



การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้รูปแบบการจัดวางสาย  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  
Voltage Drop Cable Riser Pole Analysis Method with  
Wire Arrangement Model of the PEA

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



Voltage Drop Cable Riser Pole Analysis Method with  
Wire Arrangement Model of the PEA

Surasit Prakobkit

This Research in Funded by Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhorn  
Year 2018

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้รูปแบบการจัดวางสาย  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  
ผู้วิจัย : นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
พ.ศ. : 2561

### บทคัดย่อ

เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินเป็นตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนจากสายไฟฟ้าเหนือดินเป็นสายเคเบิลใต้ดิน กับดักเสิร์จ หัวเคเบิลสายต่อลงดินและแท่งหลักดินทำหน้าที่ร่วมกับสวิตช์ตัดตอนเป็นอุปกรณ์ป้องกันเหตุการณ์ฟ้าผ่าหรือลัดวงจรในระบบจะทำให้เกิดแรงดันเสิร์จตกคร่อมบนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน บทความนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมบนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้รูปแบบการจัดวางสายต่อลงดินที่เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักเสิร์จ เป็นการต่อสายจากส่วนท้ายของชุดต่อปลายสายเคเบิลเข้ากับส่วนท้ายของกับดักเสิร์จ และรูปแบบการจัดวางสายต่อลงดินที่แยกกราวด์ระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักเสิร์จ เป็นการต่อสายดินแยกชุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักเสิร์จลงทั้งสองข้างของเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบการจัดวางสายแบบต่อลงดินที่เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักเสิร์จจะเกิดแรงดันตกคร่อมสายน้อยกว่าแบบการจัดวางสายต่อลงดินที่แยกกราวด์ระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักเสิร์จ

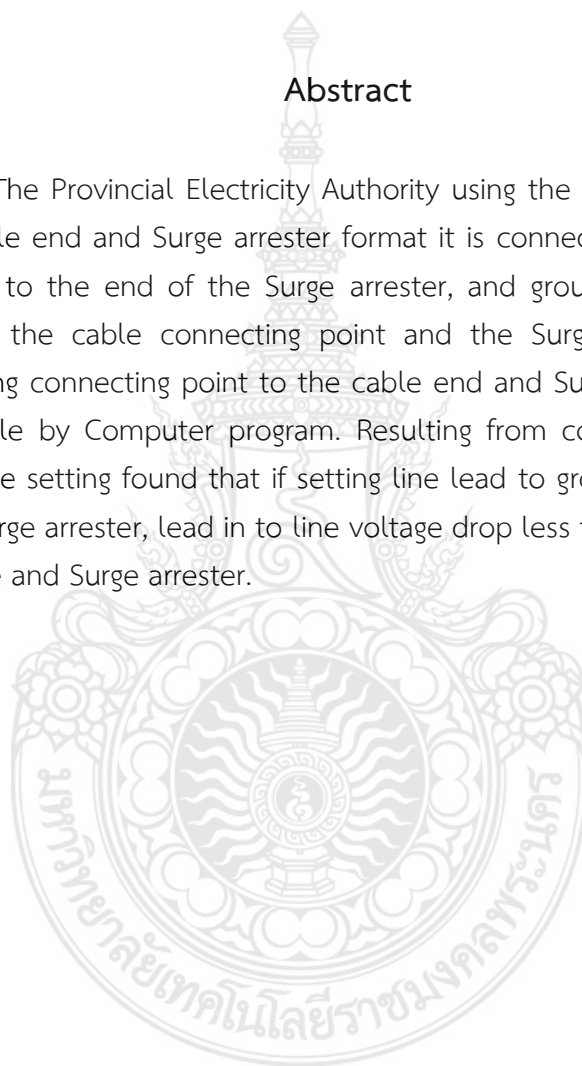
Title : Voltage Drop Cable Riser Pole Analysis Method with Wire Arrangement  
Model of the PEA

Researcher : Mr.Surasit Prakobkit, Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhorn

Year : 2018

### Abstract

System of The Provincial Electricity Authority using the grounding wire connected between the cable end and Surge arrester format it is connect the cable from the end of the cable set to the end of the Surge arrester, and grounded wire that splits the ground between the cable connecting point and the Surge arrester format it is a separate grounding connecting point to the cable end and Surge arrester on both sides of cable riser pole by Computer program. Resulting from computer analysis and the comparison of line setting found that if setting line lead to ground and join with ending cable line and Surge arrester, lead in to line voltage drop less than setting line to ground with separate line and Surge arrester.



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้รูปแบบการจัดวางสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล บุคลากรและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สมชาย ทรงศิริ และผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

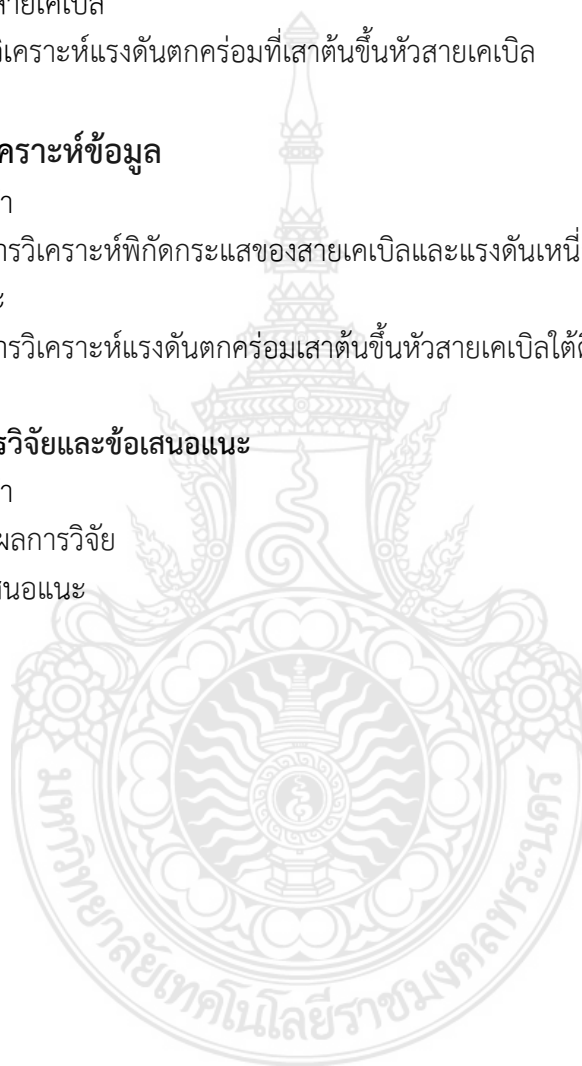


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	2
1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 บทนำ	3
2.2 เสาคันขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน	3
2.3 แรงดันเกินในระบบไฟฟ้า	6
2.4 การเกิดเบรกดาวน์	8
2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV	10
2.6 การติดตั้งและการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน	12
2.7 การต่อลงดิน	17
2.8 การคำนวณค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน	20
<b>บทที่ 3 รูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน</b>	<b>31</b>
3.1 บทนำ	31
3.2 สายเคเบิลใต้ดินของระบบส่งจ่าย 115 kV	31
3.3 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาคันขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน	32
3.4 รูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน	33

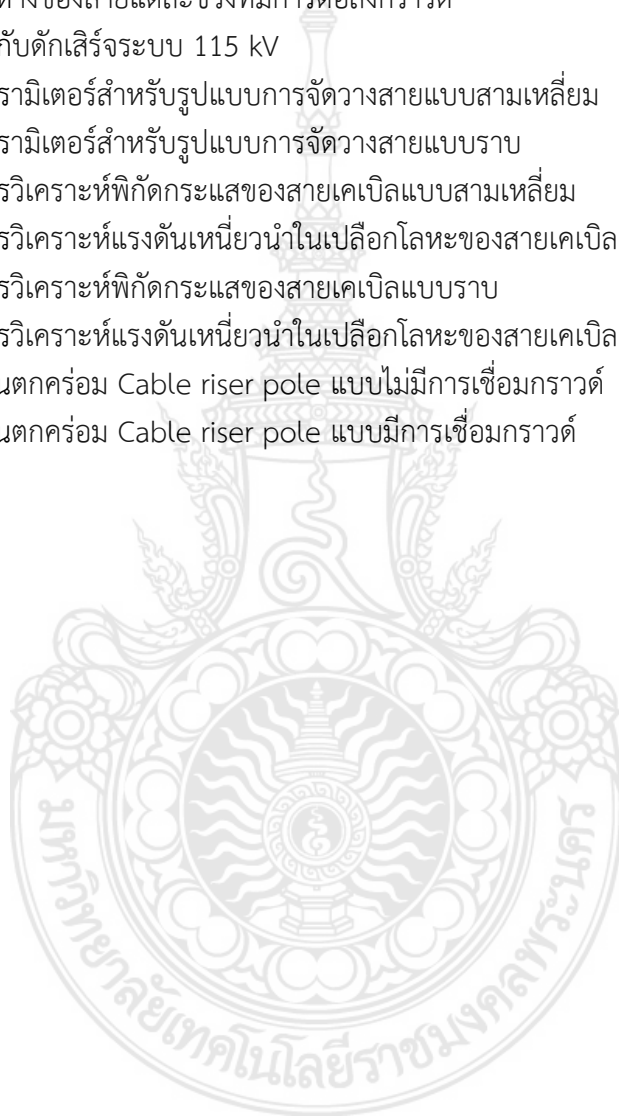
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิล	35
3.6 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนที่เพิ่มขึ้นในเปลือกโลหะของสายเคเบิล	37
3.7 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมที่เสาค้ำขึ้นหัวสายเคเบิล	38
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b>	<b>40</b>
4.1 บทนำ	40
4.2 ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลและแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะ	40
4.3 ผลการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาค้ำขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>43</b>
5.1 บทนำ	43
5.2 สรุปผลการวิจัย	43
5.3 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	45



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันเกินและแรงดันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่ความถี่	7
3.1	พารามิเตอร์ของสายเคเบิลใต้ดินระบบส่งจ่าย 115 kV	31
3.2	ระยะห่างของสายแต่ละช่วงที่มีการต่อลงกราวด์	32
3.3	พิกัด กักเก็บเสิร์จระบบ 115 kV	33
3.4	ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม	35
3.5	ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการจัดวางสายแบบราบ	36
4.1	ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม	40
4.2	ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม	40
4.3	ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลแบบราบ	41
4.4	ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแบบราบ	41
4.5	แรงดันตกคร่อม Cable riser pole แบบไม่มีการเชื่อมกราวด์	42
4.6	แรงดันตกคร่อม Cable riser pole แบบมีการเชื่อมกราวด์	42





## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV	3
2.2	ลักษณะของกั๊บดักเสิร์จ 115 kV แบบ ZnO	4
2.3	วงจรมุมของกั๊บดักเสิร์จ แบบ ZnO	5
2.4	จุดเชื่อมต่อของหัวเคเบิลระบบ 115 kV	5
2.5	หน้าตัดของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV	10
2.6	ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดิน	11
2.7	การวางท่อหุ้มคอนกรีต	13
2.8	การก่อสร้างแบบร้อยท่อฝังดิน	13
2.9	การวางสายเคเบิลแบบฝังดินโดยตรง	14
2.10	การติดตั้งสายเคเบิลด้วยระบบ HDD	14
2.11	การก่อสร้างระบบเคเบิลแบบ Pipe Jacking	15
2.12	การจัดวางท่อร้อยสายเคเบิลใน Pipe Jacking	15
2.13	การจัดวางสายเคเบิลแบบ Flat Formation	16
2.14	การจัดวางสายเคเบิลแบบ Flat Formation 2 วงจร	16
2.15	การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation 2 วงจร	17
2.16	การต่อลงดินทั้งสองปลาย	18
2.17	การต่อลงดินแบบหลายจุด	18
2.18	การต่อลงดินข้างเดียว	19
2.19	การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง	19
2.20	การต่อลงดินแบบไขว้สลับ	20
2.21	รูปแบบการวางสายเคเบิลแบบ trefoil ในท่อร้อยสาย	25
2.22	การวางสายเคเบิลรูปแบบ flat ในท่อร้อยสาย	26
2.23	ความต้านทานความร้อนในสายเคเบิลแต่ละช่วง	27
2.24	ภาพสะท้อนการวางสายเคเบิล	29
3.1	การต่อลงดินแบบไขว้	32
3.2	การจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม 2 วงจร	34
3.3	การจัดวางสายแบบราบ 2 วงจร	34
3.4	ไดอะแกรมแบบที่ไม่มีการเชื่อมกราวด์	39
3.5	ไดอะแกรมแบบที่มีการเชื่อมกราวด์	39

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเหนื่อดินจะใช้วิธีปักเสาพาดสายทำให้ทัศนียภาพบางตำแหน่งอาจถูกรบกวนหรือบางตำแหน่งอาจมีสายไฟอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชน ซึ่งปัจจุบันบริเวณเขตตัวเมืองต้องการทัศนียภาพที่สวยงามและความปลอดภัยจากการสัมผัสที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบเคเบิลใต้ดินจึงถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว การเชื่อมต่อเข้าสายไฟฟ้าระหว่างระบบเหนื่อดินกับระบบเคเบิลใต้ดินจะใช้เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน (Riser pole) ที่มีลักษณะเป็นสายเปลือยหรือสายหุ้มฉนวนเป็นจุดเชื่อมต่อ โดยมีอุปกรณ์สวิตซ์ตัดตอนแรงสูง (Disconnecting switch) ทำหน้าที่ตัดตอนวงจร กับดักเสิร์จ (Surge arrester) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ฉนวนใต้ดินเสียหายจากแรงดันเสิร์จหัวเคเบิล (Terminator) ทำหน้าที่กระจายสนามไฟฟ้าจากผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบน สายต่อลงดินและแท่งหลักดิน (Ground wire and ground rod) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าลัดวงจรหรือกระแสฟ้าผ่าลงดิน และแท่งหลักดินจะช่วยกระจายประจุฟ้าผ่า หากสายต่อลงดินชำรุดเสียหายหรือได้รับแรงดันตกคร่อมขนาดสูงจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) บนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมสายต่อลงดินสำหรับการจัดเรียงแบบแยกสายต่อลงดินระหว่างตำแหน่งท้ายของกับดักเสิร์จที่ใช้รูปแบบการจัดวางสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อลดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์บนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดิน
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางสายที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดิน

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ใช้รูปแบบการจัดวางสายเคเบิลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการวิเคราะห์
- 1.3.2 ใช้การจัดวางสายแบบเชื่อมต่อกับซีลกราวด์และเทอร์มินเนเตอร์

#### 1.4 ขั้นตอนดำเนินโครงการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนวรรณกรรม
- 1.4.2 กำหนดแนวทางของปัญหา
- 1.4.3 เก็บรวบรวมข้อมูลการจัดวางสายที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดิน
- 1.4.4 เขียนรูปแบบจำลองการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน
- 1.4.5 ประมวลผลทดสอบและวิเคราะห์ผล
- 1.4.6 สรุปผลการทดสอบ
- 1.4.7 จัดพิมพ์รูปเล่มงานวิจัย
- 1.4.8 ถ่ายทอดและเผยแพร่ผลงานวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

- 1.5.1 การเผยแพร่ผลงานทางเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 1.5.2 เผยแพร่ในการประชุมสัมมนาวิชาการระดับชาติ

#### 1.6 โครงสร้างของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งจะสามารถอธิบายขอบเขตของเนื้อหาในแต่ละบทได้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำของโครงการวิจัย ซึ่งได้กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา รวมถึงได้กำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางให้กับโครงการวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้สำหรับโครงการวิจัยฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 เป็นการออกแบบเพื่อสร้างแบบจำลองรูปแบบการจัดวางสายที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดิน

บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัวสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้รูปแบบจัดวางสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะที่มีต่อโครงการวิจัยฉบับนี้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การคำนวณแรงดันตกคร่อมเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากมาตรฐาน The International Electro technical Commission (IEC), Institution of Electrical Engineers (IEEE) และมาตรฐานสายเคเบิลใต้ดินของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยการพิจารณาจะเริ่มจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งตามลักษณะการใช้งานประกอบด้วยสวิตช์ตัดตอนแรงสูง กับดักเสิร์จ หัวเคเบิล สายต่อลงดินและแท่งหลักดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.2 เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน (Cable riser pole) จะเป็นจุดเชื่อมระหว่างระบบเคเบิลใต้ดินกับระบบสายส่งเหนือดิน (Overhead system) โดยจะทำการเชื่อมต่อกันภายในหัวเคเบิล (Terminator) ซึ่งจุดต่อสายระหว่างสายเปลือยกับสายเคเบิลใต้ดินมีฉนวนระหว่างสายไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องติดตั้งกับดักเสิร์จเพื่อป้องกันไม่ให้อิทธิพลของอุปกรณ์เสียหาย ดังนั้นที่เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินจะมีการติดตั้งเสิร์จอยู่ด้วย ซึ่งจะมีการต่อลงดินที่กับดักเสิร์จและต่อลงดินที่ปลายสายต่อลงดิน (Shield wire) ของสายเคเบิลใต้ดินเข้ากับสายต่อลงดินของระบบเพื่อต่อเข้ากับหลักดินดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV

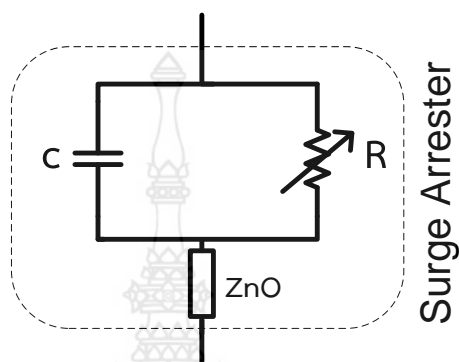
### 2.2.1 กั้บดักเสีร์จ

กั้บดักเสีร์จ (Surge arrester) หรือกั้บดักฟ้าผ่าผ่านั้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่เข้ามา สู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งในสภาวะปกติอุปกรณ์กั้บดักเสีร์จจะมีค่าความต้านทานของตัวมันเองสูงมาก หรือที่เรียกอีกอย่างว่า สภาวะอิมพีแดนซ์สูง (High impedance) แต่เมื่อใดก็ตามที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์กั้บดักเสีร์จสูงผิดปกติ อุปกรณ์จะทำการเปลี่ยนสภาวะค่าความต้านทานสูง ไปสู่สภาวะค่าความต้านทานต่ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งขณะเกิดฟ้าผ่าจะมีแรงดันและกระแสจำนวนมากเข้ามาในระบบ ขนาดของกระแสที่มาจากฟ้าผ่าส่วนใหญ่จะไหลผ่านตัวอุปกรณ์เพื่อลงกราวด์ ซึ่งขณะที่กระแสไหลลงกราวด์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอุปกรณ์ลดลงตามพิกัดของอุปกรณ์นั้น โดยที่การติดตั้งกั้บดักเสีร์จจะต่อขนานกับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันและอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ที่สุด กั้บดักเสีร์จที่มีการนำมาใช้งานมี 2 ชนิด ด้วยกัน คือ Sic และ Zno แต่ปัจจุบันกั้บดักเสีร์จชนิด Zno นิยมนำมาใช้งานเนื่องจากมีคุณสมบัติดีกว่า Sic และกั้บดักเสีร์จในระบบ 115 kV จะใช้พิกัดกระแสขนาด 10 kA ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของกั้บดักเสีร์จ 115 kV แบบ Zno

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของกัณฑ์เสิร์จที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุได้ดังภาพที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของกัณฑ์เสิร์จ แบบ ZnO

### 2.2.2 หัวเคเบิล

สำหรับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV จะต้องมีหัวเคเบิล (Terminator) เป็นตัวเชื่อมระหว่างสายบนอากาศเข้ากับสายเคเบิลใต้ดินก่อนที่จะลงสู่ใต้ดิน ซึ่งตรงหัวเคเบิลจะทำหน้าที่กระจายสนามไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนไม่ให้มีสนามไฟฟ้าหนาแน่นที่ปลายสายตัวนำต่อลงดิน



รูปที่ 2.4 จุดเชื่อมต่อของหัวเคเบิลระบบ 115 kV

**โครงเหล็กรองรับการติดตั้ง** ทำหน้าที่รองรับติดตั้งหัวสายเคเบิลใต้ดินและกับดักเสิร์จ เนื่องจากในระบบ 115 kV ทั้งหัวเคเบิลและกับดักเสิร์จมีขนาดและน้ำหนักมากกว่าระบบจำหน่าย จึงต้องออกแบบให้มีโครงเหล็กรองรับ

**แคลมป์ประกบสายเคเบิลใต้ดิน** แคลมป์ประกบสายเคเบิลมีอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ยึดประกบสายเคเบิลใต้ดินเข้ากับเสา คอร. ทำหน้าที่คล้ายห่วงรัดสาย (Cable grip) และส่วนที่ยึดประกบสายเคเบิลบริเวณใต้หัวเคเบิล โดยที่แคลมป์ทั้ง 2 ส่วนดังกล่าว จะต้องทำด้วยไม้เท่านั้น เพื่อป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กที่ไม่สมดุลจากการหักล้างกันไม่หมด เนื่องจากการติดตั้งแคลมป์ประกบสายเคเบิลจะประกบเพียง 1 เฟส หรือ 2 เฟส ซึ่งจะไม่ครบทั้ง 3 เฟส

**ท่อร้อยสายโลหะ** เป็นท่อร้อยสายสำหรับป้องกันสายเคเบิลทางด้านทางแรงกล สัตว์ หรือน้ำเข้าสายเคเบิลโดยตรง สำหรับเหตุผลที่ไม่นำท่อโลหะ (Metallic conduit) มาใช้งานเนื่องจากระบบ 115 kV จะร้อยสายเคเบิล จำนวน 1 เส้นต่อท่อ ดังนั้นถ้าร้อยในท่อโลหะก็จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กมีผลทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นที่สายเคเบิล

**Airseal Compound** ใช้สำหรับอุดช่องว่างบริเวณที่สายเคเบิลใต้ดินโผล่ออกจากปลายท่อร้อยสายเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในท่อร้อยสาย

**โครงเหล็กกันท่อร้อยสาย (Conduit steel guard)** ใช้สำหรับป้องกันท่อร้อยสายเป็นการป้องกันสายเคเบิลไปในตัว ซึ่งจะเป็นสัญลักษณ์บอกให้ทราบว่าคุณ จุดนี้มีการติดตั้งท่อร้อยสายขึ้น โดยโครงกันสามารถติดตั้งได้ทั้งทิศทางเดียวกันและทิศตรงข้ามกับการจราจร แต่โดยทั่วไปนิยมติดตั้งในทิศตรงข้ามกับจราจร

**สายต่อลงดินและแท่งหลักดิน (Ground wire and ground rod)** การต่อลงดินเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสายต่อลงดินจะเป็นตัวนำกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดินและแท่งหลักดินจะช่วยกระจายประจุฟ้าผ่าหรือนำกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ผลที่ตามมาคือ จะทำให้เกิดแรงดันมีค่าระดับต่างกันในแต่ละจุดภายในสายต่อลงดินบน Cable riser pole ดังนั้นถ้าสายต่อลงดินขาดหรือหลุด จะทำให้ไม่มีจุดกราวด์อ้างอิง ทำให้เกิดแรงดันสูงคร่อมอุปกรณ์บน Cable riser pole เกินกว่าที่อุปกรณ์ทนได้และเกิดการ Breakdown ตามมาในที่สุด

## 2.3 แรงดันเกินในระบบไฟฟ้า

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่กำหนดไว้ แรงดันเกินอาจเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และในระบบส่งจ่ายไฟฟ้านั้นมีโอกาสได้รับแรงดันเกิน โดยแบ่งสาเหตุการเกิดแรงดันเกินออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกมีต้นกำเนิดมาจากในบรรยากาศ คือ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งเป็น

สาเหตุที่เกิดขึ้นภายนอกของระบบจึงเรียกได้ว่าแรงดันเกินภายนอก (External overvoltage) และสำหรับประเภทที่สองมีต้นกำเนิดมาจากภายในระบบ อันเนื่องมาจากการทำงานปิด-เปิดวงจรของ ระบบ หรือเกิดจากลัดวงจรขึ้นในระบบสาเหตุประเภทนี้จะเรียกว่าแรงดันเกินภายใน (Internal overvoltage) เมื่อพิจารณาจากขนาดและช่วงเวลาที่เกิดขึ้น แรงดันเกินแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. แรงดันเกินจากฟ้าผ่า (Lightning overvoltage)
2. แรงดันเกินจากการสวิตช์ (Switching overvoltage)
3. แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary overvoltage)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันเกิน และแรงดันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่ความถี่

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes					a
	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1^a$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

<sup>a</sup> To be specified by the relevant apparatus committees.

แรงดันเกินในระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายจะเกิดขึ้นได้หลายกรณี แต่สามารถแบ่งโดยใช้ช่วงของความถี่เป็นเกณฑ์แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ Low Frequency และ Transient ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นการแสดงรูปร่างแรงดันเกิน และรูปร่างของแรงดันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ



สำหรับแรงดันเกินจากการสวิตช์ จัดอยู่ในรูปแบบแรงดันเสิร์จหรือแรงดันชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร เพื่อขจัดความผิดปกติที่เกิดในระบบเป็นต้น แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดต่ำกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งแรงดันเสิร์จหรือแรงดันชั่วขณะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้าอย่างกะทันหันรวดเร็ว และมีช่วงระยะเวลาการเกิดที่สั้นมากเมื่อเทียบกับการทำงานในช่วงเวลาทำงานปกติ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากค่าของแรงดันและค่าของกระแสโดยมีค่าที่เกินกว่าปกติอยู่หลายเท่าตัวซึ่งอาจจะเกิดในรูปของค่าของแรงดันเกิน หรือค่ากระแสเกิน ซึ่งเมื่อเกิดค่าอย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นจะส่งผลให้เกิดอีกค่าอย่างหนึ่งตามมา แม้ว่าช่วงระยะเวลาที่เกิดจะสั้นมากก็ตาม แต่สิ่งนี้มีความสำคัญมาก เพราะฉนวนและองค์ประกอบในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับระบบได้

## 2.4 การเกิดเบรกดาวน์

การทดสอบเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าเป็นการบ่อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่า ๆ หนึ่งให้กับฉนวนโดยมีความเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้น ๆ หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนไม่สามารถทนได้จึงเกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งการเกิดเบรกดาวน์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นเหตุการณ์เบรกดาวน์แบ่งได้ตามชนิดของฉนวนทางไฟฟ้าได้ 3 แบบ ดังนี้

### 2.4.1 การเบรกดาวน์ในก๊าซ (Breakdown in gas)

ก๊าซใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน ก๊าซ  $SF_6$  ใช้เป็นฉนวนของระบบ GIS ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีดีสชาร์จเกิดขึ้นในก๊าซจะเป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออน ที่เกิดเพิ่มอย่างทวีคูณจากกระบวนการไอออไนเซชัน

### 2.4.2 การเบรกดาวน์ ในของเหลว (Breakdown in Liquid)

ส่วนมากฉนวนไฟฟ้าที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมัน จะเป็นสารประกอบของ Hydrocarbon และเป็นสารที่ทำให้เกิด Polarized น้อยมาก จึงทำให้มีค่า Dielectric สูง และคุณสมบัติของน้ำมันบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นฉนวน การเบรกดาวน์นั้นไม่ขึ้นกับสารที่นำมาใช้ทำเป็น electrode แต่ถ้าฉนวนน้ำมันปนเปื้อนความชื้น หรือสาร Oxidized element จะทำให้ค่า Dielectric ของฉนวนนั้น ๆ ลดลง การเบรกดาวน์ในลักษณะนี้จะเป็นแบบเดียวกับในการเบรกดาวน์ของก๊าซ ซึ่งการเบรกดาวน์โดยอาศัยหลักการของสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities) เจือปนหรือมีฟองอากาศเจือปนในของเหลว

### 2.4.3 การเบรกดาวนในของแข็ง (Breakdown in solid)

การเบรกดาวนในของแข็งนั้นมีลักษณะแตกต่างจากของเหลวและก๊าซคือ ของแข็งเมื่อเกิดการ Breakdown จะแตกสลายทันทีไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก แต่ของเหลวหรือก๊าซเมื่อเบรกดาวนแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ดังนั้นฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วย จะต้องมีความสมบัติที่ดีดังนี้

- มีค่าสูญเสียใน dielectric ต่ำ
- ไม่มีรูพรุนหรือความชื้น
- ทนต่อแรงดึงทางกลได้สูง
- ไม่แตกกร้าว
- ทนทานต่ออุณหภูมิ
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของระบบ
- ทนต่อสารเคมี

การเบรกดาวนของของแข็งมีขบวนการกลไกการเบรกดาวนอยู่ 8 ลักษณะคือ

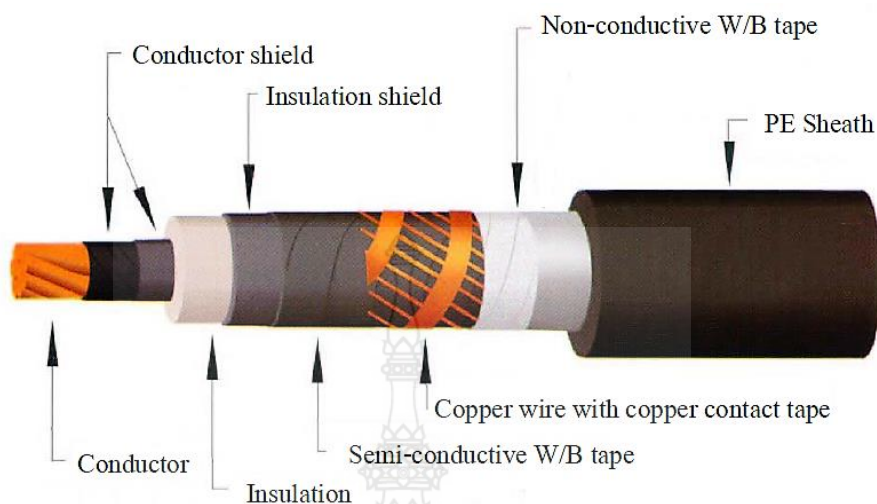
1. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากเนื้อสาร (Intrinsic breakdown)
2. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากแรงทางกล (Electromechanical Breakdown)
3. ขบวนการเบรกดาวน แบบ Streamer (Streamer Breakdown)
4. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากความร้อน (Thermal breakdown)
5. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจาก Tracking (Tracking breakdown)
6. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical breakdown)
7. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากเคมีไฟฟ้า (Electrochemical breakdown)
8. ขบวนการเบรกดาวน เนื่องจากโพรงภายใน (Cavity breakdown)

## 2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินขอรระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV

สายเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ส่วนมากนิยมใช้ฉนวนสายเคเบิลชนิด XLPE (Cross-linked Polyethylene) แทนฉนวนกระดาษ-น้ำมัน ฉนวนกระดาษและก๊าซ เนื่องจากฉนวน XLPE เป็นการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจาก Thermoplastic เป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติเพิ่มมากขึ้น โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ Dielectric Loss ต่ำ และมี Dielectric Strength สูง และมีความคงทนต่อแรงกระทำภายนอก สามารถทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าฉนวน PE/PVC และไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม เมื่อใช้งานปกติจะสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 90 องศาเซลเซียส ถ้าเกิดการลัดวงจรจะสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 250 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การติดตั้งใช้งาน และการบำรุงรักษาสายเคเบิลยังไม่ยุ่งยากเท่ากับสายเคเบิลชนิดอื่นๆ ซึ่งปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินที่ กฟภ. ใช้งานเป็นชนิดฉนวน XLPE ทั้งระดับแรงดันปานกลาง (Medium voltage cables) 22-33 กิโลโวลต์ และแรงดันสูง (High voltage cables) 115 กิโลโวลต์



รูปที่ 2.5 หน้าตัดของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดิน

สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ระบบเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง (High voltage cables) 115 กิโลโวลต์ ซึ่งมีข้อกำหนดและข้อมูลทางเทคนิคของสายเคเบิลแรงดันสูงคู่ได้ในภาคผนวก ก. โดยมีส่วนประกอบของสายเคเบิลมีดังนี้

1. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า โดยเป็นทองแดงอบอ่อนปกติและมีขนาดเล็กทีเกลียวไปรอบๆศูนย์กลางร่วม การสร้างเป็นไปตาม IEC Publication 60228.
2. เปลือกตัวนำไฟฟ้า (Conductor Screen) อยู่ถัดจากตัวนำไฟฟ้า เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ XLPE จะถูกหลอมและฉีดปกคลุมชั้นตัวนำไฟฟ้าทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นเหตุของการเกิด Partial Discharge โดยค่าความหนาเฉลี่ยคู่ได้ในภาคผนวก ก.
3. ฉนวน (Insulation) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นฉนวนชนิด unfilled XLPE ไม่มีคาร์บอนสีดำผสม โดยชั้นเปลือกตัวนำไฟฟ้า ชั้นฉนวน และชั้นเปลือกฉนวน จะถูกหลอมควบคู่กันแล้วฉีดลงบนตัวนำไฟฟ้า พร้อมกัน ทำได้เพียงกระบวนการบ่มแห้ง ส่วนกระบวนการอบน้ำธรรมดาหรือบ่อน้ำอุ่นไม่เป็นที่ยอมรับค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นฉนวนจะต้องไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ระบุไว้ในภาคผนวก ก. ค่าความหนาน้อยที่สุดของชั้นฉนวนจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของค่าที่ระบุไว้

4. เปลือกฉนวน (Insulation Screen) อยู่ถัดจากฉนวน ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเปลือกตัวนำไฟฟ้า คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของฉนวน และชั้นเปลือกโลหะ เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ XLPE จะถูกหลอมและฉีดยึดปกคลุมชั้นฉนวน โดยค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นนี้ดูได้ในภาคผนวก ก.

5. เปลือกโลหะ (Metallic Screen or Copper wire Screen or Grounding Screen) ทำหน้าที่เป็น กราวด์ (G) สำหรับสายเคเบิลและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งชั้นนี้จะต้องมีความต่อเนื่องกันทางไฟฟ้าและยึดติดกันตลอดความยาวของสายเคเบิลด้วย เทปทองแดง (copper contact tape) พื้นที่หน้าตัดรวม และจำนวนสายทองแดงต่ำสุดของชั้นนี้ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ในภาคผนวก ก.

6. ชั้นกันน้ำและเทปกั้นกระแทก (Synthetic Water Blocking & Cushioning Tape) มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า ไม่ย่อยสลาย ชั้นกันน้ำจะอยู่เหนือหรือใต้ชั้น Metallic Screen อย่างใดอย่างหนึ่ง และจะเป็นกำแพงกันน้ำตลอดความยาวของสายอย่างต่อเนื่อง เทปกั้นกระแทกต้องมีความหนาเพียงพอที่จะลดความเครียดความร้อนทางไฟฟ้าและจะต้องทำหน้าที่กั้นกระแทกจะต้องเข้ากันได้กับวัสดุอื่นในสายเคเบิล และไม่เกิดการกัดกร่อนที่เป็นผลให้เกิดความร้อนของสายเคเบิล

7. เปลือกที่ไม่ใช่โลหะ (Non-metallic Sheath) หรือ เปลือกห่อหุ้มเคเบิล (Jacket) ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่างๆ โดยวัสดุที่ใช้เป็น black PE (Polyethylene) เหมาะสำหรับการใช้งานกับสายเคเบิลที่มีอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ 90 °C และ 130 °C ภายใต้สภาวะปกติ และสภาพฉุกเฉิน ตามลำดับความหนาเฉลี่ยของเปลือกจะต้องมีค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ในภาคผนวก ก. ความหนาน้อยที่สุดของเปลือกจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่ระบุ

## 2.6 การติดตั้งและการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

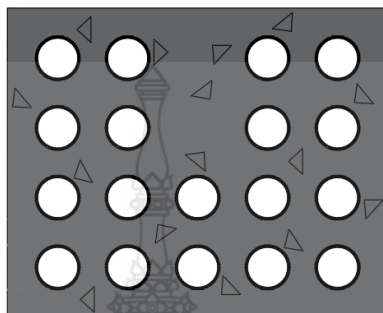
ปัจจุบันการติดตั้งระบบสายเคเบิลใต้ดินมีวิธีการติดตั้งได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆในการพิจารณา โดยแบ่งรูปแบบการติดตั้งออกเป็น 2 รูปแบบหลักๆ ดังนี้

### 2.6.1 การติดตั้งระบบเคเบิลใต้ดินแบบเปิดหน้าดิน

#### 2.6.1.1 แบบห่อหุ้มคอนกรีต (Concrete Encased Duct Bank)

เป็นการก่อสร้างสำหรับระบบจำหน่ายและระบบส่ง ลักษณะการก่อสร้างเป็นแบบใช้ท่อ HDPE (High Density Polyethylene) หรือท่อ RTRC (Reinforced Thermosetting Resin Conduit) แล้วหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นการป้องกันจากผลกระทบทางกลให้กับสายเคเบิล การก่อสร้าง

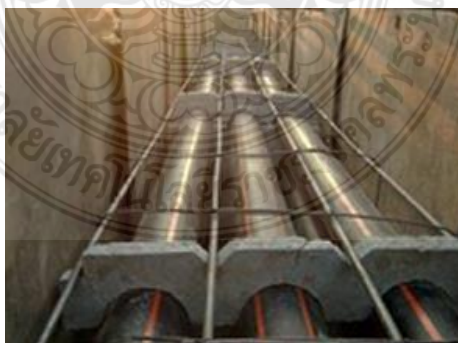
ท่อหุ้มคอนกรีต (Duct Bank) นี้จะต้องมีบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน Manhole หรือ Handhole เป็นระยะๆ สำหรับใช้ในการชักสาย สายต่อสาย ต่อแยกสาย หรือใช้ในกรณีที่แนวเคเบิลหักมุม



รูปที่ 2.7 การวางท่อหุ้มคอนกรีต

#### 2.6.1.2 แบบร้อยท่อฝังดิน (Semi-Direct Burial)

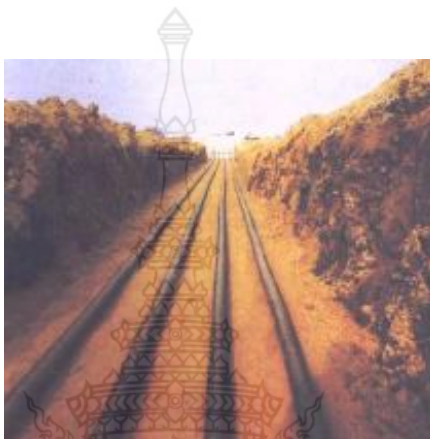
เป็นการก่อสร้างโดยนำท่อที่สามารถดัดงอได้ (Flexible) มาใช้คือ ท่อ Corrugated ท่อ HDPE หรือ ท่อ RTRC ซึ่งลักษณะการก่อสร้างจะใช้ Concrete Spacer Block บังคับท่อดังกล่าวเป็นระยะๆ เพื่อช่วยรักษาระยะห่างระหว่างท่อให้สม่ำเสมอ การก่อสร้างแบบนี้จะไม่มีการหุ้มท่อร้อยสายด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) ป้องกันอยู่ด้านบน และต้องมีบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน เช่นเดียวกับการติดตั้งแบบท่อหุ้มคอนกรีต (Duct Bank)



รูปที่ 2.8 การก่อสร้างแบบร้อยท่อฝังดิน

### 2.6.1.3 แบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

เป็นวิธีการติดตั้งสำหรับระบบจำหน่าย โดยไม่ใช้ท่อร้อยสายและไม่มีกรหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ใช้วิธีฝังสายเคเบิลใต้ดินให้มีความลึกตามมาตรฐาน ซึ่งมีการวางแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) และเทปเตือนอันตราย (Warning Sign Strip)



รูปที่ 2.9 การวางสายเคเบิลแบบฝังดินโดยตรง

## 2.6.2 การติดตั้งระบบเคเบิลใต้ดินแบบไม่เปิดหน้าดิน

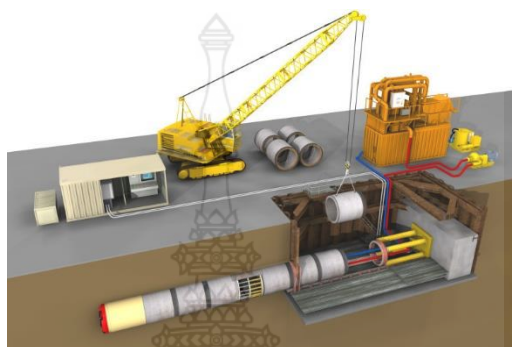
### 2.6.2.1 Horizontal Directional Drilling (HDD)

เป็นการก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน โดยไม่ต้องขุดเปิดผิวดินตลอดความยาวของท่อ ซึ่งระบบ Directional Drills จะมีขีดความสามารถที่กว้างขวางกว่าวิธีการอื่น ๆ มาก กลุ่มพื้นที่ก่อสร้างมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ซึ่งความสามารถในการควบคุมความลึกและทิศทาง รวมถึงความสามารถเจาะลากท่อในแนวโค้งหลบหลีกอุปสรรคสิ่งกีดขวางได้ จึงเป็นวิธีการวางท่อใต้ดินที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง



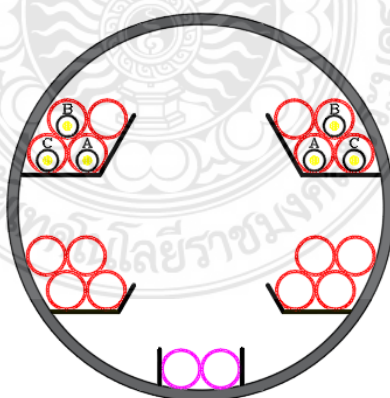
รูปที่ 2.10 การติดตั้งสายเคเบิลด้วยระบบ HDD

Pipe Jacking เป็นวิธีการสร้างท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน โดยที่ไม่ต้องขุดเปิดผิวดินตลอดความยาวของท่ออีกวิธีหนึ่งหรือเรียกว่าวิธีดันท่อ ซึ่งต้องมีเครื่องมือที่ใช้ดันท่อที่เรียกว่า Jacking Frame และจำเป็นต้องมีพื้นที่สำหรับติดตั้ง Jacking Frame



รูปที่ 2.11 การก่อสร้างระบบเคเบิลแบบ Pipe Jacking

นอกจากนี้การติดตั้งแบบ Pipe Jacking จะต้องมีบ่อพักสาย (Manhole or Handhole) บนพื้นดินจะต้องมีหลักบอกแนวท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน (Cable Route Marker) แสดงไว้ตามแนวท่อด้วย สำหรับวิธีนี้ตลอดความยาวของแนวท่อจะเป็นแนวตรงตลอดแต่อาจสามารถเป็น แนวโค้งได้เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.12 การจัดวางท่อร้อยสายเคเบิลใน Pipe Jacking



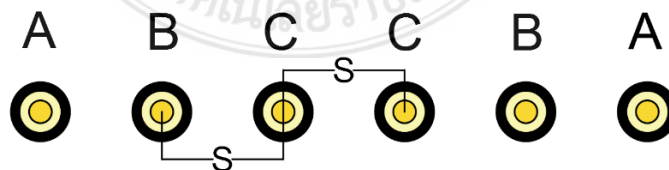
### 2.6.3 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินภายในท่อร้อยสายแบบการติดตั้งต่างๆ หรือภายใน Cable trench สิ่งที่ต้องพิจารณาคือการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินจะต้องมีการเรียงตาม Phase Relationship แต่ถ้าหากมีการจัดวางสายไม่เป็นไปตาม Phase Relationship จะทำให้ค่า Inductance ของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากันทำให้การรับกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน ไม่เท่ากันยิ่งโหลดมีค่าสูงมากๆ กระแสที่ไหลในเคเบิลแต่ละเส้นยิ่งแตกต่างกัน การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 3 เฟส สามารถ แบ่งการจัดเรียงออกเป็น 2 แบบหลักๆ ดังนี้

การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat Formation มีการเรียงตาม Phase Relationship โดยเรียงแบบ ABC ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การจัดวางแบบนี้ระยะห่างระหว่างเฟสจะเท่ากัน ( $S$ ) ส่วนการวางสายเคเบิลแบบ Flat 2 วงจร จะมีการเรียงแบบ ABC และ CBA ซึ่งการจัดวางแบบนี้ระยะห่างระหว่างเฟสจะเท่ากับระยะห่างระหว่างวงจร ( $S$ ) และระหว่างวงจรเฟสที่อยู่ติดกันควรเป็นเฟสเดียวกัน ดังรูปที่ 2.15 ในกรณีที่ เป็นสายเคเบิลใต้ดิน 2 เส้นต่อหนึ่งเฟส (Bundle) การจัดเรียงแบบนี้ค่า Inductance ของเฟสเดียวกันจะเท่ากันแต่ค่า Inductance ของแต่ละเฟสจะไม่เท่ากัน กระแสโหลดจะแบ่งไหลภายในเฟสเดียวกันใกล้เคียงกันแต่กระแสโหลดต่างเฟสกันจะแตกต่างกัน ถ้ามีการจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินบน Rack หลายๆ ชั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ระยะห่างระหว่างชั้นไม่น้อยกว่า 300 มม.

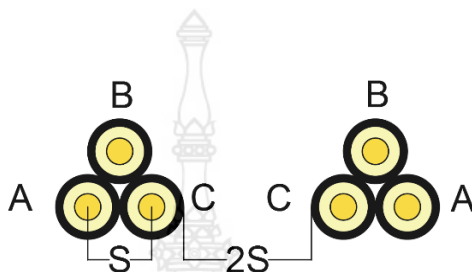


รูปที่ 2.13 การจัดวางสายเคเบิลแบบ Flat Formation



รูปที่ 2.14 การจัดวางสายเคเบิลแบบ Flat Formation 2 วงจร

การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation การจัดวางสายเคเบิลแบบ Trefoil โดยมีการจัดเรียงตาม Phase Relationship การจัดวางแบบนี้ระยะห่างระหว่างเฟสจะเท่ากัน ( $S$ ) ระยะห่างระหว่างวงจรถายเป็น 2 เท่าของระยะห่างระหว่างเฟส ( $2S$ ) และระหว่างวงจรเฟสที่อยู่ติดกันควรเป็นเฟสเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ Inductance แต่ละเฟสในวงจรเดียวกันจะเท่ากัน



รูปที่ 2.15 การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation 2 วงจร

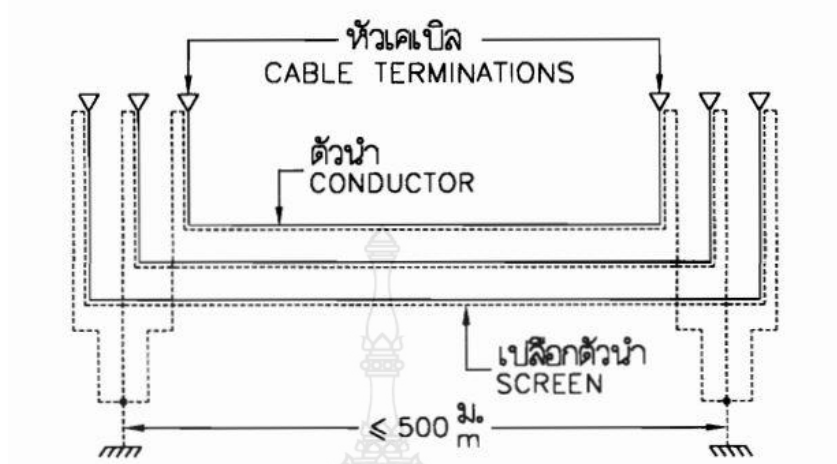
การจัดเรียงสายเคเบิลตาม Phase Relationship มีผลในเรื่องของ Magnetic Field ที่ออกจากสายเคเบิลใต้ดินอีกด้วย โดยการจัดเรียงแบบ ABC CBA ซึ่งมีการจัดเรียง Phase Sequence ของสายเคเบิลทำให้ Magnetic Field ที่ออกมาน้อยกว่าการจัดเรียงแบบ ABC และ ABC ในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นจะเกิดปัญหาการจัดเรียง Phase Sequence ภายใน Duct Bank ของระบบเคเบิลใต้ดิน 115 กิโลโวลต์เท่านั้นส่วนระบบ 22 – 33 กิโลโวลต์ จะไม่พบปัญหานี้

## 2.7 การต่อลงดิน

การต่อลงดินของระบบเคเบิลใต้ดินนั้นจะมีการต่อร่วมกับเปลือกตัวนำของสายเคเบิลใต้ดินด้วยซึ่งแบ่งการต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบตามระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 2 ระดับ ดังนี้

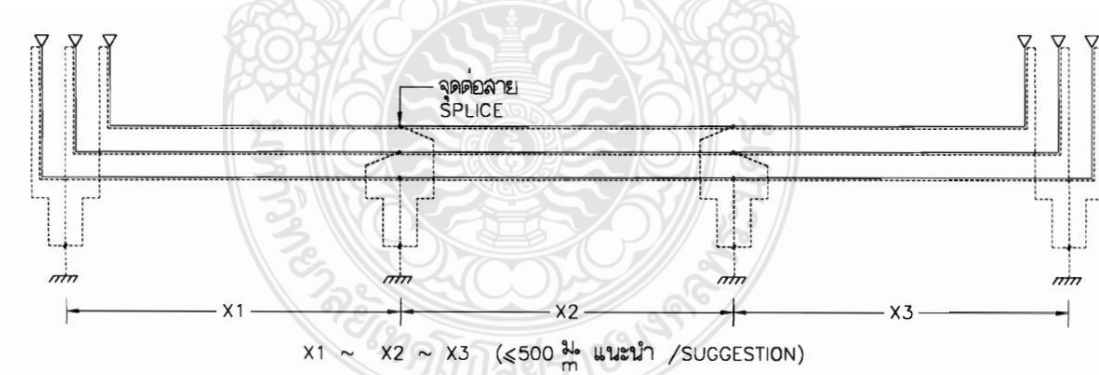
### 2.7.1 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน ระบบ 22-33 kV

การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) หมายถึงการนำเปลือกโลหะต่อร่วมกันลงดินที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้านแต่ในกรณีนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นทำให้สายเคเบิลสามารถนำกระแสได้ลดลง ใช้สำหรับระยะทางไม่เกิน 500 ม.



รูปที่ 2.16 การต่อลงดินทั้งสองปลาย

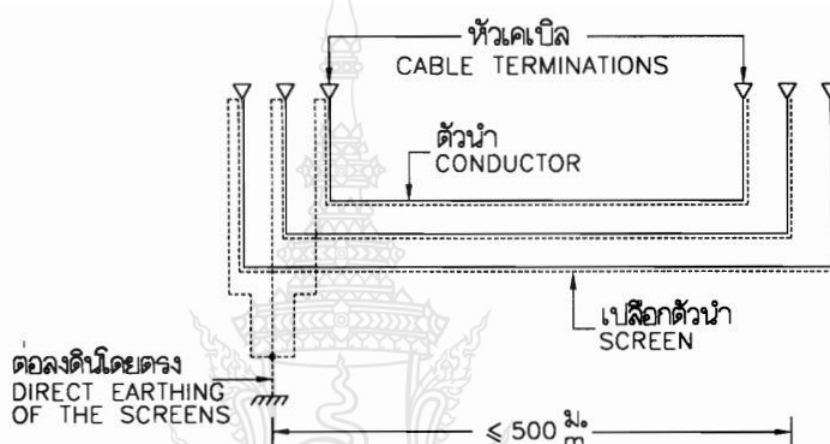
การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points Bonding) วิธีนี้เป็นการดัดแปลงมาจากการต่อลงดินทั้งสองปลาย โดยจะทำการต่อลงดินที่ปลายสายเคเบิลและทุกจุดที่มีการต่อสาย ระยะระหว่างจุดไม่เกิน 500ม.



รูปที่ 2.17 การต่อลงดินแบบหลายจุด

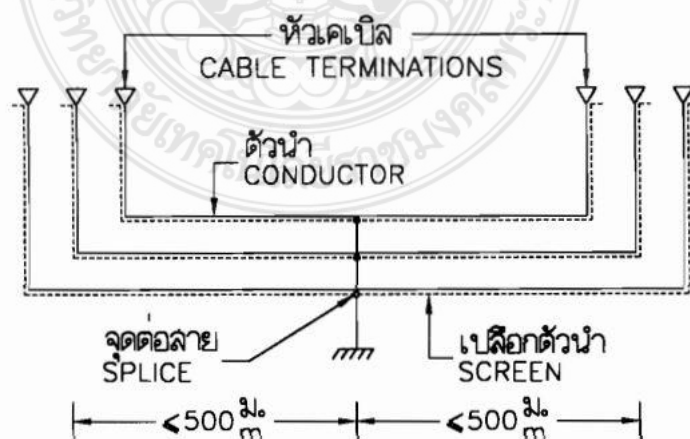
### 2.7.2 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน ระบบ 115 kV

การต่อลงดินข้างเดียว (Single-Point Bonding) หมายถึง การนำเปลือกโลหะต่อร่วมกันที่ปลายสายเคเบิลด้านใดด้านหนึ่ง แต่ในกรณีนี้จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะแต่ไม่มีกระแสไหลที่เปลือกโลหะ โดยแรงดันที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นตามความยาวของสายเคเบิลและกระแสใช้งาน ทำให้การต่อลงดินแบบนี้ใช้กับการวางสายเคเบิลระยะสั้นๆไม่เกิน 500 ม.



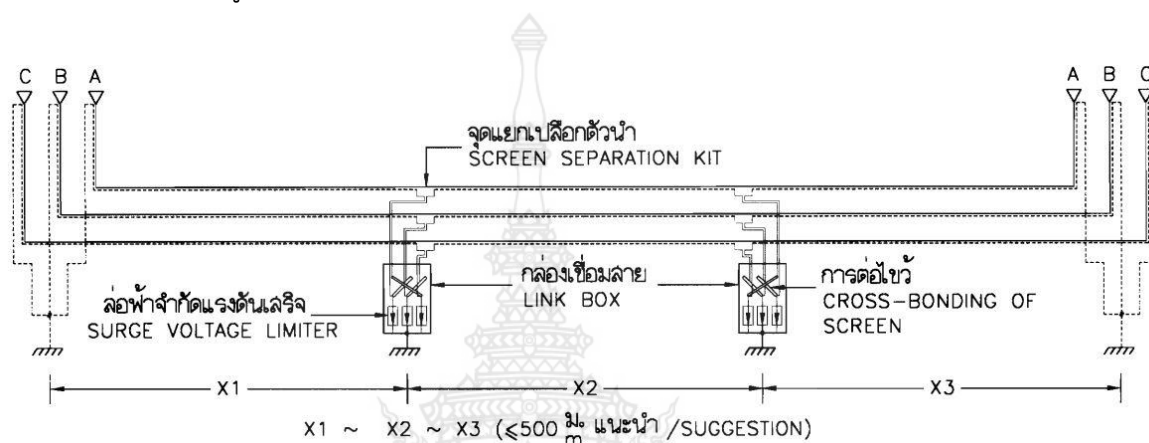
รูปที่ 2.18 การต่อลงดินข้างเดียว

การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) เป็นการดัดแปลงมาจากการต่อแบบข้างเดียว เพื่อให้ใช้ได้กับระยะเดินสายที่ไกลขึ้น สามารถใช้สำหรับระยะทางมากกว่า 500 ม. แต่ไม่เกิน 1,000 ม.



รูปที่ 2.19 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง

การต่อลงดินแบบไขว้สลับ (Cross-Bonding) หมายถึง การนำเปลือกโลหะของสายเคเบิลที่อยู่ใกล้กัน (เฟส A ต่อกับเฟส B, เฟส B ต่อกับเฟส C, เฟส C ต่อกับเฟส A) ตามรูปด้านล่าง ในกรณีนี้จะมีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่เปลือกโลหะแต่จะไม่มีกระแสไหลที่เปลือกโลหะ วิธีนี้ทำให้สายเคเบิลสามารถนำกระแสได้สูง



รูปที่ 2.20 การต่อลงดินแบบไขว้สลับ

## 2.8 การคำนวณค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

การคำนวณค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ คำนวณตามรูปแบบของมาตรฐาน IEC 60287-1-1 (2014-11) และ IEC 60287-2-1 (2015-04) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินนั้น ทำให้ทราบถึงความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูงสุดของสายเคเบิลใต้ดิน 1 เส้น (เคเบิลที่คาดว่าจะมีอุณหภูมิสูงสุดในกลุ่มของเคเบิลทั้งหมด) โดยที่ไม่ทำให้ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินนี้เสียหายหรือชำรุด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ติดตั้งจริง โดยเคเบิลใต้ดินในกรณีนี้จะติดตั้งใน Pipe Jacking และมีการต่อลงดินแบบไขว้สลับ ซึ่งการติดตั้งที่แตกต่างกันมีผลต่อการเลือกสมการและค่าพารามิเตอร์ ในการคำนวณ โดยการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสนั้น แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (2.1)$$

โดยที่	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแกนตัวนำไฟฟ้าหนึ่งแกน (A)
	$\Delta\theta$	คือ อุณหภูมิตัวนำไฟฟ้าขึ้นไปถึงอุณหภูมิผิวดิน (K)
	$R$	คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ( $\Omega/m$ )
	$W_d$	คือ ความสูญเสียในฉนวนไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวสำหรับฉนวนรอบตัวนำไฟฟ้า (W/m)
	$T_1$	คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างตัวนำไฟฟ้า และเปลือกโลหะ (K.m/W)
	$T_2$	คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างเปลือกโลหะ และเกราะเคเบิล (K.m/W)
	$T_3$	คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว รอบนอกเปลือกของสายเคเบิล (K.m/W)
	$T_4$	คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างผิวสายเคเบิล และสื่อโดยรอบ (K.m/W)
	$n$	คือ จำนวนของตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลที่รับภาระโหลด (ตัวนำไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน และรับภาระโหลดเดียวกัน)
	$\lambda_1$	คือ อัตราส่วนของความสูญเสียในเปลือกโลหะต่อความสูญเสียรวมในตัวนำไฟฟ้าทั้งหมดในสายเคเบิลนั้นๆ
	$\lambda_2$	คือ อัตราส่วนของความสูญเสียใน armour ต่อความสูญเสียรวมในตัวนำไฟฟ้าทั้งหมดในสายเคเบิลนั้นๆ

ในการหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินนั้นจากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่าต้องการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อนำมาคำนวณหาผลลัพธ์ ซึ่งผลลัพธ์นั้นไม่สามารถที่จะใช้เครื่องมือวัดค่าได้ จึงได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องมือวัดสามารถหาค่าได้มาคำนวณตามรูปแบบและเงื่อนไขตามมาตรฐาน IEC 60287-1-1 (2014-11) เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ของค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน โดยหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

2.8.1 การหาค่า  $R$  (the alternating current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature)

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (2.2)$$

โดยที่	$R$	คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ( $\Omega/m$ )
	$R'$	คือ ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ( $\Omega/m$ )
	$y_s$	คือ ตัวประกอบผลกระทบที่ผิว
	$y_p$	คือ ตัวประกอบการแจกแจงซ้ำของกระแสในตัวนำไฟฟ้า

สำหรับการหาค่า  $R$  จำเป็นต้องรู้ค่า  $R'$ ,  $y_s$  และ  $y_p$  ก่อน โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3), (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ ซึ่งในการหาค่าของ  $y_s$  และ  $y_p$  จำเป็นต้องทราบค่าของ  $x_s$  และ  $x_p$  โดยหาได้จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ ซึ่งจะสมการแสดงได้ดังนี้

$$R' = R_o [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (2.3)$$

โดยที่	$R_o$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนกระแสตรงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ( $\Omega/m$ )
	$\alpha_{20}$	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียสต่อเคล
	$\theta$	คือ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้า ( $^{\circ}C$ )

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (2.4)$$

โดยที่	$x_s$	คือ ข้อพิสุจน์ของฟังก์ชันเบสเซล ใช้เพื่อคำนวณผลกระทบที่ผิว
--------	-------	--

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (2.5)$$

- โดยที่  $x_p$  คือ ข้อพิสูจน์ของฟังก์ชันเบสเซล ใช้เพื่อคำนวณการแจกแจงซ้ำของกระแสในตัวนำไฟฟ้า
- $d_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตัวนำไฟฟ้า (mm)
- $s$  คือ ระยะห่างระหว่างแกนตัวนำไฟฟ้า (mm)

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (2.6)$$

- โดยที่  $f$  คือ ความถี่ในหน่วย เฮิรตซ์
- $R'$  คือ ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ( $\Omega/m$ )
- $k_s$  คือ ตัวประกอบใช้ในการคำนวณ  $x_s$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (2.7)$$

- โดยที่  $k_p$  คือ ตัวประกอบใช้ในการคำนวณ  $x_p$

### 2.8.2 การหาค่า $W_d$ (dielectric losses per unit length per phase)

Dielectric losses คือ ความสูญเสียในฉนวนไฟฟ้า เกิดจากที่เมื่อเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นและ ฉนวนที่ทำการหุ้มตัวนำไฟฟ้าอยู่จะได้รับผลกระทบโดยเกิดการโคจรผิดปกติของอิเล็กตรอน เกิดเป็นการสูญเสียในฉนวนไฟฟ้าและทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)



$$W_d = \omega C U_o^2 \tan \delta \quad (2.8)$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f$

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว (F/m)

$U_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเทียบดิน (V)

$\tan \delta$  คือ ตัวประกอบความสูญเสียทางไฟฟ้าของฉนวนที่ความถี่กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิใช้งาน

ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว  $C$  (The capacitance for circular conductors) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left( \frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad (2.9)$$

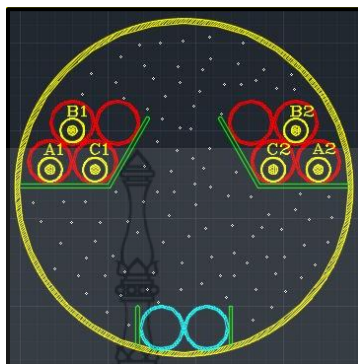
โดยที่  $\epsilon$  คือ ค่าความเป็นฉนวน

$D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวน (ไม่รวมเปลือก) (mm)

$d_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้า, รวมถึงเปลือก, ถ้ามี (mm)

**2.8.3 การหาค่า  $\lambda_1$**  (ratio of losses in the metallic sheaths to total losses in all conductors in the cable) คือ อัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียในชั้นของเปลือกโลหะ (Grounding Screen) ต่อความสูญเสียในตัวนำไฟฟ้า โดยค่าที่ได้นี้จะดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60287-1-1 (2014-11) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.12) ตามกรณีของรูปแบบการวางสายเคเบิลรูปแบบสามเหลี่ยม (trefoil formation) และรูปแบบราบ (flat formation) ตามลำดับ โดยรูปแบบทั้งหมดมีการต่อลงดินแบบไขว้สลับ ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังนี้

## รูปแบบ trefoil



รูปที่ 2.21 รูปแบบการวางสายเคเบิลแบบ trefoil ในท่อร้อยสาย

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (2.10)$$

- โดยที่  $R_s$  คือ ความต้านทานของเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาว ที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด
- $X$  คือ รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของเปลือกโลหะต่อความยาวของสายเคเบิล
- $$= 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) (\Omega/\text{m})$$
- $s$  คือ ระยะห่างระหว่างแกนตัวนำไฟฟ้าใน
- $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกโลหะ (mm)

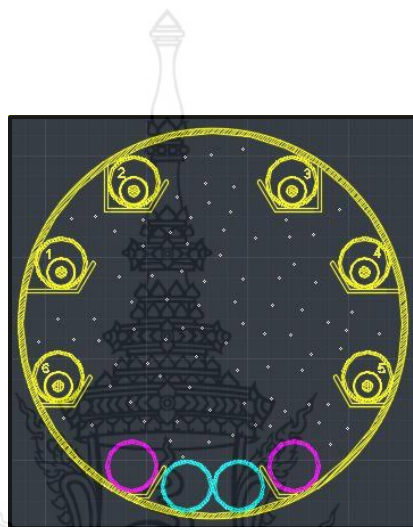
สำหรับการคำนวณ  $\lambda_1$  ในรูปแบบการวางแบบ trefoil จำเป็นต้องทราบค่าของ  $R_s$  โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)] \quad (2.11)$$

- โดยที่  $R_{s0}$  คือ ความต้านทานของเปลือกโลหะที่ 20 องศาเซลเซียส ( $\Omega/\text{m}$ )

- $\alpha_{20}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมวลคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อเคลวิน
- $\theta_{sc}$  คือ อุณหภูมิของเปลือกโลหะที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ซึ่งจะต้องสมมุติค่าขึ้นมาในขั้นต้นและทำการคำนวณซ้ำด้วยค่าที่เปลี่ยนไป จนค่าทั้งสองลู่เข้าหากัน ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปแบบ flat



รูปที่ 2.22 การวางสายเคเบิลรูปแบบ flat ในท่อร้อยสาย

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad (2.12)$$

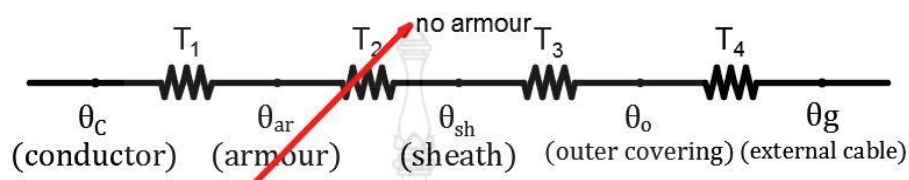
สำหรับค่า  $Q$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ ดังสมการที่ (2.13)

$$Q = X - \frac{X_m}{3} \quad (2.13)$$

โดยที่  $X_m$  คือ ค่าความสัมพันธ์รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลระหว่างเปลือกโลหะและตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลอื่นอีกสองสาย  $= 2\omega 10^{-7} \ln(2) (\Omega/\text{m})$

### 2.8.4 การหาค่า $T$ (Thermal Resistance)

ความต้านทานความร้อนของวัสดุในสายเคเบิลใต้ดิน  $T$  ซึ่งจะแบ่งออกเป็นช่วงตามวัสดุที่มีความต้านทานความร้อน (ฉนวน) ดังนี้



รูปที่ 2.23 ความต้านทานความร้อนในสายเคเบิลแต่ละช่วง

ช่วง  $T_1$  คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและเปลือกโลหะ โดยกรณีนี้เลือกใช้สมการตามลักษณะของสายเคเบิลแกนเดี่ยวที่ระบุในมาตรฐาน IEC 60287-2-1

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (2.14)$$

โดยที่  $\rho_T$  คือ สภาพต้านทานความร้อนของฉนวน (K.m/W)  
 $d_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้า (mm)  
 $t_1$  คือ ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเปลือกโลหะ (mm)

ช่วง  $T_2$  คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างเปลือกโลหะและเกราะเคเบิล โดยกรณีนี้สายเคเบิลไม่มีชั้นที่เรียกว่า เกราะเคเบิล ค่า  $T_2$  จึงไม่นำมาคำนวณ

ช่วง  $T_3$  คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว รอบนอกเปลือกของสายเคเบิล โดยกรณีนี้เลือกใช้สมการตามลักษณะของสายเคเบิล ระบุในมาตรฐาน IEC 60287-2-1

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right] \quad (2.15)$$

โดยที่  $t_3$  คือ ความหนาของเปลือกท่อหุ้มเคเบิล (mm)  
 $D'_a$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกโลหะ (mm)

ช่วง  $T_4$  คือ ความต้านทานความร้อนต่อหน่วยความยาว ระหว่างผิวสายเคเบิลและสื่อโดยรอบ (ถัดจากผิวเคเบิลไปจนถึงดิน) โดยกรณีนี้เลือกใช้สมการตามลักษณะของการจัดวางสายเคเบิลหัวข้อที่เคเบิลติดตั้งในท่อระบุในมาตรฐาน IEC 60287-2-1 ซึ่งการคำนวณค่า  $T_4$  จะต้องแบ่งเป็นช่วงตามสมการที่ (2.16)

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4 + T_{corr} \quad (2.16)$$

โดยที่  $T'_4$  คือ ความต้านทานความร้อนในท่อร้อยสาย(ระหว่างสายเคเบิลกับท่อ) (K.m/W)  
 $T''_4$  คือ ความต้านทานความร้อนของท่อร้อยสายเคเบิล (K.m/W)  
 $T'''_4$  คือ ความต้านทานความร้อนของกลุ่มท่อใน Pipe Jacking (K.m/W)  
 $T_{corr}$  คือ ความต้านทานความร้อนของ Pipe Jacking (K.m/W)

สมการหาค่า  $T'_4$  แสดงได้ดังนี้

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $U, V, Y$  คือ ค่าคงที่, ขึ้นอยู่กับการติดตั้ง  
 $D_e$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสายเคเบิล (mm)  
 $\theta_m$  คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของช่องว่างระหว่างสายเคเบิลกับท่อซึ่งจะต้องสมมุติค่าขึ้นมา  
 ในขั้นต้นและทำการคำนวณซ้ำด้วยค่าที่เปลี่ยนไป จนค่าทั้งสองคู่เข้าหากัน (°C)  
 สมการหาค่า  $T''_4$  แสดงได้ดังนี้

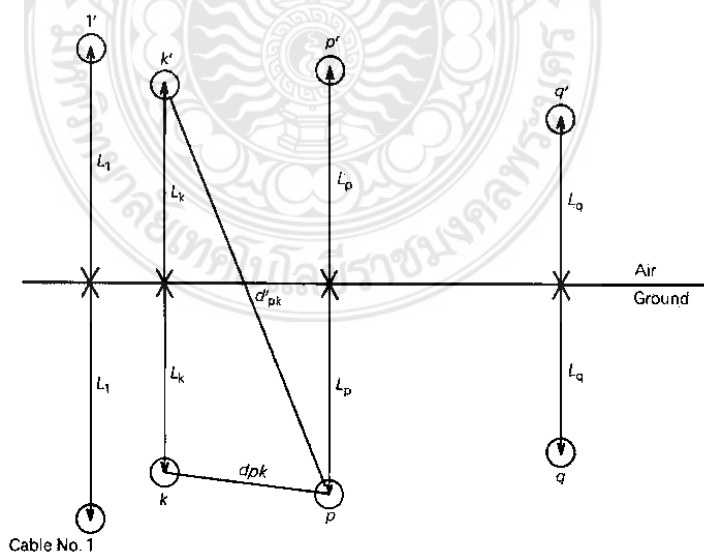
$$T''_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ \frac{D_o}{D_d} \right] \quad (2.18)$$

- โดยที่  $D_o$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของท่อร้อยสาย (mm)  
 $D_d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อร้อยสาย (mm)  
 $\rho_T$  คือ สภาพต้านทานความร้อนของวัสดุท่อ (K.m/W)

สมการหาค่า  $T''_4$  คำนวณได้โดยการตั้งสมมติฐานที่ว่าท่อร้อยสายนั้นเปรียบเสมือนสายเคเบิล โดยกลุ่มของเคเบิลที่มีโหลดเท่ากัน ระบุในมาตรฐาน IEC 60287-2-1 มาคำนวณดังนี้

$$T'''_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left\{ 2u \left[ \left( \frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left( \frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left( \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left( \frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\} \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $d_{pk}$  คือ ระยะห่างของเคเบิลอ้างอิง (กำหนดโดยเลือกเคเบิลที่คาดว่าจะมีอุณหภูมิมากที่สุดในกลุ่มสายเคเบิล) กับเคเบิลอื่นๆในกลุ่มนั้น  
 $d'_{pk}$  คือ ระยะห่างของเคเบิลอ้างอิง กับเคเบิลที่เป็นภาพสะท้อน



รูปที่ 2.24 ภาพสะท้อนการวางสายเคเบิล

สมการหาค่า  $T_{corr}$  แสดงได้ดังนี้

$$T_{corr} = \frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2.20)$$

- โดยที่  $N$  คือ จำนวนเคเบิลที่รับโหลดใน Pipe Jacking;  
 $\rho_e$  คือ สภาพต้านทานความร้อนของดินรอบๆ Pipe Jacking (K.m/W);  
 $\rho_c$  คือ สภาพต้านทานความร้อนของคอนกรีต (K.m/W);  
 $u = \frac{L_G}{r_b}$   
 $L_G$  คือ ความลึกถึงจุดกลางของ Pipe Jacking (mm);  
 $r_b$  คือ รัศมีสมมูลของ Pipe Jacking (mm) โดยกำหนดให้

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad (2.21)$$

ค่า  $x$  และ  $y$  คือด้านกว้างและยาวตามลำดับ ของ Pipe Jacking โดยไม่คำนึงถึงตำแหน่ง  
 สูตรนี้ใช้ได้กับอัตราส่วนของ  $\frac{y}{x}$  น้อยกว่า 3 เท่านั้น

### บทที่ 3

## รูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

#### 3.1 บทนำ

การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาค้ำขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินโดยกำหนดรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ใช้พารามิเตอร์ของระบบส่งจ่าย 115 kV มีการต่อลงกราวด์ของระบบเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งได้พิจารณาผลของแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนที่เกินขึ้นในเปลือกโลหะของสายเคเบิลใต้ดินซึ่งจะกล่าวต่อไป

#### 3.2 สายเคเบิลใต้ดินของระบบส่งจ่าย 115 kV

สายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV ถูกจำลองขึ้นในรูปแบบการจัดวางแบบสามเหลี่ยมและการจัดวางแบบราบ ซึ่งมีติดตั้งระบบเคเบิลใต้ดินแบบ Pipe Jacking 1 ตัวนำ ฉนวนชนิด XLPE ขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร มีความยาว 1500 เมตร ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบตามตารางที่ 3.1

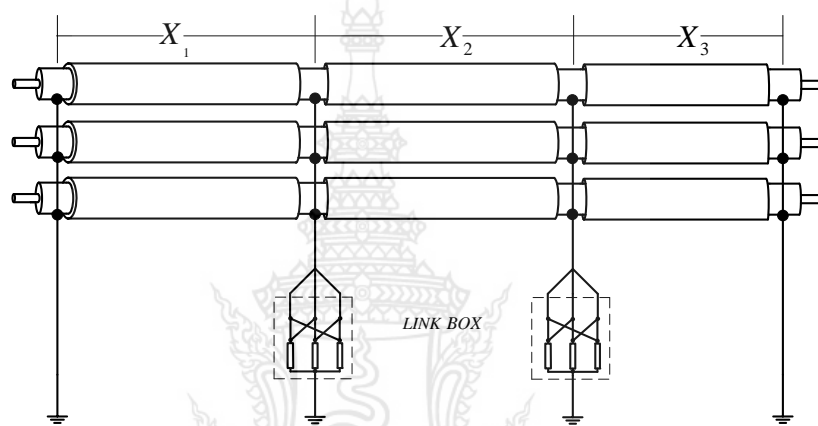
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายเคเบิลใต้ดินระบบส่งจ่าย 115 kV

XLPE underground cable 800 sq.mm	Thick (mm)	Diameter (mm)
Conductor	-	34
Conductor screen	2	38
Insulation	16	70
Insulation screen	2	74
Water blocking	0.5	75
Copper wire screen or Sheath	1.5	78
Water blocking	0.5	79
Aluminium cover	0.5	80
Jacket (PE sheath)	5	90



### 3.2.1 การต่อกราวด์ของระบบเคเบิลใต้ดิน

สำหรับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV ที่มีระยะทางมากกว่า 1500 เมตร จะต้องมีการต่อลงกราวด์แบบไขว้ (Cross-bonding) ซึ่งกรณีนี้จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่เปลือกโลหะ แต่จะไม่มีกระแสไหลที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลและจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่กล่องเชื่อมสาย แสดงได้ดังภาพที่ 3.1 โดยมีระยะห่างการต่อลงกราวด์ตามข้อมูลในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การต่อลงดินแบบไขว้

ตารางที่ 3.2 ระยะห่างของสายแต่ละช่วงที่มีการต่อลงกราวด์

ระยะทาง ( $X$ )	$X_1$	$X_2$	$X_3$
ระยะจุดการต่อลงดินแบบไขว้ (เมตร)	500	500	500

### 3.3 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

เสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV มีการจัดเรียงแบบแยกสายต่อลงดินระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกัปดักเสิร์จ และแบบต่อสายลงดินระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกัปดักเสิร์จ เพื่อลดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์บนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้สายเคเบิลทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวน ขนาด 120 ตารางมิลลิเมตร และสายอลูมิเนียมเปลือยขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร และกัปดักเสิร์จ 96 กิโลโวลต์ 10 กิโลแอมป์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

**สายเคเบิลทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวน** นำมาใช้เพื่อป้องกันการเกิดเบรกตาวอร์นบนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้สายเคเบิลทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนขนาด 120 ตารางมิลลิเมตร เป็นสายกราวด์ตามแบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

**สายอลูมิเนียมเปลือย** เป็นจุดเชื่อมต่อหรือจุดสิ้นสุดของสายเคเบิลใต้ดินกับสายไฟฟ้าเหนือดิน โดยจะต่อร่วมกับดักเสิร์จโดยใช้สายอลูมิเนียมเปลือย เพื่อป้องกันไม่ให้อิทธิพลของสายเคเบิลใต้ดินเสียหาย

**กับดักเสิร์จ** ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิทธิพลของสายเคเบิลใต้ดินเสียหายเนื่องจากแรงดันเสิร์จ (แรงดันสูงจากฟ้าผ่า จากการสับสวิตช์หรืออื่น ๆ) โดยจะรักษาระดับแรงดันไว้ไม่ให้มีค่าเกินกว่าที่ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินหรืออุปกรณ์ทนได้ ในระบบ 115 kV จะใช้กับดักเสิร์จชนิดซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ตามข้อมูลพิกัดในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** พิกัดกับดักเสิร์จระบบ 115 kV

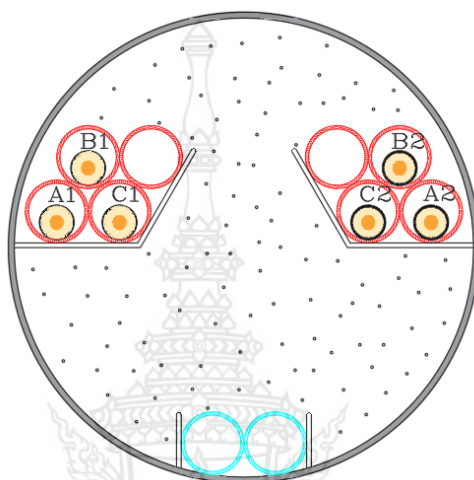
พิกัด surge arrester	Requirement
Nominal system voltage	115 kV
Maximum system voltage	123 kV
Maximum residual voltage ( $U_{res}$ ) at the nominal discharge current	$2.85 U_r$
Rated Voltage ( $U_r$ )	96 kV
Nominal discharge current ( $I_n$ )	10 kA

### 3.4 รูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

สำหรับการออกแบบรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 kV จำนวน 2 วงจร ได้มีการออกแบบให้ติดตั้งระบบเคเบิลแบบ Pipe Jacking โดยมีการออกแบบจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม (Trefoil Formation) และการจัดวางสายแบบราบ (Flat Formation) ด้วยโปรแกรม AutoCAD ซึ่งเป็นการจัดวางสายของระบบเคเบิลใต้ดินที่นิยมในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.4.1 การจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม (Trefoil Formation)

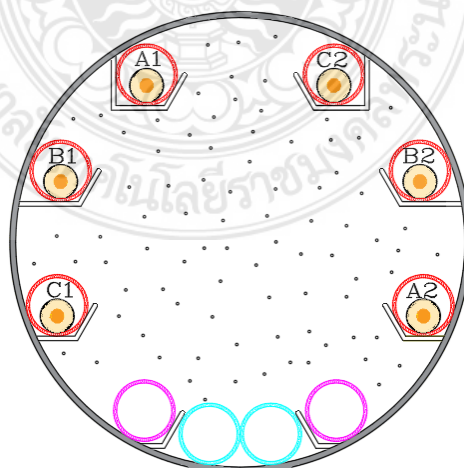
การออกแบบการจัดวางสายแบบสามเหลี่ยมจะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายของสายเคเบิลแต่ละเฟสในวงจรเดียวกันมีระยะเท่ากัน  $S_a = S_b = S_c = S$  ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม 2 วงจร

### 3.4.2 การจัดวางสายแบบราบ (Flat Formation)

สำหรับการออกแบบการจัดวางสายแบบราบจะมีระยะห่างระหว่างสายของสายเคเบิลแต่ละเฟสไม่เท่ากันทั้ง 2 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดวางสายแบบราบ 2 วงจร

### 3.5 การวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิล

เนื่องจากรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินทั้งการจัดวางแบบสามเหลี่ยมและการจัดวางแบบราบนั้นมีระยะห่างการจัดวางสายที่แตกต่างกันซึ่งอาจผลต่อพิกัดกระแสของสายเคเบิล ดังนั้นจึงดำเนินการคำนวณรูปแบบการจัดวางสายที่ติดตั้งทั้ง 2 รูปแบบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อพิกัดกระแสของสายเคเบิลหรือไม่ ซึ่งการคำนวณหาพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามมาตรฐานของ IEC ดังสมการที่ (3.1) โดยมีค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบการจัดวางสายแบบสามเหลี่ยมและรูปแบบการจัดวางสายแบบราบ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เพื่อการคำนวณหาพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สายเคเบิลสามารถทนได้ในกรณีที่โหลดเต็มพิกัด

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการจัดวางสายแบบสามเหลี่ยม (Trefoil Formation)

พารามิเตอร์		ค่า	หน่วย
Permissible temperature rise of conductor above ambient temperature	$\Delta\theta$	60	$^{\circ}\text{C}$
Alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	R	0.000031270	$\Omega/\text{m}$
Dielectric losses per unit length for the insulation surrounding the conductor	$W_d$	0.314858354	K.m/W
Thermal resistance per unit length between one conductor and sheath	$T_1$	0.446032382	K.m/W
Thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour	$T_2$	0	K.m/W
Thermal resistance per unit length of the external serving of the cable	$T_3$	0.077775007	K.m/W
Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (A)	$T_4$	3.226691092	K.m/W

Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (B)	$T_4$	3.241844485	K.m/W
Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (C)	$T_4$	3.320212122	K.m/W
Number of conductors in a cable	$n$	1	core
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (A)	$\lambda_1$	0.003853627	
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (B)	$\lambda_1$	0.003853372	
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (C)	$\lambda_1$	0.003852083	
Ratio of the losses in the armouring to total losses in all conductors in that cable	$\lambda_2$	0	

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการจัดวางสายแบบราบ (Flat Formation)

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
Permissible temperature rise of conductor above ambient temperature	$\Delta\theta$	60 $^{\circ}\text{C}$
Alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	$R$	0.000030961 $\Omega/\text{m}$
Dielectric losses per unit length for the insulation surrounding the conductor	$W_d$	0.314858354 K.m/W
Thermal resistance per unit length between one conductor and sheath	$T_1$	0.446032382 K.m/W
Thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour	$T_2$	0 K.m/W
Thermal resistance per unit length of the external serving of the cable	$T_3$	0.077775007 K.m/W

Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (A)	$T_4$	3.028559292	K.m/W
Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (B)	$T_4$	3.063500086	K.m/W
Thermal resistance per unit length between cable surface and the surrounding medium (C)	$T_4$	2.988250230	K.m/W
Number of conductors in a cable	n	1	core
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (A)	$\lambda_1$	0.008829998	
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (B)	$\lambda_1$	0.006590469	
Ratio of the losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable (C)	$\lambda_1$	0.011477806	
Ratio of the losses in the armouring to total losses in all conductors in that cable	$\lambda_2$	0	

### 3.6 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในเปลือกโลหะของสายเคเบิล

การต่อกราวด์ที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลใต้ดินเพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ที่ฉนวน XLPE ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพในการทำงานยิ่งขึ้น ซึ่งกรณีการต่อกราวด์ที่เปลือกโลหะของระบบ 115 kV ที่ระยะทางมากกว่า 1000 เมตร จึงต้องมีการต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-bonding) ในกรณีนี้จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนขึ้นที่เปลือกโลหะของสายเคเบิล โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการจัดวางสายแบบสามเหลี่ยมและการจัดวางสายแบบราบ มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.6.1 แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะ

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเปลือกโลหะของสายเคเบิลที่มีการต่อดินแบบไขว้ (Cross bonding) นั้นจะส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่เปลือกโลหะสามารถพิจารณาโดยให้เปลือกโลหะของสายเคเบิลเป็นเสมือนตัวนำที่ขนานอยู่กับตัวนำเฟส ซึ่งแรงดันในเปลือกโลหะสามารถเกิดขึ้นในสายเคเบิลทั้ง 3 เฟส สำหรับกรณีการจัดวางสายเคเบิล 3 เฟส 2 วงจร สามารถคำนวณแรงเหนี่ยวนำภายในเปลือกโลหะในแต่ละเฟส ดังสมการที่ (3.2), (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$E_a = jI_a X_{aa} + jI_b X_{ab} + jI_c X_{ac} \quad (3.2)$$

$$E_b = jI_a X_{ab} + jI_b X_{bb} + jI_c X_{bc} \quad (3.3)$$

$$E_c = jI_a X_{ac} + jI_b X_{bc} + jI_c X_{cc} \quad (3.4)$$

### 3.6.2 กระแสไหลวนในเปลือกโลหะ

สำหรับระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อเปลือกโลหะลงดินแบบไขว้ (Cross-bonding) เป็นการลดกระแสไหลวนในเปลือกโลหะให้น้อยลง เพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ที่ฉนวน XLPE และตัวนำของสายเคเบิลสามารถนำกระแสได้สูงขึ้น ดังนั้นจึงดำเนินการคำนวณรูปแบบการจัดวางสายที่ติดตั้งทั้ง 2 รูปแบบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อกระแสไหลวนที่เปลือกโลหะหรือไม่ โดยการแสไหลวนภายในเปลือกโลหะสามารถคำนวณจากความสูญเสียทางไฟฟ้าในเปลือกโลหะ  $\lambda_1$  ดังสมการที่ (3.5)

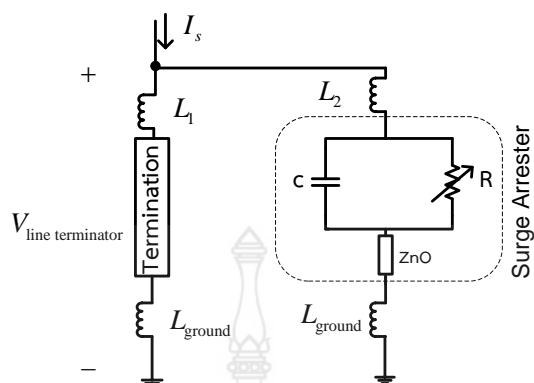
$$\lambda_1 = \frac{I_s^2 R_s}{I_c^2 R_c} \quad (3.5)$$

ดังนั้นจะได้กระแสไหลวนในเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวดังสมการที่ (3.6)

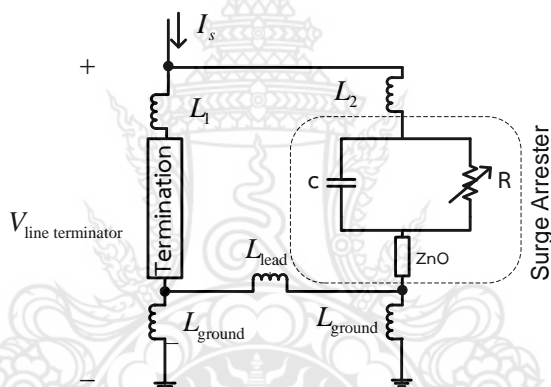
$$I_s^2 = \frac{\lambda_1 I_c^2 R_c}{R_s} \quad (3.6)$$

### 3.7 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมที่เสาดันขึ้นหัวสายเคเบิล

สำหรับการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมที่เสาดันขึ้นหัวสายเคเบิล โดยการคำนวณระหว่างแบบแยกสายต่อลงดินที่ตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกับดักเสิร์จ ดังรูปที่ 3.4 เปรียบเทียบกับแบบเชื่อมสายต่อลงดินระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกับดักเสิร์จดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแบบที่ไม่มีการเชื่อมกราวด์



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแบบที่มีการเชื่อมกราวด์

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 สามารถคำนวณแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเสาต้นขึ้นหัวสาย เคเบิลดังสมการที่ (3.7) โดยนำค่าความเหนี่ยวนำมาเป็นตัวชี้วัดปริมาณของแรงดันตกคร่อมที่เทียบกับ กระแสที่แปรผันตามเวลาที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นการคำนวณแบบแยกสายต่อลงดิน เปรียบเทียบกับแบบเชื่อมสายต่อลงดินนั้นสามารถลดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์บนเสาต้นขึ้นหัวสาย เคเบิลได้ดินหรือไม่ ซึ่งสามารถคำนวณแรงดันตกคร่อมทั้งหมดทางฝั่งหัวเคเบิล (Terminator) ดังสมการที่ (3.8)

$$V_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{line terminator}} = V_{\text{arrester}} + V_{L_2} + V_{L_{\text{ground}}} \quad (3.8)$$



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ที่พิจารณาการจัดวางสายในระบบ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยใช้รูปแบบสามเหลี่ยมและแบบราบ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นการดำเนินการภายใต้เงื่อนไขตามมาตรฐาน IEC ซึ่งจะสามารถแสดงผลการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลและแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะ

##### 4.2.1 การจัดวางรูปแบบสามเหลี่ยม (Trefoil formation)

ผลการวิเคราะห์นั้นอยู่ภายใต้เงื่อนไข เคเบิลเดินในท่อ XLPE การติดตั้งรูปแบบสามเหลี่ยมใน Pipe Jacking ความลึก 2 เมตร ค่าสภาพต้านทานความร้อนของดิน 1.2 K.m/W อุณหภูมิดิน 30 องศาเซลเซียส

##### ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม

		Phase A	Phase B	Phase C
Thermal of cable	(°C)	82.950	82.980	83.120
Loss in conductor	(W/m)	15.650	15.580	15.260
Loss factor		0.0039	0.0039	0.0039
Ampacity	(A)	707.42	705.97	698.58

จากตารางที่ 4.1 ความสามารถในการนำกระแสสูงสุดของวงจรนี้คือ 698 A หรือ 80 MVA ต่อสายเคเบิล 1 เส้น

##### ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม

		Phase A	Phase B	Phase C
Loss in metallic screen	(W/m)	0.060	0.060	0.059
Current in metallic screen	(A)	16.32	16.29	16.11
Voltage in metallic screen	(V/m)	0.057	0.063	0.055

จากตารางที่ 4.2 การจัดวางแบบสามเหลี่ยมจะมีค่าความสูญเสียในเปลือกโลหะและแรงดันเหนี่ยวนำใกล้เคียงกันเนื่องจากระยะห่างการจัดวางสายเท่ากัน

#### 4.2.2 การจัดวางรูปแบบราบ (Flat formation)

ผลการวิเคราะห์นั้นอยู่ภายใต้เงื่อนไข เคเบิลเดินในท่อXLPE การติดตั้งรูปแบบราบใน Pipe Jacking ความลึก 2 เมตร ค่าสภาพต้านทานความร้อนของดิน 1.2 K.m/W อุณหภูมิดิน 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พิกัดกระแสของสายเคเบิลแบบราบ

		Phase A	Phase B	Phase C
Thermal of cable	(°C)	82.580	82.640	82.520
Loss in conductor	(W/m)	16.470	16.340	16.620
Loss factor		0.0088	0.0066	0.0115
Ampacity	(A)	729.31	726.39	732.73

จากตารางที่ 4.3 ความสามารถในการนำกระแสสูงสุดของวงจรนี้คือ 726 A หรือ 84 MVA ต่อสายเคเบิล 1 เส้น

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแบบราบ

		Phase A	Phase B	Phase C
Loss in metallic screen	(W/m)	0.150	0.110	0.190
Current in metallic screen	(A)	25.36	21.82	29.05
Voltage in metallic screen	(V/m)	0.094	0.097	0.102

จากตารางที่ 4.4 การจัดวางแบบราบ (Flat formation) จะมีค่าความสูญเสียและแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะไม่เท่ากันเนื่องจากระยะห่างการจัดวางสายทั้ง 3 เฟสไม่เท่ากัน

### 4.3 ผลการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

#### 4.3.1 แบบไม่มีการต่อกราวด์ระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกับดักลึร์จ

การจัดวางสายต่อลงดินที่แยกกราวด์ระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักลึร์จเป็นการต่อสายดินแยกระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักลึร์จลงทั้งสองข้างของเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

ตารางที่ 4.5 แรงดันตกคร่อม Cable riser pole แบบไม่มีการเชื่อมกราวด์

Cable riser pole		แรงดันตกคร่อม (kV)
Surge arrester	$V_{\text{arrester}}$	273.6
Line	$V_{L_2}$	1956.9
Line ground	$V_{L_{\text{ground}}}$	10623.66
Terminator	$V_{\text{line terminator}}$	12854.16

จากตารางที่ 4.5 แรงดันตกคร่อมที่ช่องทางด้านหัวเคเบิลจำนวนมากเนื่องจากไม่มีการต่อกราวด์เข้าด้วยกันทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายกราวด์มากจึงเกิดแรงดันตกคร่อมที่สายกราวด์ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) บนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

#### 4.3.2 แบบต่อกราวด์ระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิลและตำแหน่งท้ายของกับดักลึร์จ

การจัดวางสายต่อลงดินที่เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อปลายสายเคเบิลและกับดักลึร์จเป็นการต่อสายจากตำแหน่งส่วนท้ายของจุดต่อปลายสายเคเบิลเข้ากับตำแหน่งส่วนท้ายของกับดักลึร์จ

ตารางที่ 4.6 แรงดันตกคร่อม Cable riser pole แบบมีการเชื่อมกราวด์

Cable riser pole		แรงดันตกคร่อม (kV)
Surge arrester	$V_{\text{arrester}}$	273.6
Line	$V_{L_2}$	1956.9
Line ground	$V_{L_{\text{ground}}}$	2038.083
Terminator	$V_{\text{line terminator}}$	4268.583

จากตารางที่ 4.6 แรงดันตกคร่อมที่ช่องทางด้านหัวเคเบิลลดลงเนื่องจากมีการต่อกราวด์เข้าด้วยกัน ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายกราวด์มีค่าน้อยลง จึงเกิดแรงดันตกคร่อมที่สายกราวด์ลดลง และลดความเสี่ยงที่จะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) บนเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดิน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

งานวิจัยบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการวิเคราะห์ตลอดจนข้อเสนอแนะของงานวิจัย ซึ่งจะได้นำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจ

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์พิกัดกระแสไฟฟ้าสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน จากผลการคำนวณสายเคเบิลแกนเดี่ยว ขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร ฉนวน XLPE เติมน้ำมันร้อยท่อ XLPE ขนาด 160 มิลลิเมตร ติดตั้งใน Pipe Jacking พบว่าการจัดวางเคเบิลรูปแบบสามเหลี่ยมมีค่าตัวประกอบความสูญเสียทางไฟฟ้าประมาณ 0.0039 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการจัดวางแบบราบ แต่มีอุณหภูมิที่ออกมาจากสายเคเบิลมากที่สุด 83.12 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากกว่าการจัดวางแบบราบ 0.48 องศาเซลเซียส เป็นผลให้เคเบิลในการจัดวางแบบราบมีความสามารถในการนำกระแสได้มากกว่า ในกรณีนี้มีการต่อลงดินแบบไขว้สลับจึงทำให้ระบบมีค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยมากจึงไม่มีผลกระทบต่อการนำกระแสของสายเคเบิล และทำให้เกิดความร้อนในเปลือกโลหะน้อยลง การจัดวางเคเบิลแบบราบที่มีพื้นที่ในการถ่ายเทอุณหภูมิจึงมีความเหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ความสูญเสียสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลทั้งสองแบบจะพบว่าความสูญเสียทางไฟฟ้า และแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสไหลวนในรูปแบบ Flat จะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากระยะห่างของการจัดวางสายในแต่ละเฟสที่มีระยะห่างระหว่างสายที่มากกว่าเป็นผลให้เกิดค่าต่างๆสูงกว่าการจัดวางแบบ Trefoil และ การจัดวางแบบ Flat ทำให้เกิดมุมต่างเฟสกันทำให้ค่าในแต่ละเฟสแตกต่างกัน นอกจากนี้ผลที่เกิดขึ้นในซิลด์ยังขึ้นอยู่กับขนาดของสายเคเบิลและกระแสในตัวนำของสายเคเบิล

การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเสาต้นขึ้นหัวสายเคเบิลใต้ดินผลการคำนวณพบว่าแบบที่ไม่มี การต่อกราวด์ระหว่างหัวเคเบิลและกับดักเสิร์จ มีแรงดันตกคร่อมที่หัวเคเบิลมากกว่าแบบที่ไม่มีการต่อกราวด์ระหว่างหัวเคเบิลและกับดักเสิร์จ 33% ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนระหว่างหัวเคเบิลกับกราวด์ การปรับปรุงรูปแบบสายต่อลงดินที่มีการต่อกราวด์ระหว่างตำแหน่งท้ายของหัวเคเบิล และตำแหน่งท้ายของกับดักเสิร์จ ทำให้ต้องเพิ่มสายต่อร่วมแต่จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมที่ลดลง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

พัฒนาให้เป็นแนวทางในการเลือกรูปแบบในการก่อสร้างระบบใต้ดินและเป็นแนวทางในการพิจารณารูปแบบการจัดวางสายกราวด์ในการก่อสร้างระบบใต้ดินให้มีประสิทธิภาพ



## บรรณานุกรม

- IEC Standard, Electric cable - Calculation of the current rating Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses. General. 2014. Public No. 60287-1-1.
- IEC Standard, Electric cable - Calculation of the current rating Part 2: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance. 2015. Public No. 60287-2-1
- IEC Standard, Conductors of insulated cables. 2004. Public No. 60228
- IEEE std 575-2014. 2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cable Rated 5 kV through 500 kV.
- IEEE Std 518-1982. 1982. Industrial Control committee of IEEE industrial Applications Society.
- SA1-015/37004. 115 kv UNDERGROUND CABLE RISER POLE STRUCTURE DOUBLE POLES, IN LINE CONSTRUCTION.
- RPRO-029/2558.2558. PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION 115 kV SURGE ARRESTERS.
- 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.
- George J. Anders. 1997. Rating of electric power cables – Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications, New York.
- วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ, ณัฐวุฒิ วงษ์แก้ว และกิตติพันธ์ ประมายันต์. 2558. แบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม.
- พงศ์ศรีณย์ ดานะประทีปกุล. 2539. วงจรและระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท. มงคล เดชนครินทร์, (บรรณาธิการ). 2554. พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ วสท. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า. 2548. ระบบเคเบิลใต้ดิน.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า. 2548. ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัยระบบเคเบิลใต้ดิน.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า. 2549. หลักเกณฑ์การออกแบบ การติดตั้งและการเลือกใช้งานในระบบไฟฟ้า.

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า. 2548. ระบบเคเบิลใต้ดิน underground cable system. หน้า 14-18, ธันวาคม.

ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2549. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่3, หน้า 1-17, 8-13. มีนาคม.

จิราวัฒน์ ชัยนุพัทธ์. 2555. การวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะในช่วงสับวิตช์ของเคเบิลใต้น้ำ พิกัด 115 กิโลโวลต์กรณีศึกษาทางงานขยายเส้นทางการจ่ายไฟจาก อำเภอแหลมฉบังไปยัง อำเภอเกาะช้าง จังหวัดตราด, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (น. 6-44).

พันธุ์เทพ เลหาชัย. 2555. การวิเคราะห์แรงดันและกระแสในเปลือกโลหะของเคเบิลใต้ดินระบบ ไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่จำกัดสายป้อน และไม่จำกัดรูปแบบของการวางสาย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 433 – 441, ตุลาคม – ธันวาคม.

เอกรัฐ ฝ่ายทะแสง และ นาทยา คล้ายเรือง. 2558. ผลของรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินต่อ แรงดันในซีลด์ของระบบ 22 กิโลโวลต์. การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิง ประยุกต์ ครั้งที่ 7 (น.99-102). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา.

