



การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราว  
ที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ  
นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
สรเชษฐ เดชฟุ้ง  
อดิศักดิ์ วิริยกรรม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



Power System Grounding for Mitigation of Voltage Sag  
Originated from Single Line to Ground Fault

Surasit	Prakobkit
Nattachote	Rugthaicharoencheep
Surachet	Dechphung
Adisak	Viriyakam

This Research is Funded by Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Phra Nakorn  
Year 2015

ชื่อเรื่อง : การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

ผู้วิจัย : นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
ดร.สุรเชษฐ เดชฟุ้ง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
นายอดิศักดิ์ วิริยกรรม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร

พ.ศ. : 2558

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า และก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐศาสตร์ กรณีศึกษาของการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า จะทำการวิเคราะห์ผลของการต่อลงดินในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การต่อลงดินโดยตรง การไม่ต่อลงดิน การต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน และการต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย โดยทำการประเมินระดับของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่และระยะเวลาที่เกิดเปรียบเทียบกับกราฟตามมาตรฐาน ITIC จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการต่อลงดินสามารถลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกให้กับผู้ใช้ไฟและสามารถช่วยลดค่าความเสียหายทางเศรษฐศาสตร์ของระบบได้

Title : Assessment of Lightning Protection Performance in Transmission System

Researcher : Mr.Surasit Prakobkit, Department of Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, RMUTP

Assistant Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep,

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP

Dr.Surachet Dechphung, Department of Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, RMUTP

Mr.Adisak Viriyakam, Department of Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, RMUTP

Year : 2015

### Abstract

The faults in a power distribution system do not only impact to power outage directly. They also cause voltage sag problem spread over the system. A single-line to ground fault is about 70% of the overhead system faults. The magnitude and duration of voltage sag causes the economic damage of the system. This paper presents an analysis of the different systems grounding to mitigate the voltage sag in a power distribution system by using the technical analysis system in case of one phase to ground fault. The objective is to minimize voltage drop for users using the simulation with single line to ground fault in distribution system, voltage level at 22 kV PEA's test system by the computer program. The results show that the grounding method can mitigate the voltage sag and reduce the damage of the economic system.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่เกิดจากการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินนี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สมชาย ทรงศิริ และผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย

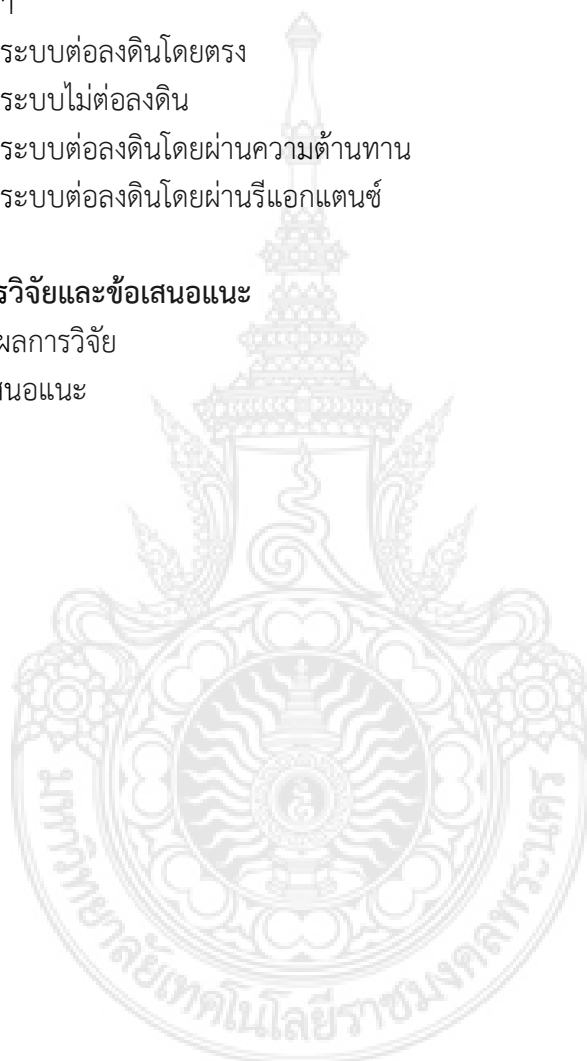


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	3
1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ	4
2.2 การวิเคราะห์เหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	4
2.3 องค์ประกอบสมมาตร	5
2.4 การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	30
<b>บทที่ 3 การจำลองต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า</b>	<b>32</b>
3.1 บทนำ	32
3.2 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	32
3.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการจำลองระบบต่อลงดิน</b>	37
4.1 บทนำ	37
4.2 กรณีระบบต่อลงดินโดยตรง	38
4.3 กรณีระบบไม่ต่อลงดิน	39
4.4 กรณีระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน	41
4.5 กรณีระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์	43
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	48
คณะผู้วิจัย	49



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	พารามิเตอร์ของสายจำหน่ายระบบ 22 kV	33
3.2	พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	33
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้า	35
4.1	ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยตรง	39
4.2	ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบไม่ต่อลงดิน	41
4.3	ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดิน โดยผ่านความต้านทาน	42
4.4	ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์	44
4.5	เวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรกรณีระบบต่อลงดินโดยตรง	45
4.6	เวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรกรณีระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน	45





## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	1.1 มาตรฐานแรงดันตกชั่วขณะตาม IEEE Std.1159-1995	1
2.1	การเกิดลัดวงจรเมื่อเกิดวาทไฟตามผิวที่ฉนวนลูกถ้วย	4
2.2	ไดอะแกรมการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ตำแหน่ง $k$	5
2.3	การวางขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส	6
2.4	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล	6
2.5	เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสบวก	7
2.6	เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสลบ	8
2.7	เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสศูนย์	8
2.8	เฟสเซอร์ของแรงดันเฟส $abc$ ที่เกิดจากเฟสเซอร์ลำดับบวก ลบ และศูนย์	9
2.9	เฟสเซอร์ของแรงดันเฟสที่แยกตามกลุ่ม	9
2.10	วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบวาย	11
2.11	วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบเดลตา	13
2.12	องค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส	15
2.13	เครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบพิกัดเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์	17
2.14	เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ $Z_n$	19
2.15	เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด $N$ ไม่ต่อลงกราวด์	20
2.16	สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	21
2.17	สายส่งไฟฟ้าเฟสเดียวสองเส้นที่เกิดการคล้อยเกี่ยวกันระหว่างเฟส	23
2.18	การต่อหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน	23
2.19	การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน	24
2.20	การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน	24
2.21	วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน	25
2.22	องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน	25
2.23	การต่อหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิ	26
2.24	องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิ	26
2.25	การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	26
2.26	การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	27
2.27	องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบเดลตา – เดลตา	27
2.28	การต่อหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	27
2.29	การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	28
2.30	วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	28
2.31	องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน – เดลตา	29
2.32	วงจรสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน	30

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.1	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV	32
3.2	แรงดันไฟฟ้าตามกราฟมาตรฐาน ITIC	34
3.3	แบบจำลองการต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า	36
4.1	การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า	37
4.2	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1	38
4.3	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2	39
4.4	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1	40
4.5	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2	40
4.6	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1	41
4.7	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2	42
4.8	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1	43
4.9	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2	43
4.10	แรงดันเฟสกรณีระบบต่อลงดินโดยตรงและต่อลงดินผ่านความต้านทานที่บัส 4 และ 5	46
4.11	แรงดันสายกรณีระบบต่อลงดินโดยตรงและต่อลงดินผ่านความต้านทานที่บัส 4 และ 5	46

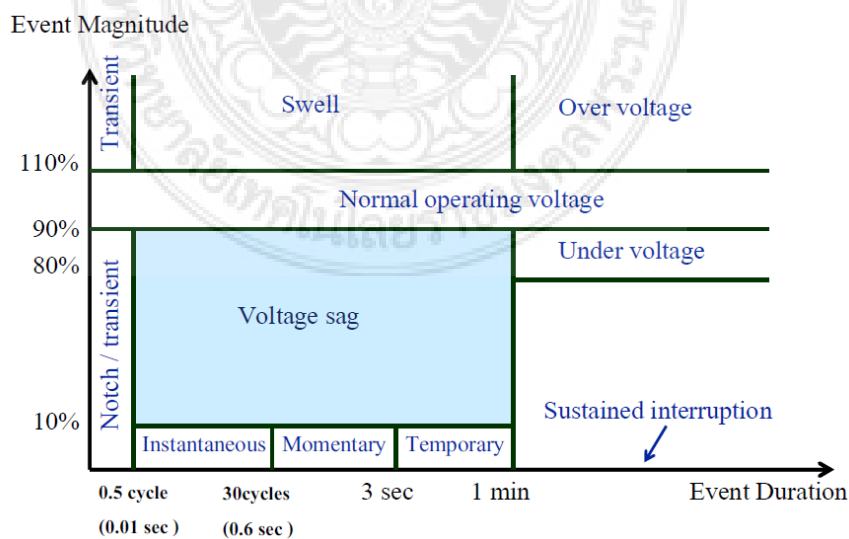


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟในภาคอุตสาหกรรม ภาคการพาณิชย์ และอาคารบ้านเรือนต่างๆ เนื่องจากเป็นโหนดที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่ายโดยตรง ซึ่งปัจจุบันผู้ใช้ไฟมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ซึ่งโอกาสที่ระบบจะเกิดเหตุการณ์ฟอลต์ (Fault) จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิตย่อมมีมากขึ้นด้วยระบบจึงต้องการอุปกรณ์ป้องกันเพื่อที่จะแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ หากเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าก็อาจส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ หรือแม้แต่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นระบบที่ใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง การเกิดเหตุขัดข้องที่อุปกรณ์แต่ละตัวย่อมส่งผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละจุดโหนด เช่นในระหว่างที่เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายซึ่งทำให้เกิดแรงดันตก ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยเฉพาะในส่วนของภาคอุตสาหกรรมจะมีความไวต่อการต่อแรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ โดยที่ความรุนแรงของฟอลต์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งฟอลต์ และประเภทของฟอลต์ ซึ่งฟอลต์ที่พบบ่อยสุดเป็นแบบหนึ่งเฟสลงดินด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งแรงดันตกตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-1995 [1] กำหนดให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าซึ่งจัดอยู่ในประเภทของแรงดันตกชั่วขณะ โดยที่ขนาดของรูปคลื่นแรงดันลดลงอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 p.u. ของพิกัดแรงดันปกติ ขนาดของแรงดันที่ลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นตั้งแต่ 0.01 วินาที จนถึง 1 นาที หากเกิดขึ้นนานกว่านี้ถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทอื่น สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 มาตรฐานแรงดันตกชั่วขณะตาม IEEE Std.1159-1995

แรงดันตกคือปัญหาคุณภาพไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟโดยเฉพาะผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรม ที่ใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตก ทั่วไปแล้วสาเหตุหลักของแรงดันตกเกิดมาจากฟอลต์ในระบบไฟฟ้าซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของแรงดันตกประกอบไปด้วย ขนาด (Magnitude) และระยะเวลาของการเกิดแรงดันตก ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบแรงดันตก โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการการทดลองดินของระบบไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบแรงดันตกชั่วคราวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยได้นำกราฟตามมาตรฐาน (The Information Technology Industry Council, ITIC) [2] มาใช้เป็นสมมติฐานในการทำนายแรงดันตก อย่างไรก็ตามปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่บอกระดับความรุนแรงของกระแสลัดวงจรก็คือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ซึ่งระดับความรุนแรงของกระแสฟอลต์จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการปลดวงจรของระบบป้องกัน ปัญหาที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะทางห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ 20 กิโลเมตร ระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าแบบใดจะช่วยลดผลกระทบปัญหาคุณภาพไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟในพื้นที่ข้างเคียงขณะเกิดลัดวงจร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาแรงดันตกชั่วคราวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาระบบต่อลงดินโดยตรง ระบบไม่ต่อลงดิน ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์
- 1.2.3 เพื่อทำการวิเคราะห์การต่อลงดินที่ทำให้เกิดผลดีด้านคุณภาพไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 การการต่อลงดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV
- 1.3.2 ประมวลผลจากโปรแกรมจำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.3 วิเคราะห์ผลโดยใช้กรณีศึกษาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ITIC

## 1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนวรรณกรรม
- 1.4.2 ศึกษาข้อมูลเทคนิคการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.4.3 ศึกษาข้อมูลโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.4.4 ศึกษาทฤษฎีการหาค่าแรงดันตกชั่วคราวโดยคำนึงถึงเหตุการณ์การลัดวงจร
- 1.4.5 กำหนดรูปแบบปัญหา เพื่อทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.4.6 สร้างแบบจำลองเพื่อใช้แก้ไขปัญหา
- 1.4.7 ประมวลผลทดสอบ และวิเคราะห์ผล
- 1.4.8 สรุปผลการทดสอบ

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

- 1.5.1 สามารถประเมินแรงดันไฟฟ้าตกเพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบได้
- 1.5.2 สามารถใช้โปรแกรมจำลองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้
- 1.5.3 สามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวได้
- 1.5.4 สามารถนำผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

## 1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งจะสามารถอธิบายขอบเขตของเนื้อหาในแต่ละบทได้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำของโครงการวิจัย ซึ่งเราได้กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา และมาตรฐานของแรงดันตก รวมถึงเราได้กำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางให้กับโครงการวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้สำหรับโครงการวิจัยฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงองค์ประกอบสมมาตร การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร และแรงดันไฟฟ้าตกในระบบไฟฟ้า

บทที่ 3 เป็นการออกแบบจำลองเหตุการณ์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้เห็นถึงสถานะชั่วคราวของแรงดันไฟฟ้าตก

บทที่ 4 เป็นการอธิบายผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ITIC ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตกในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะที่มีต่อโครงการวิจัยฉบับนี้

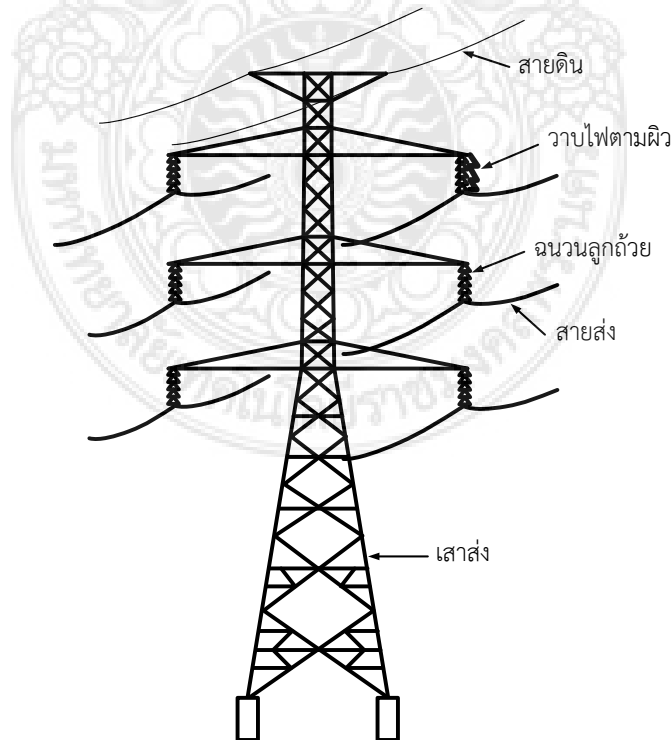
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ฟอลต์ (Fault) หรือความผิดปกติ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอาจมีสาเหตุมาจากธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า หรือสาเหตุภายในระบบไฟฟ้า เช่น การสับ – ปลดเบรกเกอร์ โดยที่ฟอลต์จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อชีวิต ฟอลต์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบสมมาตร หรือแบบไม่สมมาตร และอาจเกิดขึ้นได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้าแต่ส่วนมากจะเกิดที่สายส่งเหนือดิน (Overhead Line) โดยฟอลต์ที่พบบ่อยสุดเป็นเหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ซึ่งขณะเกิดลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งผู้ใช้ไฟที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบดังกล่าว โดยที่แรงดันตกเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

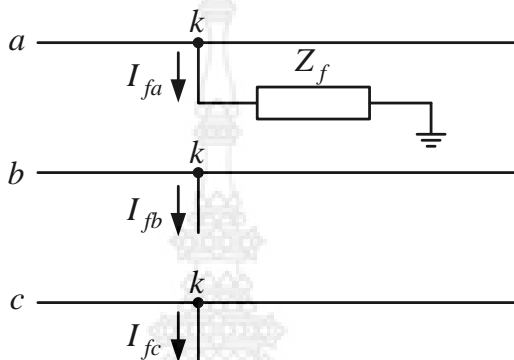
### 2.2 การวิเคราะห์เหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

เหตุการณ์ลัดวงจรส่วนใหญ่มาจากฟ้าผ่าหรือการเปิด-ปิดวงจร ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเกินตกคร่อมที่ฉนวนลูกถ้วยหากฉนวนลูกถ้วยทนต่อแรงดันเกินไม่ได้ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยลงดิน โดยที่การเกิดลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินในระบบไฟฟ้าจะมีลักษณะที่เฟสใดเฟสหนึ่งลัดวงจรลงดินหรือสายตัวนำเฟสใดเฟสหนึ่งขาดแล้วลัดวงจรลงดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเกิดลัดวงจรเมื่อเกิดวาบไฟตามผิวที่ฉนวนลูกถ้วย

จากภาพที่ 2.1 พบว่าการติดตั้งลูกถ้วยเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวทำให้ต้องลงทุนฉนวนลูกถ้วยเพิ่มขึ้นและเสาต้องรับน้ำหนักมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบ่อยครั้งเมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น และเมื่อนำเหตุการณ์การเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมาเขียนเป็นไดอะแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจร จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ไดอะแกรมการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ตำแหน่ง  $k$

จากภาพที่ 2.2 แสดงการเกิดลัดวงจรที่เฟส  $a$  ลงดินโดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_f$  ที่ตำแหน่ง  $k$  ซึ่งสามารถหาค่ากระแสลัดวงจรได้ดังสมการ (2.1)

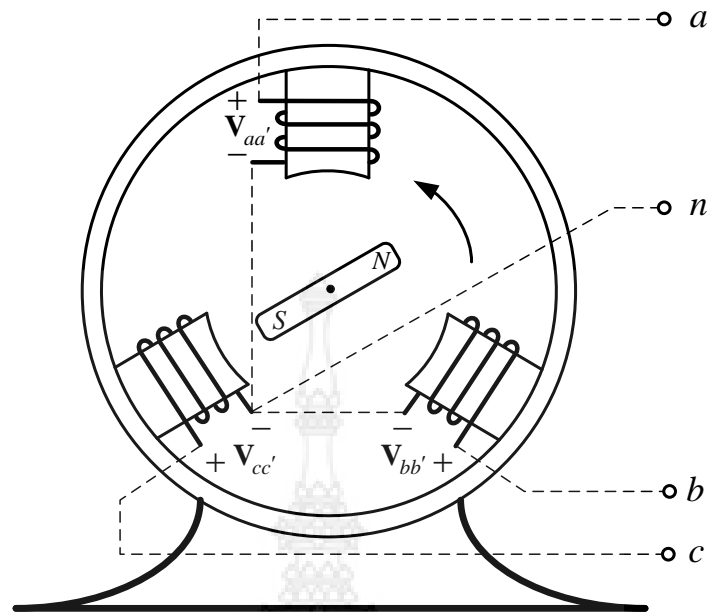
$$I_{fb} = 0 \quad ; \quad I_{fc} = 0 \quad ; \quad V_{ka} = Z_f I_{fa} \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_{fa}$  คือ กระแสลัดวงจรเฟส  $a$   
 $I_{fb}$  คือ กระแสลัดวงจรเฟส  $b$   
 $I_{fc}$  คือ กระแสลัดวงจรเฟส  $c$   
 $V_{ka}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส  $a$  ที่ตำแหน่ง  $k$

จากภาพที่ 2.2 พบว่าการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นการลัดวงจรไม่สมมาตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการขององค์ประกอบสมมาตรมาใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรซึ่งหลักการขององค์ประกอบสมมาตรสามารถอธิบายได้ดังนี้

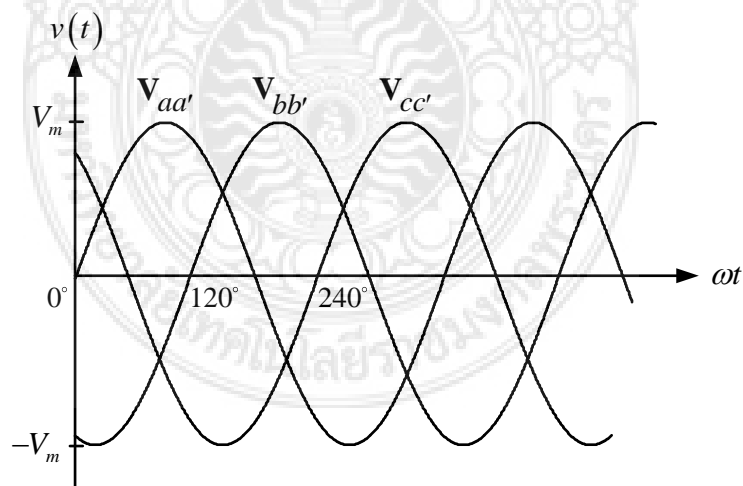
### 2.3 องค์ประกอบสมมาตร

โดยทั่วไปโครงสร้างของระบบผลิตกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบสามเฟสสมมาตร ซึ่งเกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีลักษณะการพันขดลวดทั้งสามเหมือนกันแต่จะวางห่างกันทำมุม  $120^\circ$  ทางไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การวางขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

จากภาพที่ 2.3 เมื่อหมุนส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องต้นกำลังในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในลักษณะของฟังก์ชันไซน์ขอยด์ขึ้นในขดลวดทั้งสาม ซึ่งสามารถเขียนรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูล

จากภาพที่ 2.4 สามารถเขียนแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสแบบสมมูลที่แทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสามแหล่ง ได้ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4)



$$v_{aa'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos \omega t \quad (2.2)$$

$$v_{bb'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.3)$$

$$v_{cc'}(t) = \sqrt{2}V_p \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.4)$$

โดยที่  $V_p$  คือ ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันเฟสแต่ละเฟส

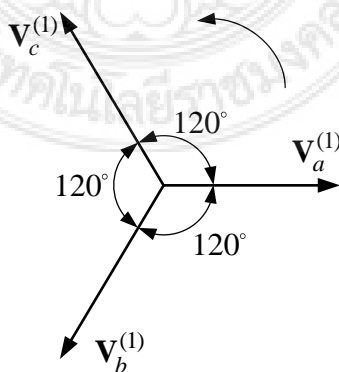
จากสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) สามารถนำหลักการของเฟสเซอร์มาเขียนเป็นสมการในรูปของแรงดันเฟสเซอร์อาร์เอ็มเอสได้ดังสมการที่ (2.5) ถึง (2.7)

$$\mathbf{V}_{aa'} = V_p \angle 0^\circ \quad (2.5)$$

$$\mathbf{V}_{bb'} = V_p \angle -120^\circ \quad (2.6)$$

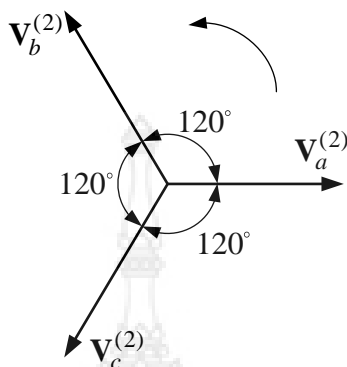
$$\mathbf{V}_{cc'} = V_p \angle 120^\circ \quad (2.7)$$

องค์ประกอบสมมาตรจะใช้วิธีการแปลงระบบเดิมที่มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล (Unbalance) ไปวิเคราะห์เป็นแบบระบบสมดุล (Balance) กล่าวคือองค์ประกอบสมมาตรจะทำการแยกเฟสเซอร์ไม่สมดุลของระบบสามเฟสออกเป็นเฟสเซอร์สมมาตรที่มีองค์ประกอบสามส่วนได้แก่องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) เพื่อใช้ในการคำนวณหาองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่สมมาตร ซึ่งจากสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) องค์ประกอบลำดับบวกสามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.5 โดยจะมีลำดับเฟส (Phase Sequence) เหมือนกับลำดับเฟสเดิมของแรงดันหรือกระแส



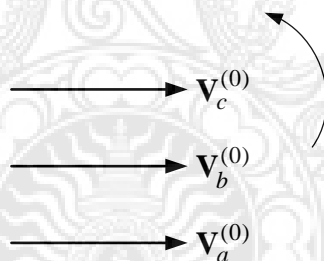
ภาพที่ 2.5 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมดุลที่มีลำดับเฟสบวก

องค์ประกอบลำดับลบจะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับองค์ประกอบลำดับบวกแต่มีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับลำดับบวก สามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมมูลที่มีลำดับเฟสลบ

องค์ประกอบลำดับศูนย์ประกอบด้วยเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกันศูนย์องศา สามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังได้ดังภาพที่ 2.7

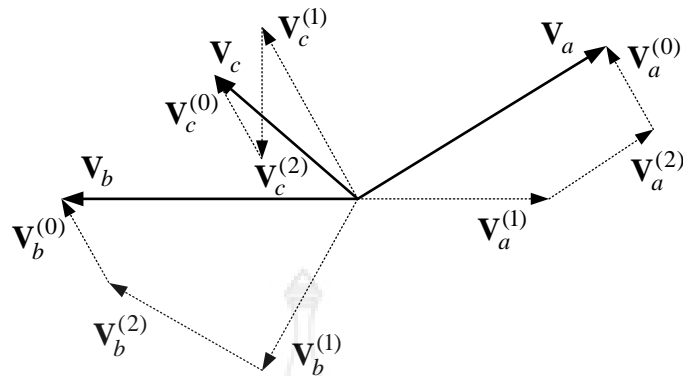


ภาพที่ 2.7 เฟสเซอร์แทนแรงดันสามเฟสสมมูลที่มีลำดับเฟสศูนย์

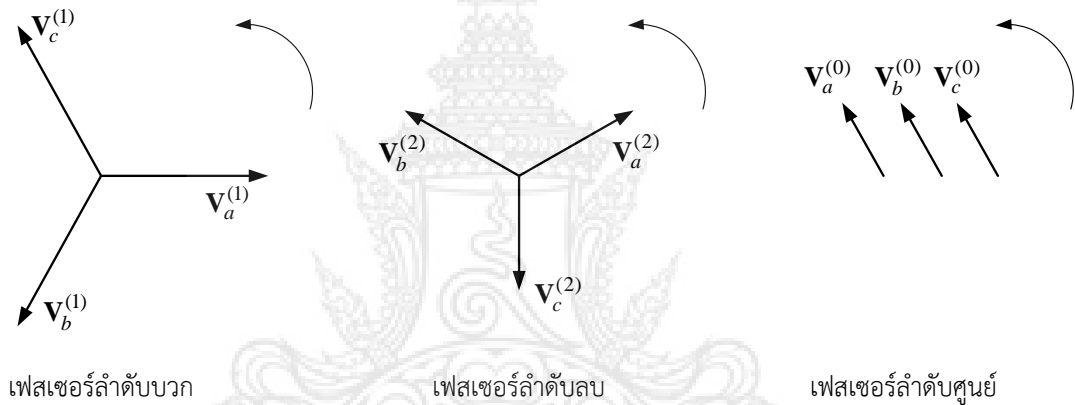
การนำเฟสเซอร์สามเฟสสมมูลที่มีเฟสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของแต่ละเฟสมารวมกันจะได้เฟสเซอร์ของแต่ละเฟสดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_a &= \mathbf{V}_a^{(0)} + \mathbf{V}_a^{(1)} + \mathbf{V}_a^{(2)} \\ \mathbf{V}_b &= \mathbf{V}_b^{(0)} + \mathbf{V}_b^{(1)} + \mathbf{V}_b^{(2)} \\ \mathbf{V}_c &= \mathbf{V}_c^{(0)} + \mathbf{V}_c^{(1)} + \mathbf{V}_c^{(2)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) พบว่าแรงดันหรือกระแสที่ไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถแยกออกเป็นกลุ่มเฟสเซอร์ 3 กลุ่ม ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟส  $abc$  ที่เกิดจากเฟสเซอร์ลำดับบวก ลบ และศูนย์



ภาพที่ 2.9 เฟสเซอร์ของแรงดันเฟสที่แยกตามกลุ่ม

จากภาพที่ 2.9 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลกับองค์ประกอบสมมาตรโดยใช้เฟสเอเป็นเฟสอ้างอิง ซึ่งกำหนดให้ตัวปฏิบัติการ (Operator,  $a$ ) มีค่า  $a = 1\angle 120^\circ$  และความสัมพันธ์ขององค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ เมื่อเทียบกับเฟสเอจะแสดงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_b^{(0)} &= \mathbf{V}_a^{(0)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(0)} &= \mathbf{V}_a^{(0)} \\
 \mathbf{V}_b^{(1)} &= a^2 \mathbf{V}_a^{(1)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(1)} &= a \mathbf{V}_a^{(1)} \\
 \mathbf{V}_b^{(2)} &= a \mathbf{V}_a^{(2)} & ; & & \mathbf{V}_c^{(2)} &= a^2 \mathbf{V}_a^{(2)}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสของระบบเดิม และองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ในสมการที่ (2.9) นำไปแทนลงในสมการที่ (2.8) จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (2.10) ถึงสมการที่ (2.12)

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_a^{(0)} + \mathbf{V}_a^{(1)} + \mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{V}_a^{(0)} + a^2\mathbf{V}_a^{(1)} + a\mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{V}_a^{(0)} + a\mathbf{V}_a^{(1)} + a^2\mathbf{V}_a^{(2)} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.10) ถึง (2.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

หรือ  $\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{A}\mathbf{V}_a^{(012)} \quad (2.14)$

เมื่อ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

และสามารถเขียนส่วนกลับ (Invert) ของเมตริกซ์  $\mathbf{A}$  ได้เป็น

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถนำมาใช้คำนวณหาองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ของแรงดันได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{V}_a^{(012)} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{V}_{abc} \quad (2.18)$$

การคำนวณหากระแสไม่สมดุลจะสามารถใช้ความสัมพันธ์ของกระแสลำดับบวก ลบ ศูนย์ เช่นเดียวกับแรงดัน โดยกระแสเฟส  $abc$  สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{I}_{abc} = \mathbf{A} \mathbf{I}_a^{(012)} \quad (2.20)$$

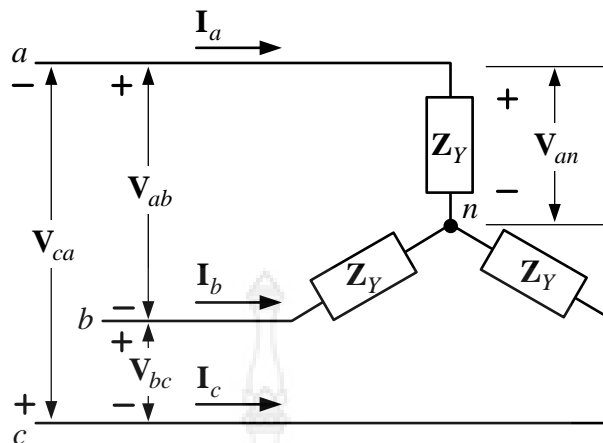
จากสมการที่ (2.19) สามารถนำมาใช้คำนวณหาองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ของกระแสได้ดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\text{หรือ} \quad \mathbf{I}_a^{(012)} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.22)$$

### 2.3.1 องค์ประกอบของวงจรแบบวาย (Y) และแบบเดลตา ( $\Delta$ )

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส  $abc$  จะมีการเชื่อมต่อโดยผ่านอิมพีแดนซ์ในลักษณะแบบวาย และเดลตา ซึ่งทั้งสองแบบมีองค์ประกอบของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน วงจรที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบวายสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบวาย  
จากภาพที่ 2.10 กระแสสายแต่ละสายซึ่งจะเท่ากับกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_Y$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{V}_{an}}{\mathbf{Z}_Y} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{I}_b = \frac{\mathbf{V}_{bn}}{\mathbf{Z}_Y} = \mathbf{I}_a \angle -120^\circ \quad (2.24)$$

$$\mathbf{I}_c = \frac{\mathbf{V}_{cn}}{\mathbf{Z}_Y} = \mathbf{I}_a \angle 120^\circ \quad (2.25)$$

กระแสสายนิวทรัล  $n$  จะมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.21) จะพบว่า  $3\mathbf{I}_a^{(0)} = \mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c$  ซึ่งจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้  
ดังนี้

$$\mathbf{I}_n = 3\mathbf{I}_a^{(0)} \quad (2.27)$$

จากภาพที่ 2.10 สามารถใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดันเพื่อหาแรงดันระหว่างสาย  
ได้ดังสมการที่ (2.8)

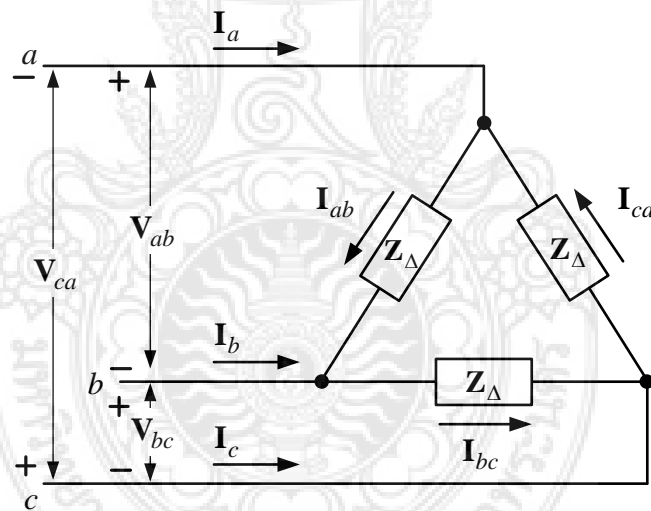
$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_{ab} &= \mathbf{V}_{an} - \mathbf{V}_{bn} \\
 \mathbf{V}_{bc} &= \mathbf{V}_{bn} - \mathbf{V}_{cn} \\
 \mathbf{V}_{ca} &= \mathbf{V}_{cn} - \mathbf{V}_{an}
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟส  $V_p$  ที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์  $Z_Y$  กับแรงดันระหว่างสาย ที่อิมพีแดนซ์  $Z_Y$  จะพบว่าขนาดของแรงดันระหว่างสายที่ไหลจะมีค่าเป็น  $\sqrt{3}$  เท่าของขนาดแรงดันเฟสที่อิมพีแดนซ์  $Z_Y$  ดังสมการที่ (2.29)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_{ab} &= \sqrt{3}V_p \angle 30^\circ \\
 \mathbf{V}_{bc} &= \sqrt{3}V_p \angle -90^\circ \\
 \mathbf{V}_{ca} &= \sqrt{3}V_p \angle 150^\circ
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

การเชื่อมต่อโดยผ่านอิมพีแดนซ์ในลักษณะแบบเดลตาจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่

2.11



ภาพที่ 2.11 วงจรที่มีลักษณะการต่อแบบเดลตา

จากภาพที่ 2.11 ใช้เคอร์เซอร์สำหรับกระแสพิจารณาที่โหนด  $a$ ,  $b$  และ  $c$  จะสามารถเขียนสมการกระแสสาย  $\mathbf{I}_a$ ,  $\mathbf{I}_b$  และ  $\mathbf{I}_c$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_a &= \mathbf{I}_{ab} - \mathbf{I}_{ca} \\
 \mathbf{I}_b &= \mathbf{I}_{bc} - \mathbf{I}_{ab} \\
 \mathbf{I}_c &= \mathbf{I}_{ca} - \mathbf{I}_{bc}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

$$\mathbf{I}_a = \sqrt{3}I_{ab}\angle -30^\circ \quad (2.31)$$

$$\mathbf{I}_b = \sqrt{3}I_{ab}\angle -150^\circ \quad (2.32)$$

$$\mathbf{I}_c = \sqrt{3}I_{ab}\angle 90^\circ \quad (2.33)$$

ดังนั้นกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์  $\mathbf{Z}_\Delta$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.34) - (2.36)

$$\mathbf{I}_{ab} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_\Delta} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{I}_{bc} = \frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_\Delta} = \mathbf{I}_{ab}\angle -120^\circ \quad (2.35)$$

$$\mathbf{I}_{ca} = \frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_\Delta} = \mathbf{I}_{ab}\angle 120^\circ \quad (2.36)$$

จากสมการกระแสเฟสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์  $\mathbf{Z}$  จะพบว่าการต่อวงจรสามเฟสแบบสตาร์ กับแบบเดลตาขนาดของกระแสสายจะเป็น  $\sqrt{3}$  เท่าของขนาดกระแสเฟส และมุมเฟสของกระแสสายจะตามหลังมุมเฟสของกระแสเฟสอยู่  $30^\circ$  และการแปลงอิมพีแดนซ์สามเฟสสมมูลแบบวาย  $\mathbf{Z}_Y$  ไปเป็นอิมพีแดนซ์สามเฟสสมมูลแบบ  $\mathbf{Z}_\Delta$  จะสามารถทำได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_{Nn} = \mathbf{Z}_{Nn} + \mathbf{I}_n = 0 \quad (2.37)$$

$$\mathbf{Z}_{AN} = \mathbf{Z}_{BN} = \mathbf{Z}_{CN} = \mathbf{Z}_Y = \frac{1}{3}\mathbf{Z}_\Delta \quad (2.38)$$

$$\mathbf{Z}_{AB} = \mathbf{Z}_{BC} = \mathbf{Z}_{CA} = \mathbf{Z}_\Delta = 3\mathbf{Z}_Y \quad (2.39)$$

### 2.3.2 อิมพีแดนซ์องค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นฟอลต์แบบไม่สมมาตรการนำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันขององค์ประกอบสมมาตรมาเป็นเครื่องมือในการสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์เพื่อจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถทำได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_a^{(012)} = \mathbf{Z}_{bus}^{(012)}\mathbf{I}_a^{(012)} \quad (2.40)$$

โดยที่  $\mathbf{V}_a^{(012)}$  คือ แรงดันในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

$\mathbf{Z}_{bus}^{(012)}$  คือ อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในรูปขององค์ประกอบสมมาตร

$\mathbf{I}_a^{(012)}$  คือ กระแสในรูปขององค์ประกอบสมมาตร



จากสมการที่ (2.40) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.41)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a^{(0)} \\ \mathbf{V}_a^{(1)} \\ \mathbf{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^{(0)} \\ \mathbf{I}_a^{(1)} \\ \mathbf{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เราสามารถแปลงค่าแรงดัน และกระแสที่อยู่ในรูปขององค์ประกอบสมมาตร (012) ไปเป็นเฟส  $abc$  ได้โดยผ่านค่าคงที่  $\mathbf{A}$  โดยสามารถหาอิมพีแดนซ์เฟสจากอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในรูปขององค์ประกอบสมมาตรได้ดังสมการที่ (2.42)

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{AZ}_{bus}^{(012)} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) สามารถหาสมการของอิมพีแดนซ์เฟสได้ดังสมการที่ (2.43)

$$\mathbf{Z}_{abc} = \frac{1}{3} \mathbf{AZ}_{bus}^{(012)} \mathbf{A}^* \quad (2.43)$$

โดยที่  $\mathbf{Z}_{abc}$  คือ อิมพีแดนซ์เฟส ซึ่งเราสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์จะได้

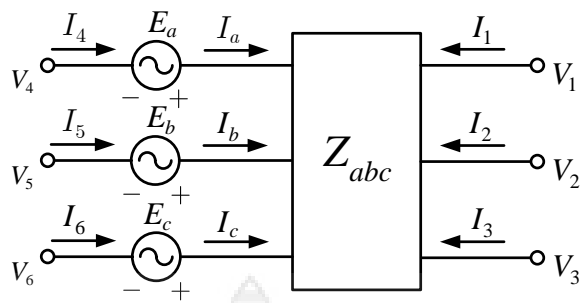
$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{aa} & \mathbf{Z}_{ab} & \mathbf{Z}_{ac} \\ \mathbf{Z}_{ba} & \mathbf{Z}_{bb} & \mathbf{Z}_{bc} \\ \mathbf{Z}_{ca} & \mathbf{Z}_{cb} & \mathbf{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

จากสมการที่ (2.41) การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฟส แรงดันเฟส และอิมพีแดนซ์เฟสของระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ดังสมการที่ (2.45)

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{abc} \quad (2.45)$$

### 2.3.3 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าสามเฟส

องค์ประกอบทั่วไปในระบบสามเฟสประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันในแต่ละเฟส โดยที่กำหนดให้แรงดันในเฟส  $a$  คือ  $E_a$ , แรงดันในเฟส  $b$  คือ  $E_b$  และแรงดันในเฟส  $c$  คือ  $E_c$  ซึ่งในแต่ละเฟสมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา และต่ออยู่กับอิมพีแดนซ์เฟส ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 องค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส

จากภาพที่ 2.12 เราจะพบว่า มีโหนดทั้งหมด 6 โหนด โดยที่เรากำหนดแรงดันในแต่ละโหนด เป็น  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  และ  $V_6$  และมีกระแสไหลตามลูกศรที่กำหนดในภาพ ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้ สามารถหาความสัมพันธ์โดยจะเริ่มจาก

$$V_{abc} = E_{abc} - Z_{abc}I_{abc} \quad (2.46)$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

โดยที่  $E_{abc}$  คือ แรงดันที่ผลิตได้ในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.48)

$$[E_{abc}] = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเราสามารถแทนสมการที่ (2.47) และ (2.48) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้สมการที่ (2.49)

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

จากภาพที่ 2.12 เมื่อเราพิจารณาทิศทางของกระแสในส่วนต่าง ๆ เราจะได้กระแสในแต่ละเฟส ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\begin{aligned}
 I_a &= -I_1 = I_4 \\
 I_b &= -I_2 = I_5 \\
 I_c &= -I_3 = I_6
 \end{aligned}
 \tag{2.50}$$

จากสมการที่ (2.50) เราสามารถหาค่ากระแสในแต่ละเฟสได้จากการย้ายตัวแปร  $E_{abc}$  และ  $Z_{abc}$  ทางขวามือให้มาอยู่ทางซ้ายมือ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.51)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.51}$$

โดยที่  $[Y_{abc}] = [Z_{abc}]^{-1}$

จากกระแส  $I_1, I_2$  และ  $I_3$  ในสมการที่ (2.50) แทนลงใน  $I_a, I_b$  และ  $I_c$  ของสมการที่ (2.51) จะได้สมการที่ (2.52)

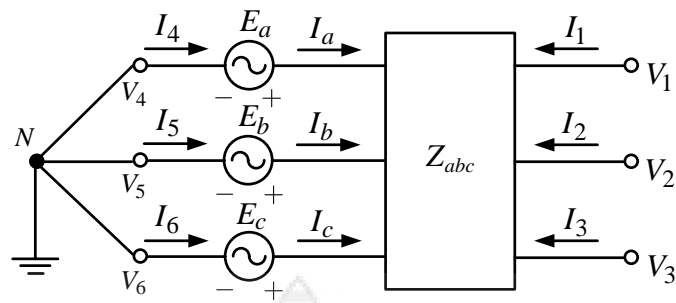
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -[Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} + [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.52}$$

จากกระแส  $I_4, I_5$  และ  $I_6$  แทนลงใน  $I_a, I_b$  และ  $I_c$  ของสมการที่ (2.51) จะได้สมการที่ (2.53)

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.53}$$

### เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบวายลงกราวด์

จากภาพที่ 2.12 ถ้าเรานำโนดที่ 4, 5 และ 6 มาต่อร่วมกันแล้วลงกราวด์ โดยแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งเป็นการแทนเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์



ภาพที่ 2.13 เครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบพิกัดเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์

จากภาพที่ 2-3 เมื่อนำโหนดที่ 4, 5, และ 6 มาต่อรวมกัน และลงกราวด์ที่โหนด  $N$  ซึ่งเราพิจารณาจากภาพพบว่าในสภาวะปกติคือ ในสภาวะที่โหลดสมดุล จะได้

$$\begin{aligned} I_N &= I_4 + I_5 + I_6 = 0 \\ V_N &= V_4 = V_5 = V_6 = 0 \\ E_N &= E_a + E_b + E_c = 0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) เราสามารถลดรูปมาเป็นสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - [Y_{abc}] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.55)$$

โดยที่  $y^{(1)}$  คือ แอดมิตแตนซ์ลำดับบวก

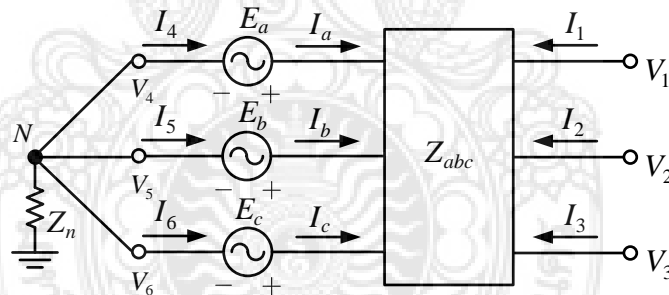
จากสมการที่ (2.55) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคุณลบนหนึ่งเข้าทางขวามือของสมการที่ (2.55) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในสมการที่ (2.56)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้ามีลักษณะการต่อหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  เราไม่สามารถนำสมการที่ (2.55) และ (2.56) ไปใช้งานได้ ดังนั้นเราจึงสามารถอธิบายรูปแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีทีโหนด  $N$  ต่อลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  ได้ดังต่อไปนี้

#### เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ $Z_n$

เราสามารถอธิบายในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีลักษณะการต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  ให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$

จากสมการที่ (2.54) เมื่อพิจารณากรณีโหนด  $N$  ลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  เราสามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} + Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

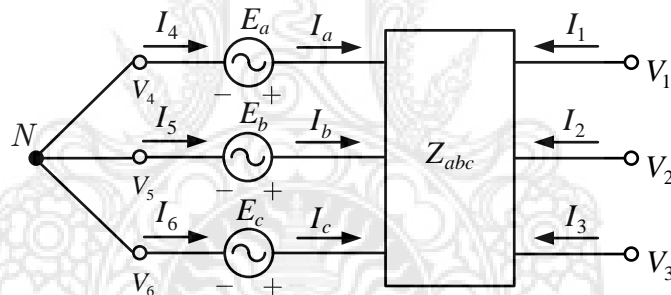
โดยที่  $y^{(0)}$  คือ แอดมิตแตนซ์ลำดับศูนย์

จากสมการที่ (2.57) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบวายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคุณลบหนึ่งเข้าทางขวามือของสมการที่ (2.57) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2.58)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} + Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

### เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด $N$ ไม่ต่อลงกราวด์

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีลักษณะการต่อแบบวายโดยที่โนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์

จากภาพที่ 2.15 เราสามารถหาสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่โนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ได้คล้ายกับสมการที่ (2.58) เพียงแต่ไม่มีในส่วนของ  $Y_n$  ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่โนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y^{(1)} E_a \\ y^{(1)} E_b \\ y^{(1)} E_c \\ -y^{(0)} E_N \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

จากสมการที่ (2.59) เป็นสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อแบบววาย โดยที่โนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยคูณลบหนึ่ง เข้าทางขวามือของสมการที่ (2.59) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในสมการที่ (2.60)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -y^{(0)} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -y^{(0)} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -y^{(0)} \\ -y^{(0)} & -y^{(0)} & -y^{(0)} & 3y^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y^{(1)}E_a \\ y^{(1)}E_b \\ y^{(1)}E_c \\ -y^{(0)}E_N \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

จากสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  และ เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายกรณีโนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ จะมีขนาดของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ เพิ่มขึ้น 1 แถว และ 1 หลัก เมื่อเรานำไปสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบจะทำให้เมตริกซ์มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการลดรูปเมตริกซ์ คือ กำจัดแถว และหลักของโนด  $N$  ซึ่งเราสามารถกำจัดแถวและหลักโดยใช้วิธีการกำจัดแบบครอน (Kron Reduction) ได้ดังนี้

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk(old)} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (2.61)$$

โดยที่  $Y_{jk(new)}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ใหม่ที่ตำแหน่งแถว  $j$  และ คอลัมน์  $k$   
 $Y_{jk(old)}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์เก่า ที่ตำแหน่งแถว  $j$  และ คอลัมน์  $k$   
 $Y_{jp}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว  $j$  และ คอลัมน์  $p$   
 $Y_{pk}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว  $p$  และ คอลัมน์  $k$   
 $Y_{pp}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ที่ต้องกำจัด ที่ตำแหน่งแถว  $p$  และ คอลัมน์  $p$   
 $j, k = 1$  ถึง  $N$  ;  $j, k \neq p$

จากสมการที่ (2.61) เมื่อเราพิจารณาในส่วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  เราสามารถลดรูปสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบววายลงกราวด์โดยผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_n$  ด้วยวิธีการกำจัดแบบครอนได้ดังสมการที่ (2.62)

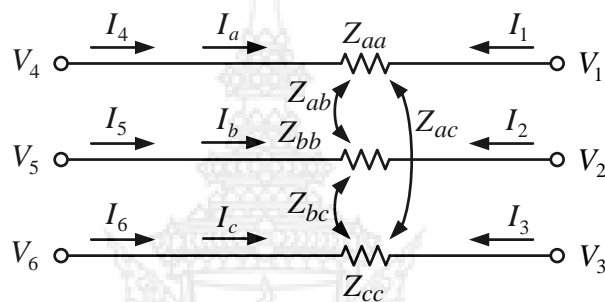
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} + Z_n & Z_{ab} + Z_n & Z_{ac} + Z_n \\ Z_{ba} + Z_n & Z_{bb} + Z_n & Z_{bc} + Z_n \\ Z_{ca} + Z_n & Z_{cb} + Z_n & Z_{cc} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อเราใช้วิธีการกำจัดแบบครอนลด์รูปสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต่อแบบวายกรณีโหนด  $N$  ไม่ต่อลงกราวด์ เราจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.63)

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

### สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

อิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 สายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากภาพที่ 2-6 สังเกตได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับภาพองค์ประกอบทั่วไปของระบบสามเฟส เพียงแต่ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเราสามารถหาแรงดันตกคร่อมในแต่ละเฟสได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (V_4 - V_1) &= Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c \\ (V_5 - V_2) &= Z_{ba}I_a + Z_{bb}I_b + Z_{bc}I_c \\ (V_6 - V_3) &= Z_{ca}I_a + Z_{cb}I_b + Z_{cc}I_c \end{aligned} \quad (2.64)$$

สามารถจัดรูปสมการที่ (2.64) ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.65)

$$\begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

จากภาพที่ 2.16 ได้กำหนดทิศทางของกระแสตามลูกศร ซึ่งเราสามารถหากระแสได้ตามทิศทางของลูกศรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_a &= -I_1 = I_4 \\ I_b &= -I_2 = I_5 \\ I_c &= -I_3 = I_6 \end{aligned} \quad (2.66)$$

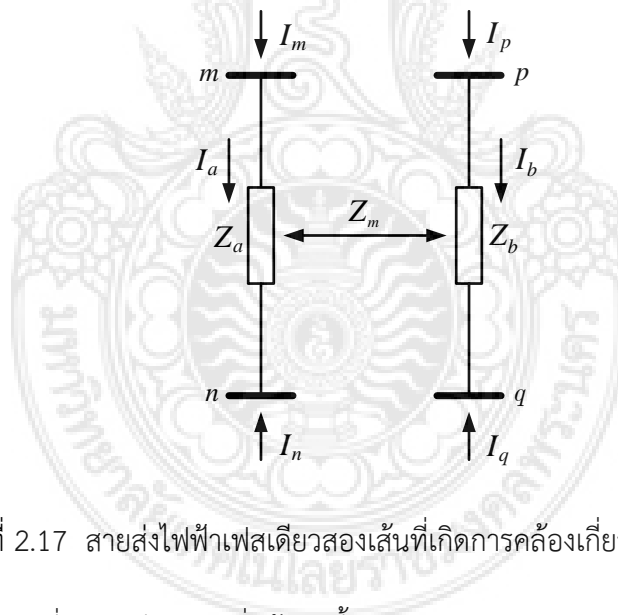


จากสมการที่ (2.65) เราสามารถหาสมการของกระแสในแต่ละโนดของสายส่งโดยนำสมการที่ (2.66) แทนลงในสมการที่ (2.67) เราจะได้สมการของกระแสในแต่ละโนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -[Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = [Y_{abc}] \begin{bmatrix} V_4 - V_1 \\ V_5 - V_2 \\ V_6 - V_3 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

กรณีในระบบมีอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส การหาแอดมิตแตนซ์เฟสของสายส่ง เราสามารถเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สายส่งเฟสเดียวสองเส้นที่มีการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สายส่งไฟฟ้าเฟสเดียวสองเส้นที่เกิดการคล้องเกี่ยวกันระหว่างเฟส

จากภาพที่ 2.17 มีสมการเริ่มต้นดังนี้

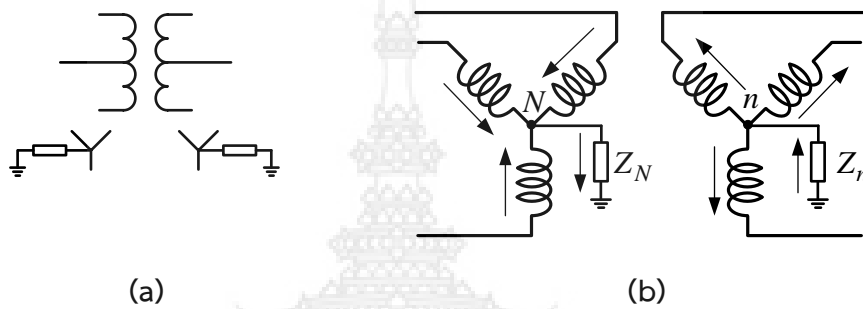
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$\begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.70)$$

**ลักษณะการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ**

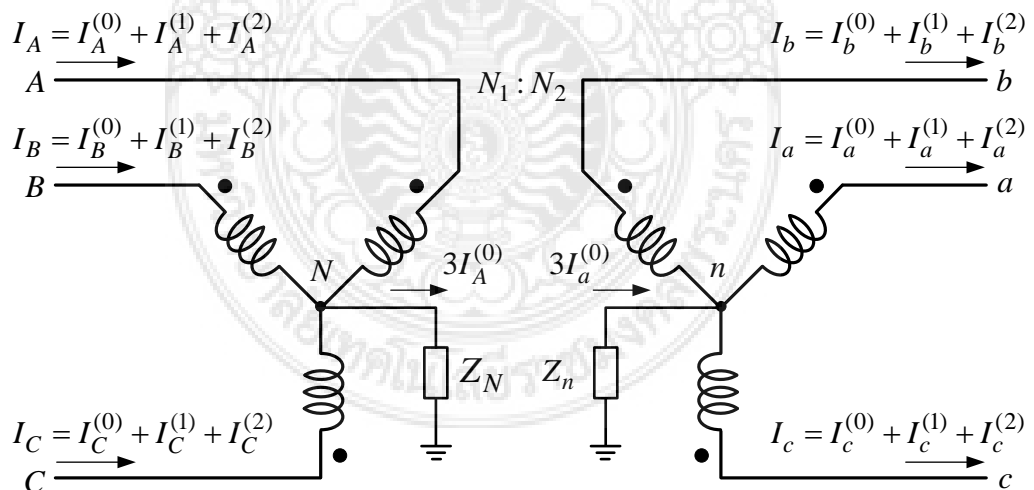
ภาคอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยถูกเชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวส่งผ่านพลังงาน ซึ่งการต่อลงดินด้านจ่ายโหลดของหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้าจะมีผลต่อวงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้คำนวณหากระแสลัดวงจรลงดินเพื่อวิเคราะห์แรงดันตกขณะเกิดลัดวงจร โดยลักษณะการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

**การต่อแบบวาย - ยาย**



ภาพที่ 2.18 การต่อหม้อแปลงแบบวาย - ยาย ลงดินทั้งสองด้าน

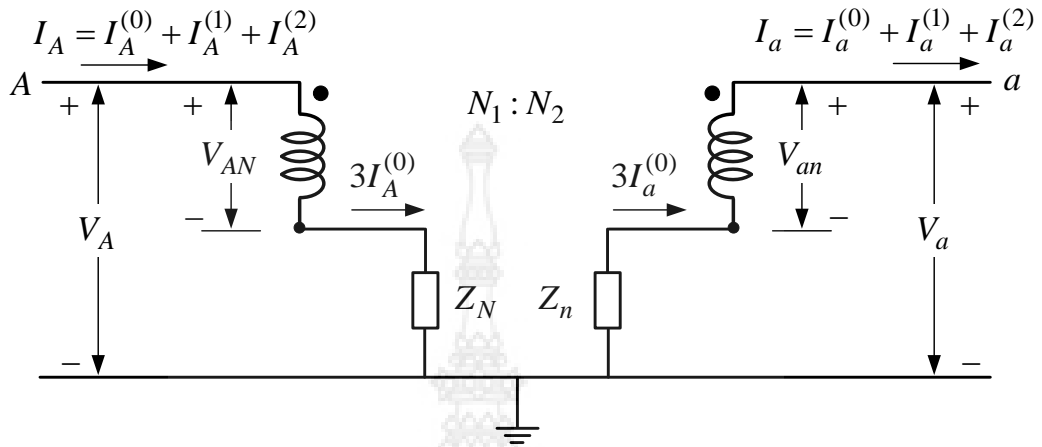
การต่อหม้อแปลงแบบวาย - ยาย มีสัญลักษณ์ดังภาพที่ 2.18 (a) ส่วนภาพที่ 2.18 (b) เป็นไดอะแกรมการเชื่อมต่อขดลวดเฟสภายในตัวหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย - ยาย ลงดินทั้งสองด้าน

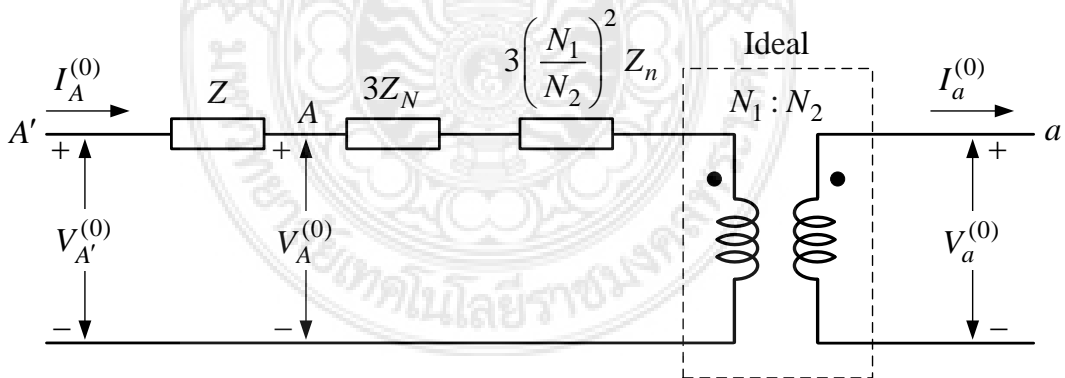
จากภาพที่ 2.19 การเชื่อมต่อขดลวดสามเฟสผ่านอิมพีแดนซ์ลงดินและพบว่าการต่อขดลวดแบบวาย - ยายโดยมีจุดนิวทรัลต่อลงดินจะทำให้กระแสลำดับศูนย์ด้านปฐมภูมิไหลลงดิน ซึ่ง

การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ต่อขดลวดแบบวาย - วาย จะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.20



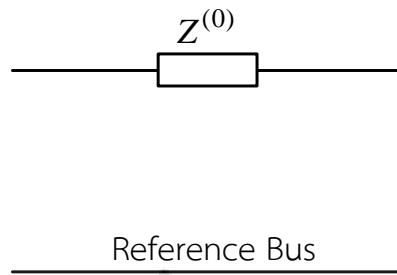
ภาพที่ 2.20 การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงแบบวาย - วาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.20 พบว่ากระแสลำดับศูนย์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำลำดับศูนย์ที่ขดลวดทุติยภูมิจึงทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ไหลออกทางด้านทุติยภูมิ เหตุนี้จึงทำให้วงจรลำดับศูนย์ของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเชื่อมต่อกันผ่านอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายเป็นวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 2.21



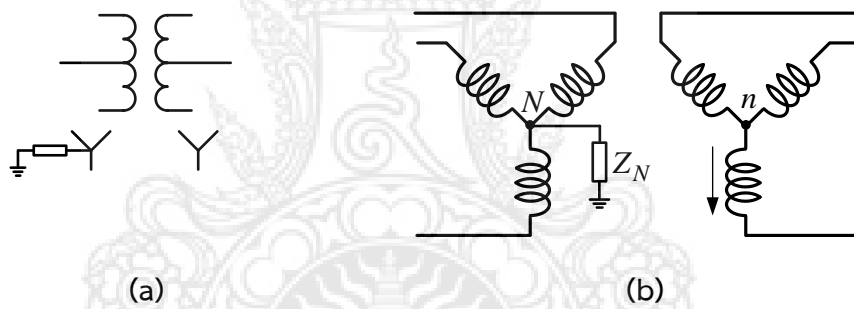
ภาพที่ 2.21 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย - วาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.21 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย - วาย ลงดินทั้งสองด้านสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.22



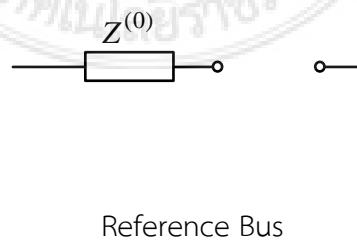
ภาพที่ 2.22 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินทั้งสองด้าน

จากภาพที่ 2.21 หากหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเชื่อมต่อลงดินโดยผ่านตัวรีแอกเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ทั้งสองฝั่งจะต้องถูกคูณด้วยสามก่อนที่จะนำมารวมกับค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงก็จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรลำดับศูนย์ แต่ในกรณีที่หม้อแปลงต่อขดลวดเป็นแบบวาย – วาย โดยที่ด้านปฐมภูมิต่อลงดินเพียงด้านเดียว ดังภาพที่ 2.23



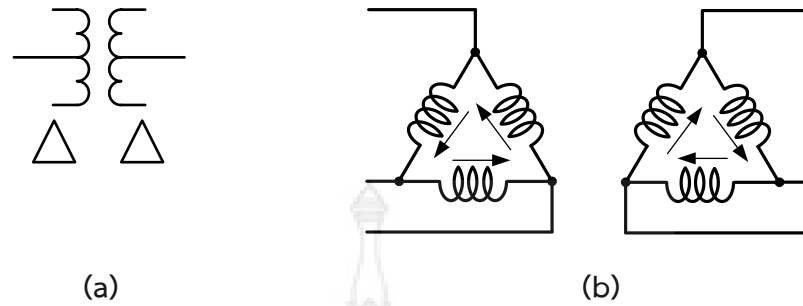
ภาพที่ 2.23 การต่อหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิ

จากภาพที่ 2.23 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐมภูมิสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.24



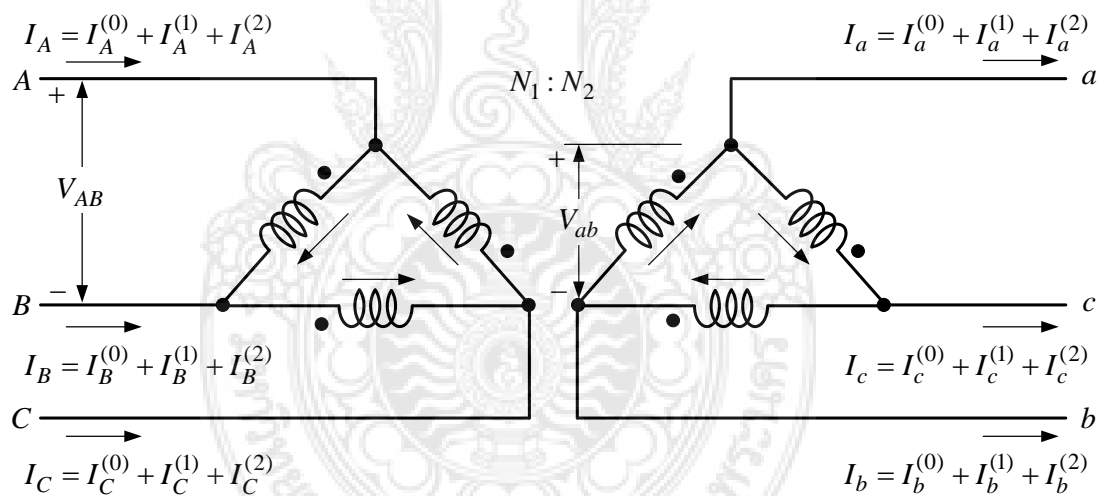
ภาพที่ 2.24 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวาย – วาย ลงดินด้านปฐม

## การต่อแบบเดลตา - เดลตา



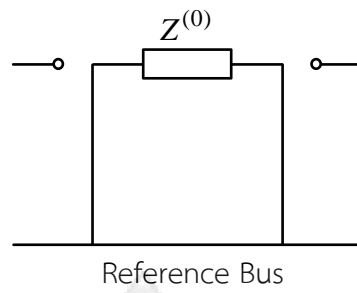
ภาพที่ 2.25 การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

การต่อหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา มีสัญลักษณ์ดังภาพที่ 2.25 (a) ส่วนภาพที่ 2.25 (b) เป็นไดอะแกรมการเชื่อมต่อขดลวดเฟสภายในตัวหม้อแปลง ซึ่งจะสามารถอธิบายการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 2.26



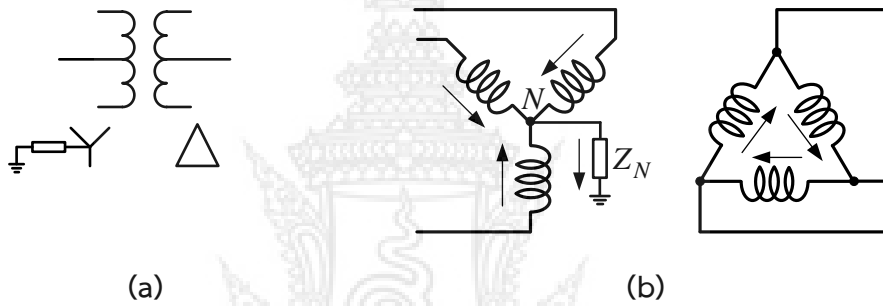
ภาพที่ 2.26 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

จากภาพที่ 2.26 หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลตา - เดลตา สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.27

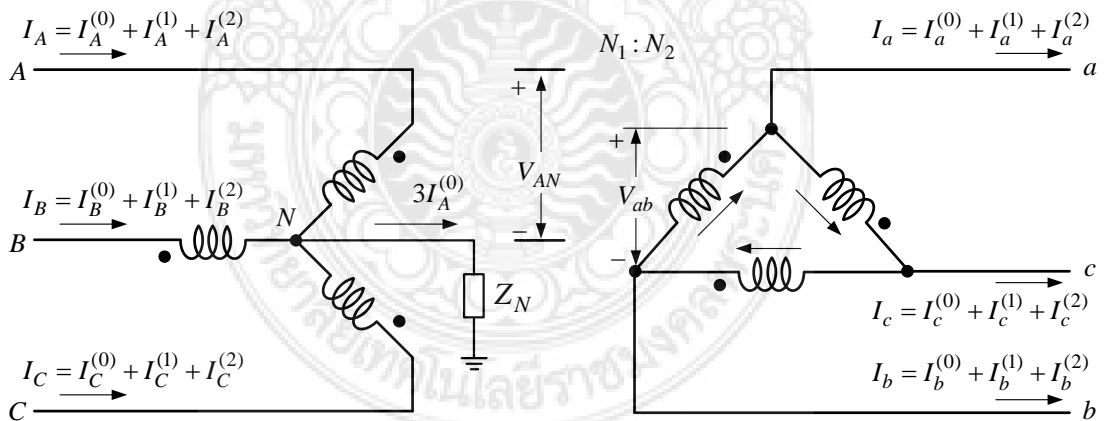


ภาพที่ 2.27 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบเดลตา - เดลตา

การต่อแบบวาย - เดลตา

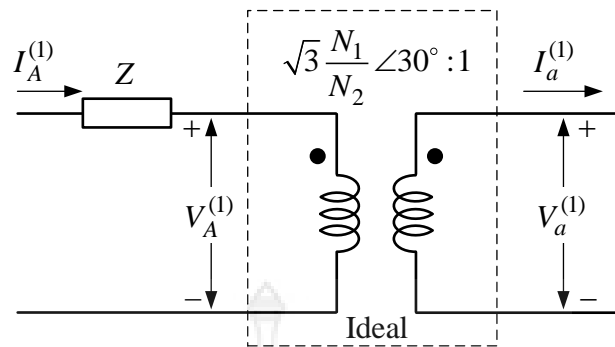


ภาพที่ 2.28 การต่อหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

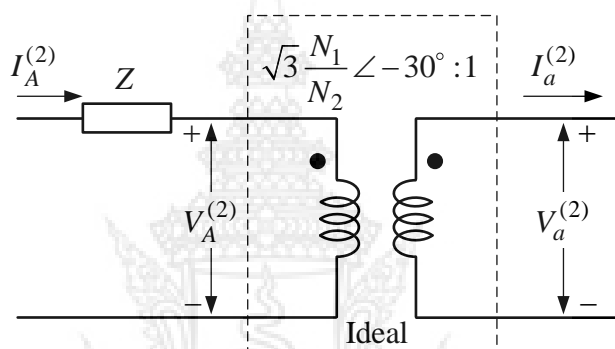


ภาพที่ 2.29 การเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลง สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.30



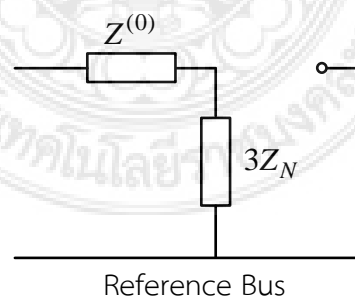
(a)



(b)

ภาพที่ 2.30 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

จากภาพที่ 2.30 หม้อแปลงที่มีการต่อลวดแบบวายลงดิน - เดลตา สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลขององค์ประกอบลำดับศูนย์ได้ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 องค์ประกอบลำดับศูนย์ของหม้อแปลงแบบวายลงดิน - เดลตา

จากวงจรสมมูลของการต่อลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวาย - วาย แบบวาย - เดลตา แบบเดลตา - วาย และแบบเดลตา - เดลตา สามารถเขียนเป็นสมการอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.71)$$

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.72)$$

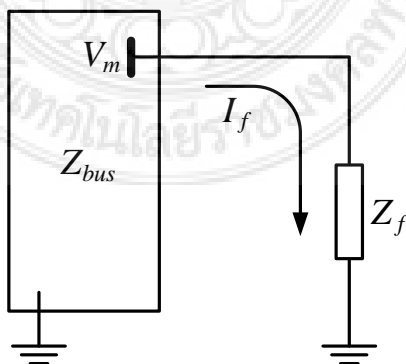
$$\left| \frac{V_{LL}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.73)$$

$$\left| \frac{V_{LN}}{V_{ln}} \right| = \frac{N_1 / \sqrt{3}}{N_2 / \sqrt{3}} \quad ; \quad \left| \frac{V_{LL}}{V_{ll}} \right| = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.74)$$

- โดยที่  $V_{LL}$  คือ line to line voltage on the primary  
 $V_{ll}$  คือ line to line voltage on the secondary  
 $V_{LN}$  คือ line to neutral voltage on the primary  
 $V_{ln}$  คือ line to neutral voltage on the secondary  
 $N_1$  คือ number of turn on the primary  
 $N_2$  คือ number of turn on the secondary

#### 2.4 การวิเคราะห์การลัดลงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

การเกิดฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดินเป็นการเกิดฟอลต์ที่พบบ่อยสุดในระบบไฟฟ้า โดยที่การวิเคราะห์ฟอลต์ประเภทนี้เราสามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 วงจรสมมูลการเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน



จากภาพที่ 2.32 เราสามารถกำหนดให้  $I_f = I_a$  ซึ่ง  $I_f$  เป็นกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า และเกิดการลัดวงจรจากบัส  $m$  ลงกราวด์  $g$  ขณะเกิดฟอลต์มี  $Z_f$  เป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากฟอลต์ โดยให้  $Z_f = Z_a$  ในที่นี้บัส  $n$  ก็คือบัสที่ลงกราวด์  $g$  นั้นเอง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.75)

$$[Z_f + (Z_{mm} - Z_{mg}) - (Z_{gm} - Z_{gg})]I_f = (V_m - V_g) \quad (2.75)$$

โดยที่  $Z_{mg}, Z_{gm}$  คือ อิมพีแดนซ์ระหว่างบัส  $m$  กับ กราวด์ ไม่มีค่า จึงให้เท่ากับศูนย์  
 $Z_{gg}$  คือ อิมพีแดนซ์ของกราวด์ ไม่มีค่า จึงให้เท่ากับศูนย์  
 $V_g$  คือ แรงดันของกราวด์เท่ากับศูนย์

จากสมการที่ (2.75) เมื่อเราแทนตัวแปรที่กำหนดให้ข้างต้นเราจะสามารถหาสมการของกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินได้ดังสมการที่ (2.76)

$$I_f = \frac{V_m}{(Z_{mm} + Z_f)} \quad (2.76)$$

เมื่อเราได้ค่าของกระแสฟอลต์แล้วเราสามารถหาแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละบัสโดยใช้สมการดังนี้

$$\Delta V = V' - V = -Z_{bus} A_c^T [I_f] \quad (2.77)$$

จากสมการที่ (2.77) ในเทอมของ  $Z_{bus}$  เราสามารถนำหลักที่  $m$  ของ  $Z_{bus}$  มาใช้ในการคำนวณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังสมการที่ (2.78)

$$\Delta V = -Z_{bus}^{(m)} \times I_f \quad (2.78)$$

โดยที่  $(m)$  คือ บัสและเฟสที่เกิดฟอลต์

เพราะฉะนั้นแรงดันใหม่ที่บัสแต่ละบัสจะหาได้ดังนี้

$$V' = V + \Delta V \quad (2.79)$$

### บทที่ 3

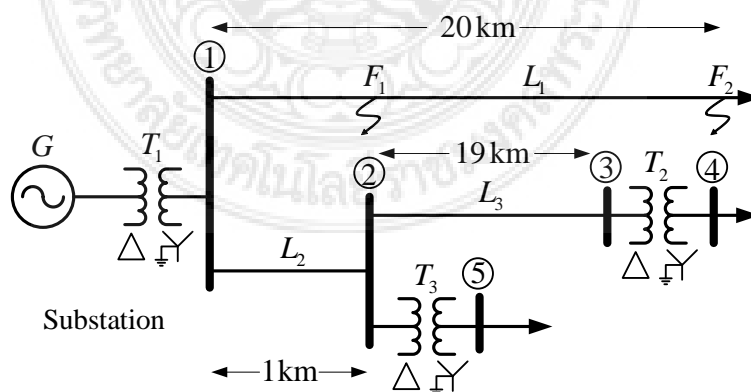
## การจำลองต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

### 3.1 บทนำ

ฟอลต์ (Fault) หรือความผิดปกติ คือเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอาจมีสาเหตุมาจากธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า หรือสาเหตุภายในระบบไฟฟ้า เช่น การปิด - เปิดเบรกเกอร์ โดยที่ฟอลต์จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อชีวิต ฟอลต์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบสมมาตร หรือแบบไม่สมมาตร และอาจเกิดขึ้นได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้าแต่ส่วนมากจะเกิดที่สายส่งเหนือดิน (Overhead Line) โดยฟอลต์ที่พบบ่อยสุดเป็นเหตุการณ์ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินซึ่งขณะเกิดลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งผู้ใช้ไฟที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบดังกล่าว โดยที่ขณะเกิดลัดวงจรจะเกิดแรงดันตกซึ่งเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้านำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

### 3.2 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินได้ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองในงานวิจัยนี้ โดยระบบการต่อลงดินคือการต่อที่จุดนิวทรัล (Neutral) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะเป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบไฟฟ้ากับจุดอ้างอิงของค่าแรงดันไฟฟ้า การแบ่งแยกขอบเขตของระบบ การต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะเริ่มจากหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้า ซึ่งระบบที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV แบบรัศมี (Radial) โดยกำหนดให้เกิดลัดวงจรที่สายจำหน่าย  $L_1$  ซึ่งตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร  $F_1$  และ  $F_2$  จะอยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ 20 กิโลเมตร ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV

จากภาพที่ 3.1 สายจำหน่ายของระบบ 22 kV เป็นสายแบบ Partial Insulated Cable, PIC ขนาด 185 mm<sup>2</sup> ความถี่ 50 Hz โดยที่สายจำหน่าย L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> และ L<sub>3</sub> มีระยะทาง 20, 1 และ 19 กิโลเมตร ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ของสายจำหน่ายสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายจำหน่ายระบบ 22 kV

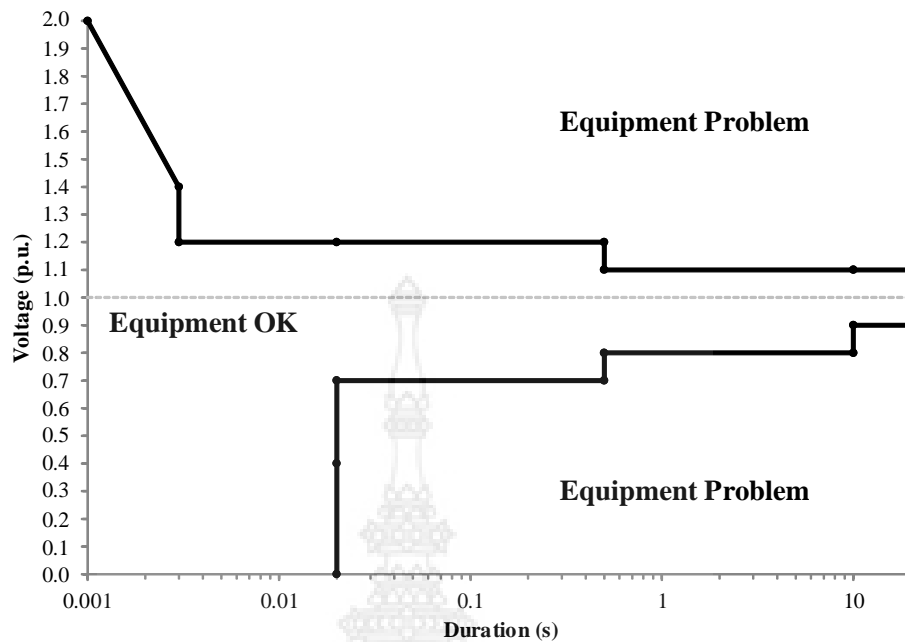
ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	Sequence	Resistance (ohm/km)	Reactance (ohm/km)	Susceptance (S/km)
185	Positive	0.214410	0.224010	5.3076E-6
	Zero	0.459940	1.755800	1.7886E-6

จากภาพที่ 3.1 หม้อแปลงในระบบจำหน่าย T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> และ T<sub>3</sub> สามารถแสดงพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลง	พิกัด กำลังไฟฟ้า	พิกัด แรงดันไฟฟ้า	การต่อขดลวด	Reactance (p.u.)
T <sub>1</sub>	50 MVA	115 kV/22 kV	DYn11	0.1
T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub>	0.1 MVA	22 kV/400 V	DYn11	0.1

โดยที่ผลจากการจำลองเหตุการณ์ต่อลงดิน สามารถนำมาคำนวณระยะเวลาในการกำจัดกระแสลัดวงจร เพื่อแสดงให้อยู่ในรูปแบบตามกราฟมาตรฐาน ITIC (The Information Technology Industry Council) ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าตามกราฟมาตรฐาน ITIC

จากภาพที่ 3.2 สามารถคำนวณหาเวลาในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้ตั้งสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2)

$$t(I) = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^n - 1} \times TMS \quad (3.1)$$

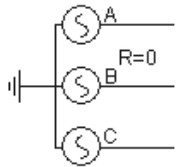
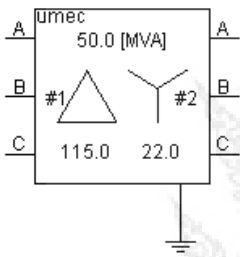
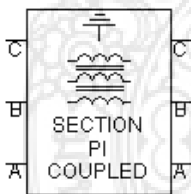

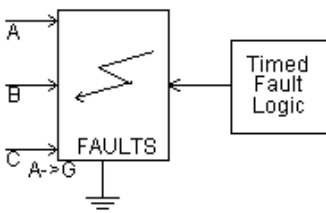
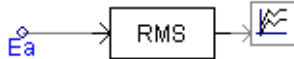
$$t_c = t(I) + 100 \text{ ms} \quad (3.2)$$

โดยที่	$t(I)$	คือ Interruption time
	$I$	คือ Short-circuit current
	$I_p$	คือ Pickup current
	$TMS$	คือ Time multiplier
	$K$	คือ Family factor
	$n$	คือ Characteristic type factor
	$t_c$	คือ Clearing time

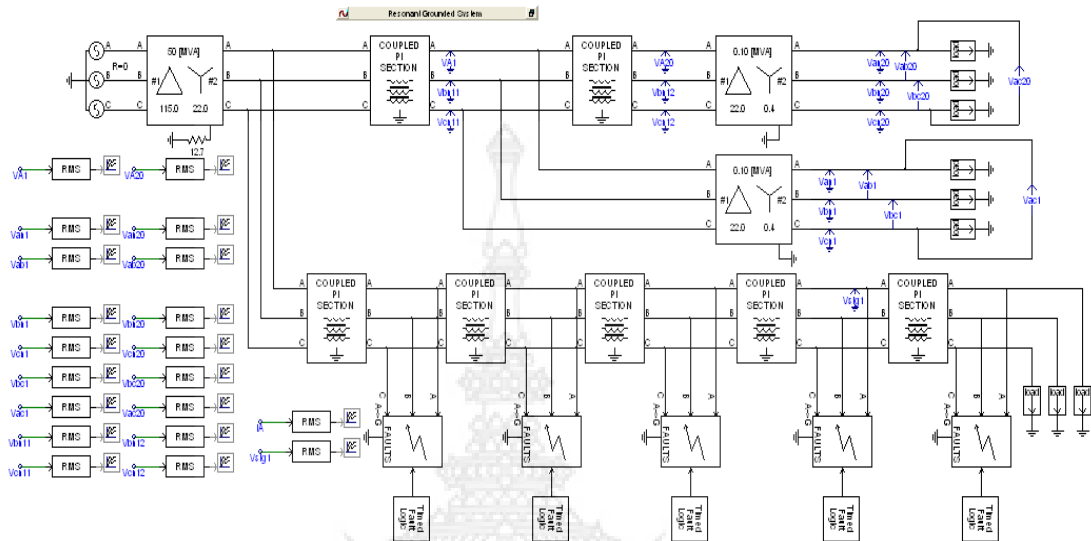
### 3.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตก ซึ่งเราสามารถอธิบายถึงเครื่องมือเบื้องต้นที่นำมาใช้ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้า

เครื่องมือ	รายละเอียดแบบจำลอง
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
	หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส
	สายส่ง
	โหลด
	เหตุการณ์ลัดวงจร
	เครื่องมือวัดที่แสดงผลเป็น RMS

จากตารางที่ 3.3 สามารถเลือกเครื่องมือเพื่อจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.3



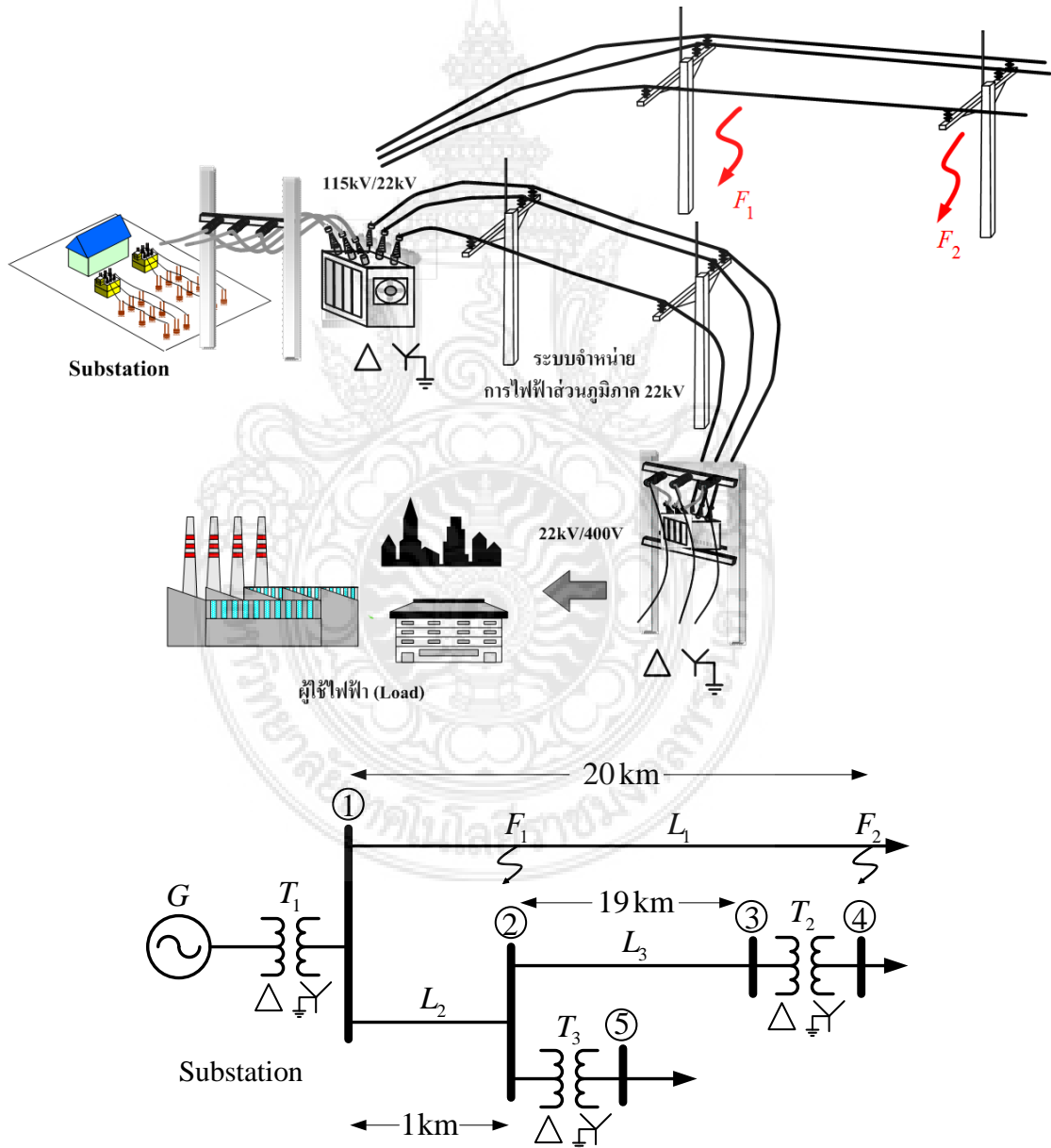
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองการต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

## บทที่ 4

### ผลการจำลองระบบต่อลงดิน

#### 4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้จำลองให้เกิดการลัดวงจรเพียงแบบเดียวคือหนึ่งเฟสลงดินและได้ทำการจำลองเหตุการณ์ต่อลงดินที่หม้อแปลงในสถานีไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยพิจารณาผลของแรงดันไฟฟ้าตกที่สายจำหน่ายใกล้เคียง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4.1

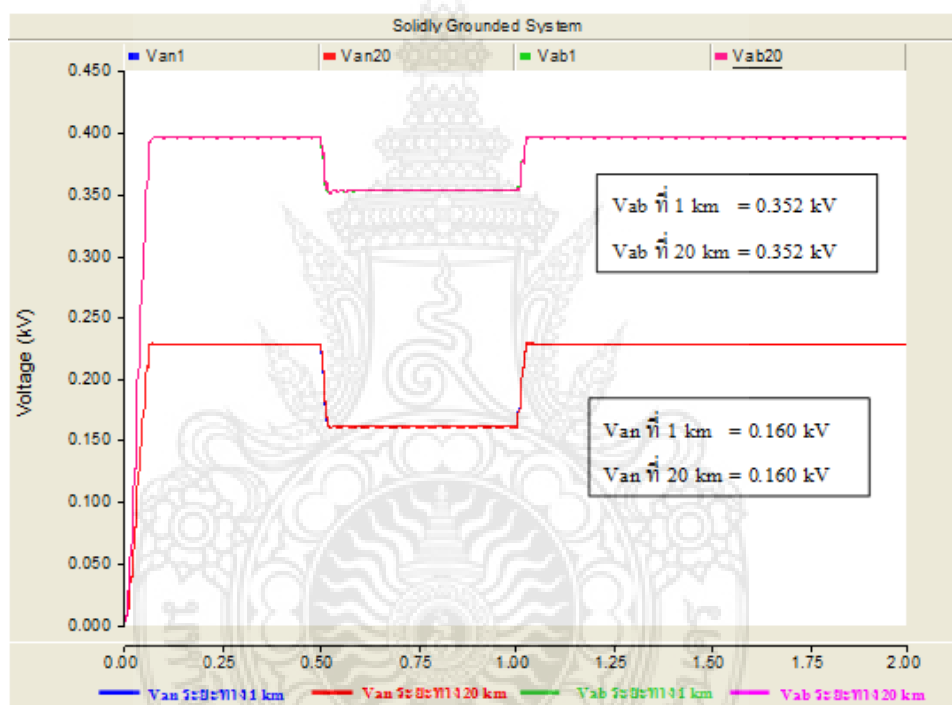


ภาพที่ 4.1 การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.1 สามารถทำการจำลองเพื่อศึกษาการต่อลงดินที่ระบุไว้ในงานวิจัยนี้ได้ 4 กรณี คือ ระบบต่อลงดินโดยตรง ระบบไม่ต่อลงดิน ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน และระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์ ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 4.2 กรณีระบบต่อลงดินโดยตรง

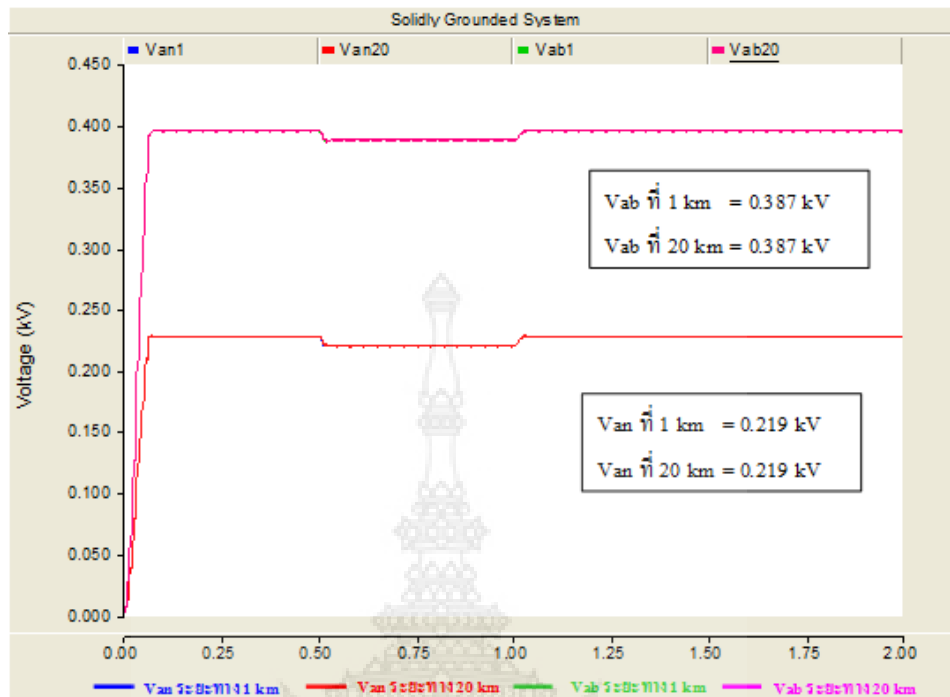
การศึกษาในเหตุการณ์นี้ได้จำลองให้หม้อแปลงไฟฟ้า  $T1$ ,  $T2$  และ  $T3$  ต่อลงดินโดยตรง จากนั้นเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F1$  ห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ  $F2$  ห่างจากสถานีไฟฟ้า 20 กิโลเมตร ตามลำดับ และทำการวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.2 และ 4.3



ภาพที่ 4.2 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F1$

จากภาพที่ 4.2 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.352 kV และ 0.160 kV ตามลำดับ และเมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F2$  สามารถแสดงผลการจำลองของแรงดัน ไฟฟ้าตกได้ดังภาพที่ 4.3





ภาพที่ 4.3 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2

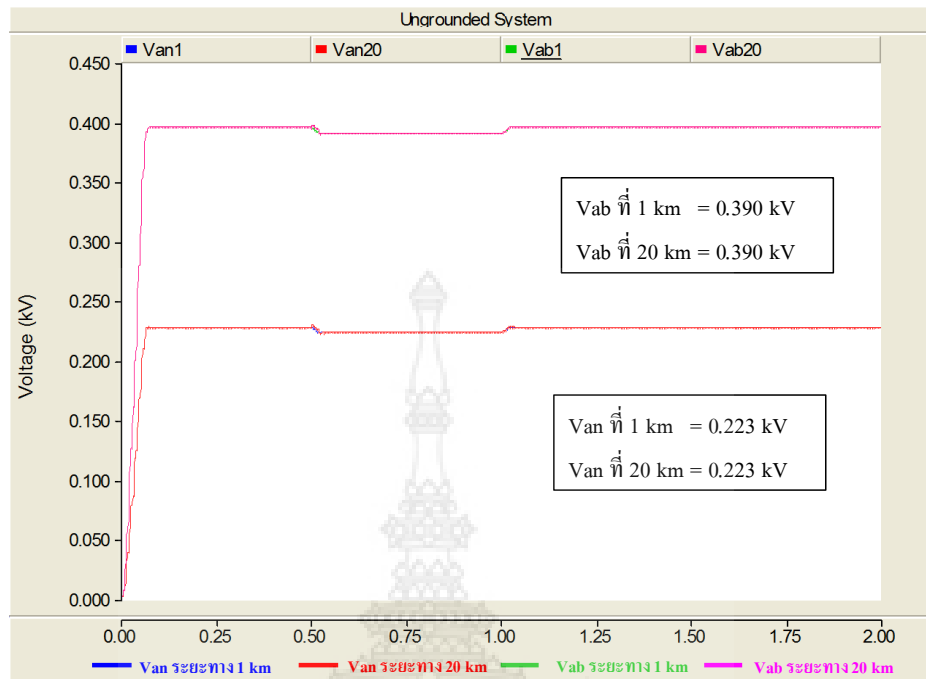
จากภาพที่ 4.3 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.387 kV และ 0.219 kV ตามลำดับ และสามารถแสดงเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยตรง

ตำแหน่ง	Bus 4		Bus 5	
	Vab	Van	Vab	Van
F1	0.352 kV	0.160 kV	0.352 kV	0.160 kV
F2	0.387 kV	0.219 kV	0.387 kV	0.219 kV

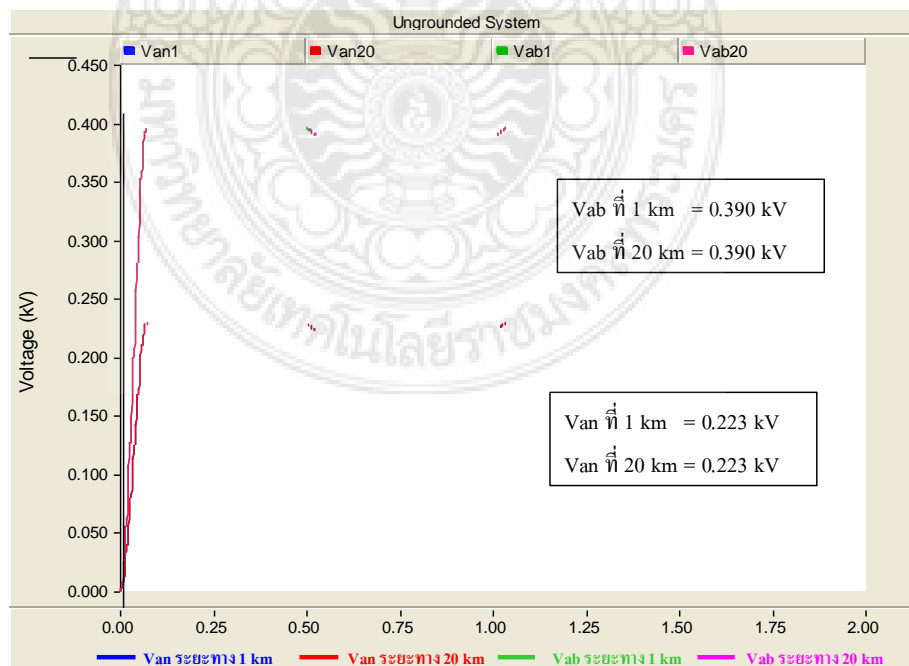
#### 4.3 กรณีระบบไม่ต่อลงดิน

การศึกษาในเหตุการณ์นี้ได้จำลองให้หม้อแปลงไฟฟ้า T1 ไม่มีการต่อลงดิน ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้า T2 และ T3 มีการต่อลงดินโดยตรง จากนั้นเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 ห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ F2 ห่างจากสถานีไฟฟ้า 20 กิโลเมตร ตามลำดับ และทำการวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.4 และ 4.5



ภาพที่ 4.4 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1

จากภาพที่ 4.4 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.390 kV และ 0.223 kV ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2

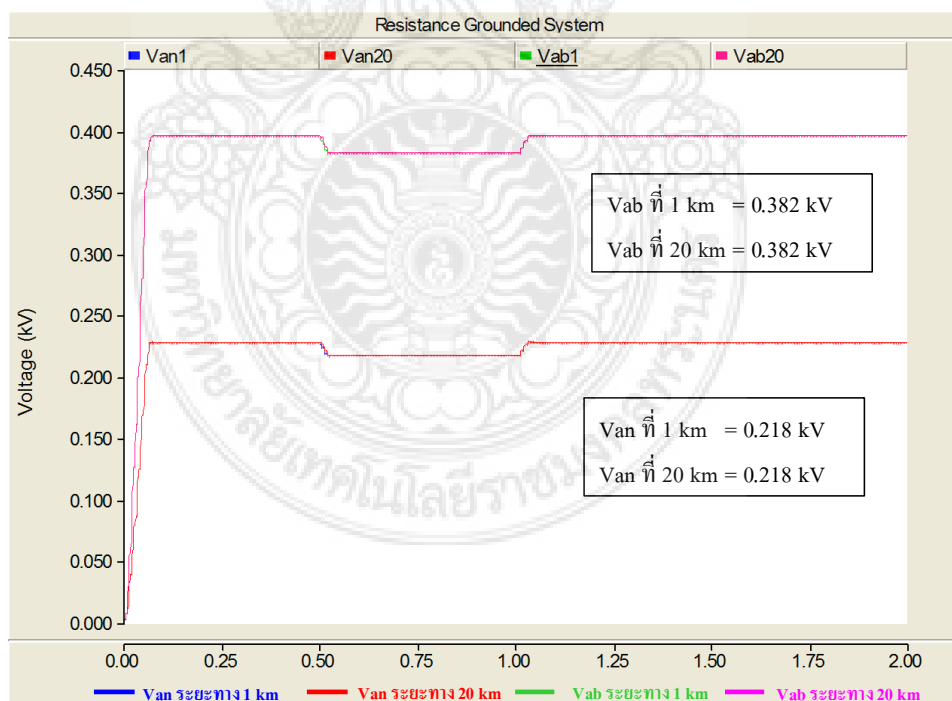
จากภาพที่ 4.5 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.390 kV และ 0.223 kV ตามลำดับ และสามารถแสดงเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบไม่ต่อลงดิน

ตำแหน่ง	Bus 4		Bus 5	
	Vab	Van	Vab	Van
F1	0.390 kV	0.223 kV	0.390 kV	0.223 kV
F2	0.390 kV	0.223 kV	0.390 kV	0.223 kV

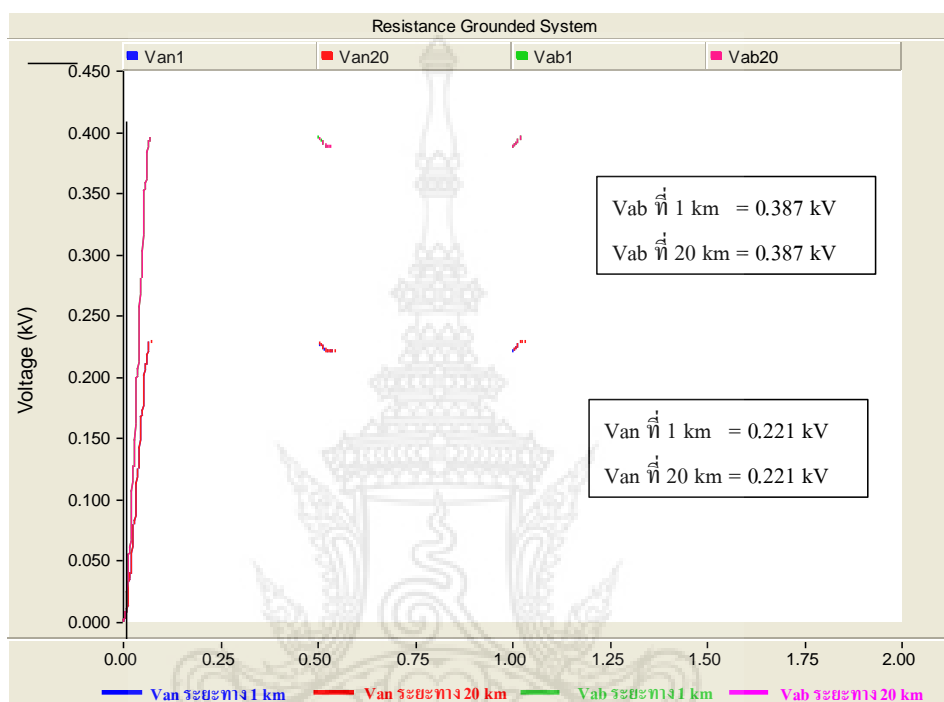
#### 4.4 กรณีระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน

การศึกษาในเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานได้จำลองให้หม้อแปลงไฟฟ้า T1 มีการต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน Neutral Ground Resistor, NGR มีค่าเท่ากับ  $12.7 \Omega$  ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้า T2 และ T3 มีการต่อลงดินโดยตรง จากนั้นเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 ห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ F2 ห่างจากสถานีไฟฟ้า 20 กิโลเมตร ตามลำดับ และทำการวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.6 และ 4.7



ภาพที่ 4.6 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1

จากภาพที่ 4.6 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.382 kV และ 0.218 kV ตามลำดับ และเมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2 สามารถแสดงผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าตกได้ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2

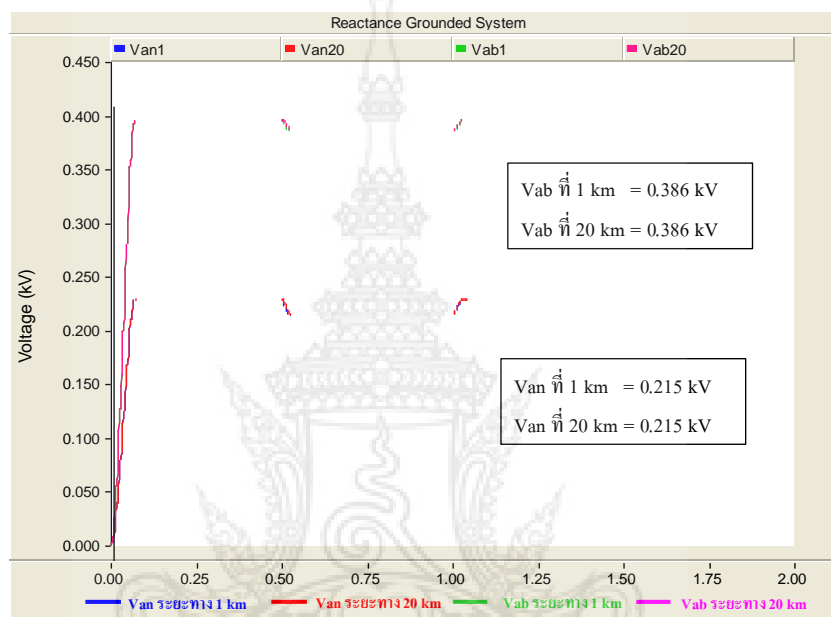
จากภาพที่ 4.7 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.387 kV และ 0.221 kV ตามลำดับ และสามารถแสดงเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทาน

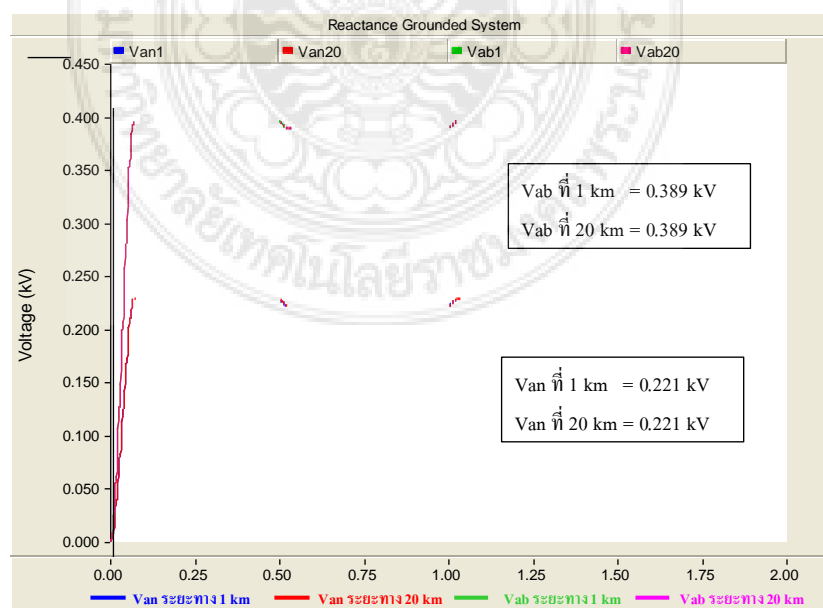
ตำแหน่ง	Bus 4		Bus 5	
	Vab	Van	Vab	Van
F1	0.382 kV	0.218 kV	0.382 kV	0.218 kV
F2	0.387 kV	0.221 kV	0.387 kV	0.221 kV

#### 4.5 กรณีระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์

การศึกษาในเหตุการณ์นี้ได้จำลองให้หม้อแปลงไฟฟ้า  $T1$  มีการต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์ โดยกำหนดค่าประมาณ 100% ของ Zero Sequence Impedance ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $37.7 \Omega$  ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้า  $T2$  และ  $T3$  มีการต่อลงดินโดยตรง จากนั้นเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F1$  ห่างจากสถานีไฟฟ้า 1 กิโลเมตร และ  $F2$  ห่างจากสถานีไฟฟ้า 20 กิโลเมตร ตามลำดับ และทำการวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.8 และ 4.9



ภาพที่ 4.8 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F1$



ภาพที่ 4.9 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ขณะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ตำแหน่ง  $F2$

จากภาพที่ 4.8 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.386 kV และ 0.215 kV ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 4.9 เป็นผลการจำลองของแรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งสามารถวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 ได้เท่ากับ 0.389 kV และ 0.215 kV ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และ 5 กรณีเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์

ตำแหน่ง	Bus 4		Bus 5	
	Vab	Van	Vab	Van
F1	0.386 kV	0.215 kV	0.386 kV	0.215 kV
F2	0.389 kV	0.221 kV	0.389 kV	0.221 kV

จากการจำลองเหตุการณ์ทั้ง 4 เหตุการณ์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าระบบต่อลงดินโดยตรงเมื่อเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 และ F2 จะเกิดผลกระทบทำให้แรงดันเฟสที่บัส 4 และบัส 5 มีขนาดลดลง 12% และ 3.25% ตามลำดับ ระบบไม่ต่อลงดินจะไม่ได้รับผลกระทบกล่าวคือ เมื่อเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 และ F2 จะเกิดผลกระทบทำให้แรงดันเฟสที่บัส 4 และบัส 5 ลดลง 2.5% ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานเมื่อเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 และ F2 จะเกิดผลกระทบทำให้แรงดันเฟสที่บัส 4 และบัส 5 ลดลง 4.5% และ 3.25% ตามลำดับ ส่วนการจำลองเหตุการณ์ระบบต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์เมื่อเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 และ F2 จะเกิดผลกระทบทำให้แรงดันเฟสที่บัส 4 และบัส 5 ลดลง 3.5% และ 2.75% ตามลำดับ จากนั้นได้นำขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวที่บัส 4 และบัส 5 มาทำเป็นระบบเปอร์เซ็นต์และ คำนวณหาเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรสามารถใช้สมการที่ (3.1) และเขียนเป็นกราฟตามมาตรฐาน ITIC โดยเหตุการณ์ต่อลงดินที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบได้แก่ การต่อลงดินโดยผ่านความต้านและการต่อลงดินโดยตรงซึ่งการต่อลงดินทั้งสองรูปแบบเป็นการต่อลงดินที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้งาน เพื่อเป็นการศึกษาปัญหาคุณภาพไฟฟ้าทางด้านจ่ายโวลตของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแสดงแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวตามระยะเวลาในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้ดังตารางที่ 4.5

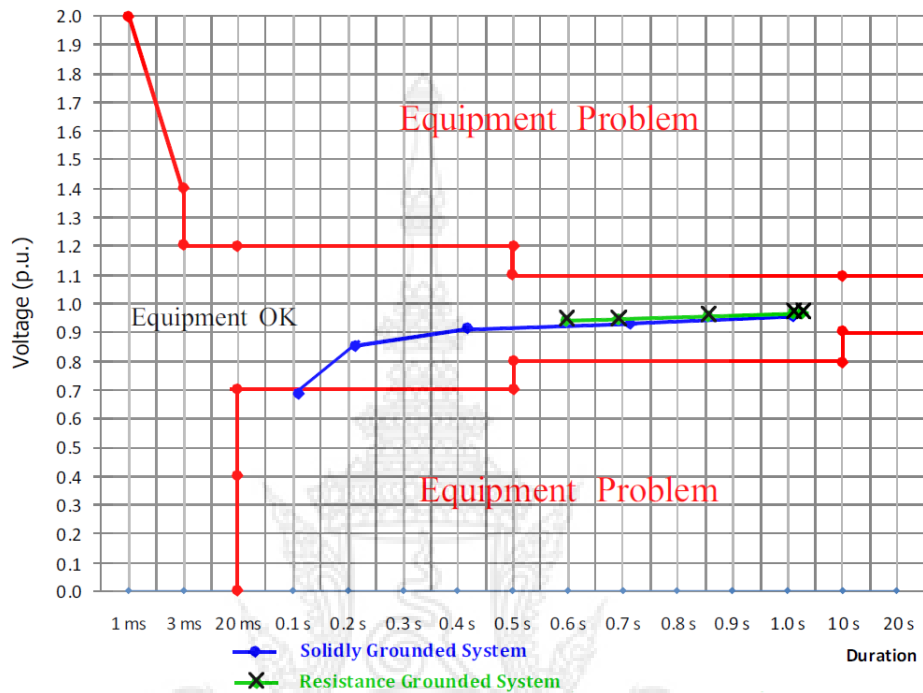
ตารางที่ 4.5 เวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรกรณีระบบต่อลงดินโดยตรง

ตำแหน่ง ลัดวงจร (km)	กระแสลัดวงจร (kA)	แรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 (p.u.)		เวลาการกำจัด กระแสลัดวงจร (ms)
		$V_{an} \text{ (p.u.)} = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{base}}}$	$V_{an} \text{ (p.u.)} = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{base}}}$	
1	7.346	$\frac{160}{230} = 0.695$	$\frac{352}{400} = 0.880$	116
5	2.752	$\frac{202}{230} = 0.878$	$\frac{375}{400} = 0.937$	217
10	1.939	$\frac{213}{230} = 0.926$	$\frac{383}{400} = 0.957$	438
15	1.617	$\frac{217}{230} = 0.943$	$\frac{386}{400} = 0.965$	724
20	0.984	$\frac{219}{230} = 0.952$	$\frac{387}{400} = 0.967$	1021

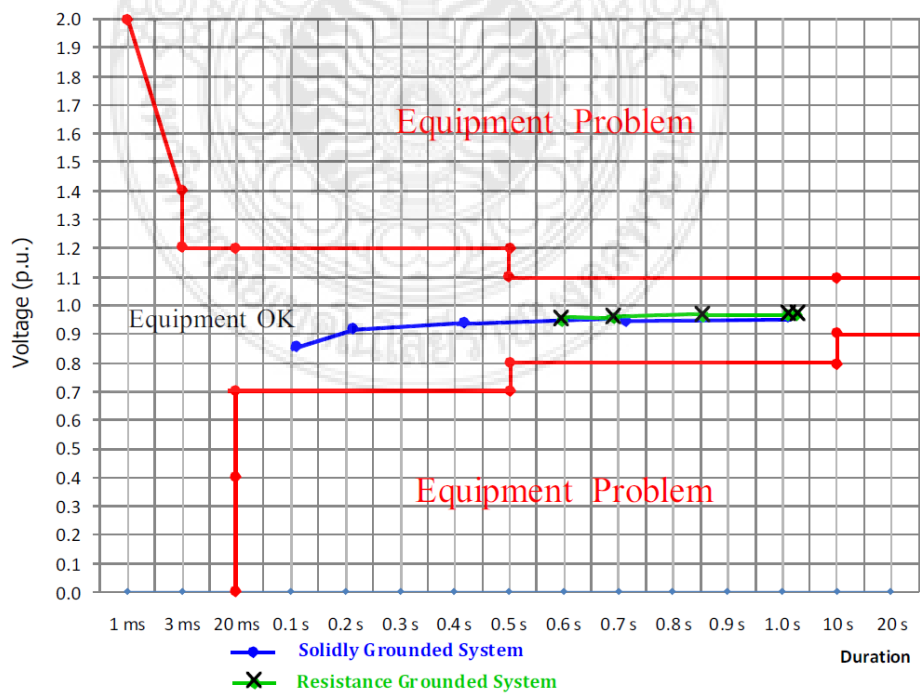
ตารางที่ 4.6 เวลาการกำจัดกระแสลัดวงจรกรณีระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

ตำแหน่ง ลัดวงจร (km)	กระแสลัดวงจร (kA)	แรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ที่บัส 4 และ 5 (p.u.)		เวลาการกำจัด กระแสลัดวงจร (ms)
		$V_{an} \text{ (p.u.)} = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{base}}}$	$V_{an} \text{ (p.u.)} = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{base}}}$	
1	1.333	$\frac{218}{230} = 0.948$	$\frac{382}{400} = 0.955$	599
5	1.218	$\frac{218}{230} = 0.948$	$\frac{383}{400} = 0.958$	698
10	1.087	$\frac{219}{230} = 0.952$	$\frac{385}{400} = 0.963$	853
15	0.982	$\frac{220}{230} = 0.957$	$\frac{386}{400} = 0.965$	1025
20	0.913	$\frac{220}{230} = 0.957$	$\frac{387}{400} = 0.967$	1172

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกที่บัส 4 และ 5 มีค่าเท่ากัน จึงสามารถคำนวณระยะเวลาในการกำจัดกระแสลัดวงจรและสามารถแสดงเป็นกราฟมาตรฐาน ITIC ของแรงดันเฟส และแรงดันสายได้ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 แรงดันเฟสกรณีระบบต่อลงดินโดยตรงและต่อลงดินผ่านความต้านทานที่บัส 4 และ 5



ภาพที่ 4.11 แรงดันสายกรณีระบบต่อลงดินโดยตรงและต่อลงดินผ่านความต้านทานที่บัส 4 และ 5



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบการต่อลงดินโดยตรงจะส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่มากกว่าระบบการต่อลงดินชนิดอื่นๆ เป็นระบบที่มีการลงทุนต่ำสุดเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ในวงจรที่ไม่เกิดลัดวงจรจะมีค่าสูง ระบบการต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานมีขนาดของแรงดันตกชั่วครู่ต่ำกว่าระบบต่อลงดินโดยตรงกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าระบบต่อลงดินโดยตรง แม้จะทำให้ระยะเวลาในการกำจัดกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลดีในการยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ที่นำกระแสลัดวงจรในระหว่างการเกิดลัดวงจร ระบบไม่ต่อลงดินถือได้ว่าไม่มีผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วครู่ แต่ก็ทำให้ระบบป้องกันไม่สามารถตรวจจับกระแสลัดวงจรได้ และระบบการต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์มีขนาดของแรงดันตกชั่วครู่ต่ำกว่าระบบการต่อลงดินโดยตรง แต่การต่อลงดินรูปแบบนี้การไฟฟ้าไม่นิยมนำมาใช้ ดังนั้นระบบต่อลงดินโดยตรง และระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถทำให้มีคุณภาพไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งนอกจากแรงดันไฟฟ้าตกก็คือแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) ซึ่งการเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินได้เช่นกัน ดังนั้นการทดสอบด้านแรงดันไฟฟ้าเกินก็จะช่วยให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าชัดเจนยิ่งขึ้น โดยอย่างยิ่งกรณีเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบส่งจ่ายจะมีผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งหากไม่มีการป้องกันจะทำให้โหลดได้รับผลกระทบนั้นไปด้วยเนื่องจากโหลด หรือผู้ใช้ไฟจะต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

## บรรณานุกรม

- Information Technology Industry Council. 2000. ITI (CBEMA) Curve Application Note,” Technology Committee 3 (TC3) of the ITI Council. Washington DC.
- IEEE 446-1995(ANSI) "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.
- Bach Quoc Khanh, Nguyen Hong Phuc, “Prediction of Voltage Sag in The Transmission System of Vietnam, A Case Study,” IEEE 2011.
- J. J Grainger and W. D. Stevenson. 1994. Power System Analysis. Singapore : McGraw-Hill.
- P. M. Anderson. 1999. Power System Protection. New York : McGraw-Hill Book Company.
- IEEE std 80-2000. 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Power and Energy Society.
- ชำนาญ ห่อเกียรติ และเทพกัญญา ชิตแสง. 2549. การต่อลงดิน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ จรัสสนิทวงศ์.
- พงศ์ศรีณย์ ตานะประทีปกุล. 2539. วงจรและระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท.
- มงคล เดชนครินทร์, (บรรณาธิการ). 2554. พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ วสท. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์ ประสิทธิ์ ที่มพุมิ และปฐมทัศน์ จิระเดชะ, (บรรณาธิการ). 2549. ความรู้พื้นฐานวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรออกแบบและรักษาเครื่องกลและไฟฟ้าไทย สมาคมช่างเหมาไฟฟ้าและเครื่องกลไทย.

คณะผู้วิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Surasit Prakobkit
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381ถนนประชากรราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800  
โทรศัพท์ 02-913-2424 ต่อ 150 โทรสาร 02-913-2424 ต่อ 151  
e-mail: surasit.pr@rmutp.ac.th
4. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
ปริญญาตรี อส.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) วิทยาลัยปทุมธานี
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
- การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
6. ประสบการณ์งานวิจัย  
- ตำแหน่ง นักวิจัย โครงการวิจัย การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการสับจ่ายชุดตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสแบบที่ละเฟสในระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
- ตำแหน่ง นักวิจัย โครงการวิจัย การลดผลกระทบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนาจากระบบไฟฟ้าใกล้เคียงในขณะปฏิบัติงานแบบดับไฟ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายรัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Nattachote Rugthaicharoencheep
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381ถนนประชากรราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800  
โทรศัพท์ 02-913-2424 ต่อ 150 โทรสาร 02-913-2424 ต่อ 151  
e-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th
4. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาเอก ปร.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
ปริญญาตรี คอ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
- การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน  
- การตรวจสอบความปลอดภัยในอาคารควบคุม
6. ประสบการณ์งานวิจัย  
- ตำแหน่ง นักวิจัย โครงการ ศึกษาผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์อันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับในพื้นที่  
การจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสุรเชษฐ เดชพิง  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Surachet Dechphung
2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยอธิการบดี และอาจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381ถนนประชากรราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800  
โทรศัพท์ 02-913-2424 ต่อ 150 โทรสาร 02-913-2424 ต่อ 151  
e-mail: surachet.d@rmutp.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0816158202
4. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาเอก วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
  - การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
  - การตรวจสอบความปลอดภัยในอาคารควบคุม
  - วิศวกรรมซอฟต์แวร์
  - วิศวกรรมเครื่องกล
6. ประสบการณ์งานวิจัย
  - รางวัลวิศวกรยอดเยี่ยมของประเทศ จาก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ประจำปี 2555
  - รางวัลสิ่งประดิษฐ์คิดค้นแห่งชาติ ประจำปี 2557 โดยสภาวิจัยแห่งชาติ
  - รางวัลเหรียญเงิน ในการประกวดสิ่งประดิษฐ์โลก ณ กรุงเจนีวา สมาพันธรัฐสวิส
  - และอื่นๆ
  - หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการงานวิจัยอีกหลายโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอดิศักดิ์ วิริยกรรม  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Adisak Viriyakam
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381ถนนประชาราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800  
โทรศัพท์ 02-913-2424 ต่อ 150 โทรสาร 02-913-2424 ต่อ 151  
e-mail: v.adisak@hotmail.com
4. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาโท คอ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปริญญาตรี คอ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
  - การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
  - การตรวจสอบความปลอดภัยในอาคารควบคุม
6. ประสบการณ์งานวิจัย
  - ตำแหน่ง ผู้ร่วมโครงการวิจัย โครงการ อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่วด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าต่ำ

