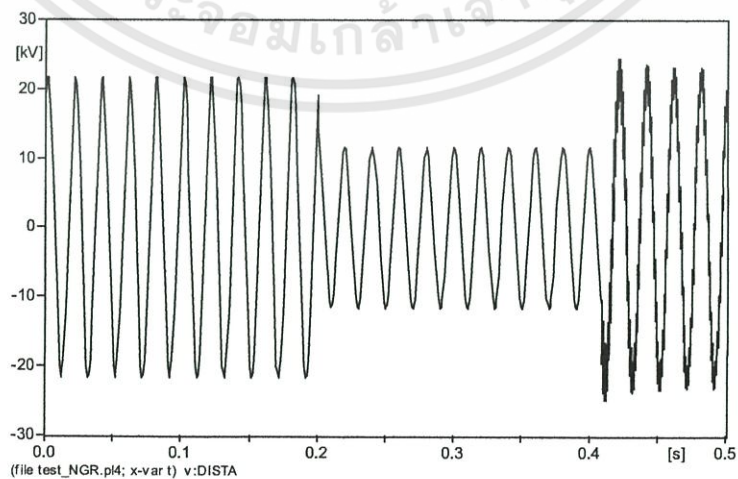
รูปที่ 6 ความเสียหายของขดลวดตัวด้านทานตัวด้านทานต่อลงดินจากการระเบิดและไฟไหม้สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา



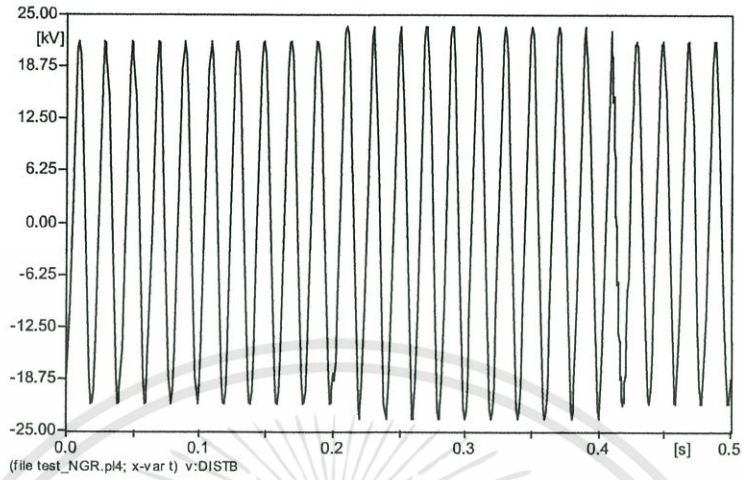
รูปที่ 7 หม้อแปลงกระแสเสียหายของจากการระเบิดและไฟไหม้สถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา



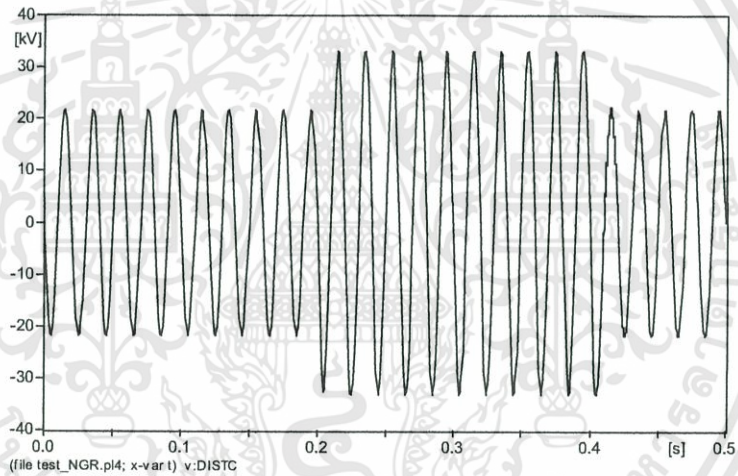
รูปที่ 8 วงจรที่จำลองผลด้วยโปรแกรม ATP/AMTP



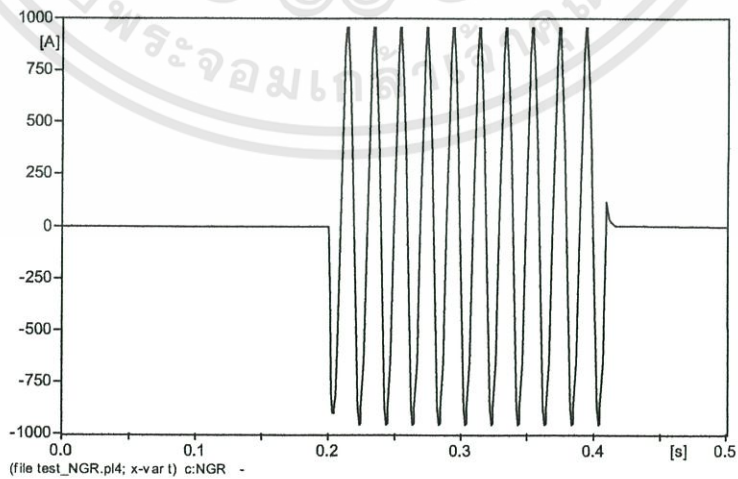
รูปที่ 9  $V_L$  ที่เฟส A เมื่อเกิดการลัดวงจร A



รูปที่ 10  $V_L$  ที่เฟส B เมื่อเกิดการลัดวงจร A



รูปที่ 11  $V_L$  ที่เฟส C เมื่อเกิดการลัดวงจร A



รูปที่ 12 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานต่อลงดินเมื่อเกิดการลัดวงจร



### สรุปผลการวิจัย

ปัญหาการระเบิดของ ตัวต้านทานต่อลงดิน ที่เกิดขึ้นนั้น มีสาเหตุมาจากการได้รับกระแสสูงเป็นระยะเวลานานเนื่องจากการเกิดลัดวงจรลงดินเฟสเดียวเป็นระยะเวลานาน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและพลังงานสะสมขึ้นภายในขดลวดของตัวต้านทานต่อลงดินซึ่งทำให้ขดลวดตัวต้านทานสูญเสียเสถียรภาพทางกล และเกิดการระเบิดขึ้นในที่สุด โดยแนวทางการแก้ไขดังกล่าวได้เสนอไว้ข้างต้น การเลือกใช้ควรอยู่ในพื้นฐานความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ความเหมาะสมกับระบบ ประสิทธิภาพการแก้ปัญหา และค่าใช้จ่ายในการลงทุน

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณกิตติ เลียงเครือ เจ้าหน้าที่กองวิจัย และคุณเรืองศักดิ์ พรหมจันทร์ เจ้าหน้าที่กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและความรู้ และขอขอบเจ้าหน้าทีประจำสถานีไฟฟ้าแรงดัน 1 และสถานีไฟฟ้าแรงดัน 3 จังหวัดปทุมธานี และสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้อำนวยความสะดวกในการศึกษาข้อมูลภาคสนาม

### เอกสารอ้างอิง

IEEE Std. 32-1990. (1990). *IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices.*

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2545). *Type Test Report of Neutral Grounding Resister 12.7 Ohm/1,000 A.* สัญญาจ้างเลขที่ จ.55/2545.

William Lobos, Goran Drobnjak, and John Skliutas. (2004). *A Possible Mechanism for Neutral Grounding Resistor Failures. 0-7803-9156-X. IEEE.*

กองแผนงานระบบไฟฟ้า. (2550). *รายงานค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ปี 2550 (2007).*

ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

กองพัฒนาระบบไฟฟ้า.(2540). *สรุปรายงานผลการวิเคราะห์การทำงานของ NGR โครงการ DAS.*

ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

# การวิเคราะห์สาเหตุความเสียหายของ NGR ที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## Analysis of Neutral Grounding Resister Failures in PEA Substation

บัวเรียน ชาลี นรเศรษฐ พัฒนเดช มณฑล สิลลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ : 0-2326-9902 E-mail: buarian.cha@pea.co.th

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาถึงความเสียหายของตัวต้านทานต่อลงดิน (NGR) ภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จากการเก็บข้อมูลความเสียหายของ NGR ภาคสนามและจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP พบว่าขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเกิน และมีกระแสสูงไหลผ่าน NGR ถ้าแรงดันเกินและกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมากกว่าพิกัดการทำงานต่อเนื่องสูงสุดจะทำให้ NGR ได้รับความเสียหาย วิธีการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติทำได้โดยการจัดลำดับอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานสัมพันธ์กันและเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมเพื่อลดอัตราการเกิดลัดวงจรลงดิน

คำสำคัญ: ตัวต้านทานต่อลงดิน, ลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส, โปรแกรม ATP/EMTP

### Abstract

This paper presents the study of neutral grounding resister (NGR) failures in Provincial Electricity Authority's substation (PEA). The results obtained from the field survey and simulation with ATP/EMTP program show that, the single line to ground fault causes the existence of over voltage and high fault current absorbed by NGR, if the overvoltage is higher than the rate of maximum continuous operating of such NGR, it may be failure. The proposed practical solution is the arrangement of co-ordination of protective devices, with the corrective equipment to reduce single line to ground faults occurring in power system.

Keywords: neutral grounding resister, single line to ground fault, ATP/EMTP Program

### 1. บทนำ

โดยปกติแล้ว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต่อจุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้าเป็นแบบลงดินโดยตรง (Solidly Ground) เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน กระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงมาก

และเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) ในเฟสเดียวกันของวงจรอื่นๆ ที่ได้รับ ไฟจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องเดียวกัน ทำให้เกิดผลกระทบกับพวกลูกอุปกรณ์จำพวก PLC คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันปลดตัวออกจากระบบ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งจากปัญหาดังกล่าว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้รับเรื่องร้องเรียนจากผู้ใช้ไฟเป็นจำนวนมาก

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งตัวต้านทาน (NGR) ขนาด 12.7 Ω [1,2] ที่จุดนิวทรัลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะ รักษาแรงดันไม่ให้ลดลงเกินร้อยละ 20 ของแรงดันปกติ และจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสให้มีขนาดไม่เกิน 1,000 A จากการติดตั้งตัวต้านทานดังกล่าว เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส สามารถรักษาแรงดันไม่ให้ลดลงเกินร้อยละ 20 ของแรงดันปกติ และจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสให้มีขนาดไม่เกิน 1,000 A ได้ แต่จะทำให้เกิดแรงดันเกิน (Overvoltage) ของแรงดันปกติในเฟสที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจร

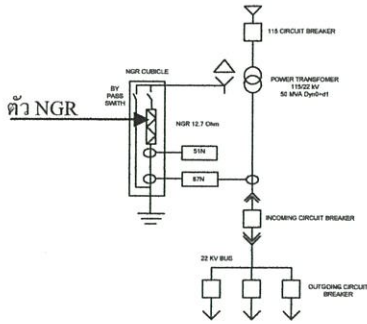
ปัจจุบันเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จะทำให้มีแรงดันเกินและกระแสลัดวงจรที่สูงมากในช่วงระยะเวลาอันสั้น ส่งผลให้ NGR ที่ติดตั้งได้รับความเสียหายอย่างรุนแรง จนไม่สามารถใช้งานได้ ต้องทำการปลดออกจากระบบ

บทความวิจัยนี้นำเสนอสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ทำให้ NGR เสียหายเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยการเก็บข้อมูลภาคสนาม และการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP [3]

### 2. กรณีศึกษา

กรณีศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้เป็น NGR ขนาด 12.7 Ω ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมีแผนภาพเส้นเดี่ยวของการติดตั้ง NGR ดังรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 1 แผนภาพเส้นเดียว วงจรการติดตั้ง NGR [1]



รูปที่ 3 ตู้ NGR ที่ได้รับความเสียหาย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้ทำการติดตั้ง NGR ที่จุดนิวทรอลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ดังรูปที่ 1 โดยทำการติดตั้งในสถานโก ใกล้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง NGR ทั้งนี้ได้ติดตั้งรีเลย์จำนวน 2 ชุด คือ 51N (Over Current Relay) และ 87N (Differential Relay) เพื่อตรวจจับกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจร

จากข้อมูลภาคสนามสถานีไฟฟ้าที่ NGR เกิดการชำรุดเสียหาย 2 แห่ง คือสถานีไฟฟ้าห้วยทะเล จังหวัดนครราชสีมา และสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า NGR เกิดการระเบิดและไหม้อย่างรุนแรง ขดลวดความต้านทานสูญเสียสภาพทางกล ถูกด้วยฉนวนพังเสียหาย ดังรูปที่ 3 - 5 ซึ่งจากการตรวจสอบบันทึกและสอบถามจากพนักงานประจำสถานีพบว่า สาเหตุที่ NGR เกิดการระเบิดและไฟไหม้เกิดจากสายไฟระบบจำหน่ายขาดแล้วตกลงพื้น



รูปที่ 4 ขดลวด NGR ที่ได้รับ ความเสียหาย

รูปที่ 5 สภาพความเสียหายของหม้อแปลงกระแสจากการระเบิด



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้ง NGR ภายในสถานีไฟฟ้า

3. การสร้างแบบจำลอง และพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เพื่อใช้ในโปรแกรม ATP/EMTP แบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. สถานีไฟฟ้า จำลองด้วย แหล่งจ่าย 3 เฟส 115 kV 50 Hz
2. หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมัน มีรายละเอียดดังนี้
  - ขนาด 50 MVA, 115/22 kV, Dyn0+d1
  - พารามิเตอร์ของหม้อแปลง

พารามิเตอร์	ด้านปฐมภูมิ	ด้านทุติยภูมิ
R(mohm)	529.631	16.937

3. สายเคเบิล XLPE ขนาด 185 sq.mm. จำลองด้วยแบบจำลองสายเคเบิล 3 เฟส มีพารามิเตอร์ดังนี้ [4]

R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)
0.210655	0.414406	0.355472	1.644735

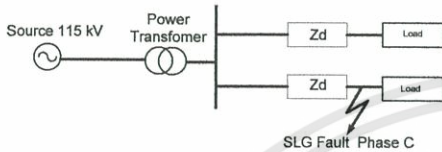
เมื่อ R1, X1, R0 และ X0 คือค่า Thevenin Impedance สายเคเบิลของระบบจำหน่าย

4. NGR ขนาด 12.7 Ω
5. ช่วงเวลาลัดวงจรที่ t = 0.2 - 0.4 s

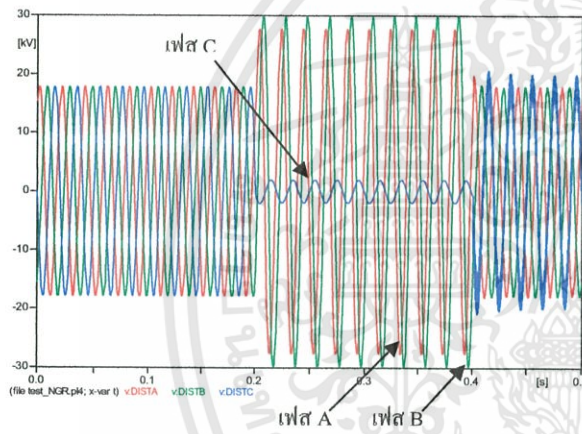
4. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

4.1 แรงดันเกินจากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

การศึกษาแรงดันเกินที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส โดยการจำลองในกรณีสายเฟส C ขาดและตกลงดิน วงจรดังรูปที่ 6 เมื่อเกิดการลัดวงจรจะทำให้แรงดันในเฟสที่ลัดวงจรลดลงและเกิดแรงดันเกินชั่วคราวในเฟสที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจร ดังรูปที่ 7 ซึ่งแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงพอที่จะส่งผลให้ NGR ได้รับความเสียหายได้ [5]



รูปที่ 6 วงจรจำลองลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส



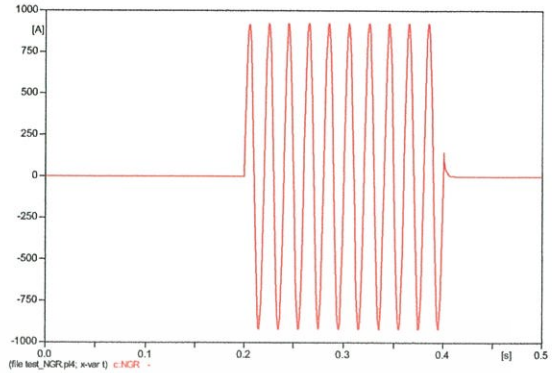
รูปที่ 7 แรงดันเกินเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส (ที่เฟส C)

4.2 กระแสที่ไหลผ่าน NGR จากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส

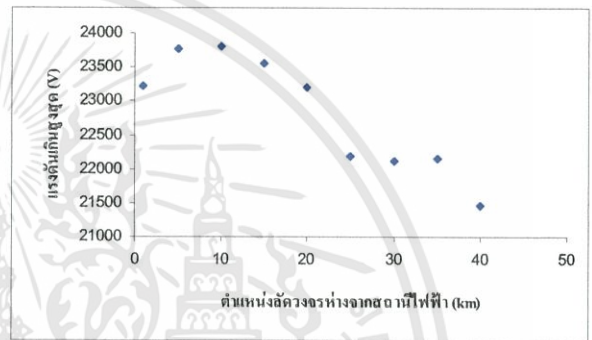
การลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จะทำให้มีกระแสไหลย้อนกลับไปยังจุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยผ่าน NGR ซึ่งกระแสดังกล่าวจะมีค่าไม่เกิน 1,000 A ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากถูกจำกัดจากขนาดของ NGR แต่กระแสสูงดังกล่าวจะไหลผ่านในช่วงเวลาอันสั้น ส่งผลให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นที่ขดลวดความต้านทานของ NGR อย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ NGR ได้รับความเสียหาย

4.3 ผลจากพารามิเตอร์ของระบบ

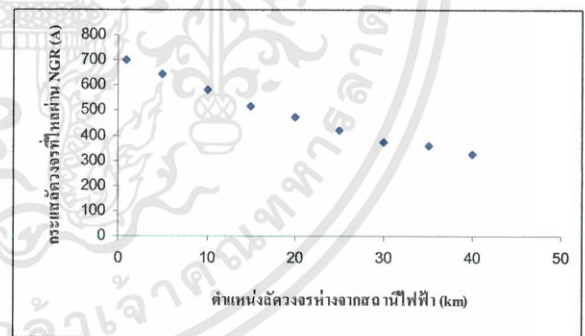
ผลจากระยะทางของตำแหน่งที่ลัดวงจรลงดินขนาดของแรงดันเกินและกระแสที่ไหลผ่าน NGR ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ลัดวงจรว่าอยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้าเท่าใด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งที่ลัดวงจรจะได้ค่าดังรูปที่ 9-10



รูปที่ 8 กระแสลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ที่ไหลผ่าน NGR ขณะลัดวงจร



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรกับแรงดันที่ตกคร่อมตัว NGR



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรกับกระแสที่ไหลผ่าน NGR

จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่าเมื่อตำแหน่งการลัดวงจรมีระยะห่างจากสถานีไฟฟ้ามากขึ้นแรงดันเกินและกระแสที่ไหลผ่าน NGR จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อตำแหน่งลัดวงจรมีระยะทางมากขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้แรงดันเกินและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลง

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP นั้นชี้ให้เห็นว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส จะมีกระแสไหลผ่านตัว NGR และมีแรงดันสูงตกคร่อมที่ตัว NGR และจากผลการตรวจสอบสภาพของ NGR

ที่เกิดความเสียหายภาคสนาม ซึ่งให้เห็นว่า NGR ที่เกิดความเสียหายนั้น เกิดการระเบิดขึ้นอย่างรุนแรง บางแห่งลูกหม้อและติดไฟ สาเหตุหลักเกิดจากสายตัวนำในระบบจำหน่ายขาด และตกลงบนวัสดุที่มีความต้านทานสูง ซึ่งถือว่าเป็นการลัดวงจรที่มีอิมพีแดนซ์สูง [6] ส่งผลให้มีกระแสไหลผ่าน NGR เป็นเวลานาน เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถตรวจจับการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในเวลาอันรวดเร็วได้ ทำให้ตัว NGR เกิดพลังงานความร้อนจากกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน และเมื่อรวมกับพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในขดลวดของ NGR เนื่องจากกระแสไหลไม่สมดุล ทำให้ขดลวดของ NGR และระบบการฉนวน ไม่สามารถทนต่อพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้ เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางกลจากพลังงานความร้อน และเกิดการระเบิดขึ้นในที่สุด

#### 4.5 แนวทางการป้องกัน และแก้ไข้ปัญหา

1. เลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดลัดวงจรลงดิน ที่ทำให้เกิดแรงดันเกินและกระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความเสียหายของ NGR
2. กำหนดค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันภายในสถานีไฟฟ้าที่ติดตั้ง NGR โดยให้สามารถตรวจจับฟอลต์ และลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสออกจากระบบได้ในเวลาที่เหมาะสมเพื่อลดระยะเวลาที่จะเกิดความร้อนสะสมที่ขดลวดของ NGR จากกระแสลัดวงจรไหลผ่าน
3. แยกวงจรที่ต้องการคุณภาพไฟฟ้าสูงไว้ที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเครื่องเดียวกัน เพื่อง่ายต่อการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน และการจัดการระบบจำหน่าย

#### 5. สรุป

ปัญหาความเสียหายของ NGR ที่เกิดขึ้นนั้น มีสาเหตุมาจากการเกิดแรงดันเกินและได้รับกระแสที่ไหลผ่านเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากการลัดวงจรลงดิน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและพลังงานสะสมขึ้นภายในขดลวดของ ส่งผล NGR เกิดความเสียหาย

ขนาดของแรงดันเกินชั่วคราว และกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน NGR ขึ้นอยู่กับระยะห่างของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรกับสถานีไฟฟ้ากรณีศึกษานี้แรงดันเกินชั่วคราว และกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน NGR จะลดลงเมื่อตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรมีระยะห่างจากสถานีไฟฟ้ามากขึ้น

การป้องกันความเสียหายของ NGR ที่เกิดจากแรงดันเกินชั่วคราว และกระแสที่ไหลผ่านขณะเกิดการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟส ได้เสนอแนวทางการแก้ไขดังกล่าวได้เสนอไว้ข้างต้น โดยการเลือกใช้ครออยู่ในพื้นฐานความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ความเหมาะสมกับระบบประสิทธิภาพการแก้ปัญหา และค่าใช้จ่ายในการลงทุน

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการศึกษาข้อมูลภาคสนาม

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองพัฒนาระบบไฟฟ้า. สรุปรายงานผลการวิเคราะห์การทำงานของ NGR โครงการ DAS. มิถุนายน 2540. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.Type Test Report of Neutral Grounding Resister 12.7 Ohm/1,000 A.สัญญาจ้างเลขที่ จ.55/2545.
- [3] H.W. Dommel, "EMTP Theory," 1987
- [4] กองแผนงานระบบไฟฟ้า. ค่าพารามิเตอร์ของสายระบบจำหน่ายหรือระบบสายส่ง. ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า.การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [5] William Lobos, Goran Drobnjak, and John Skliutas. A Possible Mechanism for Neutral Grounding Resistor Failures. 0-7803-9156-X, IEEE, 2004.
- [6] โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. รายงานการศึกษาระบบป้องกันสำหรับสาย PIC. สาขาการวิเคราะห์ฟอลต์และการป้องกัน มีนาคม 2546.



บัวเรียน ชาลี ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



นรเศรษฐ พัฒนเดช ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยเกี่ยวกับฉนวน และการตรวจสอบวินิจฉัยการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, สายเคเบิลใต้ดิน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้นรวมทั้งฟ้าผ่า การป้องกันและEMC



มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไว้ว่าควรปฏิบัติตามข้อบังคับของมหาวิทยาลัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบัวเรียน ชาลี
วัน เดือน ปีเกิด	10 กุมภาพันธ์ 2526
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 86/5 หมู่ที่ 10 ตำบลบึงบอน อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดศรีสะเกษ 33190
ประวัติการศึกษา	2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	งานก่อสร้างสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ประสบการณ์ทำงาน	ป.ศ. 2549 -ปัจจุบัน วิศวกรระดับ 4 สำนักงานโครงการสถานีไฟฟ้าและสายส่ง (ภาคเหนือ, ตะวันออกเฉียงเหนือ, ใต้) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้