

การศึกษาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบจำหน่าย เนื่องจากการทดสอบความทนต่อ
การลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส



นายเร็กซ์กิติ์ อ่อนจินดา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF VOLTAGE SAG IMPACT ON DISTRIBUTION SYSTEMS DUE TO
SHORT CIRCUIT WITHSTAND TEST OF 3-PHASE TRANSFORMERS

Mr. Rerngsak Onjinda



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5870420521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POWER QUALITY / VOLTAGE SAG / FAULT / ABILITY TO WITHSTAND SHORT
CIRCUIT OF 3 PHASE TRANSFORMERS FOR DISTRIBUTION SYSTEMS

RERNGSAK ONJINDA: A STUDY OF VOLTAGE SAG IMPACT ON DISTRIBUTION
SYSTEMS DUE TO SHORT CIRCUIT WITHSTAND TEST OF 3-PHASE
TRANSFORMERS. ADVISOR: ASSOC. PROF.THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D.,
182 pp.

Provincial Electricity Authority (PEA) allows institutes/laboratories in Thailand to test the ability to withstand short circuit of 3 phase transformers for 22 kV and 33 kV distribution systems by using PEA's power system as a source according to reference specification no. RTRN-035/2558. Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) is an institute/laboratory accepted and can use power system of PEA at 22 kV voltage level. The result of circuit connection for testing with PEA's power system while testing may cause power quality problems in PEA's power system.

This thesis focuses on study of voltage sag impact on electrical power systems on ability to withstand short circuit test of 3 phase transformers testing for 22 kV and 33 kV in sample area where the existing institute/laboratory is located. Geographic Information System (GIS) of PEA is used to create electrical system modeling and analyze by analysis program in electrical engineering, DlgSILENT PowerFactory, in order to understand the severity of voltage sag impact on PEA's power system and other users near institute/laboratory and suggest how to avoid voltage sag impact on PEA's power system for the existing institute/laboratory and new institutes/laboratories that maybe set up in the future.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และแนวทางการแก้ไขปัญหา ตั้งแต่เริ่มทำวิทยานิพนธ์ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการตรวจสอบ แนะนำการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง เป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์ให้กับผู้วิจัย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) และ ดร.จักรเพชร มัทราช (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งได้กรุณาตรวจสอบ และให้คำแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการ ระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนด้านข้อมูล ทุนวิจัย และโอกาสในการเดินทางไปทำวิจัยระยะสั้น กับ Prof. Nakanishi Yosuke ณ มหาวิทยาลัยวะเซเซดะ กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจอย่างดี มาโดยตลอด และทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 รูปแบบการทดสอบฯ ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน.....	7
2.1 การทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็น แหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ.....	8
2.2 การทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบ เอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ	12
2.3 การทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ.....	16
บทที่ 3 ข้อกำหนดทางเทคนิค และมาตรฐานในการทดสอบฯ.....	29
3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามสเปคอ้างอิง เลขที่ RTRN-035/2558 [1]	29

3.2 หัวการข้อทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามสเปคอ้างอิง เลขที่ RTRN-035/2558 [1]	32
3.2.1 การทดสอบประจำ (Routine test)	32
3.2.2 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test)	32
3.2.3 การทดสอบพิเศษ (Special test)	33
3.3 รายละเอียดการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] (Power transformers Part 5 : Ability to withstand short circuit)	35
3.3.1 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า	35
3.3.2 ค่าต่ำที่สุดที่ได้รับการยอมรับของเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจ ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเป็นไปตามนี้	35
3.3.3 ค่า Short-circuit apparent power ของระบบ	36
3.3.4 จำนวนครั้ง และช่วงเวลาในการทดสอบฯ	37
3.3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสลัดวงจรจากการทดสอบฯ	37
3.3.6 กระบวนการทดสอบ	37
บทที่ 4 ทฤษฎี และความรู้พื้นฐาน	66
4.1 เกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5]	66
4.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	67
4.2.1 นิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า	67
4.2.2 เหตุผลสำคัญที่ทำให้ต้องพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า [17]	67
4.2.3 สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า	68
4.2.4 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า [17]	68
4.3 แรงดันตกชั่วขณะ และการคำนวณ	76
4.3.1 นิยามของแรงดันตกชั่วขณะ	76

4.3.2 การจำแนกประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ.....	76
4.3.3 สาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะ.....	76
4.3.4 ผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะ.....	78
4.3.5 การตอบสนองของอุปกรณ์ในระบบ ในสภาวะเกิดการผิดปกติ.....	79
4.3.6 การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะ.....	80
4.4 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	82
4.4.1 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	82
4.4.2 แหล่งจ่ายไฟสมมูล.....	84
4.4.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร.....	86
4.4.4 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล.....	89
4.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นของหม้อแปลงไฟฟ้าในทุกพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV ก่อนที่จะทำการทดสอบ.....	90
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	92
5.1 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory.....	92
5.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร สำหรับการทดสอบฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4].....	108
5.2.1 ตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร.....	108
5.2.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 160 kVA สำหรับแรงดัน 22 kV 50 Hz คือ.....	109
5.2.3 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร สำหรับการทดสอบฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า.....	110

5.3 รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบ จำหน่าย	111
5.4 ผลการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย	112
5.4.1 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1	112
5.4.2 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2	117
5.4.3 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3	122
5.4.4 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4	127
5.5 วิเคราะห์ผล	137
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	146
รายการอ้างอิง	150
ภาคผนวก ก	153
ภาคผนวก ข	167
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	182

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ค่าความสูญเสีย และเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจของหม้อแปลงไฟฟ้า	31
ตารางที่ 3.2 ค่าต่ำที่สุดที่ได้รับการยอมรับของเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	35
ตารางที่ 3.3 ค่า Short-circuit apparent power	36
ตารางที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์ของ X/R ratio กับค่า $k \times \sqrt{2}$ [4]	50
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	66
ตารางที่ 4.2 การจำแนกประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE 1159	76
ตารางที่ 5.1 ปริมาณการใช้โหลดสูงสุด และต่ำสุด	101
ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสลัดวงจร ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบฯ ตามสเปค อ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า	110
ตารางที่ 5.3 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1	113
ตารางที่ 5.4 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1.....	115
ตารางที่ 5.5 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 2	118
ตารางที่ 5.6 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 2.....	120
ตารางที่ 5.7 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 3	123
ตารางที่ 5.8 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 3.....	125
ตารางที่ 5.9 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.1	128
ตารางที่ 5.10 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.1	130
ตารางที่ 5.11 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.2.....	133
ตารางที่ 5.12 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.2	135
ตารางที่ 5.13 ขนาดกระแสลัดวงจรกับระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เรียงจากน้อย ไปมาก.....	137
ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 กับ 2.....	138

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 กับ 3.....	141
ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบฯ สถานการณที่ 1, 4.1 และ 4.2.....	144
ตารางที่ 5.17 สรุปรายละเอียดการทดสอบฯ ทุกสถานการณ.....	144
ตารางที่ 5.18 ข้อสังเกต/ข้อสรุป ผลการทดสอบฯ ทุกสถานการณ.....	145
ตารางที่ ก.1 เปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสีย การเลือกใช้ระหว่างฟิวอินเวอร์เตอร์กับเจนเนอเรเตอร์ สำหรับ Fault current contribution ขณะทดสอบฯ	156
ตารางที่ ก.2 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1	160
ตารางที่ ก.3 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1	160
ตารางที่ ก.4 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 (Before).....	165
ตารางที่ ก.5 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 (After) (สำหรับการใช้ ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของฟิวอินเวอร์เตอร์ ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุด เชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ).....	166
ตารางที่ ก.6 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 (Before)....	166
ตารางที่ ก.7 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1 (After) (สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของฟิวอินเวอร์เตอร์ ช่วยรักษาระดับ แรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ).....	166
ตารางที่ ข.1 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1	167
ตารางที่ ข.2 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 2	170
ตารางที่ ข.3 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 3	173
ตารางที่ ข.4 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.1	176
ตารางที่ ข.5 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณที่ 4.2	178
ตารางที่ ข.6 สรุปขนาด Fault current contribution ของฟิวอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายกระแส ลัดวงจร เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส พิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA ถึง 2,000 kVA ขณะทดสอบฯ สถานการณที่ 1	181

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVAของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6].....	9
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6].....	10
รูปที่ 2.3 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6]	11
รูปที่ 2.4 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVAของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7].....	13
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7].....	14
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7].....	14
รูปที่ 2.7 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7].....	15
รูปที่ 2.8 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVA ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8].....	17
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8].....	18

รูปที่ 2.10 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8]	19
รูปที่ 2.11 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 1 [9]	21
รูปที่ 2.12 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 2 [9]	22
รูปที่ 2.13 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 3 [9]	23
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบฯ [9]	24
รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ทดสอบฯ และอุปกรณ์ป้องกัน [9]	25
รูปที่ 2.16 วันที่ทำการทดสอบฯ [9]	26
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [9]	27
รูปที่ 2.18 ผลการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [9]	28
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพรวมคาร์แรกเตอร์ที่ได้จากการวัด [8]	38
รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบ และเครื่องมือวัดฯ	39
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างค่า voltage ratio ที่วัดได้ และการตรวจสอบ phase displacement [8]	39
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างค่า Insulation resistance tests ที่วัดได้ [8]	40
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวงจรการวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่างๆ	40
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างค่าความต้านทานของขดลวดที่วัดได้ [8]	41
รูปที่ 3.7 วงจรทดสอบ และตัวอย่างรายงานผลการทดสอบ Separate source AC voltage withstand test [8]	42
รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบ Induce voltage withstand test [8]	43
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างผลการทดสอบ Induce voltage withstand test [8]	43
รูปที่ 3.10 วงจรทดสอบ no-load loss and current [8]	44

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลการทดสอบการวัดค่า no-load loss และกระแส [8].....	45
รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบ Measurement of short-circuit impedance and load loss [8]	46
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างผลการทดสอบ short-circuit impedance and load loss [8].....	47
รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [8]	48
รูปที่ 3.15 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจร [8].....	51
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนที่จะทำการทดสอบฯ [8].....	52
รูปที่ 3.17 กราฟ และผลการทดสอบฯ [8].....	53
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากทำการทดสอบฯ [8].....	54
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างค่า voltage ratio ที่วัดได้ และการตรวจสอบ phase displacement หลัง ทำการทดสอบฯ [8]	55
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างค่า Insulation resistance ที่วัดได้หลังทำการทดสอบฯ [8].....	56
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างค่า winding resistance ที่วัดได้หลังทำการทดสอบฯ [8].....	57
รูปที่ 3.22 วงจรทดสอบ และตัวอย่างรายงานผลการทดสอบ Separate source AC voltage withstand test หลังทำการทดสอบ [8].....	58
รูปที่ 3.23 วงจรทดสอบ Induce voltage withstand test [8].....	59
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างผลการทดสอบ Induce voltage withstand test [8].....	60
รูปที่ 3.25 วงจรทดสอบ short-circuit impedance and load [8].....	60
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการทดสอบการวัดค่า no-load loss และกระแสหลังทำการทดสอบฯ [8] .	61
รูปที่ 3.27 วงจรทดสอบ Measurement of short-circuit impedance and load loss [8]	62
รูปที่ 3.28 ตัวอย่างผลการทดสอบ short-circuit impedance and load loss หลังทำการ ทดสอบฯ [8].....	63
รูปที่ 3.29 ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า หลังทำการทดสอบฯ [8].....	64
รูปที่ 3.30 เปิดฝาลังหม้อแปลงไฟฟ้าออก (Untanked) [8]	65
รูปที่ 3.31 ตรวจสอบความผิดปกติของ Active part หลังการทดสอบฯ [8].....	65

รูปที่ 4.1 การเกิดอิมพัลส์ชั่วครู่จากกระแสฟ้าผ่า [17]	68
รูปที่ 4.2 กระแสอสซิลเลทชั่วครู่ โดยการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบ back-to-back [17]	69
รูปที่ 4.3 แรงดันตกชั่วขณะ จากสาเหตุ SLG fault [17]	71
รูปที่ 4.4 แรงดันตกชั่วขณะ จากสาเหตุการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ [17]	71
รูปที่ 4.5 แรงดันเกินชั่วขณะ จากสาเหตุ SLG fault [17]	72
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างแนวโน้มแรงดันไม่สมดุลในสายป้อนที่อยู่อาศัยแห่งหนึ่ง [17]	72
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของกระแส และฮาร์มอนิกสเปกตรัม สำหรับกระแสขาเข้า ASD [17]	73
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันรอยบากที่มีสาเหตุมาจาก 3 เฟสคอนเวอร์เตอร์ [17]	74
รูปที่ 4.9 แรงดันกระเพื่อมที่มีสาเหตุมาจากการใช้เตาหลอมแบบอาร์ค [17]	75
รูปที่ 4.10 รูปแบบของคลื่นแรงดันตกชั่วขณะ และ RMS plot ที่เกิดจากความผิดปกติพร้อม	77
รูปที่ 4.11 คุณลักษณะแรงดันตกชั่วขณะโดยทั่วไปของการสตาร์ทมอเตอร์	77
รูปที่ 4.12 รูปแบบคลื่นแรงดันตกชั่วขณะโดยทั่วไป และ RMS plot จากการเริ่มทำงานของหม้อ แปลงไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.13 การพิจารณาระบบ โดยอาศัยหลักการ Super position	80
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [19]	82
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [19]	83
รูปที่ 4.16 ชนิดของการลัดวงจร [19]	84
รูปที่ 4.17 ไดอะแกรมวงจรสมมูลของระบบ Positive sequence [19]	85
รูปที่ 4.18 Voltage factor (IEC 60909) [19]	85
รูปที่ 4.19 ระบบไฟฟ้า และการแทนด้วยวงจรสมมูล [19]	86
รูปที่ 4.20 กราฟตัวคูณค่า K [19]	90
รูปที่ 5.1 การ Log on เข้าโปรแกรม DigSILENT PowerFactory [20]	92
รูปที่ 5.2 โปรแกรมจะสอบถามว่าจะให้สร้าง User ตามนี้หรือไม่ ให้ตอบ YES [20]	93
รูปที่ 5.3 เลือกรุ่น New Data Manager [20]	93

รูปที่ 5.4 หน้าจอ Data Manager [20].....	93
รูปที่ 5.5 การสร้าง Library Folder [20].....	94
รูปที่ 5.6 การตั้งชื่อ Library Folder [20].....	94
รูปที่ 5.7 Library Folder ที่ถูกสร้างขึ้นภายใต้ User name [20]	94
รูปที่ 5.8 การนำเข้าไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]	95
รูปที่ 5.9 พื้นที่จัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20].....	95
รูปที่ 5.10 เลือกที่จัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20].....	95
รูปที่ 5.11 Library Folder ที่ต้องการจัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20].....	96
รูปที่ 5.12 เลือก New Path [20].....	96
รูปที่ 5.13 รายการ Name, Type ของอุปกรณ์ทั้งหมดที่จัดเก็บอยู่ใน Library [20]	96
รูปที่ 5.14 แสดงเครื่องมือ (Tools) ที่รองรับ.....	97
รูปที่ 5.15 วิธีการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs [20]	98
รูปที่ 5.16 เลือกไฟล์ .dgs ที่ต้องการนำเข้า (Import) [20].....	98
รูปที่ 5.17 เลือกไฟล์ Library ที่อยู่ที่ User [20]	99
รูปที่ 5.18 ทำเครื่องหมายถูกต้องข้อความ “Copy Library into Project” [20].....	99
รูปที่ 5.19 ตรวจสอบภาพรวมสำหรับข้อมูลที่ป้อนเข้าไป ในขั้นตอนการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs [20].....	99
รูปที่ 5.20 ระบบไฟฟ้ากำลังของ กฟภ. สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9 ที่จ่ายออกจากสถานีอ้อม ใหญ่ 1 กฟภ.3 จ. นครปฐม กฟภ. ที่ได้จากการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs จากระบบ GIS [2]....	100
รูปที่ 5.21 การวิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดสูงสุด.....	101
รูปที่ 5.22 วิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดต่ำสุด.....	101
รูปที่ 5.23 สร้าง External Grid ขนาด 115 kV เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เชื่อมต่อกับ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ 5 สายป้อน.....	102
รูปที่ 5.24 นำข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรสามเฟส (3-P-Fault) ค่าความต้านทาน (R1,R2 และ R0) และค่ารีแอกแตนซ์ (X1,X2 และ X0) ของสถานีอ้อมใหญ่ 1 บัส 115/22-TP1	103

รูปที่ 5.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนลงใน External Grid	104
รูปที่ 5.26 การป้อนค่ากำลังไฟฟ้าจริง, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กรณีการใช้โหลดสูงสุด ในสาย ป้อนที่ 3	104
รูปที่ 5.27 ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow test)	105
รูปที่ 5.28 ดึงภาพเข้า (Zoom in) แสดงการเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ แบบจำลองระบบไฟฟ้า ในพื้นที่ตัวอย่าง	106
รูปที่ 5.29 ดึงภาพออก (Zoom out) แสดงการเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ แบบจำลองระบบ ไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง	106
รูปที่ 5.30 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับ 4 สถานการณ์ โดยมีสายป้อนที่ 1 (สี แดง), สายป้อนที่ 2 (สีทอง), สายป้อนที่ 3 (สีน้ำเงิน) และสายป้อนที่ 4 (สีฟ้าอ่อน).....	107
รูปที่ 5.31 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 1	112
รูปที่ 5.32 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A.....	113
รูปที่ 5.33 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ ตัวอย่างสายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 1 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA.....	116
รูปที่ 5.34 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.33 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1.....	116
รูปที่ 5.35 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 2	117
รูปที่ 5.36 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A.....	118
รูปที่ 5.37 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ ตัวอย่างสายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 2 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA.....	121
รูปที่ 5.38 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.37 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2.....	121
รูปที่ 5.39 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 3	122
รูปที่ 5.40 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A.....	123

รูปที่ 5.41 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 3 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA.....	126
รูปที่ 5.42 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.41 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3.....	126
รูปที่ 5.43 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 4.1	127
รูปที่ 5.44 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A	128
รูปที่ 5.45 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สถานการณ์ที่ 4.1 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA... ..	131
รูปที่ 5.46 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 4.2	132
รูปที่ 5.47 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A.....	133
รูปที่ 5.48 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 4.2 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,250 kVA.....	136
รูปที่ 5.49 กราฟขนาดกระแสลัดวงจรฯ ที่ส่งผลกระทบต่อความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะ	138
รูปที่ 5.50 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สำหรับเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการทดสอบของสถานการณ์ที่ 1, 4.1 และ 4.2.....	143
รูปที่ ก.1 Synchronous generator short circuit contribution	154
รูปที่ ก.2 Asynchronous generator short circuit contribution.....	154
รูปที่ ก.3 PV Inverter : Generic Model	155
รูปที่ ก.4 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 1.....	159
รูปที่ ก.5 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A	160
รูปที่ ก.6 กระแสลัดวงจรฯ ณ บัสที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ.....	161
รูปที่ ก.7 กระแสลัดวงจรฯ ณ บัสที่อยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบฯ	162
รูปที่ ก.8 นำพีวีอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับแบบจำลองระบบไฟฟ้าสถานการณ์ที่ 1 ที่จุด PCC.....	163
รูปที่ ก.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็น	164

รูปที่ ก.10 การกำหนดค่า I_k'' 164

รูปที่ ก.11 แบบจำลองแสดงผลการทดสอบฯ สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA แรงดันพิกัด 22 kV..... 165



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยที่มา และความสำคัญของปัญหาผลกระทบต่อด้านแรงดันตกชั่วขณะ ต่อ “ระบบจำหน่าย” ซึ่งต่อไปในวิทยานิพนธ์เรียกว่า “ระบบไฟฟ้ากำลัง” วัตถุประสงค์ ขอบเขตที่จะศึกษา ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

ในการปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย เช่น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) มีหน้าที่ และความรับผิดชอบหลักอยู่ 2 ประเด็นที่สำคัญ คือ ทำให้ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ที่ตนเองรับผิดชอบมีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) และมีคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยการควบคุมแรงดัน ความถี่ การใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อให้ผู้เชื่อมต่อ และผู้ใช้ไฟฟ้าทุกรายที่ต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้ามีแรงดัน ความถี่ และคุณภาพกำลังไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ดังกล่าว ปราศจากสิ่งรบกวนทางไฟฟ้า

สิ่งรบกวนที่ส่งผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ามีหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เกิดในระบบไฟฟ้าอยู่แล้ว ดังนั้น การผลิต การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะต้องควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้มีระดับแรงดัน และรูปคลื่นทางไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน ซึ่งต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบของการไฟฟ้า และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ในความเป็นจริงการไฟฟ้าจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่หลายประเภท และอุปกรณ์ที่ใช้งานก็มีอยู่หลากหลายเช่นกัน ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการรบกวนทางไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ทั่วไป โดยอาจเกิดจากต้นทางคือแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือเกิดจากปลายทางโหลด เนื่องจากอุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิดจะรบกวนกันเอง ซึ่งการรบกวนนี้จะสามารถแพร่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงของการไฟฟ้าในฐานะผู้ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือจะมีวิธีการอย่างไรที่จะไม่ทำให้ระบบเกิดปัญหาเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้า และควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อให้เครื่องใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างปกติ และมีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจากหลายสาเหตุ ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสิ่งที่การไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ต้องการให้เกิดขึ้น โดยเฉพาะสาเหตุจากการเกิดสภาวะความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาด้านแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) เป็นปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ส่งผลกระทบเป็นวงกว้างได้

ตามที่มีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีความยินยอมและอนุญาตให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นสถาบัน/ห้องปฏิบัติการภายในประเทศที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้การยอมรับ และใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง ระดับแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบฯ ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] นั้น ปัจจุบันได้ดำเนินการทดสอบอยู่ที่บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ผ่านสายป้อนที่ 3 สถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคกลาง) จ. นครปฐม ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้

เนื่องจากปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ให้ความสำคัญ และสนับสนุนให้มีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่ายชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร แทนการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่ายชนิดธรรมดา เพื่อเป็นการยกระดับมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมถึงราคาที่ไม่แตกต่างกันมาก และสำหรับในอนาคต การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีแนวโน้มจะทำการสุ่มทดสอบฯ ในกระบวนการตรวจรับ (Acceptance test) มากขึ้น เพื่อให้ได้มาซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณภาพ และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด แต่นั่นก็คือผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จะมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) ต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ในพื้นที่ตัวอย่าง ซึ่งเป็นสถานที่ตั้งของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการที่ทำการทดสอบฯ ณ ปัจจุบัน โดยพิจารณาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้คือ ขนาดกระแสลัดวงจรที่ทำการทดสอบฯ ที่เป็นผลมาจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA) และ %Z ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ ขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฯ (kV) ปริมาณการใช้โหลด (kW) ในสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในขณะทดสอบฯ และขนาดอิมพีแดนซ์ (Ω) ของสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ โดยนำข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และปัจจัยข้างต้นมาสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และต่อผู้ใช้ไฟฟารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาบัน/ห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ที่เกิดขึ้นในแต่ละปัจจัย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 2) เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกับสถาน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ
- 3) เพื่อเสนอแนะวิธีการหลีกเลี่ยงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับสถาน/ห้องปฏิบัติการที่จะทำการทดสอบฯ ทั้งที่มีอยู่เดิมแล้ว และอาจเกิดขึ้นใหม่ในอนาคต

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณา “ระบบจำหน่าย” ซึ่งต่อไปนีในวิทยานิพนธ์เรียกว่า “ระบบไฟฟ้ากำลัง” ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระดับแรงดัน 22 kV ที่เชื่อมต่อกับบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง (สถาน/ห้องปฏิบัติการที่ทำการทดสอบฯ) บนสายป้อน (Feeder) ที่สนใจ คือ สายป้อนที่ 3 จากสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 (จ่ายกำลังไฟฟ้าสายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคกลาง) จ. นครปฐม
- 2) ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังจาก GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ตัวอย่าง คือ สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9 สถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคกลาง) จ. นครปฐม [2]
- 3) ใช้ข้อมูลปริมาณการใช้โหลดรายวัน (Daily load profile) ช่วงวันจันทร์ที่ 27 มี.ค. 2560 ถึง วันอาทิตย์ที่ 31 มี.ค. 2560 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดสูงสุด และปริมาณการใช้โหลดต่ำสุด บนสายป้อนที่เราสนใจ คือ สายป้อนที่ 3 [3]
- 4) ใช้ข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 Bus 115 kV [3]
- 5) พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ที่ใช้ในการทดสอบฯตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA), ตั้งค่าแท็บที่ตำแหน่งแท็บที่ 3 และทดสอบฯ เฉพาะเวคเตอร์กรุป Dyn11 เท่านั้น
- 6) การทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] โดยใช้วิธีการทดสอบเท่านั้น และยังไม่พิจารณาวิธีการใดๆ ที่สามารถช่วยลดผลกระทบต่อ Supplied voltage ที่อยู่นอกเหนือมาตรฐานดังกล่าว

- 7) พิจารณาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้
- 7.1) ขนาดกระแสลัดวงจรที่ทำการทดสอบฯ ที่เป็นผลมาจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA) และ %Z ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ
 - 7.2) ขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฯ (kV)
 - 7.3) ปริมาณการใช้โหลด (kW) ในสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในขณะทดสอบฯ
 - 7.4) ขนาดอิมพีแดนซ์ (Ω) ของสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาเกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5]
- 2) ศึกษารายละเอียดข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1]
- 3) ศึกษามาตรฐานการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4]
- 4) ศึกษารายงานผลการทดสอบฯ (Test report) ที่ออกให้โดยสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในแต่ละรูปแบบการทดสอบฯ
- 5) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และการคำนวณกระแสลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC 60909
- 6) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแรงดันตกชั่วขณะ และการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะ
- 7) ขอข้อมูลเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory ดังนี้ คือ
 - 8.1) ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังจากระบบ GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ตัวอย่าง คือ สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9 สถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคกลาง) จ. นครปฐม [2]
 - 8.2) ข้อมูลปริมาณการใช้โหลดรายวัน (Daily load profile) ช่วงวันจันทร์ที่ 27 มี.ค. 2560 ถึง วันอาทิตย์ที่ 31 มี.ค. 2560 เพื่อวิเคราะห์หาช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด และช่วงเวลาการใช้โหลดต่ำสุด บนสายป้อนที่เราสนใจ คือ สายป้อนที่ 3 [3]
 - 8.3) ข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 Bus 115 kV [3]

- 8) สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory
- 9) คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรและกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร สำหรับการทดสอบฯ ตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] (หัวข้อที่ 4.1.2, 4.2.3 และ 4.2.4) และเปรียบเทียบกับกระแสลัดวงจรทั้งสองแบบที่ได้จากการทดสอบฯ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ผนวกกับการพิจารณาถึง 4 ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เป็น 4 สถานการณ์
- 10) ผลการทดสอบฯ
 - 10.1) ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1
 - 10.2) ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2
 - 10.3) ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3
 - 10.4) ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4
- 11) วิเคราะห์ผล
- 12) สรุปผลและให้ข้อเสนอแนะ
- 13) สร้างรูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบฯ โดยนำปัจจัยที่ถูกพิสูจน์แล้วว่า มีผลกระทบต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง (ระบบจำหน่าย) มาร่วมพิจารณา
- 14) ศึกษาฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter) เพื่อนำมาช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ที่ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการทดสอบฯ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด
- 15) นำกรณีพบว่าไม่สามารถทดสอบฯ ในบางพิกัดที่ต้องการได้ เนื่องจากเหตุผลด้านกระแสลัดวงจรฯ และ/หรือ ผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ มาเชื่อมต่อเข้ากับพีวีอินเวอร์เตอร์สามเฟสในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ตามสถานการณ์ที่ 1 และใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ
- 16) เรียบเรียงผลการวิจัย และจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) ทำให้ทราบระดับความรุนแรงของผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานับ/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ
- 2) ทำให้ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานับ/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ
- 3) ข้อเสนอแนะวิธีการหลีกเลี่ยงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับสถานับ/ห้องปฏิบัติการที่จะทำการทดสอบฯ ทั้งที่มีอยู่เดิมแล้ว และอาจเกิดขึ้นใหม่ในอนาคต
- 4) ได้รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากการทดสอบฯ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือหาผลกระทบดังกล่าว สำหรับกรณีที่น่าจะมีสถานับ/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ เกิดขึ้นมาใหม่
- 5) ได้วิธีการช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อที่ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

บทที่ 2

รูปแบบการทดสอบฯ ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน จากรายละเอียดข้อกำหนดทางเทคนิค ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] หม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวต้องผ่านการทดสอบความสามารถทนต่อการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ซึ่งต้องควบคุมหรือตรวจสอบการทดสอบฯ โดยสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมีรูปแบบการทดสอบฯ 3 รูปแบบ ดังนี้คือ 1) ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ 2) ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ และ 3) ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ


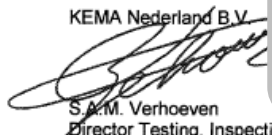
บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร จะต้องส่งหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวที่เป็นตัวต้นแบบจำนวน 1 ตัว เพื่อแทนขนาดพิกัดใดพิกัดหนึ่ง เพื่อทำการทดสอบความสามารถทนต่อการลัดวงจร (Special test) ซึ่งมีรูปแบบการทดสอบฯ 3 รูปแบบ ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น และเมื่อผ่านการทดสอบฯ บริษัทผู้ผลิตจะได้รับหนังสือรับรองผลการทดสอบ หรือรายงานผลการทดสอบที่ออกให้โดยสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระที่ทำการทดสอบให้ เพื่อเป็นการรับรองคุณภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว โดยในหนังสือรับรองผลการทดสอบ หรือรายงานผลการทดสอบจะแสดงรายละเอียด เช่น แผ่นประกาศนียบัตรแสดงภาพรวมของอุปกรณ์ที่ทดสอบฯ (ชื่ออุปกรณ์ รุ่น/พิกัด ชื่อสถาบัน/ห้องปฏิบัติการที่ทดสอบฯ วันที่ทดสอบฯ ชื่อมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ และลายมือชื่อพร้อมวันที่ลงนาม) ภาพแสดงวงจรทดสอบฯ กระบวนการทดสอบฯ ที่ทุกสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระต้องดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] และผลลัพธ์จากการทดสอบฯ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอแสดงตัวอย่างรูปแบบการทดสอบฯ ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันทั้ง 3 รูปแบบ ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดที่สำคัญในหนังสือรับรองผลการทดสอบ หรือรายงานผลการทดสอบ โดยเลือกหนังสือรับรองผลการทดสอบ หรือรายงานผลการทดสอบมาแสดงจำนวน 3 รูปแบบ สำหรับบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 160 kVA ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร และในปัจจุบันได้รับการจดทะเบียนเป็น vender list ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแล้วจำนวน 3 บริษัท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

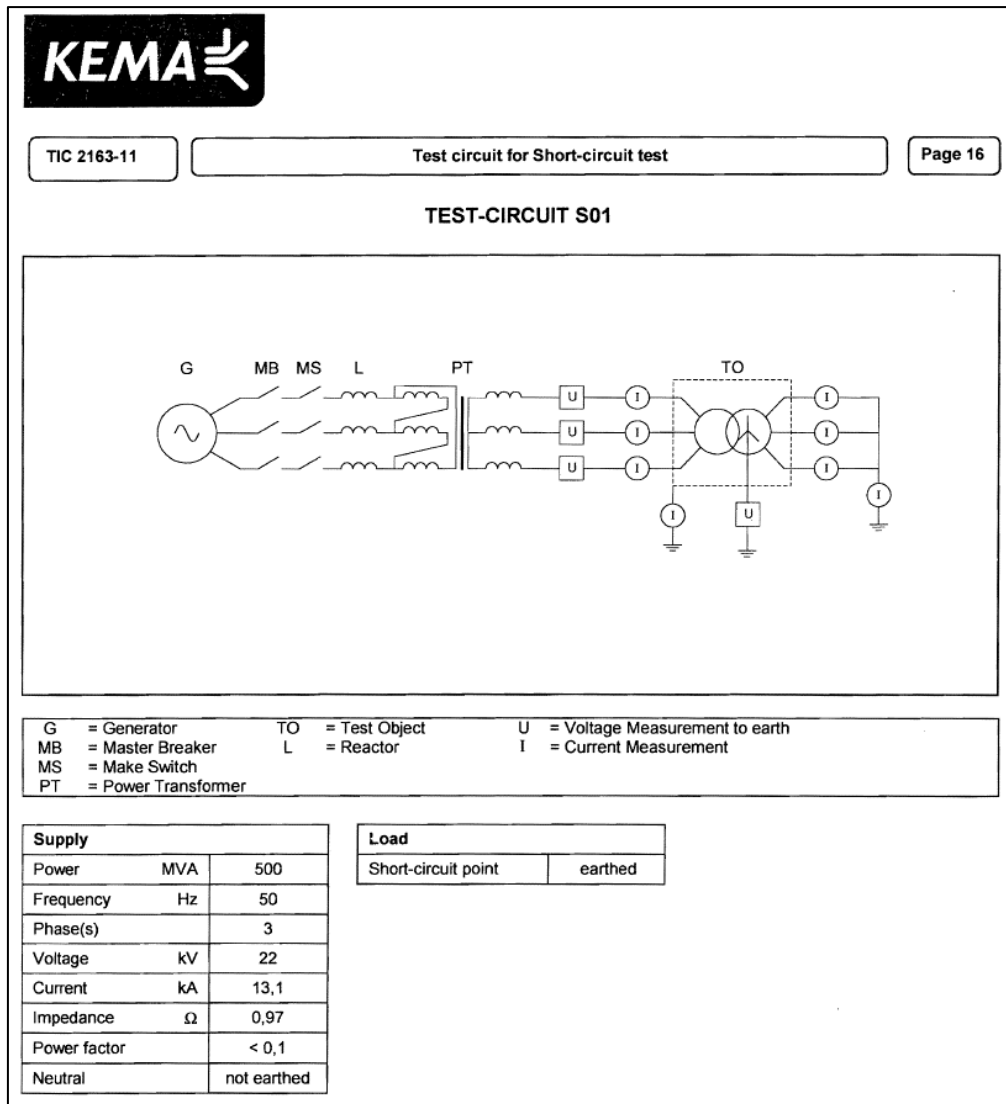
2.1 การทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ

สถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ ได้แก่ KEMA Laboratories (Holland) ซึ่งใช้ขนาดพิกัดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] Table 2 – Short-circuit apparent power of the system โดยมีรายละเอียดการทดสอบฯ ดังตัวอย่างหนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรถดสอบฯ ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.2 และสรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.3



		TIC 2163-11	
TYPE TEST CERTIFICATE OF SHORT-CIRCUIT PERFORMANCE			
APPARATUS	A three-phase oil-immersed type distribution transformer		
DESIGNATION	160 kVA Transformer	SERIAL No.	54107551EE
	Rated power	160 kVA	
	Rated voltage	22 kV \pm 2 x 2,5% / 0,400 kV	
	Connection symbol	Dyn11	
	Rated frequency	50 Hz	
MANUFACTURER			
TESTED FOR			
TESTED BY	KEMA HIGH-POWER LABORATORY and HIGH-VOLTAGE LABORATORY Utrechtseweg 310 - 6812 AR Arnhem - The Netherlands		
DATE(S) OF TESTS	12, 13, 14 and 18 October 2011		
<p>The apparatus, constructed in accordance with the description, drawings and photographs incorporated in this Certificate, has been subjected to the series of proving tests in accordance with</p> <p style="text-align: center;">IEC 60076-5 (2006)</p> <p>This Type Test Certificate has been issued by KEMA following exclusively the STL Guides.</p> <p>The results are shown in the record of Proving Tests and the oscillograms attached hereto. The values obtained and the general performance are considered to comply with the above Standard with respect to the dynamic ability to withstand short-circuits.</p> <p>This Certificate applies only to the apparatus tested. The responsibility for conformity of any apparatus having the same designations with that tested rests with the Manufacturer.</p> <p>This Certificate consists of 43 sheets in total.</p> <p>This Certificate falls under the scope of the accreditation certificates L 020 and L 218 of the Dutch Council for Accreditation. See information sheet (page 2).</p> <p><small>© Copyright: Only integral reproduction of this Certificate is permitted without written permission from KEMA. Electronic copies in e.g. PDF-format or scanned version of this Certificate may be available and have the status "for information only". The sealed and bound version of the Certificate is the only valid version.</small></p> <p style="text-align: right;">KEMA Nederland B.V.  S.A.M. Verhoeven Director Testing, Inspections & Certification The Netherlands</p> <p style="text-align: right;">Arnhem, 6 March 2012</p>			

รูปที่ 2.1 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVA ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6]




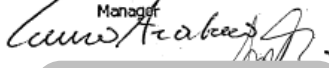
KEMA		SUMMARY: Short-circuit tests						Page 8
TIC-2163-11								
Test no.		111013 6005	111013 6006	111013 6007	111013 6009	111013 6010	111013 6011	
Tap position		1	1	1	3	3	3	
	A	kV	12,3	12,5	12,5	12,1	12,3	
Voltage, phase value, beginning	B	kV	12,2	12,5	12,5	12,1	12,2	
	C	kV	12,3	12,5	12,5	12,1	12,2	
	A	kV	12,2	12,5	12,5	12,1	12,2	
Voltage, phase value, end	B	kV	12,2	12,5	12,5	12,1	12,2	
	C	kV	12,2	12,5	12,4	12,1	12,2	
	A	A	182	186	185	154	157	
Current HV-winding, peak value	B	A	-181	-183	-183	-195	-197	
	C	A	-140	-144	-144	196	197	
	A	A	92,1	93,9	93,8	102	103	
Current HV-winding, phase value, beginning	B	A	92,3	94,0	93,9	102	103	
	C	A	92,3	94,2	94,0	102	103	
	A	A	92,2	94,0	93,8	102	103	
Current HV-winding, phase value, end	B	A	92,0	93,7	93,6	102	103	
	C	A	92,3	94,0	93,8	102	103	
	A	A	91,2	92,9	92,8	102	103	
Current HV-winding, phase value, average	B	A	92,6	94,3	94,2	101	102	
	C	A	92,1	93,9	93,7	103	104	
	A	kA	11,0	11,2	11,1	9,69	9,84	
Current LV-winding, peak value	B	kA	-8,84	-8,91	-8,88	-11,2	-11,3	
	C	kA	-9,41	-9,63	-9,60	9,30	9,27	
	A	kA	5,33	5,43	5,42	5,62	5,67	
Current LV-winding, phase value, beginning	B	kA	5,32	5,42	5,41	5,61	5,66	
	C	kA	5,32	5,43	5,42	5,63	5,68	
	A	kA	5,32	5,42	5,40	5,61	5,66	
Current LV-winding, phase value, end	B	kA	5,31	5,41	5,40	5,60	5,65	
	C	kA	5,33	5,42	5,42	5,62	5,67	
	A	kA	5,35	5,45	5,44	5,58	5,63	
Current LV-winding, phase value, average	B	kA	5,32	5,43	5,42	5,63	5,69	
	C	kA	5,29	5,39	5,38	5,64	5,69	
Current duration		s	0,514	0,515	0,515	0,529	0,529	
REMARKS								
111013-6005		No visible disturbance.						
111013-6006		No visible disturbance.						
111013-6007		No visible disturbance.						
111013-6009		No visible disturbance.						
111013-6010		No visible disturbance.						
111013-6011		No visible disturbance.						

รูปที่ 2.3 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [6]

2.2 การทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ

สถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบ ได้แก่ CESI : Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (ITALY) ณ ตำบล Lambrate เมืองมิลาน ประเทศอิตาลี โดยมีรายละเอียดการทดสอบฯ ดังตัวอย่างหนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.4 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.5 คุณลักษณะของแหล่งกำเนิดไฟฟ้างดังรูปที่ 2.6 และสรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.7

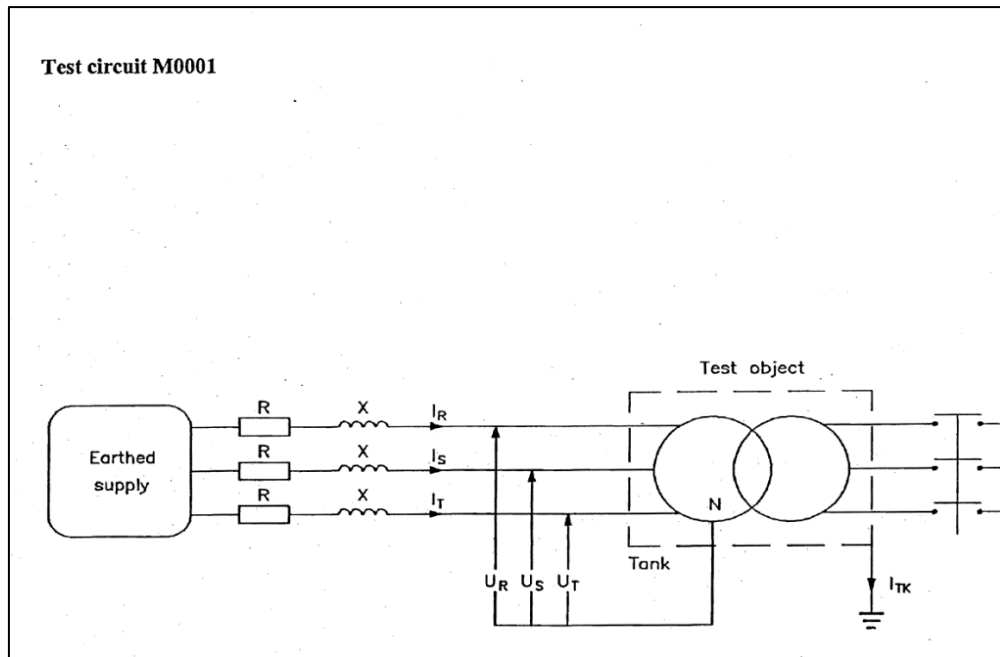


CESI		  	
TEST REPORT		APPROVED B2039042	
Client			
Address of the client			
Manufacturer			
Tested samples/items	Three-phase oil-immersed power transformer, for continuous duty, with external cooling by air natural convection (ONAN): 160 kVA – 22 kV / 0,4 kV		
Tests carried out	Verification of dynamic and thermal ability to withstand short-circuit		
Standards/Specifications	IEC 60076-5 (2-2006)		
Tests date	from December 17, 2012 to December 17, 2012		
The results reported in this document relate only to the tested samples/items. Partial reproduction of this document is permitted only with the written permission from CESI.			
No. of pages	12	No. of pages annexed	10
Issue date	January 14, 2013		
Prepared	PMV - Levati Mario <small>B2039042 2061 ALI</small>		
Verified	PSV - Garolfi Dario, PMV - Magistris Paolo <small>B2039042 215054 VSR B2039042 215040 VSR</small>		
Approved	PMI - Arcidiaco Lorenzo <small>B2039042 021814 APV</small>		
CESI S.p.A. Via Rubattino 54 I-20134 Milano - Italy Tel: +39 02 21251 Fax: +39 02 21255440 e-mail: info@cesi.it www.cesi.it		CESI S.p.A. Testing & Certification Division Testing Operations Area "Milan Platform" Manager 	
Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 0079358015 P.I. IT00793580150 N. R.E.A. 429222			
© Copyright 2012 by CESI. All rights reserved			

PAD B2039042 (1757724) - CONFIDENTIAL USE

Mod. RPPO v. 8

รูปที่ 2.4 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVA ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7]



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7]

Laboratory information

Date: December 17, 2012

Characteristics of supply circuit

Tests		Supply	OTE MV		OTE LV	
from	to		K	position	K	position
1	10	23 kV Lambrate	-	-	61,7	6

รูปที่ 2.6 คุณลักษณะของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7]


Test Report		CESI		Approved		B2039		Pag	
Short-circuit tests with three-phase current									
Test circuit:		M0001							
Test frequency:		50 Hz							
Reference number of the oscillograms:		B2039042							
Conditions of the transformer before the tests:		as after the routine tests							
Transformer prearranged on the voltage ratio:		22 kV / 0,4 kV							
Date: December 17, 2012									
Test	Oscillogram	Tap-changer position	No-load supply voltage	peak value	Test current		Duration		
No.	No./sheets	-	V	A	r.m.s. value	average value	s		
1	2/1	3	250,9	7259	3138 3155 3146	3147	0,08		
2	3/1	3	256,7	12840	6517 6709 6413	6565	0,5		
3	4/1	3	251,5	12840	6476 6840 6413	6576	0,5		
4	5/1	3	251,2	12790	6345 6635 6306	6429	0,5		
5	6/1	1	250,8	12730	6269 6388 6595	6417	0,5		
6	7/1	1	249,9	12820	6265 6257 6624	6382	0,5		
7	8/1	1	250,5	12930	6338 6474 6837	6550	0,5		
8	9/1	5	250,9	12220	6409 6089 6353	6284	0,5		
9	10/1	5	250,3	12290	6455 6084 6349	6296	0,5		
10	11/1	5	250,5	12260	6340 6082 6155	6193	0,5		
Conditions of the transformer after the tests: see notes									
- Externally did not show any damage.									

รูปที่ 2.7 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power systems) ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบเอง เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [7]

2.3 การทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระภายในประเทศที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้การยอมรับ และยินยอมให้ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) ระดับแรงดัน 22 kV เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบฯ ปัจจุบันมีผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผ่านการทดสอบฯ โดยการควบคุมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้รับการจดทะเบียนเป็น vender list กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแล้ว โดยมีรายละเอียดการทดสอบฯ ดังตัวอย่างหนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.8 ตัวอย่างวงจรถดสอบฯ ที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.9 และสรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ดังรูปที่ 2.10




130

No. T2160023-1

INSPECTION REPORT

Object : 3Phase 50Hz 22000V – 400/230V 160kVA
Distribution Transformer type, Delta core, Oil-immersed
Hermetical sealed, Serial no. 5950624

Manufacturer :

Client :

Address :

Test place : High Power Laboratory, Thai Maxwell Electric Co., Ltd.

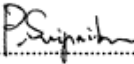
Test date : June 7-10, 2016

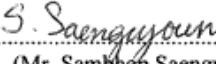
Issue date : July 15, 2016


No. of pages : 69

Test item(s) : Ability to withstand short circuit

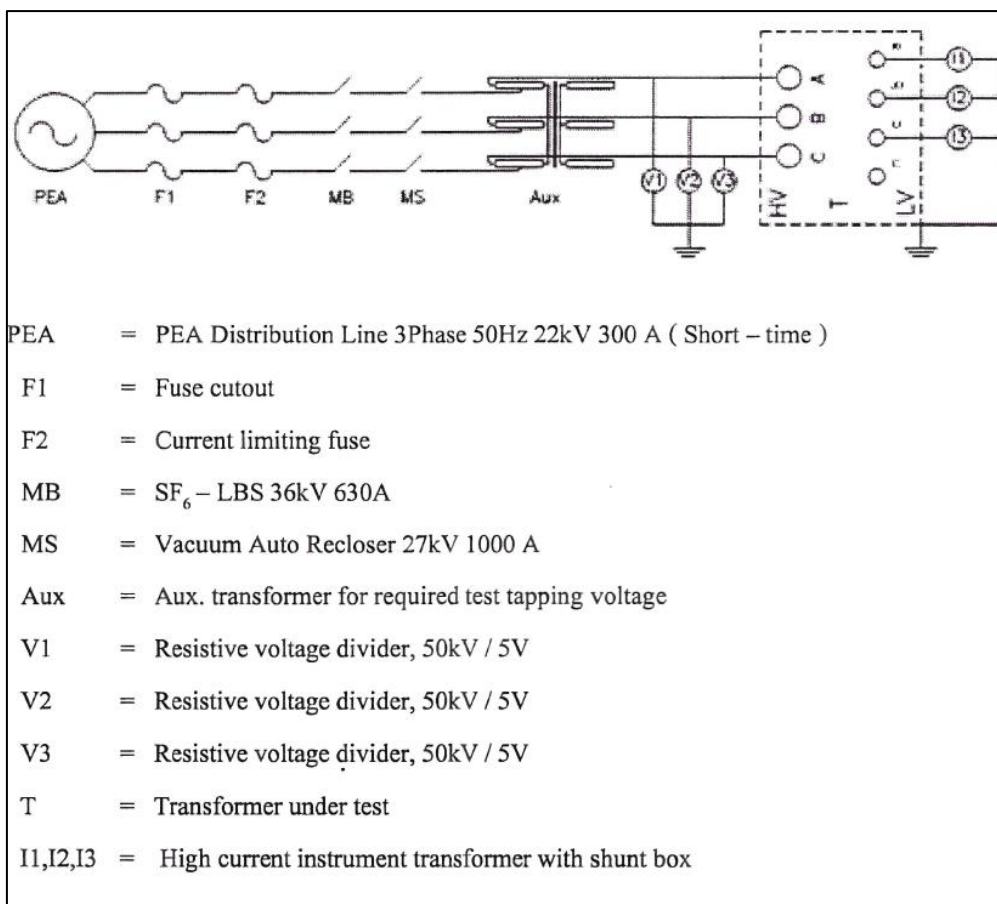
Reference standard : IEC 60076-5 (2006) Power transformer Part 5 :
Ability to withstand short circuit

Witnessed by : 
(Mr. Praves Sripaiboon)
Head, High Voltage Equipment Testing Section




Approved by : 
(Mr. Sambhop Saengumyoun)
Chief, High Voltage Testing Department



รูปที่ 2.8 หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 22 kV/400 V-160 kVA
ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
(PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างวงจรทดสอบฯ ที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8]

SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST										
Test date : 09 / 06 / 2016										
Amb. Condition : Pressure 757.6 mmHg , Relative Humidity 68.3 % Temperature 29.0 °C										
Terminals connection :										
Applied primary voltage (three phase)					A - B - C					
Pre-set short - circuit on secondary winding with current measurement					a - b - c to ground					
Grounded with current measurement					Tank					
Test record :										
Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tap position	1	1	1	3	3	3	5	5	5	
Primary voltage to ground (kV)	A	13.419	13.467	13.504	13.078	13.126	13.100	12.086	12.170	12.150
	B	13.334	13.399	13.370	12.985	13.025	13.003	11.979	12.068	12.048
	C	13.530	13.627	13.605	13.269	13.298	13.265	12.209	12.288	12.301
Secondary winding current $I_{asym} (kA_p)$	a	-11.70	+11.40	-11.80	-9.40	+9.60	-9.80	+10.30	-10.60	+10.20
	b	+10.00	-10.70	+9.40	+11.60	-11.70	+11.80	+9.50	-9.00	+10.30
	c	+9.90	-8.80	+10.10	-9.40	+10.30	-9.60	-11.10	+11.40	-11.10
Secondary winding current $I_{sym} (kA_{rms})$	a	5.586	5.762	5.550	5.939	5.833	5.762	5.975	5.762	5.975
	b	5.798	5.762	5.762	5.904	5.939	5.762	5.798	5.939	5.939
	c	5.727	5.692	5.692	5.868	5.833	5.798	5.939	6.187	5.939
Current duration (second)	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	
Tank current : normal conditions	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
See oscillogram on page	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Tested by	 (Mr. Prasit Chusurwan)									
Witnessed by	 (Mr. Praves Sriphobon)  Head, High Voltage Equipment Testing Section Electricity Generating Authority of Thailand									
The result in this Test Report relates only to the item tested and does not certify the quality of any products having same brand or trade mark sold in the market. This Test Report shall not be used for advertisement and shall not be reproduced except in full, without the written approval of EGAT's High Voltage Testing Department.										

รูปที่ 2.10 สรุปผลลัพธ์จากการทดสอบฯ ของบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง
 ที่ทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems)
 เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ [8]

หมายเหตุ

จากรายละเอียดข้อกำหนดทางเทคนิคตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] การทดสอบโดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ (รูปแบบที่ 3) ผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า หรือสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ จะต้องยื่นเอกสารทางเทคนิคของการทดสอบฯ โดยเอกสารเหล่านั้นจะต้องส่งให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิจารณา และอนุมัติก่อนที่จะทำการทดสอบฯ ได้ ซึ่งเอกสารทางเทคนิคที่ต้องส่งให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอนุมัติมีดังนี้คือ

- (1) กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย
- (2) ไดอะแกรมวงจรการทดสอบฯ
- (3) อุปกรณ์ทดสอบฯ และอุปกรณ์ป้องกัน
- (4) วันที่ทำการทดสอบฯ
- (5) ผลการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตัวอย่างแสดงเอกสารทางเทคนิคของการทดสอบฯ

- (1) กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย

<p>Test procedure for Short – circuit performance test</p> <p>1. Routine tests before short – circuit performance test</p> <p>1.1. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement</p> <p>Test method : Tested according to clause 10.3 of IEC 60076-1. The voltage ratio shall be measured on each tapping.</p> <p>1.2. Insulation resistance tests</p> <p>Test method : Tested according to clause 10.11 of IEEE C57.12.90. Insulation resistance tests are made to determine the insulation resistance from individual winding to ground or between individual windings.</p> <p>1.3. Measurement of winding resistance</p> <p>Test method : Tested according to clause 10.2 of IEC 60076-1. The resistance of each winding, the terminals between which it is measured and the temperature of the windings shall be recorded.</p> <p>1.4. Separate source AC withstand voltage test (applied potential test)</p> <p>Test method : Tested according to clause 11 of IEC 60076-3. The full test voltage shall be applied for 60 seconds between all terminals of the winding under test connected together and all terminals of the remaining windings, core, frame and tank or casing of the transformer, connected together for earth.</p> <p>1.5. Short-duration induced AC withstand voltage test (ACSD) for transformers with uniformly insulated high – voltage winding.</p> <p>Test method : Tested according to clause 12.2 of IEC 60076-3. The test voltage across an untapped winding of the transformer shall be as close as possible to twice the rated voltage. The duration of the test shall be 20 seconds and the frequency 350 Hz. It shall be applied between the terminals of secondary winding by maintaining the primary winding open.</p> <p>1.6. Measurement of no – load loss and current</p> <p>Test method : Tested according to clause 10.5 of IEC 60076-1. The test shall be measured on one of the windings at rated frequency and at a voltage corresponding to rated voltage if the test is performed on the principal tapping. The wave shape shall be as nearly as possible of the sine. The remaining winding or windings shall be left open – circuited.</p> <p>1.7. Measurement of short – circuit impedance and load loss</p> <p>Test method : Tested according to clause 10.4 of IEC 60076-1. The transformer made with all secondary windings under short – circuit. The supplied current should be equal to the relevant rated current.</p> <p>1.8. Measurement of reactance</p> <p>Test method : The transformer made with all secondary windings under short – circuit. The supplied current should be equal to the relevant test current across each two HV terminals and evaluated on a “ per – phase ” basis.</p> <p>1.9. Oil dielectric strength test</p> <p>Test method : Tested according to clause 6.4 of IEC 60296.</p>	<p>Page 1 of 7 <small>ISO 9001 CERTIFIED ISO 14001 CERTIFIED</small></p>
---	--

รูปที่ 2.11 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 1 [9]

2. Short – circuit performance test

2.1. Calculation of symmetrical and asymmetrical short – circuit current

2.2. Reduced voltage short – circuit calibration test

Test method : The transformer shall be made with all secondary windings under short – circuit and tested with suitable current transformer for measurement of symmetrical and asymmetrical short – circuit current with suitable reduced supplied voltage.

2.3. Short – circuit performance test

Test method : Tested according to clause 4.1 and 4.2 of IEC 60076-5. For transformer of category I and II three – phase transformer, the total number of tests shall be nine. Three tests in the position corresponding to the highest voltage, three tests on the principal tapping on the middle phase and three tests in the position corresponding to the lowest voltage. The duration of each test shall be 0.5 s with a tolerance of $\pm 10\%$. After each test, the reactance of all pairs of HV terminals shall be measured.

1. Preliminary adjustment for No - load voltage beginning at zero across the required HV phase and timing for short – circuit test.
2. Short – circuit test.
3. Measurement of reactance after short – circuit performance test.

3. Routine tests after short – circuit performance test

3.1. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

Test method : Tested according to clause 10.3 of IEC 60076-1. The voltage ratio shall be measured on each tapping.

3.2. Insulation resistance tests

Test method : Tested according to clause 10.11 of IEEE C57.12.90. Insulation resistance tests are made to determine the insulation resistance from individual winding to ground or between individual windings.

3.3. Measurement of winding resistance

Test method : Tested according to clause 10.2 of IEC 60076-1. The resistance of each winding, the terminals between which it is measured and the temperature of the windings shall be recorded.

3.4. Separate source AC withstand voltage test (applied potential test)

Test method : Tested according to clause 11 of IEC 60076-3. The full test voltage shall be applied for 60 seconds between all terminals of the winding under test connected together and all terminals of the remaining windings, core, frame and tank or casing of the transformer, connected together for earth.

รูปที่ 2.12 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส
สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 2 [9]

3.5. Short-duration induced AC withstand voltage test (ACSD) for transformers with uniformly insulated high – voltage winding.

Test method : Tested according to clause 12.2 of IEC 60076-3. The test voltage across an untapped winding of the transformer shall be as close as possible to twice the rated voltage. The duration of the test shall be 20 seconds and the frequency 350 Hz. It shall be applied between the terminals of secondary winding by maintaining the primary winding open.

3.6. Measurement of no – load loss and current

Test method : Tested according to clause 10.5 of IEC 60076-1. The test shall be measured on one of the windings at rated frequency and at a voltage corresponding to rated voltage if the test is performed on the principal tapping. The wave shape shall be as nearly as possible of the sine. The remaining winding or windings shall be left open – circuited.

3.7. Measurement of short – circuit impedance and load loss

Test method : Tested according to clause 10.4 of IEC 60076-1. The transformer made with all secondary windings under short – circuit. The supplied current should be equal to the relevant rated current.

3.8. Measurement of reactance

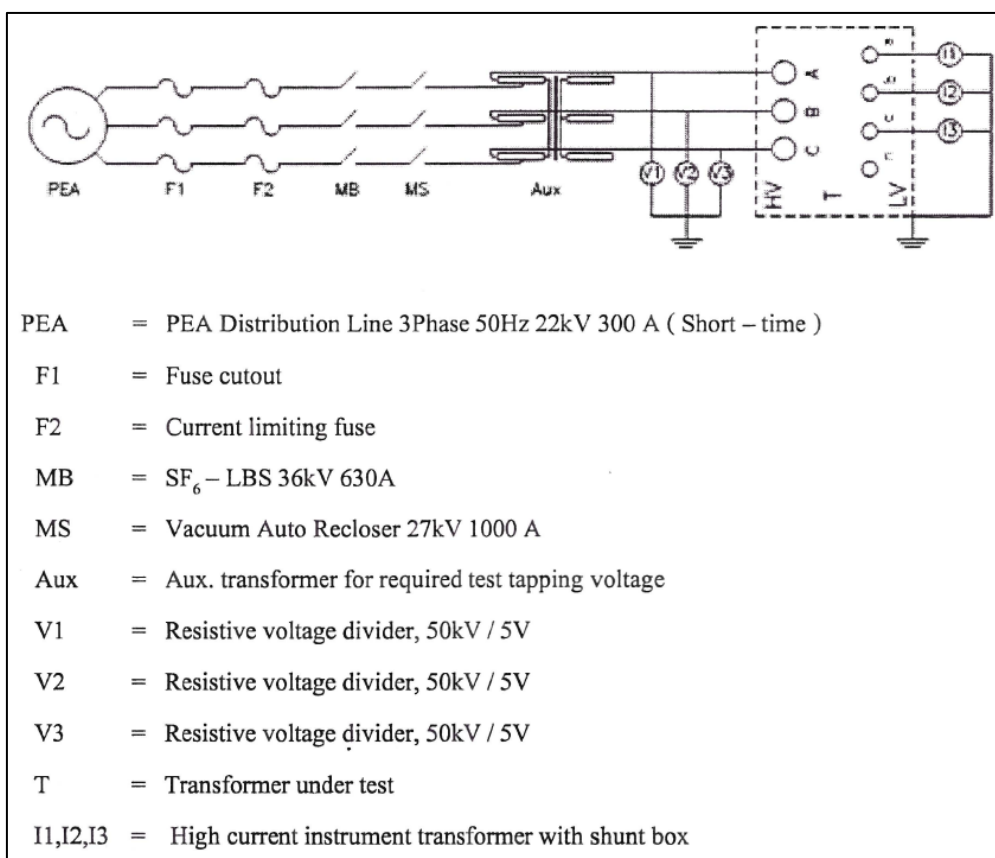
Test method : The transformer made with all secondary windings under short – circuit. The supplied current should be equal to the relevant test current across each two HV terminals and evaluated on a “ per – phase ” basis.

3.9. Oil dielectric strength test

Test method : Tested according to clause 6.4 of IEC 60296.

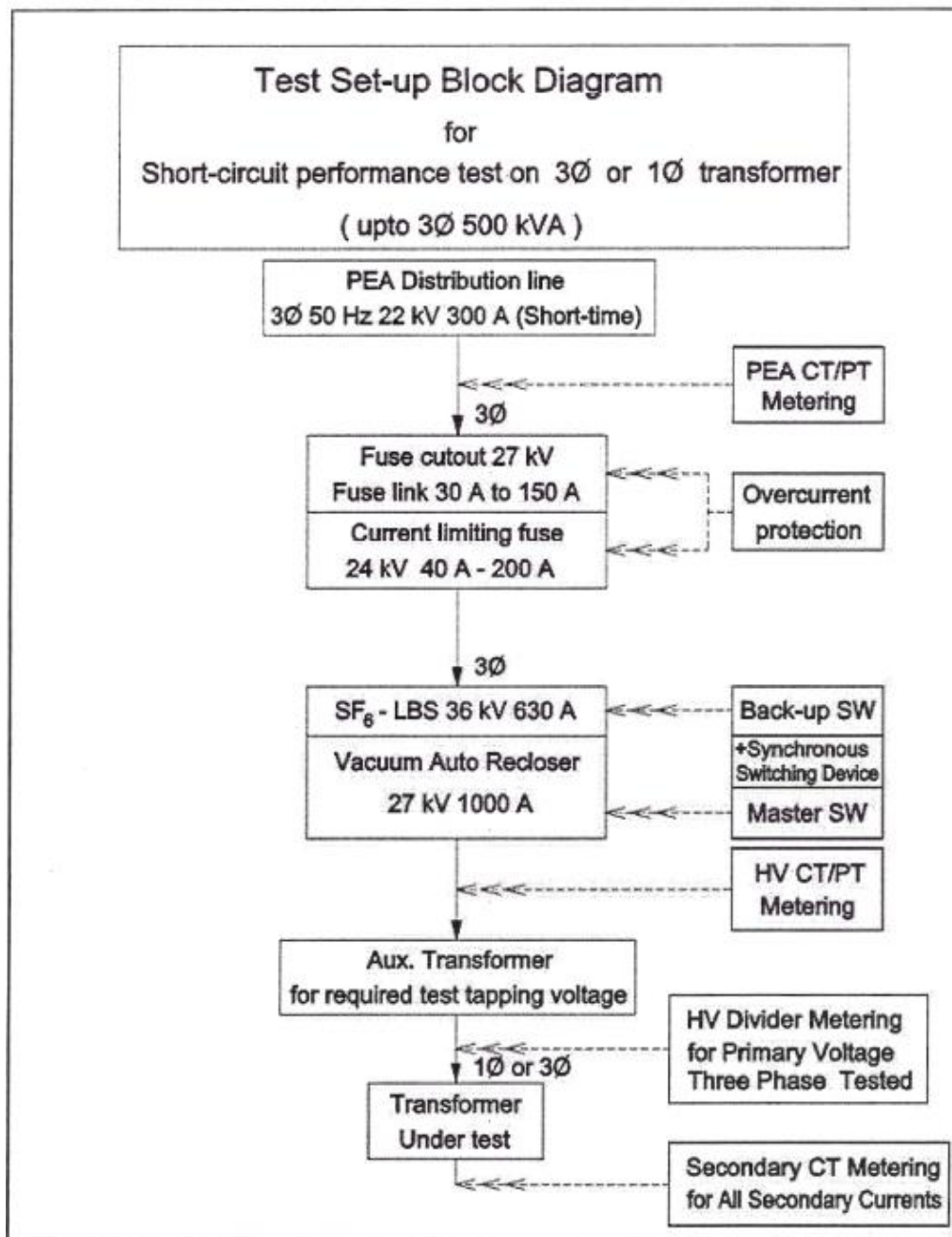
รูปที่ 2.13 กระบวนการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส
สำหรับระบบจำหน่าย แผ่นที่ 3 [9]

(2) ไดอะแกรมวงจรการทดสอบฯ



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบฯ [9]

(3) อุปกรณ์ทดสอบฯ และอุปกรณ์ป้องกัน



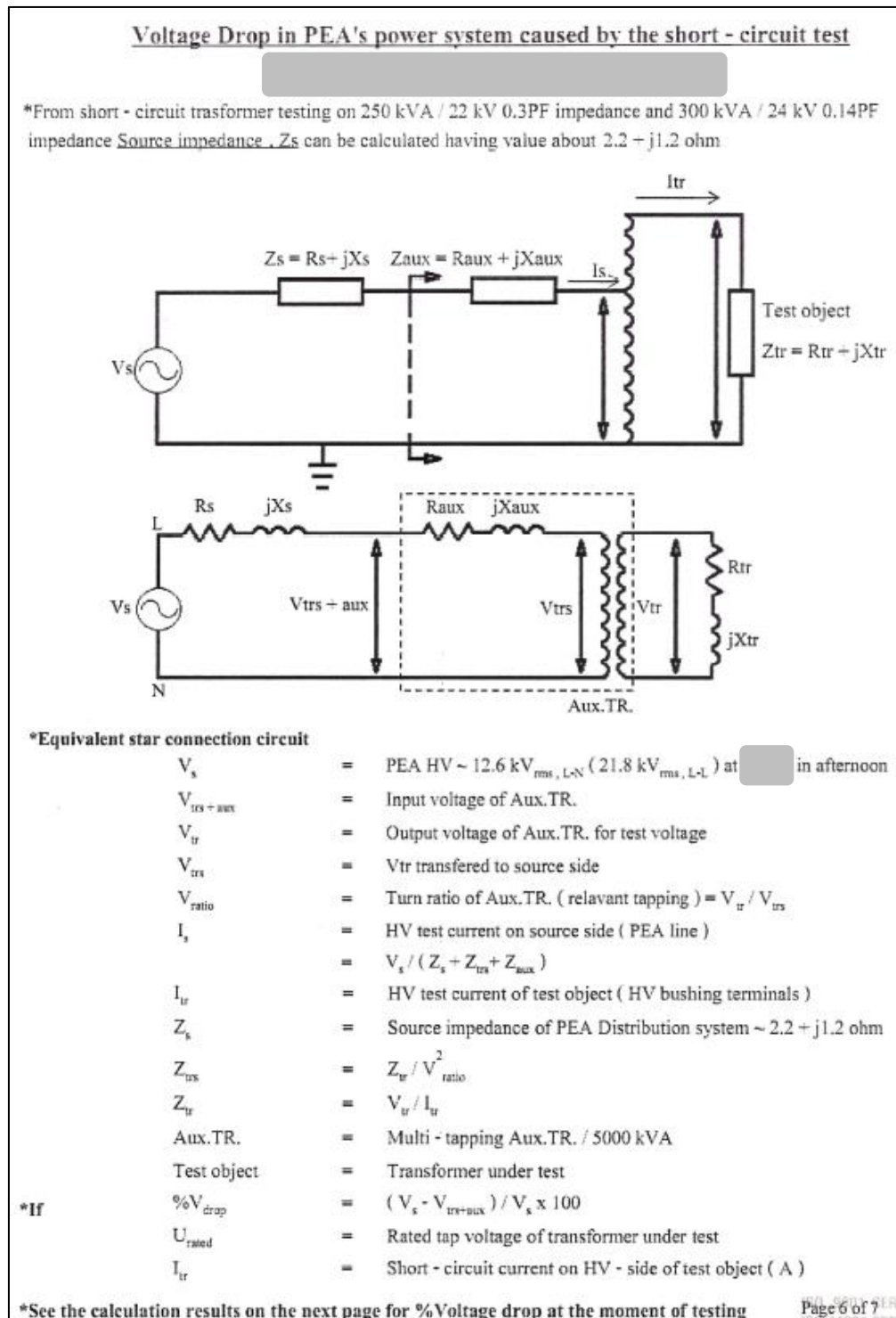
รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ทดสอบฯ และอุปกรณ์ป้องกัน [9]

(4) วันที่ทำการทดสอบฯ

ที่	220/2556	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย วันที่ ๑๕ มิ.ย. ๒๕๕๖ 2640
	9 กันยายน 2556	
เรื่อง	ขอนำส่งเอกสารเพื่อ Approval	
เรียน	ผู้อำนวยการฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	
สำเนา	ผู้อำนวยการกองมาตรฐานระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	
อ้างถึง	1) หนังสือการไฟฟ้าฯ เลขที่ มท 5303.11/13375 ลงวันที่ 1 เมษายน 2556 2) หนังสือการไฟฟ้าฯ เลขที่ มท 5310.4/22988 ลงวันที่ 11 มิถุนายน 2556 3) สเปค กฟภ. เลขที่ RTRN-035/2556	
สิ่งที่ส่งมาด้วย	Technical Information for Short-Circuit Performance Test at TME, High Power Lab. จำนวน 8 แผ่น	
	<p>ตามที่บริษัทฯ ได้ให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็น Inspector/Witness Test การทดสอบการ ถัดวงจร (Short-circuit tests) หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ให้กับบริษัทฯ และทางการไฟฟ้าส่วน ภูมิภาคได้พิจารณาขอรับความละเอียดดังอ้างถึง 1) และ 2) แล้วนั้น</p> <p>พร้อมหนังสือฉบับนี้ บริษัทฯ ขอนำส่งเอกสารตามที่ส่งมาด้วยนั้น เพื่อใช้ประกอบทดสอบในการ Inspector/Witness Test หม้อแปลงแปลงขนาด 250 kVA 22 kV และหม้อแปลงขนาด 250 kVA 33 kV เพื่อทำ การทดสอบหม้อแปลงตามสเปค กฟภ. เลขที่ RTRN-035/2556 ที่อ้างถึง 3) แล้วนั้น</p> <p>ทั้งนี้ บริษัทฯ คาดว่าจะทำการทดสอบประมาณไม่เกินวันที่ ๒๕ ตุลาคม 2556 เป็นต้นไป อนึ่ง หากทราบ กำหนดเวลาที่แน่นอน บริษัทฯ จักแจ้งให้ทราบในครั้งต่อไป</p> <p>บริษัทฯ จึงขอนำส่งเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณา และขอเรียนเชิญการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาร่วมทำ การทดสอบดังกล่าวละเอียดที่แจ้งมาด้วยแล้วนั้น</p> <p>จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และหากมีข้อขัดข้องประการใด ขอได้โปรดแจ้งให้บริษัทฯ ทราบในโอกาส แรกด้วย จักเป็นพระคุณอย่างสูง</p>	

รูปที่ 2.16 วันที่ทำการทดสอบฯ [9]

(5) ผลการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [9]

kVA	%z	Isc	Rtr	Xtr	Vtrs	%Vdrop	Vtr (L-N)	Vtr / Urated	Vratio
50	4.0	32.80	183.920	340.730	12.489	0.664	13.863	1.091	1.11
100	4.0	65.61	75.020	178.470	12.392	1.232	13.756	1.083	1.11
160	4.0	104.97	39.703	114.301	12.284	1.860	13.635	1.074	1.11
250	4.0	164.02	22.845	73.994	12.124	2.794	13.457	1.059	1.11
315	4.0	206.67	17.072	59.042	12.012	3.445	13.333	1.050	1.11
400	4.0	262.43	12.554	46.744	11.870	4.270	13.176	1.037	1.11
500	6.5	201.87	9.583	62.186	12.086	2.950	13.415	1.056	1.11

Table A – 22 kV Tap position No. 3

kVA	%z	Isc	Rtr	Xtr	Vtrs	%Vdrop	Vtr (L-N)	Vtr / Urated	Vratio
50	4.0	21.87	413.820	766.644	12.482	0.606	19.526	1.025	1.583
100	4.0	43.74	168.795	401.566	12.377	1.113	19.429	1.020	1.583
160	4.0	69.98	89.332	257.177	12.260	1.679	19.312	1.014	1.583
250	4.0	109.35	51.401	166.486	12.087	2.522	19.145	1.005	1.583
315	4.0	137.78	38.413	132.844	11.967	3.109	19.029	0.999	1.583
400	4.0	174.93	28.246	105.173	11.683	4.255	19.820	1.041	1.670
500	6.5	134.58	21.562	139.918	12.042	2.666	19.116	1.003	1.583

Table B – 33 kV Tap position No. 3

รูปที่ 2.18 ผลการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [9]



บทที่ 3

ข้อกำหนดทางเทคนิค และมาตรฐานในการทดสอบฯ

3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1]

(1) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดใช้น้ำมันเป็นฉนวน ระบายความร้อนเองโดยธรรมชาติ มีพิกัดกำลังไฟฟ้าจาก 50 kVA ถึง 2,000 kVA ถูกออกแบบและสร้างมาให้มีความคงทนต่อความเสียหายจากความร้อน และผลกระทบจากการลัดวงจรภายนอก เหมาะสำหรับการติดตั้งไว้ภายนอกอาคารและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz

(2) หม้อแปลงไฟฟ้าต้องถูกผลิต และทดสอบตามมาตรฐานฉบับแก้ไขล่าสุด ที่กำหนดดังต่อไปนี้

Thailand Industrial Standard (TIS)

- TIS 384 [10] Power Transformers

International Electrotechnical Commission (IEC)

- IEC 60076-1 [11] Power Transformers-Part 1 : General
- IEC 60076-5 [4] Power Transformers-Part 5 : Ability to withstand short circuit
- IEC 60296 [12] The Transformer oil

Deutsches Institut für Normung (DIN)

- DIN 42530 [13] Low voltage bushing

(3) พิกัดแรงดันไฟฟ้า

Rated Primary Voltage	Rated Secondary Voltage
22 kV, 33 kV	400/230 V

(4) พิกัดกำลังไฟฟ้า

50	kVA	500	kVA
100	kVA	630	kVA
160	kVA	1,000	kVA
250	kVA	1,250	kVA
315	kVA	1,500	kVA
400	kVA	2,000	kVA

(5) พิกัดความถี่ไฟฟ้า : 50 Hz

(6) แกนเหล็ก และขดลวด

Transformer Rating (kVA)	Construction of Core	HV and LV Windings shall be made of	Construction of Windings	
			HV winding	LV winding
50-2,000	According to Manufacturer's standard	Copper only	According to Manufacturer's standard	According to Manufacturer's standard

(7) การแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้า

ด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีตัวเปลี่ยนแท็ป (tap changer) ที่สามารถเปลี่ยนแท็ปได้จากภายนอก

ขอบเขตของการแท็ป : $\pm 2 \times 2.5\%$ ของพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

(8) สัญลักษณ์การเชื่อมต่อ

- หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA to 160 kVA จะต้องมียุทธศาสตร์การเชื่อมต่อ แบบ Dyn11 หรือ Yzn11 ใดๆอย่างหนึ่ง
- หม้อแปลงไฟฟ้าที่มียุทธศาสตร์การเชื่อมต่อแบบ Yzn11 จะต้องมียุทธศาสตร์ป้องกันแบบเต็มรูปแบบ (full insulation level) ที่จุดนิวทรัลของขดลวดด้านปฐมภูมิ
- หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 kVA ถึง 2,000 kVA ต้องมียุทธศาสตร์การเชื่อมต่อแบบ Dy11

(9) ซีตจำกัดของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น, ที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่า 40°C

ส่วนบนสุดของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า : ต้องไม่เกิน 60K

ขดลวด : ต้องไม่เกิน 65K

(10) ค่าความสูญเสีย และเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ค่าความสูญเสีย และเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจของหม้อแปลงไฟฟ้า

Transformer Rating (kVA)	Watt Loss (W)		Load loss at 75°C	Short-circuit Impedance at 75°C (%)
	No-load loss, for system voltage of :			
	22 kV	33 kV		
50	160	170	950	4
100	250	260	1,550	4
160	360	370	2,100	4
250	500	520	2,950	4
315	600	630	3,500	4
400	720	750	4,150	4
500	860	900	4,950	6.5 or more
630	1,010	1,050	5,850	4
1,000	1,270	1,300	12,150	6
1,250	1,500	1,530	14,750	6
1,500	1,820	1,850	17,850	6
2,000	2,110	2,140	21,600	6

3.2 หัวข้อทดสอบฯ ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV 50 Hz ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1]

3.2.1 การทดสอบประจำ (Routine test)

การทดสอบประจำ (Routine test) หมายถึง การทดสอบที่ทำเป็นประจำในโรงงาน เป็นการทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกลูก เพื่อตรวจสอบดูว่าหม้อแปลงนั้นไม่มีความบกพร่องจากการผลิต ซึ่งการทดสอบประจำมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- (1) Measurement of winding resistance
- (2) Measurement of voltage ratio, and check of phase displacement
- (3) Measurement of short-circuit impedance
- (4) Measurement of load loss
- (5) Measurement of no-load loss
- (6) Induced overvoltage withstand test
- (7) Separate-source voltage-withstand test
- (8) Oil dielectric strength test

3.2.2 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test)

การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test) หมายถึง การทดสอบเพื่อตรวจสอบหรือพิสูจน์ว่าลักษณะการออกแบบมีคุณภาพ เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ซึ่งการทดสอบเฉพาะแบบมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- (1) Temperature-rise test
- (2) Impulse withstand voltage test

โดยการทดสอบต้องถูกควบคุม และตรวจสอบโดยสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งได้แก่

- KEMA : KEMA Laboratories (Holland)
- V' Fall : Statens Vattenfallsverk, The Swedish State Power Board (SWEDEN)

- CRIEPI : Central Research Institute of Electric Power Industry (JAPAN)
- EdF : Electricite de France (FRANCE)
- CESI : Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (ITALY)
- PLI : Powertech High Power Laboratory (CANADA)
- TCA : Testing and Certification (AUSTRALIA)
- OHT : Ontario Hydro Technologies (CANADA)
- EGAT : The Electricity Generating Authority of Thailand (THAILAND)
- : Testing Laboratory, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University (THAILAND)
- SATS : Scandinavian Association for Testing Electric Power Equipment (NORWAY)
- ASTA : ASTA Certification Services (UK)

แต่สำหรับผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV ชนิดที่สามารถทนต่อการลัดวงจร ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] จะต้องเพิ่มการทดสอบพิเศษ (Special test) ขึ้นมา เพื่อทดสอบความสามารถการทนต่อการลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ซึ่งจะต้องทำการทดสอบดังนี้

3.2.3 การทดสอบพิเศษ (Special test) รัชมังคลาจารย์มหาวิทยาลัย

การทดสอบพิเศษ (Special test) หมายถึง การทดสอบที่ต้องการทราบข้อมูลเพิ่มเติมจากการทดสอบปกติ หม้อแปลงไฟฟ้าต้องผ่านการทดสอบการทนการลัดวงจร ตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ฉบับล่าสุด ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- (1) Calculation of symmetrical and asymmetrical short-circuit current
- (2) Photograph before test
- (3) Short circuit performance test
- (4) Photograph after test

โดยการทดสอบต้องถูกควบคุม และตรวจสอบโดยสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ ที่ได้รับการยอมรับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งได้แก่

- KEMA : KEMA Laboratories (Holland)
- V' Fall : Statens Vattenfallsverk, The Swedish State Power Board (SWEDEN)
- CRIEPI : Central Research Institute of Electric Power Industry (JAPAN)
- EdF : Electricite de France (FRANCE)
- CESI : Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (ITALY)
- PLI : Powertech High Power Laboratory (CANADA)
- TCA : Testing and Certification (AUSTRALIA)
- OHT : Ontario Hydro Technologies (CANADA)
- SATS : Scandinavian Association for Testing Electric Power Equipment (NORWAY)
- ASTA : ASTA Certification Services (UK)
- EGAT : The Electricity Generating Authority of Thailand (THAILAND)

ทั้งนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ยินยอมให้สถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ สามารถใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) ระดับแรงดัน 22 kV เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบฯ นี้ได้ ถ้าสถาบันเหล่านี้ไม่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] Table 2 – Short-circuit apparent power of the system แต่ทุกครั้งของการทดสอบฯ ผู้ผลิตหม้อแปลง หรือสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระ จะต้องยื่นเอกสารทางเทคนิคของการทดสอบฯ เช่น กระบวนการทดสอบฯ, ไดอะแกรมวงจรการทดสอบ, อุปกรณ์ทดสอบฯ และอุปกรณ์ป้องกัน, วันที่ทำการทดสอบ และผลการคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเอกสารเหล่านี้จะต้องส่งให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พิจารณา และต้องได้รับการอนุมัติก่อนถึงจะทำการทดสอบดังกล่าวได้

3.3 รายละเอียดการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] (Power transformers Part 5 : Ability to withstand short circuit)

3.3.1 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นหม้อแปลงประเภทสองขดลวดที่แยกกัน สำหรับวัตถุประสงค์ของมาตรฐานนี้ ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สามพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนี้

- ประเภทที่ 1 : 25 kVA ถึง 2,500 kVA;
- ประเภทที่ 2 : 2,501 kVA ถึง 100,000 kVA;
- ประเภทที่ 3 : สูงกว่า 100,000 kVA

3.3.2 ค่าต่ำที่สุดที่ได้รับการยอมรับของเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจ ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเป็นไปตามนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าต่ำที่สุดที่ได้รับการยอมรับของเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เทจของหม้อแปลงไฟฟ้า

Short-circuit impedance at rated current		
Rated power (kVA)		Minimum short-circuit impedance (%)
25	to 630	4.0
631	to 1,250	5.0
1,251	to 2,500	6.0
2,501	to 6,300	7.0
6,301	to 25,000	8.0
25,001	to 40,000	10.0
40,001	to 63,000	11.0
63,001	to 100,000	12.5
above	100,000	>12.5

Note 1 : Values for rated power greater than 100,000 kVA are generally subject to agreement between manufacturer and purchaser

Note 2 : In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating

3.3.3 ค่า Short-circuit apparent power ของระบบ

ค่า Short-circuit apparent power ณ ตำแหน่งที่ตั้งของหม้อแปลงไฟฟ้าควรถูกกำหนดโดยผู้ซื้อ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร เพื่อใช้ในการออกแบบ และทดสอบฯ แต่ถ้าวัดค่า Short-circuit apparent power ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ ให้ใช้ค่าตามดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่า Short-circuit apparent power

Highest voltage for equipment, U_m (kV)	Short-circuit apparent power (MVA)	
	Current Euro practice	Current North American practice
7.2; 12; 17.5 and 24	500	500
36	1,000	1,500
52 and 72.5	3,000	5,000
100 and 123	6,000	15,000
145 and 170	10,000	15,000
245	20,000	25,000
300	30,000	30,000
362	35,000	35,000
420	40,000	40,000
525	60,000	60,000
765	83,500	83,500

Note : if not specified, a value between 1 and 3 should be consider for the ratio of zero-sequence to positive sequence impedance of the system

3.3.4 จำนวนครั้ง และช่วงเวลาในการทดสอบฯ

(1) จำนวนครั้งในการทดสอบ

- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส, ทดสอบ 3 ครั้ง ได้แก่ แท้ปที่มี Voltage ratio ต่ำที่สุด, แท้ปกลาง และแท้ปที่มี Voltage ratio มากที่สุด
- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส, ทดสอบ 9 ครั้ง คือ ทดสอบ 3 ตำแหน่งแท้ป ได้แก่ แท้ปที่มี Voltage ratio ต่ำที่สุด, แท้ปกลาง และแท้ปที่มี Voltage ratio มากที่สุด โดยทดสอบตำแหน่งแท้ปละ 3 ครั้ง

(2) ช่วงเวลาในการทดสอบการลัดวงจร

- 0.5 วินาที \pm 10% สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทที่ 1
- 0.25 วินาที \pm 10% สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทที่ 2 และ 3

3.3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสลัดวงจรจากการทดสอบฯ


$$(1) i_{p,test} = i_{p,spec} \pm 5\%$$

$$(2) I''_{k,test} = I''_{k,spec} \pm 10\%$$

3.3.6 กระบวนการทดสอบ

(1) Reactance measurement overview

วัดค่ารีแอกแตนซ์ของทุกขดลวด ในตำแหน่งแท้ปที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งตัวอย่างค่าที่วัดได้ ดังรูปที่ 3.1

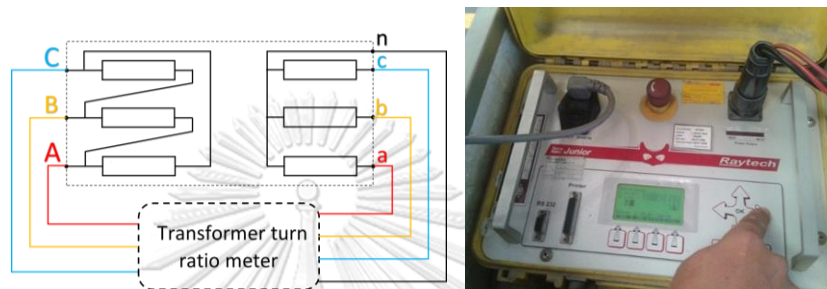
									
TIC-2163-11			REACTANCE MEASUREMENT OVERVIEW				Page 7		
Tap position 1									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	A-B	B-C	A-C	A	B	C	A	B	C
Before tests	258,55	258,55	257,61	388,30	388,30	385,48	-	-	-
AT 111013-6005	258,55	258,55	257,61	388,30	388,30	385,48	0,0	0,0	0,0
AT 111013-6006	258,55	258,55	257,61	388,30	388,30	385,48	0,0	0,0	0,0
AT 111013-6007	258,55	258,55	257,61	388,30	388,30	385,48	0,0	0,0	0,0
After tests	258,55	258,87	257,92	387,98	388,93	386,11	-0,1	0,2	0,2
Tap position 3									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	A-B	B-C	A-C	A	B	C	A	B	C
Before tests	229,34	229,34	228,39	344,48	344,48	341,66	-	-	-
AT 111013-6009	229,34	229,34	228,39	344,48	344,48	341,66	0,0	0,0	0,0
AT 111013-6010	229,34	229,34	228,71	344,32	344,32	342,44	0,0	0,0	0,2
AT 111013-6011	229,34	229,34	228,71	344,32	344,32	342,44	0,0	0,0	0,2
After tests	229,34	229,34	228,71	344,32	344,32	342,44	0,0	0,0	0,2
Tap position 5									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	A-B	B-C	A-C	A	B	C	A	B	C
Before tests	203,89	203,58	202,95	306,47	305,52	303,64	-	-	-
AT 111013-6013	203,89	203,58	202,95	306,47	305,52	303,64	0,0	0,0	0,0
AT 111013-6014	203,89	203,58	202,95	306,47	305,52	303,64	0,0	0,0	0,0
AT 111013-6015	203,89	203,58	202,95	306,47	305,52	303,64	0,0	0,0	0,0
After tests	203,89	203,58	202,95	306,47	305,52	303,64	0,0	0,0	0,0

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพรวมค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จากการวัด [8]

(2) Routine tests before short-circuit performance test

1) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

วัดค่า Ratio ระหว่างค่าแรงดันขาเข้า และค่าแรงดันขาออก ซึ่งมีวงจรถดสอบ และใช้เครื่องมือวัดฯ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน $\pm 0.5\%$ (ทดสอบตามหัวข้อที่ 10.3 ของมาตรฐาน IEC 60076-1) ตัวอย่างค่า voltage ratio ที่วัดได้ และการตรวจสอบ phase displacement ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรถดสอบ และเครื่องมือวัดฯ

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 07 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 31.30 °C Bottom radiator 30.50 °C Average oil 30.90 °C								
Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 63.5 %								
I. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement								
Test method : Tested according to clause 11.3 of IEC 60076-1. The voltage ratio shall be measured on each tapping. The connection symbol of three phase transformers shall be checked.								
Instrument : Three phase transformer turns ratio model TR-MK-III " Raytech "								
Test Record :								
High voltage		Low voltage						
Tap position	Voltage	Rated	A - B/a - n	% Error	B - C/b - n	% Error	C - A/c - n	% Error
1	23100	100.026	100.060	0.03%	100.060	0.03%	100.030	0.00%
2	22550	97.644	97.665	0.02%	97.695	0.05%	97.665	0.02%
3	22000	95.263	95.270	0.01%	95.300	0.04%	95.270	0.01%
4	21450	92.881	92.905	0.03%	92.935	0.06%	92.905	0.03%
5	20900	90.500	90.510	0.01%	90.540	0.04%	90.510	0.01%
Phase displacement : Dyn 11								
Acceptance criteria : The voltage ratio error shall be within $\pm 0.5\%$ for each tap								

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างค่า voltage ratio ที่วัดได้
และการตรวจสอบ phase displacement [8]

2) Insulation resistance tests

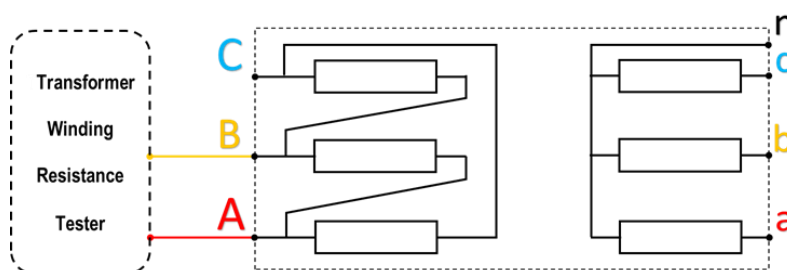
จากมาตรฐาน IEEE C57.12.90 หัวข้อที่ 10.11 ผลการทดสอบต้องมีค่ามากกว่า 3000 M Ω ดังตัวอย่างรูปที่ 3.4

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST			
Test date	: 07 / 06 / 2016		
Temperature	: Top oil 31.50 °C	Bottom radiator 30.60 °C	Average oil 31.05 °C
Amb. Condition	: Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 64.1 %		
3. Insulation resistance tests			
Test method	: Tested according to clause 10.11 of IEEE C57.12.90. Insulation resistance tests are made to determine the insulation resistance from individual winding to ground and between individual windings.		
Instrument	: Analogue Digital insulation tester model BM5200 "Megger"		
Test record	:		
	Between HV to LV	Between HV to LV + Ground	Between LV to HV + Ground
Test voltage (V _{DC})	2500 V	2500 V	500 V
Test value	41.6 G Ω	40.6 G Ω	16.1 G Ω
Requirement	: None		

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างค่า Insulation resistance tests ที่วัดได้ [8]

3) Measurement of winding resistance

เป็นการวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่างๆ เช่น A-C เป็นต้น ของหม้อแปลงไฟฟ้า (ตามมาตรฐาน IEC 60076-1 หัวข้อที่ 10.2) ไม่มีเกณฑ์พิจารณา แต่วัดเพื่อนำไปคำนวณค่ากำลังสูญเสียในขดลวดในขั้นต่อไป ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.5 และตัวอย่างค่าความต้านทานของขดลวดที่วัดได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวงจรการวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่างๆ

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 07 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 30.90 °C Bottom radiator 30.20 °C Average oil 30.55 °C								
Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 65.0 %								
2. Measurement of winding resistance								
Test method : Tested according to clause 11.2 of IEC 60076-1. The resistance of each winding, the terminals between which it is measured and the temperature of the windings shall be recorded.								
Instrument : Digital micro ohm meter model DAC-MRG-1 " Soken "								
: Digital Thermo - hygrometer model MHB-382SD " Lutron "								
: Temperature controller model F4 " Vertex "								
Test record :								
Between HV terminal (Ω)						Between LV terminal (Ω)		
HV Terminal	1	2	3	4	5	a - b	b - c	c - a
A - B	33.850	32.970	32.100	31.250	30.380	0.009650	0.009560	0.009705
B - C	33.920	33.020	32.170	31.310	30.730	a - n	b - n	c - n
C - A	33.920	33.020	32.140	31.290	30.430	0.005134	0.004988	0.004952
Requirement : None								

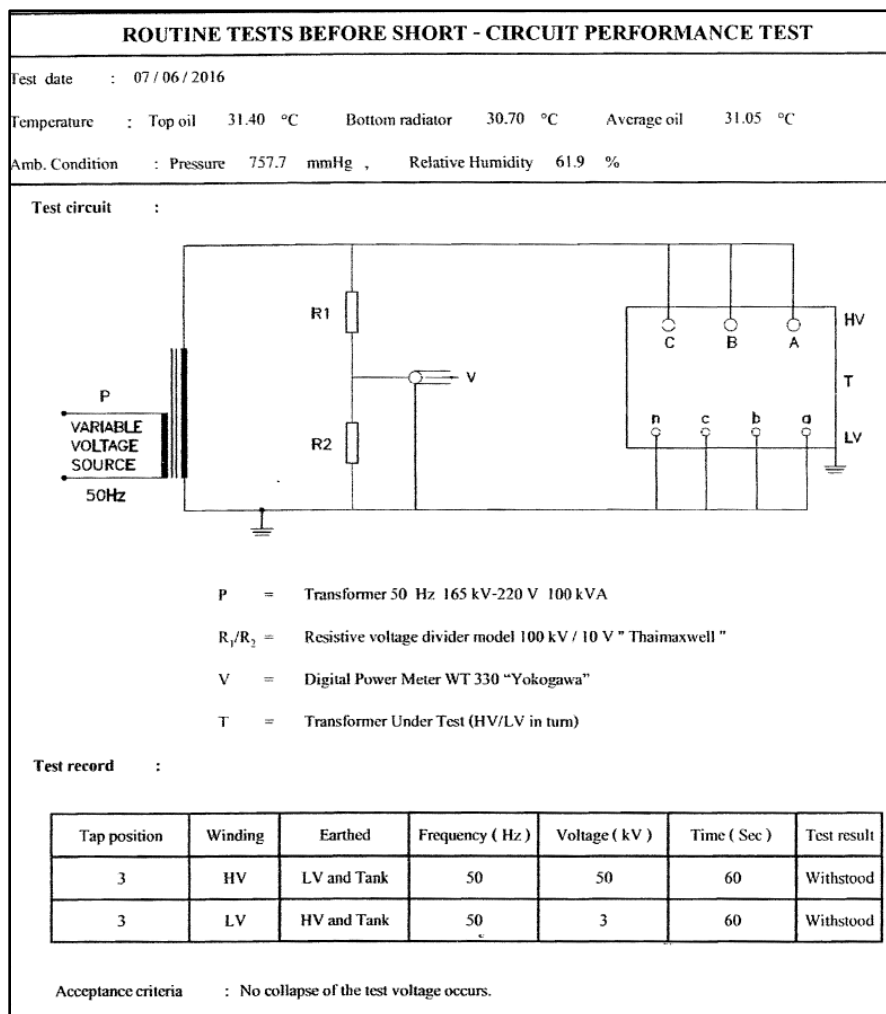
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างค่าความต้านทานของขดลวดที่วัดได้ [8]

4) Separate source AC withstand voltage test (applied potential test)

ทำการต่อวงจรเพื่อวัดความเป็นฉนวนระหว่าง Phase กับ Ground โดยลัดวงจรแต่ละด้าน ทำการทดสอบ 2 แบบ คือ

- ต่อฝั่ง HV ลงกราวด์แล้วจ่ายแรงดันประมาณ 2 เท่าของแรงดันพิกัดที่ฝั่ง LV
- ต่อฝั่ง LV ลงกราวด์แล้วจ่ายแรงดันประมาณ 2 เท่าของแรงดันพิกัดที่ฝั่ง HV

เป็นการทดสอบเพื่อจำลองสถานการณ์แรงดันเกินค่าพิกัด ว่าหม้อแปลงสามารถทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ (ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 หัวข้อที่ 10) ซึ่งมีวงจรทดสอบและตัวอย่างรายงานผลการทดสอบดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรทดสอบ และตัวอย่างรายงานผลการทดสอบ

Separate source AC voltage withstand test [8]

- 5) Short-duration induced AC withstand voltage test (ACSD) for transformers with uniformly insulated high voltage winding

ทำการทดสอบความเป็นฉนวนระหว่าง phase, turn, coils ของขดลวด และ ระหว่างขดลวดกับ ground โดยการจ่ายแรงดันที่ 2 เท่าของแรงดันพิกัด และความถี่ที่ 200 Hz เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทดสอบว่าหม้อแปลงจะทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ โดยการเพิ่มความถี่เพื่อป้องกันการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 หัวข้อที่ 11.2) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.8 และมีตัวอย่างผลการทดสอบดังรูปที่ 3.9

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST

Test date : 07 / 06 / 2016

Temperature : Top oil 31.60 °C Bottom radiator 30.90 °C Average oil 31.25 °C

Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 61.5 %

7. Induced voltage withstand test (IVW)

Test method : Tested according to clause 11.2 of IEC 60076-3. The test voltage across an untapped winding of the transformer shall be as close as possible to twice the rated voltage. The duration of the test shall be 30 seconds and the frequency 200 Hz. It shall be applied between the terminals of secondary winding by maintaining the primary winding open.

Instrument : Digital Power Meter WT 500 "Yokogawa"

Test circuit :

WT 500

G = Generator 3 phase 200 Hz 15 kVA
w = Digital Power Meter WT 500 "Yokogawa"
T = Transformer under test

รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบ Induce voltage withstand test [8]

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST

Test date : 07 / 06 / 2016

Temperature : Top oil 31.60 °C Bottom radiator 30.90 °C Average oil 31.25 °C

Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 61.5 %

Test record :

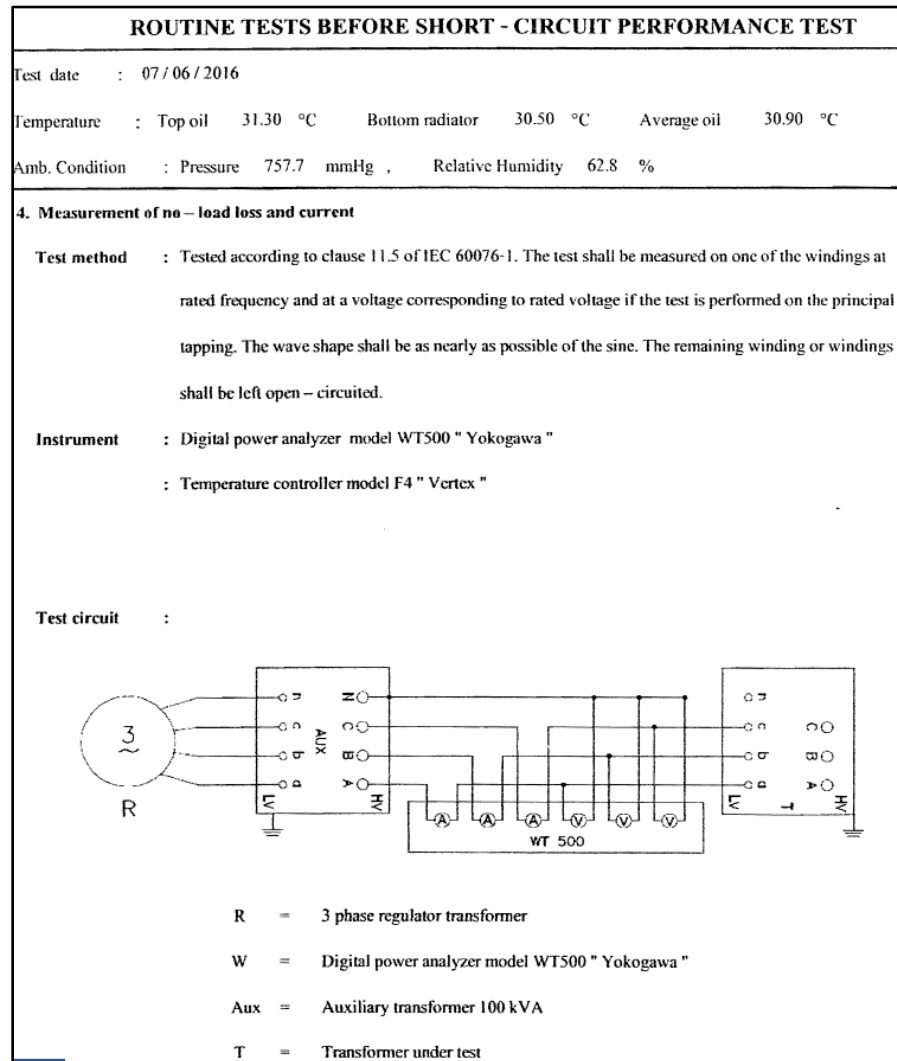
Tap position	Winding	Frequency (Hz)	Induced voltage phase to phase (V)	Time (Sec)	Test result
3	LV	200	800	30	Withstood

Acceptance criteria : No collapse of the test voltage occurs.

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างผลการทดสอบ Induce voltage withstand test [8]

6) Measurement of no-load loss and current

ต้องวงจรทดสอบลัดวงจร และทำการวัดค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ซึ่งไม่ควรเกินตามมาตรฐาน (ตามมาตรฐาน IEC 60076-1 หัวข้อที่ 11.5) ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.10 และตัวอย่างผลการทดสอบดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรทดสอบ no-load loss and current [8]

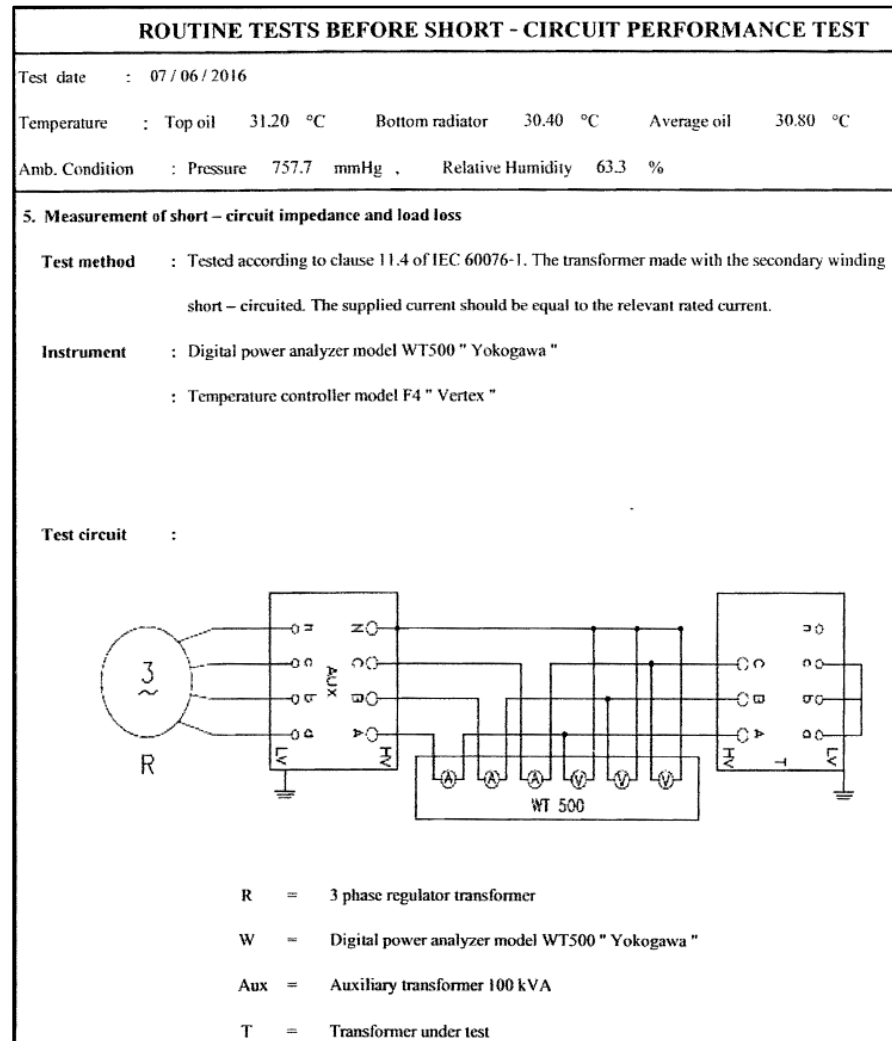
ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 07 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 31.30 °C Bottom radiator 30.50 °C Average oil 30.90 °C								
Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 62.8 %								
Test record :								
Mean voltage $U' (V)$	a	399.17	b	400.48	c	400.53	Average	400.06
RMS voltage $U (V)$	a	398.13	b	399.39	c	399.58	Average	399.03
RMS current (A)	a	0.5100	b	0.5422	c	0.5356	Average	0.5293
Exciting current (%)	a	0.221	b	0.235	c	0.232	Average	0.229
No – load losses from testing at ambient temperature (W) : P_m								336.25
Voltmeter reading difference : $d = (U' - U) / U'$								0.002567
Corrected no – load losses (W) : P_o								337.11
Requirement : The test voltage wave shape is satisfactory if d is within 3%.								
Note : The corrected no – load losses are calculated with the formula $P_o = P_m [1 + d]$								

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลการทดสอบการวัดค่า no-load loss และกระแส [8]



7) Measurement of short-circuit impedance and load loss

ทำการต่อวงจรทดสอบลัดวงจร และทำการวัดค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดซึ่งไม่ควรเกินตามมาตรฐาน (ตามมาตรฐาน IEC 60076-1 หัวข้อที่ 11.4) ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.12 และตัวอย่างผลการทดสอบดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบ

Measurement of short-circuit impedance and load loss [8]

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST						
Test date : 07 / 06 / 2016						
Temperature : Top oil 31.20 °C Bottom radiator 30.40 °C Average oil 30.80 °C						
Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 63.3 %						
Test record :						
Tap position			1	3	5	
Voltage at testing	30.80 °C (V)		890.000	826.767	800.700	
Current at testing	30.80 °C (A)		3.8928	4.0470	4.4111	
Load losses at testing	30.80 °C (W)		1644.300	1646.300	1806.500	
Voltage at rated current	30.80 °C (V)		914.272	857.808	802.299	
Load losses at rated current	30.80 °C (W)		1735.208	1772.242	1813.720	
DC losses at	30.80 °C (W)		1585.656	1622.488	1666.778	
DC losses at	75.00 °C (W)		1849.336	1892.292	1943.947	
Stray losses at	30.80 °C (W)		149.552	149.754	146.943	
Stray losses at	75.00 °C (W)		128.229	128.402	125.992	
Load losses at	75.00 °C (W)		1977.565	2020.694	2069.938	
R at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)		41.221	38.204	35.319	
R at 75.00 °C	(%)		1.236	1.263	1.294	
X at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)		126.946	113.089	100.127	
X at 75.00 °C	(%)		3.806	3.738	3.668	
Z at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)		133.471	119.368	106.173	
Z at 75.00 °C	(%)		4.002	3.946	3.889	
X / R			3.080	2.960	2.835	
Peak factor			1.951	1.932	1.910	
Requirement : Information for short-circuit performance test						
Remark : Tap 1 and Tap 5 are calculated for peak factor of short - circuit performance test						

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างผลการทดสอบ

short-circuit impedance and load loss [8]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

8) Oil dielectric strength test

เป็นการตรวจสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ต้องนำน้ำมันทิ้งไว้ 5 นาที ก่อนการทดสอบ และทำการทดสอบโดยการเพิ่มแรงดันด้วยอัตรา $2.0 \text{ kV/s} \pm 0.2 \text{ kV/s}$ จนเกิดการ breakdown วิธีการทดสอบเป็นไปตาม IEC 60156 โดยค่าเฉลี่ยของแรงดัน breakdown ต้องไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งมีผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.14

ROUTINE TESTS BEFORE SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST						
Test date : 07 / 06 / 2016						
Temperature : Top oil 31.60 °C Bottom radiator 30.90 °C Average oil 31.25 °C						
Amb. Condition : Pressure 757.7 mmHg , Relative Humidity 61.5 %						
8. Oil dielectric strength test						
Test method : Tested according to IEC 60156						
Instrument : Oil dielectric test model OTS60 AF " Megger "						
Test record :						
Times						Average
1	2	3	4	5	6	
60.3 kV	60.2 kV	60.2 kV	60.2 kV	60.2 kV	60.2 kV	60.2 kV
Results : The results are for information only.						

รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน
ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [8]

(3) Short-circuit performance test

1) Calculation of symmetrical and asymmetrical short-circuit current [4]

- การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical short-circuit current) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ประเภทสองขดลวดที่แยกกัน ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ($I(rms)$) สามารถคำนวณได้ตามนี้

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_s + Z_t)} \quad (kA) \quad (3.1)$$

โดยที่

Z_s คือ Short-circuit impedance ของระบบ

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ in ohms per phase (equivalent star connection)} \quad (3.2)$$

โดยที่

U_s คือ แรงดันพิกัดของระบบ (kV)

S คือ ค่า Short-circuit apparent power ของระบบ (MVA)

U และ Z_r สามารถกำหนดได้ตามนี้

- สำหรับแท็ปหลัก (principal tapping):

U คือ แรงดันพิกัด U_r ของขดลวดที่อยู่ภายใต้การพิจารณา (kV)

Z_r คือ short-circuit impedance ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อ้างถึงขดลวด
ต้องนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามนี้

$$Z_r = \frac{Z_r \times U_r^2}{100 \times S_r} \text{ in ohms } (\Omega) \text{ per phase} \quad (3.3)$$

โดยที่

Z_r คือ ค่า short-circuit impedance ที่วัดได้ที่กระแสพิกัด และความถี่พิกัดที่แท็ปหลัก และที่อุณหภูมิอ้างอิง (%)

S_r คือ กำลังพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (MVA)

- สำหรับแท็ปอื่นๆ

U คือ นอกจากที่ระบุไว้, ต้องพิจารณาการแท็ปแรงดัน (kV)

Z_r คือ ค่า Short-circuit impedance ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อ้างถึงแท็ป
และขดลวดต้องนำมาพิจารณาด้วย, in ohms (Ω) per phase

- การคำนวณกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตร (1^{st} peak of the asymmetrical current)

$$\hat{i} = I \times k \times \sqrt{2} \quad (3.4)$$

โดยที่

I คือ ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร

ค่า $k \times \sqrt{2}$ คือ ตัวคูณค่ายอด (Peak factor), จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า X/R ratio

โดยที่

X คือ ผลรวมของรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบ ($X_t + X_s$) ในหน่วยโอห์ม

R คือ ผลรวมของความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบ ($R_t + R_s$) ในหน่วยโอห์ม, ที่ซึ่งค่า R_t ณ อุณหภูมิอ้างอิง

ค่าความสัมพันธ์ของ X/R ratio กับค่า $k \times \sqrt{2}$ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์ของ X/R ratio กับค่า $k \times \sqrt{2}$ [4]

X/R	$k \times \sqrt{2}$
1	1.51
1.5	1.54
2	1.76
3	1.95
4	2.09
5	2.19
6	2.27
8	2.38
10	2.46
14	2.55
<p>Note: For other values of X/R between 1 and 14, the factor $k \times \sqrt{2}$ may be determined by linear interpolation</p>	

(กรณี $Z_s < 0.05Z_t$ ให้ละทิ้ง $Z_s = R_s + jX_s$)

หรือ

$$k \times \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X})) \sin \phi \times \sqrt{2} \quad (3.5)$$

โดยที่

ϕ คือ มุมเฟส โดย $\phi = \arctan \frac{X}{R}$, radian

สรุป คือ

$$\hat{i} = I \times (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X}) \sin \phi) \times \sqrt{2} \quad (3.6)$$

ถ้าไม่ได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่น ในกรณี $X/R > 14$ ค่า factor $k \times \sqrt{2}$ มีค่าเท่ากับ

$$1.8 \times \sqrt{2} = 2.55 \text{ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทที่ 2}$$

$$1.9 \times \sqrt{2} = 2.69 \text{ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทที่ 3}$$

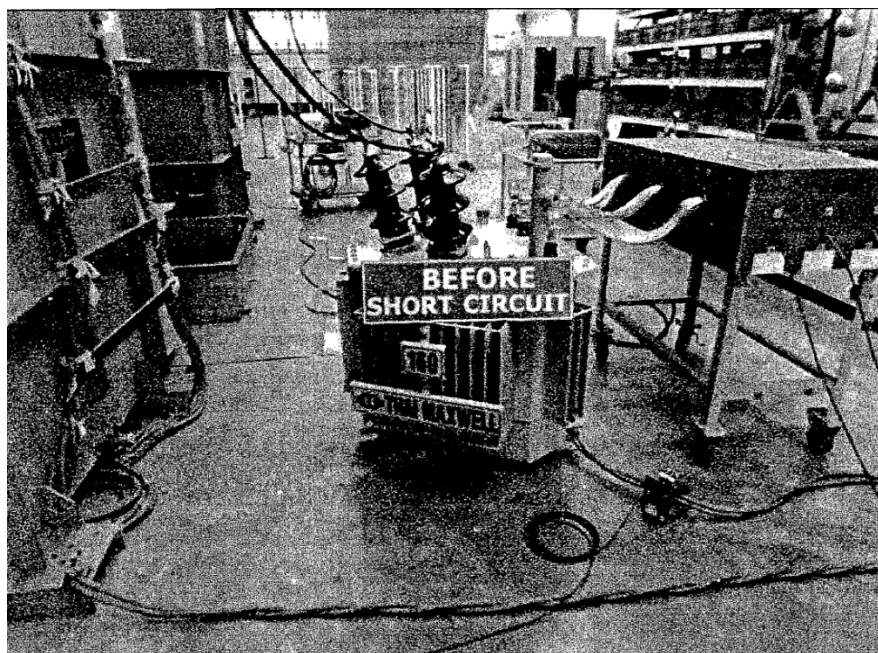
ตัวอย่างผลการคำนวณกระแสลัดวงจร ดังรูปที่ 3.15

SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST					
Test date : 09/06/2016					
Amb. Condition : Pressure 757.6 mmHg . Relative Humidity 68.3 % Temperature 29.0 °C					
Short-circuit current calculation for short-circuit test.					
Test method : Tested according to clause 4.1 and 4.2 of IEC 60076-5. by three phase power supply.					
Tap position	Peak factor	Calculation value	Min	Calculation	Max
1	1.951	Symmetrical short-circuit current (I_{sym}), kA _{rms}	5.193	5.771	6.348
		Asymmetrical short-circuit current (I_{asym}), kA _p	10.697	11.260	11.823
3	1.932	Symmetrical short-circuit current (I_{sym}), kA _{rms}	5.267	5.852	6.438
		Asymmetrical short-circuit current (I_{asym}), kA _p	10.740	11.305	11.871
5	1.910	Symmetrical short-circuit current (I_{sym}), kA _{rms}	5.344	5.938	6.532
		Asymmetrical short-circuit current (I_{asym}), kA _p	10.778	11.345	11.912
Instrument : Resistive voltage divider model 50kV/5V 3 units " Thai maxwell "					
: Digital oscilloscope model DLM2024 " Yokogawa "					
: Digital thermo-hygrometer model MHB-382SD " Lutron "					
: Current transformer model BCT " Thai maxwell "					
: Rogowski current waveform Transducer for input of OSC. scope					

รูปที่ 3.15 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจร [8]

2) Photograph before test

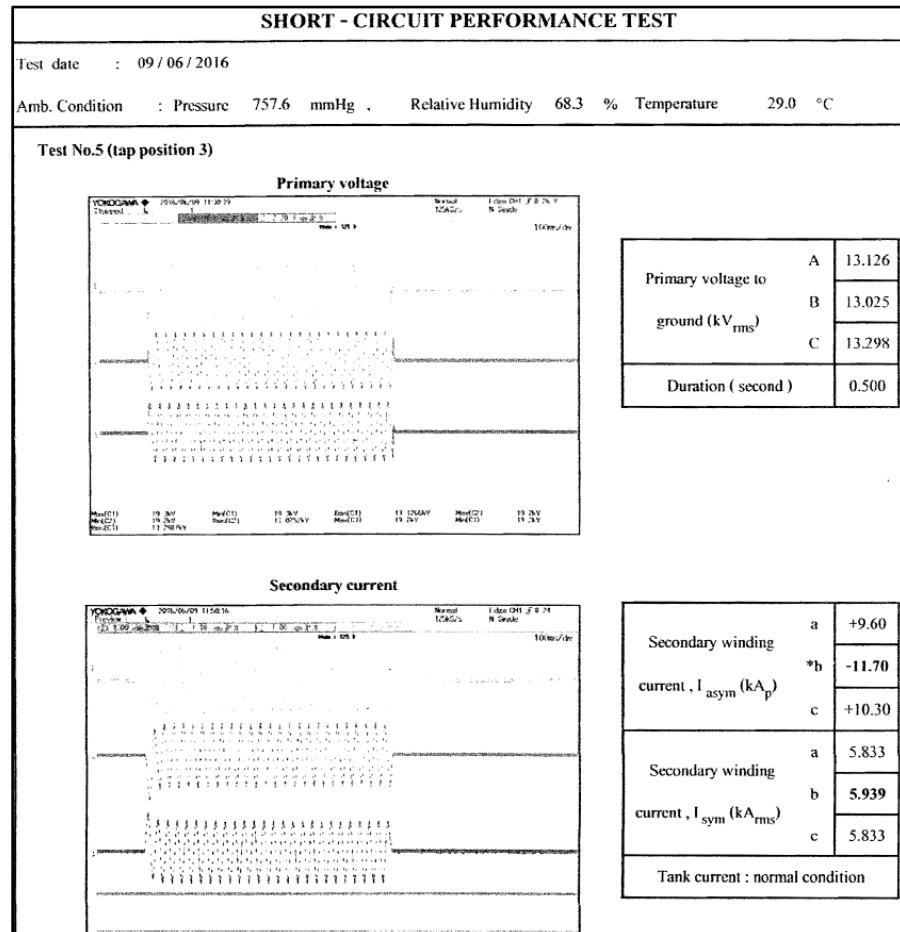
ภาพถ่ายหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบฯ ทั้งหมดแล้ว และพร้อมที่จะเริ่มทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนที่จะทำการทดสอบฯ [8]

3) Short-circuit performance test

ทดสอบ 3 ตำแหน่งแท็บ ได้แก่ แท็บที่มี Voltage ratio ต่ำที่สุด, แท็บกลาง และแท็บที่มี Voltage ratio มากที่สุด โดยทดสอบตำแหน่งแท็บละ 3 ครั้ง ได้กราฟ และผลทดสอบฯ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กราฟ และผลการทดสอบฯ [8]

4) Photograph after test

ภาพถ่ายหลังทำการทดสอบฯ เสร็จสิ้น เพื่อดูผลกระทบภายนอกจากการลัดวงจร
ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากทำการทดสอบฯ [8]

(4) Routine tests after short-circuit performance test

1) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

วัดค่า voltage ratio และตรวจสอบ phase displacement หลังจากทำการทดสอบฯ
ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 3.19

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 10 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 31.30 °C Bottom radiator 30.70 °C Average oil 31.00 °C								
Amb. Condition : Pressure 756.8 mmHg , Relative Humidity 62.8 %								
1. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement								
Test method : Tested according to clause 11.3 of IEC 60076-1. The voltage ratio shall be measured on each tapping. The connection symbol of three phase transformers shall be checked.								
Instrument : Three phase transformer turns ratio model TR-MK-III " Raytech "								
Test Record :								
High voltage		Low voltage						
Tap position	Voltage	Rated	A - B/a - n	% Error	B - C/b - n	% Error	C - A/c - n	% Error
1	23100	100.026	100.070	0.04%	100.070	0.04%	100.040	0.01%
2	22550	97.644	97.670	0.03%	97.700	0.06%	97.670	0.03%
3	22000	95.263	95.275	0.01%	95.305	0.04%	95.275	0.01%
4	21450	92.881	92.910	0.03%	92.940	0.06%	92.910	0.03%
5	20900	90.500	90.520	0.02%	90.545	0.05%	90.515	0.02%
Phase displacement : Dyn 11								
Acceptance criteria : The voltage ratio error shall be within ± 0.5 % for each tap								

รูปที่ 3.19 ตัวอย่างค่า voltage ratio ที่วัดได้

และการตรวจสอบ phase displacement หลังทำการทดสอบฯ [8]

2) Insulation resistance tests

วัดค่า Insulation resistance หลังจากทำการทดสอบฯ ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 3.20

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST			
Test date	: 10 / 06 / 2016		
Temperature	: Top oil 31.30 °C	Bottom radiator 31.10 °C	Average oil 31.20 °C
Amb. Condition	: Pressure 756.8 mmHg , Relative Humidity 63.9 %		
3. Insulation resistance tests			
Test method	: Tested according to clause 10.11 of IEEE C57.12.90. Insulation resistance tests are made to determine the insulation resistance from individual winding to ground and between individual windings.		
Instrument	: Analogue Digital insulation tester model BM5200 "Megger"		
Test record	:		
	Between HV to LV	Between HV to LV + Ground	Between LV to HV + Ground
Test voltage (V _{DC})	2500 V	2500 V	500 V
Test value	39.1 GΩ	37.4 GΩ	15.9 GΩ
Requirement	: None		

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างค่า Insulation resistance ที่วัดได้หลังทำการทดสอบฯ [8]



3) Measurement of winding resistance

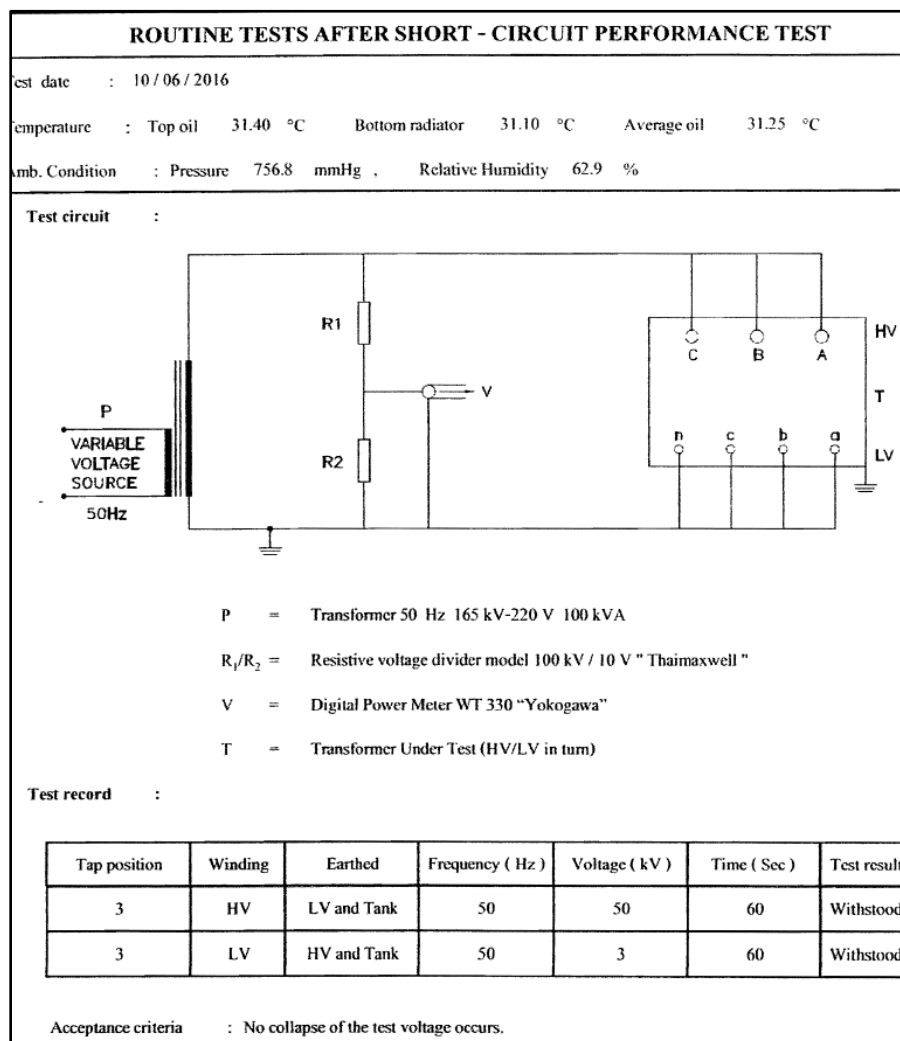
วัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่างๆ เช่น A-C เป็นต้น ของหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากทำการทดสอบฯ ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 3.21

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 10 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 31.00 °C Bottom radiator 30.30 °C Average oil 30.65 °C								
Amb. Condition : Pressure 756.8 mmHg , Relative Humidity 73.7 %								
2. Measurement of winding resistance								
Test method : Tested according to clause 11.2 of IEC 60076-1. The resistance of each winding, the terminals between which it is measured and the temperature of the windings shall be recorded.								
Instrument : Digital micro ohm meter model DAC-MRG-1 " Soken "								
: Digital thermo - hygrometer model MHB-382SD " Lutron "								
: Temperature controller model F4 " Vertex "								
Test record :								
Between HV terminal (Ω)					Between LV terminal (Ω)			
HV Terminal	1	2	3	4	5	a - b	b - c	c - a
A - B	33.870	32.980	32.110	31.270	30.420	0.009650	0.009561	0.009707
B - C	33.920	33.030	32.170	31.310	30.460	a - n	b - n	c - n
C - A	33.910	33.020	32.150	31.300	30.430	0.005137	0.004992	0.004958
Requirement : None								

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างค่า winding resistance ที่วัดได้หลังทำการทดสอบฯ [8]

4) Separate source AC withstand voltage test (applied potential test)

วัดความเป็นฉนวนระหว่าง Phase กับ Ground หลังจากทำการทดสอบฯ ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรทดสอบ และตัวอย่างรายงานผลการทดสอบ

Separate source AC voltage withstand test หลังทำการทดสอบ [8]

5) Short-duration induced AC withstand voltage test (ACSD) for transformers with uniformly insulated high voltage winding

ทดสอบความเป็นฉนวนระหว่าง phase, turn, coils ของขดลวด และ ระหว่างขดลวด กับ ground หลังจากทำการทดสอบฯ ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.23 และได้ผลทดสอบดังรูปที่ 3.24

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST			
Test date	: 10 / 06 / 2016		
Temperature	: Top oil 31.30 °C	Bottom radiator 31.10 °C	Average oil 31.20 °C
Amb. Condition	: Pressure 756.7 mmHg , Relative Humidity 61.3 %		
7. Induced voltage withstand test (IVW)			
Test method	: Tested according to clause 11.2 of IEC 60076-3. The test voltage across an untapped winding of the transformer shall be as close as possible to twice the rated voltage. The duration of the test shall be 30 seconds and the frequency 200 Hz. It shall be applied between the terminals of secondary winding by maintaining the primary winding open.		
Instrument	: Digital Power Meter WT 500 "Yokogawa"		
Test circuit	:		
<p>G = Generator 3 phase 200 Hz 15 kVA</p> <p>w = Digital Power Meter WT 500 "Yokogawa"</p> <p>T = Transformer under test</p>			

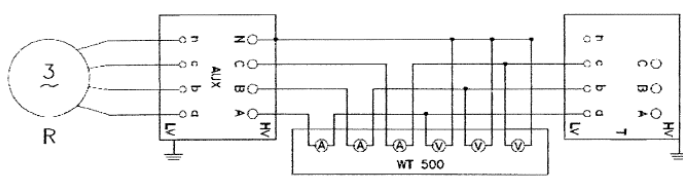
รูปที่ 3.23 วงจรทดสอบ Induce voltage withstand test [8]

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST					
Test date : 10 / 06 / 2016					
Temperature : Top oil 31.30 °C Bottom radiator 31.10 °C Average oil 31.20 °C					
Amb. Condition : Pressure 756.7 mmHg , Relative Humidity 61.3 %					
Test record :					
Tap position	Winding	Frequency (Hz)	Induced voltage phase to phase (V)	Time (Sec)	Test result
3	LV	200	800	30	Withstood
Acceptance criteria : No collapse of the test voltage occurs.					

รูปที่ 3.24 ตัวอย่างผลการทดสอบ Induce voltage withstand test [8]

6) Measurement of no-load loss and current

วัดค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก หลังจากทำการทดสอบฯ ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.25 และตัวอย่างผลการทดสอบดังรูปที่ 3.26

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST	
Test date : 10 / 06 / 2016	
Temperature : Top oil 31.20 °C Bottom radiator 30.70 °C Average oil 30.95 °C	
Amb. Condition : Pressure 756.8 mmHg , Relative Humidity 63.4 %	
4. Measurement of no – load loss and current	
Test method	: Tested according to clause 11.5 of IEC 60076-1. The test shall be measured on one of the windings at rated frequency and at a voltage corresponding to rated voltage if the test is performed on the principal tapping. The wave shape shall be as nearly as possible of the sine. The remaining winding or windings shall be left open – circuited.
Instrument	: Digital power analyzer model WT500 " Yokogawa " : Temperature controller model F4 " Vertex "
Test circuit	: 
	R = 3 phase regulator transformer W = Digital power analyzer model WT500 " Yokogawa " Aux = Auxiliary transformer 100 kVA T = Transformer under test

รูปที่ 3.25 วงจรทดสอบ short-circuit impedance and load [8]

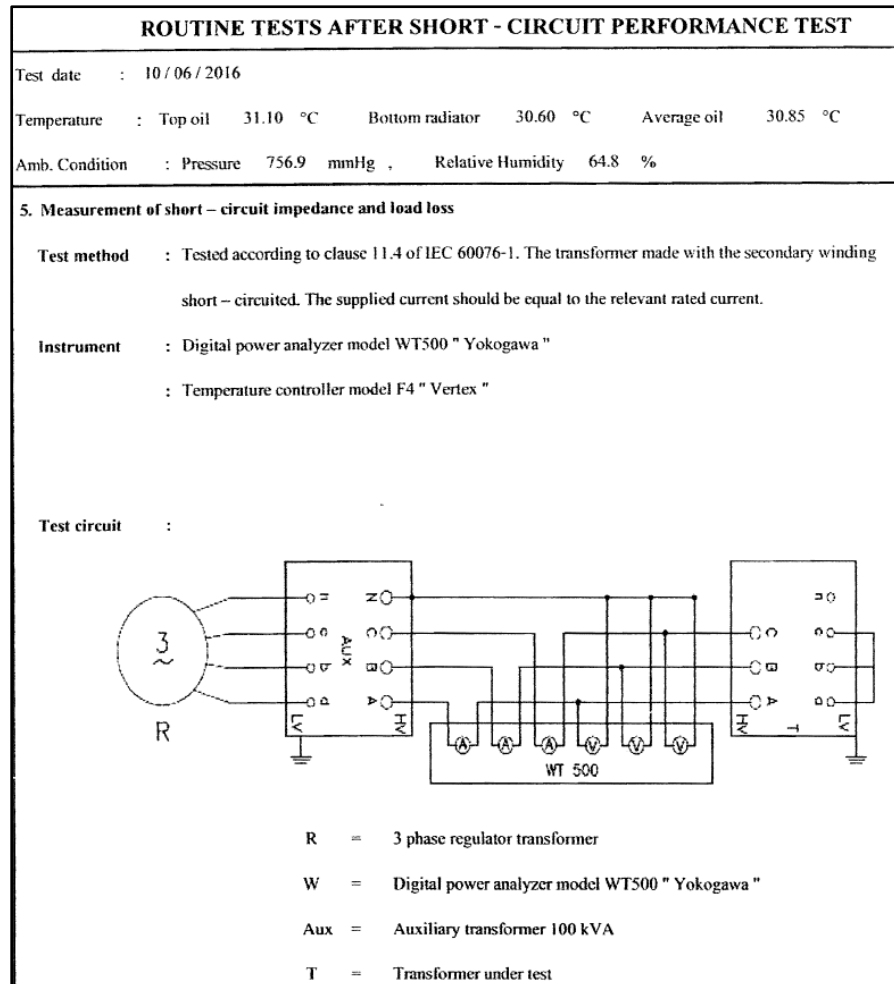
ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST								
Test date : 10 / 06 / 2016								
Temperature : Top oil 31.20 °C Bottom radiator 30.70 °C Average oil 30.95 °C								
Amb. Condition : Pressure 756.8 mmHg , Relative Humidity 63.4 %								
Test record :								
Mean voltage U' (V)	a	398.42	b	399.48	c	402.25	Average	400.05
RMS voltage U (V)	a	397.86	b	398.85	c	401.75	Average	399.49
RMS current (A)	a	0.5202	b	0.5814	c	0.5565	Average	0.5527
Exciting current (%)	a	0.225	b	0.252	c	0.241	Average	0.239
No – load losses from testing at ambient temperature (W) : P_m							338.47	
Voltmeter reading difference : $d = (U' - U) / U'$							0.001407	
Corrected no – load losses (W) : P_o							338.95	
Requirement : The test voltage wave shape is satisfactory if d is within 3%.								

รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการทดสอบการวัดค่า no-load loss

และกระแสหลังทำการทดสอบฯ [8]

7) Measurement of short-circuit impedance and load loss

วัดค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวด หลังจากทำการทดสอบฯ ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.27 และตัวอย่างผลการทดสอบดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 วงจรทดสอบ

Measurement of short-circuit impedance and load loss [8]

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST					
Test date : 10/06/2016					
Temperature : Top oil 31.10 °C Bottom radiator 30.60 °C Average oil 30.85 °C					
Amb. Condition : Pressure 756.9 mmHg , Relative Humidity 64.8 %					
Test record :					
Tap position		1	3	5	
Voltage at testing	30.85 °C (V)	896.700	844.100	802.000	
Current at testing	30.85 °C (A)	3.9166	4.1208	4.4141	
Load losses at testing	30.85 °C (W)	1667.100	1710.200	1811.700	
Voltage at rated current	30.85 °C (V)	915.557	860.107	803.055	
Load losses at rated current	30.85 °C (W)	1737.953	1775.678	1816.469	
DC losses at	30.85 °C (W)	1585.518	1622.439	1664.295	
DC losses at	75.00 °C (W)	1848.826	1891.879	1940.687	
Stray losses at	30.85 °C (W)	152.435	153.239	152.174	
Stray losses at	75.00 °C (W)	130.725	131.415	130.502	
Load losses at	75.00 °C (W)	1979.552	2023.294	2071.188	
R at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)	41.262	38.253	35.340	
R at 75.00 °C	(%)	1.237	1.265	1.294	
X at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)	127.123	113.400	100.216	
X at 75.00 °C	(%)	3.812	3.749	3.671	
Z at 75.00 °C (Equivalent star connection)	(Ω)	133.651	119.678	106.264	
Z at 75.00 °C	(%)	4.007	3.956	3.892	
X / R		3.081	2.964	2.836	
Peak factor		1.951	1.932	1.911	

รูปที่ 3.28 ตัวอย่างผลการทดสอบ

short-circuit impedance and load loss หลังทำการทดสอบฯ [8]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

8) Oil dielectric strength test

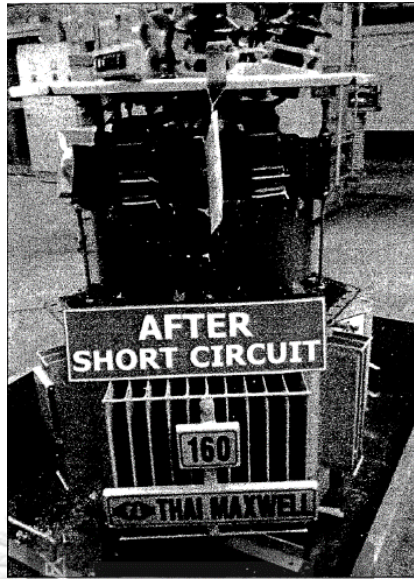
ทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า หลังทำการทดสอบฯ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.29

ROUTINE TESTS AFTER SHORT - CIRCUIT PERFORMANCE TEST						
Test date : 10/06/2016						
Temperature : Top oil 31.30 °C Bottom radiator 31.10 °C Average oil 31.20 °C						
Amb. Condition : Pressure 756.7 mmHg , Relative Humidity 61.3 %						
8. Oil dielectric strength test						
Test method : Tested according to IEC 60156						
Instrument : Oil dielectric test model OTS60 AF " Megger "						
Test record :						
Times						Average
1	2	3	4	5	6	
37.6 kV	30.0 kV	44.5 kV	36.9 kV	36.1 kV	41.0 kV	37.7 kV
Results : The results are for information only.						

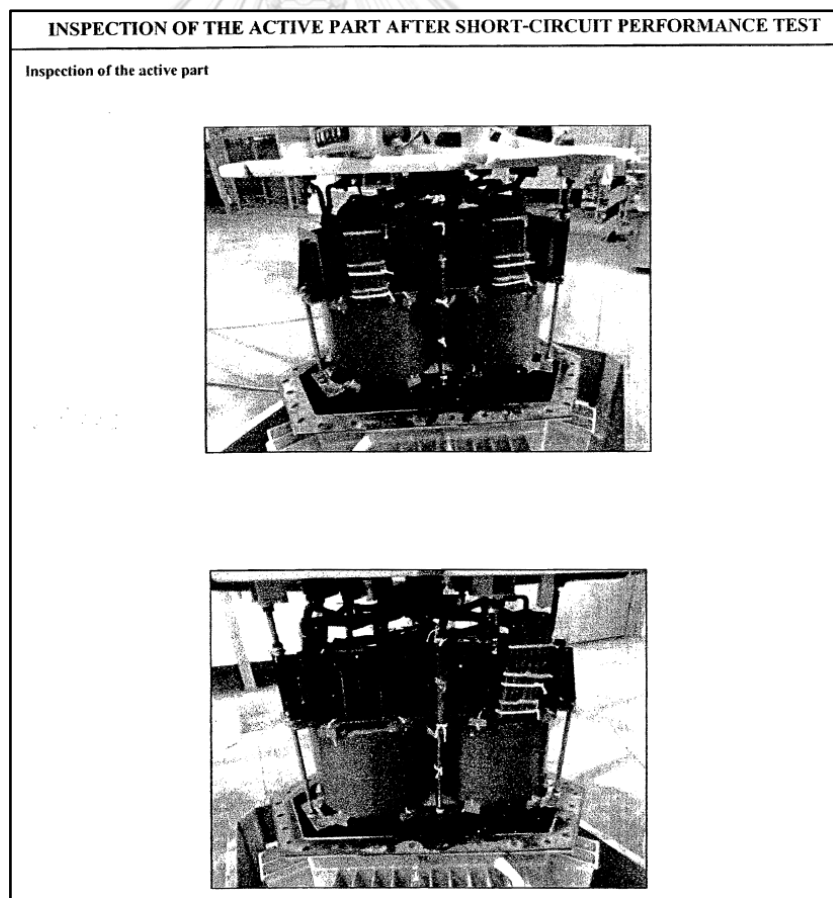
รูปที่ 3.29 ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน
ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า หลังทำการทดสอบฯ [8]

(5) Inspection of the active part after short-circuit performance test

ทำการเปิดถังหม้อแปลงไฟฟ้าออก (Untanked) และตรวจสอบ Active parts ภายในว่ามีสิ่งใดผิดปกติ หรือเสียหายหรือไม่ เช่น ตรวจสอบความผิดปกติแกนเหล็ก และขดลวด, จุดเชื่อมต่อต่างๆ, ตัวรองรับโครงสร้าง เป็นต้น ดังตัวอย่างรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.30 เปิดฝาถังหม้อแปลงไฟฟ้าออก (Untanked) [8]



รูปที่ 3.31 ตรวจสอบความผิดปกติของ Active part หลังการทดสอบฯ [8]

บทที่ 4

ทฤษฎี และความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงความรู้พื้นฐาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อคือ เกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันตกชั่วขณะ และการคำนวณ การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และการคำนวณกระแสลัดวงจร และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นของหม้อแปลงไฟฟ้าในทุกพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV ก่อนที่จะทำการทดสอบฯ เพื่อการกำหนดค่าเกณฑ์

4.1 เกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5]

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 kV (1.00 p.u.)	120.7 kV (1.05 p.u.)	109.2 kV (0.95 p.u.)	126.5 kV (1.10 p.u.)	103.5 kV (0.90 p.u.)
69 kV (1.00 p.u.)	72.4 kV (1.05 p.u.)	65.5 kV (0.95 p.u.)	75.9 kV (1.10 p.u.)	62.1 kV (0.90 p.u.)
33 kV (1.00 p.u.)	34.6 kV (1.05 p.u.)	31.3 kV (0.95 p.u.)	36.3 kV (1.10 p.u.)	29.7 kV (0.90 p.u.)
22 kV (1.00 p.u.)	23.1 kV (1.05 p.u.)	20.9 kV (0.95 p.u.)	24.2 kV (1.10 p.u.)	19.8 kV (0.90 p.u.)
380 V (1.00 p.u.)	418 V (1.10 p.u.)	342 V (0.90 p.u.)	418 V (1.10 p.u.)	342 kV (0.90 p.u.)
220 V (1.00 p.u.)	240 V (1.10 p.u.)	200 V (0.90 p.u.)	240 V (1.10 p.u.)	200 kV (0.90 p.u.)

4.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.2.1 นิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า

นิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐานสากล IEC standard และ IEEE standard ได้ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้าไว้มีดังต่อไปนี้ คือ

- (1) IEEE 1159 [14] defines a Power Quality as “A wide variety of electromagnetic phenomena that characterize the voltage and current at a given time and at a given location on the power system”
- (2) IEC 61000-4-30 [15] defines a Power Quality as “Characteristics of the electricity at a given point on an electrical system, evaluated against a set of reference technical parameters”
- (3) IEEE 1100 [16] defines a Power Quality as “The concept of powering and grounding electronic equipment in a manner that is suitable to the operation of that equipment and compatible with the premise wiring system and other connected equipment”

4.2.2 เหตุผลสำคัญที่ทำให้ต้องพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า [17]

- (1) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์ที่เคยใช้ในอดีต อีกทั้งยังมีการควบคุมโดยการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งเปลี่ยนแปลงตามสิ่งรบกวนหลายชนิดที่เกิดขึ้นในระบบได้ง่าย
- (2) ความสำคัญ และความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้มีการนำอุปกรณ์ที่จะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น มอเตอร์แบบปรับความเร็วได้ และตัวเก็บประจุแบบขนานที่ใช้ในการแก้ตัวประกอบกำลัง (Power factor) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานผลลัพธ์ที่ตามมา คือ เป็นการเพิ่มระดับของฮาร์มอนิกส์ ในระบบไฟฟ้ากำลัง และหลายฝ่ายที่เกี่ยวข้องเริ่มวิตกกังวลผลกระทบต่อความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าในอนาคต
- (3) การที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับข้อมูลปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เช่น ปัญหาจากการเกิดไฟฟ้าดับ การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ภาวะชั่วขณะของการสวิตช์มากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตไฟฟ้าต้องปรับปรุงการจ่ายไฟให้มีคุณภาพมากขึ้น

- (4) ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบเน็ตเวิร์ก ซึ่งเมื่ออุปกรณ์ใดก็ตามเกิดความผิดพลาดจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นในระบบด้วย

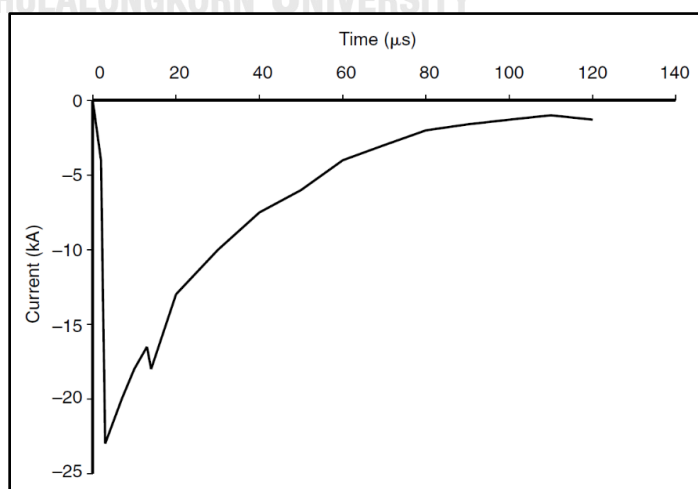
4.2.3 สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุ ดังต่อไปนี้

- (1) เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น พายุ
- (2) เกิดจากสภาวะความผิดปกติ (Faults) ทางไฟฟ้า ทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- (3) เกิดจากการสวิตชิงอุปกรณ์ในระบบ
- (4) เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ในระบบอุตสาหกรรม
- (5) เกิดจากการต่อลงดินอย่างไม่ถูกต้อง

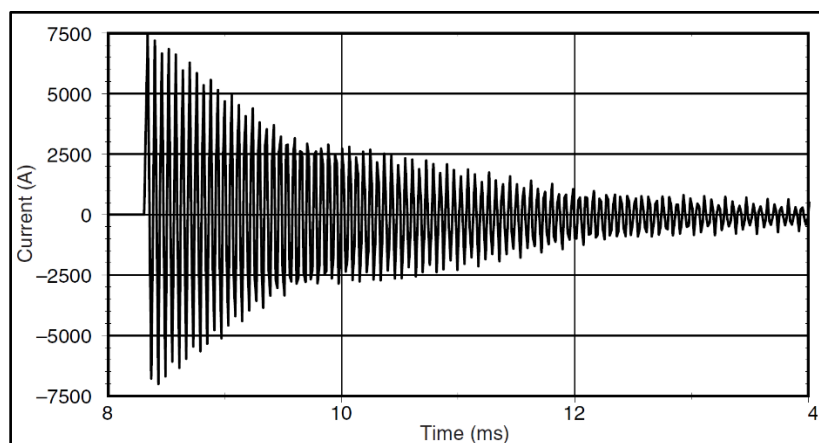
4.2.4 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า [17]

- (1) ภาวะชั่วคราว (Transient) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใดจากสภาพปกติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ
 - 1) อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulse Transient) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สูงมากเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด เป็นการเปลี่ยนแปลงในเวลาที่ไม่ใช่ความถี่ระบบ (50 Hz) ในสภาวะ steady-state ของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่างไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง (ชั่วคราวหรือชั่วลบ) ตัวอย่างแสดง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวจากกระแสฟ้าผ่า [17]

- 2) ออสซิลเลทชั่วคราว (Oscillatory Transient) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สูงมาก เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด เป็นการเปลี่ยนแปลงในควมถี่ที่ไม่ใช่ความถี่ระบบ (50 Hz) ในสภาวะ steady-state ของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่างไปในทั้งสองทิศทาง (ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ) ตัวอย่างแสดง ดังรูปที่ 4.2

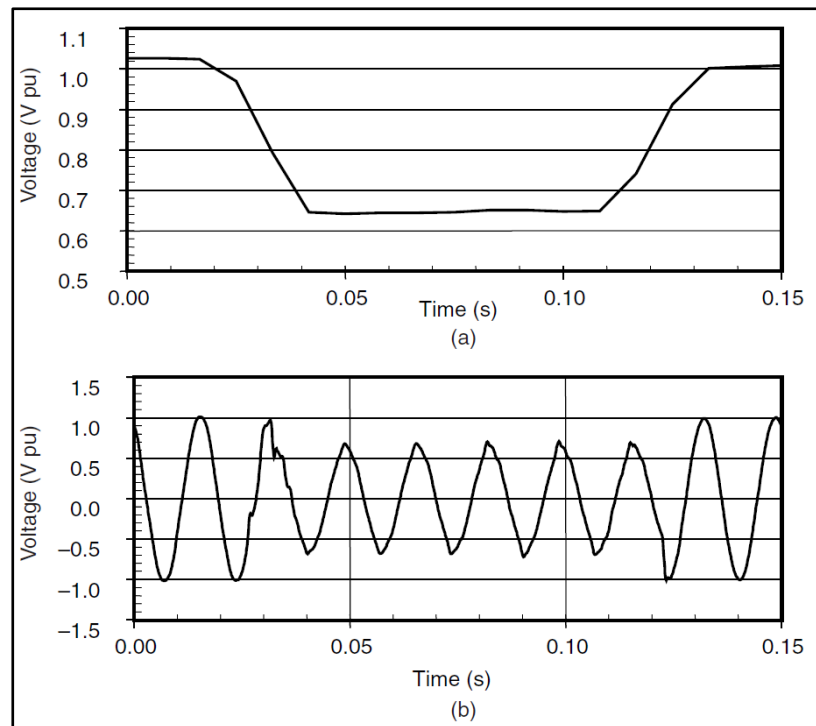


รูปที่ 4.2 กระแสออสซิลเลทชั่วคราว โดยการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบ back-to-back [17]

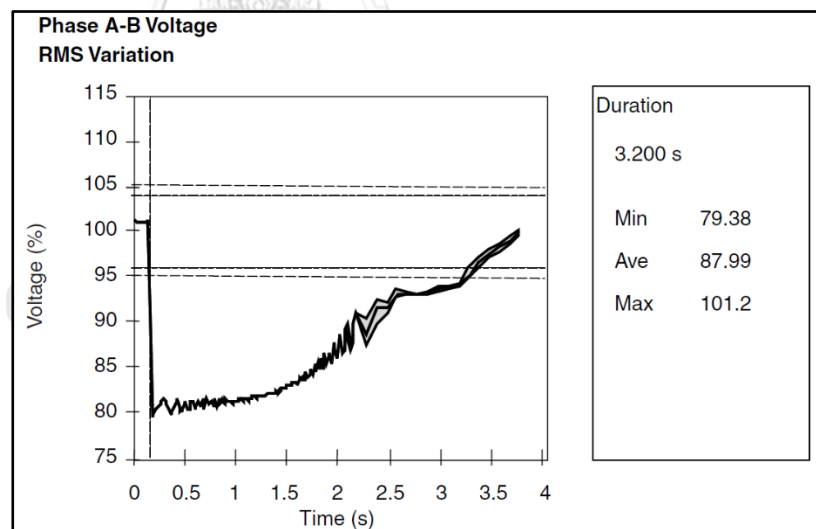
- (2) การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation) เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้า (rms) ในช่วงระยะเวลาเกิน 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงดันตก (Undervoltage) แรงดันเกิน (Overvoltage) และไฟดับถาวร (Sustained Interruptions) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 2.1) แรงดันตก (Undervoltage) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.9 p.u. ในช่วงระยะเวลานานกว่า 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลของการสวิตชิงโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ ดังนั้นอาจทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เนื่องจากรับภาระเกิน (Overload)
- 2.2) แรงดันเกิน (Overvoltage) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ซึ่งมีขนาดมากกว่า 1.1 p.u. ในช่วงระยะเวลานานกว่า 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าระบบ หรือการปรับแก้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับระบบ ทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบ

- 2.3) ไฟดับถาวร (Sustained Interruptions) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่ลดลงเป็น 0 p.u. ในช่วงระยะเวลาเกินกว่า 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจรออกจากแหล่งจ่ายไฟอย่างถาวร เช่น การ Lockout ของรีโกลสเซอร์ที่ตัดวงจรออกจากระบบอย่างถาวร เมื่อพบว่าความผิดปกตินั้นเป็นแบบถาวร (Permanent fault)
- (3) การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า (Fault) ทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับช่วงสั้นๆ (Interruption), แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag หรือ Voltage Dip), แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) และ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้
- 3.1) ไฟดับช่วงสั้นๆ (Interruption) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 p.u. ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า (Fault) ในระบบ แต่อาจพบว่าเป็นความผิดปกติแบบชั่วคราว (Temporary fault) ทำให้อุปกรณ์ป้องกันกลับมาเชื่อมต่อวงจรดังเดิม เช่น การทำงานของรีโกลสเซอร์ เป็นต้น
- 3.2) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag or Voltage Dip) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ลดลงระหว่าง 0.1-0.9 p.u. ในช่วงระยะเวลา 0.5 ไซเคิล - 1 นาที ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากเฟสที่เกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า (Fault) ดังรูปที่ 4.3 ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) มีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.65 p.u. ในช่วงเวลา 5 ไซเคิล และรูปที่ 4.4 เกิดแรงดันตกชั่วขณะ เนื่องจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) จะมีกระแสขณะสตาร์ทสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสปกติ ทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อแหล่งจ่ายเกิดการดำเนินงานผิดพลาด หรือหยุดทำงานได้



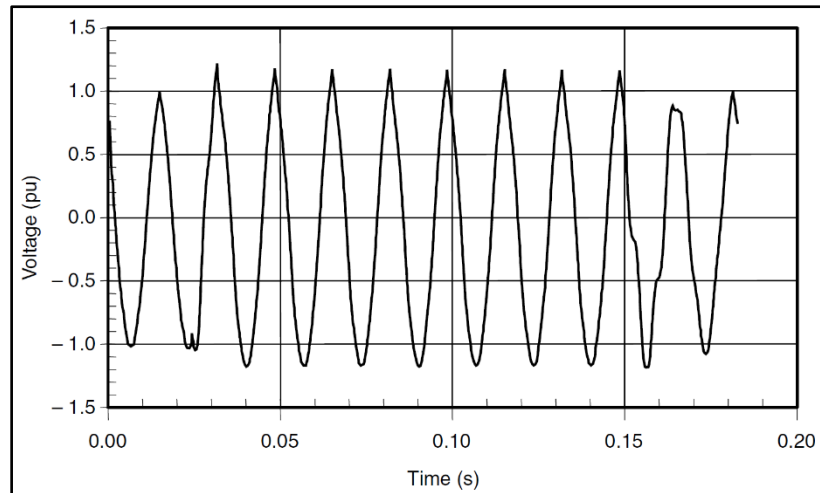
รูปที่ 4.3 แรงดันตกชั่วขณะ จากสาเหตุ SLG fault [17]



รูปที่ 4.4 แรงดันตกชั่วขณะ จากสาเหตุการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ [17]

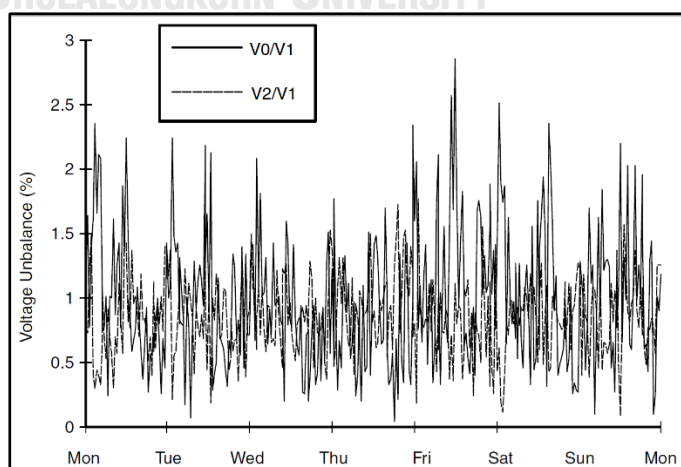
- 3.3) แรงดันเกินชั่วขณะ (Swells) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 – 1.8 p.u. ในช่วงระยะเวลา 0.5 ไซเคิล – 1 นาที ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีสาเหตุเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า (Fault) โดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือการสวิตชิงคาปาซิเตอร์ขนาด

ใหญ่เข้าระบบ ทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ มีผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย หรือทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟทำงานผิดพลาดหรือหยุดทำงาน



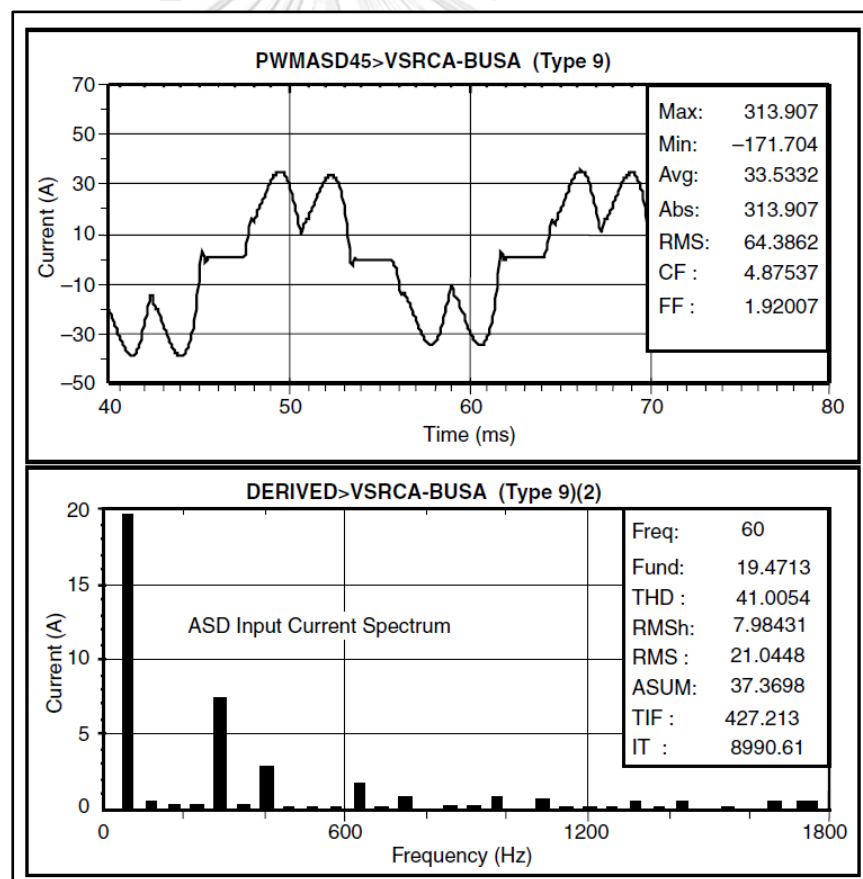
รูปที่ 4.5 แรงดันเกินชั่วขณะ จากสาเหตุ SLG fault [17]

- (4) แรงดันไม่สมดุล (Voltage Imbalance or Voltage unbalance) คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบ 3 เฟส ในแต่ละเฟสมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน หรือแต่ละเฟสมีมุมเปลี่ยนไปจาก 120 องศา ซึ่งสาเหตุเกิดจากความไม่สมดุลของโหลดแต่ละเฟส สามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนระหว่าง zero-sequence กับ positive-sequence (V_0/V_1) และอัตราส่วนระหว่าง negative-sequence กับ positive-sequence (V_2/V_1) ตัวอย่างแนวโน้มแรงดันไม่สมดุลในสายป้อนที่อยู่อาศัยแห่งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.6



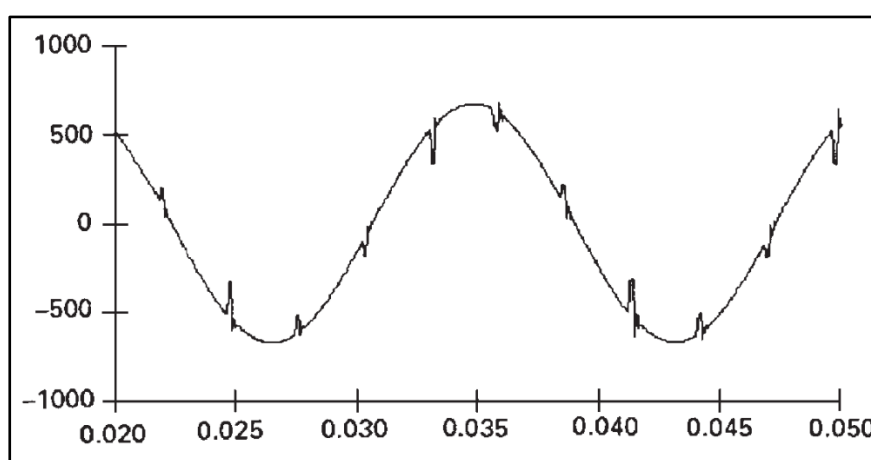
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างแนวโน้มแรงดันไม่สมดุลในสายป้อนที่อยู่อาศัยแห่งหนึ่ง [17]

- (5) ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (Waveform Distortion) คือ การเบี่ยงเบนของรูปคลื่นไซน์ในสถานะคงตัวที่ความถี่ระบบ (50 Hz)
- (6) องค์ประกอบไฟตรง (DC offset) คือ การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟตรงปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนของ geomagnetic disturbance หรือ asymmetry of electronic power converter เช่น half-wave rectifier
- (7) ฮาร์โมนิก (Harmonic) คือ รูปคลื่นไซน์แรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และเป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน (ความถี่มูลฐานทั่วไปคือ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์) รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนี้สามารถแยกออกเป็นผลรวมของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิกได้ ฮาร์โมนิกเกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดแบบไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า ตัวอย่างรูปคลื่นของกระแส และฮาร์โมนิกสเปกตรัม สำหรับกระแสเข้า ASD ดังรูปที่ 4.7



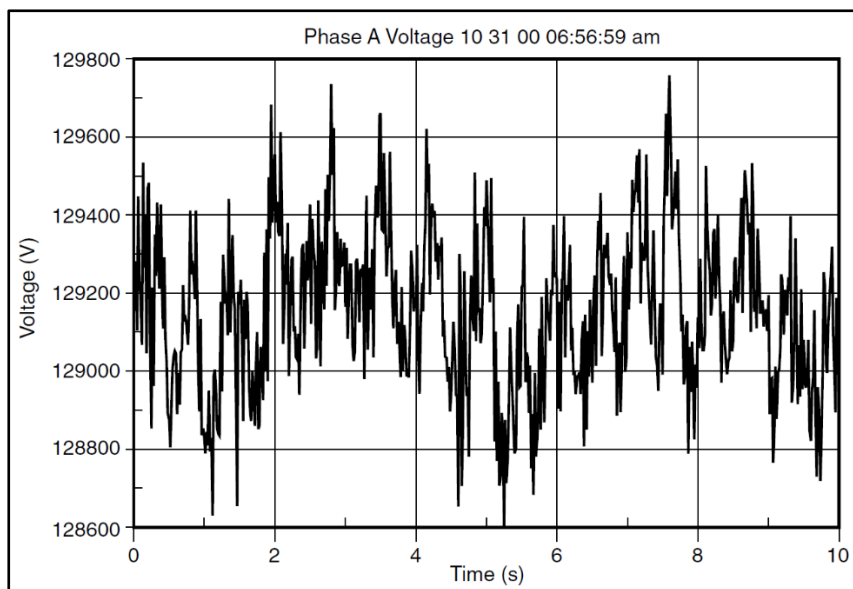
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของกระแส และฮาร์โมนิกสเปกตรัม สำหรับกระแสเข้า ASD [17]

- (8) อินเทอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic) คือ รูปคลื่นไซน์แรงดันหรือกระแสที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่า และไม่เป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน (ความถี่มูลฐานทั่วไปคือ 50 หรือ 60 เฮิรตซ์) เช่น 103 Hz, 148 Hz เป็นต้น
- (9) คลื่นรอยบาก (Notching) คือ สิ่งรบกวนทางแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะต่อเนื่อง ซึ่งสาเหตุเกิดจากการการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เมื่อกระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันรอยบากที่มีสาเหตุมาจาก 3 เฟสคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันรอยบากที่มีสาเหตุมาจาก 3 เฟสคอนเวอร์เตอร์ [17]

- (10) สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ จะมีความถี่ต่ำกว่า 200 kHz ปะปนบนสัญญาณแรงดัน หรือกระแสในสายเฟส หรือพบในสายนิวทรัล หรือสายสัญญาณ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้อง สัญญาณรบกวนจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ไมโครคอมพิวเตอร์ และชุดคอนโทรลเลอร์ที่สามารถโปรแกรมได้ เป็นต้น
- (11) แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดันไฟฟ้า (rms) ซึ่งมีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.9-1.1 p.u. (ANSI C84.1) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ต้องการกระแสสูง และคงที่ เช่น เต้าหลอมแบบอาร์ค ส่งผลทำให้แรงดันเกิดการกระเพื่อม ส่งผลทำให้อุปกรณ์ในระบบเสียหาย เช่น On-load-tap-changer ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะทำงานหนัก และอายุการใช้งานจะน้อยลง รวมถึงการกระพริบของหลอดไฟ (Flicker) ตัวอย่างแรงดันกระเพื่อมที่มีสาเหตุมาจากการใช้เต้าหลอมแบบอาร์ค ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แรงดันกระเพื่อมที่มีสาเหตุมาจากการใช้เตาหลอมแบบอาร์ค [17]

- (12) การแปรเปลี่ยนของความถี่ระบบ (Power Frequency Variation) คือ ปรากฏการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีค่าเปลี่ยนไปจากความถี่ระบบ (50 Hz) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการทำงานผิดพลาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ หรือมีการหลุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบ ทำให้มีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์กับความถี่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

4.3 แรงดันตกชั่วขณะ และการคำนวณ

4.3.1 นิยามของแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) [14] คือ การลดลงของแรงดันค่ารากกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง 0.1 – 0.9 เปรอ์ยูนิต ที่ความถี่ระบบ ในช่วงเวลา 0.5 ไซเคิล ถึง 1 นาที

4.3.2 การจำแนกประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ

การจำแนกประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE 1159 [14] ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การจำแนกประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE 1159

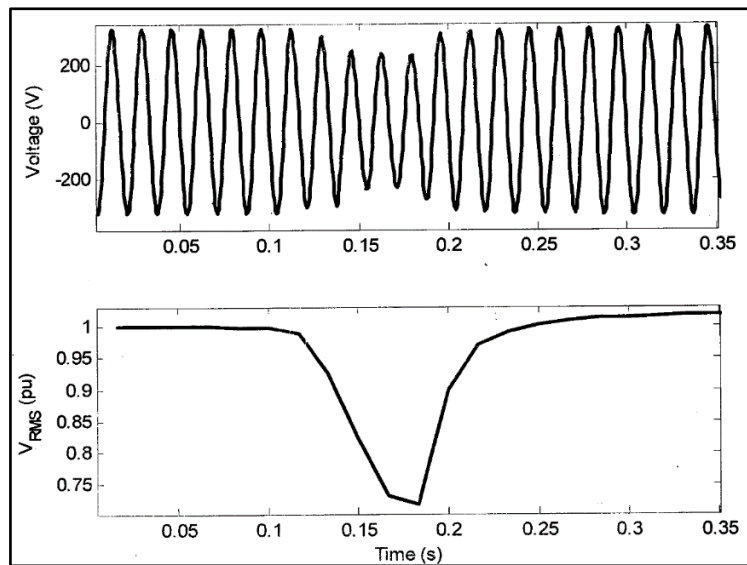
Type of Sag	Duration	Magnitude
Instantaneous	0.5 – 30 cycles	0.1 – 0.9 p.u.
Momentary	30 cycles – 3 s.	0.1 – 0.9 p.u.
Temporary	3 s. – 1 min.	0.1 – 0.9 p.u.

4.3.3 สาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะ

สาเหตุของแรงดันตกชั่วขณะ (Sources of Voltage Sags) [18] มีดังต่อไปนี้

(1) ความผิดปกติในระบบ (System fault)

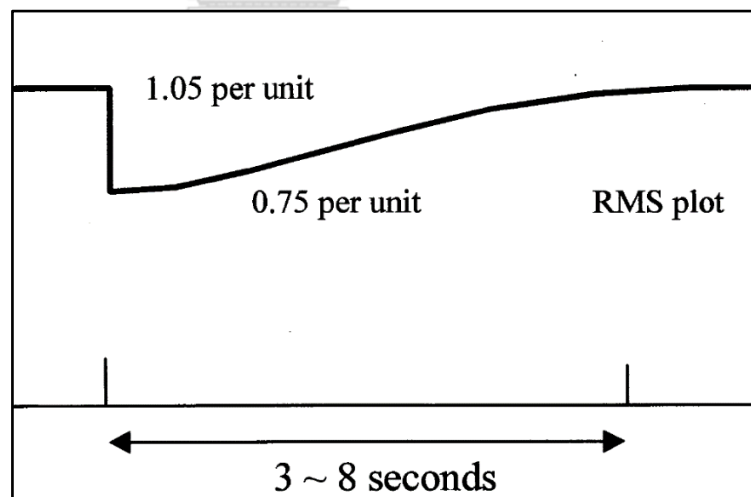
การเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า หรือการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งใดๆ ในระบบส่งไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้าถือว่าเป็นสาเหตุหลักของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) การเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าจะก่อให้เกิดกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบฯ เพิ่มขึ้น ซึ่งนี่คือผลลัพธ์ที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) ที่เกือบทุกจุดในระบบฯ



รูปที่ 4.10 รูปแบบของคลื่นแรงดันตกชั่วขณะ และ RMS plot ที่เกิดจากความผิดปกติ

(2) การต่อเข้ามาของโหลดไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Switching on Large Loads)

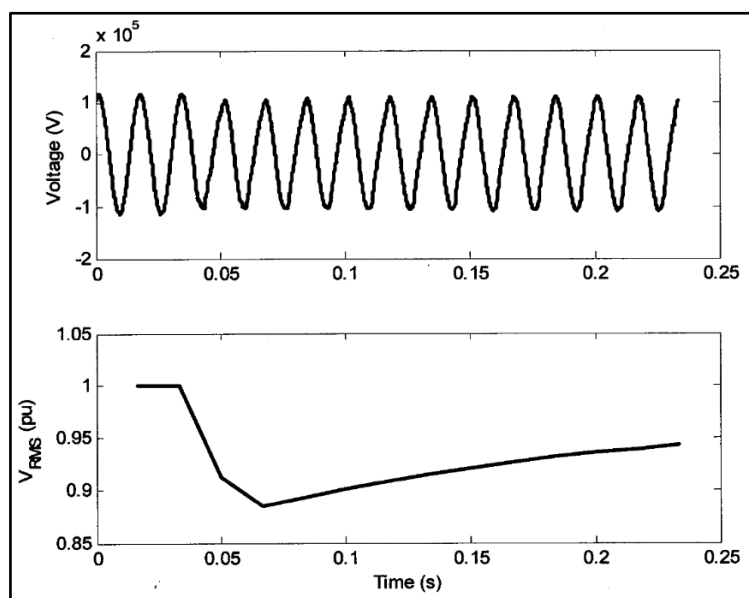
ตัวอย่างของโหลดไฟฟ้าขนาดใหญ่คือ การสตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ เพราะการเริ่มสตาร์ทของมอเตอร์จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีขนาดสูงขึ้น 6 – 10 เท่าของกระแสเต็มพิกัด



รูปที่ 4.11 คุณสมบัติแรงดันตกชั่วขณะโดยทั่วไปของการสตาร์ทมอเตอร์

(3) การเริ่มทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Energization)

ขณะหม้อแปลงเริ่มทำงาน แกนเหล็กของหม้อแปลงสามารถเกิดการอิ่มตัว ซึ่งส่งผลให้เกิดกระแสอินรัช (Inrush current) เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ 4.12 รูปแบบคลื่นแรงดันตกชั่วขณะโดยทั่วไป และ RMS plot จากการเริ่มทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

4.3.4 ผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะ

ผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะ (Effects of Voltage Sags) [18] มีดังต่อไปนี้

การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ จะส่งผลทำให้อุปกรณ์บางชนิดทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงาน หรือความเสียหายของอุปกรณ์ได้ อาทิเช่น

(1) AC Relays and Contactors

การเกิด Voltage sag สามารถเป็นสาเหตุให้ Relays และ Contactors เกิดภาวะสัญญาณขาดหาย เมื่อแรงดันลดลงต่ำกว่า 80% ของสภาวะปกติ เป็นเวลามากกว่า 1 ไชเคิล

(2) Induction motor

การลดลงของทอร์คในมอเตอร์ประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง และทำให้กระแสในมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหลักทำให้มอเตอร์เกิดความร้อน

(3) Lighting

การรบกวนต่อการทำงานของไฟถนนซึ่งถ้าแรงดันตกลงเกินร้อยละ 90 จะทำให้หลอดไฟถนนประเภท High-pressure discharge lamps ต้องเริ่มการทำงานใหม่ โดยจะส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวไม่มีแสงสว่างไปชั่วขณะ

(4) AC adjustable speed drives (ASDs)

ASDs จะถูกป้อนแรงดันจากวงจรสามเฟสเรกติไฟเออร์ (diode bridges) โดยค่าแรงดันที่ DC bus จะมากกว่า หรือน้อยกว่าค่าคงที่ ดังนั้นที่ DC bus จะถูกติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าตก (Under voltage) และแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) มาให้เพื่อป้องกันไดโอดจากกระแสอินรัช (Inrush current) ถ้าแรงดันตกมีค่ามากเกินไป จะเกิดสัญญาณทริบ (trip signal) จนทำให้ Capacitor bus ไม่สามารถรักษาแรงดันไว้ได้ในเวลาหนึ่ง ดังนั้น ASDs จึงไม่สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้

(5) Consumer Electronics

อุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภท เช่น personal computers, video recorders, electronic alarms and microwave ovens สามารถรีเซ็ตตัวเอง เนื่องจากการลดลงของแรงดันไฟฟ้าในระยะสั้น

4.3.5 การตอบสนองของอุปกรณ์ในระบบ ในสภาวะเกิดการผิดพลาด

การตอบสนองของอุปกรณ์ในระบบ ในสภาวะเกิดการผิดพลาด (Component responses under fault condition) [18] มีดังต่อไปนี้

(1) องค์ประกอบไฟฟ้าแบบพาสซีฟ (Passive elements) เช่น สายไฟ (Lines), สายเคเบิล (Cables) และหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers) พิจารณาในสภาวะการทำงานแบบ Steady-state

(2) โหลดไฟฟ้า (Load) ในช่วง Steady state (ก่อนเกิดแรงดันตก) และที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ของโหลดได้ดังนี้

$$Z_L = \frac{|V_L|^2}{(P_L + jQ_L)^*} = \frac{|V_L|^2}{P_L - jQ_L} \quad (4.1)$$

(3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ (Generator and Motor) ในระหว่างการเกิดความผิดพลาดหรือขณะเกิดทรานเซียน (Transient condition) สามารถคำนวณแรงดันตกชั่วขณะได้ดังนี้

$$E' = V + IZ' \quad (4.2)$$

โดยที่ E' คือ แรงดันตกชั่วขณะ

Z' คือ transient short circuit impedance

V คือ แรงดันไฟฟ้าก่อนการถูกรบกวน

I คือ กระแสไฟฟ้าได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

4.3.6 การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะ

การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะ (Sag Calculation) [18] แบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

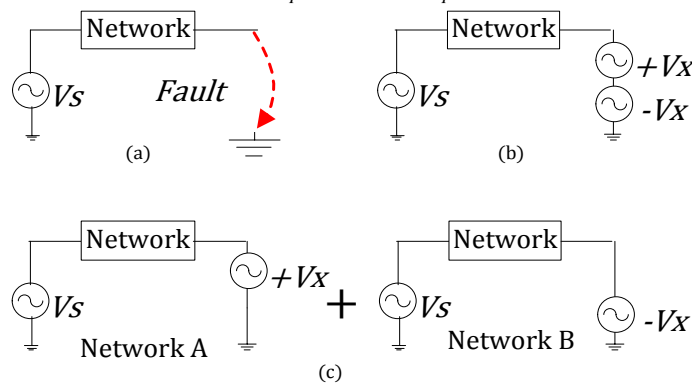
(1) Simplified Method

การคำนวณแรงดันตกด้วย Simplified method ใช้หลักการ Super position โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานว่าแรงดันขณะก่อนเกิดการลัดวงจรมีค่า 1 p.u. สำหรับทุกๆบัส
2. เปิดวงจรโหลด และละเลยส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ทุกตัว
3. นำหลักการ Super position มาใช้ โดยแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน จากรูปที่ 1 Network A คือเงื่อนไขก่อนเกิดความผิดปกติ (Pre fault conditions) Network B คือ Passive network โดยมีหนึ่งแหล่งกำเนิดเป็น Negative
4. คำนวณค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบ
5. แก้มการของระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันเพียงแหล่งเดียวโดยอาศัยหลักการแบ่งแรงดัน
6. คำนวณแรงดันหลังเกิดการลัดวงจรและแรงดันตกที่ทุกๆบัสโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$V_{post} = V_{NetworkA} + V_{NetworkB} \quad (4.3)$$

$$V_{Sag} = \frac{V_{pre} - V_{post}}{V_{pre}} = \frac{-V_B}{V_{pre}} \times 100\% \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.13 การพิจารณาระบบ โดยอาศัยหลักการ Super position

(2) Z_{BUS} method

การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะโดยวิธี Z_{BUS} method ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างเมทริกซ์ [Y] ในหน่วยเปอร์ยูนิต จากวงจรที่ต้องการวิเคราะห์
2. ทำการอินเวอร์สเมทริกซ์ [Y] เป็นเมทริกซ์ [Z]
3. พิจารณาฟอลต์เกิดขึ้นที่บัสใด (บัส f) ให้สนใจที่คอลัมน์นั้น เพื่อการคำนวณแรงดันขณะเกิดฟอลต์ที่บัสนั้น
4. ใช้ข้อมูลแรงดันที่บัสต่างๆ ก่อนเกิดฟอลต์ (V_m^{pf}) จากการทดสอบ Power flow
5. กำหนดให้ m คือ ชื่อบัสใดๆ เช่น สมมุติมีทั้งหมด 4 บัส ดังนั้นบัส m (1,2,3 และ 4)
6. แรงดันที่ทุกๆ บัส m คือ

$$V_m = V_m^{pf} - \frac{Z_{mf}}{Z_{ff}} \quad (4.5)$$

(3) Detailed Method

การคำนวณแรงดันตกด้วย Detailed Method มีขั้นตอนดังนี้

1. เขียนแผนภาพอิมพีแดนซ์ (Impedance diagram)
2. แปลงโหลดในรูปของกำลังให้เป็นอิมพีแดนซ์
3. สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. แก้สมการหาแรงดันของระบบ
5. คำนวณดัชนีของแรงดันตกจาก

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{|V_{pre}| - |V_{post}|}{|V_{pre}|} \times 100\% \quad (4.6)$$

โดยที่ $\frac{\Delta V}{V}$ คือ Percent change of voltage magnitude

4.4 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และการคำนวณกระแสลัดวงจร

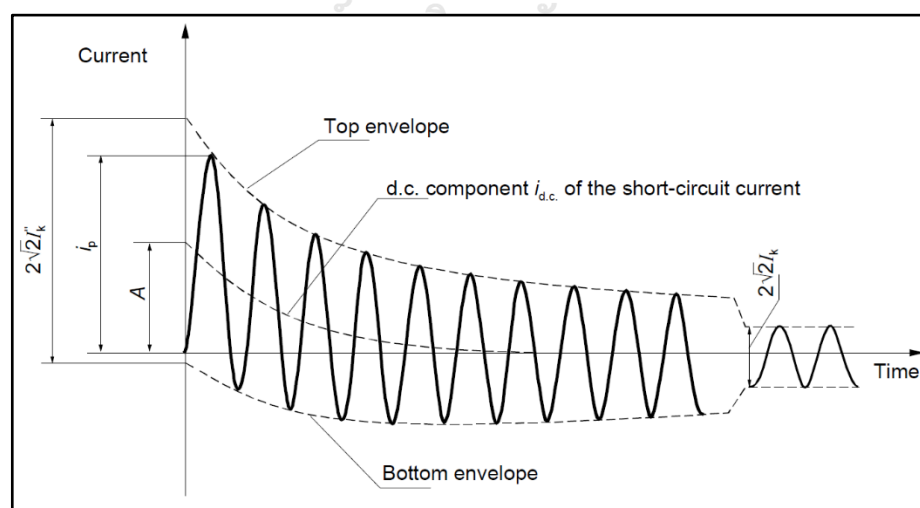
การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และการคำนวณกระแสลัดวงจร [19] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า การลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายแบบ และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ คือ การลัดวงจรแบบสมมาตร และการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร การลัดวงจรแบบสมมาตร คือ การลัดวงจรแบบสามเฟส ส่วนการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ได้แก่ การลัดวงจรระหว่างเฟส-เฟส เฟส-ดิน หรือ เฟส-เฟส-ดิน การศึกษาการลัดวงจรประกอบด้วย การคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นว่า มีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีเลย์ เป็นต้น ให้สามารถป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้อย่างสมบูรณ์ หรือเพื่อให้ผู้ออกแบบอุปกรณ์สามารถออกแบบ และผลิตอุปกรณ์ให้สามารถทนต่อค่ากระแสลัดวงจรค่าใดค่าหนึ่งได้เพื่อความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ และผู้ที่ต้องปฏิบัติงานกับอุปกรณ์นั้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ตู้สวิตช์เกียร์ รিংเมนยูนิท เซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น เนื่องจากกระแสลัดวงจรทำให้เกิด ความเครียดทางกล (Mechanical stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal stress) ขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การระเบิด แล้วเกิดเพลิงไหม้ได้

4.4.1 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร

มาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ IEC 60909 “ Short-circuit Current Calculation in Three-phase A.C. System ” ได้แบ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรออกเป็น 2 ประเภท คือ

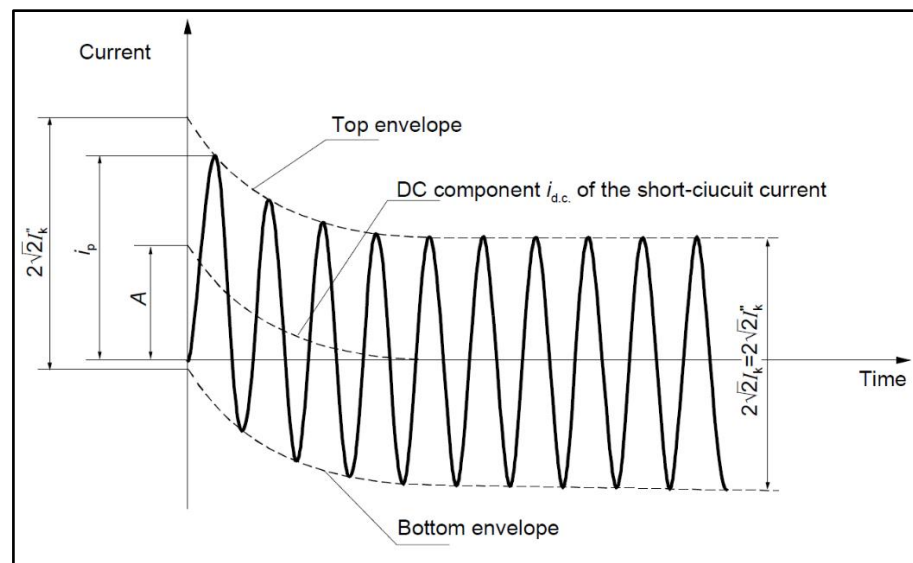
- (1) การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นของกระแสลัดวงจร ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [19]

- โดยที่ I_k'' : initial symmetrical short-circuit current
 i_p : peak short-circuit current
 I_k : steady-state short-circuit current
 $i_{d.c.}$: d.c. component of short-circuit current
 A : initial value of the d.c. component $i_{d.c.}$

(2) การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นของกระแสลัดวงจร ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [19]

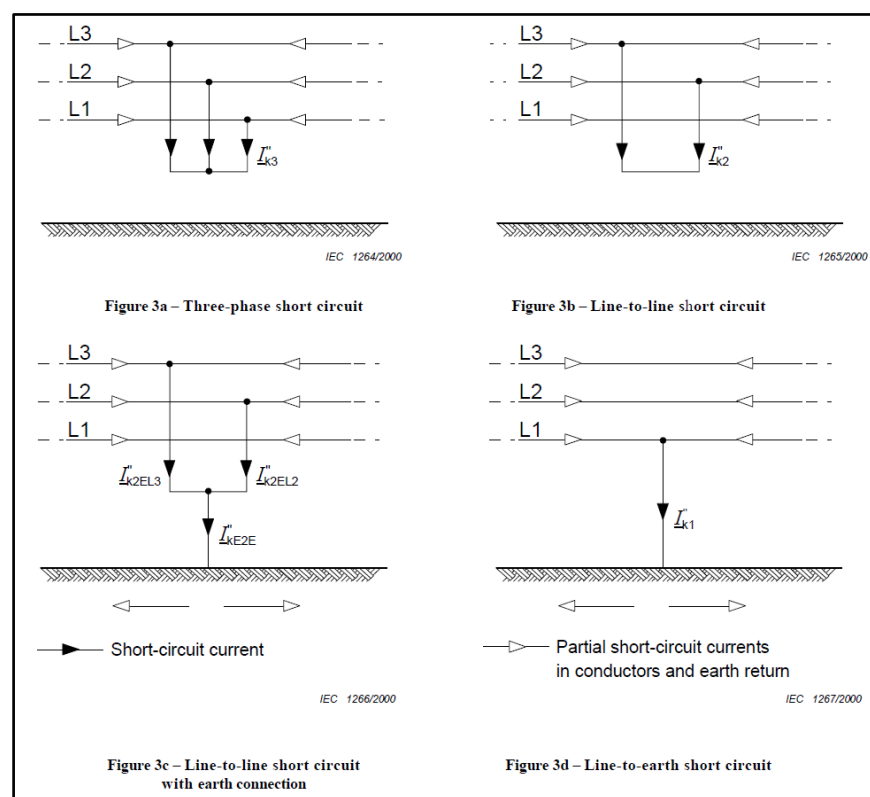
- โดยที่ I_k'' : initial symmetrical short-circuit current
 i_p : peak short-circuit current
 I_k : steady-state short-circuit current
 $i_{d.c.}$: d.c. component of short-circuit current
 A : initial value of the d.c. component $i_{d.c.}$

กรณีเมื่อเกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสลัดวงจรจะเป็นผลของกระแส 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

- 1) ส่วนประกอบ A.C. ซึ่งมีขนาดคงที่ตลอดระยะเวลาการเกิดลัดวงจร
- 2) ส่วนประกอบ D.C. ซึ่งมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และค่อยๆ มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

การลัดวงจรของระบบไฟฟ้าแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

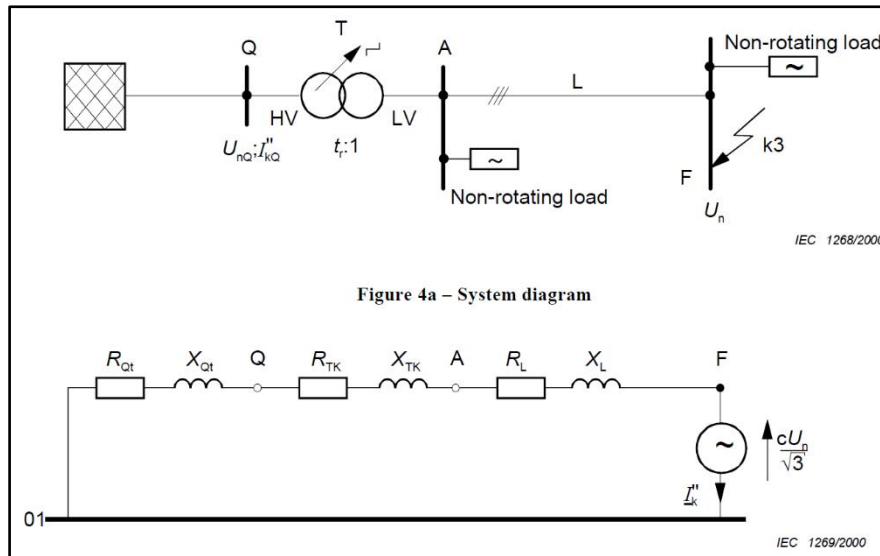
- 1) การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three-Phase Short Circuit)
- 2) การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน (Line to Line Short Circuit Without Earth Connection)
- 3) การลัดวงจรแบบสายถึงสายต่อกับดิน (Line to Line Short Circuit With Earth Connection)
- 4) การลัดวงจรแบบสายถึงดิน (Line to Earth Short Circuit)



รูปที่ 4.16 ชนิดของการลัดวงจร [19]

4.4.2 แหล่งจ่ายไฟสมมูล

การลัดวงจรที่จุดใดๆ ในวงจรไฟฟ้า ที่จุดนั้นอาจแทนด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent Voltage Source) ซึ่งจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ สำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟเป็นเครื่องจักรซิงโครนัส และเครื่องจักรอะซิงโครนัส จะต้องใส่ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมันด้วย ตัวอย่างแหล่งจ่ายไฟสมมูล แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ไดอะแกรมวงจรสมมูลของระบบ Positive sequence [19]

ที่ตำแหน่งลัดวงจร (F) แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$

โดย c คือ ตัวประกอบกำลังแรงดัน (Voltage factor) และ U_n คือ แรงดันของระบบที่ใช้ (L-L) ค่าตัวประกอบแรงดัน c จะมีค่าแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้า (Nominal voltage : U_n) ซึ่งมีรายละเอียด ดังรูปที่ 4.18

Nominal voltage U_n	Voltage factor c for the calculation of	
	maximum short-circuit currents $c_{\max}^{1)}$	minimum short-circuit currents c_{\min}
Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038, table I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Medium voltage >1 kV to 35 kV (IEC 60038, table III)	1,10	1,00
High voltage²⁾ >35 kV (IEC 60038, table IV)		

1) $c_{\max}U_n$ should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems.
2) If no nominal voltage is defined $c_{\max}U_n = U_m$ or $c_{\min}U_n = 0,90 \times U_m$ should be applied.
3) For low-voltage systems with a tolerance of +6 %, for example systems renamed from 380 V to 400 V.
4) For low-voltage systems with a tolerance of +10 %.

รูปที่ 4.18 Voltage factor (IEC 60909) [19]

ทางด้าน แรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \quad (4.7)$$

ทางด้าน แรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$t_r = HV / LV \quad (4.8)$$

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4.9)$$

ถ้าในกรณีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่ง Over Head Lines ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว

$$Z_Q = jX_Q \quad (4.10)$$

สำหรับกรณีอื่นๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน R_Q ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน

$$R_Q = 0.1X_Q \quad (4.11)$$

และ

$$X_Q = 0.995Z_Q \quad (4.12)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S_{kQ}'' ที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 24 kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ $S_{kQ}'' = 500 \text{ MVA}$

(2) ค่าอิมพีแดนซ์ของ Two-winding Transformer

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (4.13)$$

$$Z_T = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.14)$$

$$R_T = \frac{U_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (4.15)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.16)$$

โดยที่

U_{rT} : แรงดันพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงต่ำ

I_{rT} : กระแสพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงต่ำ

S_{rT} : กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

P_{krT} : กำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าในขดลวดที่กระแสพิกัด

U_{kr} : แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

U_{Rr} : ความต้านทานพิกัด ของแรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

สำหรับค่า Zero sequence impedance

$$Z_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T} \quad (4.17)$$

ของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น อาจหาได้จากผู้ผลิต แต่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งต่อแบบ Delta-Wye อาจใช้ค่าโดยประมาณดังนี้ คือ

$$R_{(0)T} = R_T \quad (4.18)$$

$$X_{(0)T} = 0.95X_T \quad (4.19)$$

ในการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า อาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ ซึ่งอาจทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป ดังนั้น ในการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุด จำเป็นต้องมีตัวคูณชดเชย คือ Impedance correction factors (K_T) [19] โดย

$$K_T = 0.95 \times \frac{C_{\max}}{1 + 0.6X_T} \quad (4.20)$$

$$Z_{TK} = K_T Z_T \quad (4.21)$$

(3) ค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead lines and cables impedance

$$\text{ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร } Z_L = R_L + jX_L \quad (4.22)$$

สามารถหาได้โดยการคำนวณจากข้อมูลต่างๆ ของตัวนำ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ และระยะห่างศูนย์กลางของตัวนำ

$$R_L' = \frac{\rho}{q_n} \quad (4.23)$$

โดยที่

R_L' : ค่าความต้านทานประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว ของสาย Overhead Lines ที่อุณหภูมิ 20 °C

q_n : พื้นที่หน้าตัดของสาย

ρ : ค่าความต้านทานจำเพาะ

หมายเหตุ ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีค่าดังต่อไปนี้

ทองแดง : $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

อลูมิเนียม : $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

อลูมิเนียมอัลลอย : $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

โดยที่ ค่า X'_L : (รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว) สามารถคำนวณได้จาก

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.24)$$

โดยที่

d : ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ ($d = \sqrt[3]{d_{L_1 L_2} d_{L_2 L_3} d_{L_3 L_1}}$)

r : รัศมีของตัวนำเดี่ยว ในกรณีของตัวนำ Bundle จะแทน r ด้วย $\sqrt[nrR^{n-1}]$

R : รัศมี Bundled

n : จำนวนตัวนำ Bundled

μ_0 : ค่าความซึมซาบได้ของสุญญากาศ ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}, H/m$)

4.4.4 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

โดยทั่วไปการลัดวงจรแบบนี้จะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด และจะเกี่ยวข้องกับเฉพาะ Positive Sequence Impedance เท่านั้น

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (4.25)$$

โดยที่

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$: แหล่งจ่ายไฟสมมูล

R_k : ผลรวมของความต้านทานที่อนุกรม

X_k : ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรม

Z_k : อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในกรณีของการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ว่า

$$I_b = I_k = I_k'' \quad (4.26)$$

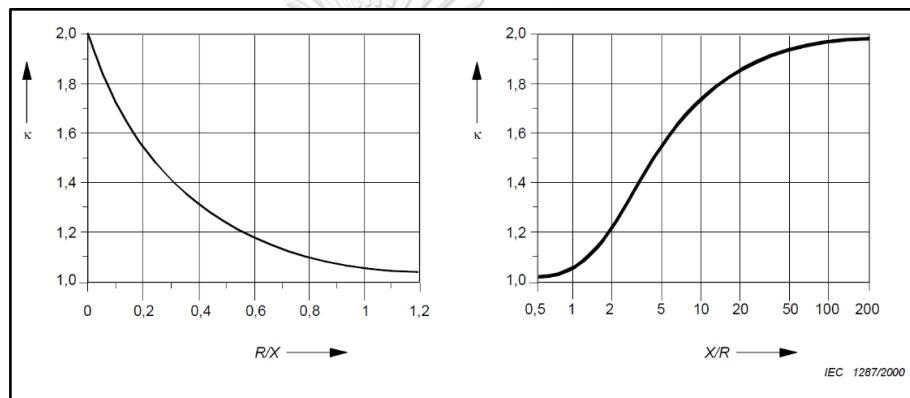
ดังนั้น i_p (กระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตร) มีค่าดังนี้

$$i_p = K\sqrt{2}I_k'' \quad (4.27)$$

โดยที่ค่า K ขึ้นอยู่กับค่า R/X หรือ X/R

ซึ่งค่า K ต้องได้มาจากรูปที่ 4.20 หรือมาจากสมการต่อไปนี้

$$K = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} \quad (4.28)$$



รูปที่ 4.20 กราฟตัวคูณค่า K [19]

4.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นของหม้อแปลงไฟฟ้าในทุกพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV ก่อนที่จะทำการทดสอบ

- (1) การหาค่า Z_t (อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}, \text{ in ohm } (\Omega) \text{ per phase} \quad (4.29)$$

โดยที่

z_t คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ตามตารางที่ 3.1

S_r คือ ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (MVA) ตามตารางที่ 3.1

- (2) การหาค่า $I_{FL,tr}$ (กระแสพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$I_{FL,tr} = \frac{S}{\sqrt{3}V_L}, (A) \quad (4.30)$$

- (3) การหาค่า R_t (ความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า) และ X_t (รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า) ในหน่วยโอห์ม (Ω)

$$R_t = \frac{P_{cu,loss}}{3(I_{FL,tr})^2}, (\Omega) \quad (4.31)$$

โดยที่

$P_{cu,loss}$ คือ ค่าความสูญเสียของขดลวด (Watt)

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}, (\Omega) \quad (4.32)$$

- (4) การหาค่า I_k'' (กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร)

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)}, kA(rms) \quad (4.33)$$

โดยที่

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ ถ้าไม่ได้ระบุจากผู้ซื้อ สามารถละเลยได้

- (5) การหาค่า $k \times \sqrt{2}$ (ตัวคูณค่ายอด)

โดยที่

$k \times \sqrt{2}$ คือ ตัวคูณค่ายอด (Peak factor) ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับ ratio X/R โดยมีค่าดังตารางที่ 3.4 และสำหรับกรณีค่าอื่นๆ ของ X/R ระหว่าง 1 ถึง 14 $k \times \sqrt{2}$ หาได้จากวิธีการ linear interpolation

- (6) การหาค่า i_p (กระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตร)

$$i_p = I_k'' \times k \times \sqrt{2}, kA(peak) \quad (4.34)$$

- (7) ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตรที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบฯ คือ

- $I_{k,test} = I_{k,spec} \pm 10\%, kA(rms)$
- $i_{p,test} = i_{p,spec} \pm 5\%, kA(peak)$

บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

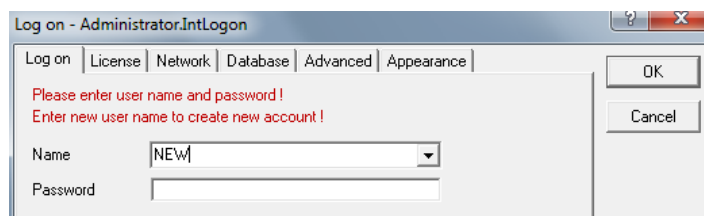
เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DlgSILENT PowerFactory การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรและกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตรสำหรับการทดสอบฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ผลการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ผนวกการพิจารณาถึง 4 ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังเป็น 4 สถานการณ์ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อหาข้อสังเกต/ข้อสรุป ผลการทดสอบฯ ทุกสถานการณ์

5.1 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DlgSILENT PowerFactory

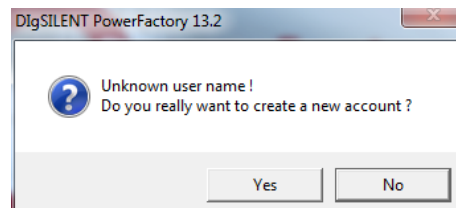
การนำเข้า (import) ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังจาก GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ตัวอย่าง คือ สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9 สถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคกลาง) จ. นครปฐม [2] เข้ามาในโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DlgSILENT PowerFactory มีขั้นตอนดังนี้ คือ

(1) การ Log on เข้าใช้งานโปรแกรม [20]

- 1) เปิดโปรแกรม DlgSILENT PowerFactory จะขึ้นหน้าจอให้ใส่ค่า UserName กับ Password ให้ใส่ชื่อที่ต้องการส่วน Password อาจเว้นว่างไว้ก็ได้ จากนั้นกดปุ่ม OK

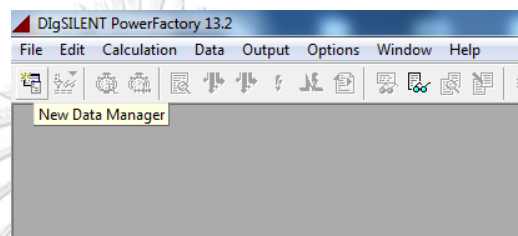


รูปที่ 5.1 การ Log on เข้าโปรแกรม DlgSILENT PowerFactory [20]

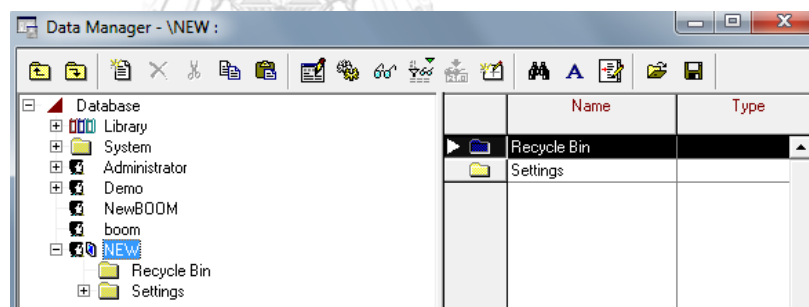


รูปที่ 5.2 โปรแกรมจะสอบถามว่าจะให้สร้าง User ตามนี้หรือไม่ ให้ตอบ YES [20]

- 2) เมื่อ Log on เข้ามาจะพบกับหน้าจอที่ว่างเปล่า ให้ผู้ใช้คลิกเลือกปุ่ม New Data Manager ที่อยู่บนมุมบนด้านซ้ายของโปรแกรมดังรูปที่ 5.3 แล้วหลังจากนั้นจะแสดง Dialog Box ดังรูปที่ 5.4

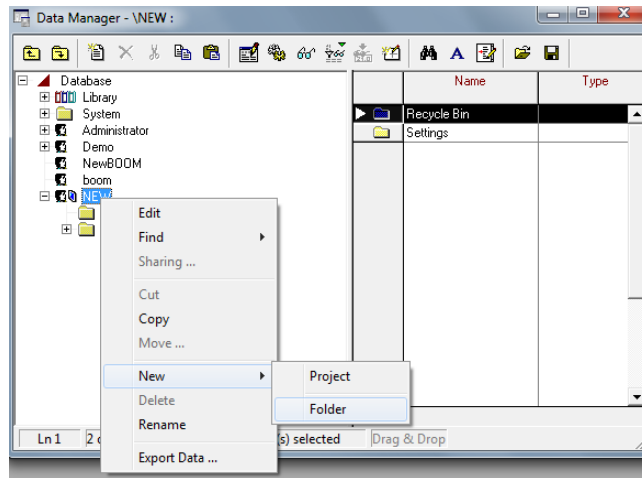


รูปที่ 5.3 เลือกปุ่ม New Data Manager [20]



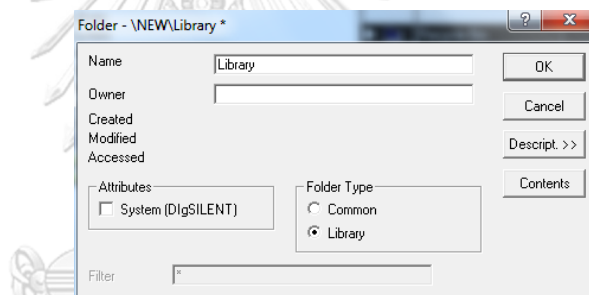
รูปที่ 5.4 หน้าจอ Data Manager [20]

- 3) จะเห็นรูปหน้าคนแสดงถึง User ที่กำลังเข้าใช้งาน ชื่อว่า NEW (ตามชื่อตอนที่ Log on) ภายใต้ User ยังไม่ปรากฏ Folder ใดๆ ดังนั้นผู้ใช้จะต้องสร้าง Folder ชื่อว่า Library ขึ้นมาไว้สำหรับจัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz
- 4) สร้าง Library Folder โดยคลิกขวาที่ User -> New -> Folder ดังรูปที่ 5.5



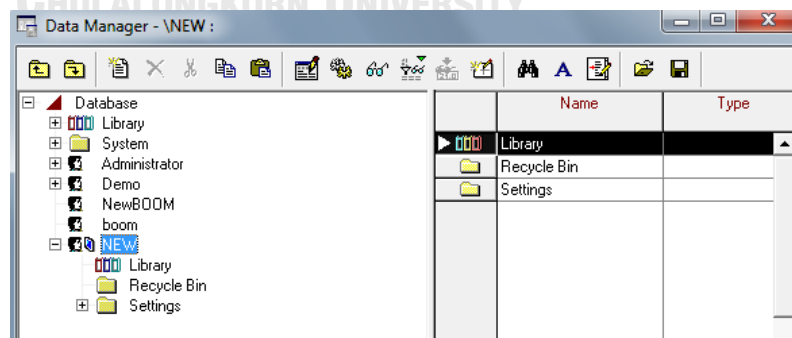
รูปที่ 5.5 การสร้าง Library Folder [20]

- 5) หลังจากนั้นจะแสดง Dialog Box ดังรูปที่ 5.6 ให้ป้อนชื่อเป็น Library และเลือก Folder Type เป็นประเภท Library จากนั้น คลิก OK



รูปที่ 5.6 การตั้งชื่อ Library Folder [20]

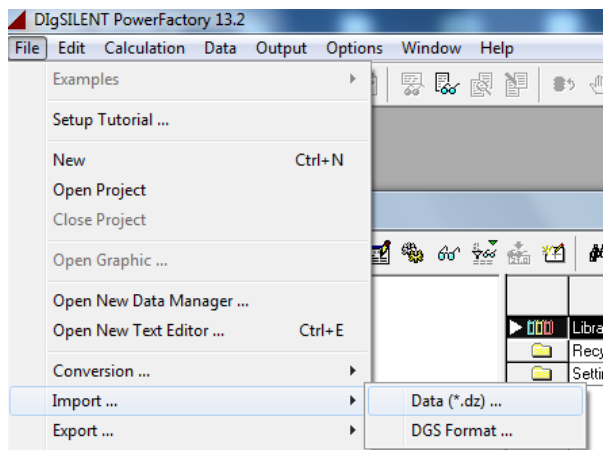
- 6) จะได้ Library Folder ที่ถูกสร้างขึ้นภายใต้ User name ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 Library Folder ที่ถูกสร้างขึ้นภายใต้ User name [20]

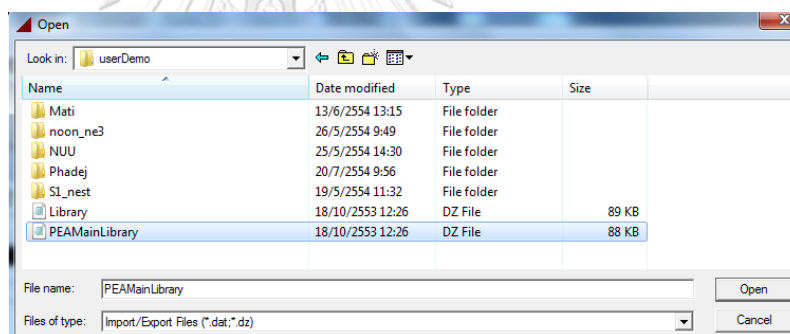
(2) การนำเข้า (Import) ไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]

1) เลือก File -> Import -> Data (*.dz) เพื่อนำเข้าไฟล์ PEAMainLibrary.dz ดังรูปที่ 5.8



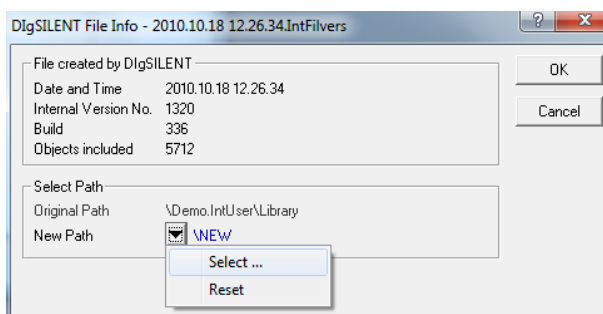
รูปที่ 5.8 การนำเข้าไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]

2) เลือกพื้นที่จัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz ดังรูปที่ 5.9 แล้วเลือก open



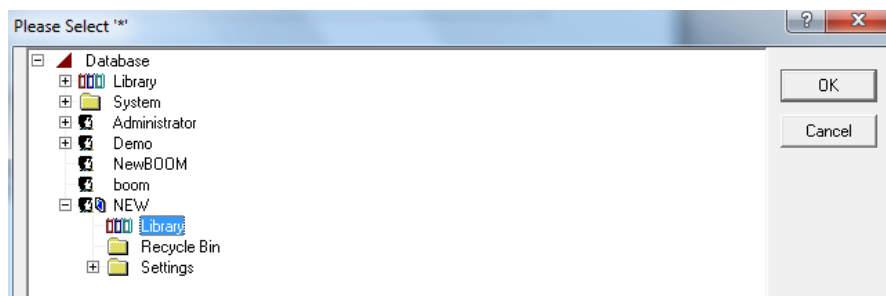
รูปที่ 5.9 พื้นที่จัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]

3) หน้าต่างจะปรากฏดังรูปที่ 5.10 หลังจากนั้นให้เลือกว่าต้องการนำเข้า (import) ไฟล์ PEAMainLibrary.dz ไปไว้ที่ตำแหน่งใด ดังรูปที่ 5.10



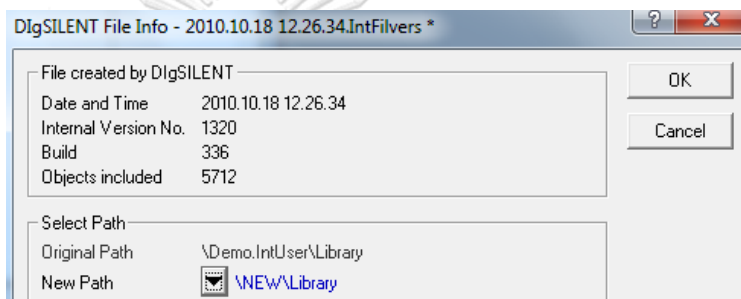
รูปที่ 5.10 เลือกที่จัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]

- 4) เลือก Library Folder ที่ต้องการจัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz ดังรูปที่ 5.11



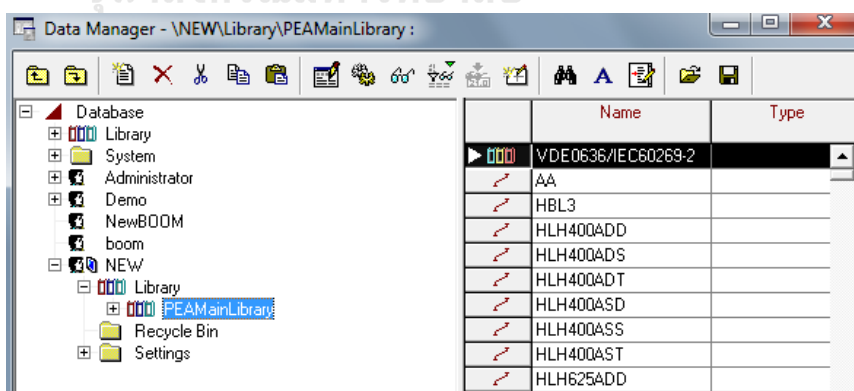
รูปที่ 5.11 Library Folder ที่ต้องการจัดเก็บไฟล์ PEAMainLibrary.dz [20]

- 5) เลือก New Part แล้วเลือก OK ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เลือก New Path [20]

- 6) กดเครื่องหมาย + ด้านหน้า Library Folder จะแสดงให้เห็น PEAMainLibrary อยู่ด้านใต้ และเมื่อกดเลือกที่ PEAMainLibrary Folder ตารางฝั่งขวาจะแสดงรายการ Name, Type ของอุปกรณ์ทั้งหมดที่จัดเก็บอยู่ใน PEAMainLibrary ดังรูปที่ 5.13

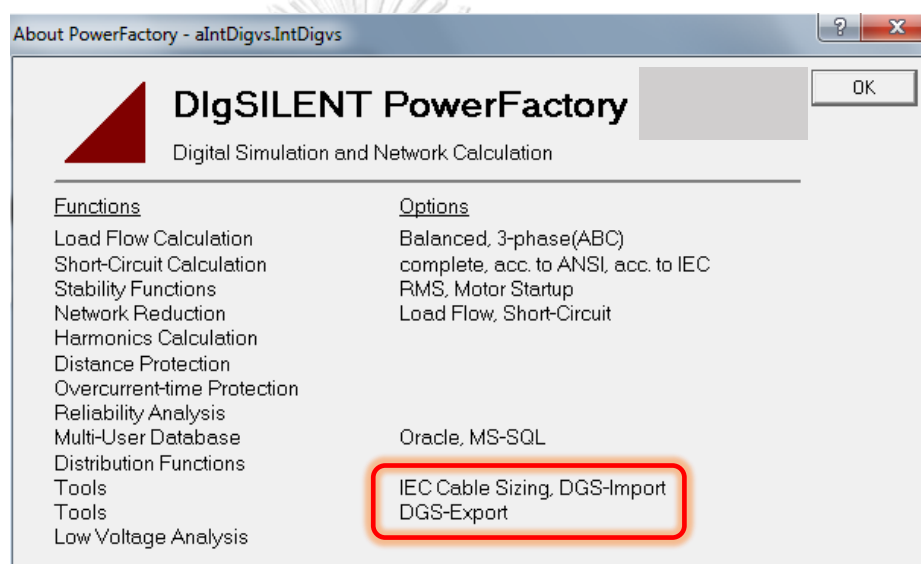


รูปที่ 5.13 รายการ Name, Type ของอุปกรณ์ทั้งหมดที่จัดเก็บอยู่ใน Library [20]

- (3) การนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs (ไฟล์ระบบไฟฟ้าของพื้นที่ตัวอย่างจากระบบ GIS ที่เราได้ดำเนินการขอข้อมูลไว้) เข้ามาในโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า (DigSILENT PowerFactory) [20]

หมายเหตุ

ก่อนที่จะทำการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs ผู้ใช้ต้องตรวจสอบก่อนว่าโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า (DigSILENT PowerFactory) ที่ผู้ใช้ใช้อยู่มีเครื่องมือ (Tools) ที่รองรับการนำเข้า (Import) หรือ นำออก (Export) ไฟล์ .dgs อยู่หรือไม่ โดยไปที่แถบเมนู Help -> About PowerFactory จะมีหน้าต่างขึ้นมาดังรูปที่ 5.14

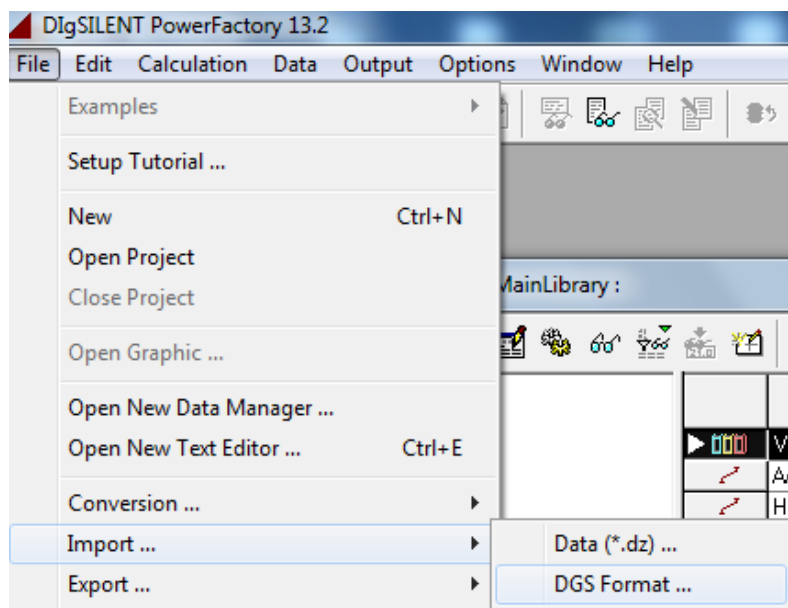


รูปที่ 5.14 แสดงเครื่องมือ (Tools) ที่รองรับการนำเข้า (Import) หรือ นำออก (Export) ไฟล์ .dgs ได้ [20]

ซึ่งจากรูปที่ 5.14 จะมีข้อความ “DGS-Import”, “DGS-Export” แสดงไว้ ดังนั้นทำให้ทราบว่าโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า (DigSILENT PowerFactory) ที่ใช้อยู่ขณะนี้ ผู้ใช้สามารถนำเข้า (Import) หรือ นำออก (Export) ไฟล์ .dgs ได้

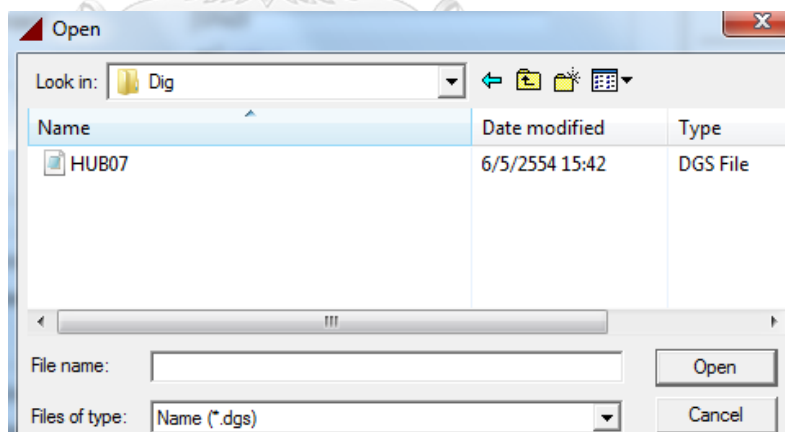
ขั้นตอนการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs มีดังต่อไปนี้

- 1) กดเลือกเมนู File -> Import -> DGS Format ดังรูปที่ 5.15



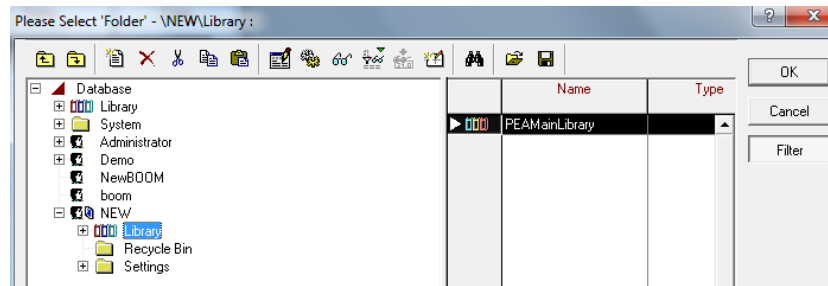
รูปที่ 5.15 วิธีการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs [20]

- 2) หลังจากนั้นจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 5.16 ให้ดำเนินการตั้งชื่อ Project ที่จะใช้งาน หลังจากนั้นนำเข้า (Import) ไปในโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า (DigSILENT PowerFactory) แล้ว
- 3) ให้เลือก browse เพื่อไปที่ไฟล์ .dgs ที่ต้องการจะนำเข้า (Import) ดังรูปที่ 5.16

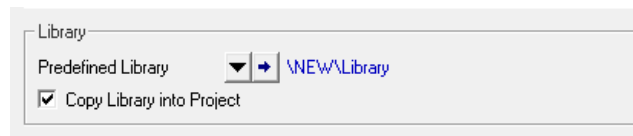


รูปที่ 5.16 เลือกไฟล์ .dgs ที่ต้องการนำเข้า (Import) [20]

- 4) เลือกไฟล์ Library ที่อยู่ใต้ User แล้วกดปุ่ม OK จะแสดง Path ที่เลือก Library ดังรูปที่ 5.17 หลังจากนั้นให้ทำเครื่องหมายถูกตรงข้อความ “Copy Library into Project” ดังรูปที่ 5.18 เพื่อให้โปรแกรมคัดลอกไฟล์ PEAMainLibrary ไปไว้ใต้ Project ที่นำเข้า (Import) เรียบร้อยแล้วด้วย

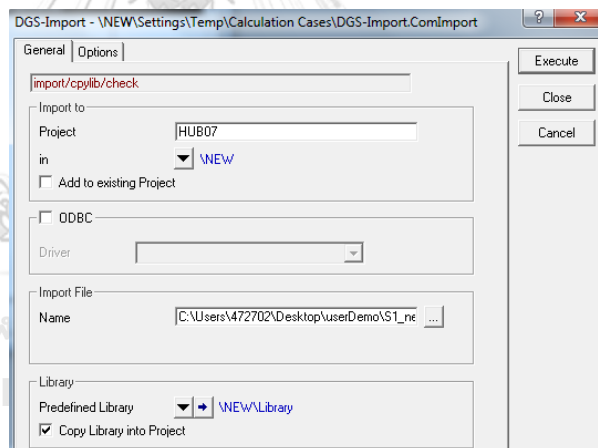


รูปที่ 5.17 เลือกไฟล์ Library ที่อยู่ใต้ User [20]



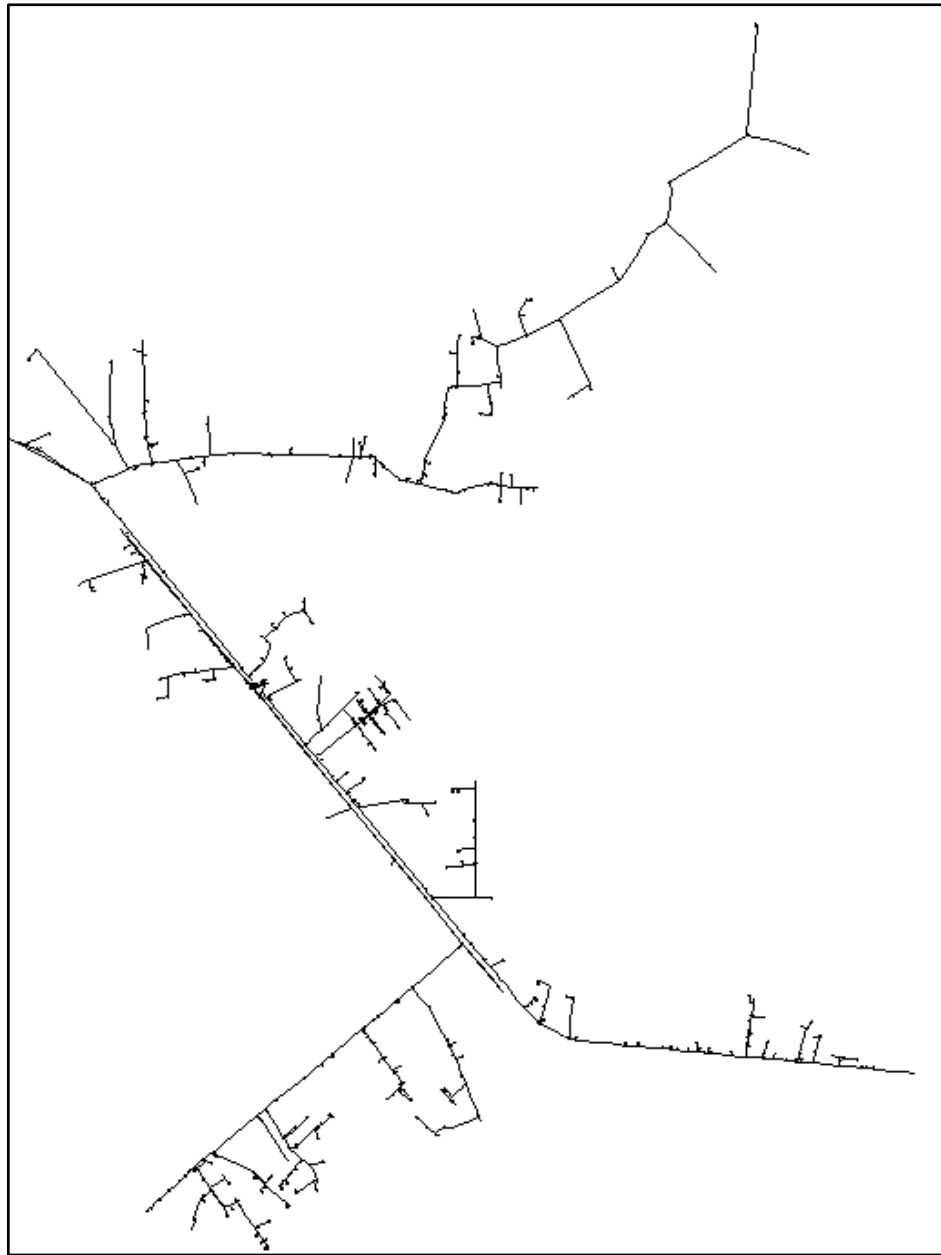
รูปที่ 5.18 ทำเครื่องหมายถูกตรงข้อความ “Copy Library into Project” [20]

- 5) ตรวจสอบภาพรวมสำหรับข้อมูลที่ป้อนเข้าไปว่าครบถ้วน และถูกต้องหรือไม่ แล้วกดปุ่ม Execute ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ตรวจสอบภาพรวมสำหรับข้อมูลที่ป้อนเข้าไป
ในขั้นตอนการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs [20]

- 6) โปรแกรมฯ จะทำการประมวลผล แล้วจะได้ระบบไฟฟ้าที่เรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ระบบไฟฟ้ากำลังของ กฟภ. สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9
ที่จ่ายออกจากสถานีอ้อมใหญ่ 1 กฟภ.3 จ. นครปฐม กฟภ.
ที่ได้จากการนำเข้า (Import) ไฟล์ .dgs จากระบบ GIS [2]

- (4) นำข้อมูลปริมาณการใช้โหลดรายวัน (Daily load profile) ช่วงวันจันทร์ที่ 27 มี.ค. 2560 ถึง วันอาทิตย์ที่ 31 มี.ค. 2560 [3] วิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดสูงสุด และปริมาณการใช้โหลดต่ำสุด บนสายป้อนที่เราสนใจ คือ สายป้อนที่ 3 โดยใช้โปรแกรม MS Excel ดังรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ตามลำดับ

	Date	Day	No.	Category	01VB01	02VB01	03VB01	04VB01	09VB01	P_total (MW)	P_total (%)
1											
2	30/3/2560	Thursday	89	22:00	4.09	3.76	8.17	3.09	0.58	19.69	46.33
3	30/3/2560	Thursday	45	11:00	3.9	7.46	8.05	4.14	0.66	24.21	56.96
4	28/3/2560	Tuesday	89	22:00	3.74	4.1	8.01	2.8	0.58	19.32	45.46
5	30/3/2560	Thursday	91	22:30	3.88	3.79	8	3.1	0.66	19.36	45.55
6	30/3/2560	Thursday	92	22:45	3.9	3.79	8	3.1	0.58	19.38	45.60
7	30/3/2560	Thursday	93	23:00	3.9	3.79	8	3.1	0.58	19.17	45.11
8	28/3/2560	Tuesday	87	21:30	3.74	4.56	7.99	3.19	0.65	20.13	47.36
9	30/3/2560	Thursday	41	10:00	3.88	7.22	7.99	3.91	0.66	23.66	55.67
10	30/3/2560	Thursday	90	22:15	4.09	3.99	7.98	3.11	0.58	19.75	46.47

รูปที่ 5.21 การวิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดสูงสุด

	Date	Day	No.	Category	01VB01	02VB01	03VB01	04VB01	09VB01	P_total (MW)	P_total (%)
1	1/4/2560	Saturday	47	11:30	0	0	0.02	0	0	0.02	0.05
2	1/4/2560	Saturday	48	11:45	0	0	0.02	0	0	0.02	0.05
3	1/4/2560	Saturday	49	12:00	0	0	0.02	0	0	0.02	0.05
4	1/4/2560	Saturday	50	12:15	2.83	0	1.74	1.96	0.24	6.77	15.93
5	1/4/2560	Saturday	22	5:15	3.12	2.92	3	1.52	0.59	11.15	26.24
6	1/4/2560	Saturday	21	5:00	3.12	2.92	3.02	1.52	0.59	11.17	26.28
7	1/4/2560	Saturday	25	6:00	3.36	3.18	3.02	1.52	0.59	11.67	27.46
8	1/4/2560	Saturday	24	5:45	3.36	3.18	3.12	1.52	0.59	11.77	27.69
9	1/4/2560	Saturday	23	5:30	3.36	3.17	3.16	1.52	0.59	11.8	27.76

รูปที่ 5.22 วิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดต่ำสุด

นำมาสรุปได้ข้อมูลปริมาณการใช้โหลดสูงสุด และปริมาณการใช้โหลดต่ำสุด บนสายป้อนที่เราสนใจ คือ สายป้อนที่ 3 ดังตารางที่ 5.1

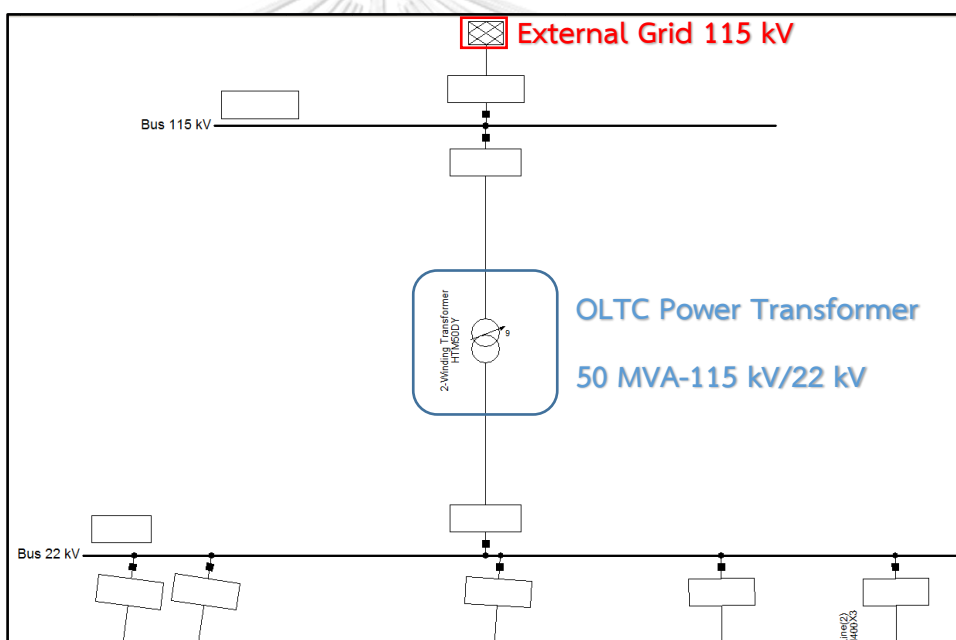
ตารางที่ 5.1 ปริมาณการใช้โหลดสูงสุด และต่ำสุด

ปริมาณโหลด (MW)	วันและเวลา	สายป้อนที่ 1	สายป้อนที่ 2	สายป้อนที่ 3	สายป้อนที่ 4	สายป้อนที่ 9
โหลดสูงสุดรายวัน (MW)	(พท) 30-03-2560, 11:00 น.	3.90 (45.88%)	7.46 (87.76%)	8.05 (94.71%)	4.14 (48.71%)	0.66 (7.76%)
โหลดต่ำสุดรายวัน (MW)	(ส) 01-04-2560, 5:15 น.	3.12 (36.71%)	2.92 (34.35%)	3.00 (35.29%)	1.52 (17.88%)	0.59 (6.94%)

หมายเหตุ

ในกรณีการวิเคราะห์หาปริมาณการใช้โหลดสูงสุด ที่เราไม่เลือกขณะสายป้อนที่ 3 มีโหลดเท่ากับ 8.17 MW (วันที่ 30 มี.ค. 59 เวลา 22:00 น.) แต่กลับเลือกขณะที่สายป้อนที่ 3 มีโหลดเท่ากับ 8.05 MW (วันที่ 30 มี.ค. 59 เวลา 11:00 น.) มาแทน เนื่องจากความแตกต่างระหว่างระหว่างสองเวลานี้ในสายป้อนที่ 3 แตกต่างกันเพียง 1.41% แต่ภาพรวมของการจ่ายโหลดทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังลูกนี้ ระหว่างสองเวลาแตกต่างกันถึง 10.63% ดังนั้นเราจึงนำภาพรวมการใช้โหลดทั้งหมดมาคิดด้วยจึงได้มาซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าว

- (5) สร้าง External Grid ขนาด 115 kV เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดที่มี On-load-tap-changer ขนาด 50 MVA-115 kV/22 kV (PEA Library) แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ 5 สายป้อน คือ สายป้อนที่ 1, 2, 3, 4 และ 9 ดังรูปที่ 5.23

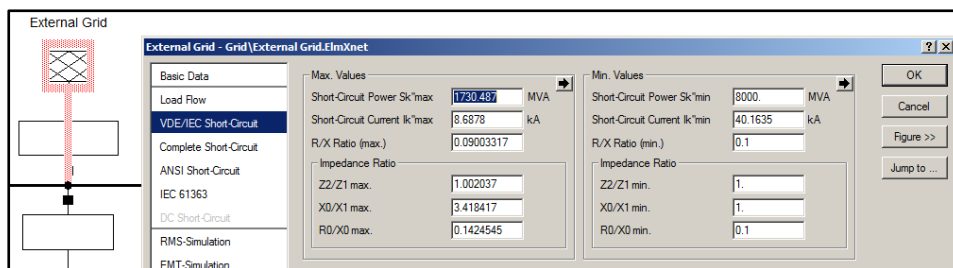


รูปที่ 5.23 สร้าง External Grid ขนาด 115 kV เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ 5 สายป้อน

- (6) นำข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรสามเฟส (3-P-Fault) ค่าความต้านทาน (R1,R2 และ R0) และค่ารีแอกแตนซ์ (X1,X2 และ X0) ของสถานีอ้อมใหญ่ 1 บัส 115/22-TP1 [3] ดังรูปที่ 5.24 มาคำนวณและป้อนค่าพารามิเตอร์ลงใน External Grid ดังรูปที่ 5.25

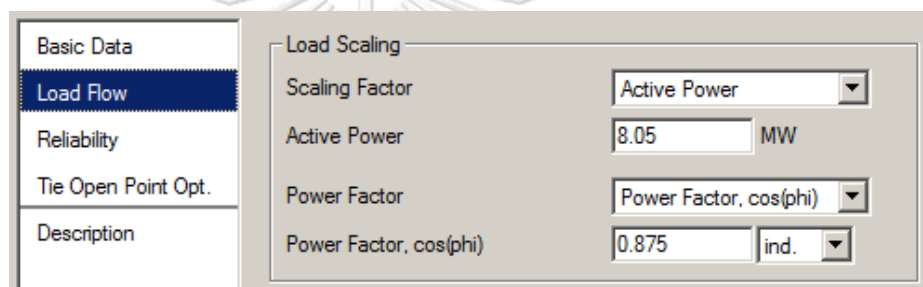
สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.3 (กฟภ.)										
รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS kv	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
27 สมุทรสาคร 4	115		7.806	3.879	0.00802	0.06381	0.00802	0.06381	0.03965	0.25666
	22-TP1	50	7.404	7.933	0.01525	0.35410	0.01525	0.35410	0.00000	0.28382
	22-TP2	50	7.454	7.990	0.01525	0.35172	0.01525	0.35173	0.00000	0.28145
28 สมุทรสาคร 5	115		21.147	17.466	0.00103	0.02372	0.00103	0.02377	0.00516	0.03844
	22-TP1	50	7.961	8.178	0.00750	0.32956	0.00751	0.32961	0.00000	0.30347
29 สมุทรสาคร 6	115		13.929	7.944	0.00352	0.03587	0.00352	0.03589	0.01779	0.11620
	22-TP1	50	8.113	8.460	0.01028	0.32329	0.01028	0.32332	0.00000	0.28382
	22-TP2	50	8.113	8.460	0.01028	0.32329	0.01028	0.32332	0.00000	0.28382
30 สมุทรสาคร 7 (ชั่วคราว)	115		12.445	6.859	0.00420	0.04012	0.00420	0.04014	0.02118	0.13732
	22-TP1	50	7.997	8.375	0.01103	0.32798	0.01104	0.32801	0.00000	0.28382
31 สมุทรสาคร 8 (ชั่วคราว)	115		17.259	10.678	0.00242	0.02899	0.00242	0.02901	0.01230	0.08201
	22-TP1	50	8.309	8.600	0.00907	0.31571	0.00907	0.31573	0.00000	0.28382
32 สามพราน 1	115		18.657	11.828	0.00209	0.02683	0.00209	0.02683	0.01012	0.07287
33 สีนสาคร (ชั่วคราว)	115		13.544	7.655	0.00368	0.03688	0.00368	0.03691	0.01860	0.12123
	22-TP1	50	8.110	8.466	0.01046	0.32342	0.01046	0.32345	0.00000	0.28283
34 ท้องปลาหมอ (ชั่วคราว)	115		7.849	4.433	0.00698	0.06358	0.00699	0.06383	0.03133	0.20931
	22-TP1	50	7.411	7.935	0.01410	0.35384	0.01411	0.35412	0.00000	0.28382
35 อ้อมน้อย 1	115		13.571	7.618	0.00369	0.03681	0.00369	0.03681	0.01808	0.12245
	22-TP1	50	8.087	8.441	0.01047	0.32433	0.01047	0.32433	0.00000	0.28382
	22-TP2	50	8.087	8.441	0.01047	0.32433	0.01047	0.32433	0.00000	0.28382
36 อ้อมน้อย 2	115		11.386	6.090	0.00482	0.04383	0.00482	0.04383	0.02370	0.15739
	22-TP1	50	7.898	8.303	0.01171	0.33207	0.01171	0.33207	0.00000	0.28382
	22-TP2	50	7.955	8.365	0.01172	0.32970	0.01172	0.32970	0.00000	0.28145
37 อ้อมน้อย 3 (ชั่วคราว)	115		15.014	8.710	0.00313	0.03329	0.00313	0.03329	0.01527	0.10498
	22-TP1	50	8.052	8.367	0.00984	0.32578	0.00984	0.32578	0.00000	0.28915
38 อ้อมน้อย 4	115		0.000	0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	22-TP1	50	6.056	6.844	0.02536	0.43259	0.02536	0.43274	0.00000	0.28382
	22-TP2	50	6.056	6.844	0.02536	0.43259	0.02536	0.43274	0.00000	0.28382
39 อ้อมใหญ่ 1	115		7.898	4.356	0.00570	0.06331	0.00570	0.06344	0.03083	0.21642
	22-TP1	50	7.308	7.815	0.01267	0.35887	0.01268	0.35902	0.00000	0.28915
	22-TP2	50	7.308	7.815	0.01267	0.35887	0.01268	0.35902	0.00000	0.28915

รูปที่ 5.24 นำข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรสามเฟส (3-P-Fault)
ค่าความต้านทาน (R1,R2 และ R0) และค่ารีแอกแตนซ์ (X1,X2 และ X0)
ของสถานีอ้อมใหญ่ 1 บัส 115/22-TP1



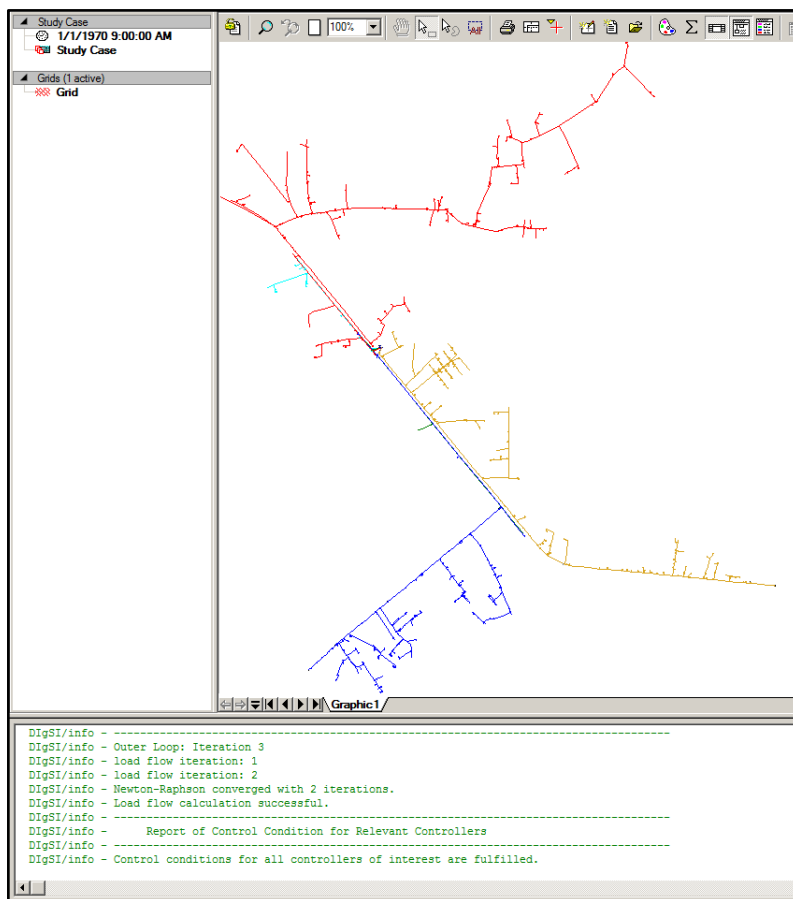
รูปที่ 5.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนลงใน External Grid

- (7) กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้คำนวณ และวิเคราะห์ไว้แล้วก่อนหน้านี้ ได้แก่ ปริมาณการใช้โหลดสูงสุดและต่ำสุด ที่ต้นทางสายป้อนทั้ง 5 สายป้อน รวมถึงค่าอื่นๆ ที่จำเป็นด้วย ได้แก่ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ดังตัวอย่างรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 การป้อนค่ากำลังไฟฟ้าจริง, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากรณีการใช้โหลดสูงสุด ในสายป้อนที่ 3

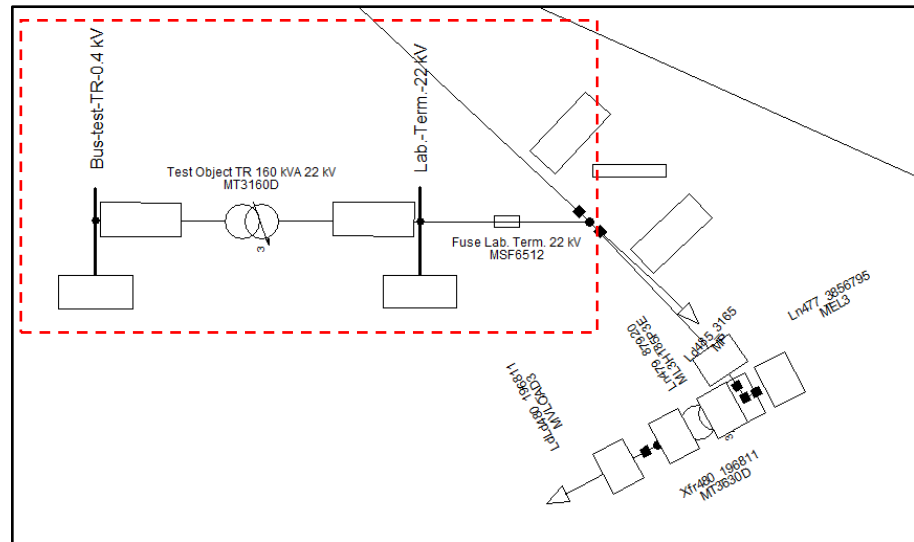
- (8) ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow test) ต้องไม่ติดข้อผิดพลาด (errors) แสดงว่าแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นมีความถูกต้องในเบื้องต้น ดังรูปที่ 5.27



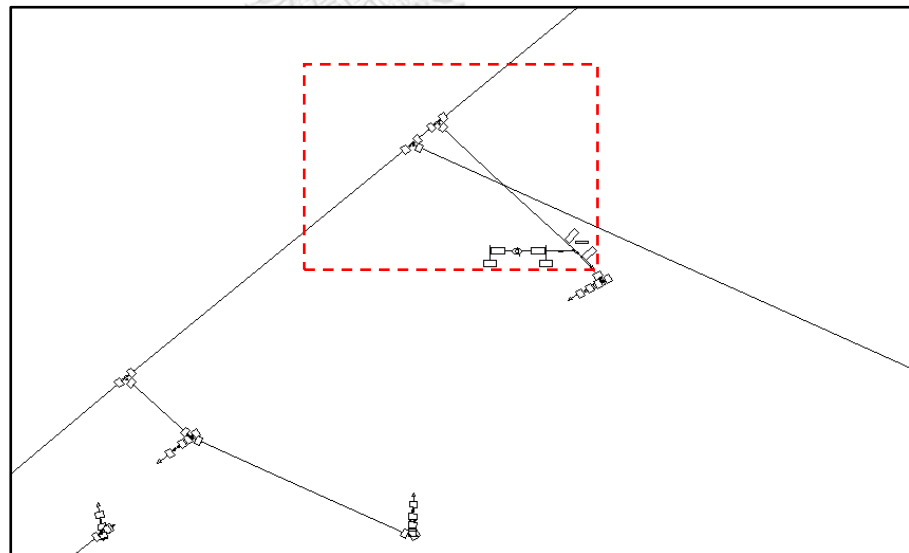
รูปที่ 5.27 ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow test)

- (9) นำแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างที่สร้างเสร็จแล้วจากข้อที่ (8) ไปตรวจสอบความถูกต้องกับระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ที่ศูนย์จ่ายไฟของพื้นที่ตัวอย่างที่เราจำลองระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลของระบบ SCADA ณ ขณะนั้น เช่น กำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ฯลฯ ลงไปในแต่ละสายป้อนของแบบจำลองระบบไฟฟ้า แล้วทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow test) ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาต้องไม่ต่างกันมาก เช่น ปริมาณการใช้โหลดที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิดที่มี On-load-tap-changer ขนาด 50 MVA-115 kV/22 kV และตำแหน่งการทำงานของ On-load-tap-changer ควรต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกันหรือไม่ควรต่างกันเกิน ± 1 ตำแหน่ง จึงถือว่าแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่เราสร้างขึ้นนั้นมีความถูกต้อง

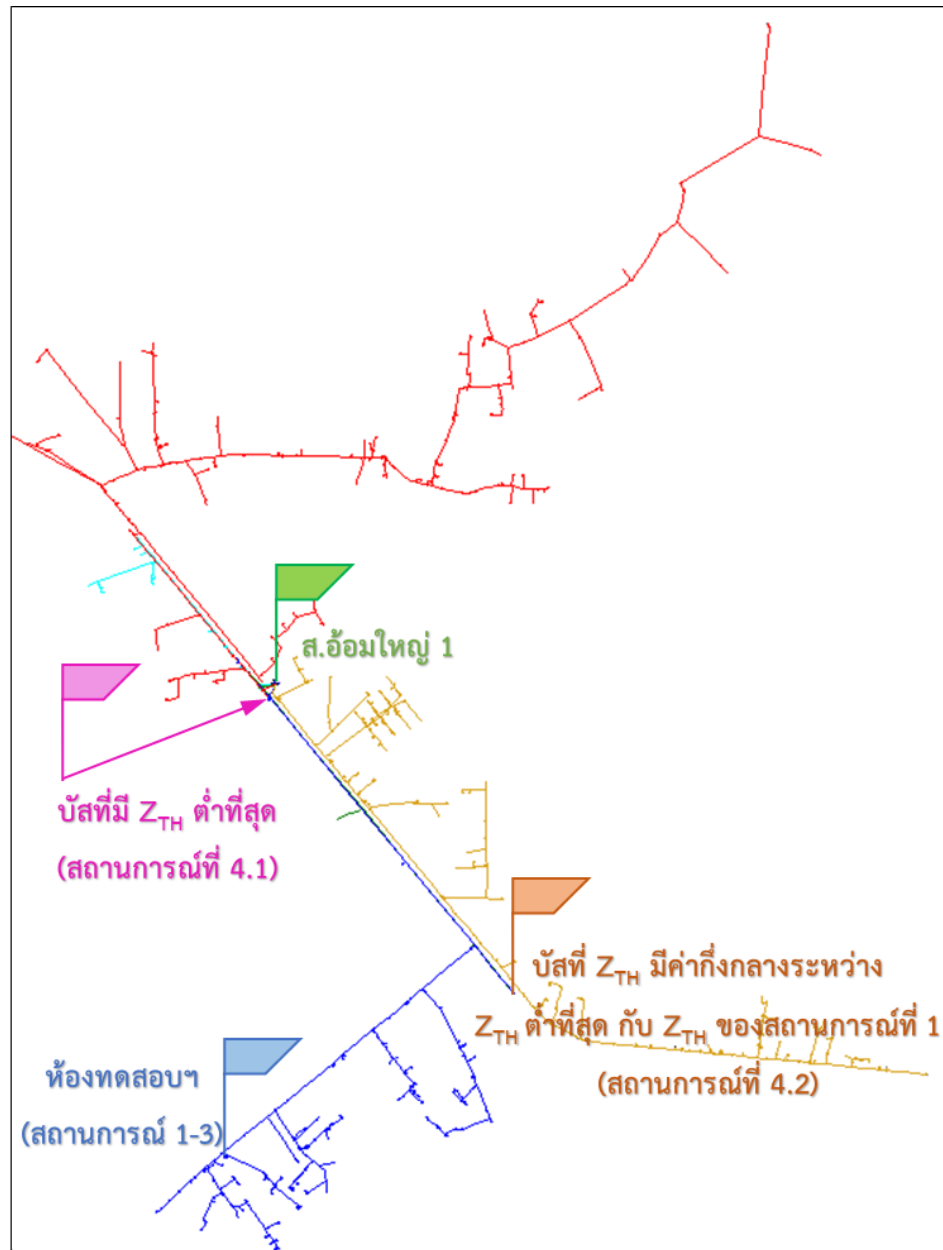
- (10) สร้างวงจรทดสอบฯ แล้วนำมาเชื่อมต่อกับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 เพื่อการทดสอบฯ 4 สถานการณ์ สำหรับ 4 ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.28 ดึงภาพเข้า (Zoom in) แสดงการเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง



รูปที่ 5.29 ดึงภาพออก (Zoom out) แสดงการเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง



รูปที่ 5.30 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับ 4 สถานการณ์ โดยมีสายป้อนที่ 1 (สีแดง), สายป้อนที่ 2 (สีทอง), สายป้อนที่ 3 (สีน้ำเงิน) และสายป้อนที่ 4 (สีฟ้าอ่อน)

5.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตร สำหรับการทดสอบฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4]

5.2.1 ตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตร

จงคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค่ายอดแบบไม่สมมาตรของหม้อแปลงระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 160 kVA สำหรับแรงดัน 22 kV 50 Hz

(1) การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical short-circuit current calculation)

- หาค่า Z_t (อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r} \\ &= \frac{4 \times (400)^2}{(160 \times 1000) \times 100} \\ &= 0.0400 \Omega \end{aligned}$$

- หาค่า $I_{FL,tr}$ (กระแสฟลักซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$\begin{aligned} I_{FL,tr} &= \frac{S}{\sqrt{3}V_L} \\ &= \frac{160 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} \\ &= 230.9401 \text{ A (rms)} \end{aligned}$$

- หาค่า R_t (ความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$\begin{aligned} R_t &= \frac{P_{cu,loss}}{3(I_{FL,tr})^2} \\ &= \frac{2100}{3(230.94)^2} \\ &= 0.0131 \Omega \end{aligned}$$

- หาค่า X_t (รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า)

$$\begin{aligned} X_t &= \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} \\ &= \sqrt{(0.04)^2 - (0.0131)^2} = 0.0378\Omega \end{aligned}$$

- หาค่า I_k'' (กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร)

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)}$$

เมื่อไม่ได้ระบุ Z_s ให้ละทิ้งได้ ดังนั้นจะได้

$$I_k'' = \frac{400}{\sqrt{3} \times 0.04} = 5.7735 \text{ kA (rms)}$$

- (2) การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรรายอดแบบไม่สมมาตร (1st peak of the asymmetrical current calculation)

- ค่า $X / R = X_t / R_t = 2.8789$

- หาค่า $k \times \sqrt{2}$ (ตัวคูณรายอด)

ใช้วิธี Linear Interpolation จากตารางที่ 3.4 จะได้ค่า $k \times \sqrt{2} = 1.9270$

- หาค่า i_p (กระแสลัดวงจรรายอดแบบไม่สมมาตร)

$$\begin{aligned} i_p &= I_k'' \times k \times \sqrt{2} \\ &= 5.7735 \times 1.9270 = 11.1255 \text{ kA (peak)} \end{aligned}$$

5.2.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรรายอดแบบไม่สมมาตร ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 160 kVA สำหรับแรงดัน 22 kV 50 Hz คือ

$$\begin{aligned} (1) \quad I_{k,test} &= I_{k,spec} \pm 10\%, \text{ kA (rms)} \\ &= 5.7735 \text{ kA (rms)} \pm 10\% \\ &= 5.1962 \text{ kA (rms) to } 6.3509 \text{ kA (rms)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \quad i_{p,test} &= i_{p,spec} \pm 5\%, \text{ kA (peak)} \\ &= 11.1255 \text{ kA (peak)} \pm 5\% \\ &= 10.5692 \text{ kA (peak) to } 11.6817 \text{ kA (peak)} \end{aligned}$$

5.2.3 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร สำหรับการทดสอบฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า

ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 5.2

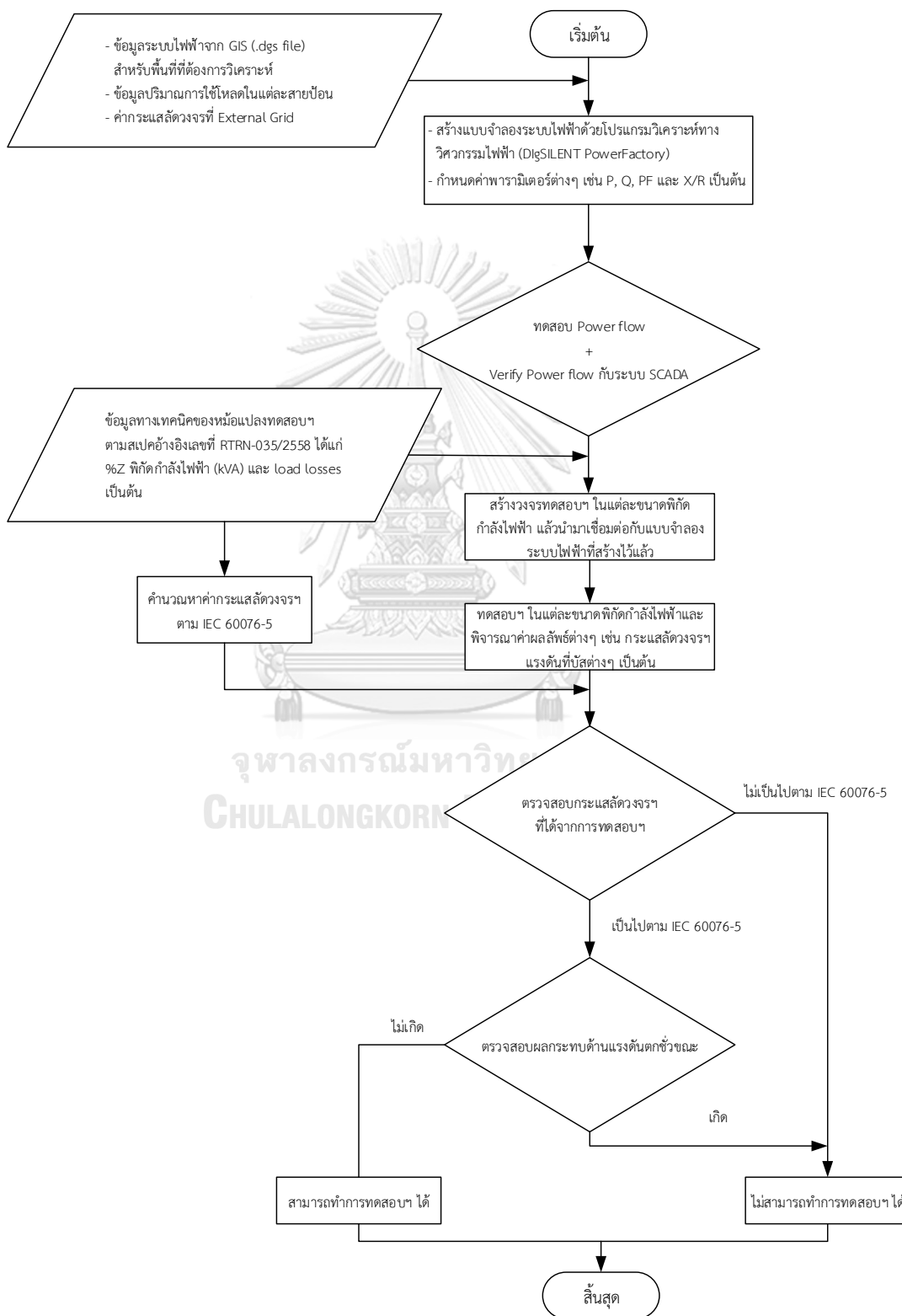
ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] สำหรับการทดสอบฯ ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V, 33 kV/400V			
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$i_{p,spec}$ (kA)	
	(Min.)	(Max.)	(Min.)	(Max.)
50	1.6238	1.9846	2.9560	3.2672
100	3.2476	3.9693	6.2802	6.9412
160	5.1962	6.3509	10.5692	11.6817
250	8.1190	9.9232	16.9983	18.7876
315	10.2299	12.5032	21.7495	24.0389
400	12.9904	15.8771	28.1274	31.0882
500	9.9926	12.2132	24.2271	26.7773
630	20.4599	25.0065	45.5471	50.3415
1000	21.6506	26.4619	49.6742	54.9030
1250	27.0633	33.0774	62.5197	69.1008
1500	32.4760	39.6928	74.8743	82.7558
2000	43.3013	52.9238	101.7977	112.5133

หมายเหตุ

ค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] หมายถึง ต้องมีค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ($I''_{k,test}$ (kA)) และกระแสลัดวงจรค้ายอดแบบไม่สมมาตร ($i_{p,test}$ (kA)) ที่ได้จากการทดสอบฯ อยู่ในช่วงค่าที่กำหนดตามตารางที่ 5.2 ทั้ง 2 แบบ

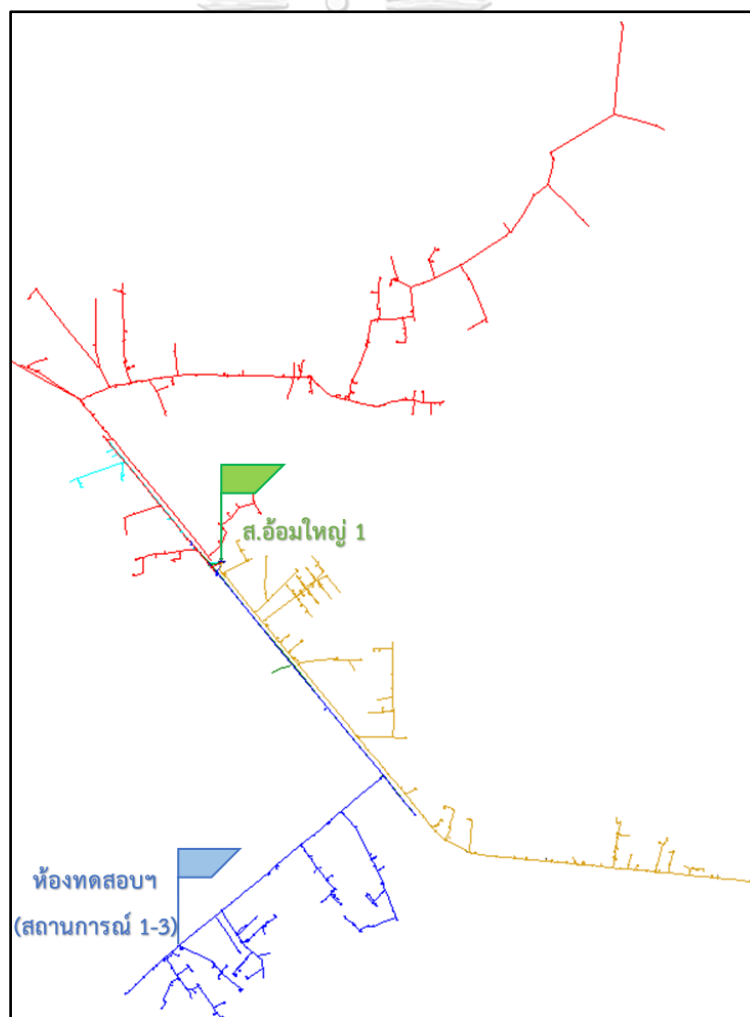
5.3 รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย



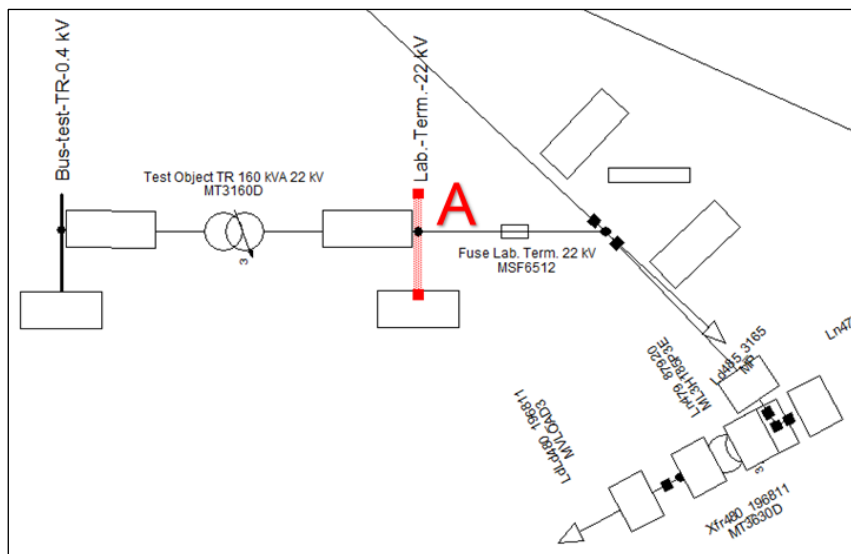
5.4 ผลการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย

5.4.1 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ($Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$ ที่จุด A) บนสายป้อนที่ 3 ที่จ่ายออกจากสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 ดังรูปที่ 5.31 ในช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด ด้วยวิธีต่อโดยตรงระหว่างวงจรทดสอบฯ กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 5.32 ได้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.3 และผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.31 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 1



รูปที่ 5.32 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ
แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ 5.3 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.5
	1,795	474_1287	0.9956	
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.5
	1,795	474_1287	0.9909	
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.5
	1,795	474_1287	0.9853	
250	2	Bus 115 kV	0.9484	0.5
	1,795	474_1287	0.9771	
315	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9462	0.5
	1,795	474_1287	0.9713	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
400	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9326	0.5
	1,795	474_1287	0.9640	
500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9468	0.5
	1,795	474_1287	0.9709	
630	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.5
	171	480_168527	0.8984	
	172	487_5478_C	0.9005	
1,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8915	0.5
	284	482_803970	0.8991	
	285	482_804046	0.9023	
1,250	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8680	0.5
	459	480_159290	0.8956	
	460	487_5485_C	0.9021	
1,500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8456	0.5
	469	480_138998	0.8961	
	470	487_5457_C	0.9161	
2,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8043	0.5
	1,794	474_1287	0.8939	
	1,795	Bus 115 kV	0.9339	

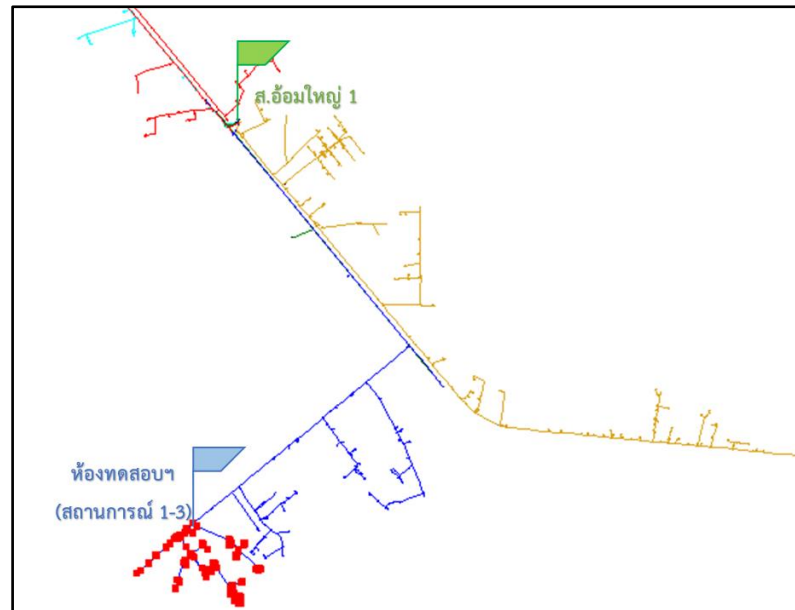
หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

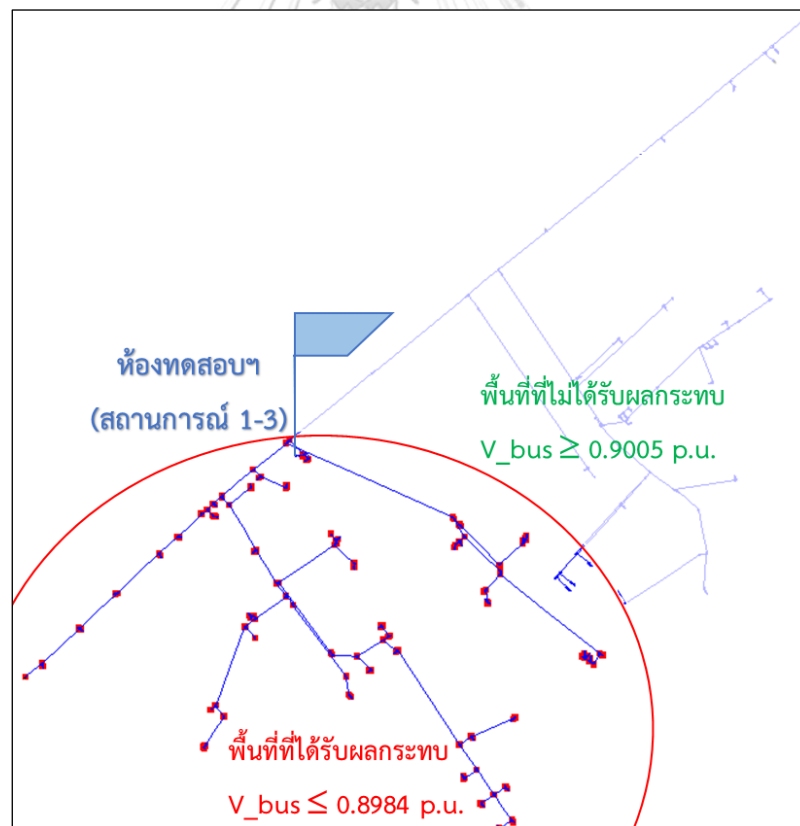
ตารางที่ 5.4 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณที่ 1

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec} (kA)$		$I''_{k,test} (kA)$	$i_{p,spec} (kA)$		$i_{p,test} (kA)$
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
50	1.6238	1.9846	1.8309	2.9560	3.2672	3.1478
100	3.2476	3.9693	3.6327	6.2802	6.9412	6.6799
160	5.1962	6.3509	5.7535	10.5692	11.6817	11.1343
250	8.1190	9.9232	8.8519	16.9983	18.7876	17.6611
315	10.2299	12.5032	11.0305	21.7495	24.0389	22.3668
400	12.9904	15.8771	13.8076	28.1274	31.0882	28.4885
500	9.9926	12.2132	10.9450	24.2271	26.7773	25.1898
630	20.4599	25.0065	20.9390	45.5471	50.3415	44.3106
1000	21.6506	26.4619	22.2573	49.6742	54.9030	48.4312
1250	27.0633	33.0774	27.0885	62.5197	69.1008	59.1981
1500	32.4760	39.6928	31.6690	74.8743	82.7558	69.0158
2000	43.3013	52.9238	40.1692	101.7977	112.5133	88.7569

ผลจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA แรงดันพิกัด 22 kV สำหรับสถานการณที่ 1 นี้ มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA ที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในขณะที่การทดสอบฯ ขนาดตั้งแต่ 630 kVA ถึง 2,000 kVA จะก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้รายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานบ้น/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.33 และรูปที่ 5.34 ตามลำดับ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่ากระแสลัดวงจรฯ ในการทดสอบฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] คือ ขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA



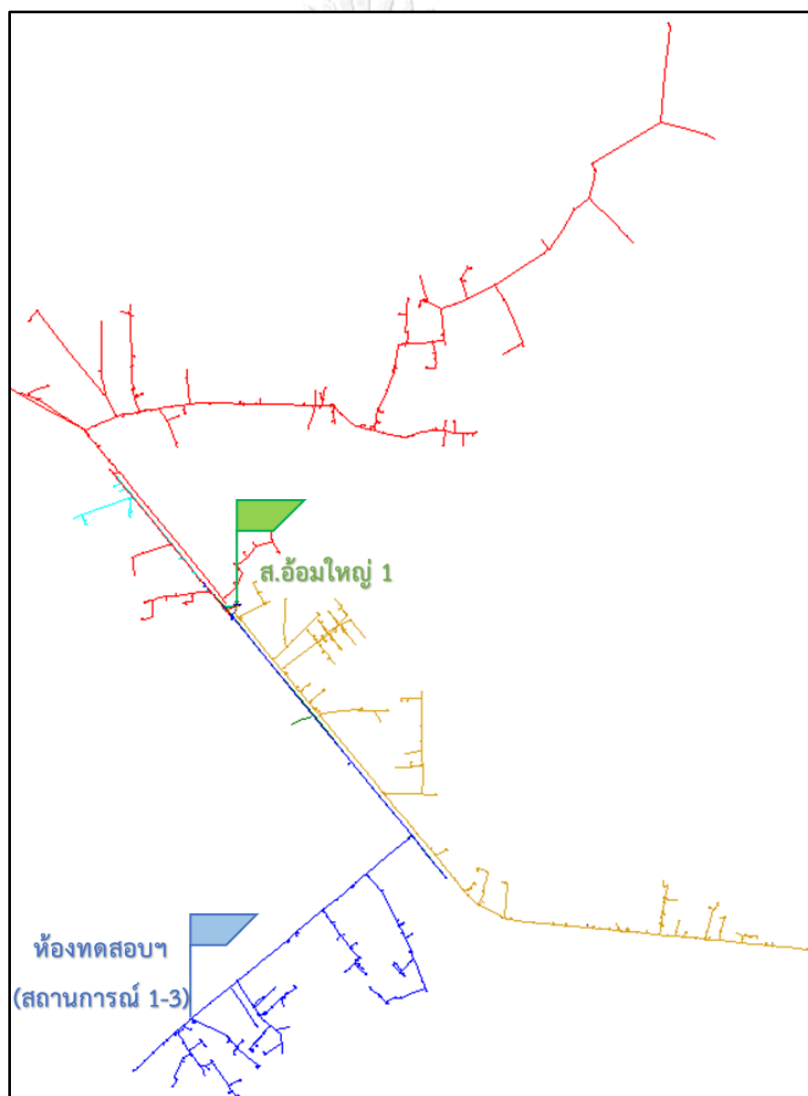
รูปที่ 5.33 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 1 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA



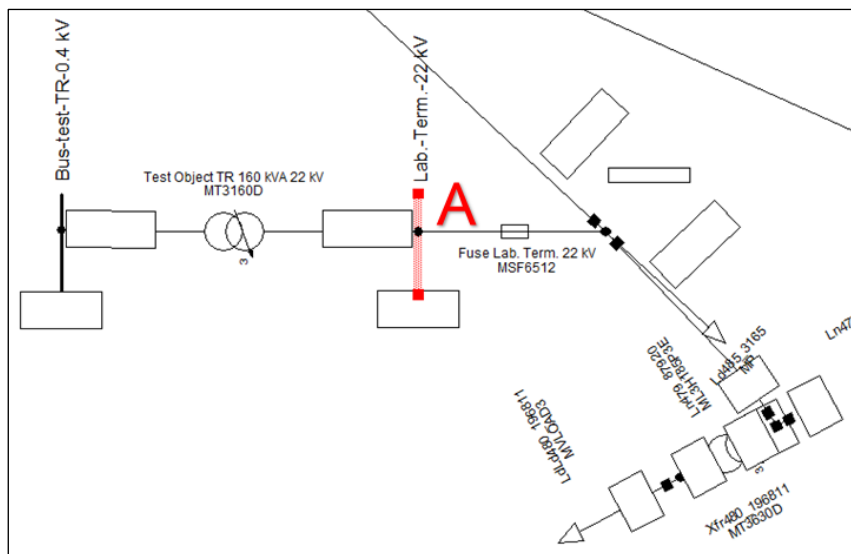
รูปที่ 5.34 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.33 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถานบ้าน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1

5.4.2 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ($Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029 \Omega$ ที่จุด A) บนสายป้อนที่ 3 ที่จ่ายออกจากสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 ดังรูปที่ 5.35 ในช่วงเวลาการใช้โหลดต่ำสุด ด้วยวิธีต่อโดยตรงระหว่างวงจรทดสอบฯ กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 5.36 ได้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.5 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.35 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 2



รูปที่ 5.36 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ
แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ 5.5 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 2

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.5
	1,795	474_1287	0.9956	
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.5
	1,795	474_1287	0.9909	
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.5
	1,795	474_1287	0.9853	
250	2	Bus 115 kV	0.9484	0.5
	1,795	474_1287	0.9771	
315	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9462	0.5
	1,795	474_1287	0.9713	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
400	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9326	0.5
	1,795	474_1287	0.9640	
500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9468	0.5
	1,795	474_1287	0.9709	
630	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.5
	171	480_168527	0.8984	
	172	487_5478_C	0.9005	
1,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8915	0.5
	284	482_803970	0.8991	
	285	482_804046	0.9023	
1,250	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8680	0.5
	459	480_159290	0.8956	
	460	487_5485_C	0.9021	
1,500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8456	0.5
	469	480_138998	0.8961	
	470	487_5457_C	0.9161	
2,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8043	0.5
	1,794	474_1287	0.8939	
	1,795	Bus 115 kV	0.9339	

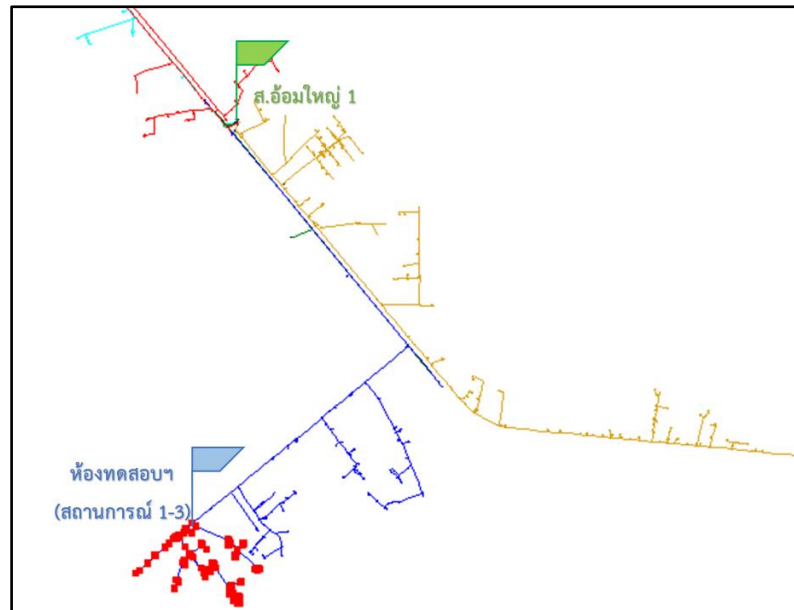
หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

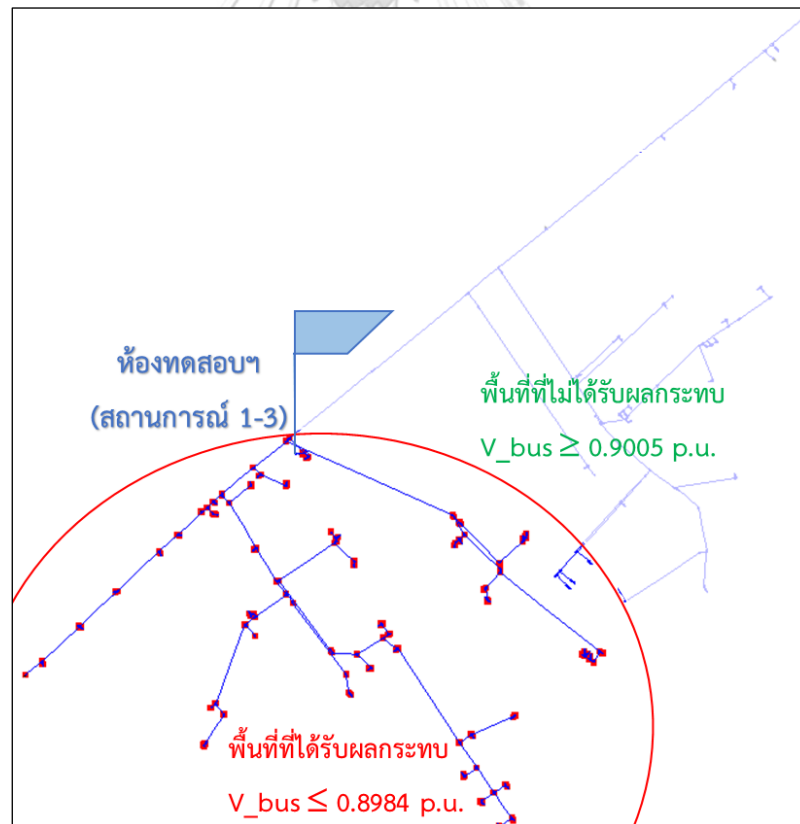
ตารางที่ 5.6 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 2

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I_{k,spec} (kA)$		$I_{k,test} (kA)$	$i_{p,spec} (kA)$		$i_{p,test} (kA)$
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
50	1.6238	1.9846	1.8309	2.9560	3.2672	3.1478
100	3.2476	3.9693	3.6327	6.2802	6.9412	6.6799
160	5.1962	6.3509	5.7535	10.5692	11.6817	11.1343
250	8.1190	9.9232	8.8519	16.9983	18.7876	17.6611
315	10.2299	12.5032	11.0305	21.7495	24.0389	22.3668
400	12.9904	15.8771	13.8076	28.1274	31.0882	28.4885
500	9.9926	12.2132	10.9450	24.2271	26.7773	25.1898
<i>630</i>	20.4599	25.0065	20.9390	45.5471	50.3415	<i>44.3106</i>
<i>1000</i>	21.6506	26.4619	22.2573	49.6742	54.9030	<i>48.4312</i>
<i>1250</i>	27.0633	33.0774	27.0885	62.5197	69.1008	<i>59.1981</i>
<i>1500</i>	32.4760	39.6928	<i>31.6690</i>	74.8743	82.7558	<i>69.0158</i>
<i>2000</i>	43.3013	52.9238	<i>40.1692</i>	101.7977	112.5133	<i>88.7569</i>

ผลจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA แรงดันพิกัด 22 kV สำหรับสถานการณ์ที่ 2 นี้ มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในขณะทำการทดสอบฯ ขนาดตั้งแต่ 630 kVA ถึง 2,000 kVA จะก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.37 และรูปที่ 5.38 ตามลำดับ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่ากระแสลัดวงจรฯ ในการทดสอบฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] คือ ขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA



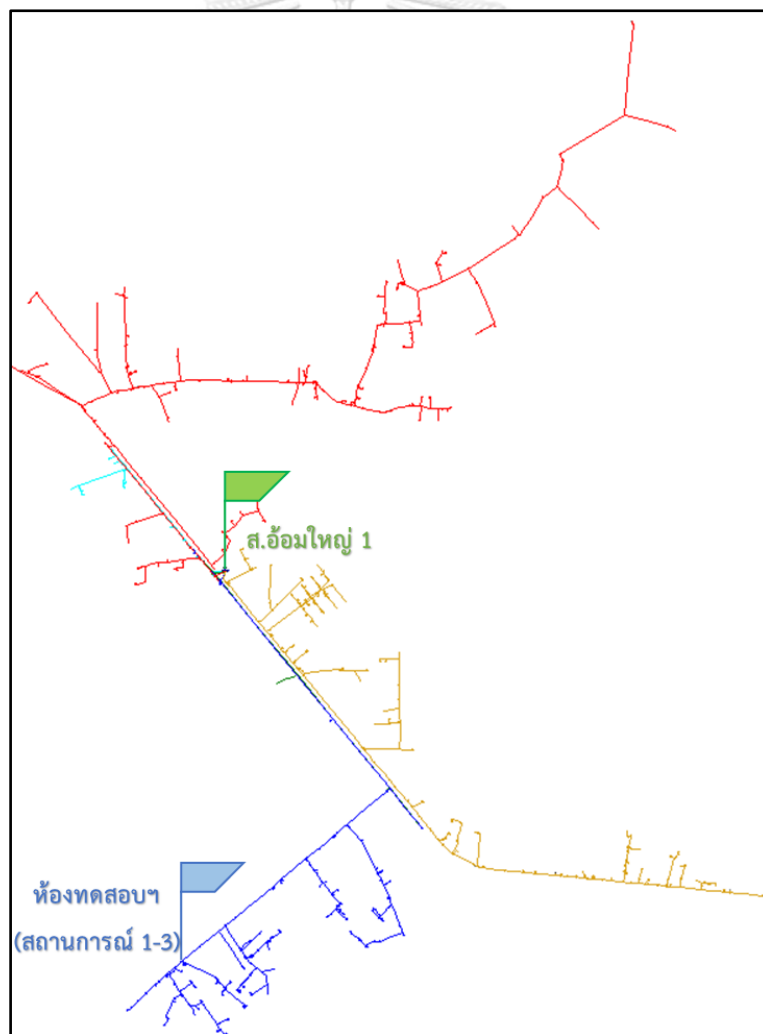
รูปที่ 5.37 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 2 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA



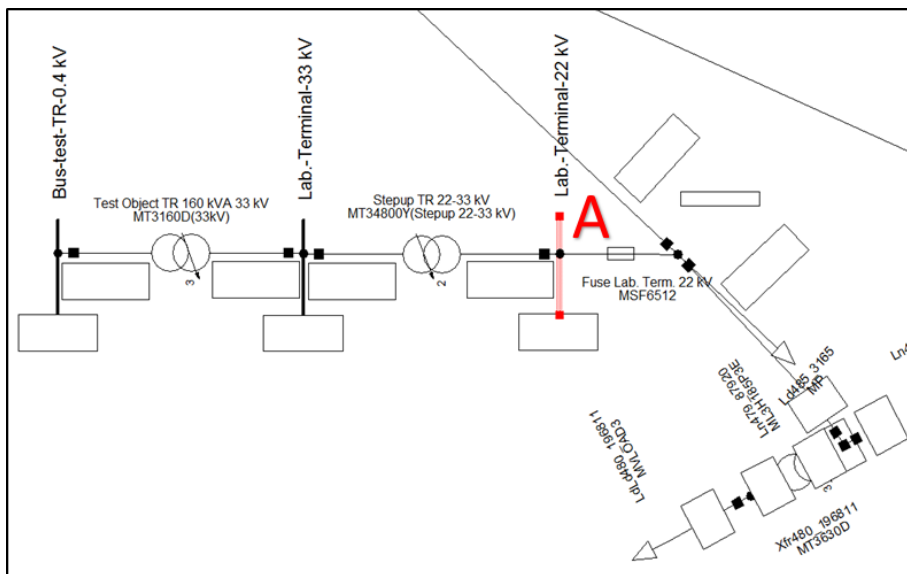
รูปที่ 5.38 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.37 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2

5.4.3 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 33 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ($Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$ ที่จุด A) บนสายป้อนที่ 3 ที่จ่ายออกจากสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 ดังรูปที่ 5.39 ในช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด ด้วยวิธีต่อวงจรทดสอบฯ ผ่านหม้อแปลงยกระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 22/33 kV-1.2 MVA ($\%Z = 0.2$) กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 5.40 ได้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.7 และผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.39 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 3



รูปที่ 5.40 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับ
แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ 5.7 แรงแดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 3

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงแดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.5
	1,796	474_1287	0.9956	
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.5
	1,796	474_1287	0.9909	
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.5
	1,796	474_1287	0.9853	
250	2	Bus 115 kV	0.9484	0.5
	1,796	474_1287	0.9771	
315	3	Lab.-Terminal-22 kV	0.9463	0.5
	1,796	474_1287	0.9714	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
400	3 ⋮ 1,796	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 474_1287	0.9327 ⋮ 0.9640	0.5
500	3 ⋮ 1,796	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 474_1287	0.9469 ⋮ 0.9709	0.5
630	3 ⋮ 172 173	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 480_168527 487_5478_C	0.8981 ⋮ 0.8986 0.9008	0.5
1,000	3 ⋮ 285 286	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 482_803970 482_804046	0.8918 ⋮ 0.8994 0.9025	0.5
1,250	3 ⋮ 460 461	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 480_159290 487_5485_C	0.8684 ⋮ 0.8959 0.9024	0.5
1,500	3 ⋮ 470 471	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 480_138998 487_5457_C	0.8462 ⋮ 0.8965 0.9164	0.5
2,000	3 ⋮ 1,795 1,796	Lab.-Terminal-22 kV ⋮ 474_1287 Bus 115 kV	0.8053 ⋮ 0.8944 0.9340	0.5

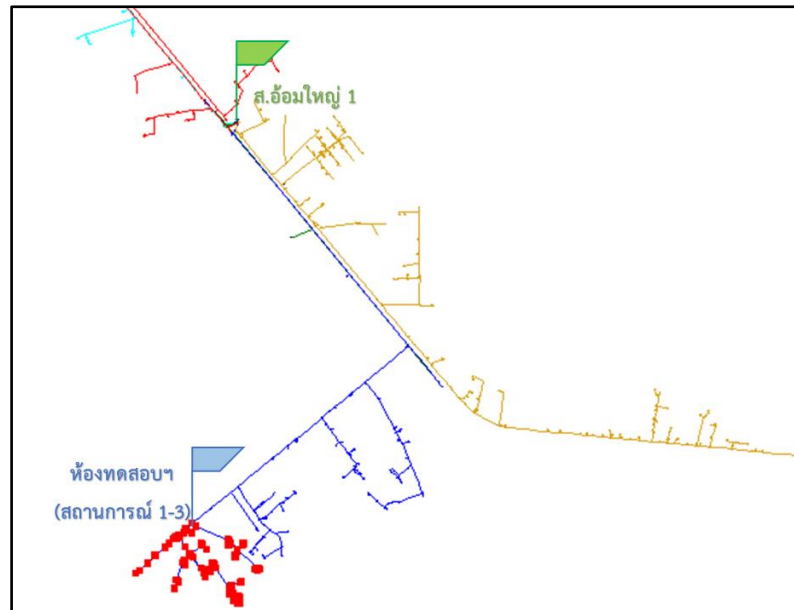
หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์
- บัสที่ 2 สำหรับ 50-250 kVA คือ Bus 115 kV, สำหรับ 315-2,000 kVA คือบัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงยกระดับแรงดันขนาด 22/33-1.2 MVA (%Z=0.2) ซึ่งไม่นำมาพิจารณาในกรณีนี้

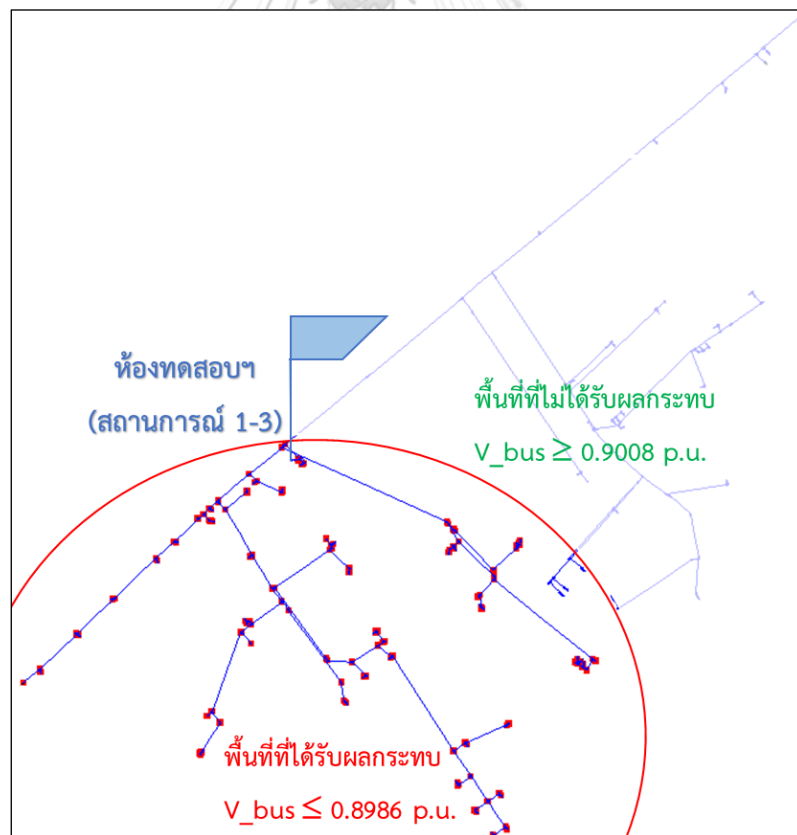
ตารางที่ 5.8 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 3

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 33 kV/400V					
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$I''_{k,test}$ (kA)	$i_{p,spec}$ (kA)		$i_{p,test}$ (kA)
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
50	1.6238	1.9846	1.8305	2.9560	3.2672	3.1472
100	3.2476	3.9693	3.6311	6.2802	6.9412	6.6772
160	5.1962	6.3509	5.7496	10.5692	11.6817	11.1269
250	8.1190	9.9232	8.8424	16.9983	18.7876	17.6425
315	10.2299	12.5032	11.0158	21.7495	24.0389	22.3368
400	12.9904	15.8771	13.7847	28.1274	31.0882	28.4400
500	9.9926	12.2132	10.9307	24.2271	26.7773	25.1519
630	20.4599	25.0065	20.8864	45.5471	50.3415	44.1934
1000	21.6506	26.4619	22.1979	49.6742	54.9030	48.2914
1250	27.0633	33.0774	27.0006	62.5197	69.1008	58.9893
1500	32.4760	39.6928	31.5489	74.8743	82.7558	68.7322
2000	43.3013	52.9238	39.9765	101.7977	112.5133	88.2885

ผลจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA พิกัดแรงดัน 33 kV สำหรับสถานการณ์ที่ 3 นี้ มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในขณะที่การทดสอบฯ ขนาดตั้งแต่ 630 kVA ถึง 2,000 kVA จะก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.41 และรูปที่ 5.42 ตามลำดับ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่ากระแสลัดวงจรฯ ในการทดสอบฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] คือ ขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA



รูปที่ 5.41 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 3 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA

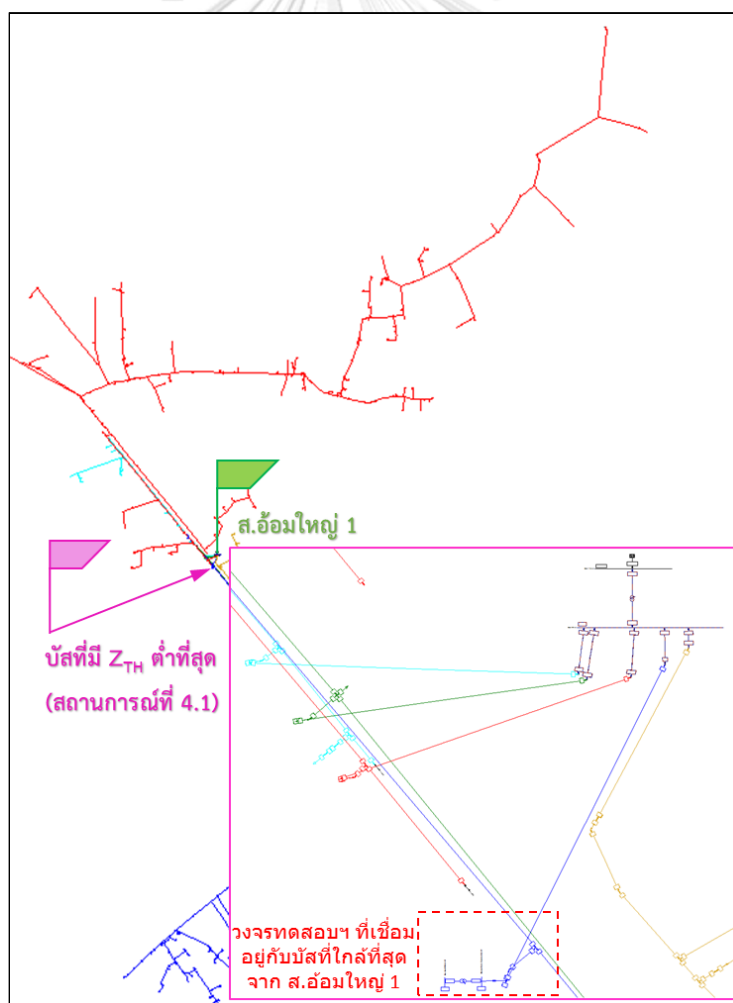


รูปที่ 5.42 ภาพขยาย (Zoom in) รูปที่ 5.41 แสดงผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่บัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้สถานับ/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3

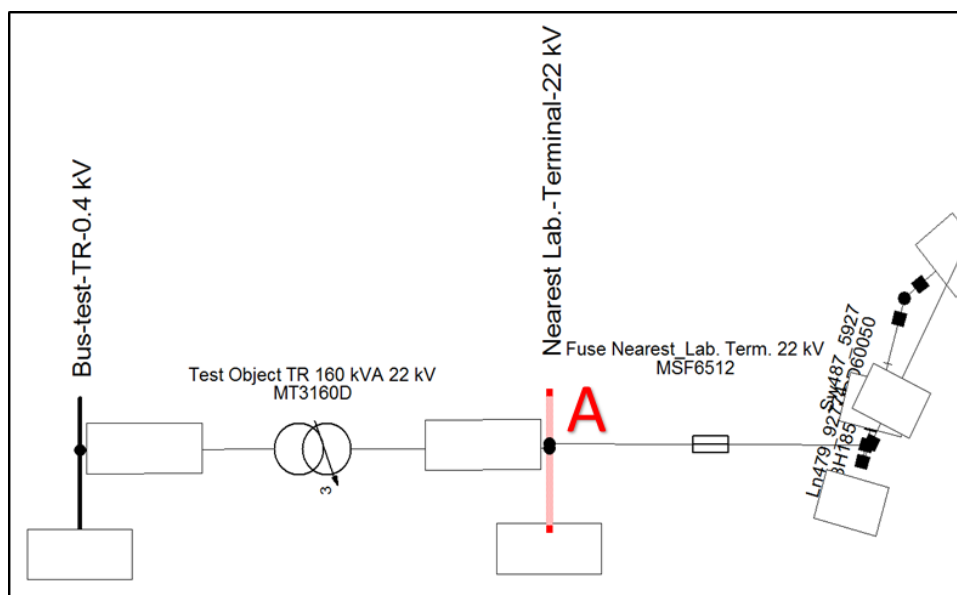
5.4.4 ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4

ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4.1

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบัสที่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 มากที่สุด คือ มีอิมพีแดนซ์ในสายป้อนต่ำที่สุด ($Z_{TH} = 0.0621 + j1.8764\Omega$ ที่จุด A) บนสายป้อนที่ 3 ดังรูปที่ 5.43 ในช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด ด้วยวิธีต่อโดยตรงระหว่างวงจรทดสอบฯ กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 5.44 ได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.9 และค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.10



รูปที่ 5.43 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 4.1



รูปที่ 5.44 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ 5.9 แรงแดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงแดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.5
	1,795	474_1287	0.9956	
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.5
	1,795	474_1287	0.9908	
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.5
	1,795	474_1287	0.9851	
250	2	Bus 115 kV	0.9483	0.5
	1,795	474_1287	0.9766	
315	2	Bus 115 kV	0.9472	0.5
	1,795	474_1287	0.9706	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
400	2	Bus 115 kV	0.9459	0.5
	1,795	474_1287	0.9627	
500	2	Bus 115 kV	0.9472	0.5
	1,795	474_1287	0.9701	
630	2	Nearest Lab.-Term.-22 kV	0.9421	0.5
	1795	Bus 115 kV	0.9423	
1,000	2	Nearest Lab.-Term.-22 kV	0.9379	0.5
	1795	Bus 115 kV	0.9416	
1,250	2	Nearest Lab.-Term.-22 kV	0.9235	0.5
	1795	Bus 115 kV	0.9391	
1,500	2	Nearest Lab.-Term.-22 kV	0.9096	0.5
	1795	Bus 115 kV	0.9367	
2,000	2	Nearest Lab.-Term.-22 kV	0.8935	0.5
	475	482_805952	0.8935	
	476	474_1298	0.8937	
	1,794	474_1287	0.8937	
	1,795	Bus 115 kV	0.9434	

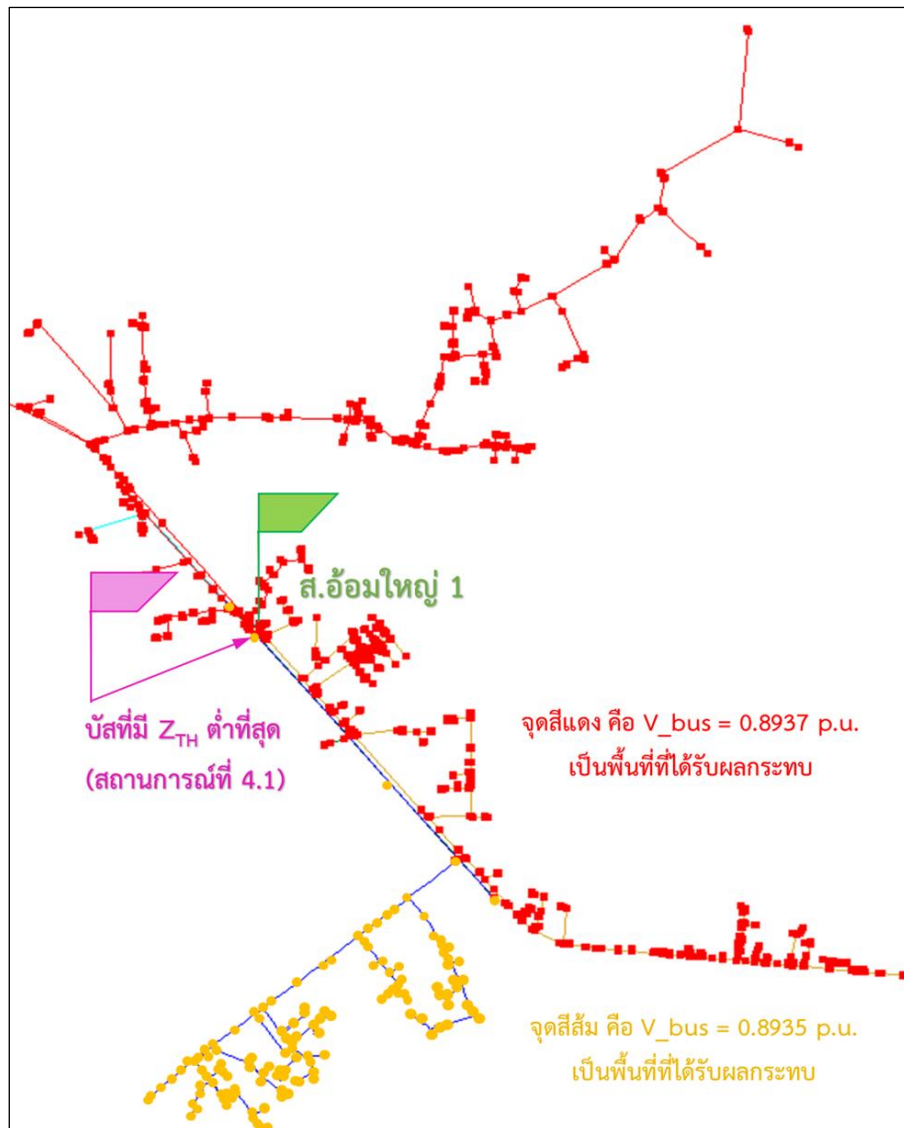
หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่อยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

ตารางที่ 5.10 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.1

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$I''_{k,test}$ (kA)	$i_{p,spec}$ (kA)		$i_{p,test}$ (kA)
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
50	1.6238	1.9846	1.8388	2.9560	3.2672	3.1614
100	3.2476	3.9693	3.6635	6.2802	6.9412	6.7412
160	5.1962	6.3509	5.8306	10.5692	11.6817	11.3057
250	8.1190	9.9232	9.0342	16.9983	18.7876	18.0957
315	10.2299	12.5032	11.3139	21.7495	24.0389	23.0678
400	12.9904	15.8771	14.2525	28.1274	31.0882	29.6344
500	9.9926	12.2132	11.2138	24.2271	26.7773	26.0732
630	20.4599	25.0065	21.9713	45.5471	50.3415	47.1408
1000	21.6506	26.4619	23.4170	49.6742	54.9030	51.8242
1250	27.0633	33.0774	28.8226	62.5197	69.1008	64.3445
1500	32.4760	39.6928	34.0658	74.8743	82.7558	76.1138
2000	43.3013	52.9238	44.6205	101.7977	112.5133	101.9567

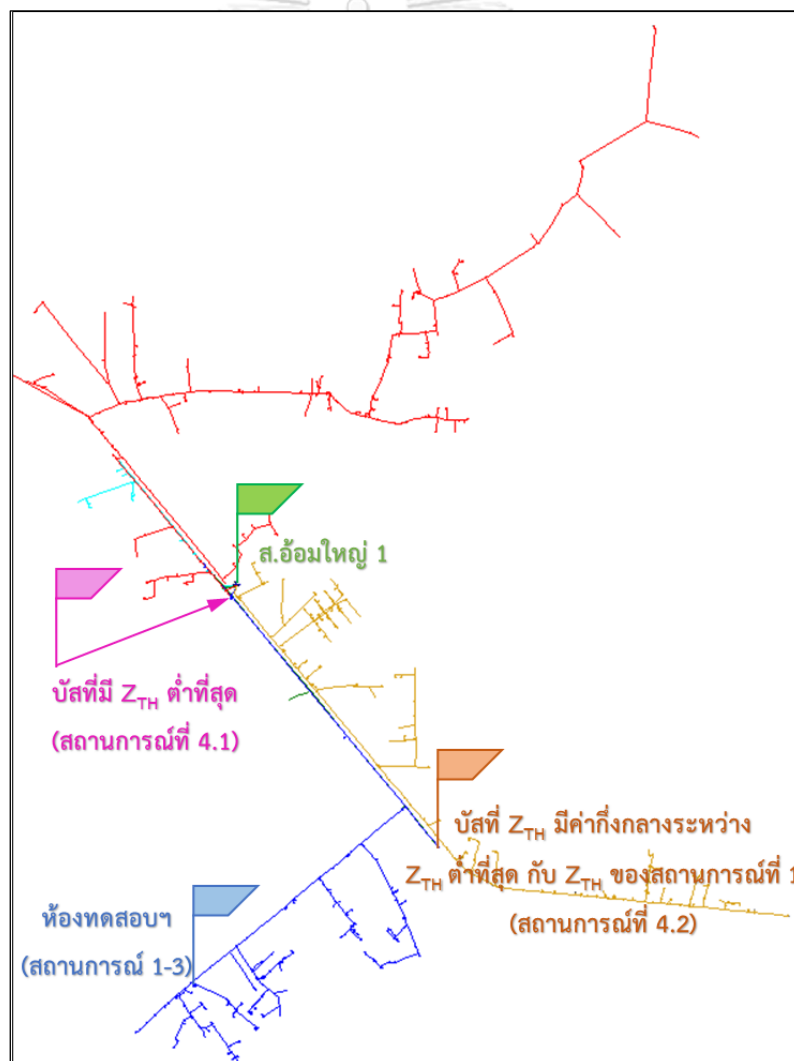
ผลจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA พิกัดแรงดัน 22 kV สำหรับสถานการณ์ที่ 4.1 นี้ มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA เพียงขนาดเดียวที่ก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.45 และหม้อแปลงไฟฟ้าทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้ามีค่ากระแสลัดวงจรฯ ในการทดสอบฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] คือ ขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA



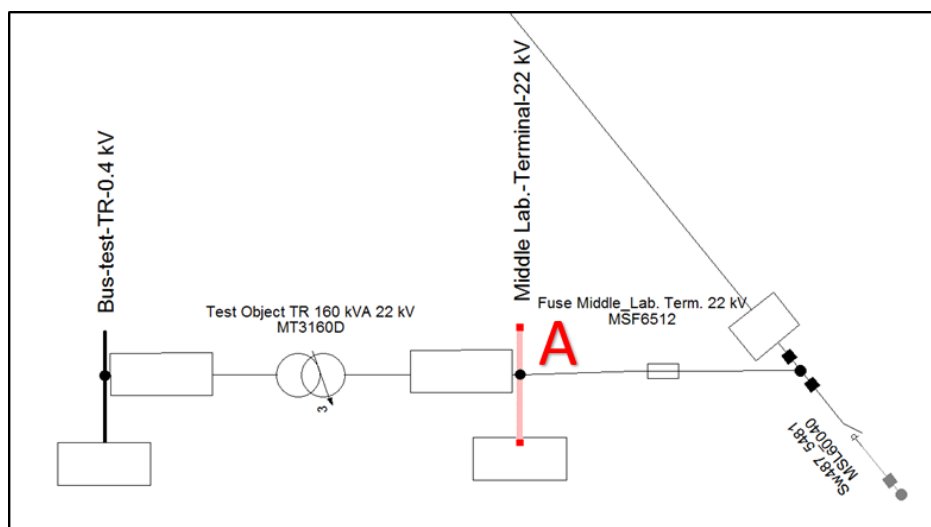
รูปที่ 5.45 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สถานการณ์ที่ 4.1 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA

ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4.2

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบัสที่อยู่ประมาณกึ่งกลางระหว่างสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 กับบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ($Z_{TH} = 0.5609 + j2.5834\Omega$ ที่จุด A) บนสายบ่อนที่ 3 ดังรูปที่ 5.46 ในช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด ด้วยวิธีต่อโดยตรงระหว่างวงจรทดสอบฯ กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 5.47 ได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.11 และค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.12



รูปที่ 5.46 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 4.2



รูปที่ 5.47 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ
กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ 5.11 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.2

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.5
	1,795	474_1287	0.9956	
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.5
	1,795	474_1287	0.9909	
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.5
	1,795	474_1287	0.9852	
250	2	Bus 115 kV	0.9483	0.5
	1,795	474_1287	0.9769	
315	2	Bus 115 kV	0.9473	0.5
	1,795	474_1287	0.9710	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
400	2 ⋮ 1,795	Bus 115 kV ⋮ 474_1287	0.9460 ⋮ 0.9634	0.5
500	2 ⋮ 1,795	Bus 115 kV ⋮ 474_1287	0.9473 ⋮ 0.9705	0.5
630	2 ⋮ 1,795	Mid. Lab.-Term.-22 kV ⋮ 474_1287	0.9202 ⋮ 0.9450	0.5
1,000	2 ⋮ 1,795	Mid. Lab.-Term.-22 kV ⋮ Bus_115 kV	0.9083 ⋮ 0.9413	0.5
1,250	2 ⋮ 465 466	Mid. Lab.-Term.-22 kV ⋮ 480_104952 482_1223498	0.8879 ⋮ 0.8934 0.9029	0.5
1,500	2 ⋮ 469 470	Mid. Lab.-Term.-22 kV ⋮ 480_138998 487_5457_C	0.8684 ⋮ 0.8860 0.9081	0.5
2,000	2 ⋮ 1,794 1,795	Mid. Lab.-Term.-22 kV ⋮ 474_1287 Bus 115 kV	0.8411 ⋮ 0.8889 0.9330	0.5

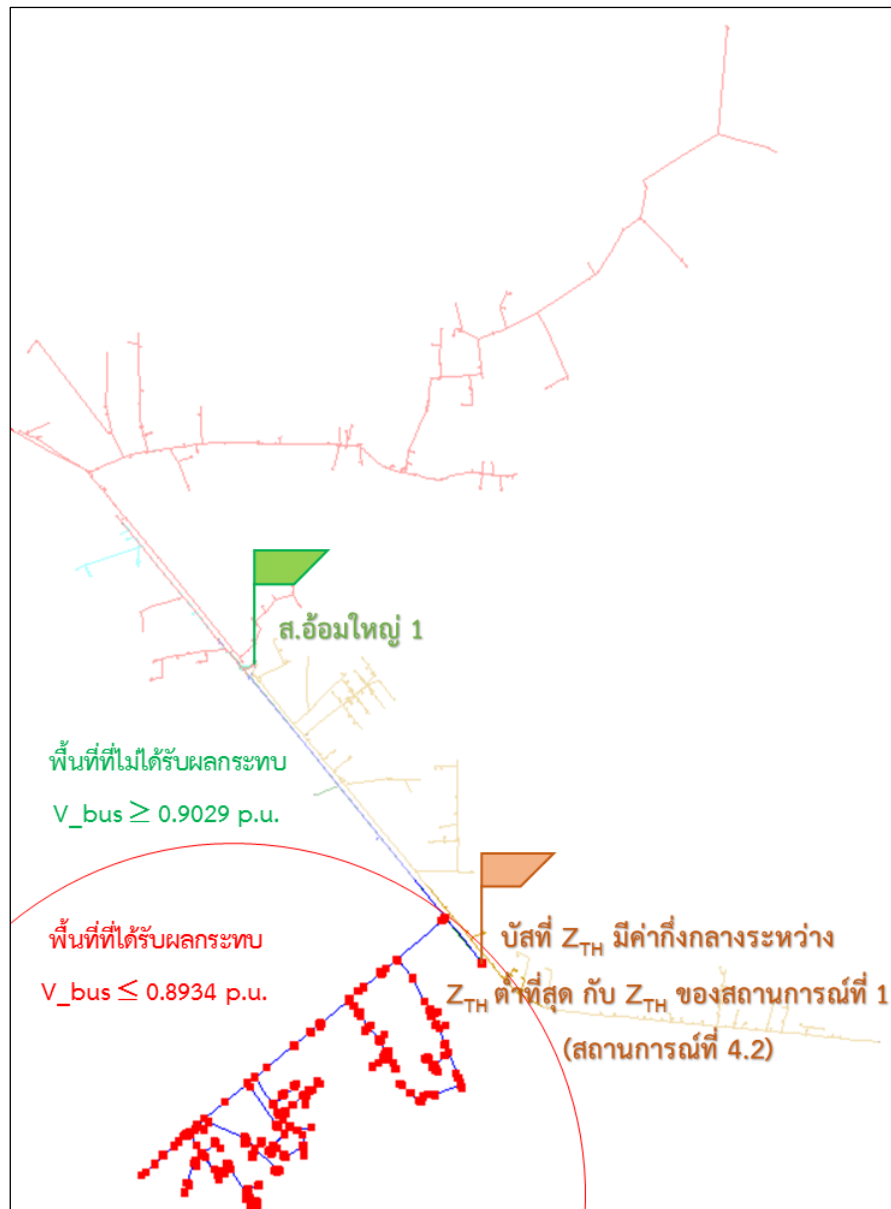
หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

ตารางที่ 5.12 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจร จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.2

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$I''_{k,test}$ (kA)	$i_{p,spec}$ (kA)		$i_{p,test}$ (kA)
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
50	1.6238	1.9846	1.8346	2.9560	3.2672	3.1537
100	3.2476	3.9693	3.6473	6.2802	6.9412	6.7065
160	5.1962	6.3509	5.7904	10.5692	11.6817	11.2085
250	8.1190	9.9232	8.9393	16.9983	18.7876	17.8484
315	10.2299	12.5032	11.1663	21.7495	24.0389	22.6679
400	12.9904	15.8771	14.0207	28.1274	31.0882	28.9786
500	9.9926	12.2132	11.0761	24.2271	26.7773	25.5700
630	20.4599	25.0065	21.4922	45.5471	50.3415	45.6173
1000	21.6506	26.4619	24.2389	49.6742	54.9030	52.2344
1250	27.0633	33.0774	29.6205	62.5197	69.1008	64.2188
1500	32.4760	39.6928	34.7649	74.8743	82.7558	75.2444
2000	43.3013	52.9238	42.0061	101.7977	112.5133	93.6771

ผลจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 2,000 kVA แรงดันพิกัด 22 kV สำหรับสถานการณ์ที่ 4.2 นี้ มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาด ตั้งแต่ 50 kVA ถึง 1,000 kVA ที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในขณะที่การทดสอบฯ ขนาดตั้งแต่ 1,250 kVA ถึง 2,000 kVA จะก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่อยู่ใกล้กับสถานบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.48 และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่ากระแสลัดวงจรฯ ในการทดสอบฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] คือ ขนาดตั้งแต่ 50 kVA ถึง 1,500 kVA



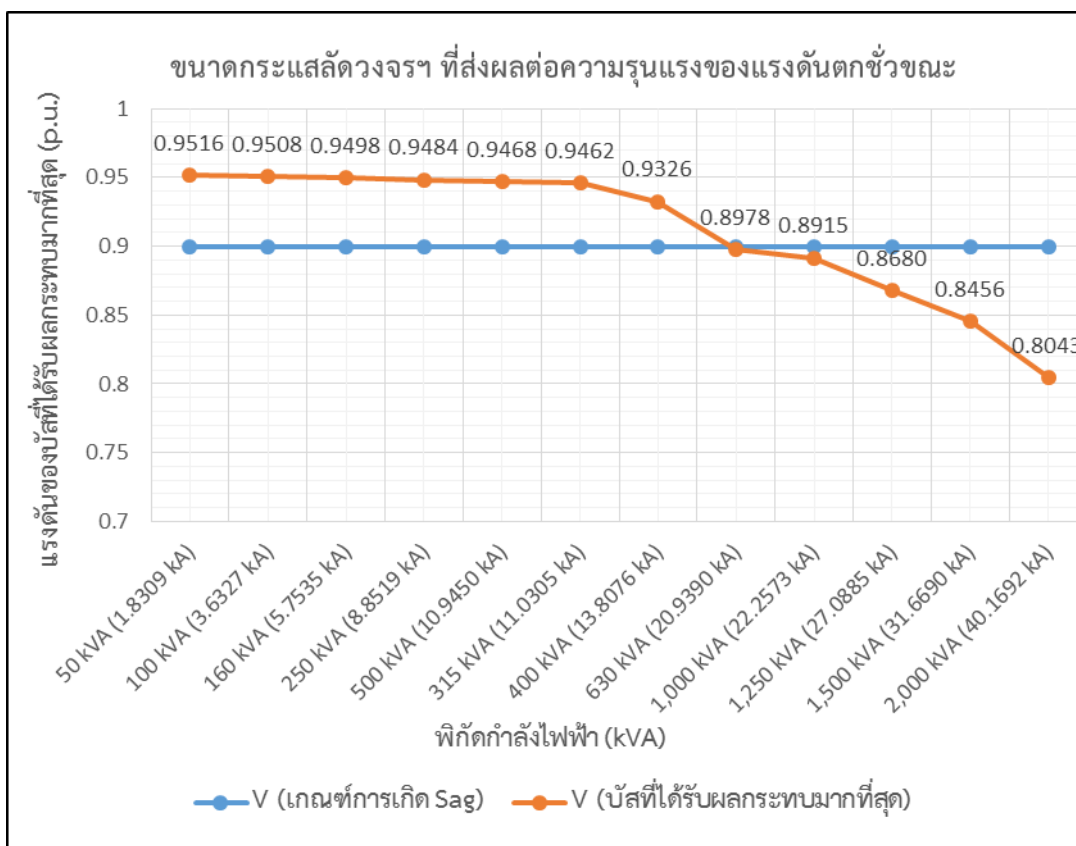
รูปที่ 5.48 บริเวณที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง สายป้อนที่ 3 สถานการณ์ที่ 4.2 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,250 kVA

5.5 วิเคราะห์ผล

(1) จากผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1 พบว่าขนาดกระแสลัดวงจรฯ ที่ได้จากการทดสอบฯ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA) และ %Z ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ ดังตารางที่ 3.1 มีผลอย่างมากต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.13 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสลัดวงจรฯ ที่ส่งผลต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 5.49 โดยจะเห็นว่า การทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 500 kVA ลงมา จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่การทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดตั้งแต่ 630 kVA ขึ้นไปจะก่อให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

ตารางที่ 5.13 ขนาดกระแสลัดวงจรกับระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เรียงจากน้อยไปมาก

No.	" $I_{k,test}$ (kA)	พิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA)	%Z	แรงดันของบัสที่ได้รับ ผลกระทบมากที่สุด (p.u.)
1	1.8309	50	4	0.9516
2	3.6327	100	4	0.9508
3	5.7535	160	4	0.9498
4	8.8519	250	4	0.9484
5	10.9450	500	6.5	0.9468
6	11.0305	315	4	0.9462
7	13.8076	400	4	0.9326
8	20.9390	630	4	0.8978
9	22.2573	1,000	6	0.8915
10	27.0885	1,250	6	0.8680
11	31.6690	1,500	6	0.8456
12	40.1692	2,000	6	0.8043



รูปที่ 5.49 กราฟขนาดกระแสลัดวงจร ที่ส่งผลต่อความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะ

(2) จากผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 สำหรับค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ดังตารางที่ 5.14 จะเห็นว่า มีค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ เท่ากัน ดังนั้นจากผลดังกล่าวจึงทำให้พบว่า ปริมาณการใช้โหลด (MW) ในสายป้อนที่ใช้ในการทดสอบฯ ไม่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 กับ 2

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	
			สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.9516
	1,795	474_1287	0.9956	0.9956

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	
			สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.9508
	1,795	474_1287	0.9909	0.9909
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.9498
	1,795	474_1287	0.9853	0.9853
250	2	Bus 115 kV	0.9484	0.9484
	1,795	474_1287	0.9771	0.9771
315	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9462	0.9462
	1,795	474_1287	0.9713	0.9713
400	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9326	0.9326
	1,795	474_1287	0.9640	0.9640
500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.9468	0.9468
	1,795	474_1287	0.9709	0.9709
630	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.8978
	171	480_168527	0.8984	0.8984
	172	487_5478_C	0.9005	0.9005
1,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8915	0.8915
	284	482_803970	0.8991	0.8991
	285	482_804046	0.9023	0.9023

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	
			สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2
1,250	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8680	0.8680
	459	480_159290	0.8956	0.8956
	460	487_5485_C	0.9021	0.9021
1,500	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8456	0.8456
	469	480_138998	0.8961	0.8961
	470	487_5457_C	0.9161	0.9161
2,000	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8043	0.8043
	1,794	474_1287	0.8939	0.8939
	1,795	Bus 115 kV	0.9339	0.9339

(3) จากผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 สำหรับค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบ ดังตารางที่ 5.15 จะเห็นว่า มีค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ แตกต่างกันน้อยมาก (มีค่าใกล้เคียงกันมาก) ดังนั้นจากผลดังกล่าวจึงทำให้พบว่า ขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฯ ในทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ที่เพิ่มจากระดับแรงดัน 22 kV เป็น 33 kV ในกรณีนี้ ไม่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะ เพราะหม้อแปลงที่ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าในการทดสอบ มีค่า %Z ค่อนข้างต่ำมาก คือ 0.2

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 กับ 3

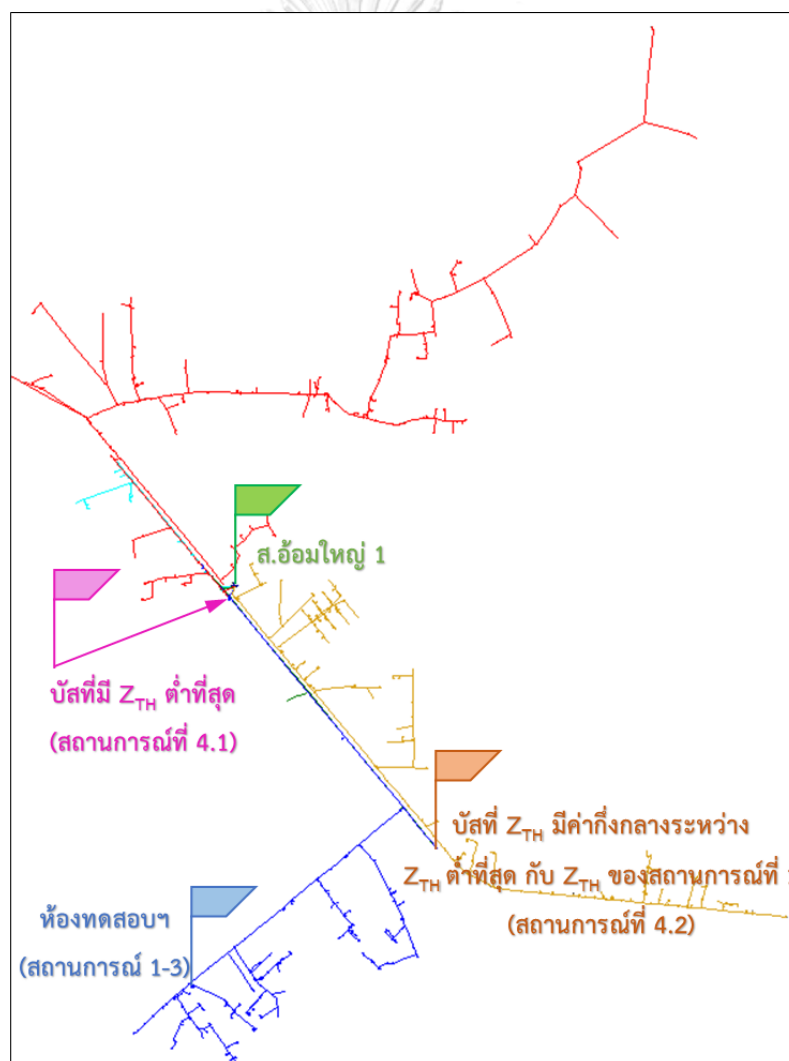
กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)		ผลต่าง (p.u.)
			สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 3	
50	2	Bus 115 kV	0.9516	0.9516	0
	1,795(1,796)	474_1287	0.9956	0.9956	0
100	2	Bus 115 kV	0.9508	0.9508	0
	1,795(1,796)	474_1287	0.9909	0.9909	0
160	2	Bus 115 kV	0.9498	0.9498	0
	1,795(1,796)	474_1287	0.9853	0.9853	0
250	2	Bus 115 kV	0.9484	0.9484	0
	1,795(1,796)	474_1287	0.9771	0.9771	0
315	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.9462	0.9463	0.0001
	1,795(1,796)	474_1287	0.9713	0.9714	0.0001
400	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.9326	0.9327	0.0001
	1,795(1,796)	474_1287	0.9640	0.9640	0
500	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.9468	0.9469	0.0001
	1,795(1,796)	474_1287	0.9709	0.9709	0
630	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.8981	0.0003
	171(172)	480_168527	0.8984	0.8986	0.0002
	172(173)	487_5478_C	0.9005	0.9008	0.0003

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)		ผลต่าง (p.u.)
			สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 3	
1,000	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.8915	0.8918	0.0003
	284(285)	482_803970	0.8991	0.8994	0.0003
	285(286)	482_804046	0.9023	0.9025	0.0002
1,250	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.8680	0.8684	0.0004
	459(460)	480_159290	0.8956	0.8959	0.0003
	460(461)	487_5485_C	0.9021	0.9024	0.0003
1,500	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.8456	0.8462	0.0006
	469(470)	480_138998	0.8961	0.8965	0.0004
	470(471)	487_5457_C	0.9161	0.9164	0.0003
2,000	2(3)	Lab.-Terminal-22 kV	0.8043	0.8053	0.0010
	1,794(1,795)	474_1287	0.8939	0.8944	0.0005
	1,795(1796)	Bus 115 kV	0.9339	0.9340	0.0001

หมายเหตุ

ตัวเลขลำดับบัสในวงเล็บหมายถึง ลำดับบัสของสถานการณ์ที่ 3 ซึ่งจะมีชื่อบัสตรงกับตัวเลขลำดับบัสนอกวงเล็บ ซึ่งหมายถึงลำดับบัสของสถานการณ์ที่ 2 (เนื่องจากสถานการณ์ที่ 3 มีบัส 33 kV (ลำดับบัสที่ 2) ที่ต่อออกจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ายกระดับแรงดันเพิ่มเข้ามา ดังนั้นจึงมีจำนวนบัสรวมแล้วมากกว่าสถานการณ์อื่นๆ อยู่ 1 บัส)

(4) จากผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสถานการณ์ที่ 1 ซึ่งแตกต่างกันที่ตำแหน่งที่ทำการทดสอบฯ ดังรูปที่ 5.50 จะพบว่าขนาดอิมพีแดนซ์ของสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ (Z_{TH}) หรือตำแหน่งจุดทดสอบฯ มีผลอย่างมากต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากจำนวนขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ แล้วทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ และความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เพิ่มขึ้นจากบัสที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด ในที่นี้คือบัสที่วงจรทดสอบฯ เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับการทดสอบฯ ที่ขนาด 2,000 kVA ดังตารางที่ 5.16



รูปที่ 5.50 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง
สำหรับเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการทดสอบของสถานการณ์ที่ 1, 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1, 4.1 และ 4.2

สถานการณ์	$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH}$	$ Z_{TH} $	จำนวนขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ แล้วเกิดแรงดันตกชั่วขณะ	แรงดันของบัสที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด กรณี 2,000 kVA
4.1	$Z_{TH} = 0.0621 + j1.8764\Omega$	1.8774 Ω (0.20%)	1 ขนาด (2,000 kVA)	<i>0.8935 p.u.</i>
4.2	$Z_{TH} = 0.5609 + j2.5834\Omega$	2.6436 Ω (38.02%)	3 ขนาด (1,250 – 2,000 kVA)	<i>0.8411 p.u.</i>
1	$Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$	3.4096 Ω (75.83%)	5 ขนาด (630 – 2,000 kVA)	<i>0.8043 p.u.</i>

(5) การทดสอบฯ ทุกสถานการณ์ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.17 และจากผลการทดสอบฯ โดยการพิจารณาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น ร่วมกับค่ากระแสลัดวงจร ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] ได้ข้อสังเกต/ข้อสรุป ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.17 สรุปรายละเอียดการทดสอบฯ ทุกสถานการณ์

สถานการณ์	ปริมาณการใช้โหลดในสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิด	ตำแหน่งที่ตั้งของจุดทดสอบฯ ($Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH}$)	ระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบฯ	จำนวนขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ
1	สูงสุด (8.05 MW) (94.71%)	$Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$ $(Z_{TH} = 3.4096\Omega)$ (75.83%)	22 kV	12 ขนาด (50 - 2,000 kVA)
2	ต่ำสุด (3.00 MW) (35.29%)	$Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$ $(Z_{TH} = 3.4096\Omega)$ (75.83%)	22 kV	12 ขนาด (50 - 2,000 kVA)
3	สูงสุด (8.05 MW) (94.71%)	$Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029\Omega$ $(Z_{TH} = 3.4096\Omega)$ (75.83%)	33 kV	12 ขนาด (50 - 2,000 kVA)
4.1	สูงสุด (8.05 MW)	$Z_{TH} = 0.0621 + j1.8764\Omega$ $(Z_{TH} = 1.8774\Omega)$	22 kV	12 ขนาด (50 - 2,000 kVA)

สถานการณ์	ปริมาณการใช้ โหลดในสายป้อนที่ ใช้เป็นแหล่งกำเนิด	ตำแหน่งที่ตั้งของจุดทดสอบฯ $(Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH})$	ระดับแรงดัน ที่ใช้ทดสอบฯ	จำนวนขนาดพิกัดหม้อ แปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ
	(94.71%)	(0.20%)		
4.2	สูงสุด (8.05 MW) (94.71%)	$Z_{TH} = 0.5609 + j2.5834\Omega$ $(Z_{TH} = 2.6436\Omega)$ (38.02%)	22 kV	12 ขนาด (50 - 2,000 kVA)

ตารางที่ 5.18 ข้อสังเกต/ข้อสรุป ผลการทดสอบฯ ทุกสถานการณ์

สถานการณ์	จำนวนขนาดพิกัด หม้อแปลงไฟฟ้าที่ ทดสอบฯ แล้ว เกิดแรงดันตกชั่วขณะ	จำนวนขนาดพิกัด หม้อแปลงไฟฟ้าที่ ทดสอบฯ แล้ว ไม่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ	กระแสลัดวงจร เป็นไปตาม IEC 60076-5	กระแสลัดวงจร ไม่เป็นไปตาม IEC 60076-5
1-3	5 ขนาด (630-2,000 kVA)	7 ขนาด (50-500 kVA)	7 ขนาด (50-500 kVA)	5 ขนาด (630-2,000 kVA)
4.1	1 ขนาด (2,000 kVA)	11 ขนาด (50-1,500 kVA)	12 ขนาด (50-2,000 kVA)	-
4.2	3 ขนาด (1,250-2,000 kVA)	9 ขนาด (50-1,000 kVA)	11 ขนาด (50-1,500 kVA)	1 ขนาด (2,000 kVA)

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบจำหน่าย เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยการนำข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ตัวอย่างมาสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory โดยพิจารณาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้า กำลังตั้งนี้คือ ขนาดกระแสลัดวงจรที่ทำการทดสอบฯ ที่เป็นผลมาจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA) และ %Z ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ ปริมาณการใช้โหลด (kW) ในสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในขณะทดสอบฯ ขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฯ (kV) และขนาดอิมพีแดนซ์ (Ω) ของสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่เกิดขึ้นในแต่ละปัจจัย

จากผลการทดสอบฯ พบว่าขนาดกระแสลัดวงจรฯ ที่ได้จากการทดสอบฯ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVA) และ %Z ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และขนาดอิมพีแดนซ์ของสายป้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ (Z_{TH}) หรือตำแหน่งจุดทดสอบฯ มีผลอย่างมากต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น ขณะที่ปริมาณการใช้โหลด (MW) ในสายป้อนที่ใช้ในการทดสอบฯ และขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฯ ในทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มจากระดับแรงดัน 22 kV เป็น 33 kV ในกรณีนี้ ไม่มีผลกระทบต่อระดับความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะ

สำหรับผลการทดสอบฯ โดยการพิจารณาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นร่วมกับค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 จะพบว่า

- 1) สำหรับสถานการณ์ที่ 1-3 ที่ทำการทดสอบฯ ณ บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง สามารถทำการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ เนื่องจากขนาดพิกัดดังกล่าว ไม่ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ และมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4]

ขณะที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 630 kVA ขึ้นไป ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากขนาดพิกัดดังกล่าว ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ และมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4]

- 2) สำหรับสถานการณ์ที่ 4.1 ที่ทำการทดสอบฯ ณ บัสที่อยู่ใกล้ ส.อ้อมใหญ่ 1 มากที่สุดสามารถทำการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 1,500 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ เนื่องจากขนาดพิกัดดังกล่าว ไม่ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ และมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ขณะที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV **ไม่ควร**ทำการทดสอบฯ เนื่องจากขนาดพิกัดดังกล่าว ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ถึงแม้ว่าจะมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ก็ตาม
- 3) สำหรับสถานการณ์ที่ 4.2 ที่ทำการทดสอบฯ ณ บัสที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสถานการณ์ที่ 1 กับสถานการณ์ที่ 4.1 สามารถทำการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 1,000 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ เนื่องจากพิกัดดังกล่าว ไม่ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ และมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ขณะที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,250 kVA และ 1,500 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 และ 33 kV **ไม่ควร**ทำการทดสอบฯ เนื่องจากขนาดพิกัดดังกล่าว ทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ถึงแม้ว่าจะมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] ก็ตาม และสุดท้ายสำหรับขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV ไม่สามารถทำการทดสอบฯ ได้ เนื่องจากทำให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาน/

ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ และมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4]

ดังนั้น จากการพิจารณาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นร่วมกับค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] ดังข้างต้นจะพบว่ามีกรณีที่ต้องหลีกเลี่ยง คือ

- 1) สถานการณ์ที่ 4.1 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 2,000 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV
- 2) สถานการณ์ที่ 4.2 สำหรับการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,250 kVA และ 1,500 kVA ที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV

ข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับการทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของ หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีดังต่อไปนี้

- 1) สำหรับบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นสถาบัน/ห้องปฏิบัติการที่ทำการทดสอบฯ อยู่ ณ ปัจจุบัน (ตามสถานการณ์ที่ 1-3) สามารถทำการทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kVA ถึง 500 kVA ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 [1] ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ เนื่องจากมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ขณะที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 630 kVA ขึ้นไปที่พิกัดแรงดัน 22 kV และ 33 kV ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากมีค่ากระแสลัดวงจรฯ ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076-5 [4] และยังก่อให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะกับระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ
- 2) สำหรับสถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่อาจเกิดขึ้นใหม่ในอนาคต ควรต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ ว่ามีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นที่อยู่ใกล้กับสถาบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ หรือไม่ และหาค่ากระแสลัดวงจรฯ ว่ามีค่ากระแสลัดวงจรฯ เป็นไปตาม IEC 60076-5 [4] หรือไม่ โดยการใช้ “รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบความทนต่อการลัดวงจร

ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย” วิเคราะห์หาผลลัพธ์ดังกล่าว ก่อนจะพิจารณาอนุญาตให้เป็นสถานบัน/ห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบฯ ที่สามารถใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ ได้

- 3) สำหรับกรณีถ้าวิเคราะห์ตามข้อที่ 2) แล้วพบว่าไม่สามารถทดสอบฯ ในบางพิกัดที่ต้องการได้ เนื่องจากเหตุผลด้านกระแสลัดวงจรฯ และ/หรือ ผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอเสนอแนะวิธีการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter) ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ตัวอย่างมาสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญตามข้อมูลที่ได้รับมาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า DigSILENT PowerFactory แทนการทดสอบฯ และการวัดค่าผลลัพธ์จากระบบจริง ดังนั้นค่าผลลัพธ์ที่ได้อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก ข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ GIS อาจจะยังไม่ได้รับการปรับปรุง (Update) ข้อมูล ให้เป็นข้อมูลที่ถูกต้องล่าสุด ณ วันที่ได้รับข้อมูล หรือข้อมูลใน PEA Library ซึ่งเปรียบเทียบมาตรฐานข้อมูลของข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อาจจะยังไม่ได้รับการปรับปรุง (Update) ข้อมูล ให้เป็นข้อมูลที่ถูกต้องล่าสุด ณ วันที่ได้รับข้อมูลเช่นกัน หรือลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของอุปกรณ์ในระบบ เช่น การถูกกัดกร่อน (corrosion) ที่หน้าสัมผัสของตัวนำที่เชื่อมต่อกัน อาจทำให้เกิดจุดร้อน เป็นค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นมาของระบบที่เราไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ และไม่สามารถที่จะควบคุมได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สิ่งที่สำคัญคือ รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์หาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการทดสอบฯ ควรเป็นไปตามการนำเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบฯ จากแบบจำลองระบบไฟฟ้า มีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบฯ จากระบบจริงมากที่สุด

รายการอ้างอิง

- [1] กองข้อกำหนดทางเทคนิค ฝ่ายวิศวกรรม, "THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 KV AND 33 KV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2558.
- [2] แผนกวิเคราะห์และวางแผนการจ่ายไฟ กองปฏิบัติการ ฝ่ายปฏิบัติการและบำรุงรักษา, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคกลาง (จ.นครปฐม).
- [3] แผนกวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [4] Power Transformers Part 5, "Ability to withstand short circuit," IEC standard 60076-5, 2006-02.
- [5] "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2559.
- [6] กองจัดหาภายในประเทศ ฝ่ายจัดหา, "หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ สถาบัน KEMA Laboratories (Holland)," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [7] กองจัดหาภายในประเทศ ฝ่ายจัดหา, "หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ สถาบัน CESI (ITALY)," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [8] กองจัดหาภายในประเทศ ฝ่ายจัดหา, "หนังสือรับรองผลการทดสอบฯ จากการใช้ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [9] "เอกสารทางเทคนิค เพื่อขออนุมัติทำการทดสอบฯ ของสถาบัน/ห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระแห่งหนึ่ง ตามรายละเอียดสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 สำหรับการทดสอบที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA's power systems) เป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการทดสอบฯ (รูปแบบที่ 3)," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [10] Power Transformer, TIS standard 384, 2000.
- [11] Power Transformer Part 1, "General," IEC standard 60076-1, 2011.
- [12] Fluids for electrotechnical applications, "Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear," IEC standard 60296, 2012.
- [13] Bushings up to 1000 V and from 250 A to 5000 A, "for liquid filled transformers," DIN standard 42530, German version HD 596 S1:1996.
- [14] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE standard 1159, 1995.

- [15] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30, "Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods," IEC standard 61000-4-30, 2015.
- [16] IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, IEEE standard 1100, 2005.
- [17] Roger C. Dugan and Mark F. McGranaghan and Surya Santoso and H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*.
- [18] T. Tayjasanant., *Fundamentals of power quality*. Chulalongkorn University.
- [19] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0, "Calculation of currents," IEC standard 60909, 2001.
- [20] "คู่มือการใช้โปรแกรมประยุกต์ Network Analysis and Power Flow Modeling ฉบับปรับปรุง โครงการพัฒนาสารสนเทศระบบไฟฟ้าทางภูมิศาสตร์ ระยะที่ 2," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [21] "Fault current contribution from DG," in "Technology for a better society," SINTEF.
- [22] กองข้อกำหนดทางเทคนิค ฝ่ายวิศวกรรม, "ตารางเปรียบเทียบรายละเอียดสเปคชุดเครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้า ขนาดไม่น้อยกว่า 40 kW," การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2561.
- [23] <http://www.ecosolar.co.th>. (2018). ติดตั้งระบบโซลาร์รูฟท็อป อินเวอร์เตอร์ SMA + แผง PV Solar ราคา 43,000 บาทต่อกิโลวัตต์ สำหรับขนาด 25 กิโลวัตต์ ถึง 100 กิโลวัตต์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter) ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย

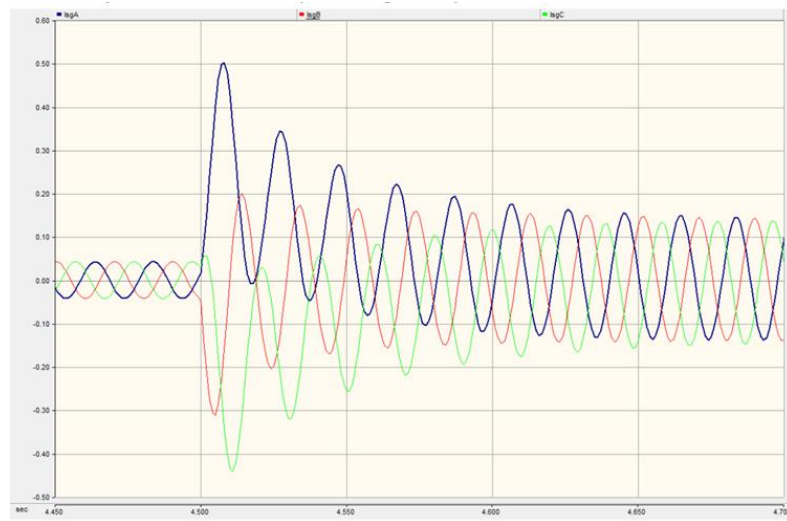
ในระหว่างเกิดความผิดปกติ (fault) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) ในระบบไฟฟ้ากำลัง พีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverters) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีฟังก์ชัน “Fault current contribution” ซึ่งสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าค่ากระแสสูงสุดในสภาพการใช้งานปกติ และจ่ายกระแสดังกล่าวเข้าสู่จุดที่เชื่อมต่อเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

Fault current contribution จาก Distributed generation (DG) มีดังต่อไปนี้ [21]

- (1) ซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ (Synchronous generator)
- (2) อะซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ (Asynchronous generator)
- (3) พีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter)

พฤติกรรมของ Fault current contribution จาก DG แบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้ [21]

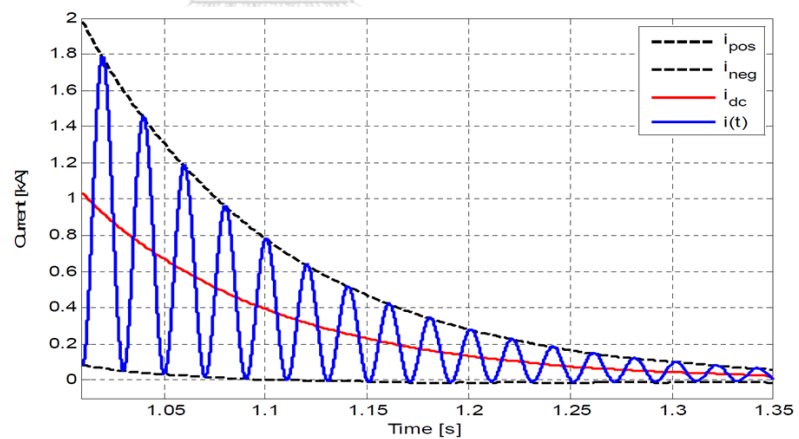
- (1) Synchronous generator short circuit contribution
 - ค่า Peak ac-component : ประมาณ 6 เท่าของค่าพิกัด
 - ค่า Max dc-component: มีค่าเหมือนกับค่า Peak ac
 - การเข้าสู่ Steady-state ของกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ และ AVR (Automatic Voltage Regulation)



รูปที่ 1 ก.1 Synchronous generator short circuit contribution

(2) Asynchronous generator short circuit current contribution

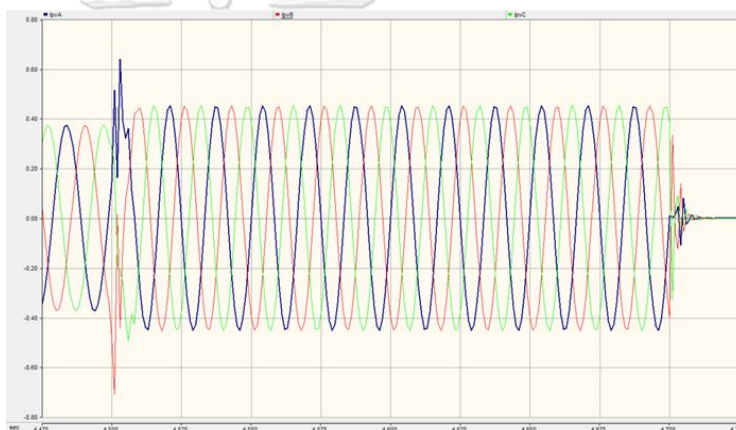
- ค่า Peak ac-component : ประมาณ 6 เท่าของค่าพิกัด
- ค่า Max dc-component: มีค่าเหมือนกับค่า Peak ac
- ค่ากระแสจะค่อยๆ ลดลงจนกลายเป็นศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ (ไม่มี AVR)



รูปที่ 2 ก.2 Asynchronous generator short circuit contribution

(3) PV Inverter short circuit current contribution

- ค่ากระแสไฟฟ้าที่ช่วยจ่ายเข้าจุดเชื่อมต่อ (current contribution) ขณะเกิดความผิดปกติ (Fault) ของระบบไฟฟ้าจะไม่เป็นศูนย์ (not zero) และ มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามการออกแบบ (varies by design)
- ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) ถูกจำกัดโดยความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ค่ากระแสไฟฟ้าที่ช่วยจ่ายเข้าจุดเชื่อมต่อ (current contribution) ขณะเกิดความผิดปกติ (Fault) ของระบบไฟฟ้า ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 100% ถึง 120% ของค่ากระแสปกติของอินเวอร์เตอร์ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละราย)



รูปที่ ก.3 PV Inverter : Generic Model

เหตุผลที่วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนะให้ใช้ฟิวินเวอร์เตอร์ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ เนื่องจากมีข้อดีมากกว่าเจนเนอเรเตอร์ ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 เปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสีย การเลือกใช้ระหว่างฟิวินเวอร์เตอร์กับเจนเนอเรเตอร์สำหรับ

Fault current contribution ขณะทดสอบฯ

ฟิวินเวอร์เตอร์	เจนเนอเรเตอร์
<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นพลังงานต้นกำลัง - สนับสนุนการใช้พลังงานทดแทน - โครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีส่วนประกอบน้อย - ชิ้นเพราะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นข้อดีในเรื่องของการสำรองอะไหล่ และการบำรุงรักษาทำได้ง่าย - โครงสร้างแทบจะไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ทำให้แทบจะไม่เกิดการสึกหรอ เป็นข้อดีในเรื่องการบำรุงรักษา - ไม่มีเสียงดังขณะทำงาน - ขณะทำงานไม่ปลดปล่อย CO₂ 	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - สนับสนุนการใช้พลังงานทดแทน - ไม่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า - ราคาพร้อมติดตั้งถูกกว่าฟิวินเวอร์เตอร์ ประมาณ 3.53 เท่า (ราคา 12,167 บาทต่อกิโลวัตต์) [22]
<p>ข้อเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - อาจทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า - ราคาพร้อมติดตั้งสูงกว่าเจนเนอเรเตอร์ ประมาณ 3.53 เท่า (ราคา 43,000 บาทต่อกิโลวัตต์) [23] 	<p>ข้อเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นพลังงานต้นกำลัง - โครงสร้างซับซ้อน มีส่วนประกอบมากขึ้น ทั้งส่วนที่เป็นทางไฟฟ้า และส่วนที่เป็นทางกล ทำให้ต้องสำรองอะไหล่่มาก และการบำรุงรักษาทำได้ยาก - โครงสร้างส่วนที่เป็นทางกลมีการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการสึกหรอ ดังนั้นต้องได้รับการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ - มีเสียงดังขณะทำงาน - ขณะทำงานจะปลดปล่อย CO₂

คุณลักษณะของ PV Inverter short circuit current contribution [21]

- พีวีอินเวอร์เตอร์จะตรวจจับการเกิดความผิดปกติ (fault) ได้ 2 วิธี คือ
 - Internal under voltage protection
 - Current and voltage unbalance
- มุมของกระแสฟอลต์
 - มุมกระแสฟอลต์ของพีวีอินเวอร์เตอร์ จะเป็นมุมเดียวกันกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากขั้วต่อ ก่อนที่จะเกิดความผิดปกติ (fault) ขึ้น
 - มุมกระแสฟอลต์ของระบบ จะทำมุมประมาณ 80 – 90 องศา เทียบกับมุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดขึ้นอยู่กับอัตราส่วน X/R
- ค่าความถี่ของกระแสฟอลต์ของพีวีอินเวอร์เตอร์
 - แรงดันที่ขั้วต่อมีค่าต่ำเกินไปสำหรับการนำไปหาค่าความถี่ และมุมเฟส
 - เฟสล็อกกลูป (Phase-locked Loop) ของอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนความถี่อย่างทันทีทันใด จาก +1 Hz ถึง +10 Hz
 - เวกเตอร์ของกระแสพีวีอินเวอร์เตอร์จะหมุนตามกระแสฟอลต์ของระบบ

กระแสลัดวงจรที่ช่วยจ่ายเข้าจุดเชื่อมต่อ (Short circuit contribution) จากพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ (full size converters) ตามมาตรฐาน IEC 60909:2016

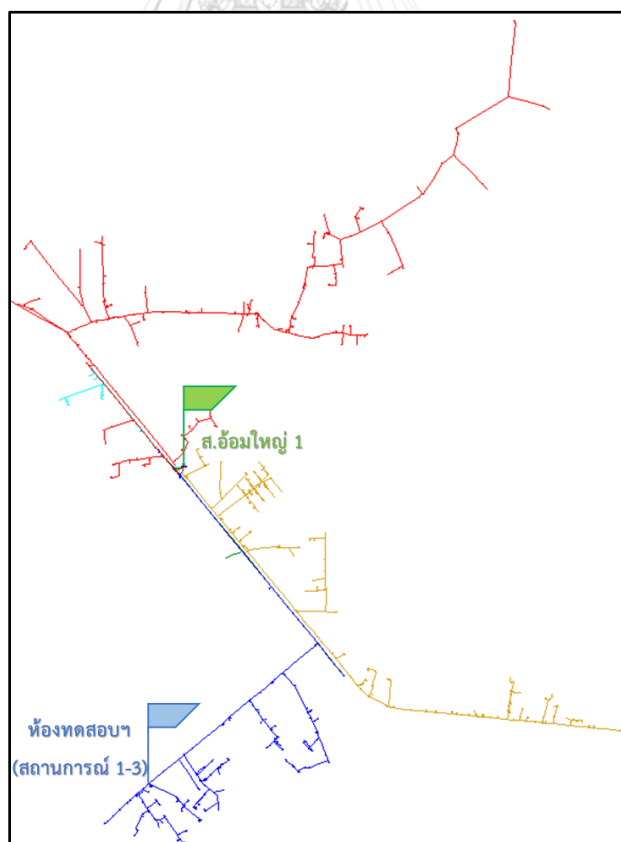
- มาตรฐาน IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0 : Calculation of currents
 - New : “short circuit contribution from power station units with full size converters (for instance PV) and from wind power station units with doubly fed induction generator and full converters.”
- กระแสลัดวงจรที่ช่วยจ่ายเข้าจุดเชื่อมต่อ (Short circuit contribution) จากพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ (full size converters)
 - สร้างแบบจำลองในระบบซีควเอนซ์บวก (Positive sequence) โดยใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแส (Current source)
 - (1) ข้อมูลควรเป็นไปตามที่ผู้ผลิตให้มา สำหรับแต่ละประเภทของการลัดวงจร
 - (2) ค่ากระแสลัดวงจรที่ช่วยจ่ายเข้าจุดเชื่อมต่อ (Short circuit current contribution) จากวงจรสมมูลของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจะถูกคำนวณไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม กระแสที่ช่วยจ่ายจากพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ (full size converter) จะถูกเพิ่มเข้าไปด้วย
 - ถ้ากระแสลัดวงจรที่ช่วยจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์มีปริมาณไม่สูงเกินกว่า 5% ของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นขณะที่ยังปราศจากแหล่งพลังงานเหล่านี้ ค่ากระแสลัดวงจรที่ช่วยจ่ายดังกล่าวอาจจะเลยได้
 - แหล่งพลังงาน เช่น PV กับ พิกัดของคอนเวอร์เตอร์ จะถูกละเลยเมื่อมีการคำนวณองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) ของกระแสลัดวงจร
 - ค่ายอดของกระแส (The peak current) ของกระแสที่ช่วยจ่ายโดยคอนเวอร์เตอร์ คือ $\sqrt{2}I_{rms}$
 - มาตรฐาน IEC 60909 ไม่พิจารณาการตอบสนองแบบไดนามิกส์ (dynamic response) และการเปลี่ยนความถี่ (frequency change) ของคอนเวอร์เตอร์

การทดลองใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter) ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ

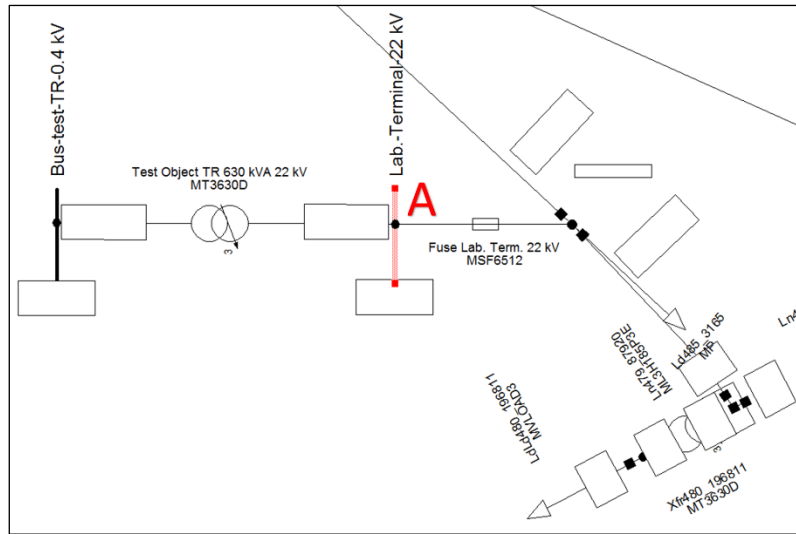
(1) พิจารณาผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1 สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า **630 kVA** แรงดันพิกัด 22 kV

ผลการทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1

ทดสอบความทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย ตามสเปคอ้างอิงเลขที่ RTRN-035/2558 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV และทุกขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ณ บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง ($Z_{TH} = 0.8465 + j3.3029 \Omega$ ที่จุด A) บนสายป้อนที่ 3 ที่จ่ายออกจากสถานีไฟฟ้าอ้อมใหญ่ 1 ดังรูปที่ ก.4 ในช่วงเวลาการใช้โหลดสูงสุด ด้วยวิธีต่อโดยตรงระหว่างวงจรทดสอบฯ กับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ ก.5 ได้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างขณะทำการทดสอบฯ ดังตารางที่ ก.2 และผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ดังตารางที่ ก.3



รูปที่ ก.4 แบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่างสำหรับสถานการณ์ที่ 1



รูปที่ ก.5 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบฯ กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าในพื้นที่ตัวอย่าง ที่จุด A

ตารางที่ ก.2 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดันขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลาขณะทดสอบ (second)
630	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.5
	171	480_168527	0.8984	
	172	487_5478_C	0.9005	

หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำการลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

ตารางที่ ก.3 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec} (kA)$		$I''_{k,test} (kA)$	$i_{p,spec} (kA)$		$i_{p,test} (kA)$
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
630	20.4599	25.0065	20.9390	45.5471	50.3415	44.3106

(2) คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ต้องการสนับสนุนจากฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของฟิวอินเวอร์เตอร์

- จากการพิจารณา ค่า $i_{p,test} < i_{p,spec}$ ดังนั้นเราต้องกำหนดค่า $i_{p,test}$ ที่เราต้องการจะได้ใหม่ ซึ่งต้องให้มีค่าอยู่ระหว่างค่าต่ำสุด กับค่าสูงสุด ตามตารางที่ ก.3

- กำหนดค่า $i_{p,test,new} \approx 46 \text{ kA}$

- ค่า X/R ratio ของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 630 kVA 22 kV มีค่า 4.19

- หาค่า $k \times \sqrt{2}$ (ตัวคูณค่ายอด)

ใช้วิธี Linear Interpolation จากตารางที่ 3.4 จะได้ค่า $k \times \sqrt{2} = 2.11$

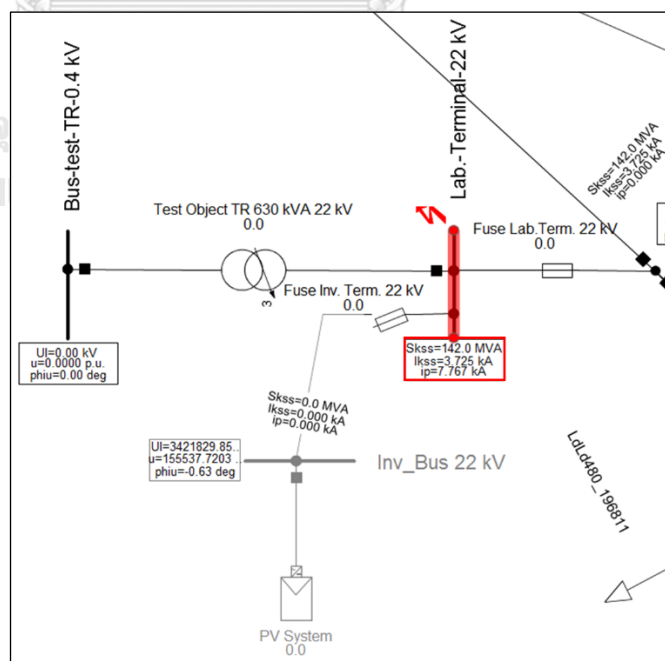
- จากสมการ

$$i_p = I_k'' \times k \times \sqrt{2}$$

$$I_k'' = \frac{i_p}{k \times \sqrt{2}} = \frac{46 \text{ kA}}{2.11} \approx 22 \text{ kA}$$

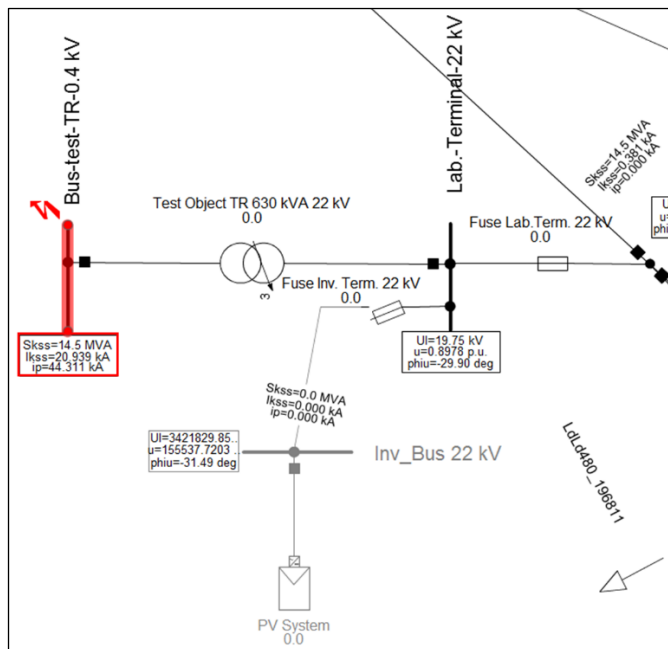
- ดังนั้นต้องการ I_k'' ด้านทุติยภูมิเพิ่ม = $22 \text{ kA} - 20.939 \text{ kA} \approx 1.061 \text{ kA}$

- พิจารณาค่า I_k'' บัสที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ ได้ $I_k'' \approx 3.725 \text{ kA}$ ซึ่งเป็นบัสที่อยู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบฯ ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 กระแสลัดวงจร ณ บัสที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดในการทดสอบฯ

- พิจารณาค่า I_k'' บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบฯ
ได้ $I_k'' \approx 20.939 \text{ kA}$ ดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 กระแสลัดวงจร ณ บัสที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบฯ

- หาค่า I_k'' ที่ต้องการสนับสนุนจากฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ได้

$$\frac{3.725 \text{ kA}}{20.939 \text{ kA}} \times 1.061 \text{ kA} = 0.1887 \text{ kA} \approx 0.2 \text{ kA}$$

- โดยทั่วไป $I_k'' \approx 1.0 I_N$ ดังนั้น

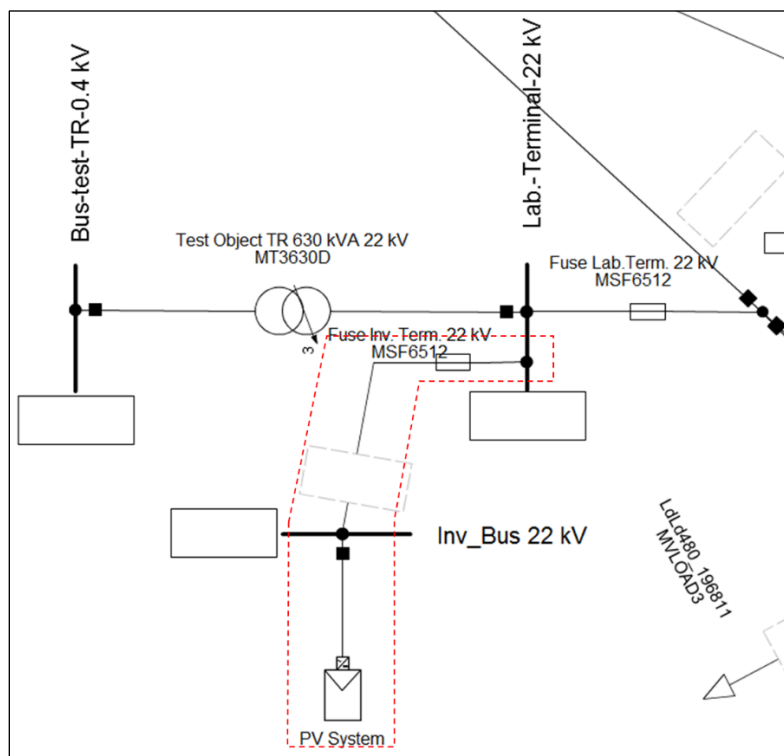
$$\begin{aligned} S_{3\phi} &= \sqrt{3} V_L I_L \\ &= \sqrt{3} \times 22 \text{ kV} \times 0.2 \text{ kA} \\ &= 7621 \text{ kVA} \end{aligned}$$

เจนเนอเรเตอร์ (Generator) ราคา = 81,134,119 บาท PF = 0.875

พีวีอินเวอร์เตอร์ (PV Inverter) ราคา = 327,703,000 บาท PF = 1.0

(3) สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าโดยนำพีวีอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับแบบจำลองระบบไฟฟ้าสถานการณ์ที่ 1 ที่จุด PCC ซึ่งเป็นบัสใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบฯ และเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (ระดับแรงดัน 22 kV) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

- สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าโดยนำพีวีอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับแบบจำลองระบบไฟฟ้าสถานการณ์ที่ 1 ที่จุด PCC ดังรูปที่ ก.8



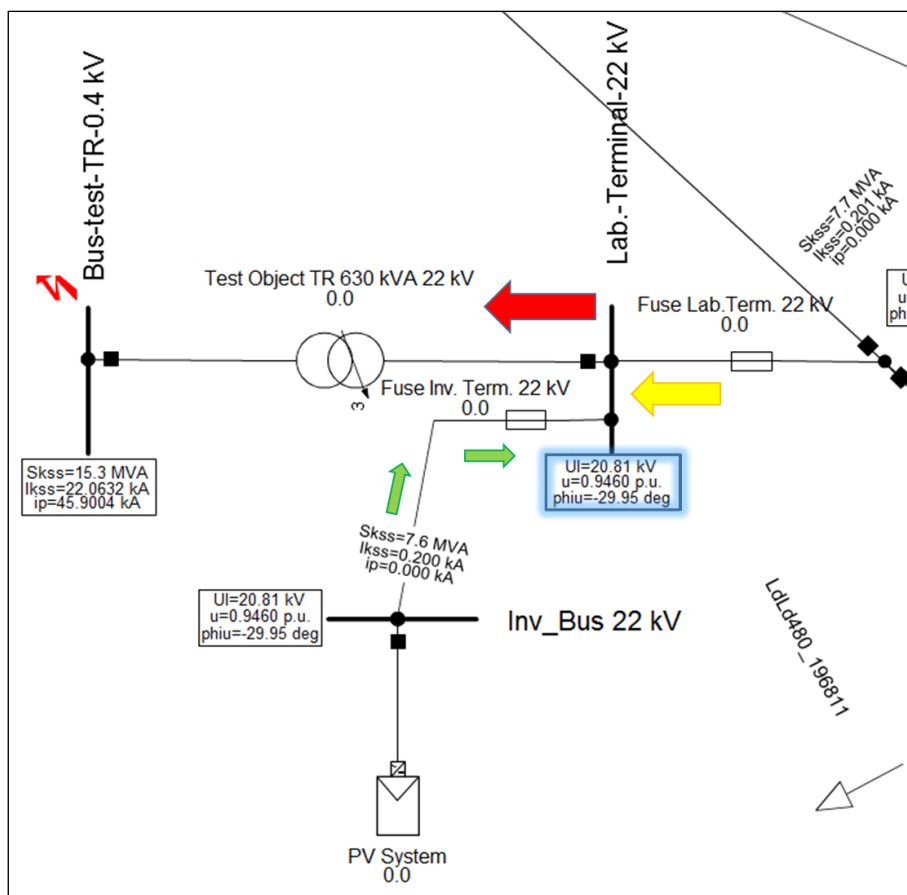
รูปที่ ก.8 นำพีวีอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับแบบจำลองระบบไฟฟ้าสถานการณ์ที่ 1 ที่จุด PCC

- กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็น และค่า I_k'' ที่เรากำหนดได้ ดังรูปที่ ก.9 และรูปที่ ก.10 ตามลำดับ

รูปที่ ก.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็น

รูปที่ ก.10 การกำหนดค่า I_k''

(4) ผลการทดสอบฯ สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ



รูปที่ ก.11 แบบจำลองแสดงผลการทดสอบฯ สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 630 kVA แรงดันพิกัด 22 kV

ตารางที่ ก.4 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 (Before)

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดันขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลาขณะทดสอบ (second)
630	2	Lab.-Terminal-22 kV	0.8978	0.5
	171	480_168527	0.8984	
	172	487_5478_C	0.9005	

ตารางที่ ก.5 แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 (After)
 (สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์
 ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ)

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (second)
630	2 3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV ทุกบัส	0.9460 ≥ 0.9460	0.5

ตารางที่ ก.6 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 (Before)

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$I''_{k,test}$ (kA)	$i_{p,spec}$ (kA)		$i_{p,test}$ (kA)
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
630	20.4599	25.0065	20.9390	45.5471	50.3415	44.3106

ตารางที่ ก.7 ผลลัพธ์ค่าของกระแสลัดวงจรฯ จากการทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1 (After)
 (สำหรับการใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์
 ช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ขณะทดสอบฯ)

Rated Power (kVA)	Rated Voltage : 22 kV/400V					
	$I''_{k,spec}$ (kA)		$I''_{k,test}$ (kA)	$i_{p,spec}$ (kA)		$i_{p,test}$ (kA)
	(Min.)	(Max.)		(Min.)	(Max.)	
630	20.4599	25.0065	22.0632	45.5471	50.3415	45.9004

(5) สรุปผล

การใช้ฟังก์ชัน “Fault current contribution” ของพีวีอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าเข้าสู่จุดที่เชื่อมต่อเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ขณะทำการทดสอบความสามารถการทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
50	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9516	
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9913 – 0.9956	
100	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9508	
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9825 – 0.9909	
160	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9498	
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9720 – 0.9853	
250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9484	
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9568 – 0.9771	
315	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9462 – 0.9713	
400	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9326 – 0.9640	
500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9468 – 0.9709	
630	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8978	
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8984	
	172-1,795	487_5478_C - 474_1287	0.9005 - 0.9451	
1,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8915	
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8920	
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8943	
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8969	
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8978	
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8991	
	285-1,795	482_804046 - Bus 115 kV	0.9023 - 0.9422	
1,250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8680	
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8686	
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8714	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8746	
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8756	
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8772	
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8811	
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8834	
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8845	
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8848	
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8888	
	368	482_826053	0.8902	
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8908	
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8933	
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8936	
	382	482_826218	0.8940	
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8956	
	460-1,795	487_5485_C - Bus 115 kV	0.9021 - 0.9399	
1,500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8456	
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8464	
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8497	
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8534	
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8546	
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8565	
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8610	
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8636	
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8650	
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8653	
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8700	
	368	482_826053	0.8716	
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8724	
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8752	
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8756	
	382	482_826218	0.8760	
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8779	
	460-461	487_5485_C - 482_826444	0.8855	
	462-463	487_5486_C - 487_5486	0.8858	
	464-465	487_5481_C - 482_826470	0.8860	
	466-469	482_1223498 - 480_138998	0.8961	
	470-1,795	487_5457_C - Bus 115 kV	0.9161 - 0.9378	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)	
2,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5	
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8043		
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8054		
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8094		
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8142		
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8157		
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8181		
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8237		
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8271		
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8289		
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8292		
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8351		
	368	482_826053	0.8372		
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8382		
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8418		
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8422		
	382	482_826218	0.8428		
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8452		
	460-461	487_5485_C - 482_826444	0.8548		
	462-463	487_5486_C - 487_5486	0.8551		
	464-465	487_5481_C - 482_826470	0.8554		
	466-469	482_1223498 - 480_138998	0.8682		
	470-472	487_5457_C - 482_805957	0.8934		
	473-474	487_5927_C - 487_5927	0.8936		
	475	482_805952	0.8937		
	476-1,794	474_1298 - 474_1287	0.8939		
		1,795	Bus 115 kV		0.9339

ตารางที่ ข.2 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 2

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)		
50	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2	Bus 115 kV	0.9516			
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9913 – 0.9956			
100	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2	Bus 115 kV	0.9508			
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9825 – 0.9909			
160	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2	Bus 115 kV	0.9498			
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9720 – 0.9853			
250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2	Bus 115 kV	0.9484			
	3-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9568 – 0.9771			
315	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9462 – 0.9713			
400	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9326 – 0.9640			
500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2-1,795	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9468 – 0.9709			
630	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8978			
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8984			
	172-1,795	487_5478_C - 474_1287	0.9005 - 0.9451			
1,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5		
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8915			
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8920			
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8943			
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8969			
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8978			
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8991			
	285-1,795	482_804046 - Bus 115 kV	0.9023 - 0.9422			
	1,250	1	Bus-test-TR-0.4 kV		0.0000	0.5
		2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811		0.8680	
7-171		487_6005_C - 480_168527	0.8686			
172-173		487_5478_C - 487_5478	0.8714			
174-179		482_803883 - 480_24759	0.8746			
180-282		487_5479_C - 480_197359	0.8756			

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8772	
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8811	
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8834	
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8845	
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8848	
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8888	
	368	482_826053	0.8902	
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8908	
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8933	
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8936	
	382	482_826218	0.8940	
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8956	
	460-1,795	487_5485_C - Bus 115 kV	0.9021 - 0.9399	
1,500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8456	
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8464	
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8497	
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8534	
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8546	
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8565	
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8610	
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8636	
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8650	
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8653	
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8700	
	368	482_826053	0.8716	
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8724	
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8752	
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8756	
	382	482_826218	0.8760	
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8779	
	460-461	487_5485_C - 482_826444	0.8855	
	462-463	487_5486_C - 487_5486	0.8858	
	464-465	487_5481_C - 482_826470	0.8860	
	466-469	482_1223498 - 480_138998	0.8961	
	470-1,795	487_5457_C - Bus 115 kV	0.9161 - 0.9378	
2,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-6	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8043	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	7-171	487_6005_C - 480_168527	0.8054	
	172-173	487_5478_C - 487_5478	0.8094	
	174-179	482_803883 - 480_24759	0.8142	
	180-282	487_5479_C - 480_197359	0.8157	
	283-284	487_6009_C - 482_803970	0.8181	
	285-287	482_804046 - 480_24761	0.8237	
	288-291	482_804090 - 480_24762	0.8271	
	292-293	487_152967_C - 482_1735310	0.8289	
	294-297	482_825635 - 480_24763	0.8292	
	298-367	487_5487_C - 480_104952	0.8351	
	368	482_826053	0.8372	
	369-371	482_826073 - 480_24770	0.8382	
	372-376	482_826184 - 480_24769	0.8418	
	377-381	482_826200 - 480_24768	0.8422	
	382	482_826218	0.8428	
	383-459	487_5490_C - 480_159290	0.8452	
	460-461	487_5485_C - 482_826444	0.8548	
	462-463	487_5486_C - 487_5486	0.8551	
	464-465	487_5481_C - 482_826470	0.8554	
	466-469	482_1223498 - 480_138998	0.8682	
	470-472	487_5457_C - 482_805957	0.8934	
	473-474	487_5927_C - 487_5927	0.8936	
	475	482_805952	0.8937	
	476-1,794	474_1298 - 474_1287	0.8939	
	1,795	Bus 115 kV	0.9339	

ตารางที่ ข.3 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 3

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
50	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9516	
	3	Lab.-Terminal-33 kV	0.9911	
	4-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9913 – 0.9956	
100	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9508	
	3	Lab.-Terminal-33 kV	0.9820	
	4-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9825 – 0.9909	
160	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9498	
	3	Lab.-Terminal-33 kV	0.9713	
	4-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9720 – 0.9853	
250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9484	
	3	Lab.-Terminal-33 kV	0.9558	
	4-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9569 – 0.9771	
315	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.9449	
	3-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9463 – 0.9714	
400	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.9311	
	3-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9327 – 0.9640	
500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.9456	
	3-1,796	Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9469 – 0.9709	
630	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.8956	
	3-7	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8981	
	8-172	487_6005_C - 480_168527	0.8986	
	173-1,796	487_5478_C - 474_1287	0.9008 - 0.9452	
1,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.8891	
	3-7	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8918	
	8-172	487_6005_C - 480_168527	0.8923	
	173-174	487_5478_C - 487_5478	0.8946	
	175-180	482_803883 - 480_24759	0.8972	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	181-283 284-285 286-1,796	487_5479_C - 480_197359 487_6009_C - 482_803970 482_804046 - Bus 115 kV	0.8981 0.8994 0.9025 - 0.9422	
1,250	1 2 3-7 8-172 173-174 175-180 181-283 284-285 286-288 289-292 293-294 295-298 299-368 369 370-372 373-377 378-382 383 384-460 461-1,796	Bus-test-TR-0.4 kV Lab.-Terminal-33 kV Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811 487_6005_C - 480_168527 487_5478_C - 487_5478 482_803883 - 480_24759 487_5479_C - 480_197359 487_6009_C - 482_803970 482_804046 - 480_24761 482_804090 - 480_24762 487_152967_C - 482_1735310 482_825635 - 480_24763 487_5487_C - 480_104952 482_826053 482_826073 - 480_24770 482_826184 - 480_24769 482_826200 - 480_24768 482_826218 487_5490_C - 480_159290 487_5485_C - Bus 115 kV	0.0000 0.8651 0.8684 0.8691 0.8718 0.8750 0.8760 0.8776 0.8815 0.8838 0.8849 0.8852 0.8891 0.8905 0.8912 0.8936 0.8939 0.8943 0.8959 0.9024 - 0.9400	0.5
1,500	1 2 3-7 8-172 173-174 175-180 181-283 284-285 286-288 289-292 293-294 295-298 299-368 369 370-372	Bus-test-TR-0.4 kV Lab.-Terminal-33 kV Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811 487_6005_C - 480_168527 487_5478_C - 487_5478 482_803883 - 480_24759 487_5479_C - 480_197359 487_6009_C - 482_803970 482_804046 - 480_24761 482_804090 - 480_24762 487_152967_C - 482_1735310 482_825635 - 480_24763 487_5487_C - 480_104952 482_826053 482_826073 - 480_24770	0.0000 0.8424 0.8462 0.8470 0.8502 0.8539 0.8551 0.8570 0.8615 0.8642 0.8655 0.8658 0.8705 0.8721 0.8729	0.5

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	373-377	482_826184 - 480_24769	0.8757	
	378-382	482_826200 - 480_24768	0.8760	
	383	482_826218	0.8765	
	384-460	487_5490_C - 480_159290	0.8784	
	461-462	487_5485_C - 482_826444	0.8859	
	463-464	487_5486_C - 487_5486	0.8862	
	465-466	487_5481_C - 482_826470	0.8864	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.8965	
	471-1,796	487_5457_C - Bus 115 kV	0.9164 - 0.9379	
2,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Lab.-Terminal-33 kV	0.8005	
	3-7	Lab.-Terminal-22 kV - 480_196811	0.8053	
	8-172	487_6005_C - 480_168527	0.8063	
	173-174	487_5478_C - 487_5478	0.8103	
	175-180	482_803883 - 480_24759	0.8150	
	181-283	487_5479_C - 480_197359	0.8166	
	284-285	487_6009_C - 482_803970	0.8189	
	286-288	482_804046 - 480_24761	0.8246	
	289-292	482_804090 - 480_24762	0.8280	
	293-294	487_152967_C - 482_1735310	0.8297	
	295-298	482_825635 - 480_24763	0.8300	
	299-368	487_5487_C - 480_104952	0.8359	
	369	482_826053	0.8380	
	370-372	482_826073 - 480_24770	0.8389	
	373-377	482_826184 - 480_24769	0.8425	
	378-382	482_826200 - 480_24768	0.8430	
	383	482_826218	0.8436	
	384-460	487_5490_C - 480_159290	0.8459	
	461-462	487_5485_C - 482_826444	0.8555	
	463-464	487_5486_C - 487_5486	0.8558	
	465-466	487_5481_C - 482_826470	0.8561	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.8688	
	471-473	487_5457_C - 482_805957	0.8939	
	474-475	487_5927_C - 487_5927	0.8941	
	476	482_805952	0.8942	
	477-1,795	474_1298 - 474_1287	0.8944	
	1,796	Bus 115 kV	0.9340	

ตารางที่ ข.4 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
50	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9516	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9956	
100	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9508	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9908	
160	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9498	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9850 – 0.9851	
250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9483	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9766	
315	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9472	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9705 – 0.9706	
400	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9459	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9627	
500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9472	
	3-1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 474_1287	0.9701	
630	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-475	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 482_805952	0.9421	
	476-1,794 1,795	474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.9422 0.9423	
1,000	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-474	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 480_104952	0.9379	
	475	482_805952	0.9380	
	476-1,794 1,795	474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.9381 0.9416	
1,250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2-474	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 480_104952	0.9235	
	475	482_805952	0.9236	
	476-1,794 1,795	474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.9237 0.9391	
1,500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	2-474 475 476-1,794 1,795	Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 480_104952 482_805952 474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.9096 0.9097 0.9098 0.9367	
2,000	1 <i>2-475</i> <i>476-1,794</i> 1,795	Bus-test-TR-0.4 kV <i>Nearest Lab.-Terminal-22 kV - 482_805952</i> <i>474_1298 - 474_1287</i> Bus 115 kV	0.0000 <i>0.8935</i> <i>0.8937</i> 0.9434	0.5



ตารางที่ ข.5 ผลลัพธ์แรงดันที่บัสต่างๆ ขณะทดสอบฯ ของสถานการณ์ที่ 4.2

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
50	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9516	
	3-4	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C	0.9933	
	5-466	487_6009_C - 480_104952	0.9937	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.9943	
	471-1,795	487_5457_C - 474_1287	0.9956	
	100	1	Bus-test-TR-0.4 kV	
2		Bus 115 kV	0.9508	
3-4		Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C	0.9864	
5-466		487_6009_C - 480_104952	0.9871	
467-470		482_1223498 - 480_138998	0.9884	
471-476		487_5457_C - 482_805952	0.9908	
477-1,795		474_1298 - 474_1287	0.9909	
160	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9498	
	3-4	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C	0.9782	
	5-466	487_6009_C - 480_104952	0.9794	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.9813	
	471-476	487_5457_C - 482_805952	0.9851	
	477-1,795	474_1298 - 474_1287	0.9852	
250	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9483	
	3-4	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C	0.9663	
	5-466	487_6009_C - 480_104952	0.9680	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.9710	
	471-476	487_5457_C - 482_805952	0.9768	
	477-1,795	474_1298 - 474_1287	0.9769	
315	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9473	
	3-4	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C	0.9578	
	5-466	487_6009_C - 480_104952	0.9600	
	467-470	482_1223498 - 480_138998	0.9636	
	471-476	487_5457_C - 482_805952	0.9709	
	477-1,795	474_1298 - 474_1287	0.9710	
400	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5
	2	Bus 115 kV	0.9460	

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	3-4 5-466 467-470 471-473 474-476 477-1,795	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 482_805952 474_1298 - 474_1287	0.9470 0.9496 0.9542 0.9632 0.9633 0.9634	
500	1 2 3-4 5-466 467-470 471-473 474-1,795	Bus-test-TR-0.4 kV Bus 115 kV Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 474_1287	0.0000 0.9473 0.9582 0.9601 0.9636 0.9704 0.9705	0.5
630	1 2-3 4-465 466-469 470 471-473 474-476 477-1,795	Bus-test-TR-0.4 kV Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 Bus 115 kV 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 482_805952 474_1298 - 474_1287	0.0000 0.9202 0.9242 0.9311 0.9438 0.9448 0.9449 0.9450	0.5
1,000	1 2-3 4-465 466-469 470-472 473-475 476-1,794 1,795	Bus-test-TR-0.4 kV Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 482_805952 474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.0000 0.9083 0.9128 0.9206 0.9359 0.9361 0.9362 0.9413	0.5
1,250	1 2-3 4-465 466-469 470-472 473-475 476-1,794 1,795	Bus-test-TR-0.4 kV <i>Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C</i> <i>487_6009_C - 480_104952</i> 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 482_805952 474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.0000 <i>0.8879</i> <i>0.8934</i> 0.9029 0.9216 0.9218 0.9220 0.9388	0.5
1,500	1	Bus-test-TR-0.4 kV	0.0000	0.5

กำลังไฟฟ้า (kVA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดัน ขณะทดสอบ (p.u.)	ระยะเวลา ขณะทดสอบ (p.u.)
	2-3 4-465 466-469 470-472 473-475 476-1,794 1,795	Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 482_805952 474_1298 - 474_1287 Bus 115 kV	0.8684 0.8749 0.8860 0.9081 0.9083 0.9085 0.9364	
2,000	1 2-3 4-465 466-469 470-472 473-474 475 476 477-1,794 1,795	Bus-test-TR-0.4 kV Middle Lab. -Terminal-22 kV - 487_5481_C 487_6009_C - 480_104952 482_1223498 - 480_138998 487_5457_C - 482_805957 487_5927_C - 487_5927 482_805952 474_1298 Bus 22 kV - 474_1287 Bus 115 kV	0.0000 0.8411 0.8488 0.8621 0.8884 0.8886 0.8887 0.8888 0.8889 0.9330	0.5

ตารางที่ ข.6 สรุปขนาด Fault current contribution ของฟิวส์อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายกระแสลัดวงจร เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส พิกัด กำลังไฟฟ้า 630 kVA ถึง 2,000 kVA ขณะทดสอบฯ สถานการณ์ที่ 1

กำลังไฟฟ้า (kVA)	$I_{k,inv}''$ (kA)	$I_{k,test}''$ (kA)	$i_{p,test}$ (kA)	ลำดับบัส	ชื่อบัส	แรงดันขณะทดสอบ (p.u.)	สรุปขนาด $I_{k,inv}''$ (kA)
630	0	20.9390	44.3106	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.8978	ไม่เพียงพอ
	0.15	21.7821	45.5030	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9340	ไม่เพียงพอ
	0.20	22.0632	45.9004	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9460	เพียงพอ
1,000	0	22.2573	48.4312	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.8915	ไม่เพียงพอ
	0.10	22.8547	49.2762	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9154	ไม่เพียงพอ
	0.15	23.1535	49.6987	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9273	เพียงพอ
1,250	0	27.0885	59.1981	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.8680	ไม่เพียงพอ
	0.30	29.2700	62.2832	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9377	ไม่เพียงพอ
	0.35	29.6336	62.7974	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9476	เพียงพอ
1,500	0	31.6690	69.0158	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.8456	ไม่เพียงพอ
	0.45	35.4945	74.4259	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9474	ไม่เพียงพอ
	0.50	35.9195	75.0270	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9485	เพียงพอ
2,000	0	40.1692	88.7569	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.8043	ไม่เพียงพอ
	0.85	49.3347	101.7189	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9512	ไม่เพียงพอ
	0.90	49.8739	102.4814	2-1,796	ทุกบัส	≥ 0.9522	เพียงพอ

หมายเหตุ

- บัสที่ 1 คือ บัสที่อยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบฯ และเป็นบัสที่ทำกรลัดวงจร 3 เฟส ($Z_f = 0\Omega$) ดังนั้น แรงดันขณะทดสอบที่บัสนี้จึงมีค่า 0 p.u. ในทุกสถานการณ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเร็กซ์ศักดิ์ อ่อนจินดา เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เมื่อ พ.ศ. 2551 เริ่มทำงานที่บริษัท ไทยแอร์โรวิจ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรประจำฝ่ายวิศวกรรมการผลิต หลังจากนั้น ปี พ.ศ. 2555 ได้เข้าทำงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรระดับ 6 กองข้อกำหนดทางเทคนิค ฝ่ายวิศวกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขณะเดียวกันก็ได้รับทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตด้านสมาร์ทกริด ตามโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง กฟภ. กับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 1

ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต นายเร็กซ์ศักดิ์ อ่อนจินดา มีผลงานตีพิมพ์ และนำเสนอบทความ “การศึกษาผลกระทบด้านแรงดันตกชั่วขณะต่อระบบไฟฟ้ากำลังในการทดสอบความสามารถการทนต่อการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV” ในงานประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟภ. ปี 2560 (PEACON & INNOVATION 2017) ระหว่างวันที่ 13 – 14 ธันวาคม พ.ศ. 2560 ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์ โรงแรมเซ็นทราศูนย์ราชการ และคอนเวนชันเซ็นเตอร์ ถนนแจ้งวัฒนะ