



# วิทยานิพนธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินระหว่าง  
ระบบสายส่งกับระบบจำหน่าย

**THE STUDIES OF VOLTAGE SAGS CORRELATIONS  
BETWEEN TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEM**

นายวีรุฒิ กนกบรรณกร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๑





## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

### ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินระหว่างระบบสายส่งกับระบบจำหน่าย

The Studies of Voltage Sags Correlations between Transmission and Distribution System

นามผู้วิจัย นายวีรุติ กนกบรรณกร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์ตฤณ แสงสุวรรณ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุณย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินระหว่างระบบสายส่งกับระบบจำหน่าย

The Studies of Voltage Sags Correlations between Transmission and Distribution System

โดย

นายวีรวุฒิ กนกบรรณกร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

วีรวุฒิ กนกบรรณกร 2551: การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินระหว่างระบบสายส่งกับระบบจำหน่าย วิทยุวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ตฤณ แสงสุวรรณ, Ph.D. 106 หน้า

ในปัจจุบันปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าได้รับความสนใจมากขึ้นทั้งในส่วนของผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้านี้สามารถสร้างความเสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อเก็บบันทึกข้อมูล แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสาเหตุ ประเมินค่าคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า หาวิธีการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญปัญหาหนึ่งคือ ปัญหาแรงดันต่ำเกิน (Voltage sag or Voltage Dip) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสลดลงในช่วงเวลาสั้น โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินเนื่องจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า การเดินโหลดขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้จัดทำเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย โดยศึกษาในกรณีตัวอย่างในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สถานีไฟฟ้าโรจนะ ซึ่งสถานีนี้รับไฟฟ้าจากระบบสายส่งที่ระดับแรงดัน 115 เควี และจำหน่ายให้ลูกค้าในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 เควี โดยใช้ข้อมูลแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการตรวจวัดของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2549 และการจำลองระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ได้สร้างคอนทราสต์แรงดันเพื่อช่วยในการพยากรณ์การเกิดแรงดันต่ำเกิน

Weerawoot Kanokbannakorn 2008: The Studies of Voltage Sags Correlations between Transmission and Distribution System. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering.  
Thesis Advisor: Associate Professor Trin Saengsuwan, Ph. D. 106 pages.

Recently, both electrical utilities and their customers increasingly concern in power quality problems due to increasing in the number of sensitive equipments in the power system such as computers, motor drives, electronics devices, etc. These problems mainly cause damaging or leading to malfunction of voltage sensitive equipments. Power quality meters are employed to monitor and record these power quality events. Then, these recorded data is used to analysis and assessment to protect and improve power quality.

The voltage sag or dip is one of the most concern problems. A sag event is a short duration reduction in rms voltage, which is caused by short circuit and starting of large load in the power system.

This research aims to study the correlations of voltage sags occurred in between the transmission system and the distribution system. Rotchana substation of Provincial Electricity Authority (PEA) network has been selected as the case study. It receives power from 115 kV transmission systems and distribute to customers in 22 kV distribution systems. The studied network is simulated by computer program and voltage sags data in 2006 are used for analysis. In addition, contours of voltage level are created to forecast sag events.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ตฤณ แสงสุวรรณ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือด้านคำปรึกษา แนวทาง วิธีการวิจัย ข้อมูลวิชาการทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า รวมทั้งการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์นี้ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือในด้านคำปรึกษาในงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณพงศ์พัฒน์ วราโภค และคุณณรงค์ ศรียาภัย วิศวกรการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในเรื่องข้อมูลระบบไฟฟ้าและคำปรึกษา

ขอขอบคุณห้องวิจัยและปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในเรื่องสถานที่และอุปกรณ์ทำงานวิจัย ขอขอบคุณมูลนิธิทุนเล่าเรียนหลวงกาญจนาภิเษก ในเรื่องค่าใช้จ่ายในการศึกษา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 จนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออลงกต กนกบรรณกร รวมทั้งคุณแม่และน้องชายทั้งสองคน ที่คอยให้กำลังใจจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

วีรวุฒิ กนกบรรณกร

เมษายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	9
อุปกรณ์	9
วิธีการ	9
ผลและวิจารณ์	25
สรุปและข้อเสนอแนะ	90
สรุป	90
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	96
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	106

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รูปแบบของแรงดันต่ำเกิน	4
2	ลักษณะแรงดันต่ำเกินเมื่อผ่านหม้อแปลงชนิด YNyn, Yy, Dd, Dz, Yd, Dy และ Yz	6
3	ข้อมูลความยาวสายส่งในระบบ 115 เควี	10
4	ข้อมูลระดับกระแสลัดวงจรและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ที่ฐานแรงดัน 115 เควี 100 MVA	11
5	ข้อมูลระดับกระแสลัดวงจรและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ที่ฐานแรงดัน 22 เควี 100 MVA	11
6	เปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการจำลองระบบ	18
7	เปรียบเทียบขนาดของแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ากับขนาดของแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการจำลองวงจร	22
8	ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ	28
9	วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg	30
10	ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ Dd, Yy, YGy และ Yyg เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ	31
11	วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd	33
12	ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ Dy, Dyg, Yd และ YGd เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ	34
13	กลุ่มของหม้อแปลงตามลักษณะของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น	35
14	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	83
15	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	83

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
16	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจร หนึ่งเฟสลงดิน	84
17	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรสองเฟส	84
18	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรสองเฟส	85
19	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรสองเฟส	85
20	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรสามเฟส	86
21	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรสามเฟส	86
22	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรสามเฟส	87
23	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีโรจนะ กรณีลัดวงจร สองเฟสลงดิน	87
24	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีวังน้อย กรณีลัดวงจร สองเฟสลงดิน	88
25	ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจร สองเฟสลงดิน	88
26	ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ ทางด้าน ปฐมภูมิของหม้อแปลงกลุ่ม X กลุ่ม Y และกลุ่ม Z	91

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แรงดันต่ำเกิน	3
2	กลุ่มของหม้อแปลงแบ่งตามผลที่เกิดกับแรงดันต่ำเกิน	6
3	คอนแทกต์แรงดัน	8
4	วงจรที่ใช้ในการศึกษา	10
5	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบางปะอิน2 (EGAT)	12
6	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบางปะอิน2 (EGAT)	12
7	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีวังน้อย	13
8	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีวังน้อย	13
9	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะ (115 เควี)	13
10	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะ (115 เควี)	14
11	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะ (22 เควี)	14
12	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะ (22 เควี)	14
13	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะเพาเวอร์	15
14	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะเพาเวอร์	15
15	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีนวนคร	15
16	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีนวนคร	16
17	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบ้านเลน	16
18	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบ้านเลน	16
19	กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบางชันธุ์	17
20	กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบางชันธุ์	17
21	แรงดันที่สถานีบางปะอิน2 ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	19
22	แรงดันที่สถานีโรจนะ ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	19
23	แรงดันที่สถานีโรจนะเพาเวอร์ ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	20
24	แรงดันที่สถานีนวนคร ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	20
25	แรงดันที่สถานีบ้านเลน ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	21

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	แรงดันที่สถานีโรจนะด้านแรงดัน 22 เควี ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร	21
27	การกำหนดจุดลัดวงจรที่ส่วนต่างๆ ด้าน 115 เควี	23
28	การกำหนดจุดลัดวงจรที่สายป้อนในระบบจำหน่าย ที่ระดับแรงดัน 22 เควี	24
29	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg	25
30	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg	26
31	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg	26
32	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg	26
33	วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg	27
34	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg	28
35	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg	29
36	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg	29
37	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg	29
38	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd	32
39	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd	32

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd	32
41	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd	33
42	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg	36
43	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy, Yyg, YGd, Dy และ Yd	36
44	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg	37
45	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Dd, Yy, YGy และ Yyg	37
46	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dy, YGd และ Yd	37
47	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสดงดินที่ ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg	38
48	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Dd, Yy, YGy, Yyg, Dy, Dyg, Yd และ YGd	38
49	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Yy, YGy, Yyg และ Dd	38
50	แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสดงดิน ด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dy, Yd, YGd และ Dyg	39
51	วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสดงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Yy, YGy, Yyg, YD, Dy, YGd และ DD	39

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg	40
53	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Yy, YGy, Yyg, Dd, Dy, YGd และ Yd	41
54	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg	42
55	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg	42
56	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรสามด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงทุกแบบ	43
57	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงแบบ YGyg	43
58	แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง	46
59	แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง	47
60	แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	48
61	แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	49
62	วงจรมุมลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน	50
63	แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควีในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	53
64	แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควีในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	54
65	แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	55
66	แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดิน โดยตรง	56
67	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	61

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เคลวี ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	61
69	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เคลวี ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	62
70	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เคลวี ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส	62
71	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	63
72	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	63
73	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	64
74	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส	64
75	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	65
76	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	65
77	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	66
78	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส	66
79	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	67
80	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	67
81	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เคลวี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรงจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	68

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
82	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟส	68
83	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	69
84	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	69
85	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	70
86	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส	70
87	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	71
88	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	71
89	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรแบบสามเฟส	72
90	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	72
91	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	73
92	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	73
93	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสามเฟส	74
94	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟส	74
95	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	75

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
96	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	75
97	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสามเฟส	76
98	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟส	76
99	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	77
100	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	77
101	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	78
102	คอนทัวร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส	78
103	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	79
104	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	79
105	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสามเฟส	80
106	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟส	80
107	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	81
108	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟสลงดิน	81
109	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสามเฟส	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
110	คอนทัวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิด ลัดวงจรสองเฟส	82
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	แบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC	98
2	แบบจำลองสายส่งด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC	99
3	แบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC	99
4	แบบจำลองการเกิดลัดวงจรด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC	100
5	วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส	102
6	วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน	102
7	วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน	103

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$YGyg$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย ลงดินด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
$YGy$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย ลงดินด้านปฐมภูมิ
$Yyg$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย ลงดินด้านทุติยภูมิ
$Yy$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย
$Dd$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเคลตต้า-เคลตต้า
$Dy$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเคลตต้า-วาย
$Dyg$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเคลตต้า-วาย ลงดินด้านทุติยภูมิ
$Yd$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-เคลตต้า
$YGd$	=	หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-เคลตต้า ลงดินด้านปฐมภูมิ
$V_A$	=	แรงดันเฟสเอ
$V_B$	=	แรงดันเฟสบี
$V_C$	=	แรงดันเฟสซี
$V_{AB}$	=	แรงดันระหว่างเฟสเอและเฟสบี
$V_{BC}$	=	แรงดันระหว่างเฟสบีและเฟสซี
$V_{CA}$	=	แรงดันระหว่างเฟสซีและเฟสเอ
$V_0$	=	แรงดันลำดับศูนย์
$V_1$	=	แรงดันลำดับบวก
$V_2$	=	แรงดันลำดับลบ
$V_{115kV}$	=	แรงดันด้าน 115 เควี
$V_{22kV}$	=	แรงดันด้าน 22 เควี
$Z_{F0}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของสายส่ง
$Z_{F1}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของสายส่ง
$Z_{F2}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบของสายส่ง
$Z_{S0}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของแหล่งจ่าย
$Z_{S1}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของแหล่งจ่าย
$Z_{S2}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบของแหล่งจ่าย
$Z_{T0}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลง
$Z_{T1}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของหม้อแปลง

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$Z_{T2}$	=	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบของหม้อแปลง
E	=	แรงดันที่แหล่งจ่าย
p.u.	=	เปอร์เซ็นต์
RMS	=	Root Mean Square
$TLL_{115kV}$	=	ความยาวสายส่งทั้งหมดภายในคอนทอร์แรงดันเมื่อวัดแรงดันที่บัส 115 เควี
$TLL_{22kV}$	=	ความยาวสายส่งทั้งหมดภายในคอนทอร์แรงดันเมื่อวัดแรงดันที่บัส 22 เควี

## การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินระหว่างระบบสายส่งกับระบบจำหน่าย

### The Studies of Voltage Sags Correlations between Transmission and Distribution System

#### คำนำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า(Power Quality) ได้รับความสนใจทั้งในส่วนของ ผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ามมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง ในระบบไฟฟ้า โดยปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าสามารถสร้างความเสียหายแก่โหลดเหล่านี้ได้ ดังนั้น จึงมีการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสาเหตุ ประเมินค่าคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า หาวิธีการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญปัญหาหนึ่งคือ การเกิดแรงดันต่ำเกิน(Voltage Sags) โดย เป็นภาวะที่ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของแรงดัน มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 เปรอ์ยูนิต ที่ความถี่ ระบบ ในช่วงเวลาสั้น ซึ่งสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำเกิน คือ การเกิดลัดวงจร ในระบบไฟฟ้า โดยขณะเกิดลัดวงจรนั้นแรงดันที่สถานีไฟฟ้าจะมีค่าลดลง หรือเกิดแรงดันต่ำเกิน ขึ้นนั่นเอง และหลังจากที่อุปกรณ์ป้องกันทำงานแล้วแรงดันจะกลับเข้าสู่ภาวะปกติ โดยขนาดของ แรงดันที่สถานีไฟฟ้าต่างๆ จะมีค่าต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการลัดวงจร ระยะห่าง จากจุดเกิดลัดวงจร รวมทั้งลักษณะการเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย ซึ่งจุดที่เชื่อมต่อระหว่างสอง ระบบนี้เชื่อมต่อโดยผ่านหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งมีผลต่อลักษณะของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น โดย การศึกษานี้ใช้ข้อมูลเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าและการ จำลองระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสร้างคอนทัวร์แรงดันเพื่อใช้พยากรณ์แรงดันต่ำ เกินในระบบไฟฟ้า

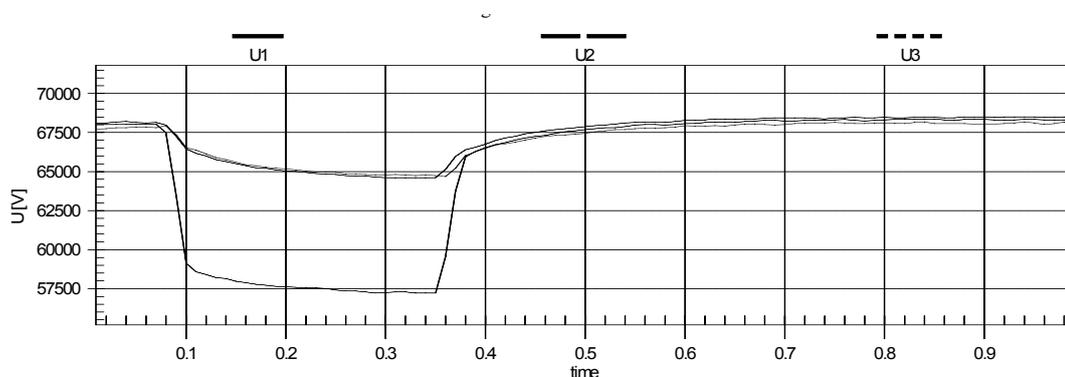
## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะแรงดันต่ำเกินในระบบไฟฟ้า
2. หาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย
3. จำลองเหตุการณ์เกิดแรงดันต่ำเกินรูปแบบต่างๆ ในระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. เพื่อจัดทำคอนทัวร์แรงดัน(Voltage Contour) แสดงถึงระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบ

## การตรวจเอกสาร

### แรงดันต่ำเกิน

Dugan *et al.* (2002) แรงดันต่ำเกิน (Voltage Sags หรือ Voltage Dips) คือ ภาวะที่ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 เพอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ระบบ ในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที ถึง 1 นาที



ภาพที่ 1 แรงดันต่ำเกิน

McGranaghan *et al.* (1997) สาเหตุสำคัญของแรงดันต่ำเกินเกิดจากการลัดวงจร (Short Circuit) ในระบบไฟฟ้า และช่วงเวลาของแรงดันต่ำเกินนี้จะอยู่ในช่วงเวลาที่อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ หรือเบรกเกอร์ทำงาน ซึ่งปัญหาของแรงดันต่ำเกินจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Equipment Sensitivity) ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า เช่น หน้าสัมผัสมอเตอร์ Adjustable - Speed Drives, Programmable Logic Controllers, Computers เป็นต้น มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงานได้

Bollen (2000); Zhang *et al.* (2000); Yalcinkaya *et al.* (2002) ลักษณะของแรงดันต่ำเกินสามารถแบ่งออกเป็น 7 แบบ โดยพิจารณาจากลักษณะการเกิดลัดวงจรคือ ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน (Single-Line to Ground) สองเฟส (Double-Lines) สองเฟสลงดิน (Double-Lines to Ground) และสามเฟส (Three Phases) โดยลักษณะรูปแบบของแรงดันต่ำเกินทั้ง 7 แบบ แสดงดังนี้

ตารางที่ 1 รูปแบบของแรงดันต่ำเกิน

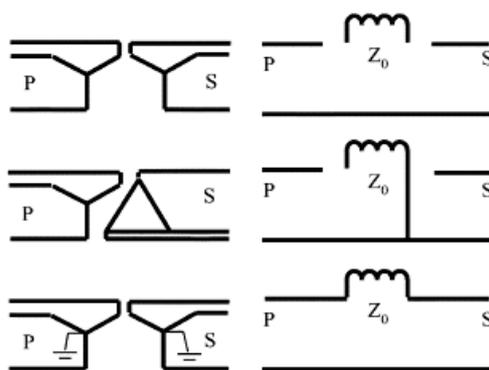
แบบแรงดันต่ำเกิน	สมการ	เฟสเซอร์
A	$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	
B	$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	
C	$V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	
D	$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แบบแรงดันต่ำเกิน	สมการ	เฟสเซอร์
E	$V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$	
F	$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}Vj\sqrt{3}$ $V_c = +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}Vj\sqrt{3}$	
G	$V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$ $V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$	

ที่มา: Bollen (2000)

โดยแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นนี้สามารถส่งผลไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบ ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์ไฟฟ้าจะรับไฟโดยผ่านหม้อแปลงแรงดัน การต่อขดลวดของหม้อแปลงจะมีผลต่อลักษณะของแรงดันต่ำเกิน โดยหม้อแปลงเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มตามผลที่เกิดกับลักษณะของแรงดันต่ำเกิน(Aung and Milanovic, 2006) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กลุ่มของหม้อแปลงแบ่งตามผลที่เกิดกับแรงดันต่ำเกิน

ที่มา: Aung and Milanovic (2006)

โดยเมื่อแรงดันต่ำเกินแพร่กระจายผ่านหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบต่างๆ ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบการต่อขดลวดของหม้อแปลงชนิดนั้นๆ เช่น กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ Yy โดยที่แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเป็นแบบ B ดังตารางที่ 1 จะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินแบบ D ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งจะพบว่าลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของหม้อแปลงมีลักษณะแตกต่างกัน โดยลักษณะของแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเมื่อเกิดแรงดันต่ำเกินแบบ A, B, C, D, E, F และ G ทางด้านปฐมภูมิสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 โดย D\* และ C\* ในตารางแสดงถึงขนาด V ของแรงดันต่ำเกินแบบ D และ C ในตารางที่ 1 เมื่อผ่านหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{3} + \frac{2}{2}V$

ตารางที่ 2 ลักษณะแรงดันต่ำเกินเมื่อผ่านหม้อแปลงชนิด YNyn, Yy, Dd, Dz, Yd, Dy และ Yz

Sag on Primary Side							
Transformer Connection	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D*	C	D	G	F	G
Yd, Dy, Yz	A	C*	D	C	F	G	F

ที่มา: Bollen (2000)

### การประเมินผลกระทบของเหตุการณ์แรงดันต่ำเกิน

ในปัจจุบันนี้มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวในการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันต่ำเกินมีผลกระทบต่ออุปกรณ์มากขึ้น การไฟฟ้าที่ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับลูกค้าจึงมีการประเมินผลของแรงดันต่ำเกินที่มีต่อลูกค้าเพื่อวิเคราะห์ปัญหา สาเหตุ เพื่อนำไปสู่การแก้ไขและปรับปรุงระบบไฟฟ้าของตน โดยการไฟฟ้านั้นจะติดตั้งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า(Power Quality Meter) ตามจุดต่างๆ เช่น ที่สถานีไฟฟ้า ที่ส่วนของลูกค้า เป็นต้น เพื่อบันทึกเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น และนำข้อมูลนี้มาประเมินหาผลกระทบของแรงดันต่ำเกิน

Brooks *et al.* (1998) การประเมินผลกระทบของแรงดันต่ำเกินนั้นมีหลายวิธี เช่น การประเมินโดยใช้ดัชนี เช่น ดัชนีเฉลี่ยจำนวนครั้งการแปรเปลี่ยนระดับแรงดันของระบบ (System Average RMS (Variation) Frequency Index VOLTAGE: SARFI<sub>x</sub>) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนเหตุการณ์ที่ตรวจวัดและมีการแปรเปลี่ยนระดับแรงดันของช่วงเวลาการประเมิน ต่อจำนวนลูกค้าที่พิจารณาทั้งหมด โดยค่าระดับแรงดันที่มีค่าต่ำกว่า  $x$  จะเป็นแรงดันต่ำเกิน หรือค่าระดับแรงดันที่มีค่าสูงกว่า  $x$  จะเป็นแรงดันสูงเกินสามารถหาได้โดย

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (1)$$

เมื่อ  $x$  = ค่าแรงดัน rms ที่พิจารณา ที่นิยมใช้ 140 120 110 90 80 70 50 และ 10 %

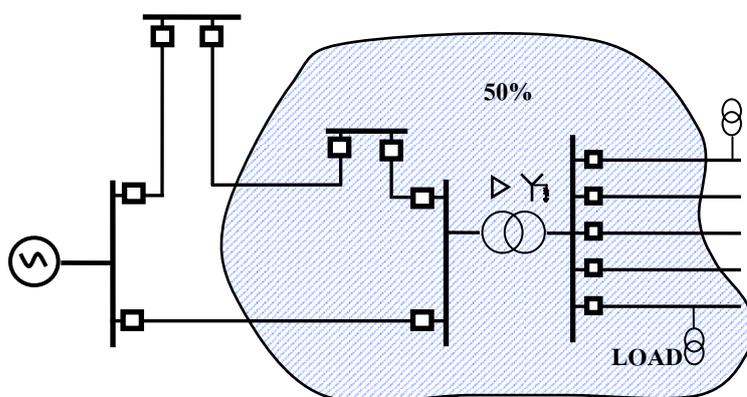
$N_i$  = จำนวนลูกค้าที่ได้รับผลกระทบจากการแปรเปลี่ยนของแรงดัน เมื่อระดับแรงดันมีค่ามากกว่า  $X\%$  กรณี  $X > 100$  หรือต่ำกว่า  $X\%$  กรณี  $X < 100$  ของการวัดเหตุการณ์ที่  $i$

$N_T$  = จำนวนของลูกค้าที่รับไฟจากพื้นที่ที่พิจารณา

โดยค่า SARFI จะถูกกำหนดโดยค่าระดับแรงดันที่ต้องการพิจารณา สามารถนำไปประเมินค่าการแปรเปลี่ยนของแรงดันที่กำหนดเอาไว้ เช่น ถ้าการไฟฟ้าฯ มีลูกค้าซึ่งมีความไวต่อระดับแรงดันต่ำกว่า 70 % ของระดับแรงดันปกติ ก็จะใช้ SARFI<sub>70</sub> ในการประเมินกับลูกค้ากลุ่มนี้ เป็นต้น

### คอนทิวร์แรงดัน

คอนทิวร์แรงดันได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการหาความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันในระบบไฟฟ้า จะประสบปัญหาแรงดันที่มีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนของอุปกรณ์ต่อสภาวะแรงดันต่ำเกินได้ ซึ่งค่าความคงทนนี้เป็นค่าแรงดันต่ำที่สุดที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือมีการทำงานผิดพลาด(Dugan *et al.*, 2002) โดยคอนทิวร์แรงดันแสดงถึงเมื่อเกิดลัดวงจรภายในคอนทิวร์แรงดันจะส่งผลให้อุปกรณ์ที่อยู่ในคอนทิวร์แรงดันนี้ประสบกับแรงดันต่ำเกิน เช่น ภาพที่ 3 แสดงคอนทิวร์แรงดันที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ โดยเมื่อเกิดลัดวงจรภายในบริเวณคอนทิวร์แรงดันนี้ โหลดที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าภายในคอนทิวร์แรงดันนี้จะประสบปัญหาแรงดันต่ำเกินที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ นอกจากนี้คอนทิวร์แรงดันยังสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์หาค่าเฉลี่ยของความถี่ในการเกิดแรงดันต่ำเกินอีกด้วย โดยนำไปใช้ประกอบกับความถี่ในการเกิดลัดวงจร ซึ่งเป็นค่าที่ได้มีการเก็บบันทึกไว้



ภาพที่ 3 คอนทิวร์แรงดัน

จากข้อมูลจากการตรวจเอกสารสรุปได้ว่าแรงดันต่ำเกินสามารถแบ่งออกเป็น 7 แบบด้วยกัน โดยเมื่อแรงดันต่ำเกินทั้ง 7 แบบนี้เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง จะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นทางด้านทุติยภูมิซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไปตามการต่อขดลวดของหม้อแปลง โดยได้มีการแบ่งกลุ่มของหม้อแปลงตามผลที่เกิดขึ้นกับลักษณะของแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิออกเป็นสามกลุ่ม

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

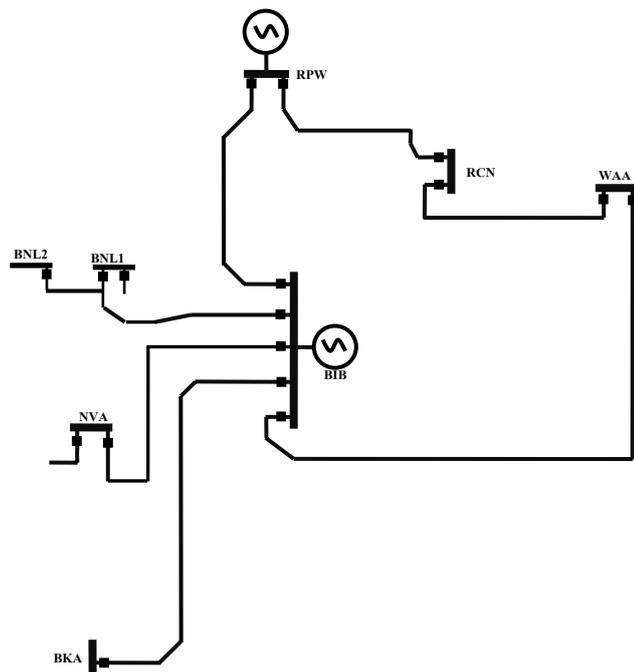
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP
3. โปรแกรม Microsoft Office 2003 (Word, Excel และ Power Point)
4. โปรแกรม PSCAD/EMTDC v.4.2
5. โปรแกรม PQSecure
6. เครื่องพิมพ์เอกสาร และอื่นๆ

### วิธีการ

การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายนี้ ศึกษาโดยใช้ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยศึกษาที่สถานีไฟฟ้าโรจนะ ซึ่งสถานีนี้รับไฟจากระบบสายส่งที่มีแรงดัน 115 เควี และจำหน่ายให้ลูกค้าในระบบจำหน่ายที่แรงดัน 22 เควี โดยผ่านหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย ขนาด 40 MVA ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของหม้อแปลงนี้ โดยระบบไฟฟ้าจะถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC และค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบได้จากข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

#### 1. ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ

1.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าทั้งหมด 7 สถานี คือ สถานีบางปะอิน 2 (BIB) สถานีวังน้อย (WAA) สถานีโรจนะ (RCN) สถานีบ้านเลน (BNL) สถานีนวนคร (NVA) สถานีบางขันธุ์ (BKA) และ โรจนะเพาเวอร์ (RPW) โดยสถานีบางปะอิน 2 สถานีโรจนะ สถานีวังน้อย สถานีโรจนะเพาเวอร์ ต่อวงจรเป็นลูปไลน์ ดังภาพที่ 4 และแต่ละสถานีเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งที่มีความยาวดังตารางที่ 3



ภาพที่ 4 วงจรที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3 ข้อมูลความยาวสายส่งในระบบ 115 เควี

ช่วงสายส่ง	ระยะทาง
สถานีบางปะอิน2 ถึง สถานีโรจนะเพาเวอร์	21.59 กิโลเมตร
สถานีบางปะอิน2 ถึง สถานีบ้านเลน	6.33 กิโลเมตร
สถานีบางปะอิน2 ถึง สถานีนวนคร	11.52 กิโลเมตร
สถานีบางปะอิน2 ถึง สถานีบางขันธุ์	19.50 กิโลเมตร
สถานีบางปะอิน2 ถึง สถานีวังน้อย	19.30 กิโลเมตร
สถานีโรจนะเพาเวอร์ ถึง สถานีโรจนะ	1.66 กิโลเมตร
สถานีโรจนะ ถึง สถานีวังน้อย	12.25 กิโลเมตร

**ตารางที่ 4** ข้อมูลระดับกระแสลัดวงจรและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ที่ฐานแรงดัน 115 เควี 100 MVA

สถานี	กระแสลัดวงจร	กระแสลัดวงจร	R1	X1	R0	X0
	สามเฟส (kA)	หนึ่งเฟส (kA)	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
สถานีบางปะอิน2	24.770	23.707	0.00133	0.02022	0.00221	0.02279
สถานีวังน้อย	14.126	8.922	0.00428	0.03886	0.01567	0.10638
สถานีโรจนะ	14.166	10.182	0.00405	0.03878	0.00970	0.08419
สถานีโรจนะเพาเวอร์	10.317	10.949	0.00384	0.03776	0.00766	0.07503
สถานีนวนคร	15.555	9.768	0.00385	0.03529	0.01518	0.09748
สถานีบ้านเลน	15.475	9.682	0.00389	0.03552	0.01536	0.09852
สถานีบางขันธุ์	6.776	3.372	0.01114	0.08073	0.055	0.32379

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งในระดับแรงดัน 115 เควี โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฐาน  $Z_{BASE}=132.25$  โอห์ม

$$Z_{F1} = Z_{F2} = 0.000324658 + 0.002024197j \text{ p.u./km}$$

$$Z_{F0} = 0.00175414 + 0.010052174j \text{ p.u./km}$$

**ตารางที่ 5** ข้อมูลระดับกระแสลัดวงจรและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ที่ฐานแรงดัน 22 เควี 100 MVA

สถานี	กระแสลัดวงจร	กระแสลัดวงจร	R1	X1	R0	X0
	สามเฟส (kA)	หนึ่งเฟส (kA)	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
สถานีโรจนะ	8.013	1.086	0.01276	0.36010	7.88016	0.31788

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนในระดับแรงดัน 22 เควี โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฐาน  $Z_{BASE}=4.84$  โอห์ม

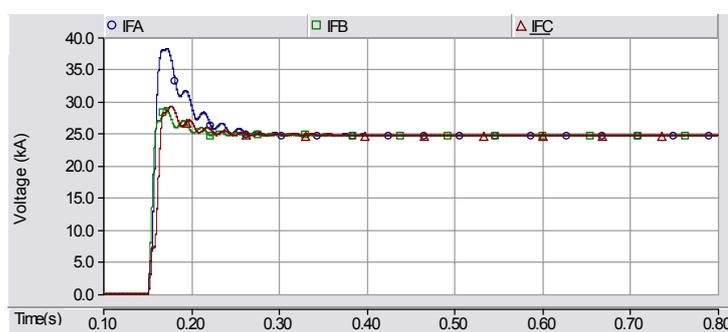
$$Z_{F1} = Z_{F2} = 0.214350 + 0.339760j \text{ ohm/km}$$

$$Z_{F0} = 0.39127 + 1.5545j \text{ ohm/km}$$

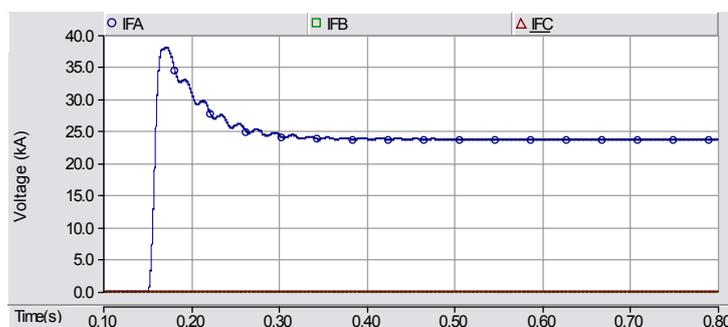
## 2. การจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

การจำลองระบบในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการจำลองระบบที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ค่าอิมพีแดนซ์หม้อแปลง ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เป็นต้น โดยวิธีการจำลองระบบนั้นใช้การเชื่อมโยงของระบบตามแผนภาพเส้นเดียว (Single Line Diagram) ของระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังภาพที่ 4 หลังจากจำลองระบบโดยโปรแกรม PSCAD/EMTDC แล้ว จะทดสอบวงจรโดยการวัดค่าระดับกระแสลัดวงจรสามเฟส และหนึ่งเฟส ในระดับแรงดัน 115 เควี และระดับแรงดัน 22 เควี ที่สถานีต่างๆ ให้ได้ตามข้อมูลกระแสลัดวงจรของของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้กล่าวในส่วนของคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองระบบ โดยผลการทดสอบค่ากระแสลัดวงจรของระบบที่จำลองขึ้นแสดงดังนี้

สถานีบางปะอิน2 (BIB)

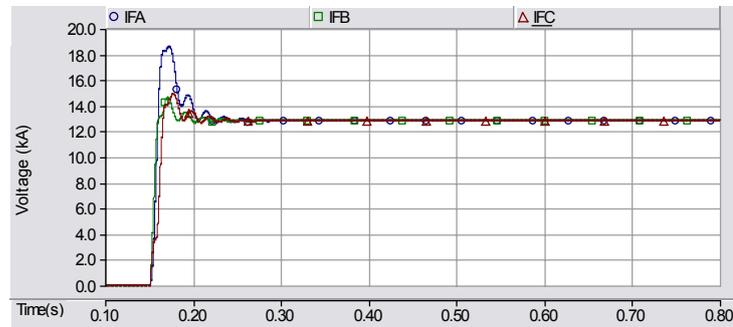


ภาพที่ 5 กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบางปะอิน2 (EGAT)

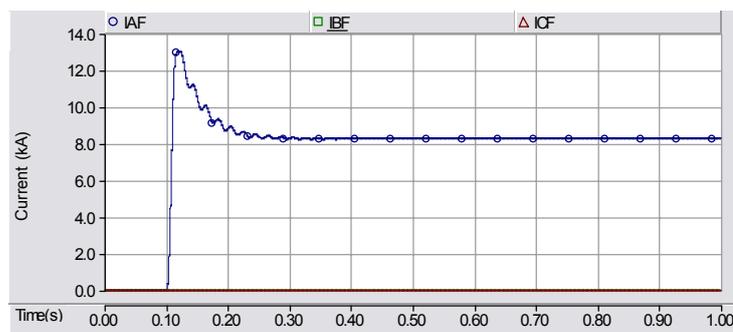


ภาพที่ 6 กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบางปะอิน2 (EGAT)

### สถานีวังน้อย (WAA)

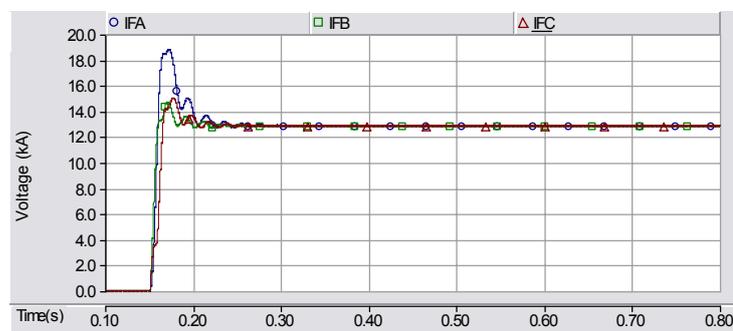


### ภาพที่ 7 กระแสตัววงจรสามเฟสที่สถานีวังน้อย

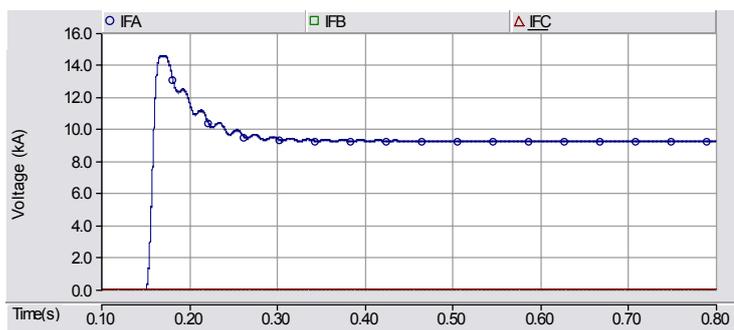


### ภาพที่ 8 กระแสตัววงจรหนึ่งเฟสที่สถานีวังน้อย

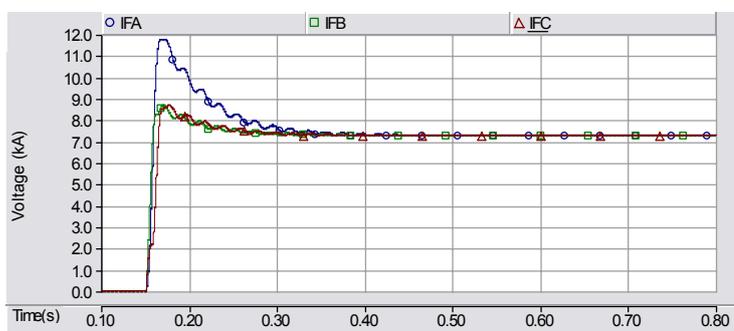
### สถานีโรจนะ (RCN)



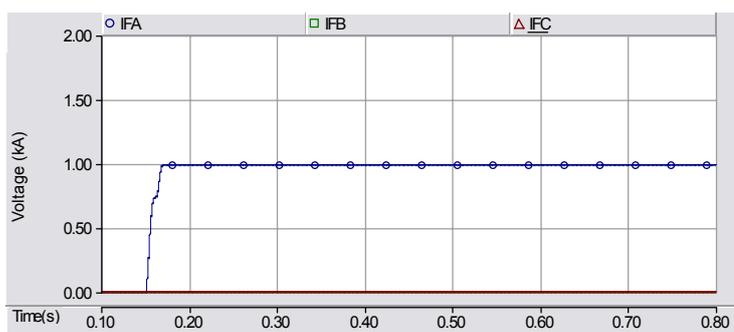
### ภาพที่ 9 กระแสตัววงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะ (115 เควี)



ภาพที่ 10 กระแสตัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะ (115 เควี)

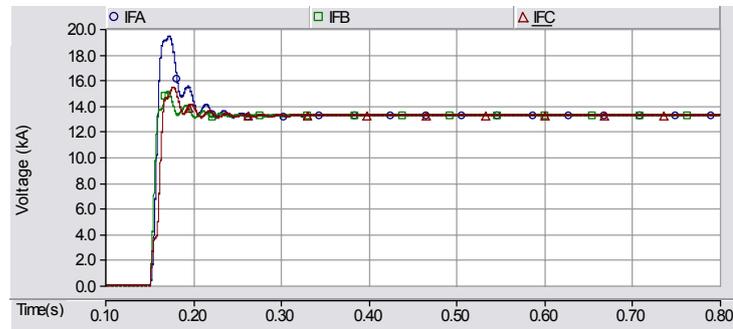


ภาพที่ 11 กระแสตัดวงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะ (22 เควี)

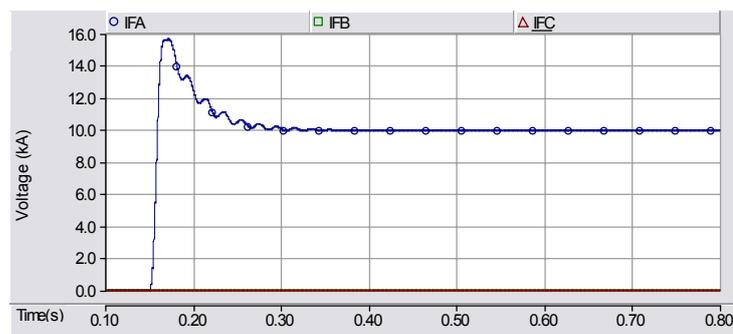


ภาพที่ 12 กระแสตัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะ (22 เควี)

### สถานีโรจนะเพาเวอร์ (RPW)

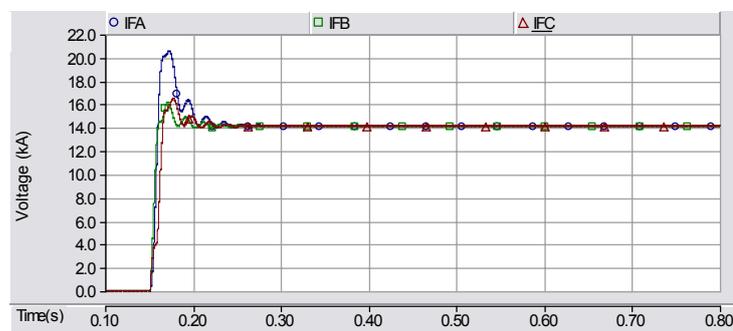


### ภาพที่ 13 กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีโรจนะเพาเวอร์

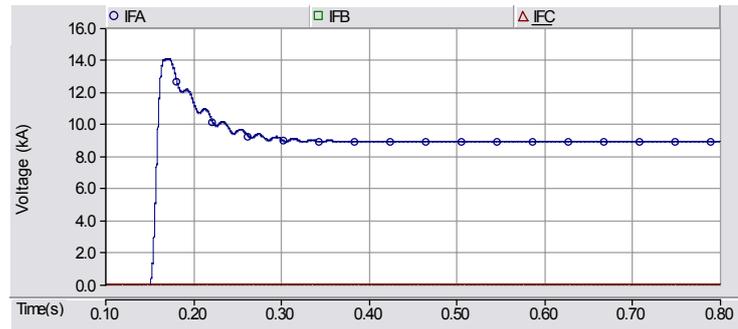


### ภาพที่ 14 กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีโรจนะเพาเวอร์

### สถานีนวนคร (NVA)

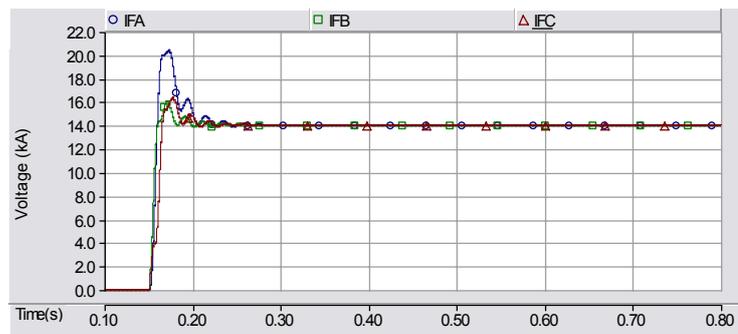


### ภาพที่ 15 กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีนวนคร

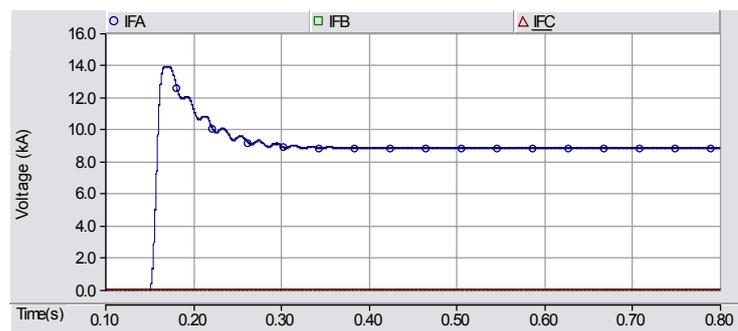


ภาพที่ 16 กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีนวนคร

สถานีบ้านเลน(BNL)

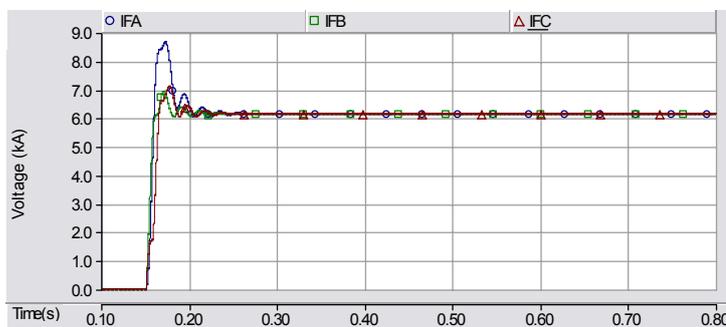


ภาพที่ 17 กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบ้านเลน

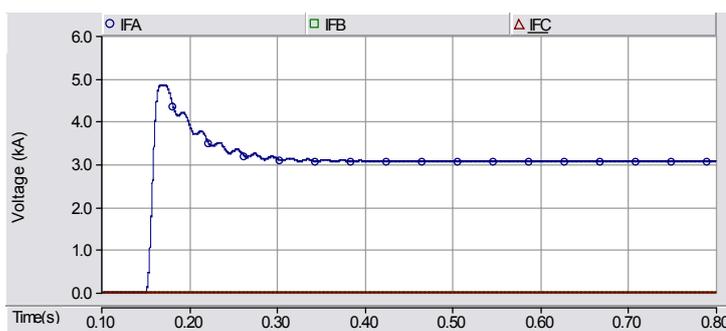


ภาพที่ 18 กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบ้านเลน

### สถานีบางขันธุ์ (BKA)



ภาพที่ 19 กระแสลัดวงจรสามเฟสที่สถานีบางขันธุ์



ภาพที่ 20 กระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สถานีบางขันธุ์

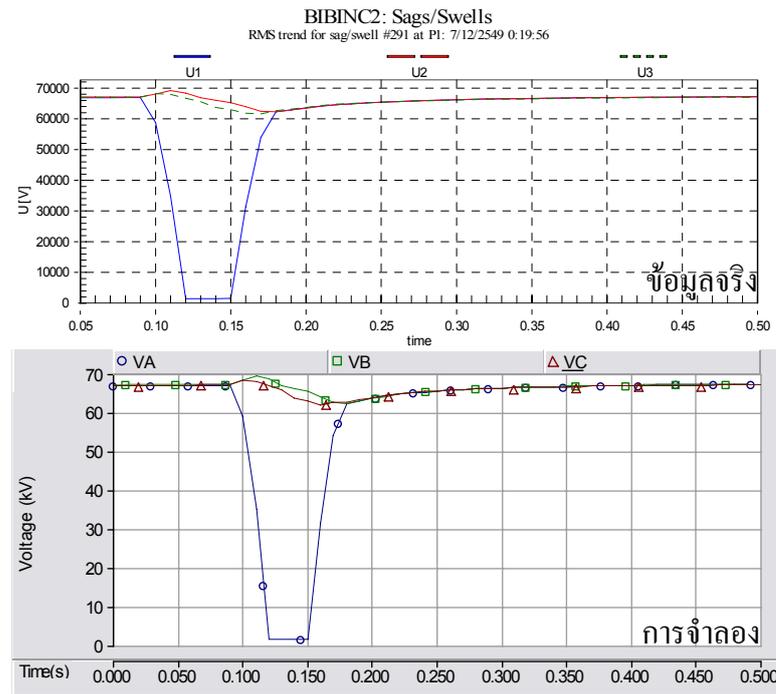
จากการทดสอบค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีต่างๆ พบว่าลักษณะกระแสลัดวงจรที่ได้จากการจำลองวงจรในช่วงแรกมีลักษณะพุ่งสูงขึ้นและมีเกิดออสซิลเลต ซึ่งสาเหตุของการเกิดออสซิลเลตเกิดจากการคำนวณค่ากระแสแบบอาร์เอ็มเอสจากรูปคลื่นกระแสของโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งมีการคำนวณตามช่วงขั้นเวลา (Time Step) ของโปรแกรมอย่างไรก็ตามหลังจากนั้นกระแสลัดวงจรค่อยๆ มีค่าลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่ โดยเมื่อเปรียบเทียบระดับกระแสลัดวงจรที่ได้จากการจำลองระบบในส่วนที่เข้าสู่ภาวะคงที่แล้วกับค่าที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกับ  
ค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการจำลองระบบ

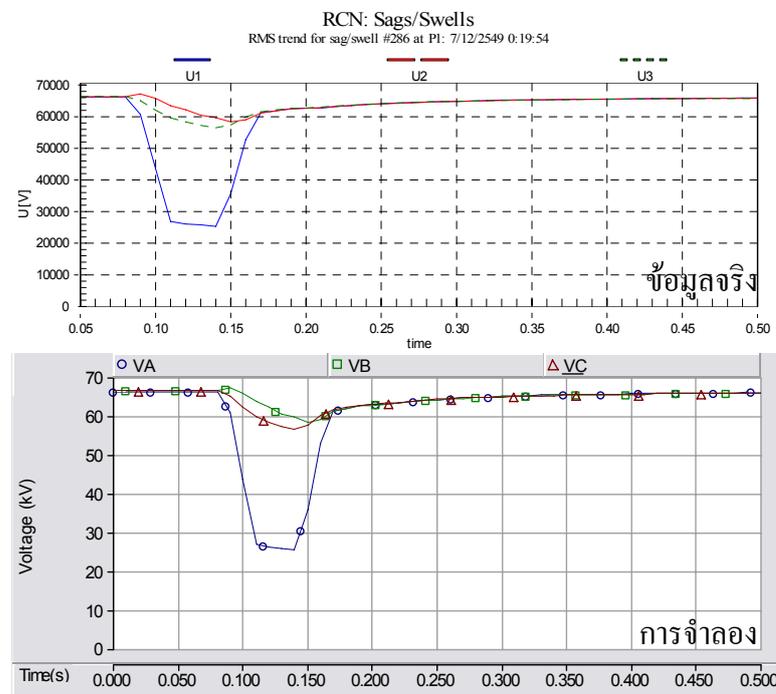
สถานี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค		การจำลองระบบ	
	กระแสลัดวงจร	กระแสลัดวงจร	กระแสลัดวงจร	กระแสลัดวงจร
	สามเฟส (kA)	หนึ่งเฟส (kA)	สามเฟส (kA)	หนึ่งเฟส (kA)
บางปะอิน2	24.770	23.707	24.78	23.75
วังน้อย	14.126	8.922	12.84	8.11
โรจนะ	14.166	10.182	12.88	9.26
โรจนะเพาเวอร์	14.317	10.949	13.23	9.95
นวนคร	15.555	9.768	14.14	8.88
บ้านเลน	15.475	9.682	14.05	8.80
บางขันธุ์	6.776	3.372	6.16	3.06

โดยในส่วนค่ากระแสลัดวงจรจากการจำลองระบบโดยโปรแกรม PSCAD/EMTDC นั้นมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งนี้เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคคำนวณค่ากระแสลัดวงจรโดยวิธี IEC ซึ่งใช้ค่า voltage factor เท่ากับ 1.1 คูณกับค่าแรงดัน ซึ่งส่งผลให้แรงดันก่อนเกิดลัดวงจรมีค่าเป็น 1.1 เปอรูยูนิต ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า แต่ในส่วนของค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีบางปะอิน2 ซึ่งเป็นสถานีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในส่วนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตนั้นใช้วิธีการคำนวณตามปกติโดยไม่มีค่า voltage factor

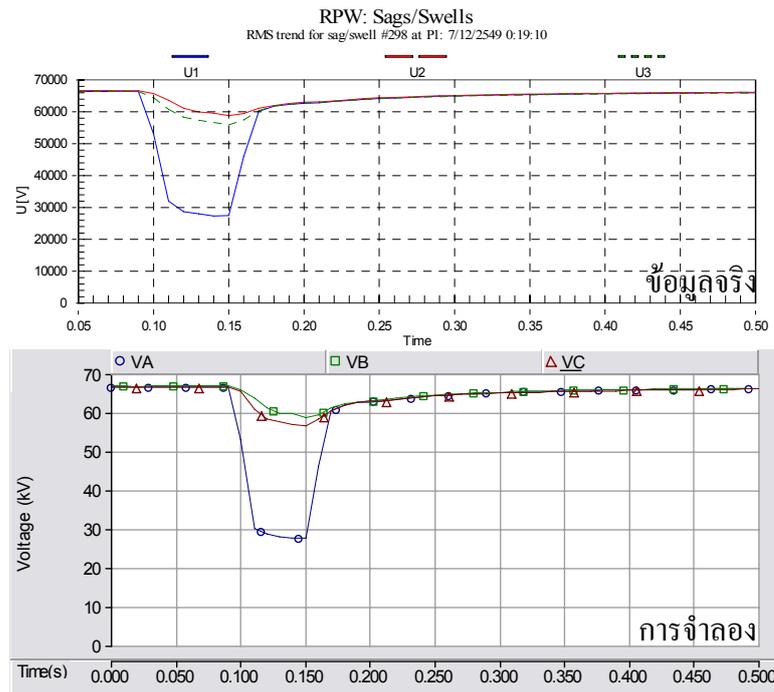
หลังจากทดสอบค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีต่างๆ แล้วจะทำการทดสอบวงจรกับข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัดของเครื่องวัดคุณภาพฟ้า โดยในที่นี้ใช้เหตุการณ์ที่ทราบตำแหน่งลัดวงจรที่แน่นอน โดยใช้เหตุการณ์วันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2549 เวลา 00.20 น. เจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบันทึกรายงานว่าเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่เฟสเอ ที่บัสสถานีบางปะอิน2 โดยสาเหตุเกิดจากลูกถ้วยรองรับ Main bus no.2 เฟสเอ ชำรุด โดยการทดสอบวงจรมันจะกำหนดให้เกิดลัดวงจรที่เฟสเอ ที่สถานีบางปะอิน2 ค่าความต้านทานลัดวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์โอห์ม เป็นเวลา 0.1 วินาที และบันทึกค่าแรงดันเฟสที่สถานีบางปะอิน2 สถานีโรจนะ สถานีโรจนะเพาเวอร์ สถานีนวนคร และสถานีบ้านเลน และนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



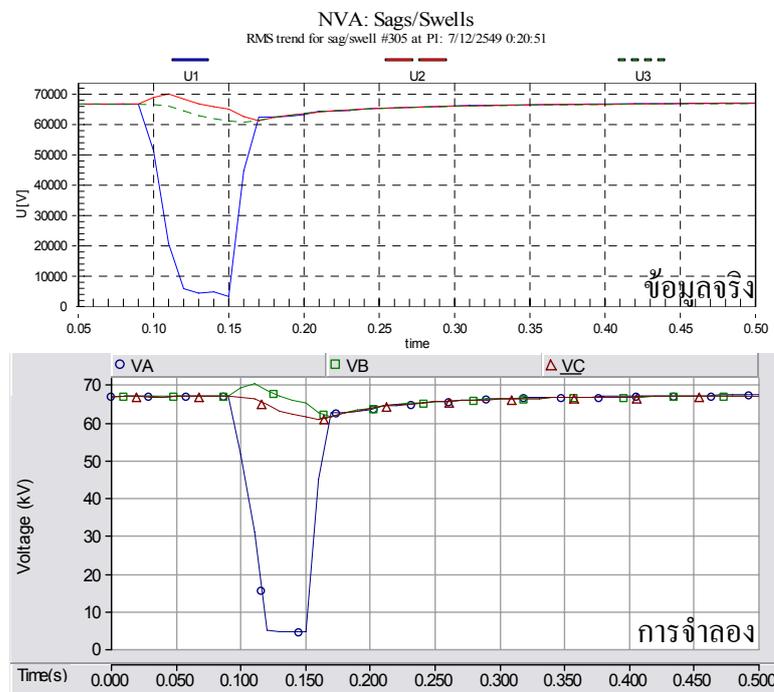
ภาพที่ 21 แรงดันที่สถานีบางปะอิน2 ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร



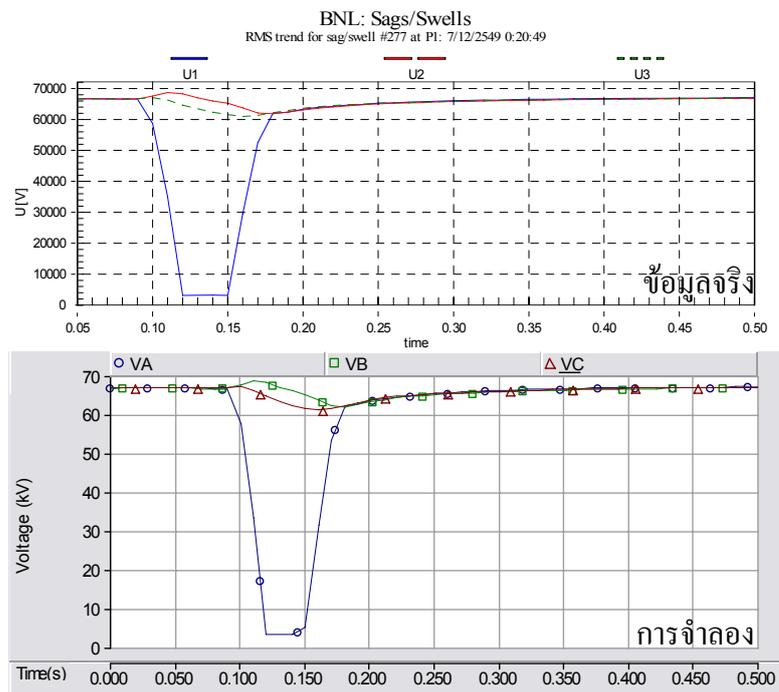
ภาพที่ 22 แรงดันที่สถานีโรจนะ ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร



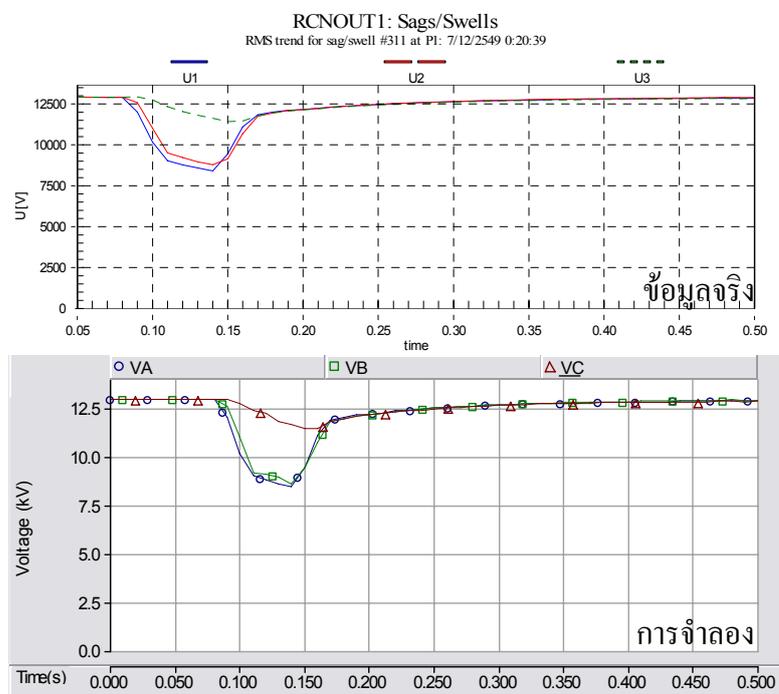
ภาพที่ 23 แรงดันที่สถานีโรจนะเพาเวอร์ ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร



ภาพที่ 24 แรงดันที่สถานีนวนคร ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร



ภาพที่ 25 แรงดันที่สถานีบ้านเลน ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร



ภาพที่ 26 แรงดันที่สถานีโรจนะด้านแรงดัน 22 เควี ที่ได้จากข้อมูลจริงกับการจำลองวงจร

จากผลการทดสอบวงจรกับข้อมูลจริงพบว่าลักษณะแรงดันที่ได้จากการจำลองวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินที่เฟสเอ ขนาดแรงดันระดับ 115 เควี ที่เฟสเอมีค่าลดต่ำลงทุกสถานี และขนาดแรงดันที่ระดับ 22 เควี ที่สถานีโรจนะ เกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นที่เฟสเอละเฟสบี โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงดันต่ำเกินในเฟสที่มีค่าต่ำที่สุดในแต่ละสถานีระหว่างขนาดแรงดันที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ากับขนาดของแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการจำลองวงจร และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 7 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ 20.02 เปอร์เซ็นต์ โดยเกิดขึ้นที่สถานีบางปะอิน2 โดยความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากการกำหนดค่าความต้านทานลัดวงจรซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบค่าให้มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยในการศึกษานี้จะนำวงจรที่ทดสอบนี้ไปใช้ในการศึกษาต่อไป

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบขนาดของแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ากับขนาดของแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการจำลองวงจร

สถานี	ขนาดแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการจำลองวงจร (โวลต์)	ขนาดแรงดันต่ำเกินที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัด (โวลต์)	ความคลาดเคลื่อน (%)
บางปะอิน2	1158.46	1448.37	20.02
โรจนะ(115 เควี)	23031.34	25331.25	9.08
โรจนะเพาเวอร์	26800.23	27328.78	1.93
นวนคร	3830.32	3319.12	15.40
บ้านเลน	3460.53	3141.97	10.14
โรจนะ(22 เควี)	8230.63	8410.93	2.14

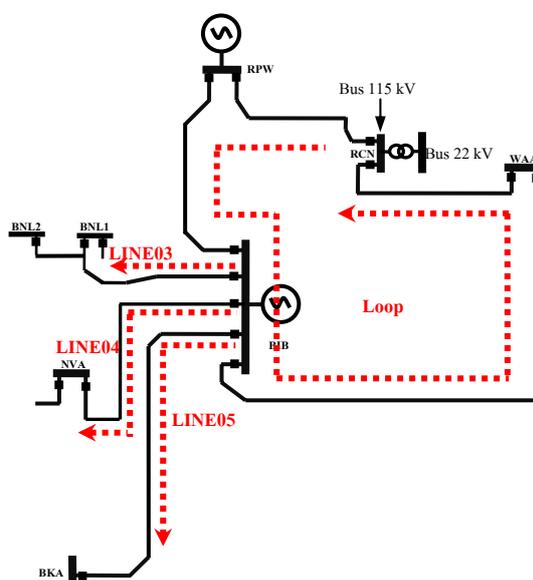
### 3. วิธีการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งที่แรงดัน 115 เควี และในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 เควี โดยศึกษาถึงผลของแรงดันต่ำเกินผ่านหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-วาย โดยจุดกลางต่อลงดินทั้งสองด้าน(YGyg) แบบ เคลต้า-เคลต้า(Dd) แบบวาย-วาย(Yy) แบบวาย-วาย โดยต่อลงดินด้านปฐมภูมิ(YGy) แบบวาย-วาย โดยต่อลงดินด้านทุติยภูมิ(Yyg) แบบเคลต้า-วาย(Dy) แบบเคลต้า-วาย โดยต่อลงดินด้านทุติยภูมิ(Dyg) แบบวาย-เคลต้า(Yd) และแบบวาย-เคลต้า โดยต่อลงดินด้านปฐมภูมิ(YGd) ซึ่งมีวิธีการศึกษา คือ

3.1 การศึกษาผลของแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบสายส่ง การศึกษาในส่วนนี้จะศึกษาแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบสายส่งที่ระดับแรงดัน 115 เควี โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรหนึ่งเฟสสองเฟส สองเฟส และสามเฟส ที่ทุกๆ 1 กิโลเมตร ที่ระดับแรงดัน 115 เควี และกำหนดให้เกิดลัดวงจรในช่วงเวลา 0.1 วินาที โดยมีวิธีการ คือ

1. กำหนดให้เกิดลัดวงจรที่บริเวณสายส่งส่วนที่เป็นลูปลาย โดยให้เกิดลัดวงจรเริ่มต้นที่สถานีโรจนะ ผ่านสายส่งไปยังสถานีโรจนเพาเวอร์ สถานีบางปะอิน2 สถานีวังน้อย และมาถึงสิ้นสุดที่สถานีโรจนะอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยมีระยะทางรวม 54.80 กิโลเมตร

2. กำหนดให้เกิดลัดวงจรส่วนที่เป็นสายแยกซึ่งประกอบไปด้วย สายส่งที่เริ่มต้นจากสถานีบางปะอิน2 ไปยังสถานีบ้านเลน (LINE03) ระยะทาง 6.33 กิโลเมตร สายส่งที่เริ่มต้นจากสถานีบางปะอิน2 ไปยังสถานีนวนคร (LINE04) ระยะทาง 9.80 กิโลเมตร และสายส่งที่เริ่มต้นจากสถานีบางปะอิน2 ไปยังสถานีบางขันธุ์ (LINE05) ระยะทาง 19.5 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 27

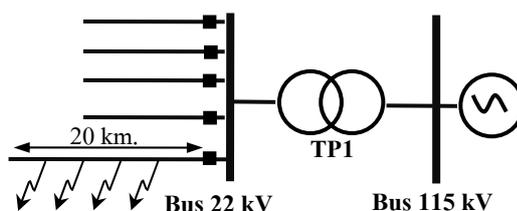


ภาพที่ 27 การกำหนดจุดลัดวงจรที่ส่วนต่างๆ ด้าน 115 เควี

3. บันทึกขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรในแต่ละครั้ง โดยบันทึกทั้งสองด้านของหม้อแปลงที่ตำแหน่งบัสระดับแรงดัน 115 เควี และที่ตำแหน่งบัสระดับแรงดัน 22 เควี ที่สถานีโรจนะ และตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร

4. เปลี่ยนชนิดของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg, Dd, Yy, YGy, Yyg, Dy, Dyg, Yd และแบบ YGd

3.2 ศึกษาผลของแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบจำหน่าย การศึกษาในส่วนนี้จะศึกษาผลของแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 เควี โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน สองเฟสลงดิน สองเฟส และสามเฟส ที่ทุกๆ 1 กิโลเมตร ที่ระดับแรงดัน 22 เควี และกำหนดให้เกิดลัดวงจรในช่วงเวลา 0.1 วินาที ดังภาพที่ 28 และบันทึกขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรในแต่ละครั้ง โดยบันทึกทั้งสองด้านของหม้อแปลงที่ตำแหน่งบัสระดับแรงดัน 115 เควี และตำแหน่งบัสระดับแรงดัน 22 เควี ที่สถานีโรงนะ และตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร



ภาพที่ 28 การกำหนดจุดลัดวงจรที่สายป้อนในระบบจำหน่าย ที่ระดับแรงดัน 22 เควี

3.3 สร้างคอนทัวร์แรงดันจากข้อมูลแรงดันต่ำเกิน และตำแหน่งเกิดลัดวงจรที่ได้จากการจำลองระบบ โดยในที่นี้สร้างคอนทัวร์แรงดัน 10%, 50%, 70%, 80% และ 90% ของแรงดันปกติ โดยวาดเส้นเชื่อมต่อจุดที่มีขนาดแรงดันเท่ากันลงบนแผนภาพเส้นเดียวของระบบที่ใช้ในการศึกษา

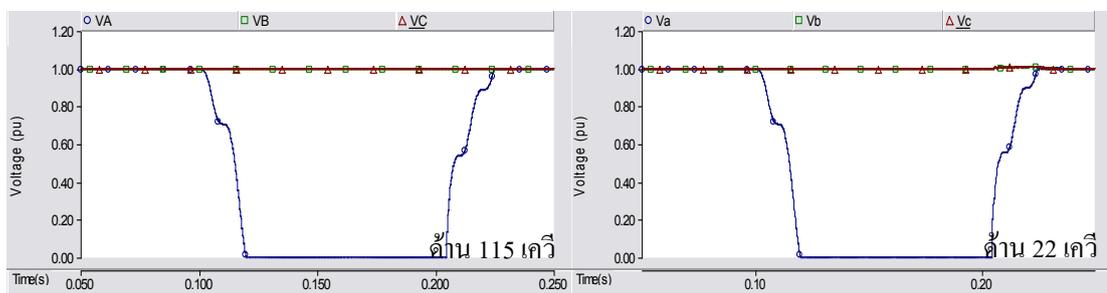
## ผลและวิจารณ์

### 1. ลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย

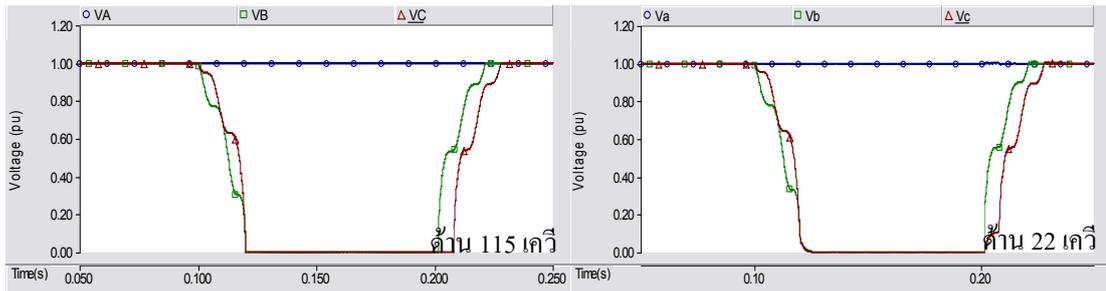
ผลการศึกษาในส่วนนี้กล่าวถึงลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินทางด้านแรงดัน 115 เควี และด้านแรงดัน 22 เควี ของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg, Dd, Yy, YGy, Yyg, Dy, Dyg, Yd และแบบ YGd โดยแสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นที่วัดได้จากทั้งสองด้านของหม้อแปลง และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น โดยในที่นี้แสดงผลการศึกษารณิลัควงจรหนึ่งเฟสลงคินที่เฟสเอ ลัควงจรสองเฟสลงคินที่เฟสบีและเฟสซี ลัควงจรสองเฟสที่เฟสบีและเฟสซี และลัควงจรสามเฟสที่เฟสเอ เฟสบีและเฟสซี ผลการศึกษาคแสดงได้ดังนี้

#### 1.1 แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดัน 22 เควี จากการลัควงจรที่ด้านแรงดัน 115 เควี

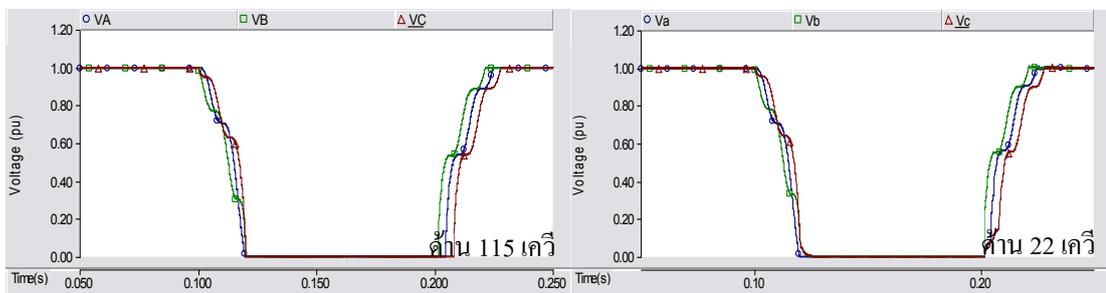
##### 1.1.1 กรณิลหม้อแปลงต่อขดลวดแบบ YGyg



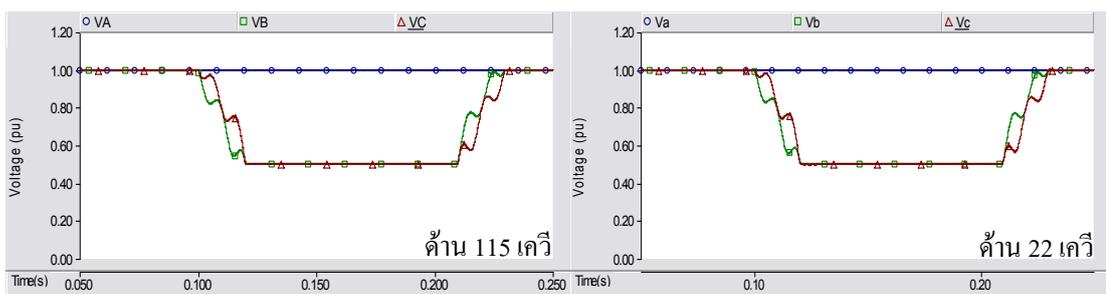
ภาพที่ 29 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณิลเกิดลัควงจรหนึ่งเฟสลงคินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg



ภาพที่ 30 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสดังดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg



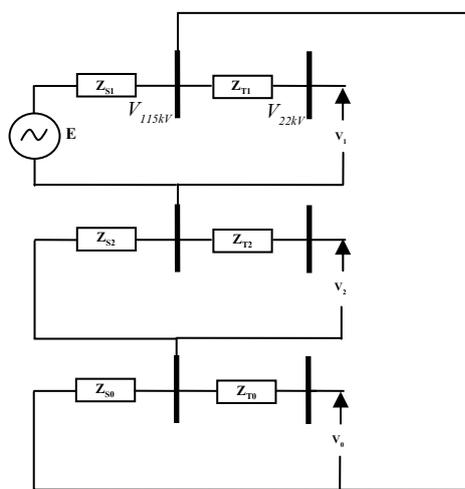
ภาพที่ 31 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg



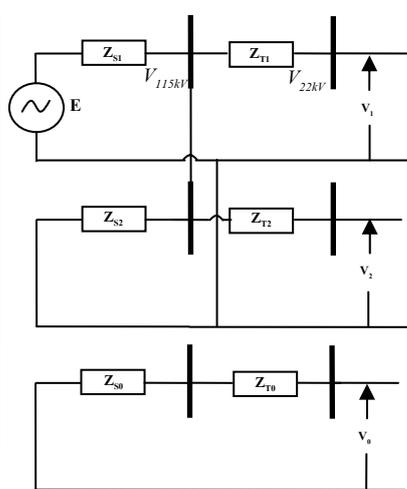
ภาพที่ 32 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg

เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสดังดิน สองเฟสดังดิน สามเฟส และสองเฟส ทางด้านแรงดัน 115 เควี ของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดัน 22 เควี มีขนาดแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นทางด้าน 115 เควี เมื่อเกิด

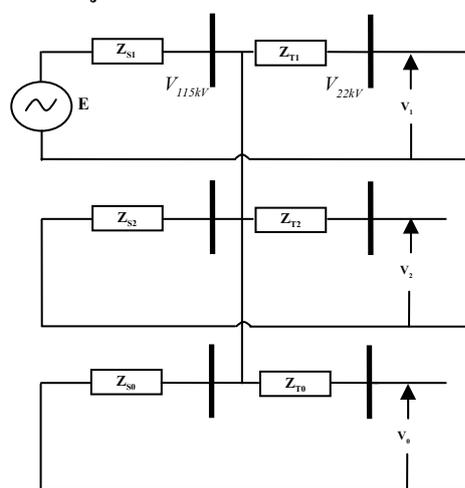
ลัทธิวงจรขึ้นสามารถเขียนวงจรสมมูลออกเป็น 3 ลำดับคือ วงจรลำดับบวก วงจรลำดับลบ และวงจรลำดับศูนย์ ซึ่งวงจรในแต่ละลำดับนั้นมีการต่อกันตามชนิดการเกิดลัทธิวงรดังภาพที่ 33 เมื่อพิจารณาขนาดแรงดันที่ด้าน 22 เควี จะเห็นว่าแรงดันนั้นประกอบไปด้วยแรงดันในแต่ละลำดับที่มีขนาดเท่ากับแรงดันในแต่ละลำดับทางด้าน 115 เควี จะเห็นว่ามีคุณสมบัติคล้องกับลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 32 ซึ่งขนาดแรงดันต่ำเกินเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของหม้อแปลงมีขนาดเท่ากัน โดยผลที่ได้นั้นสามารถแสดงดังตารางที่ 8



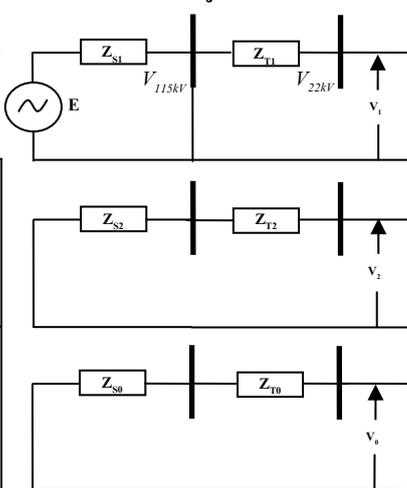
(ก) วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัทธิวงรดั้งหนึ่งเฟสลงดิน



(ข) วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัทธิวงรดั้งสองเฟส



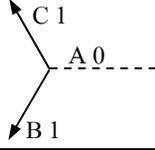
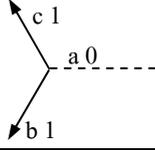
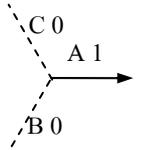
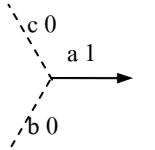
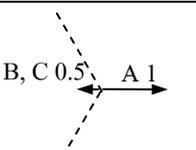
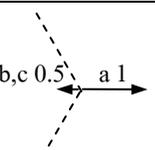
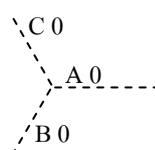
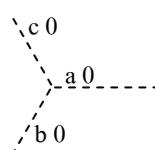
(ค) วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัทธิวงรดั้งสองเฟสลงดิน



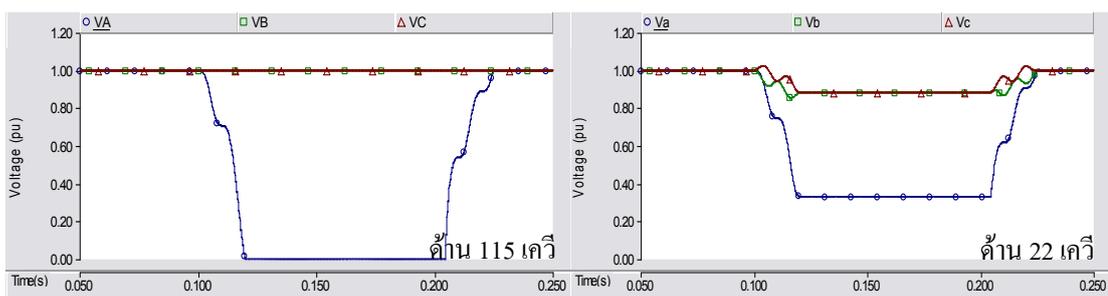
(ง) วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัทธิวงรดั้งสามเฟส

ภาพที่ 33 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัทธิวงรดั้งที่ด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง YGyg

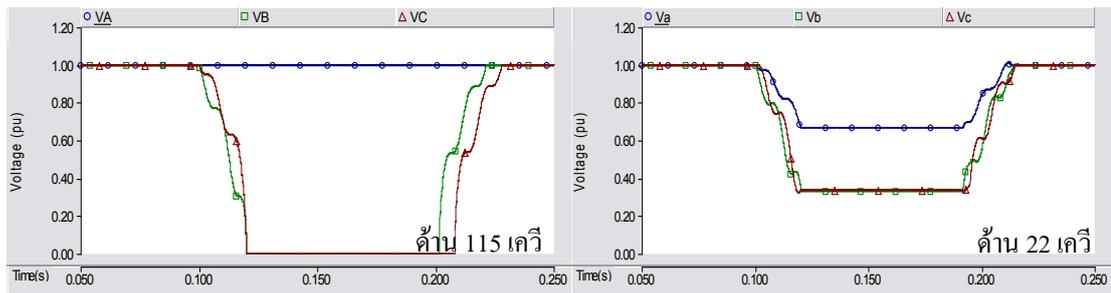
ตารางที่ 8 ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ

ชนิดลัดวงจร	แรงดันด้านปฐมภูมิ	แรงดันด้านทุติยภูมิ
หนึ่งเฟสลงดิน		
สองเฟสลงดิน		
สองเฟส		
สามเฟส		

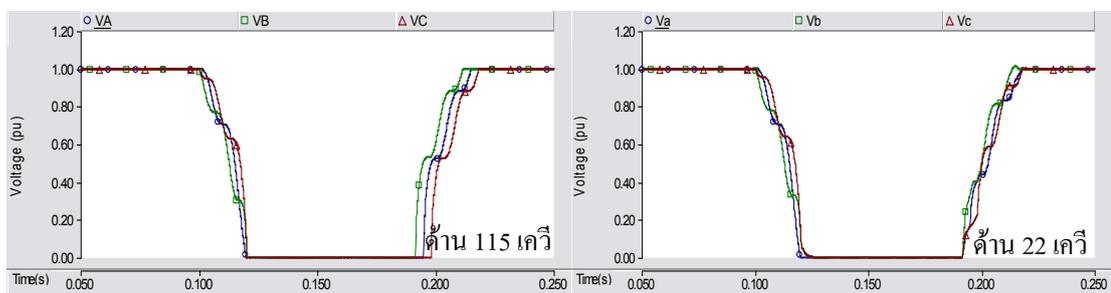
1.1.2 กรณีหม้อแปลงต่อขดลวดแบบ Dd, Yy, YGy และ Yyg



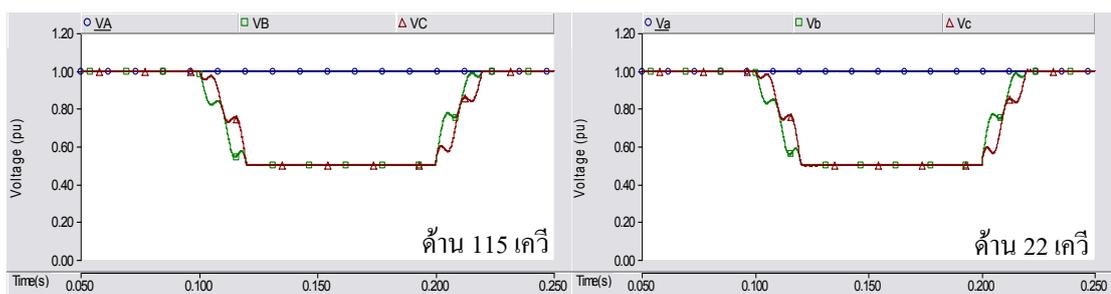
ภาพที่ 34 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg



ภาพที่ 35 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg



ภาพที่ 36 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg

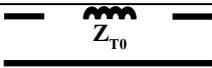
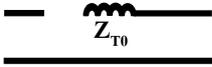
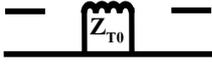


ภาพที่ 37 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg

เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน สองเฟสลงดิน สามเฟส และสองเฟส ทางด้านแรงดัน 115 เควี ในกลุ่มหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg สามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรได้เช่นเดียวกับกรณีหม้อแปลงแบบ YGyg แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของวงจรลำดับ

ศูนย์ของหม้อแปลงดังตารางที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในกลุ่มนี้ไม่ต่อกัน ซึ่งเป็นผลให้เมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน 115 เควี แรงดันในด้าน 22 เควี ไม่มีแรงดันในลำดับศูนย์เป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 9 วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy และ Yyg

ชนิดหม้อแปลง	วงจรลำดับศูนย์
Yy	
Yyg	
YGy	
Dd	

โดยถ้าพิจารณาตามคุณสมบัติของหม้อแปลงข้างต้นสามารถคำนวณหาแรงดันตกเกินทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่มนี้ได้ เช่น กรณีแรงดันตกเกินที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินด้าน 115 เควี กำหนดให้เกิดลัดวงจรที่เฟสเอ ( $V_A=0$ ) และแรงดันในเฟสบี และซี มีค่าเป็นปกติ ( $V_B=a^2, V_C=a$ ) โดยที่  $a = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$  ดังนั้นสามารถคำนวณค่าแรงดันในลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ทางด้านปฐมภูมิเมื่อเกิดลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) = \frac{1}{3}(0 + a + a^2) = -\frac{1}{3} \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) = \frac{1}{3}(0 + a^3 + a^3) = \frac{2}{3} \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C) = \frac{1}{3}(0 + a^4 + a^2) = -\frac{1}{3} \quad (4)$$

คำนวณหาแรงดันในแต่ละเฟสทางด้าน 22 เควี โดยให้ขนาดแรงดันลำดับศูนย์เท่ากับศูนย์ ( $V_0=0$ )

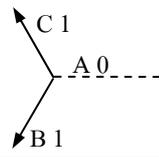
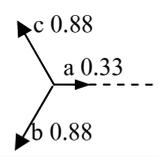
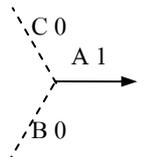
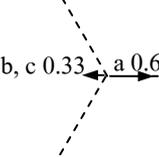
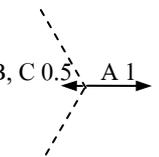
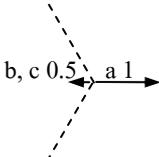
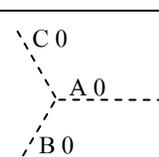
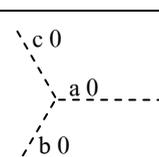
$$V_a = (V_0 + V_1 + V_2) = (0 + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}) = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ pu} \quad (5)$$

$$V_b = (V_0 + a^2V_1 + aV_2) = (0 + a^2 \frac{2}{3} - a \frac{1}{3}) = -\frac{1}{6} - 3 \frac{\sqrt{3}}{6} j = 0.88 \angle -100.89^\circ pu \quad (6)$$

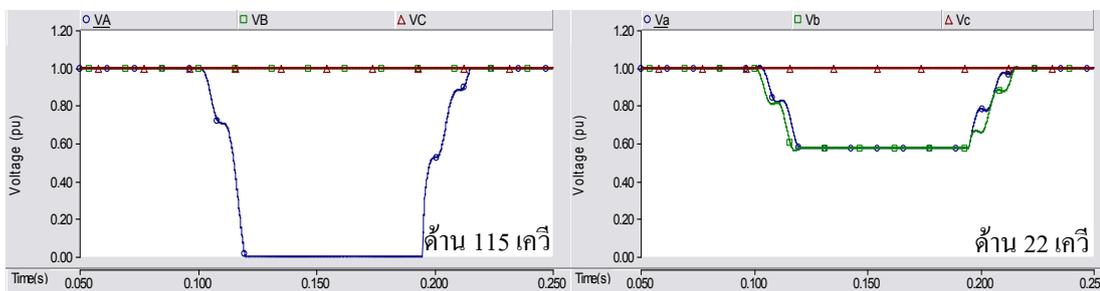
$$V_c = (V_0 + aV_1 + a^2V_2) = (0 + a \frac{2}{3} - a^2 \frac{1}{3}) = -\frac{1}{6} + 3 \frac{\sqrt{3}}{6} j = 0.88 \angle 100.89^\circ pu \quad (7)$$

จะเห็นว่าเกิดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิทั้งสามเฟส โดยเฟสเอ ลดลงมากที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกคลื่นแรงดันทางด้าน 22 เควี ในภาพที่ 34 จะเห็นว่าลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกัน โดยเมื่อเกิดลัดวงจรในแบบอื่นก็สามารถใช้วิธีเดียวกันนี้ โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 10 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณกับลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรแบบอื่นๆ ในภาพที่ 35 ถึงภาพที่ 37 จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

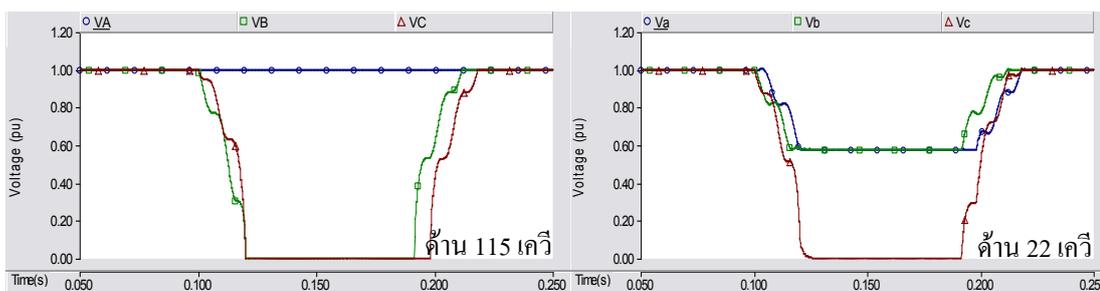
ตารางที่ 10 ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ Dd, Yy, YGy และ Yyg เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ

ชนิดลัดวงจร	แรงดันด้านปฐมภูมิ	แรงดันด้านทุติยภูมิ
หนึ่งเฟสลงดิน		
สองเฟสลงดิน		
สองเฟส		
สามเฟส		

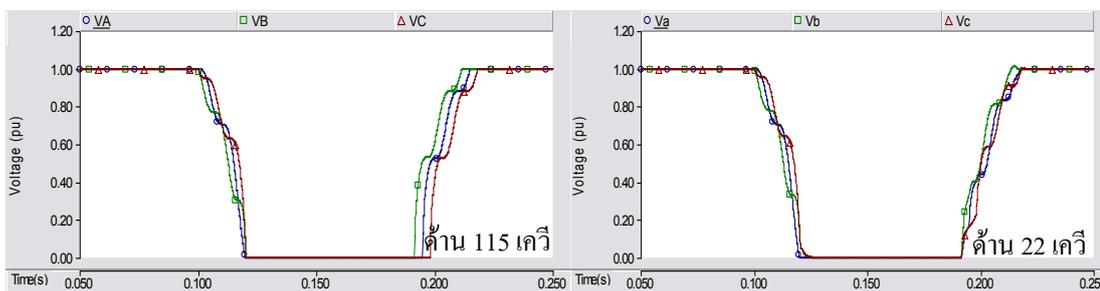
### 1.1.3 กรณีหม้อแปลงต่อขดลวดแบบ Dy, Dyg, Yd และ YGd



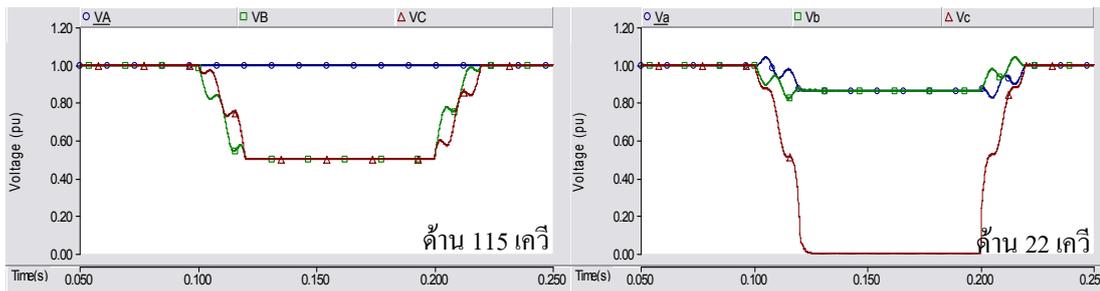
ภาพที่ 38 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd



ภาพที่ 39 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd



ภาพที่ 40 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd



ภาพที่ 41 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 115 เควี และด้าน 22 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd

เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน สองเฟสลงดิน สามเฟส และสองเฟส ทางด้านแรงดัน 115 เควี ในกลุ่มหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd สามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรได้เช่นเดียวกับกรณีหม้อแปลงแบบ YGyg แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของวงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลงดังตารางที่ 11 ซึ่งพบว่าวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในกลุ่มนี้ไม่ต่อถึงกัน ซึ่งเป็นผลให้เมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน 115 เควี แรงดันในด้าน 22 เควี นั้นไม่มีแรงดันในลำดับศูนย์เป็นองค์ประกอบ และหม้อแปลงในกลุ่มนี้มุมของแรงดันทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีค่าต่างกัน 30 องศา

ตารางที่ 11 วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลง Dy, Dyg, Yd และ YGd

ชนิดหม้อแปลง	วงจรลำดับศูนย์
Yd	
Dy	
YGd	
Dyg	

โดยถ้าพิจารณาตามคุณสมบัติของหม้อแปลงข้างต้นสามารถคำนวณหาแรงดันตกเกินทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่มนี้ได้ เช่น กรณีแรงดันตกเกินที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน 115 เควี กำหนดให้เกิดลัดวงจรที่เฟสเอ ( $V_A=0$ ) และแรงดันในเฟสบีและเฟสซี มีค่าเป็นปกติ ( $V_B=a^2, V_C=a$ ) เช่นเดียวกับกรณีของหม้อแปลงกลุ่ม Dd, Yy, YGy และ Yyg สามารถ

คำนวณหาแรงดันในแต่ละเฟสทางด้าน 22 เควี โดยให้ขนาดแรงดันลำดับศูนย์เท่ากับศูนย์ ( $V_0 = 0$ ) โดยถ้าในกรณีหม้อแปลง Dyg1 แรงดันลำดับบวกทางด้านปฐมภูมิมิมีมุมนำหน้าแรงดันด้านทุติยภูมิ 30 องศา และแรงดันลำดับลบทางด้านปฐมภูมิมิมีมุมตามหลังแรงดันด้านทุติยภูมิ -30 องศา

$$V_a = (V_0 + V_1 \angle -30^\circ + V_2 \angle +30^\circ) = \left(\frac{\sqrt{3}}{6} - \frac{3}{6}j\right) = 0.577 \angle -60^\circ \quad (8)$$

$$V_b = (V_0 + a^2 V_1 \angle -30^\circ + a V_2 \angle +30^\circ) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} - \frac{3}{6}j\right) = 0.577 \angle -120^\circ \quad (9)$$

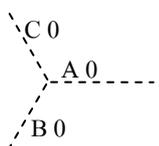
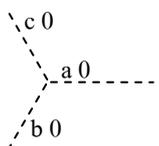
$$V_c = (V_0 + a V_1 \angle -30^\circ + a^2 V_2 \angle +30^\circ) = \frac{4}{6}j + \frac{4}{12}j = 1 \angle 90^\circ \quad (10)$$

จะเห็นว่าเกิดแรงดันต่ำเกินที่เฟสเอและเฟสบี โดยเฟสซีมีขนาดแรงดันเป็นปกติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลูกคลื่นแรงดันทางด้าน 22 เควี ในภาพที่ 38 จะเห็นว่าลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกัน โดยเมื่อเกิดลัดวงจรในแบบอื่นก็สามารถใช้วิธีเดียวกันนี้ โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 12 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณกับลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 41 จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

**ตารางที่ 12** ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ Dy, Dyg, Yd และ YGd เมื่อเกิดลัดวงจรแบบต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิ

ชนิดลัดวงจร	แรงดันด้านปฐมภูมิ	แรงดันด้านทุติยภูมิ
หนึ่งเฟสลงดิน		
สองเฟสลงดิน		
สองเฟส		

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ชนิดลัทธิจักร	แรงดันด้านปฐมภูมิ	แรงดันด้านทุติยภูมิ
สามเฟส		

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรด้าน 115 เควี สามารถแบ่งกลุ่มของหม้อแปลงออกเป็นสามกลุ่มตามลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดัน 22 เควี โดยในที่นี้กำหนดชื่อในแต่ละกลุ่มเป็น กลุ่ม X หม้อแปลงในกลุ่มนี้มีลักษณะต่อการต่อขดลวดแบบวาย-วาย โดยมีการต่อลงดินทั้งสองด้าน กลุ่ม Y หม้อแปลงในกลุ่มนี้มีลักษณะการต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิเหมือนกับทางด้านทุติยภูมิ โดยขดลวดแบบวายทางด้านปฐมภูมิหรือด้านทุติยภูมิมีการต่อลงดินเพียงด้านเดียวหรือไม่มีการต่อลงดินทั้งสองด้าน และกลุ่ม Z หม้อแปลงในกลุ่มนี้มีลักษณะต่อการต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิต่างกัน โดยด้านที่ต่อขดลวดแบบวายมีการต่อลงดินหรือไม่ก็ได้ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 กลุ่มของหม้อแปลงตามลักษณะของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น

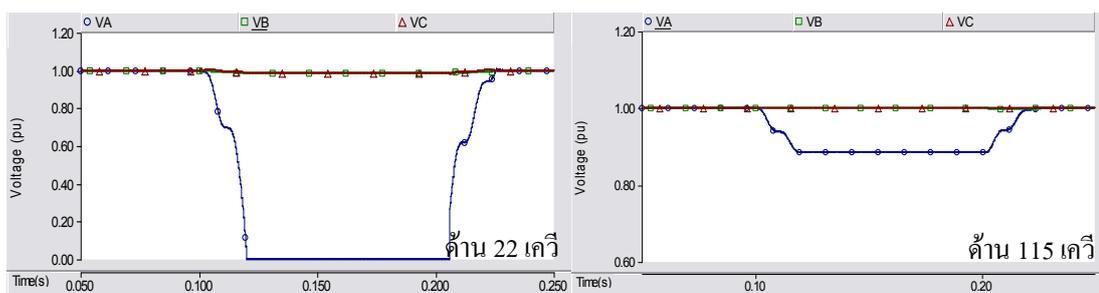
กลุ่ม	ชนิดหม้อแปลง
X	YGyg
Y	Yy, Yyg, YGy, Dd
Z	Yd, Dy, YGd, Dyg

โดยหม้อแปลงในกลุ่ม X นั้นเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน สองเฟสลงดิน สองเฟส และสามเฟส ที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะเหมือนกับแรงดันต่ำเกินทางด้านปฐมภูมิ หม้อแปลงกลุ่ม Y เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดินทางด้านปฐมภูมิ จะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นกับแรงดันทั้งสามเฟสทางด้านทุติยภูมิ โดยมีขนาดแรงดันในเฟสที่ต่ำที่สุดเป็น 0.33 เปร้อยูนิต และเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส และสามเฟสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะเหมือนกับแรงดันต่ำเกินทางด้านปฐมภูมิ ส่วนกรณีหม้อแปลงกลุ่ม Z เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง

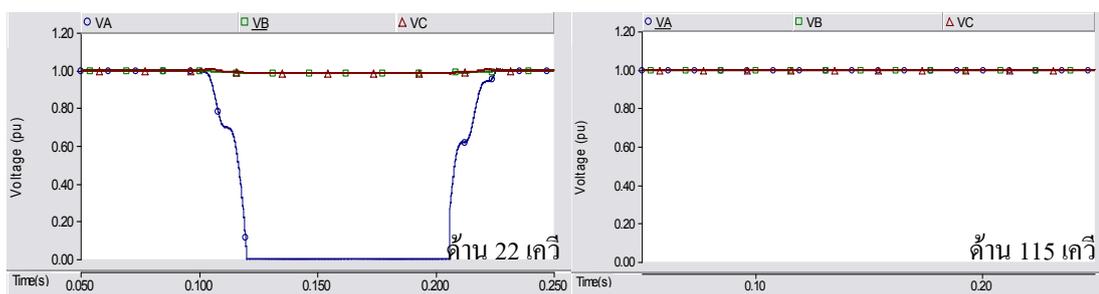
เฟสลงดินทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง จะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นกับแรงดันในสองเฟสทางด้านทุติยภูมิ โดยมีขนาดแรงดัน 0.58 เปรอร์ยูนิตและอีกหนึ่งเฟสมีค่าเป็นปกติ กรณีเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน และลัดวงจรสองเฟส จะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นกับแรงดันทั้งสามเฟสทางด้านทุติยภูมิ โดยมีขนาดแรงดันต่ำสุดคือ 0 เปรอร์ยูนิต กรณีเมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสทางด้านปฐมภูมิ ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะเหมือนกับแรงดันต่ำเกินทางด้านปฐมภูมิ

## 1.2 แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดัน 115 เควี จากการลัดวงจรที่ด้านแรงดัน 22 เควี

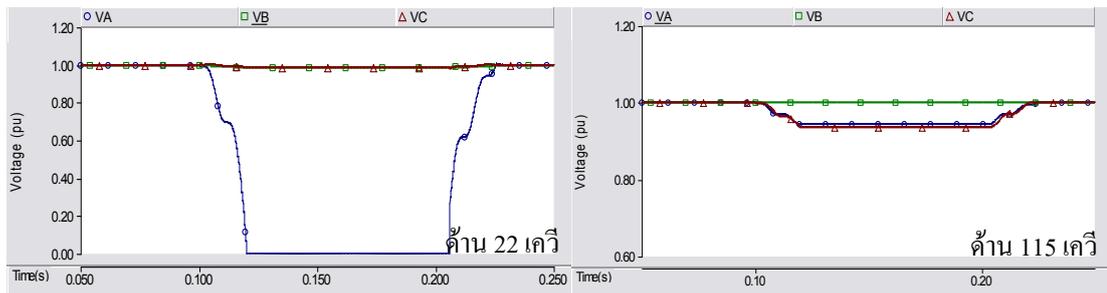
### 1.2.1 กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



ภาพที่ 42 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg

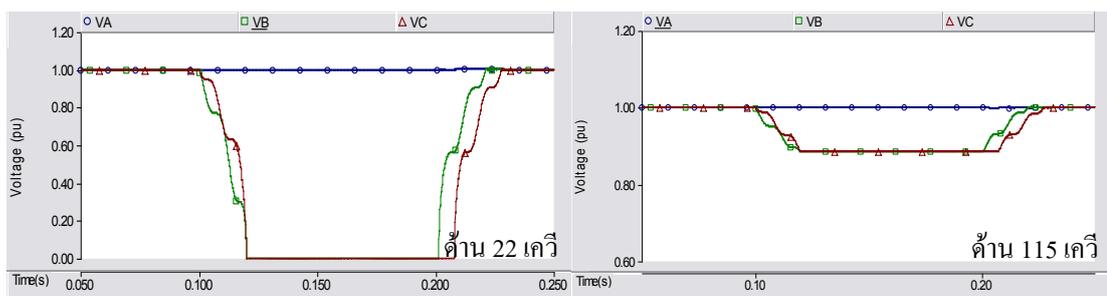


ภาพที่ 43 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dd, Yy, YGy, Yyg, YGd, Dy และ Yd

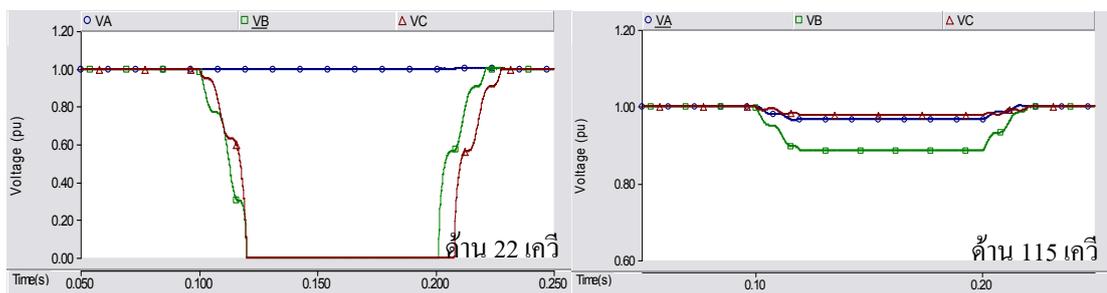


ภาพที่ 44 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg

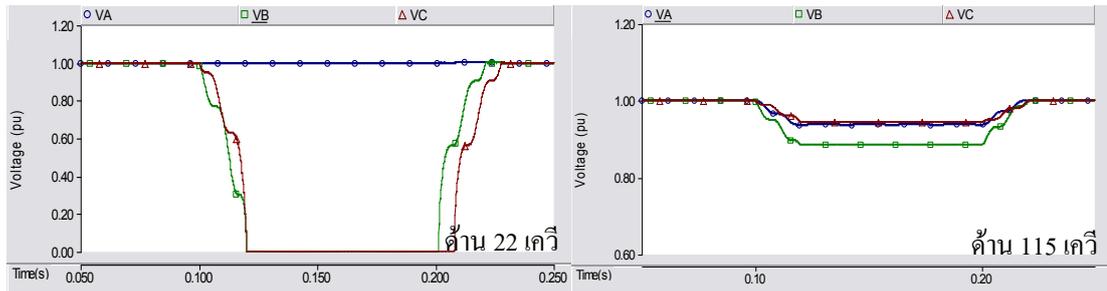
### 1.2.2 แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรสองเฟสลงดิน



ภาพที่ 45 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Dd, Yy, YGy และ Yyg

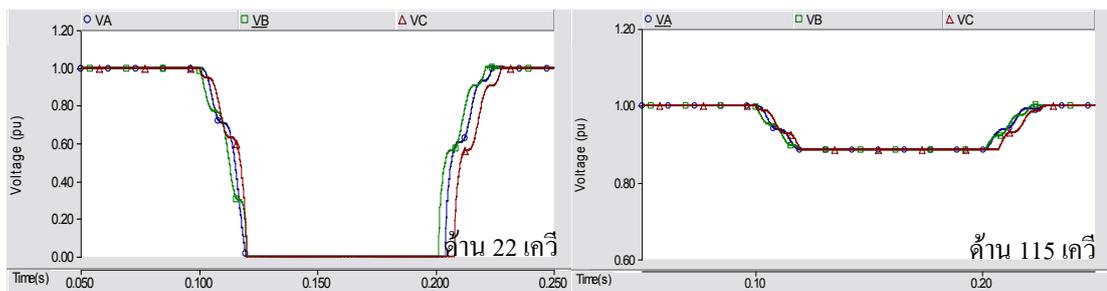


ภาพที่ 46 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dy, YGd และ Yd



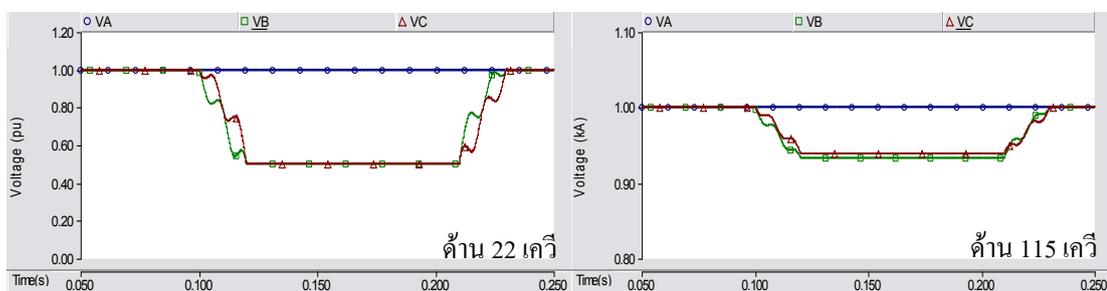
ภาพที่ 47 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg

### 1.2.3 แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรสามเฟส

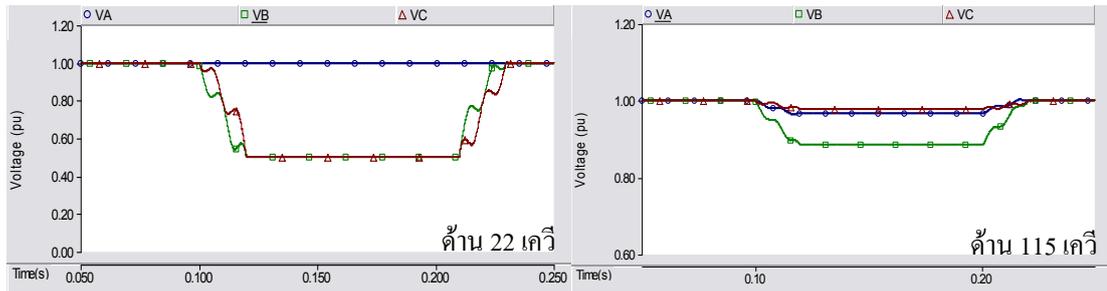


ภาพที่ 48 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Dd, Yy, YGy, Yyg, Dy, Dyg, Yd และ YGd

### 1.2.4 แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรสองเฟส

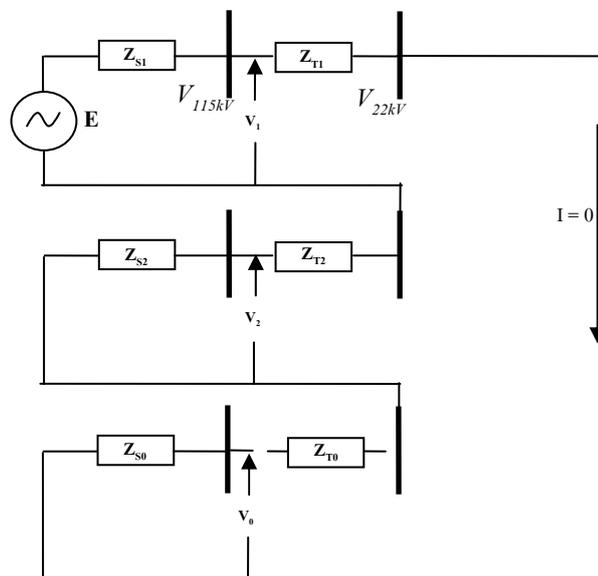


ภาพที่ 49 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง YGyg, Yy, YGy, Yyg และ Dd



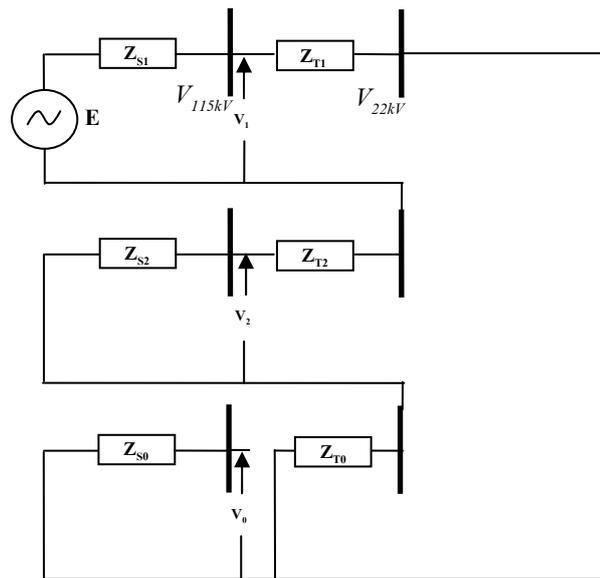
ภาพที่ 50 แรงดันอาร์เอ็มเอสด้าน 22 เควี และด้าน 115 เควี กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dy, Yd, YGd และ Dyg

จากผลการศึกษาแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้าน 115 เควี เนื่องจากการลัดวงจรด้าน 22 เควี พบว่าเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงแบบ Yy, YGy, Yyg, YD, Dy YGd และDd แรงดันทางด้าน 115 เควี มีค่าปกติ เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรดังภาพที่ 51 วงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติภูมิของหม้อแปลงไม่ต่อถึงกัน โดยแรงดันทางด้าน 115 เควี ประกอบด้วยแรงดันในลำดับบวกซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันปกติเท่านั้น



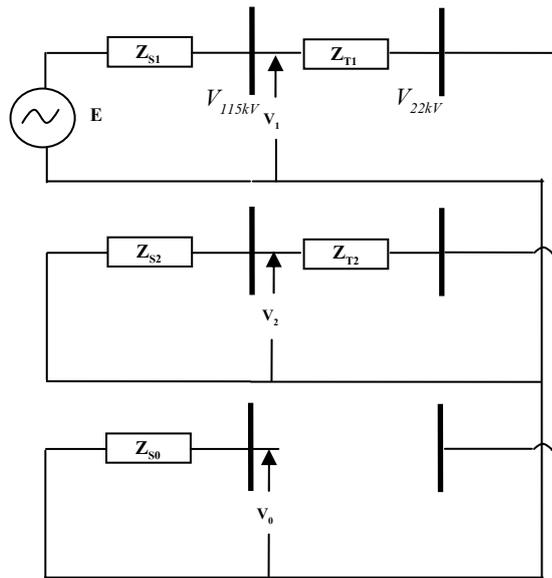
ภาพที่ 51 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Yy, YGy, Yyg, YD, Dy, YGd และDD

กรณีเกิดลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี กับหม้อแปลง Dyg แรงดันทางด้าน 115 เควี มีลักษณะลดต่ำลงสองเฟสและอีกหนึ่งเฟสมีค่าปกติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงในกลุ่ม Z พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน โดยต่างกันในขนาดของแรงดัน และเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรดังภาพที่ 52 แรงดันลำดับศูนย์ทางด้าน 22 เควี ไม่ปรากฏทางด้าน 115 เควี เนื่องจากวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไม่ต่อถึงกัน



ภาพที่ 52 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg

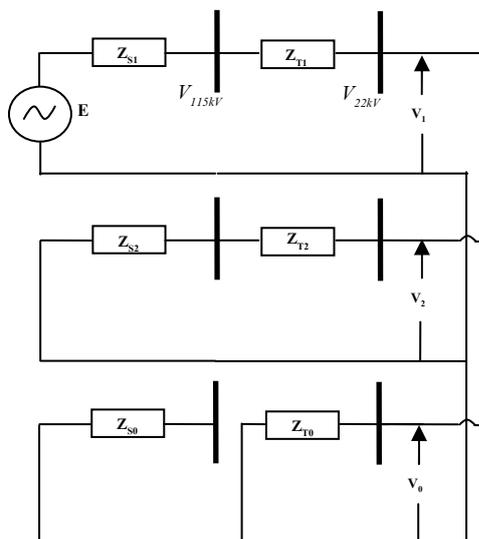
กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงแบบ Yy, YGy, Yyg และ Dd วงจรสมมูลลักษณะเหมือนกับการลัดวงจรสองเฟส เนื่องจากหม้อแปลงในกลุ่มนี้วงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิไม่ต่อถึงกันดังภาพที่ 53 โดยเกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นที่สองเฟสและอีกหนึ่งเฟสมีค่าเป็นปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี กับหม้อแปลงกลุ่ม Y พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน โดยต่างกันในขนาดของแรงดัน



ภาพที่ 53 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง  $Yy$ ,  $YGY$ ,  $Yyg$ ,  $Dd$ ,  $Dy$ ,  $YGd$  และ  $Yd$

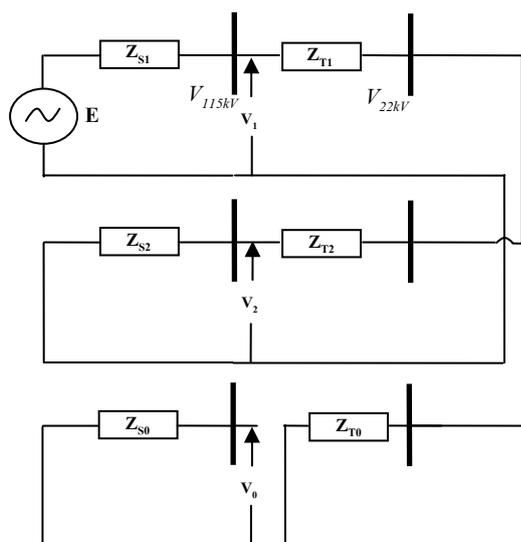
กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี กับหม้อแปลงแบบ  $Dy$ ,  $YGd$  และ  $Yd$  ลักษณะวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรมีลักษณะเหมือนกับการลัดวงจรแบบสองเฟส เนื่องจากหม้อแปลงในกลุ่มนี้วงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิไม่ต่อถึงกันดังภาพที่ 53 โดยเกิดแรงดันต่ำเกินขึ้นทั้งสามเฟส และมีหนึ่งเฟสลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรสองเฟสด้าน 115 เควี กับหม้อแปลงในกลุ่ม  $Z$  พบว่าแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกัน โดยต่างกันที่ขนาดของแรงดัน

กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี กับหม้อแปลง  $Dyg$  แรงดันทางด้าน 115 เควี ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเมื่อเกิดลัดวงจรด้าน 115 เควี กับหม้อแปลงในกลุ่ม  $Z$  พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน โดยต่างกันที่ขนาดของแรงดัน ซึ่งแรงดันในลำดับศูนย์ทางด้าน 22 เควี ไม่ปรากฏทางด้าน 115 เควี เช่นกันดังภาพที่ 54



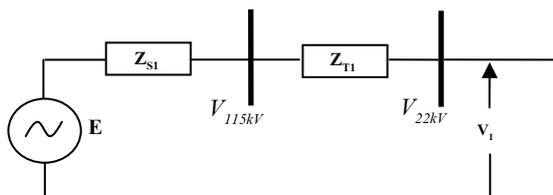
ภาพที่ 54 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg

กรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสทางด้าน 22 เควี สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 55 การลัดวงจรแบบนี้วงจรในลำดับศูนย์ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดลัดวงจร ดังนั้นแรงดันทางด้าน 115 เควี จึงประกอบด้วยแรงดันในลำดับบวกและลำดับลบเท่านั้น โดยลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น มีลักษณะคล้ายกับแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรด้าน 115 เควี โดยแตกต่างกันที่ขนาดของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น



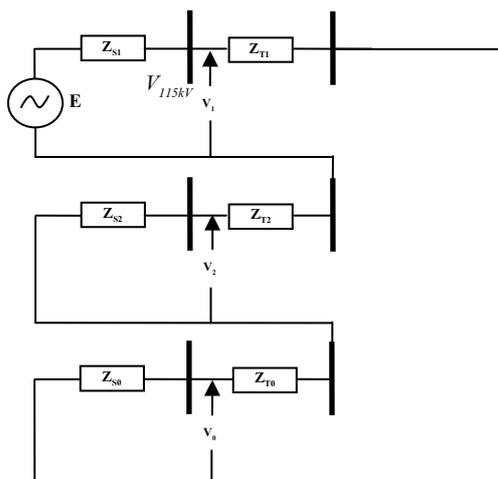
ภาพที่ 55 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ของหม้อแปลง Dyg

กรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงทุกแบบสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 56 จะเห็นว่าแรงดันทางด้าน 115 เควี ประกอบด้วยแรงดันในลำดับบวกเท่านั้น โดยลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น มีลักษณะคล้ายกับแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรด้าน 115 เควี ซึ่งมีลักษณะลดลงทั้งสามเฟส โดยแตกต่างกันที่ขนาดของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 56 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสามด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงทุกแบบ

จากการพิจารณาการเกิดแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรทางด้าน 22 เควี พบว่าในทุกกรณีนั้นขนาดแรงดันทางด้าน 115 เควี มีขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นประมาณ 0.9 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรทาง 115 เควี เปรียบเทียบกับเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน 22 เควี พบว่าเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน 22 เควี วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรมีผลของค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น กรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ทางด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงแบบ YGyg สามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรได้ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงแบบ YGyg

จากวงจรสมมูลสามารถคำนวณแรงดันด้าน 115 เควี ได้ดังนี้ (ที่มาของสมการสามารถดูได้จากภาคผนวก)

$$V_{115kV} = \frac{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}}{(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}) + (Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0})} \quad (11)$$

โดยถ้าใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สถานีโรจนะคือ  $Z_{T0}=Z_{T1}=Z_{T2}=0.3$  p.u.,  $Z_{S1}=Z_{S2}=0.039$  p.u. และ  $Z_{S0}=0.084$  p.u. โดยค่าทั้งหมดคิดที่ฐานแรงดัน 115 เควี 100 MVA สามารถคำนวณแรงดันได้ดังนี้

$$V_{115kV} = \frac{0.3 \times 3}{(0.039 + 0.039 + 0.084) + (0.3 \times 3)} = 0.8475 \text{ pu} = 84.8\% \quad (12)$$

หรือในกรณีที่เกิดลัดวงจรแบบสามเฟสสามารถคำนวณค่าแรงดันด้าน 115 เควีได้ดังนี้

$$V_{115kV} = \frac{Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{T1}} \quad (13)$$

$$V_{115kV} = \frac{0.3}{0.039 + 0.3} = 0.885 \text{ pu} = 88.5\% \quad (14)$$

จากผลการคำนวณจะเห็นว่าเมื่อเกิดลัดวงจรทางด้าน 22 เควี แรงดันทางด้าน 115 เควี ได้รับผลกระทบน้อยมากทั้งนี้เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ( $Z_T$ ) มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ( $Z_S$ ) ซึ่งในกรณีที่สถานีโรจนะนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่าเป็น 7.69 เท่าของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยเมื่อพิจารณาที่สมการแรงดันด้าน 115 เควี ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมากๆ ซึ่งสามารถไม่คำนึงถึงผลของค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะได้ว่า

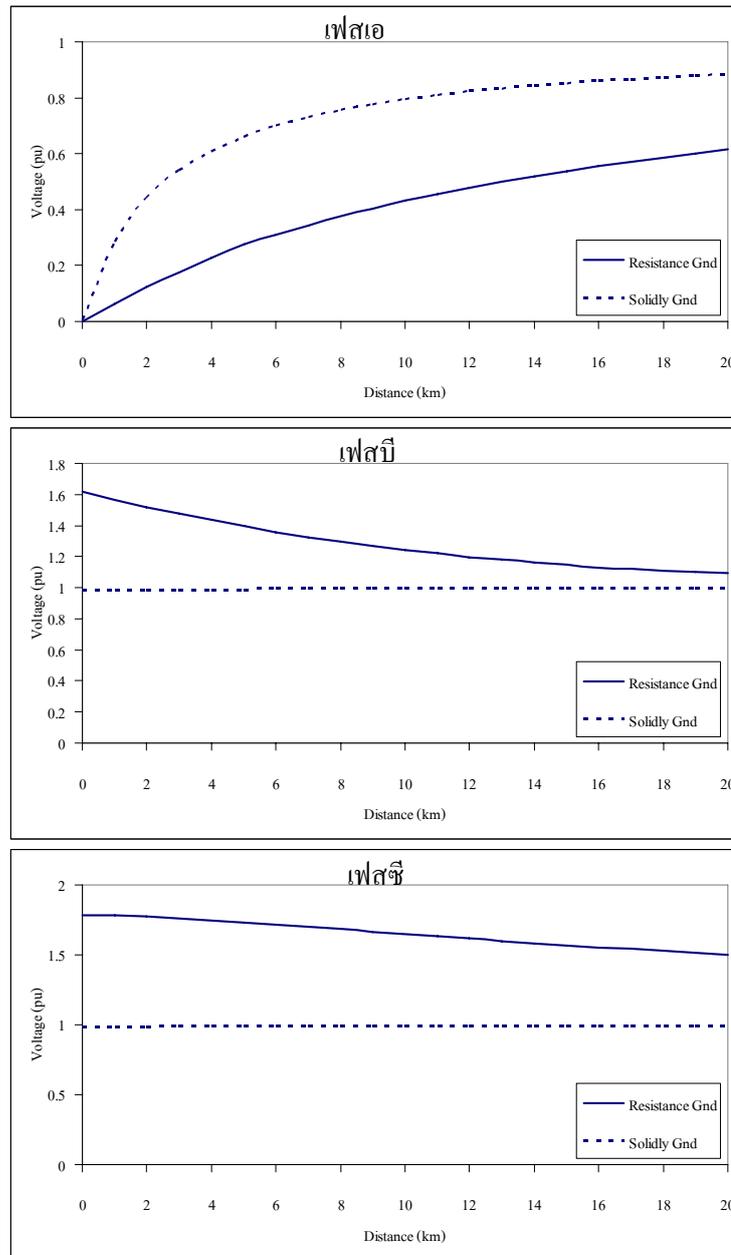
$$V_{115kV} = \frac{Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{T1}} \approx \frac{Z_{T1}}{Z_{T1}} \approx 1 \text{ pu} \quad (15)$$

ซึ่งค่าแรงดันทางด้าน 115 เควี มีค่าประมาณ 1 เปรอ์ยูนิต หรือใกล้เคียงกับค่าแรงดันปกติ

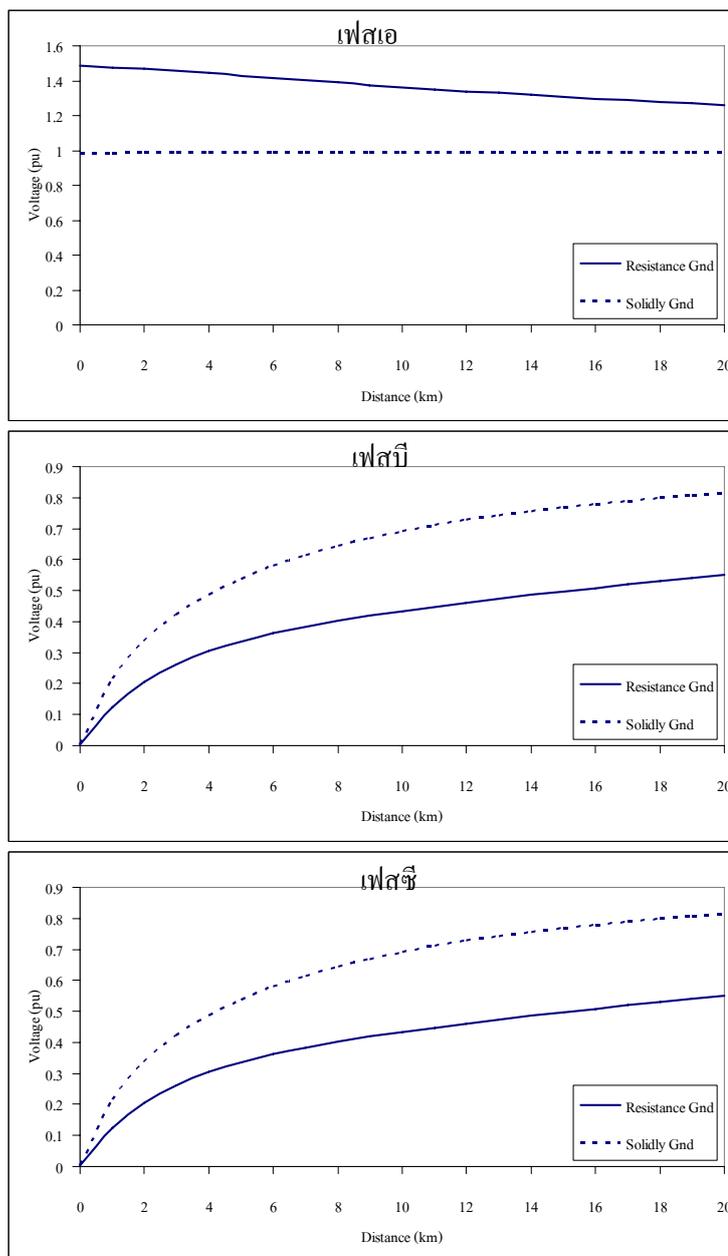
## 2. ผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่อแรงดันต่ำเกิน

ในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีการต่อลงดินที่จุดกลางของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิโดยต่อลงดินผ่านค่าความต้านทาน (Neutral Ground Resistance, NGR) ขนาด 12.7 โอห์ม โดยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของความต้านทานต่อลงดินทางด้าน 22 เควี ต่อแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกับผลของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินโดยตรงและระบบต่อลงดินผ่านตัวต้านทาน รวมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้โดยใช้ทฤษฎีและสมการร่วมด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่อแรงดันต่ำเกินเมื่อวัดค่าแรงดันเฟสและผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่อแรงดันต่ำเกินเมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างเฟส โดยในส่วนของที่มาของสมการที่ใช้ในการอธิบายสามารถดูได้จากภาคผนวก โดยผลการศึกษาแสดงดังนี้

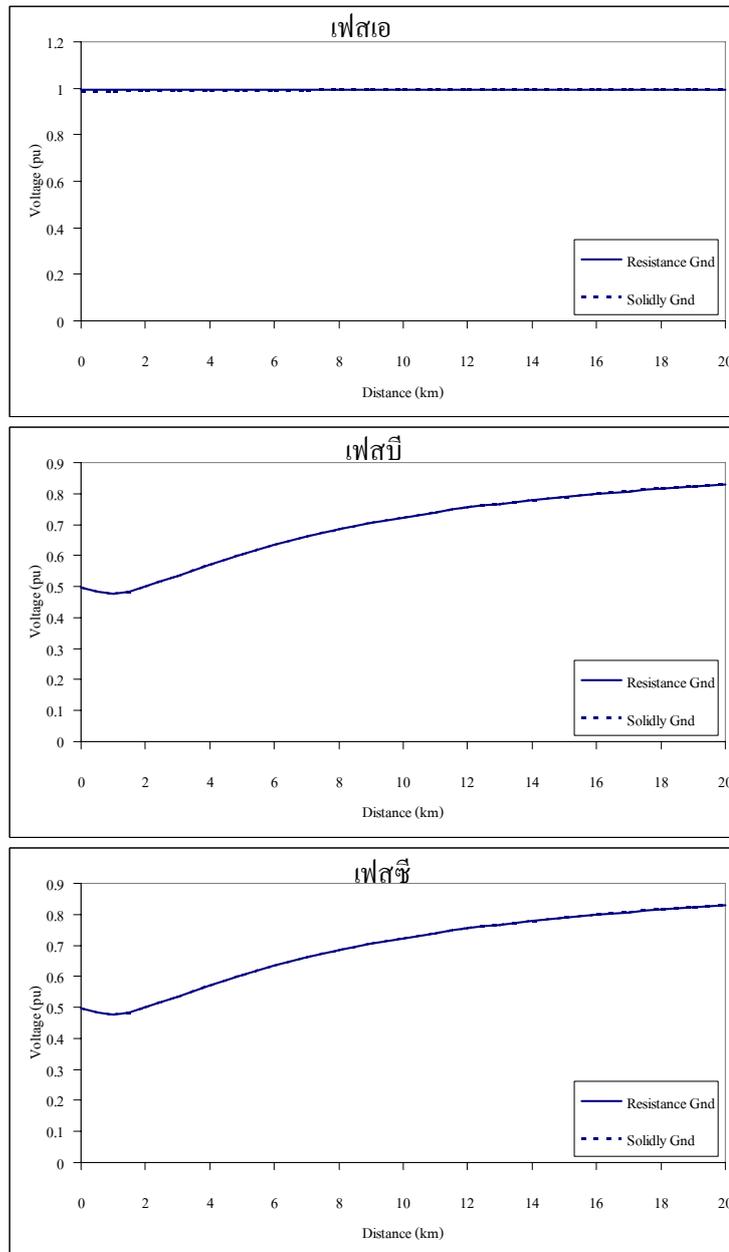
### 2.1 ผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่ำเกินเมื่อวัดค่าแรงดันเฟส



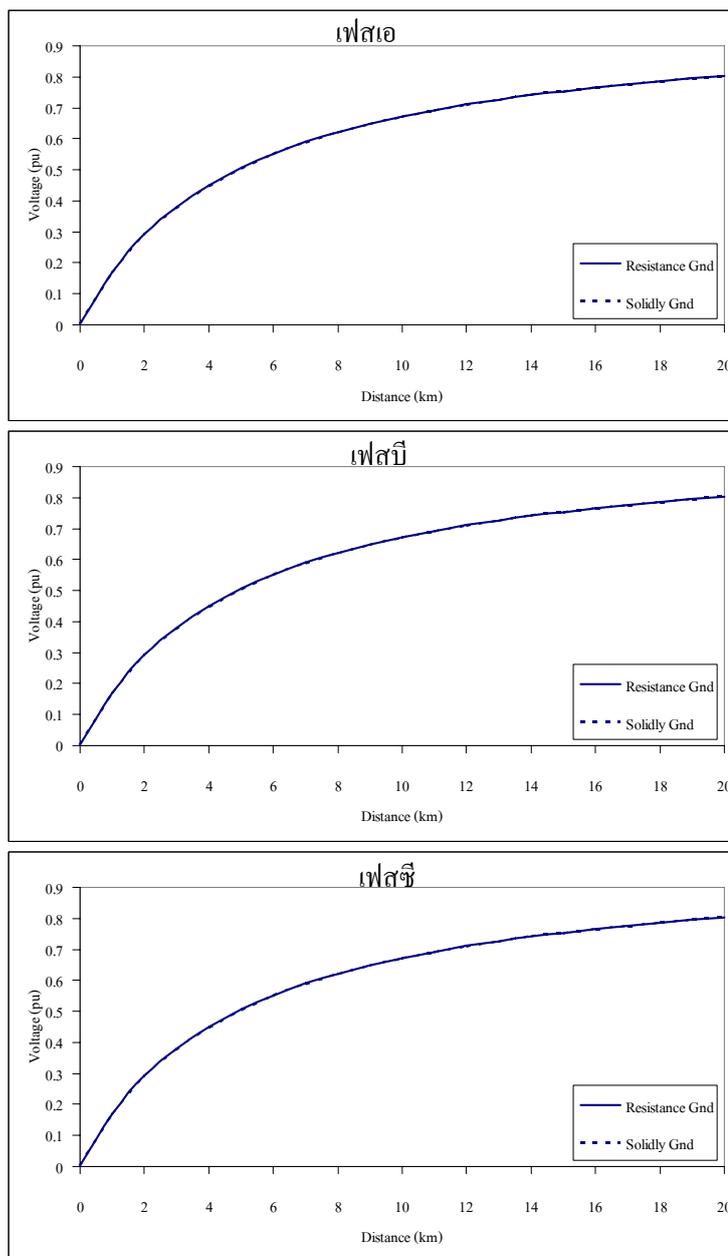
ภาพที่ 58 แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



ภาพที่ 59 แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



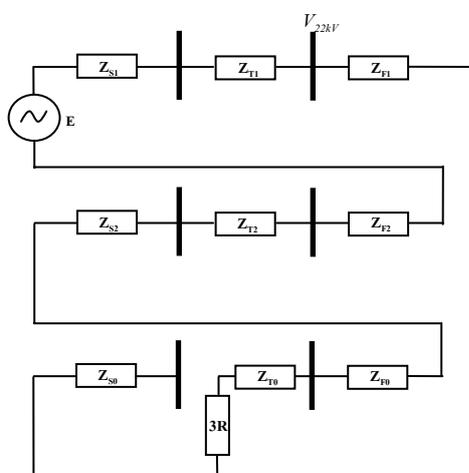
ภาพที่ 60 แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



ภาพที่ 61 แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซี เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบที่ต่อลงดินโดยตรงและต่อลงดินผ่านค่าความต้านทาน แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันในกรณีที่เกิดลัดวงจรลงดิน คือ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และการลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน จากภาพที่ 58 เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่เฟสเอ จะเห็นว่าเกิดแรงดันต่ำเกินที่เฟสเอ โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงดันเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบต่อลงดินโดยตรงและระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน พบว่าระบบที่ต่อลงดินผ่านความต้านทานมีขนาดแรงดันในเฟสที่เกิดลัดวงจร(เฟสเอ) ต่ำกว่าในระบบต่อลงดินโดยตรง ส่วนในเฟสบีและเฟสซีเกิดแรงดันเกินขึ้น ในกรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินที่เฟสบีและซี ดังภาพที่ 59 แรงดันในเฟสบีและซีมีค่าลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงดันทั้งสองระบบพบว่าแรงดันเฟสบีและซีในระบบต่อลงดินโดยตรงมีค่าสูงกว่า และในเฟสเอเกิดแรงดันเกินขึ้น

เมื่อพิจารณาโดยใช้ทฤษฎี จากวงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ในระบบต่อลงดินผ่านค่าความต้านทานดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

สามารถคำนวณแรงดันเฟสเอ ด้าน 22 เควี เมื่อเกิดลัดวงจรได้ดังนี้

$$V_a = \frac{Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2} + 3R} \quad (16)$$

เมื่อ  $Z_F = Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}$  และ  $Z_{ST} = Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}$  ค้างนั้น

$$V_a = \frac{Z_F}{Z_{ST} + Z_F + 3R} \quad (17)$$

ซึ่งจะเห็นว่าสมการขนาดของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีค่าความต้านทานที่ต่อลงดินเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ต่อลงดินโดยตรง ( $R=0$ ) จะพบว่าแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบที่ต่อลงดินผ่านตัวต้านทานมีความรุนแรงมากกว่า นอกจากนี้ในระบบที่ต่อลงดินผ่านตัวต้านทานยังส่งผลเกิดแรงดันเกินขึ้นในเฟสที่ไม่เกิดลัดวงจรคือ เฟสบีและเฟสซีดังภาพที่ 58 โดยแรงดันเกินที่เกิดขึ้นนั้นมีค่ามากที่สุดเมื่อเกิดลัดวงจรที่บริเวณสถานีไฟฟ้า โดยมีขนาดสูงสุด 1.7 เปรอ์ยูนิต โดยสามารถแสดงสมการในเฟสบีและซีเมื่อเกิดแรงดันเกินในกรณีลัดวงจรที่สถานี ( $Z_F=0$ ) ได้ดังนี้

$$V_b = a^2 - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \quad (18)$$

$$V_c = a - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \quad (19)$$

คำนวณ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สถานีโรจนะคือ  $Z_{S1} + Z_{T1} = Z_{S2} + Z_{T2} = 0.01276 + 0.3601j$  p.u. และ  $Z_{T0} + 3R = 7.88016 + 0.318788j$  p.u. โดยค่าทั้งหมดคิดที่ฐานแรงดัน 22 เควี 100 MVA จะได้

$$V_b = a^2 - \frac{(7.88016 + 0.318788j) - (0.01276 + 0.3601j)}{(7.88016 + 0.318788j) + 2(0.01276 + 0.3601j)} = -1.48 - 0.73j = 1.65 pu \quad (20)$$

$$V_c = a - \frac{(7.88016 + 0.318788j) - (0.01276 + 0.3601j)}{(7.88016 + 0.318788j) + 2(0.01276 + 0.3601j)} = -1.48 + 0.99j = 1.78 pu \quad (21)$$

หรือกรณีถ้าพิจารณาให้ค่าความต้านทานลงดินมีค่าสูงมากจะได้ว่า

$$V_b = a^2 - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \approx a^2 - 1 \approx -\frac{3}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \approx \sqrt{3} pu \quad (22)$$

$$V_c = a - \frac{Z_{S0} + Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \approx a - 1 \approx -\frac{3}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \approx \sqrt{3} pu \quad (23)$$

ในกรณีที่เกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน แรงดันเฟสบีและเฟสซีมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยแรงดันเฟสเอเกิดแรงดันเกินขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาแรงดันในเฟสเอ ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดแรงดันเกินได้ดังนี้

$$V_a = 1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{T0} + 3R) + (Z_{T0} + 3R - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0} + 3R)(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}} \quad (24)$$

ถ้า  $Z_{S1} = Z_{S2}$  และค่าความต้านทานมีค่าสูงมากจะได้ว่า

$$V_a = 1 + \frac{((Z_{T0} + 3R)Z_{S2} - Z_{S1}^2)}{2(Z_{T0} + 3R)Z_{S1} + Z_{S1}^2} \approx 1 + 0.5 = 1.5 pu \quad (25)$$

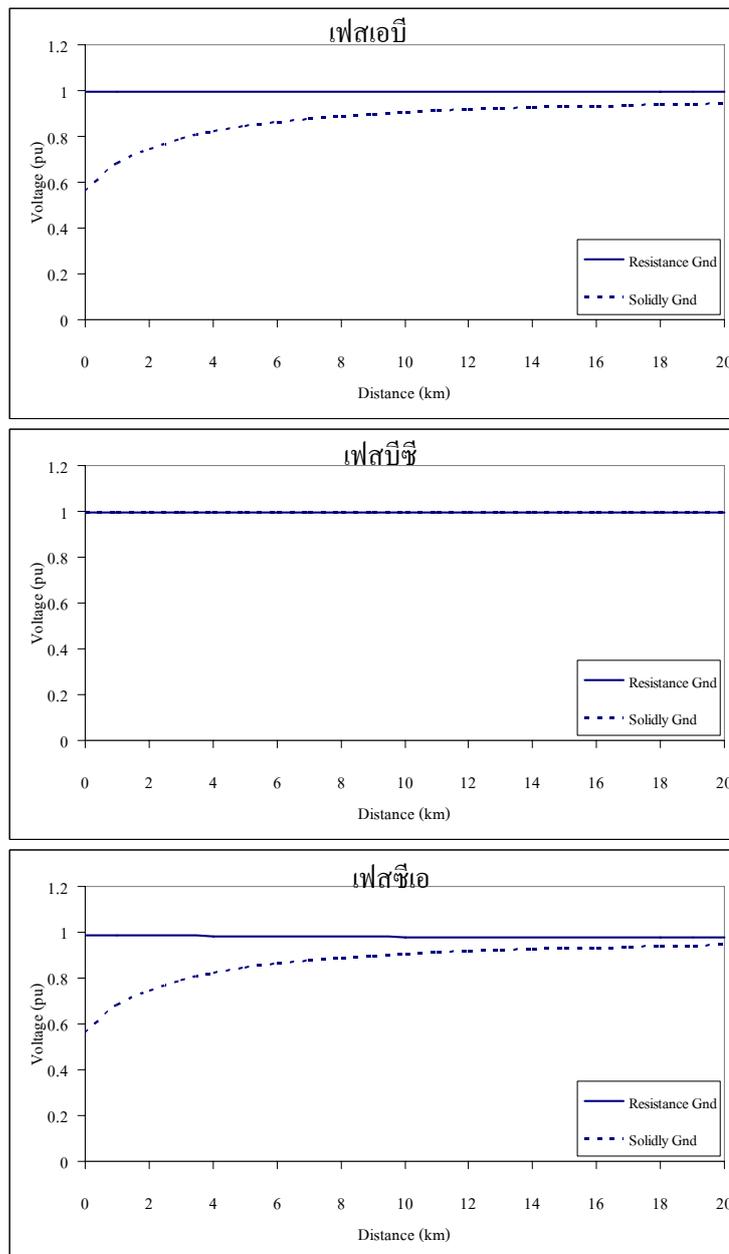
หรือใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สถานีโรงนะจะได้ว่า

$$V_a = 1 + \frac{((7.88016 + 0.318788j)(0.01276 + 0.3601j) - (0.01276 + 0.3601j)^2)}{2(7.88016 + 0.318788j)(0.01276 + 0.3601j) + (0.01276 + 0.3601j)^2} \quad (26)$$

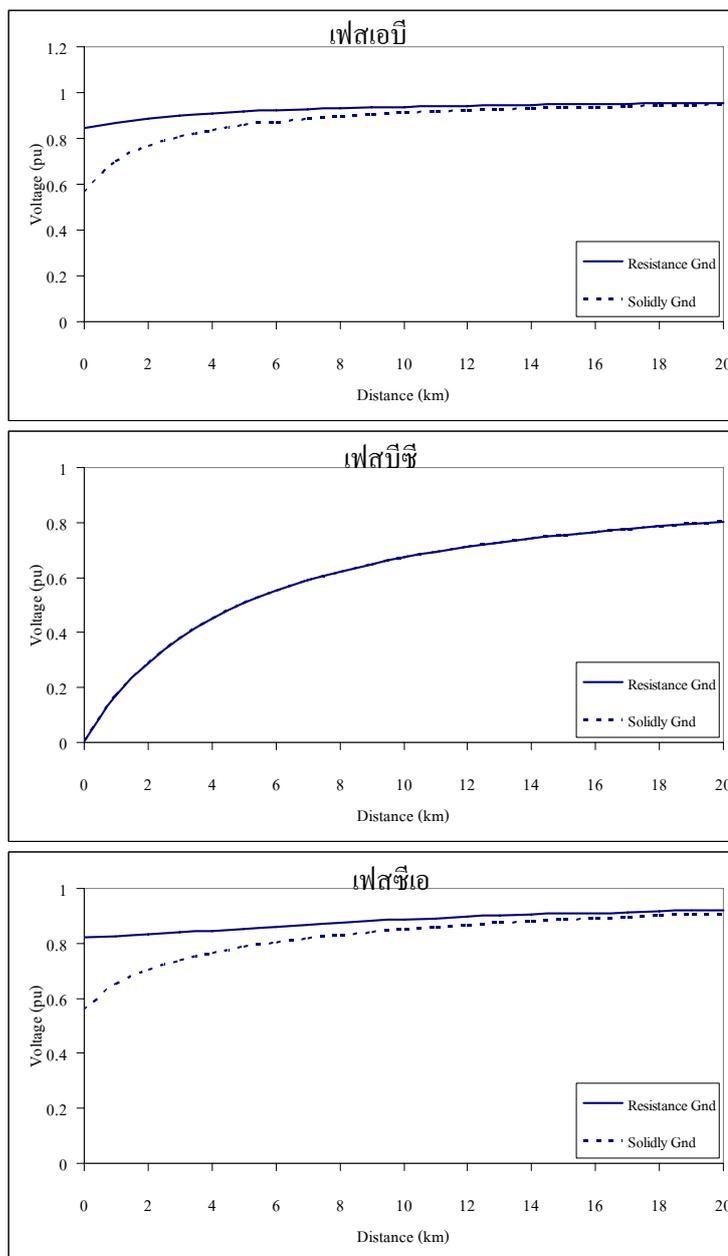
$$V_a = 1.4966 - 0.034j = 1.497 pu \quad (27)$$

## 2.2 ผลของตัวต้านทานต่อแรงดันต่ำเกินเมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างเฟส

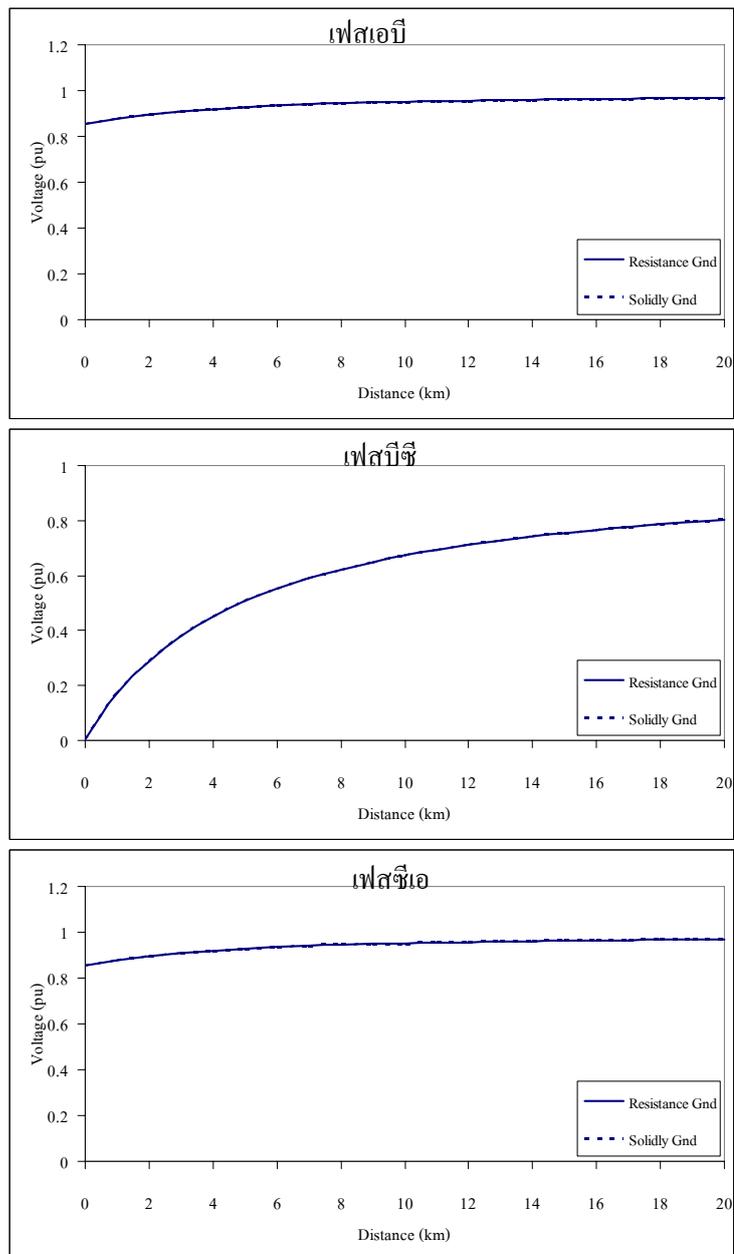
จากการทดลองวัดค่าแรงดันต่ำเกินโดยวัดแรงดันระหว่างเฟส (Phase to Phase Voltage) เมื่อเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับระหว่างระบบที่ต่อลงดินโดยตรงและระบบที่ต่อลงดินผ่านตัวต้านทาน ผลที่ได้แสดงดังนี้



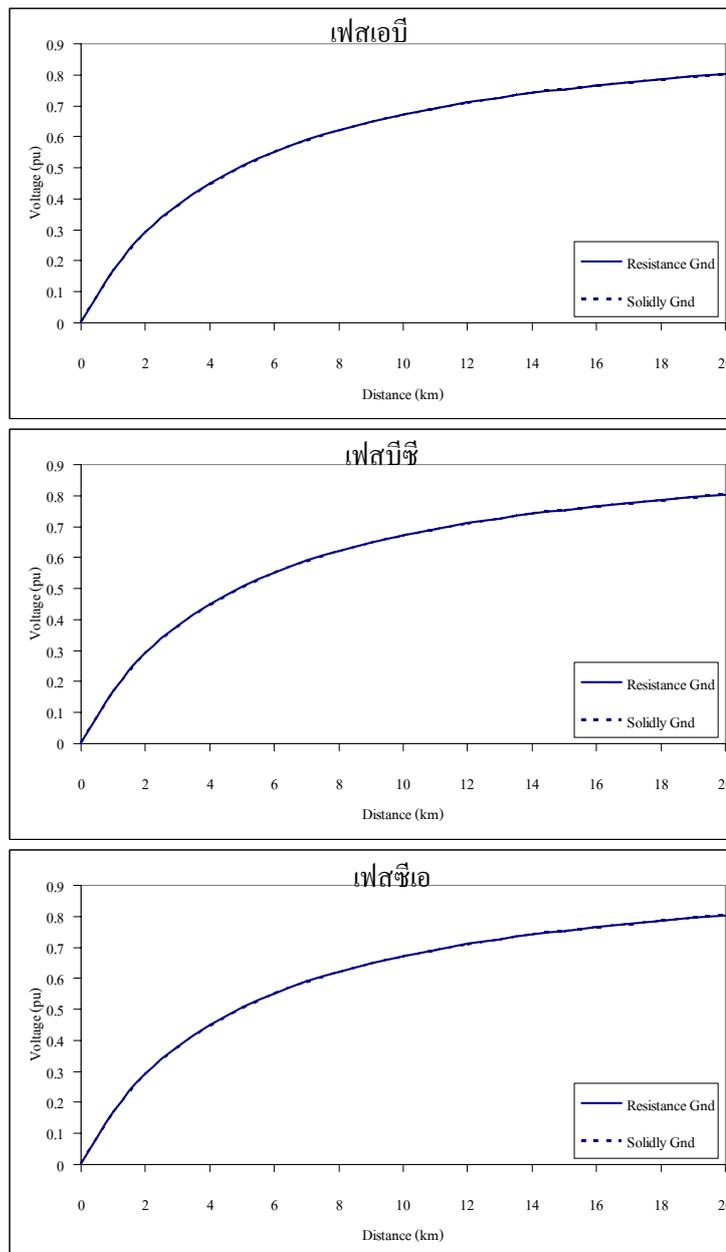
ภาพที่ 63 แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินด้าน 22 เควี  
ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



ภาพที่ 64 แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินด้าน 22 เควี  
ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



ภาพที่ 65 แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง



ภาพที่ 66 แรงดันระหว่างเฟสเอบี เฟสบีซี และเฟสซีเอ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสด้าน 22 เควี ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานและในระบบต่อลงดินโดยตรง

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน แรงดันระหว่างเฟสในระบบที่ต่อลงดินโดยตรงมีค่าลดลงมากกว่าค่าแรงดันในระบบที่ต่อลงดินผ่านค่าความต้านทาน ส่วนในกรณีลัดวงจรแบบสองเฟส สองเฟสลงดิน และสามเฟส ค่าแรงดันต่ำเกินของทั้งสองระบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

กำหนดให้เกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ที่บัสด้าน 22 เควี ( $Z_{F0} = Z_{F1} = Z_{F2} = 0$ ) ดังภาพที่ 62 สามารถคำนวณหาแรงดันในแต่ละเฟสได้ดังนี้

$$V_a = \frac{Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2} + 3R} = 0 pu \quad (28)$$

$$V_b = a^2 - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \quad (29)$$

$$V_c = a - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \quad (30)$$

จากสมการแรงดันเฟสสามารถคำนวณหาแรงดันระหว่างเฟสกรณีที่มีความต้านทานมีค่ามากได้ดังนี้

$$V_{ab} = \frac{\left( -a^2 + \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j + 1 \right)}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} pu \quad (31)$$

$$V_{bc} = \frac{(a^2 - a) \left( 1 - \frac{(Z_{S1} + Z_{T1}) - (Z_{S2} + Z_{T2})}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right)}{\sqrt{3}} \approx -j \approx 1 pu \quad (32)$$

$$V_{ca} = \frac{\left( a - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right) \left( -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j - 1 \right)}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} pu \quad (33)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ต่อลงดิน โดยตรง ( $R=0$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ab} = \frac{\left( -a^2 + \frac{Z_{T0} - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}} \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j \right)}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} pu \quad (34)$$

$$V_{bc} = \frac{(a^2 - a) \left( 1 - \frac{(Z_{S1} + Z_{T1}) - (Z_{S2} + Z_{T2})}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}} \right)}{\sqrt{3}} \approx -j \approx 1 pu \quad (35)$$

$$V_{ca} = \frac{\left( a - \frac{Z_{T0} - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}} \right)}{\sqrt{3}} \approx \frac{\left( -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right)}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} pu \quad (36)$$

ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ต่อลงดินโดยตรงแรงดันระหว่างเฟสเอบีและเฟสซีเอมีค่าลดลงเป็น 0.58 เปรอ์ยูนิต และแรงดันระหว่างเฟสบีซีมีค่าปกติ โดยขนาดแรงดันมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่มีการต่อลงดินผ่านตัวต้านทานซึ่งแรงดันทั้งสามเฟสมีค่าใกล้เคียง 1 เปรอ์ยูนิต และกรณีลัดวงจรสองเฟสลงดิน สามารถเขียนสมการหาแรงดันเฟสได้ดังนี้

$$V_a = 1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{T0} + 3R) + (Z_{T0} + 3R - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0} + 3R)(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}} \quad (37)$$

$$V_b = V_c = 0 pu \quad (38)$$

จากสมการแรงดันเฟสสามารถคำนวณแรงดันระหว่างเฟสได้ดังนี้

$$V_{ab} = \frac{1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{T0} + 3R) + (Z_{T0} + 3R - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0} + 3R)(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} \quad (39)$$

$$V_{bc} = 0 \quad (40)$$

$$V_{ca} = \frac{-1 - \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{T0} + 3R) + (Z_{T0} + 3R - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0} + 3R)(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} \quad (41)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าความต้านทานมีค่าสูงมากจะสามารถหาขนาดแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นได้

$$V_{ab} = \frac{1 + 0.5}{\sqrt{3}} = 0.866 pu \quad (42)$$

$$V_{bc} = 0 \quad (43)$$

$$V_{ca} = \frac{-1-0.5}{\sqrt{3}} = 0.866 pu \quad (44)$$

จะเห็นว่าเกิดแรงดันต่ำเกินทั้งสามเฟส โดยขนาดแรงดันระหว่างเฟสบีซีเป็นศูนย์ และแรงดันระหว่างเฟสเอบีและเฟสซีเอมีขนาด 0.866 เปรอร์ยูนิต เมื่อเปรียบเทียบกับในระบบที่ต่อลงดิน โดยตรงค่าแรงดันระหว่างเฟสสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ab} = \frac{1 + \frac{(Z_{T0} - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0})(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 pu \quad (45)$$

$$V_{bc} = 0 \quad (46)$$

$$V_{ca} = \frac{-1 - \frac{(Z_{T0} - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{T0})(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 pu \quad (47)$$

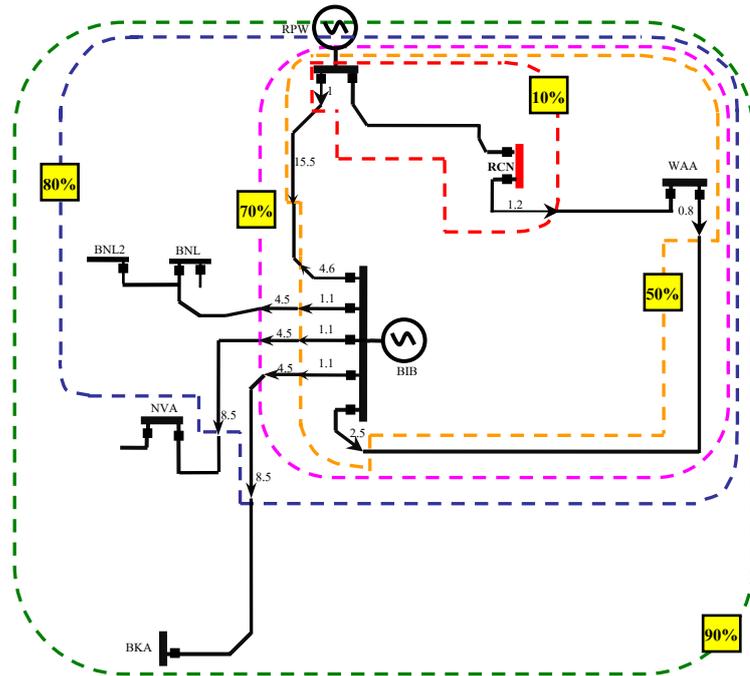
จะพบแรงดันระหว่างเฟสเอบีและเฟสซีเอมีขนาด 0.58 เปรอร์ยูนิต และแรงดันระหว่างเฟสบีซีเป็นศูนย์ โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดแรงดันทั้งสองระบบ แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน โดยตรงมีความรุนแรงกว่าในระบบที่ต่อลงดินผ่านค่าความต้านทาน

จากผลการวัดค่าแรงดันที่เกิดจากการลัดวงจรชนิดในระบบต่อลงดินโดยตรงและระบบต่อลงดินผ่านค่าความต้านทาน ผลที่ได้แสดงว่าตัวต้านทานต่อลงดินมีผลกับการลัดวงจรลงดินคือ ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และลัดวงจรสองเฟสลงดิน โดยในระบบที่ต่อลงดินผ่านตัวต้านทานในกรณีแรงดันเฟส เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดิน แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นรุนแรงกว่าในระบบต่อลงดินโดยตรง และค่าความต้านทานต่อลงดินนั้นยังทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นในเฟสที่ไม่เกิดลัดวงจรด้วย แต่ในกรณีแรงดันระหว่างเฟส ระบบที่ต่อลงดินผ่านค่าความต้านทานสามารถช่วยให้แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และสองเฟสลงดิน มีความรุนแรงน้อยลงได้ และไม่เกิดแรงดันเกินขึ้น

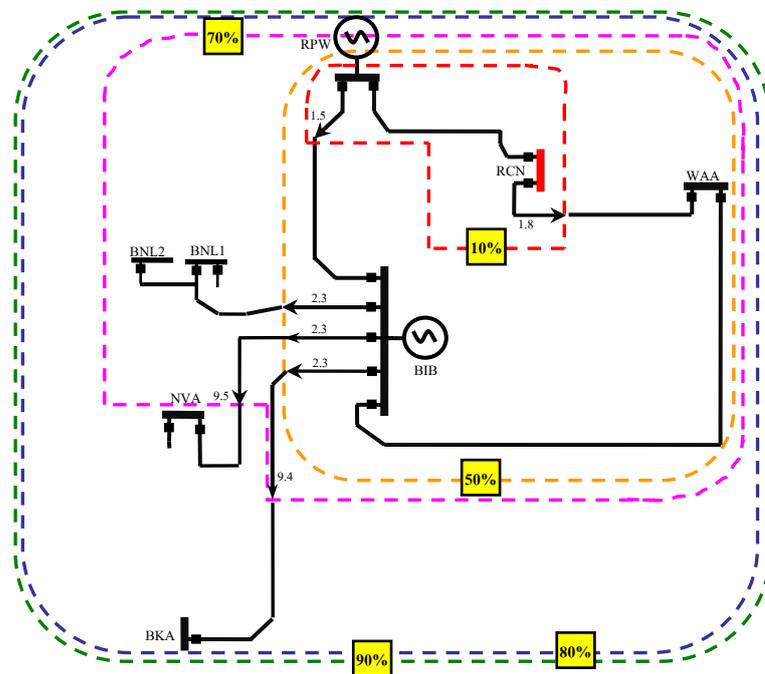
### 3. คอนทัวร์แรงดัน

การสร้างคอนทัวร์แรงดัน(Area of Vulnerability) โดยกำหนดให้เกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน สองเฟสลงดิน สามเฟส และสองเฟส ขึ้นในระดับแรงดัน 115 เควี โดยให้เกิดลัดวงจรทุกๆ 1 กิโลเมตร จากสถานีโรจนะ แล้วบันทึกขนาดแรงดันที่สถานีโรจนะ สถานีวังน้อย และสถานีบ้านเลน ที่บัส 22 เควีและ 115 เควี หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาวาดคอนทัวร์แรงดัน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างคอนทัวร์แรงดันที่ตำแหน่งบัส 115 เควี และคอนทัวร์แรงดันที่ตำแหน่งบัส 22 เควี ที่สถานีโรจนะ สถานีวังน้อย และสถานีบ้านเลน โดยคอนทัวร์แรงดันที่ตำแหน่งบัส 22 เควี จะมีการเปลี่ยนกลุ่มของหม้อแปลงคือ กลุ่ม X กลุ่ม Y และกลุ่ม Z เพื่อศึกษาผลของหม้อแปลงที่มีต่อลักษณะของคอนทัวร์แรงดัน

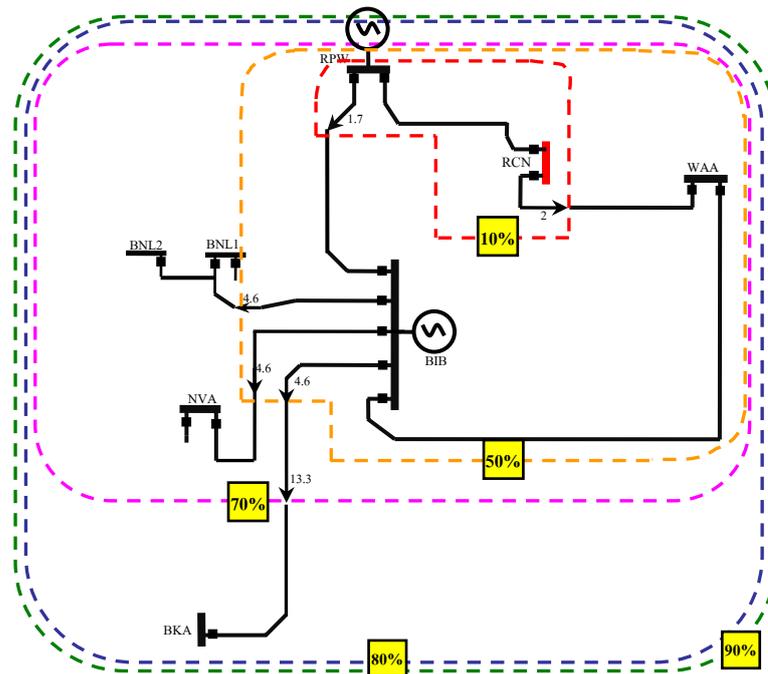
โดยคอนทัวร์แรงดันนี้จะบอกถึงค่าแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นที่บัส ของสถานีไฟฟ้าที่สนใจ เช่น คอนทัวร์แรงดัน 70 % ด้านบัส 115 เควี เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส ที่สถานีโรจนะ หมายถึง เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสภายในบริเวณคอนทัวร์แรงดันดังกล่าวจะทำให้แรงดันที่บัส 115 เควี ที่สถานีโรจนะมีค่าน้อยกว่า 70 % ของแรงดันปกติ หรือกรณีคอนทัวร์แรงดัน 70 % ด้านบัส 22 เควี ที่สถานีโรจนะ หมายถึง เมื่อเกิดลัดวงจรภายในบริเวณคอนทัวร์แรงดันดังกล่าวนี้จะส่งผลให้แรงดันที่บัส 22 เควี ที่สถานีโรจนะมีค่าน้อยกว่า 70 % ของแรงดันปกติ เป็นต้น ซึ่งภายในคอนทัวร์ที่สร้างขึ้นได้ใช้สัญลักษณ์ลูกศรแสดงระยะทางของสายส่งในหน่วยเป็นกิโลเมตร ที่ห่างจากสถานีไฟฟ้าโดยผลที่ได้แสดงดังนี้



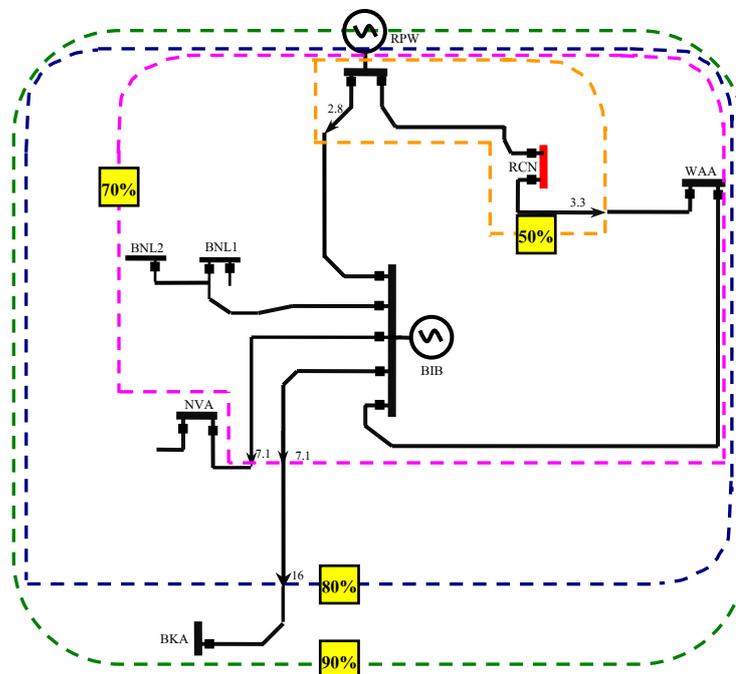
ภาพที่ 67 คอนทอร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



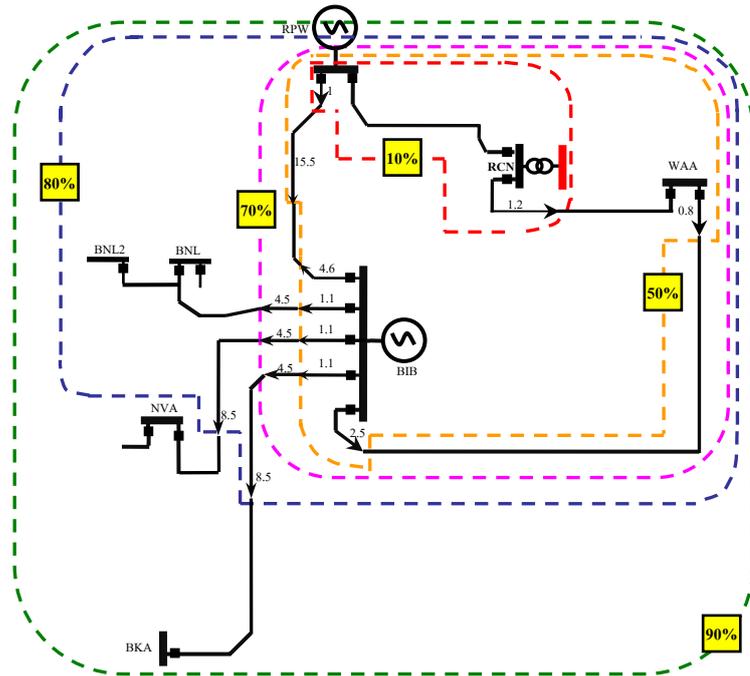
ภาพที่ 68 คอนทอร์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



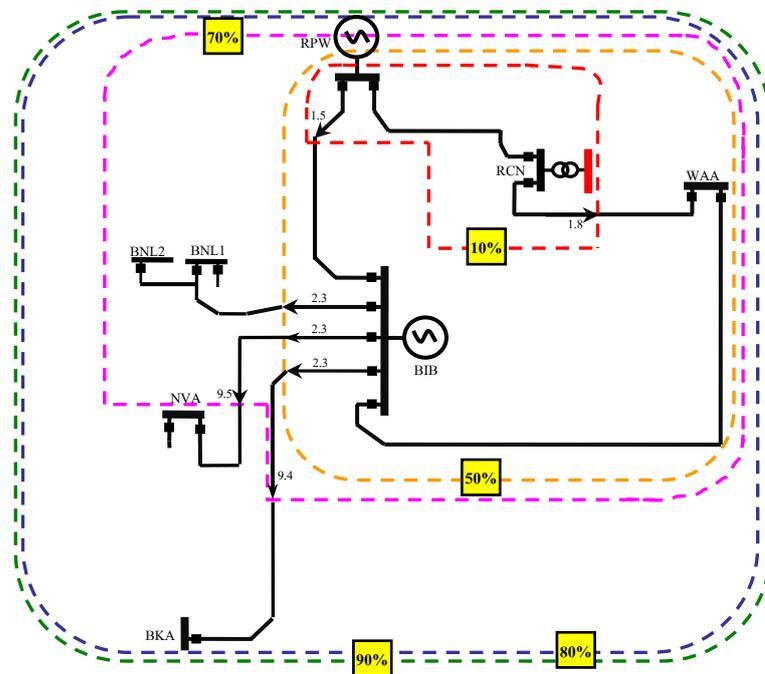
ภาพที่ 69 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



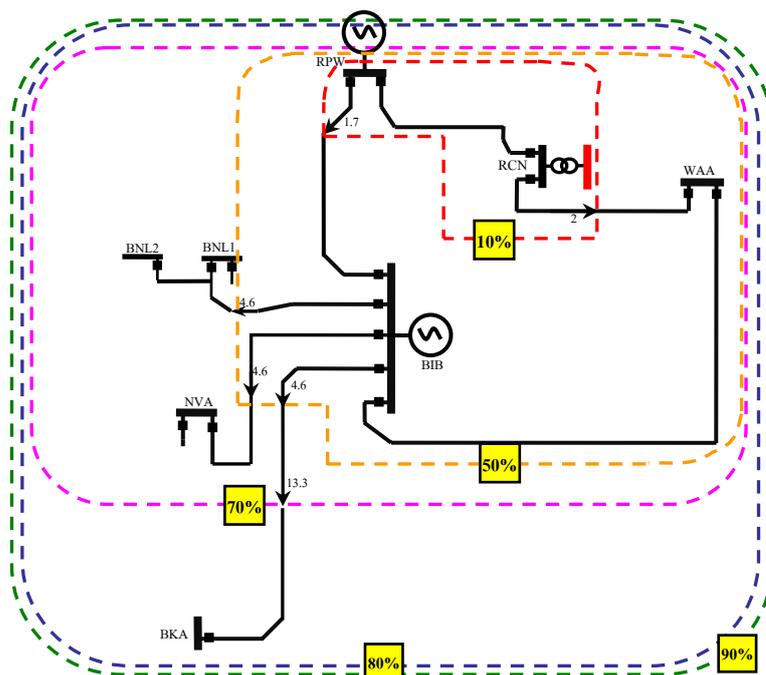
ภาพที่ 70 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



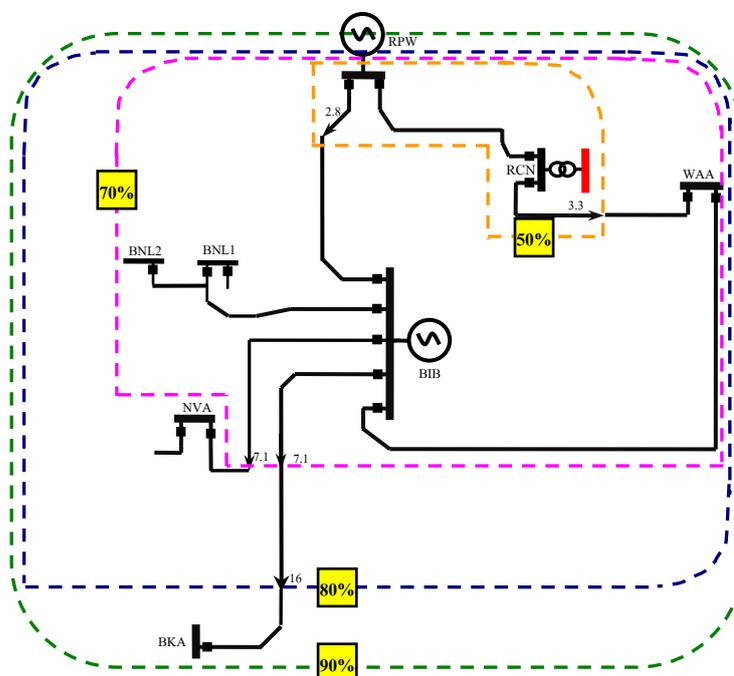
ภาพที่ 71 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน



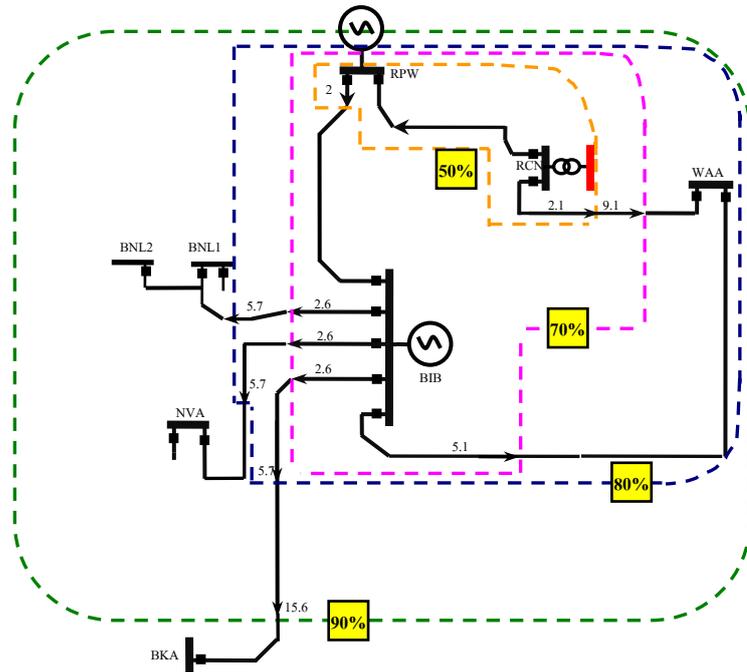
ภาพที่ 72 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน



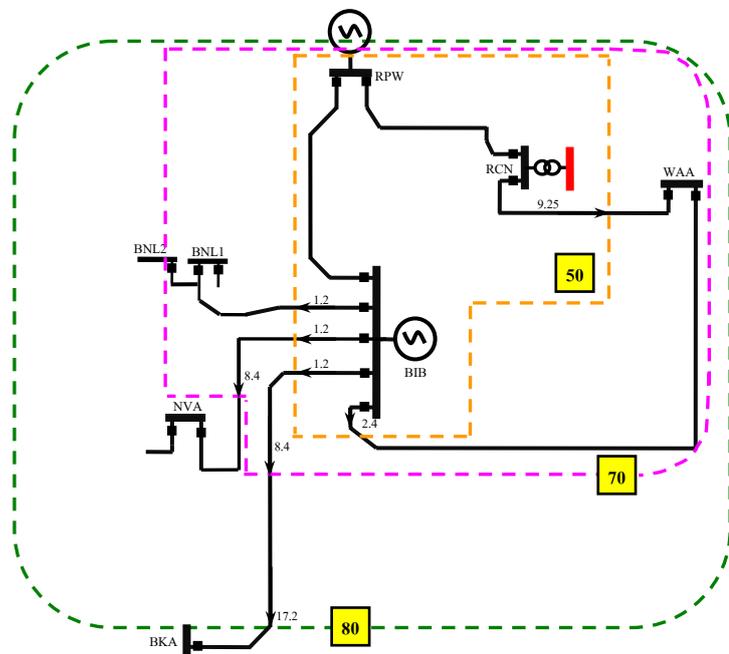
ภาพที่ 73 คอนแทอร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



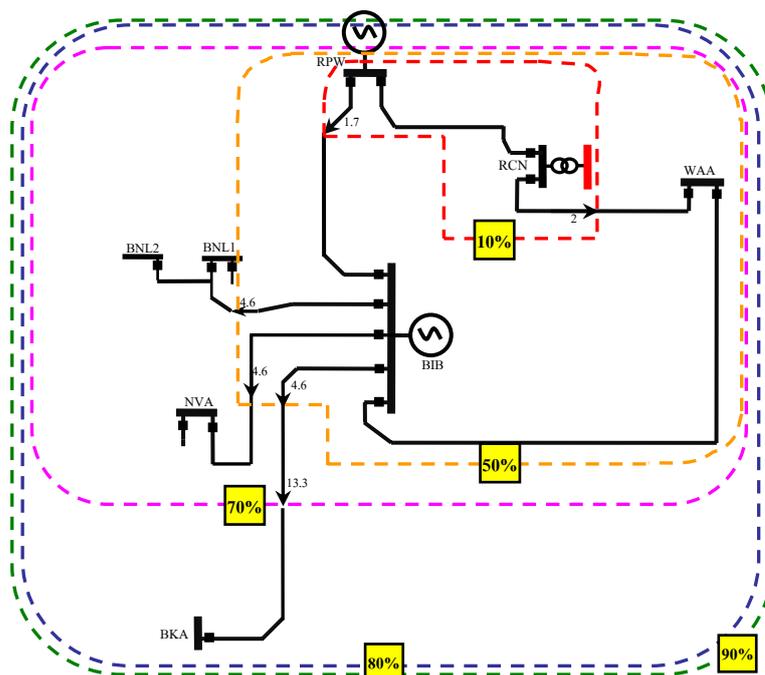
ภาพที่ 74 คอนแทอร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



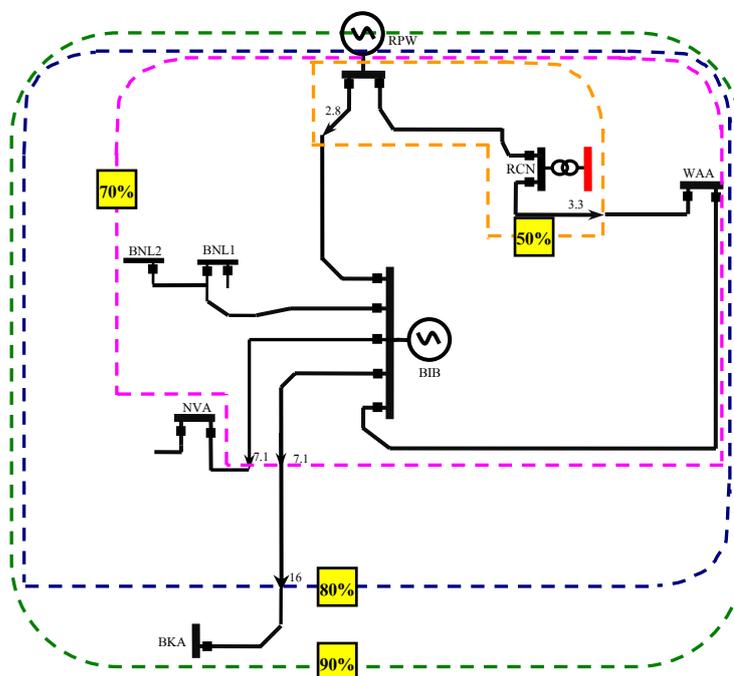
ภาพที่ 75 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



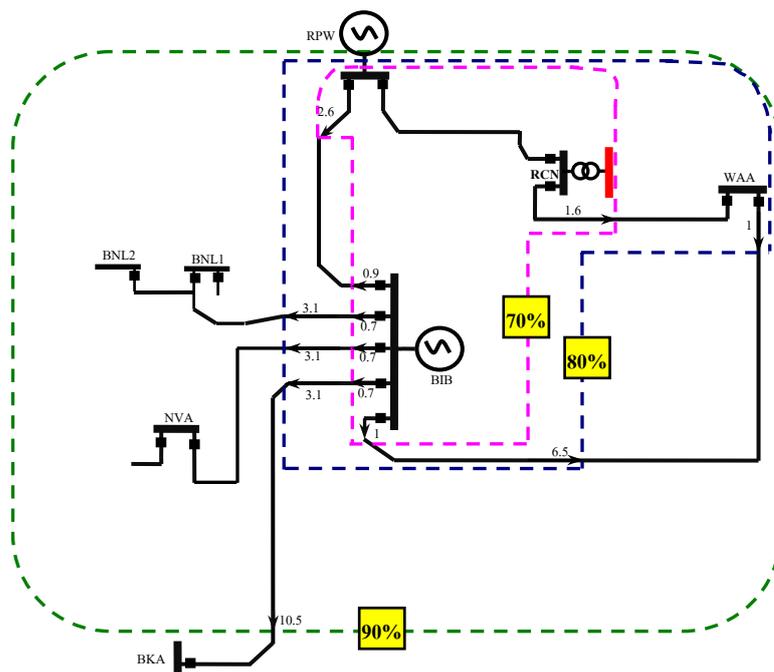
ภาพที่ 76 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



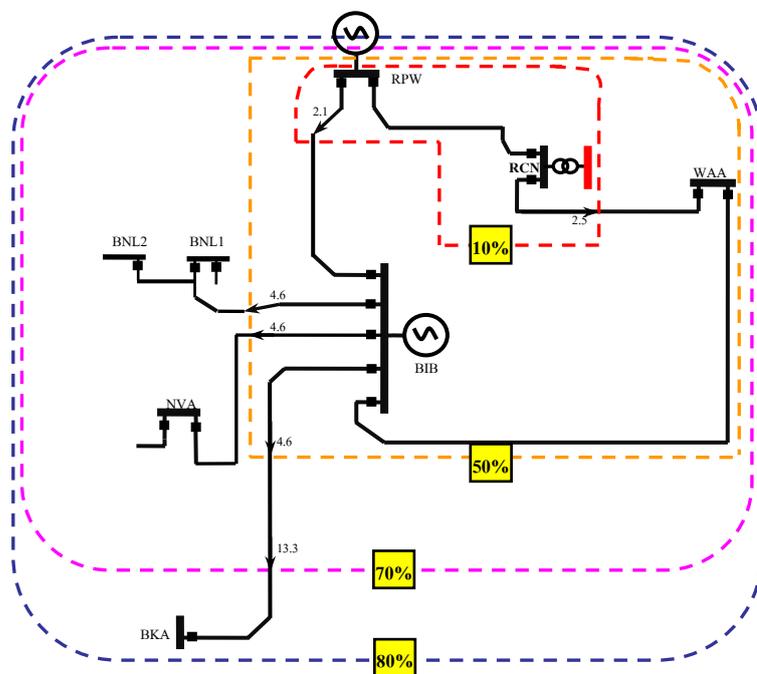
ภาพที่ 77 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



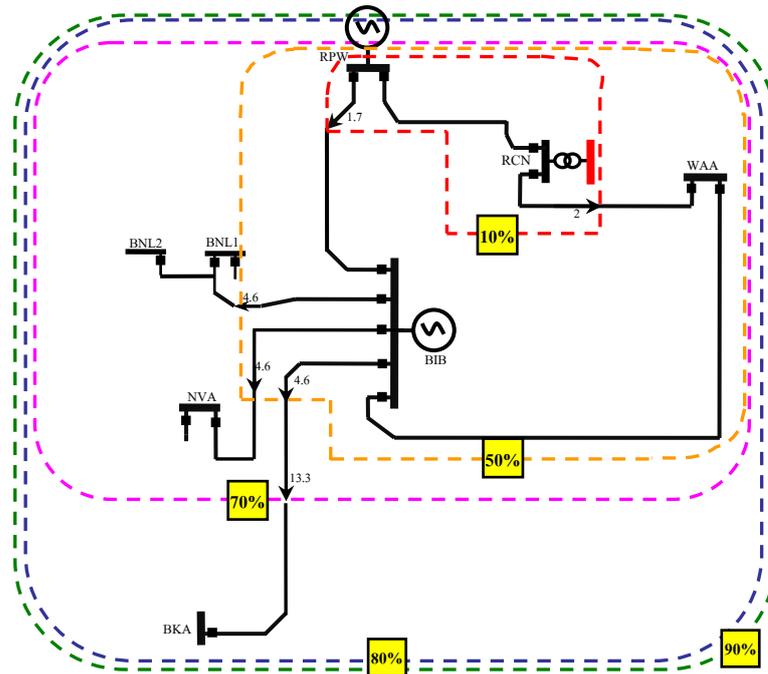
ภาพที่ 78 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



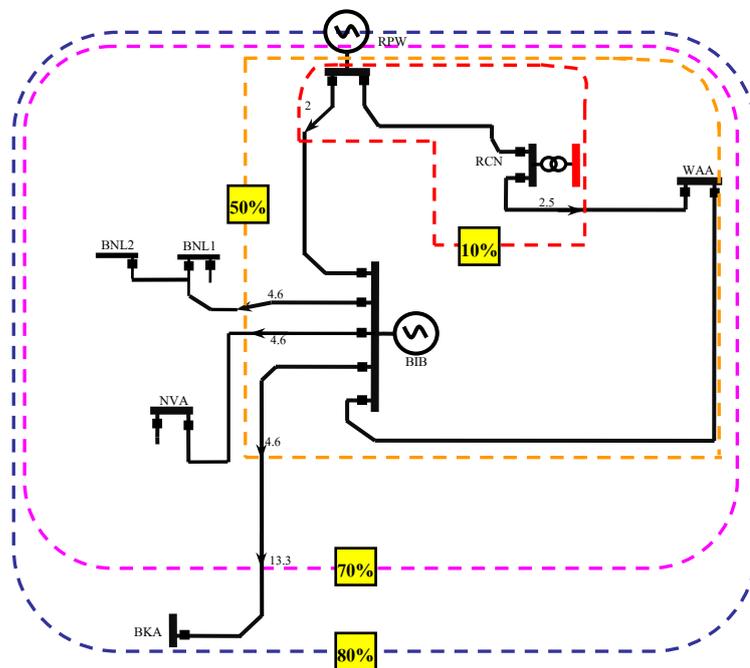
ภาพที่ 79 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน



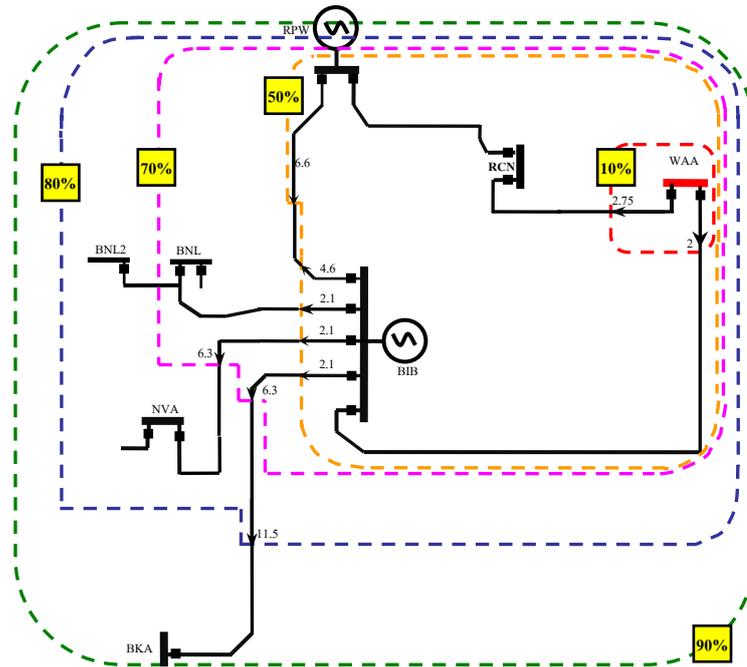
ภาพที่ 80 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน



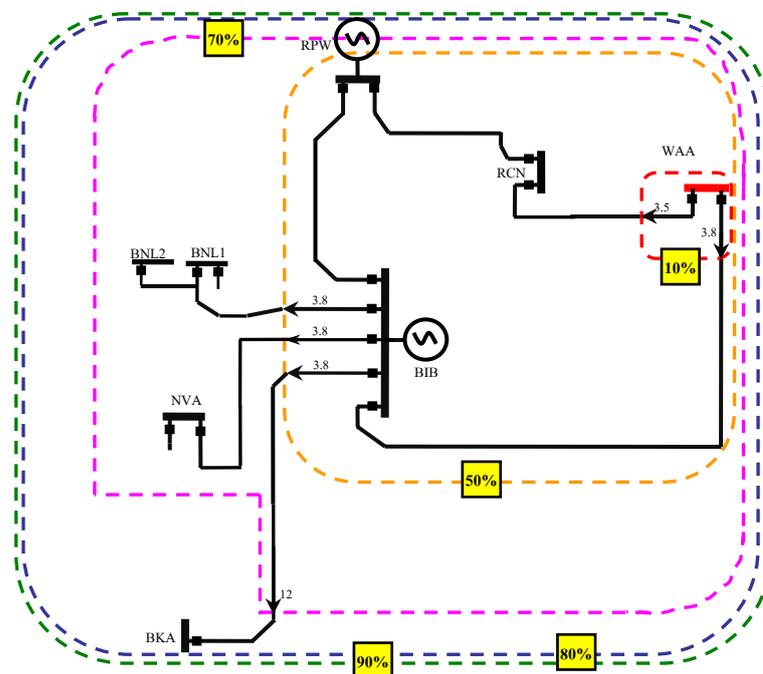
ภาพที่ 81 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



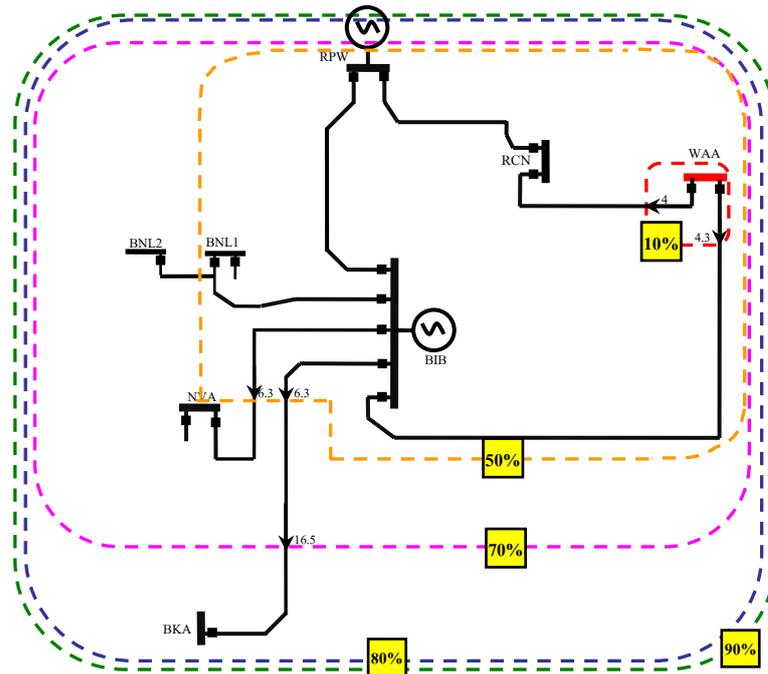
ภาพที่ 82 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโลโวลต์ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีโรจนะ เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



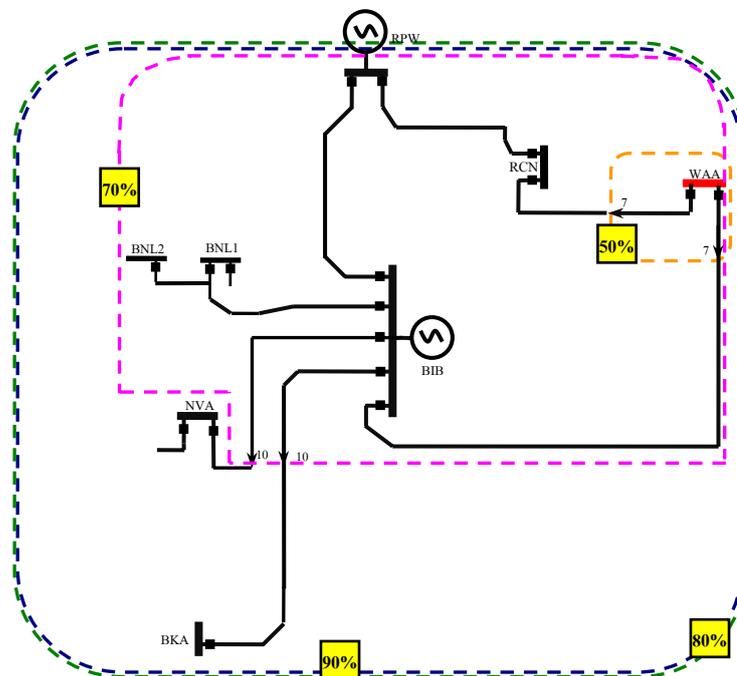
ภาพที่ 83 คอนแทอร์แรงดันด้าน 115 กิโลโวลต์ ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



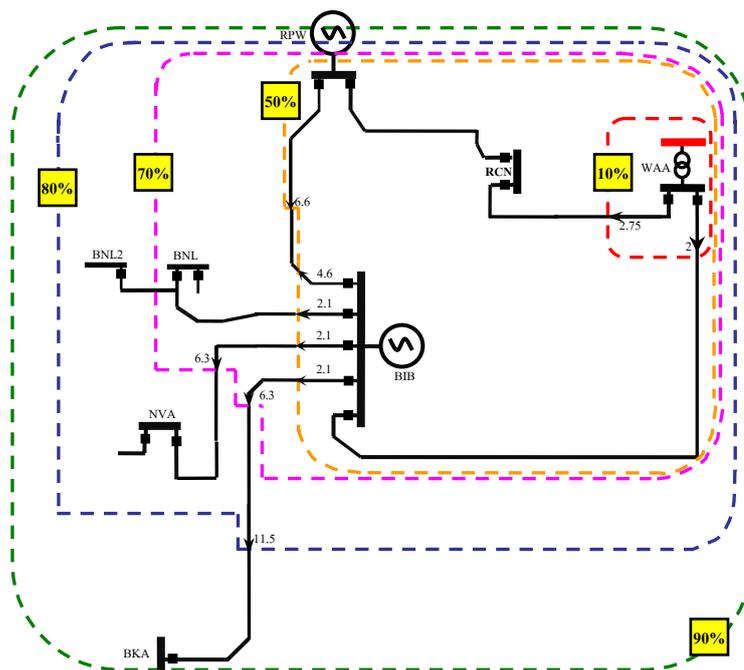
ภาพที่ 84 คอนแทอร์แรงดันด้าน 115 กิโลโวลต์ ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



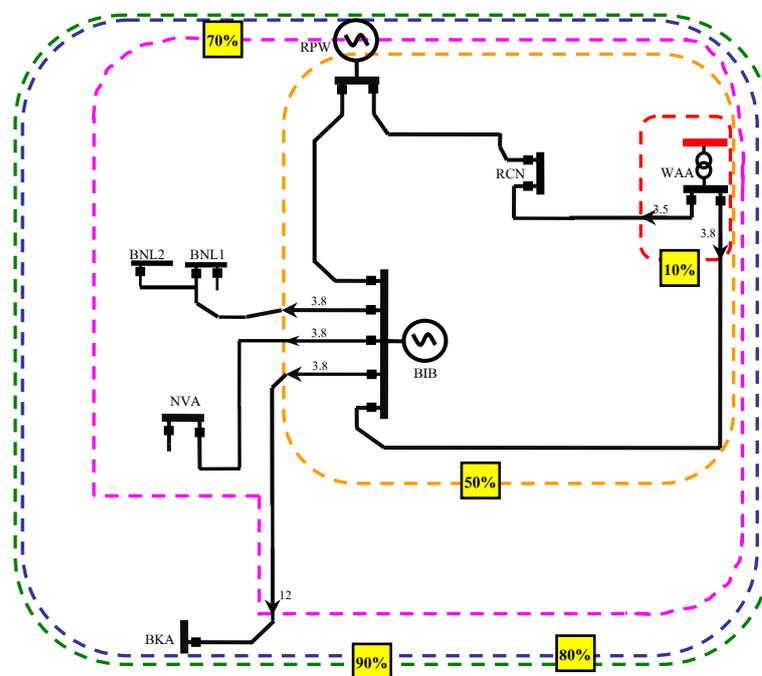
ภาพที่ 85 คอนทอร์แรงดันด้าน 115 เคว ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



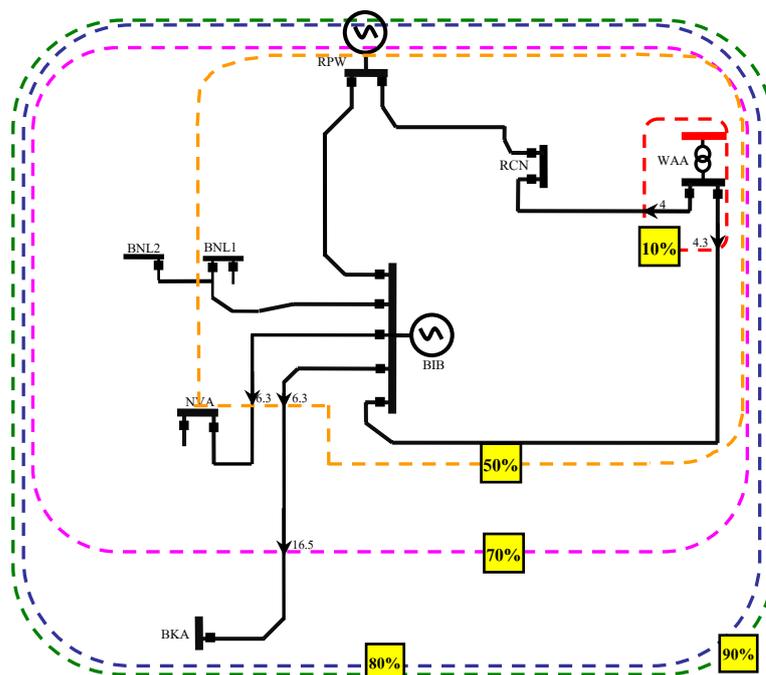
ภาพที่ 86 คอนทอร์แรงดันด้าน 115 เคว ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



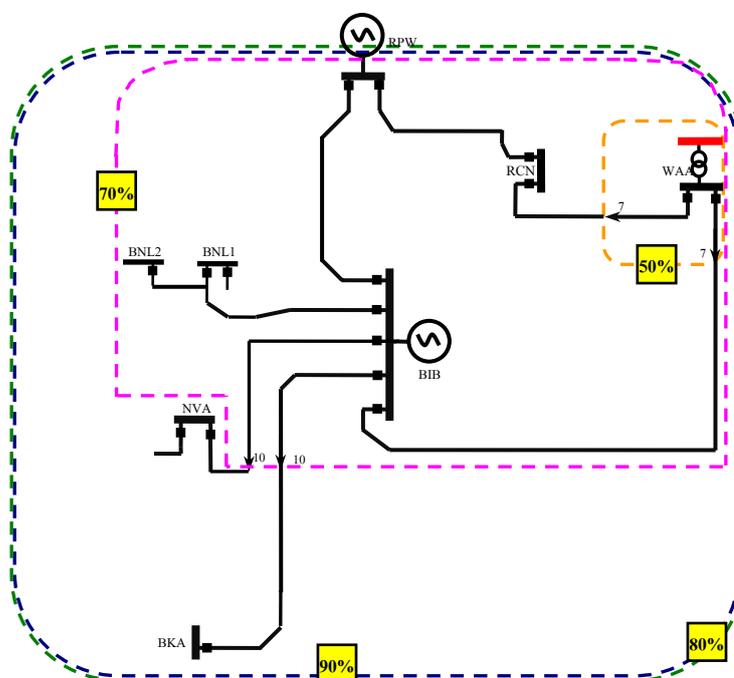
ภาพที่ 87 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน



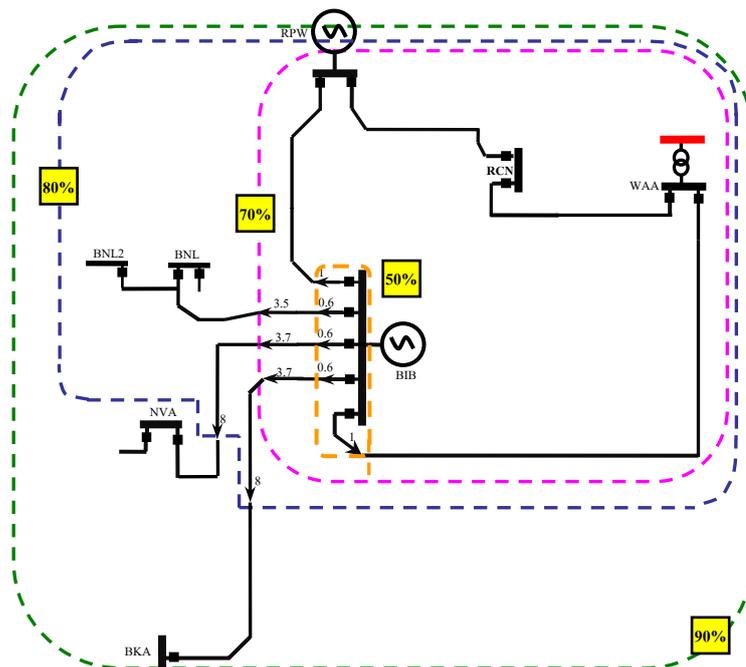
ภาพที่ 88 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน



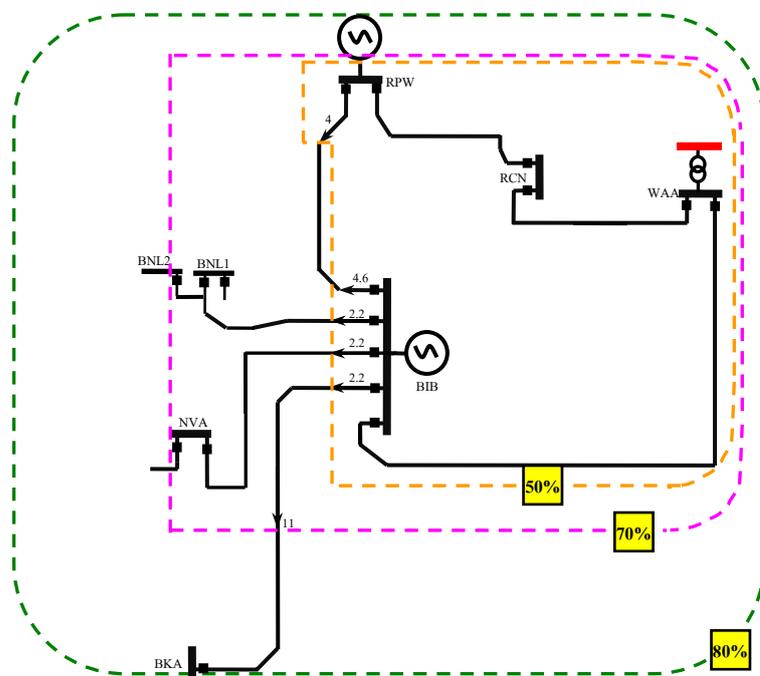
ภาพที่ 89 คอนแทกต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรแบบสามเฟส



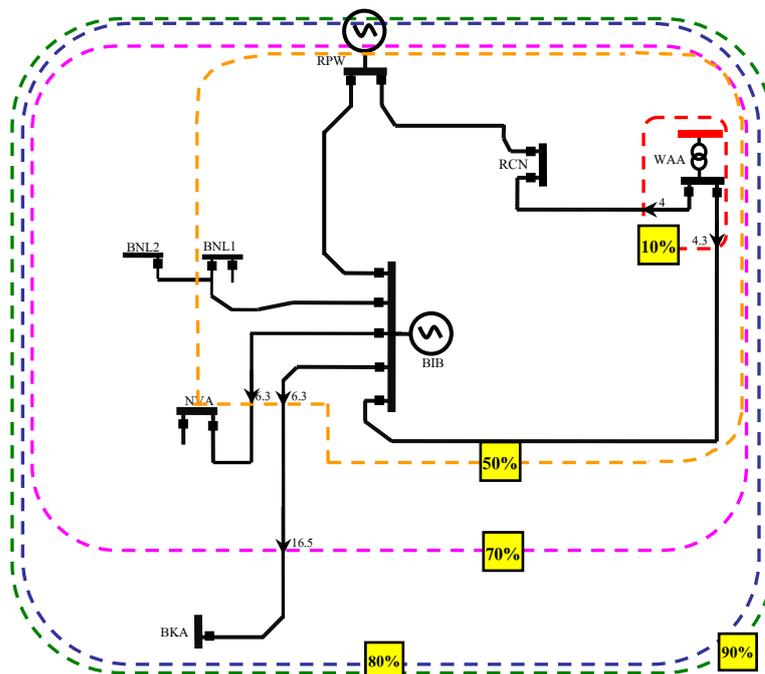
ภาพที่ 90 คอนแทกต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม X ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



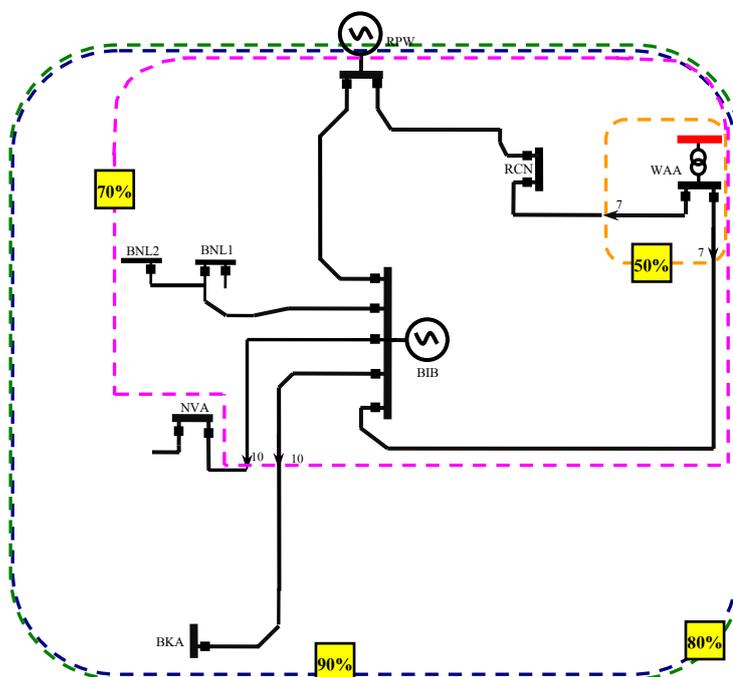
ภาพที่ 91 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน



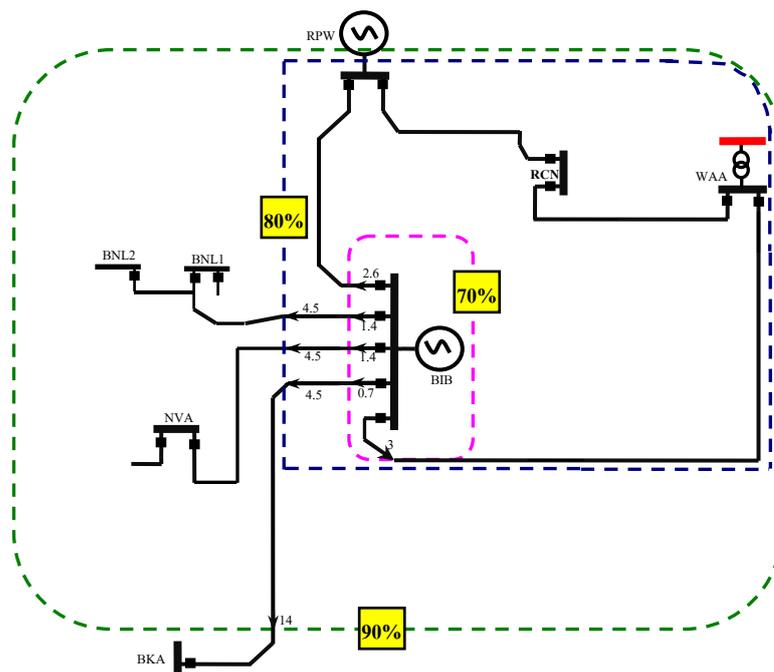
ภาพที่ 92 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน



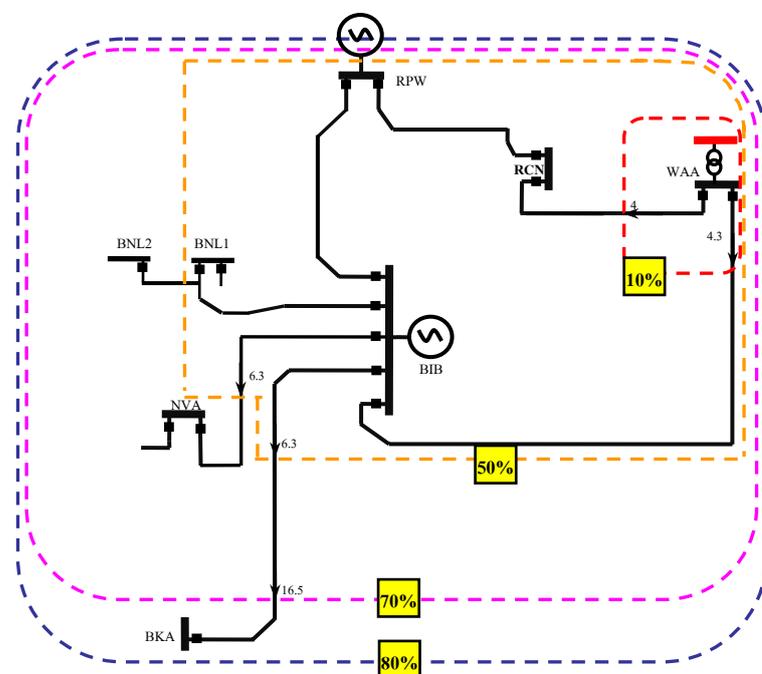
ภาพที่ 93 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



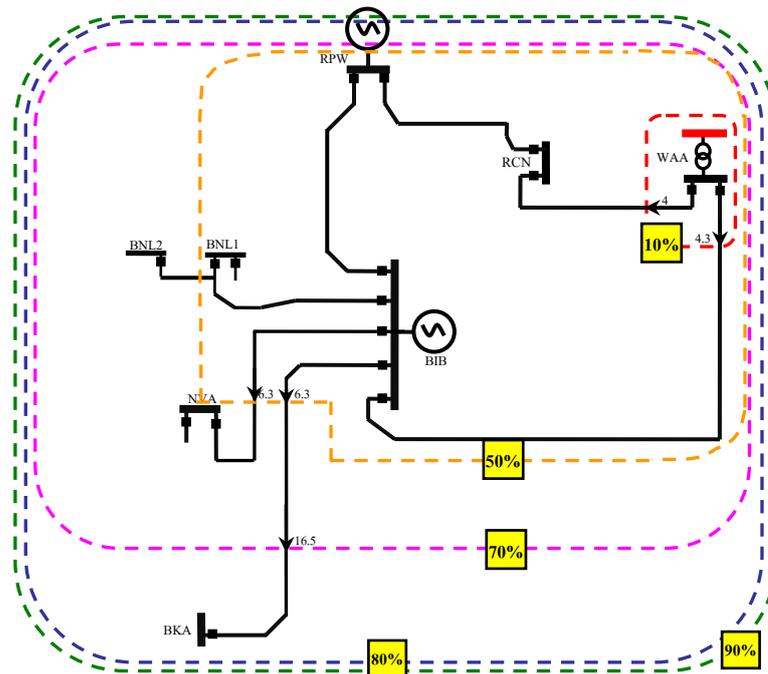
ภาพที่ 94 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



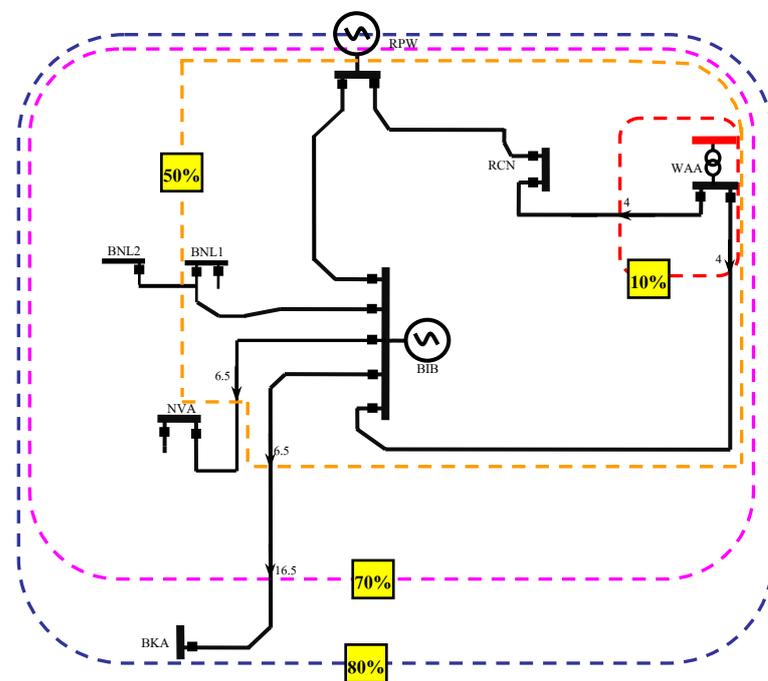
ภาพที่ 95 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



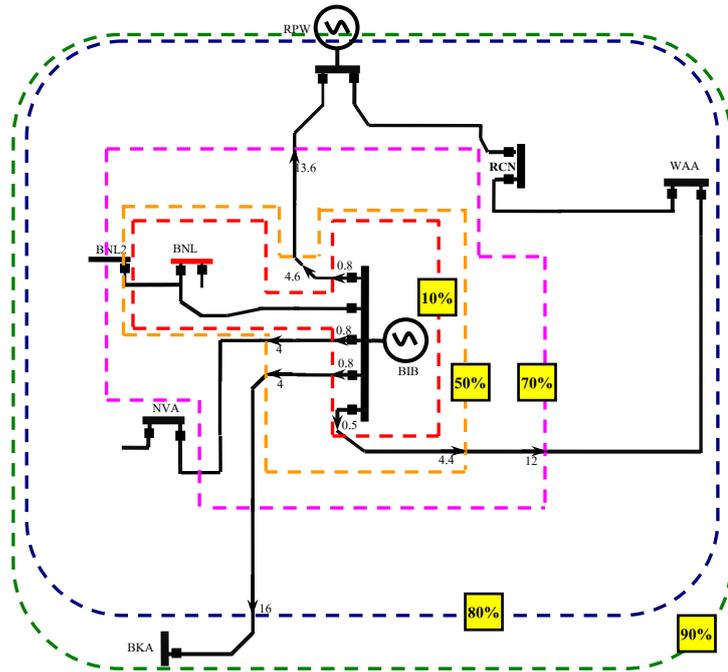
ภาพที่ 96 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



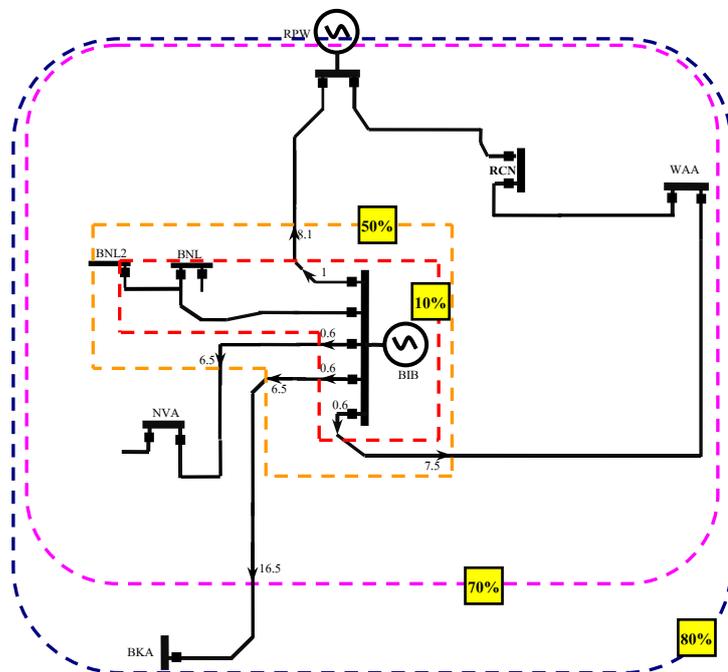
ภาพที่ 97 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



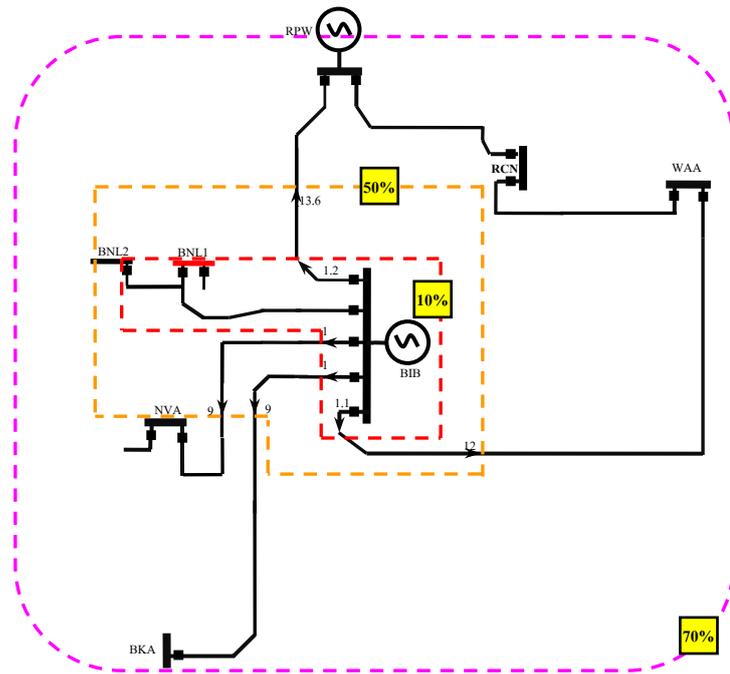
ภาพที่ 98 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีวังน้อย เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส



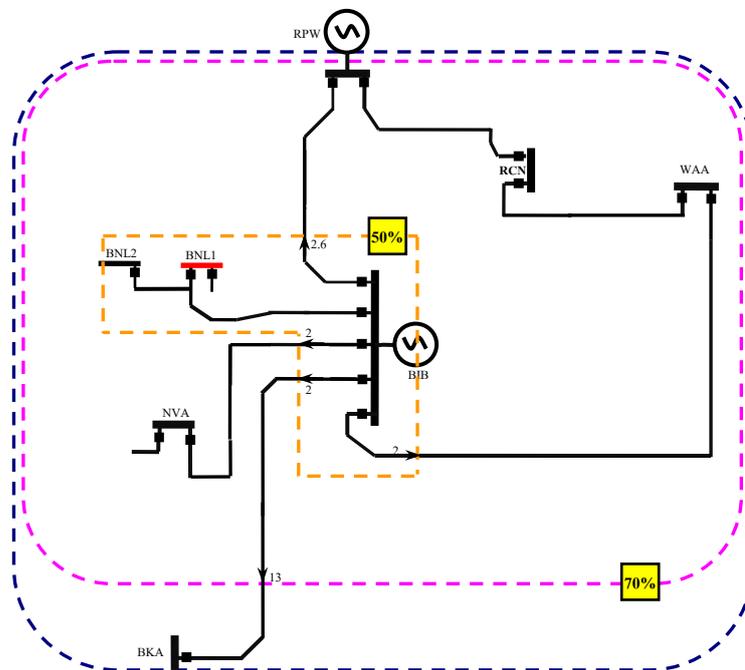
ภาพที่ 99 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



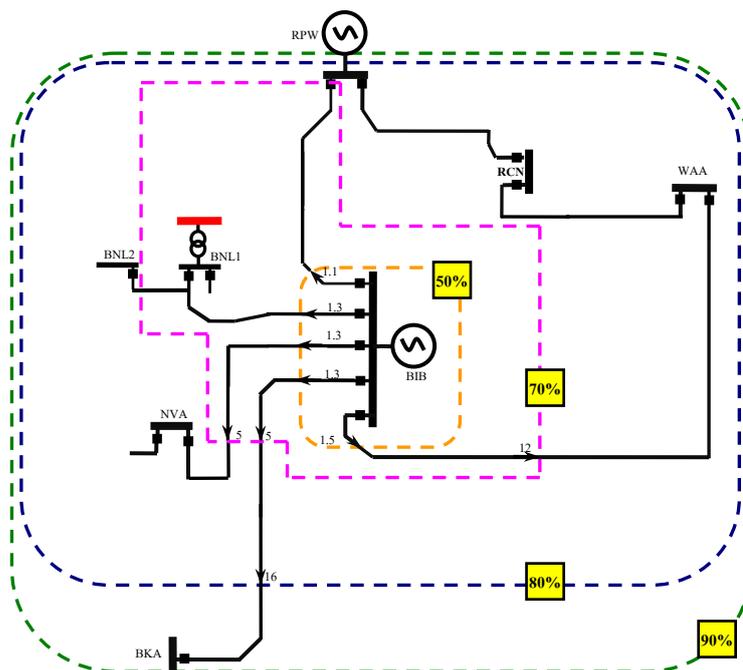
ภาพที่ 100 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 เควี ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน



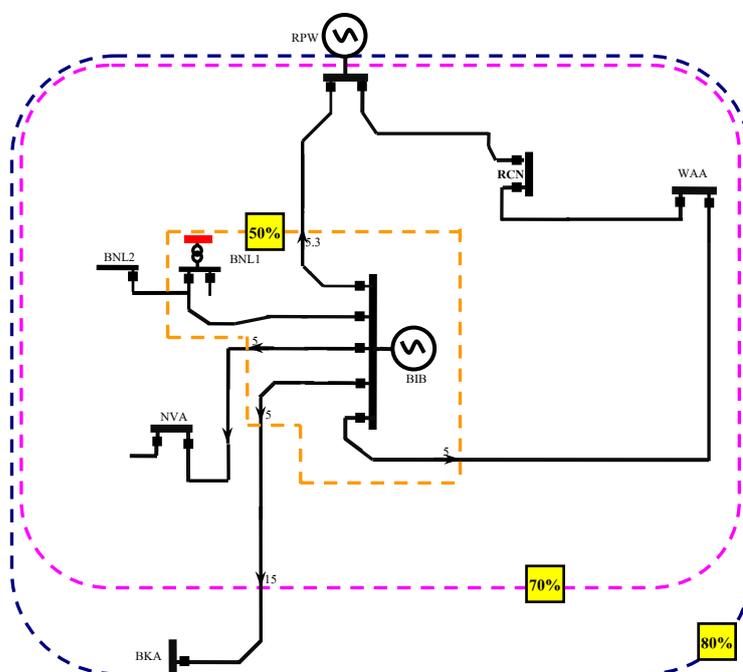
ภาพที่ 101 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 กิโลโวลต์ ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



ภาพที่ 102 คอนทักต์แรงดันด้าน 115 กิโลโวลต์ ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส

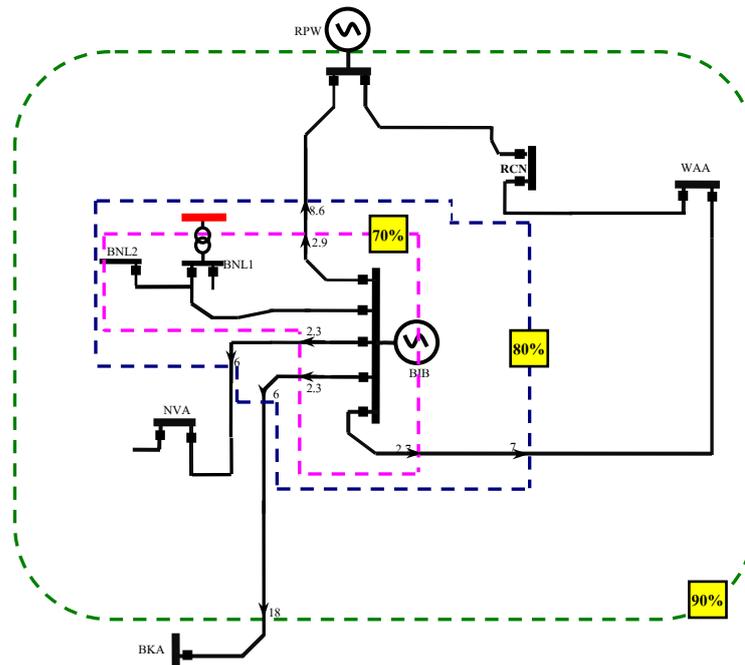


ภาพที่ 103 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโล โวลต์ ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน

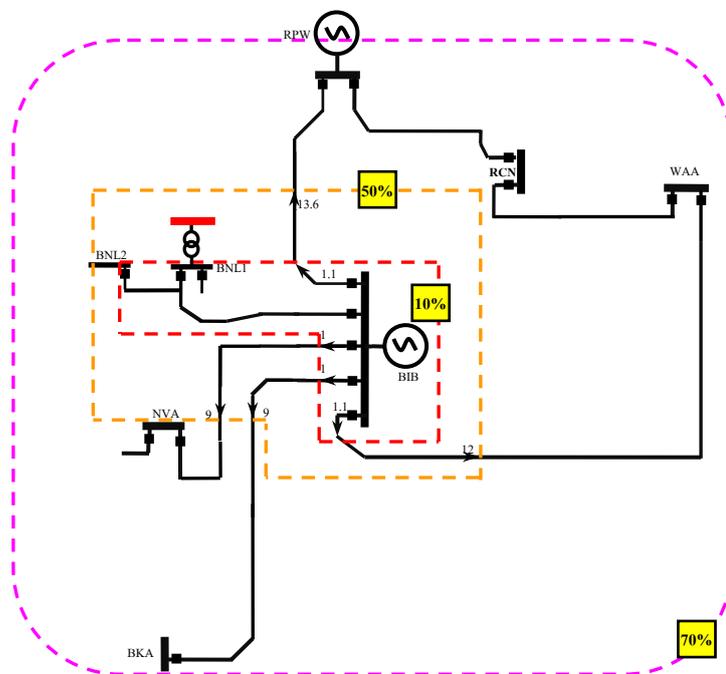


ภาพที่ 104 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 กิโล โวลต์ ของหม้อแปลงกลุ่ม Y ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน

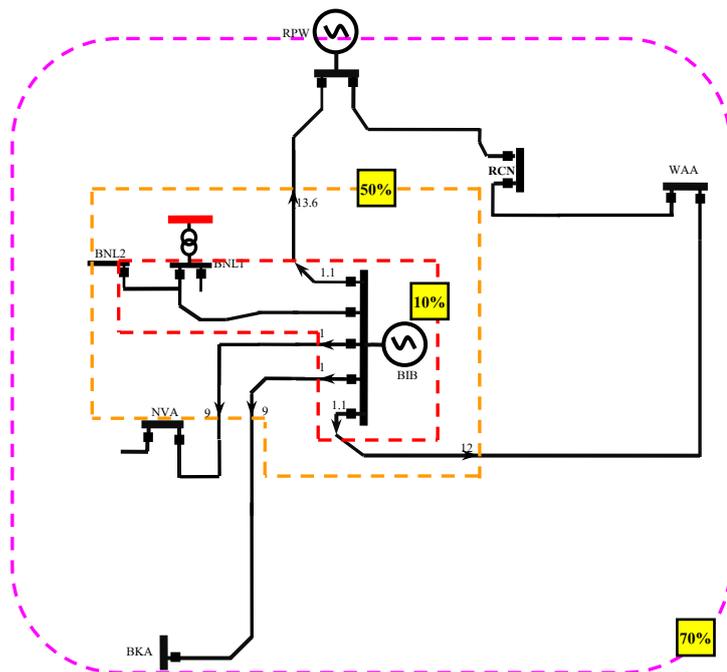




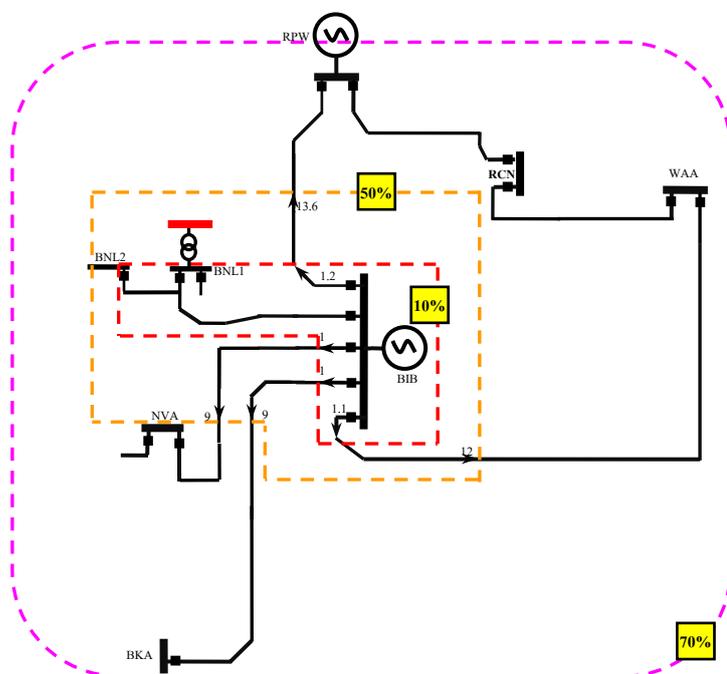
ภาพที่ 107 คอนทิวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่ง เฟสลงดิน



ภาพที่ 108 คอนทิวร์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสอง เฟสลงดิน



ภาพที่ 109 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส



ภาพที่ 110 คอนทักต์แรงดันด้าน 22 เควี ของหม้อแปลงกลุ่ม Z ที่สถานีบ้านเลน เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส

หลังจากสร้างคอนทอร์แรงดันแล้วจะคำนวณระยะทางของสายส่งทั้งหมดที่อยู่ในคอนทอร์แรงดัน (Total Line Length, TLL) ซึ่งค่าความยาวสายส่งภายในคอนทอร์แรงดันจะแสดงลักษณะของคอนทอร์แรงดันได้ชัดเจนขึ้น โดยถ้าค่านี้มีค่ามากแสดงว่าคอนทอร์แรงดันนี้ครอบคลุมระยะทางสายส่งมาก ซึ่งคอนทอร์จะมีขนาดใหญ่ โดยในที่นี้คำนวณระยะทางของสายส่งทั้งหมดภายในคอนทอร์แรงดันเมื่อวัดแรงดันที่ตำแหน่งบัส 115 เควี ( $TLL_{115kV}$ ) และคอนทอร์แรงดันเมื่อวัดแรงดันที่ตำแหน่งบัส 22 เควี ( $TLL_{22kV}$ ) ในกรณีหม้อแปลงกลุ่ม X กลุ่ม Y และกลุ่ม Z และศึกษาผลที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้แสดงดังนี้

**ตารางที่ 14** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	88.22	83.12
80%	78.10	78.10	71.90	52.30
70%	68.30	68.30	45.25	9.86
50%	40.60	40.60	5.76	-
10%	3.86	3.86	-	-

**ตารางที่ 15** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	86.65
80%	84.15	84.15	77.13	68.30
70%	75.79	75.79	65.7	9.80
50%	50.71	50.71	3.8	-
10%	4.75	4.75	-	-

**ตารางที่ 16** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	90.65
80%	88.65	88.65	88.65	33.92
70%	79.63	79.63	49.22	16.53
50%	23.33	23.33	6.5	-
10%	9.23	9.23	-	-

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า  $TLL_{115kV}$  กับค่า  $TLL_{22kV}$  ในกรณีเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินจะเห็นว่าค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม Y และกลุ่ม Z มีค่าลดลงในทุกระดับแรงดัน และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม Y และกลุ่ม Z พบว่าค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม Z มีค่าน้อยกว่าในทุกระดับแรงดัน

**ตารางที่ 17** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรสองเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	88.62	88.62	88.62	92.15
70%	75.30	75.30	75.30	85.92
50%	14.93	14.93	14.93	68.60
10%	-	-	-	6.16

**ตารางที่ 18** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรสองเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	81.13	81.13	81.13	89.15
50%	14	14	14	73.79
10%	-	-	-	8.30

**ตารางที่ 19** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันสถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรสองเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	85.65	85.65	85.65	92.15
50%	8.6	8.6	8.6	49.93
10%	-	-	-	10.63

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า  $TLL_{115kV}$  กับค่า  $TLL_{22kV}$  ในกรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสจะเห็นว่าค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม Z มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกระดับแรงดัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นมากในกรณีของคอนทอร์แรงดัน 50% และกรณีหม้อแปลงกลุ่ม X และกลุ่ม Y ค่า  $TLL_{22kV}$  มีค่าเท่ากับค่า  $TLL_{115kV}$

**ตารางที่ 20** ค่าความยาวสายส่งในคอนทิวร์แรงดันที่สถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรแบบสามเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	85.92	85.92	85.92	85.92
50%	68.60	68.60	68.60	68.60
10%	5.36	5.36	5.36	5.36

**ตารางที่ 21** ค่าความยาวสายส่งในคอนทิวร์แรงดันที่สถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรแบบสามเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	89.15	89.15	89.15	89.15
50%	73.79	73.79	73.79	73.79
10%	8.30	8.30	8.30	8.30

**ตารางที่ 22** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรแบบสามเฟส

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	92.15	92.15	92.15	92.15
50%	49.93	49.93	49.93	49.93
10%	10.63	10.63	10.63	10.63

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า  $TLL_{115kV}$  กับค่า  $TLL_{22kV}$  ในกรณีเกิดลัดวงจรสามเฟสจะเห็นว่าค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม X, กลุ่ม Y และกลุ่ม Z มีค่าเท่ากับค่า  $TLL_{115kV}$  ในทุกระดับแรงดัน

**ตารางที่ 23** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีโรจนะ กรณีลัดวงจรสองเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	89.82	92.15
70%	80.00	80.00	77.90	85.92
50%	61.17	61.17	38.50	68.60
10%	4.96	4.96	-	6.26

**ตารางที่ 24** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีวังน้อย กรณีลัดวงจรสองเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	90.65	92.15
70%	84.65	84.65	83.65	89.15
50%	66.20	66.20	48.41	74.13
10%	7.30	7.30	-	8

**ตารางที่ 25** ค่าความยาวสายส่งในคอนทอร์แรงดันที่สถานีบ้านเลน กรณีลัดวงจรสองเฟสลงดิน

% แรงดัน	ระยะสายส่งเมื่อวัด แรงดันบัส 115 เควี (กม.)	ระยะสายส่งเมื่อวัดแรงดันบัส 22 เควี (กม.)		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
90%	92.15	92.15	92.15	92.15
80%	92.15	92.15	92.15	92.15
70%	89.15	89.15	87.65	92.15
50%	34.93	34.93	26.63	49.93
10%	9.13	9.13	-	10.53

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า  $TLL_{115kV}$  กับค่า  $TLL_{22kV}$  ในกรณีเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดินจะเห็นว่าค่า  $TLL_{22kV}$  ของหม้อแปลงกลุ่ม Z มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกระดับแรงดัน กรณีหม้อแปลงกลุ่ม Y ค่า  $TLL_{22kV}$  มีค่าลดลง และกรณีหม้อแปลงกลุ่ม X ค่า  $TLL_{22kV}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $TLL_{115kV}$

ผลจากการสร้างคอนทอร์แรงดันและคำนวณหาความยาวสายส่งภายในคอนทอร์แรงดันที่สถานีโรจนะ สถานีวังน้อย และสถานีบ้านเลน จะเห็นว่าลักษณะของคอนทอร์แรงดันที่บัส 22 เควี มีความแตกต่างกันตามกลุ่มของหม้อแปลงและชนิดการลัดวงจร โดยในหม้อแปลงกลุ่ม X เมื่อ

เปรียบเทียบค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์ระหว่างคอนทิวร์แรงดันบัส 115 เควี และคอนทิวร์แรงดันบัส 22 เควี ค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์แรงดันเมื่อเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ มีค่าเท่ากัน

กรณีหม้อแปลงกลุ่ม Y เมื่อเปรียบเทียบค่าความยาวสายส่งที่อยู่ในคอนทิวร์แรงดันเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และแบบสองเฟสลงดิน ระหว่างคอนทิวร์แรงดันทางบัส 115 เควี และคอนทิวร์แรงดันบัส 22 เควี ค่าความยาวของสายส่งที่อยู่ในคอนทิวร์แรงดันทางบัส 22 เควีมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และแบบสองเฟสลงดิน ทางบัส 115 เควี แล้วทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางบัส 22 เควี มีค่าน้อยลง และในกรณีลัดวงจรสองเฟสและสามเฟส ค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์แรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง

กรณีหม้อแปลงกลุ่ม Z เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส และสองเฟสลงดิน ในระบบสายส่งระดับแรงดัน 115 เควี ค่าระยะความยาวสายส่งในคอนทิวร์แรงดันบัส 22 เควี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าระยะความยาวสายส่งในคอนทิวร์แรงดันบัส 115 เควี แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เกิดลัดวงจรแบบสองเฟส และสองเฟสลงดิน ทางด้าน 115 เควี แล้วจะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางด้าน 22 เควี มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนกรณีเมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ระยะความยาวสายส่งของคอนทิวร์แรงดันบัส 22 เควี มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ทางด้าน 115 เควี แล้วทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางบัส 22 เควี มีค่าน้อยลง และในกรณีลัดวงจรสามเฟส ค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งและในระบบจำหน่ายได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยสามารถสรุปผลในแต่ละส่วนได้ดังนี้

#### 1. ลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย

จากการศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันต่ำเกินทางด้านระบบสายส่ง ซึ่งมีระดับแรงดัน 115 เควี และระบบจำหน่าย ซึ่งมีระดับแรงดัน 22 เควี พบว่าหม้อแปลงซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ระหว่างสองระบบนี้มีผลต่อลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น โดยหม้อแปลงที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ YGyg, Dd, Yy, YGy, Yyg, Dy, Dyg, Yd และแบบ YGd โดยเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของแรงดันต่ำเกินทางด้านระบบจำหน่าย ที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรในระบบสายส่งสามารถแบ่งกลุ่มของหม้อแปลงเหล่านี้ออกเป็น 3 กลุ่ม โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดชื่อกลุ่มเป็นกลุ่ม X ประกอบด้วยหม้อแปลงชนิด YGyg, กลุ่ม Y ประกอบด้วยหม้อแปลงชนิด Dd, Yy, YGy และ Yyg และกลุ่ม Z ประกอบด้วยหม้อแปลงชนิด Dy, Dyg, Yd และ YGd ตามลำดับ โดยสิ่งที่ทำให้ลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันคือ ลักษณะของวงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงในกลุ่ม X ลักษณะวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิต่อถึงกัน ซึ่งค่าแรงดันในลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิสามารถปรากฏทางด้านทุติยภูมิได้ ดังนั้นลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านระบบจำหน่ายจึงมีลักษณะเหมือนกับแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านระบบสายส่ง หม้อแปลงในกลุ่ม Y ลักษณะวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิไม่ต่อถึงกัน ดังนั้นค่าแรงดันในลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิไม่สามารถปรากฏทางด้านทุติยภูมิได้ และหม้อแปลงในกลุ่ม Z ลักษณะวงจรลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิไม่ต่อถึงกัน ดังนั้นค่าแรงดันในลำดับศูนย์ทางด้านปฐมภูมิไม่ปรากฏทางด้านทุติยภูมิและหม้อแปลงในกลุ่มนี้แรงดันทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีมุมต่างกัน 30 องศา โดยลักษณะแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้ง 3 กลุ่มสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ขนาดแรงดันต่ำเกินทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกลุ่ม X กลุ่ม Y และกลุ่ม Z

ชนิดลัดวงจร	แรงดันด้านปฐมภูมิ	แรงดันด้านทุติยภูมิ		
		กลุ่ม X	กลุ่ม Y	กลุ่ม Z
หนึ่งเฟสลงดิน				
สองเฟสลงดิน				
สองเฟส				
สามเฟส				

แรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรในระบบจำหน่ายนั้นส่งผลต่อแรงดันในระบบสายส่งน้อยมาก ซึ่งแม้แต่ในกรณีที่เกิดลัดวงจรบริเวณสถานีไฟฟ้า บริเวณด้านหลังหม้อแปลงทางด้านระบบจำหน่าย แรงดันทางด้านระบบสายส่งได้รับผลกระทบน้อยมาก เช่น ในกรณีลัดวงจรแบบสามเฟส บริเวณด้านหลังหม้อแปลง แรงดันทางด้านระบบสายส่งลดลงเหลือ 0.885 เปรอ์ยูนิต หรือ 88.5% ของแรงดันปกติ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยจากข้อสรุปนี้ในกรณีที่ต้องการศึกษาแรงดันต่ำเกินในระบบสายส่งอาจไม่คำนึงถึงผลแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบจำหน่ายได้

## 2. ผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่อแรงดันต่ำเกิน

จากการศึกษาผลการต่อความต้านทานลงดินตรงจุดกลางของหม้อแปลงทางด้านระบบจำหน่ายมีผลให้แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินและแบบสองเฟสลงดิน มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีแรงดันเฟส เป็นผลมาจากค่าความต้านทานที่ต่อลงดินดังกล่าวมีผลโดยตรงกับการลัดวงจรที่มีการลัดวงจรลงดิน และนอกจากนี้ยังส่งผลกับแรงดันในเฟสอื่นที่ไม่เกิดลัดวงจร โดยส่งผลให้เกิดแรงดันเกินขึ้น โดยขนาดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงสุดเมื่อเกิดลัดวงจรที่สถานีซึ่งมีขนาด 170 เฟอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ กรณีแรงดันระหว่างเฟสนั้นความต้านทานต่อลงดินจะส่งผลให้แรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน มีความรุนแรงน้อยลง โดยขนาดแรงดันมีค่าใกล้เคียงค่าแรงดันปกติ และไม่เกิดแรงดันเกินขึ้น

จากสรุปผลของตัวต้านทานต่อลงดินต่อแรงดันต่ำเกินจะเห็นว่าตัวต้านทานต่อลงดินจะส่งผลมากต่อแรงดันเฟสในกรณีที่เกิดลัดวงจรลงดิน โดยในเฟสที่เกิดลัดวงจรจะมีขนาดแรงดันลดต่ำลงมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ต่อลงดินโดยตรง และยังส่งผลให้เกิดแรงดันเกินในเฟสที่ไม่ได้เกิดลัดวงจรด้วย ดังนั้นในการพิจารณาการใช้ตัวต้านทานต่อลงดินนั้นควรคำนึงถึงลักษณะการต่อของโหลดในระบบไฟฟ้า ซึ่งถ้ากรณีโหลดส่วนใหญ่เป็นโหลดที่ต่อกับแรงดันระหว่างเฟสหรือเป็นโหลดแบบสามเฟสการพิจารณาการใช้ตัวต้านทานต่อลงดินมีความเหมาะสมกว่าในระบบที่โหลดส่วนใหญ่เป็นแบบหนึ่งเฟส ซึ่งนอกจากโหลดแบบหนึ่งเฟสนี้จะได้รับผลจากแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นแล้ว โหลดที่ต่ออยู่ในเฟสที่ไม่เกิดลัดวงจรยังได้รับผลจากแรงดันเกินอีกด้วย

## 3. คอนทิวร์แรงดัน

ผลจากการสร้างคอนทิวร์แรงดันและคำนวณหาความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์แรงดันที่สถานีโรงจระ สถานีวังน้อย และสถานีบ้านเลน ลักษณะของคอนทิวร์แรงดันที่บัส 22 เควี มีความแตกต่างกันตามกลุ่มของหม้อแปลงและชนิดการลัดวงจร โดยในหม้อแปลงกลุ่ม X เมื่อเปรียบเทียบค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์ระหว่างคอนทิวร์แรงดันบัส 115 เควี และคอนทิวร์แรงดันบัส 22 เควี ค่าความยาวสายส่งภายในคอนทิวร์แรงดันเมื่อเกิดลัดวงจรชนิดต่างๆ มีค่าเท่ากัน

กรณีหม้อแปลงกลุ่ม Y เมื่อเปรียบเทียบค่าความยาวสายส่งที่อยู่ในคอนทิวร์แรงดันเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน และแบบสองเฟสลงดิน ระหว่างคอนทิวร์แรงดันทางบัส 115 เควี และคอน

ท้าวแรงดันบัส 22 เควี ค่าความยาวของสายส่งที่อยู่ในคอนท้าวแรงดันทางบัส 22 เควีมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน และแบบสองเฟสลงดิน ทางบัส 115 เควี แล้วทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางบัส 22 เควี มีค่าน้อยลง และในกรณีลัดวงจรสองเฟสและสามเฟส ค่าความยาวสายส่งภายในคอนท้าวแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง

กรณีหม้อแปลงกลุ่ม Z เมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟส และสองเฟสลงดิน ในระบบสายส่งระดับแรงดัน 115 เควี ค่าระยะความยาวสายส่งในคอนท้าวแรงดันบัส 22 เควี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าระยะความยาวสายส่งในคอนท้าวแรงดันบัส 115 เควี แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เมื่อเกิดลัดวงจรแบบสองเฟส และสองเฟสลงดิน ทางด้าน 115 เควี แล้วจะส่งผลให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางด้าน 22 เควี มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนกรณีเมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ระยะความยาวสายส่งของคอนท้าวแรงดันบัส 22 เควี มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่เมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ทางด้าน 115 เควี แล้วทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินทางบัส 22 เควี มีค่าน้อยลง และในกรณีลัดวงจรสามเฟส ค่าความยาวสายส่งภายในคอนท้าวไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากข้อสรุปนี้จะเห็นว่ากรณีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งใช้หม้อแปลงแบบ Dyg ซึ่งเป็นหม้อแปลงในกลุ่ม Z สามารถช่วยลดผลของแรงดันต่ำเกินที่เกิดจากการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินซึ่งเป็นการลัดวงจรที่เกิดบ่อยในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้จะพบว่าเมื่อเกิดลัดวงจรบริเวณที่เป็นลูปไลน์ จะส่งผลให้สถานีที่ต่ออยู่ลูปไลน์นี้ได้รับผลของแรงดันต่ำเกินทั้งหมดดังนั้นการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงควรมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เช่น สายส่ง เบรกเกอร์ หรือมีการดูแลพื้นที่ เช่น การตัดต้นไม้ บริเวณสายส่งในบริเวณนี้เพื่อช่วยลดปัญหาแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น

#### ข้อเสนอแนะ

1. คอนท้าวแรงดันที่สร้างขึ้นควรมีการทดสอบกับเหตุการณ์จริงที่เกิดขึ้น โดยใช้ข้อมูลชนิดการเกิดลัดวงจร ตำแหน่งการเกิดลัดวงจรที่แน่นอน รวมทั้งข้อมูลเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่บันทึกโดยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า
2. ในการศึกษาต่อไปควรมีการพิจารณาถึงผลของโหลด เช่น มอเตอร์ เป็นต้น และควรมีการศึกษาในเรื่องของช่วงเวลาของแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้น โดยอาจมีการจำลองในส่วนของช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันร่วมด้วย

3. ในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาแรงดันต่ำเกิน โดยใช้รูปคลื่นแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบผลกับการศึกษาโดยใช้แรงดันอาร์เอ็มเอสนี้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

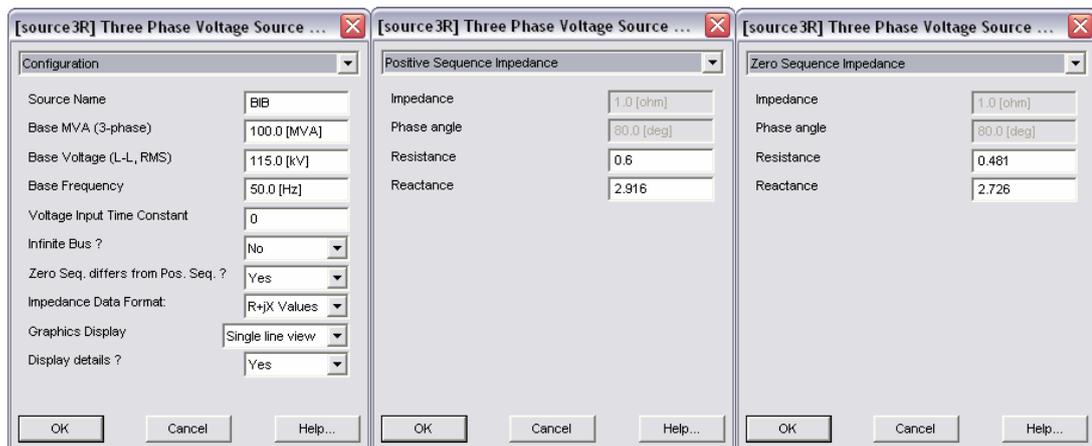
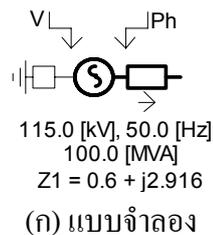
- Aung, M.T. and J.V. Milanovic. 2006. The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags. **IEEE Transactions on Power Delivery** (21): 262-269.
- Bollen, M.H.J. 2000. **Understanding Power Quality Problems: Voltages Sags and Interruptions**. 1 ed. IEEE Press, United States of America.
- Brooks, D. L., R. C. Dugan, M. Waclawiak and A. Sundaram. 1998. Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance. **IEEE Transactions on Power Delivery** (13): 254-259.
- Dugan, R.C., M.F. McGranaghan, S. Santoso and H.W. Beaty. 2002. **Electrical Power Systems Quality**. 2 ed. McGraw Hill, United States of America.
- McGranaghan, M.F, D.R. Mueller and M.J. Samotyj. 1993. Voltage sags in industrial systems. **IEEE Transactions on Industry Applications** (29): 397-403.
- Yalcinkaya, G., M.H.J. Bollen and P.A. Crossely. 1997. Characterization of voltage sags in industrial distribution systems. **IEEE Industry Applications Society Annual Meetings** (3): 2197-2204.
- Zhang, L.D. and M.H. J. Bollen. 2000. Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery** (15): 827-832.

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก  
โปรแกรม PSCAD/EMTDC

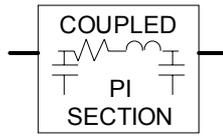
## โปรแกรม PSCAD/EMTDC

PSCAD/EMTDC เป็นโปรแกรมจำลองภาวะชั่วคราวที่มีการทำงานร่วมกันของโปรแกรม PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) และโปรแกรม EMTDC (Electromagnetic Transient including DC) โดยในส่วนของ PSCAD เป็นส่วนติดต่อทางกราฟฟิกกับผู้ใช้งานและทำงานร่วมกับ EMTDC โดยโปรแกรมจะทำการแทนวงจร และหาค่าตอบสนองการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบไฟฟ้าทั้งหมด โดยโปรแกรมนี้สามารถจำลองระบบไฟฟ้า และใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า โดยตัวโปรแกรมมีส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าบรรจุอยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง เครื่องจักรไฟฟ้า ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ เป็นต้น โดยผู้ใช้สามารถจำลองระบบไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในโปรแกรมในการศึกษาระบบไฟฟ้าได้ โดยตัวอย่างของอุปกรณ์ที่บรรจุอยู่ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC แสดงดังนี้

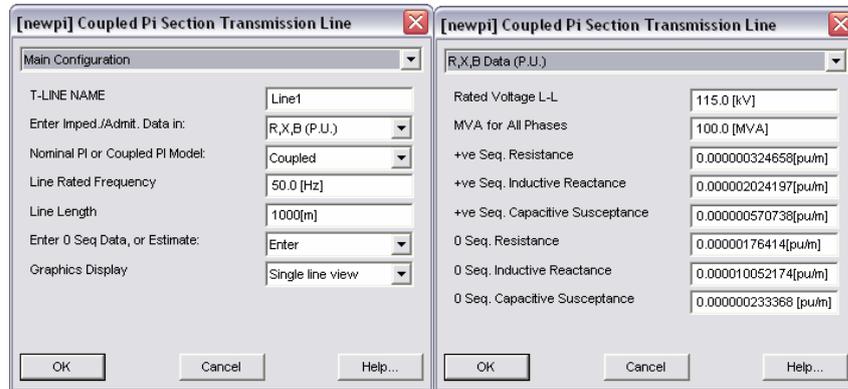


(ข) การกำหนดค่าตัวแปรของแหล่งกำเนิดแรงดัน

ภาพผนวกที่ 1 แบบจำลองแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

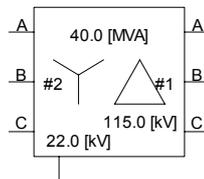


(ก) แบบจำลอง

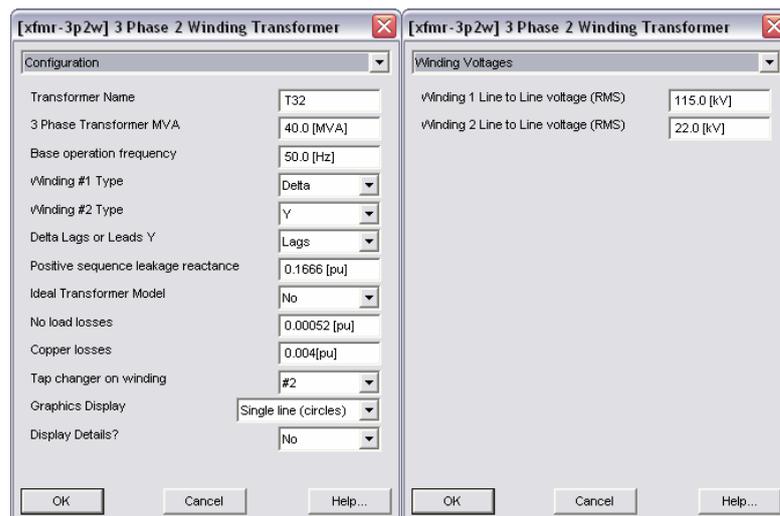


(ข) การกำหนดค่าตัวแปรของสายส่ง

ภาพผนวกที่ 2 แบบจำลองสายส่งด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

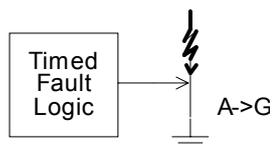


(ก) แบบจำลอง

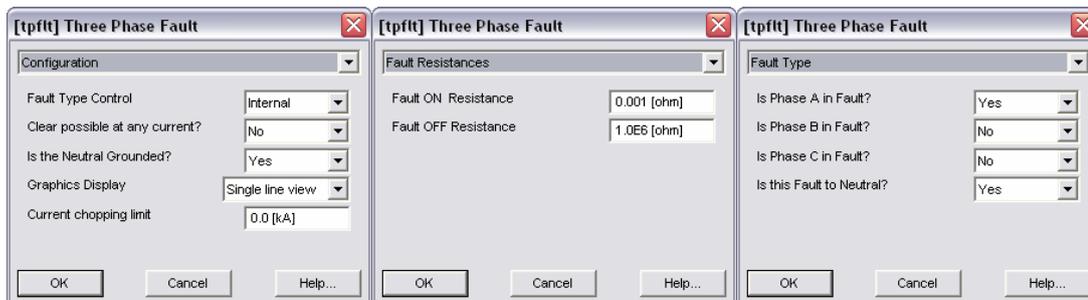


(ข) การกำหนดค่าตัวแปรของหม้อแปลง

ภาพผนวกที่ 3 แบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC



(ก) แบบจำลอง

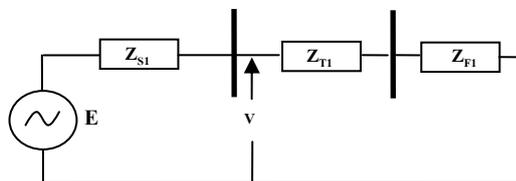


(ข) การกำหนดค่าตัวแปรของการเกิดลัดวงจร

ภาพผนวกที่ 4 แบบจำลองการเกิดลัดวงจรด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

ภาคผนวก ข  
ที่มาของสมการ

ลัดวงจรสามเฟส

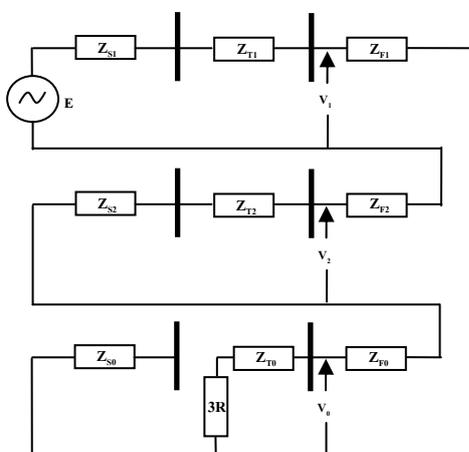


ภาพผนวกที่ 5 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟส

ค่าแรงดัน  $V$  เมื่อ  $E=1$  คือ

$$V = \frac{Z_{T1} + Z_{F1}}{Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{F1}} \quad (48)$$

ลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน



ภาพผนวกที่ 6 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน

สมการแรงดันลำดับบวก, แรงดันลำดับลบและแรงดันลำดับศูนย์ คือ

$$V_1 = \frac{(Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S2} + Z_{T2}) + Z_{T0} + 3R}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (49)$$

$$V_2 = -\frac{Z_{S2} + Z_{T2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (50)$$

$$V_0 = -\frac{Z_{T0} + 3R}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (51)$$

สมการแรงดันเฟสเอ, แรงดันเฟสบีและแรงดันเฟสซี คือ

$$V_A = \frac{(Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2})}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (52)$$

$$V_B = a^2 - \frac{a^2(Z_{S1} + Z_{T1}) + a(Z_{S2} + Z_{T2}) + Z_{T0} + 3R}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (53)$$

$$V_C = a - \frac{a(Z_{S1} + Z_{T1}) + a^2(Z_{S2} + Z_{T2}) + Z_{T0} + 3R}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{T0} + Z_{T1} + Z_{T2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2}) + 3R} \quad (54)$$

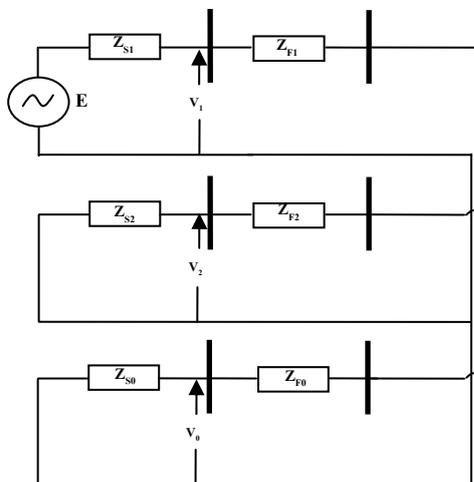
สมการแรงดันระหว่างเฟสเอบี, แรงดันระหว่างเฟสบีซีและแรงดันระหว่างเฟสซีเอ เมื่อ  $Z_F=0$  คือ

$$V_A - V_B = V_{AB} = \frac{\left( -a^2 + \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right)}{\sqrt{3}} \quad (55)$$

$$V_B - V_C = V_{BC} = \frac{(a^2 - a)}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{(Z_{S1} + Z_{T1}) - (Z_{S2} + Z_{T2})}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right) \quad (56)$$

$$V_C - V_A = V_{CA} = \frac{\left( a - \frac{Z_{T0} + 3R - Z_{S1} - Z_{T1}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R} \right)}{\sqrt{3}} \quad (57)$$

ลัดวงจรสองเฟสลงดิน



ภาพผนวกที่ 7 วงจรสมมูลเมื่อเกิดลัดวงจรสองเฟสลงดิน

สมการแรงดันลำดับบวก, แรงดันลำดับลบและแรงดันลำดับศูนย์ คือ

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}(Z_{S0} + Z_{S2} + Z_{F0} + Z_{F2})}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (58)$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}(Z_{S0} + Z_{F0})}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (59)$$

$$V_0 = \frac{Z_{S0}(Z_{S2} + Z_{F2})}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (60)$$

สมการแรงดันเฟสเอ, แรงดันเฟสบีและแรงดันเฟสซี คือ

$$V_A = 1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{S0} + Z_{F0}) + (Z_{S0} - Z_{S1})(Z_{S2} + Z_{F2})}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (61)$$

$$V_B = a^2 + \frac{(aZ_{S2} - a^2Z_{S1})Z_{S0} + (Z_{S0} - a^2Z_{S1})Z_{S2}}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (62)$$

$$V_C = a + \frac{(a^2 Z_{S2} - a Z_{S1}) Z_{S0} + (Z_{S0} - a Z_{S1}) Z_{S2}}{(Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2})} \quad (63)$$

สมการแรงดันระหว่างเฟสเอบี, แรงดันระหว่างเฟสบีซีและแรงดันระหว่างเฟสซีเอ เมื่อ  $Z_F=0$  คือ

$$V_A - V_B = V_{AB} = \frac{1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{S0}) + (Z_{S0} - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{S0})(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} \quad (64)$$

$$V_B - V_C = V_{BC} = 0 \quad (65)$$

$$V_C - V_A = V_{CA} = \frac{-1 - \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{S0}) + (Z_{S0} - Z_{S1})(Z_{S2})}{(Z_{S0})(Z_{S1} + Z_{S2}) + Z_{S1}Z_{S2}}}{\sqrt{3}} \quad (66)$$

### ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายวีรุติ กนกบรรณกร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 17 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	ระยอง
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนเล่าเรียนหลวงกาญจนาภิเษก ปี พ.ศ. 2539 ถึง ปัจจุบัน