

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี
ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.

MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF 24 KV UNDERGROUND CABLES
WITH XLPE CABLE SIZE 400 SQ.MM.

สมชาย ไกรปราบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี
ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.



สมชาย ไกรปราบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสาย XLPE
ขนาด 400 ตร.มม.
Magnetic Field Analysis of 24 kV Underground Cables with XLPE Cable
Size 400 sq.mm.

ชื่อ - นามสกุล นายสมชาย ไกรปราบ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา 2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนทล นาวงษ์, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 26 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.
ชื่อ – นามสกุล	นายสมชาย ไกรปราบ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน แรงดัน 24 เควี ชนิด XLPE ขนาด 400 ตร.มม. โดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของรูปแบบการจัดเรียงสายที่แตกต่างพร้อมทั้งวัดค่าจริงจากภาคสนาม

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายไฟฟ้าใต้ดิน เมื่อมีภาระโหลดที่แตกต่าง โดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า ตั้งแต่ 100 แอมแปร์ จนถึง 315 แอมแปร์ ตามพิกัดสายไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง ด้วยการจำลองรูปแบบการจัดเรียงสายแบบ RST/TSR เปรียบเทียบกับรูปแบบ RST/RST พร้อมทั้งสุ่มวัดค่าสนามแม่เหล็กจริงจากตัวอย่างสายไฟฟ้าใต้ดินที่มีการใช้งานจริง บริเวณถนนรัชดาภิเษก กรุงเทพมหานคร

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงสาย แบบ RST/TSR ที่กระแสสูงสุด 315 แอมแปร์ มีค่าสนามแม่เหล็ก 6,759.5 มิลลิเกาส์ ขณะที่การจัดเรียงสาย แบบ RST/RST มีค่าสนามแม่เหล็ก 7,038.5 มิลลิเกาส์ ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงสายไฟฟ้าใต้ดินทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากระยะห่างระหว่างวงจรที่จัดเรียงทั้งสองแบบ ทำให้การจัดเรียงสายไฟฟ้ามีผลต่อสนามแม่เหล็กเล็กน้อย และจากการสุ่มวัดค่าสนามแม่เหล็กจากตัวอย่างสายไฟฟ้าใต้ดิน จำนวน 1 วงจร ในช่วงเวลากลางคืน พบว่ามีค่าสนามแม่เหล็ก 588.0 มิลลิเกาส์ ขณะมีภาระโหลด ที่กระแสไฟฟ้า 101.4 แอมแปร์ และจากการวัดไม่พบค่าสนามไฟฟ้าเนื่องจากการต่อชิลด์ลงกราวด์บริเวณชุดต่อสายไฟฟ้าใต้ดินภายในบ่อพัก จากผลงานวิจัยนี้พบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดินไม่เกินค่าที่โดยองค์การอนามัยโลกกำหนด ซึ่งเจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้านครหลวงหรือผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถลงปฏิบัติงานภายในบ่อพักได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ : สนามแม่เหล็ก สายไฟฟ้าใต้ดิน บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

Thesis Title	Magnetic Field Analysis of 24 kV Underground Cables with XLPE Cable Size 400 sq mm
Name - Surname	Mr. Somchai Kriprab
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing.
Academic Year	2020

ABSTRACT

This thesis presents the magnetic field analysis of 24 kV XLPE underground cables, size 400 sq.mm. by using a computer-programmed simulation of different cable arrangement patterns and actual measurements from the field.

Magnetic field analysis arises from underground cables when there are different load types by setting the ampacity ranging from 100 amperes to 315 amperes according to the rating of the Metropolitan Electricity Authority's underground cables by simulating the RST / TSR cabling pattern compared to the RST / RST pattern, including a random measure of the actual magnetic field from real underground cable samples on Ratchadaphisek Road, Bangkok.

The magnetic field simulation using a computer program revealed that the magnetic field induced by RST / TSR arrangement at a maximum current of 315 amperes had a magnetic field value of 6,759.5 mG. while the RST / RST arrangement pattern had a magnetic field value of 7,038.5 mG. This meant that the magnetic field values arising from the two underground cable arrangement patterns were approximately the same due to the distance between the two arranged circuits. This causes the electrical wire arrangement to have little effect on the magnetic field. Moreover, when randomly measured the samples of magnetic fields from underground cable of 1 circuit during the night, it indicated the magnetic field value of 588.0 mG with the load type at 101.4 amperes. However, it did not show any electric field value due to the grounding of the shield at the cable joints in the electric maintenance manhole. The research results showed that magnetic and electric fields arising in the underground cables in the electric maintenance manhole did not exceed the limit values set by the World Health Organization. The Metropolitan Electricity Authority officials or related persons can work safely in the electric maintenance manhole.

Keywords: magnetic field, underground cables, electric maintenance manhole

กิตติกรรมประกาศ

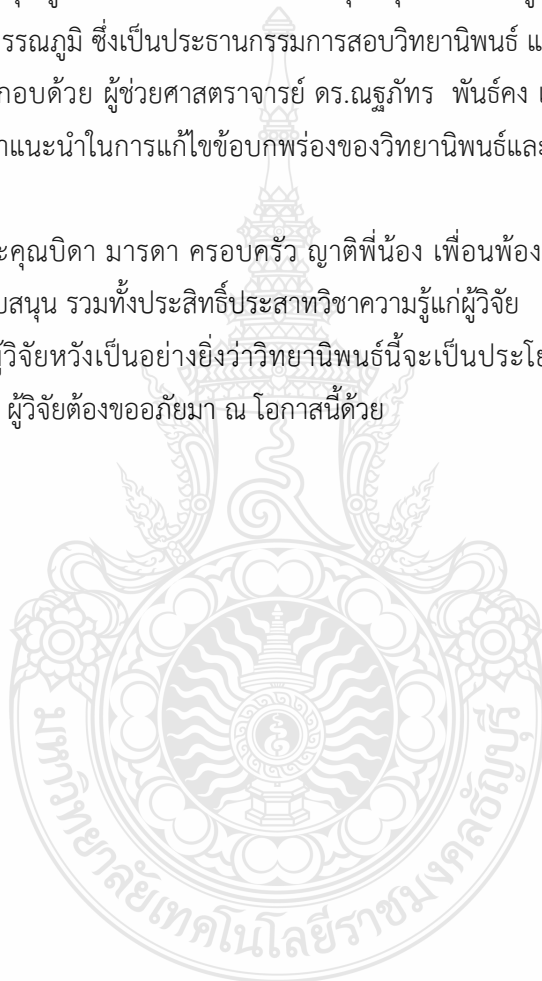
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนทล นาวงษ์ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์และเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนพ้องและคณะครู-อาจารย์ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน รวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สมชาย ไกรปราบ



สารบัญ

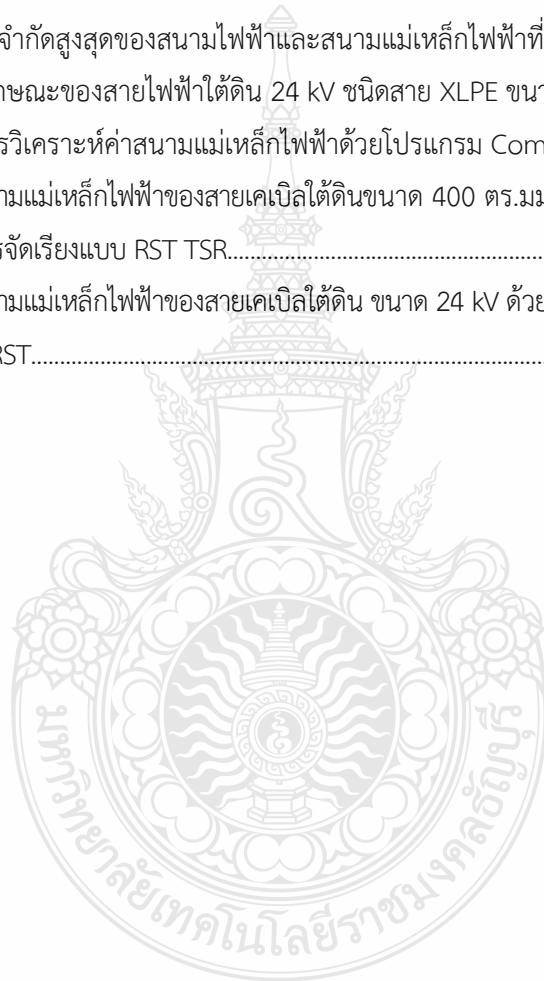
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	14
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 บทนำ.....	16
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.3 สนามไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	18
2.4 ระบบเคเบิลใต้ดินแบบไม่เปิดหน้าดิน.....	19
2.5 การออกแบบระบบเคเบิลใต้ดิน.....	27
2.6 ผลกระทบและความปลอดภัยของสนามแม่เหล็ก.....	38
2.7 ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	39
2.8 การใช้งานโปรแกรม Comsol	
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 บทนำ.....	47
3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	47
3.3 ข้อมูลของสายไฟฟ้าใต้ดินของโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นใต้ดิน.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินด้วยโปรแกรม Auto Cad และโปรแกรม Comsol	51
3.5 การวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	54
3.6 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	55
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 ผลการจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน รูปแบบ Flat Formation บน Rack โดยการจัดเรียงแบบ RST TSR.....	56
4.3 ผลการจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน รูปแบบ Flat Formation บน Rack โดยการจัดเรียงแบบ RST RST.....	59
4.4 การวัดผลค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเคเบิลใต้ดินภายในบ่อพักสาย.....	63
4.5 บทสรุป.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 บทนำ.....	66
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	66
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์.....	72
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่ากระแสและการสูญเสียกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน.....	37
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่ากระแสและการสูญเสียของการจัดสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation.....	38
ตารางที่ 2.3 ค่าขีดจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 50Hz.....	39
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.....	51
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol.....	54
ตารางที่ 4.1 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST TSR.....	61
ตารางที่ 4.2 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST RST.....	67



สารบัญรูป

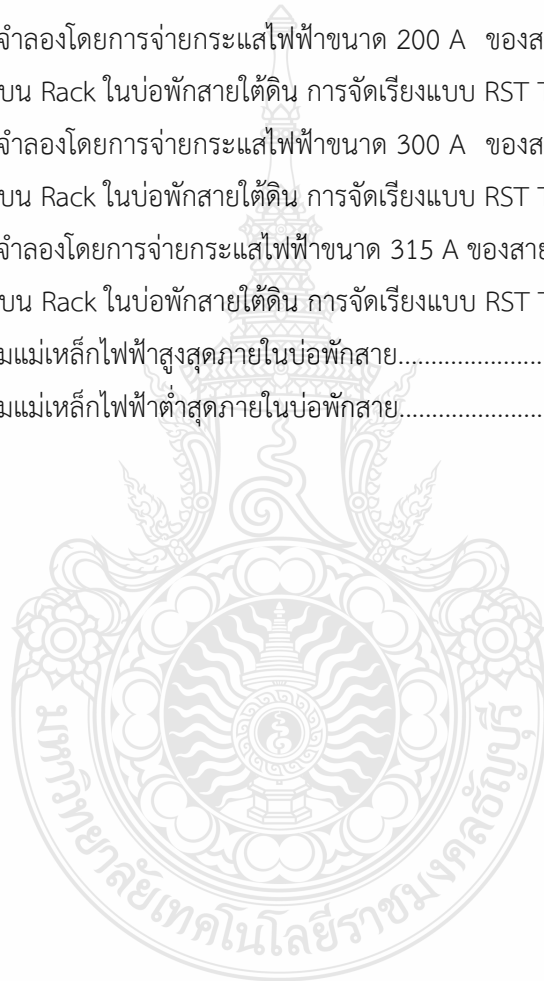
	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎมือขวาของฟาราเดย์.....	17
รูปที่ 2.2 การเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดแบบวงกลม.....	18
รูปที่ 2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์.....	18
รูปที่ 2.4 การดันท่อลอด (Pipe Jacking).....	20
รูปที่ 2.5 บ่อดัน(Driving Pit) และบ่อรับ(Receiving Pit).....	21
รูปที่ 2.6 หัวเจาะชนิดต่างๆที่ใช้ในงานดันท่อ.....	22
รูปที่ 2.7 ท่อดัน (Jacking Pipes).....	23
รูปที่ 2.8 แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jacks).....	24
รูปที่ 2.9 Horizontal Directional Drill (HDD).....	25
รูปที่ 2.10 การเจาะโดยใช้หัวเจาะ(Pilot Bore).....	25
รูปที่ 2.11 การเจาะโดยการหัวเจาะแบบคว้านตึงกลับ(Back Reaming).....	26
รูปที่ 2.12 ลากท่อลอดใต้ดิน(Pulling Pipes).....	26
รูปที่ 2.13 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-1และ Type 2T-2.....	28
รูปที่ 2.14 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-3และ Type 2T-4.....	29
รูปที่ 2.15 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-8 และ Type 2S-.....	29
รูปที่ 2.16 บ่อพัก (Manhole) Type 2C-1.....	30
รูปที่ 2.17 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-5 และ Type 2T-6.....	30
รูปที่ 2.18 บ่อพัก (Manhole) Type 2S-2.....	31
รูปที่ 2.19 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-7.....	31
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของสายตัวนำทองแดงหุ้มฉนวน XLPE ระดับแรงดัน 69 kV.....	32
รูปที่ 2.21 โครงสร้างสายตัวนำทองแดงหุ้มฉนวน XLPE ระดับแรงดัน 115 kV.....	32
รูปที่ 2.22 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat Formation.....	34
รูปที่ 2.23 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation.....	35
รูปที่ 2.24 การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดิน แบบ Flat Formation.....	36
รูปที่ 2.25 การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดิน แบบ Trefoil Formation.....	38
รูปที่ 2.26 การออกแบบสายตัวนำไฟฟ้า 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.27	วิธีนำไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol.....	41
รูปที่ 2.28	การตั้งค่าพารามิเตอร์ลงในสายไฟฟ้า 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.	42
รูปที่ 2.29	กดเพื่อเริ่มการจำลองด้วยโปรแกรม comsol.....	42
รูปที่ 2.30	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โปรแกรม Comsol จำลองเสร็จสิ้น.....	43
รูปที่ 2.31	การเลือกแสดงกราฟในโปรแกรม Comsol.....	43
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย [ต่อ].....	49
รูปที่ 3.3	พื้นที่โครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก – พระราม 9.....	50
รูปที่ 3.4	ลักษณะของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.....	51
รูปที่ 3.5	การติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดินภายในโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็น สายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก – พระราม 9.....	52
รูปที่ 3.6	การออกแบบการจัดวางสายไฟฟ้าใต้ดินเพื่อการจำลอง โดยโปรแกรม Auto Cad	53
รูปที่ 3.7	โครงสร้างไฟไนท์อีลีเมนต์ของสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลใต้ดิน.....	53
รูปที่ 3.8	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในสายเคเบิลใต้ดิน.....	54
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก Tenmars TM190.....	55
รูปที่ 4.1	การออกแบบการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat โดยการจัดเรียงแบบ RST TSR...	56
รูปที่ 4.2	ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 100 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	57
รูปที่ 4.3	ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 200 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	57
รูปที่ 4.4	ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 300 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	58
รูปที่ 4.5	ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 315 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 การออกแบบการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat โดยการจัดเรียงแบบ RST RST	60
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 100 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST RST.....	60
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 200 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	61
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 300 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	61
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 315 A ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST TSR.....	62
รูปที่ 4.19 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดภายในบ่อพักสาย.....	64
รูปที่ 4.20 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำสุดภายในบ่อพักสาย.....	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครและเมืองใหญ่ ๆ ในประเทศไทย มีความเจริญเติบโตของสังคมเมืองเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เพื่อภาพลักษณ์ที่สวยงามและความมั่นคงทางด้านพลังงานไฟฟ้า การไฟฟ้าจึงมีโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศ มาเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อรองรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคตและทัศนียภาพที่สวยงามและน่าอยู่ของประเทศ จึงมีโครงการก่อสร้างการส่งและจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและเมืองใหญ่ๆ ทดแทนรูปแบบการส่งและจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสายอากาศ (Overhead Line System)

การส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครนั้น มีการติดตั้งมาเป็นระยะเวลาานหลายปีแล้วและทำการเปลี่ยนสายส่งจ่ายไฟฟ้าจากสายอากาศเป็นสายเคเบิลใต้ดินแทนไปแล้วในหลายพื้นที่ และบางพื้นที่ที่อยู่ระหว่างดำเนินการเปลี่ยนสายส่งจ่ายไฟฟ้าแบบสายอากาศเป็นสายเคเบิลแบบใต้ดิน ซึ่งสายไฟฟ้าที่ใช้เป็นสายตัวนำหุ้มฉนวนแข็ง หลายชั้น เพื่อให้ทนต่อแรงดันสูงและสภาพอากาศที่อยู่ใต้ดินได้อย่างยาวนานและปลอดภัยต่อบุคคลที่ลงไปปฏิบัติงานในอุโมงค์ร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน การไฟฟ้าจึงพิจารณาเลือกใช้สายไฟฟ้าชนิดหุ้มฉนวน Cross-Linked Polyethylene (XLPE) ที่ขนาดแรงดันต่างๆ ตามแต่การส่งจ่ายของวงจรนั้นๆ เพื่อให้ระบบการส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดิน มีความถูกต้อง ปลอดภัย มั่นคง และเชื่อถือได้ของระบบสูง การติดตั้งสายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดินมีการติดตั้งได้หลายวิธี เช่น การขุดเปิดหน้าดินแล้ววางท่อ ร้อยสาย (Open-Cut) การวางท่อร้อยสายแบบดันท่อลอดใต้พื้นดิน HDD (Horizontal Directional Drilling) หรือวิธีการดันท่อแบบ Pipe Jacking ซึ่งในบางพื้นที่ต้องมีการติดตั้งสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน หลายวิธีการติดตั้งรวมๆกัน และในบางพื้นที่ต้องติดตั้งสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน ในแนวสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดินของแนวสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดินเดิม

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษานามแม่เหล็ก ที่เกิดจากการติดตั้งสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน ที่ติดตั้งในบ่อพักสายหรืออุโมงค์สายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการติดตั้งสายตัวนำ ให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) กำหนด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กของสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการส่งจ่ายระบบเคเบิลใต้ดินด้วยวิธีดันท่อ (Pipe Jacking)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบการส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านต่างๆ ของระบบส่งจ่ายเคเบิลใต้ดินและศึกษาวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดิน เนื่องจากว่าในการติดตั้งสายส่งจ่ายเคเบิลใต้ดิน บางช่วงต้องการการติดตั้งสายตัวนำเพิ่มเติมในบ่อพักสายเดิม หรืออุโมงค์ร้อยสายเดิมที่มีการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ในระหว่างการติดตั้ง ปริมาณของสนามแม่เหล็กจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือไม่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาสนามแม่เหล็กที่สายส่งระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์ ในระบบเคเบิลใต้ดิน ชนิดสายหุ้มฉนวน Cross-Link Polyethylene (XLPE)
- 1.4.2 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการติดตั้งสายตัวนำในอุโมงค์ร้อยสายด้วยวิธี Comsol วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กในอุโมงค์ร้อยสายที่มีการจัดวางตัวนำด้วยวิธีการติดตั้งจริงกับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาการออกแบบของระบบเคเบิลใต้ดิน
- 1.5.2 ศึกษาการดำเนินการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 เก็บและรวบรวมข้อมูลของการติดตั้งที่หน่วยงานจริง
- 1.5.4 จำลองผลของสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
- 1.5.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองผลที่เกิดขึ้น
- 1.5.6 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปและข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าที่ติดตั้งที่หน่วยงานจริง
- 1.5.7 สรุปผลและอภิปรายผลการวัดค่าและผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
- 1.5.8 เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กในอุโมงค์ร้อยสายใต้ดินของสายส่งชนิดฉนวนหุ้ม Cross-Link Polyethylene (XLPE)

1.6.2 ทำให้ทราบปริมาณของสนามแม่เหล็ก ของการติดตั้งสายตัวนำด้วยวิธีการติดตั้งแบบต่างๆ ที่ระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์

1.6.3 ทำให้ได้รับความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการติดตั้งสายตัวนำในอุโมงค์ร้อยสายใต้ดินได้จริง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

จากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบเคเบิลใต้ดิน (Underground cable system) การก่อสร้างเคเบิลใต้ดินแบบไม่เปิดหน้าดิน การออกแบบจัดวางสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง สนามแม่เหล็กและค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ จึงเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นวงกลมรอบๆตัวนำ ดังรูปที่ 2.1 โดยทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะหมุนตามเข็มนาฬิกา ในมุมมองที่กระแสพุ่งเข้า ตามกฎมือขวาของฟาราเดย์ ซึ่งจะพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้นแปรผันตรงกับปริมาณของกระแส ดังสมการที่ (2.1) จากสมการดังกล่าวจึงสามารถพบการเกิดสนามแม่เหล็กแบบต่างๆกัน ซึ่งการเกิดสนามแม่เหล็กเหล่านั้นจะเกิดขึ้นตามลักษณะของเส้นลวดตัวนำ เส้นลวดตัวนำเป็นวงกลมสนามแม่เหล็กจะเกิดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด ซึ่งจะแปรผกผันกับรัศมีของขดลวด ดังรูปที่ 2.2 แต่จะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวดและปริมาณของกระแสดังสมการที่ (2.2) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะแปรผันตามจำนวนของขดลวดและปริมาณกระแส ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะนำไปตามสมการที่ (2.3) การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ณ บริเวณใดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในตัวนำซึ่งวางอยู่ในบริเวณนั้น ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการที่ (2.4) [1]

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2a} \quad (2.2)$$

$$B = \mu_0 n I \quad \dots(2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{N \Delta \phi}{\Delta t} \quad \dots(2.4)$$

โดย B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อ ตร.ม. (W / m^2)
หรือ เทสลา (T)

μ_0 คือ สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ $4\pi \times 10^{-7} H / m$

I คือ กระแสไฟฟ้า

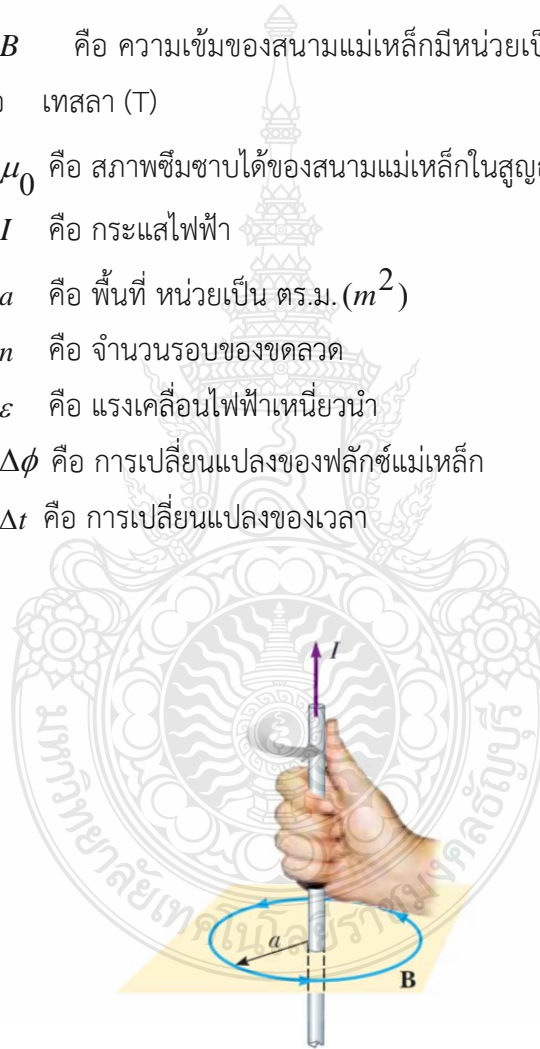
a คือ พื้นที่ หน่วยเป็น ตร.ม. (m^2)

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

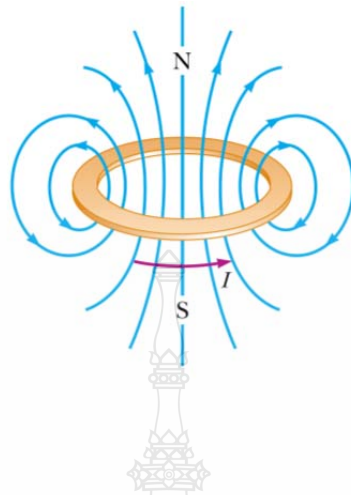
ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$\Delta \phi$ คือ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก

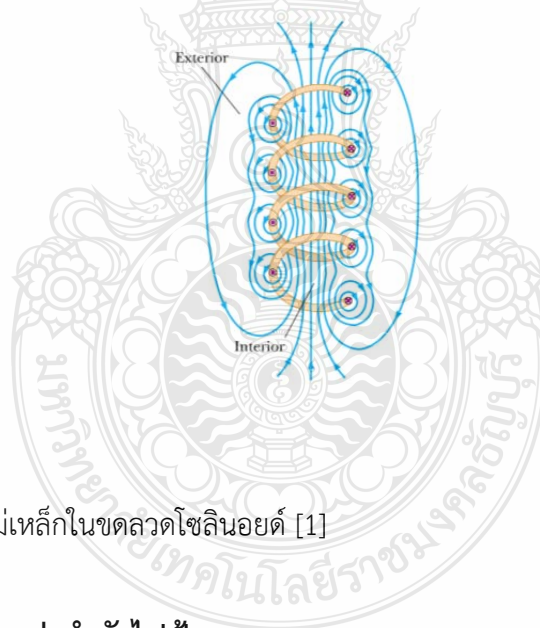
Δt คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลา



รูปที่ 2.1 การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎมือขวาของฟาราเดย์ [1]



รูปที่ 2.2 การเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดแบบวงกลม [1]



รูปที่ 2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์ [1]

2.3 สนามไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า

สนามไฟฟ้านั้นเป็นแรงเคลื่อนของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งทิศทางและขนาดสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ E สามารถวัดออกมาเป็นหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/m) ดังนั้นขนาดของสนามแม่ไฟฟ้าซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใดๆ ค่าของความเข้มสนามแม่ไฟฟ้าจะแปรผันกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะแปรผกผันกับระยะห่างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ

จุดใด ๆ จะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x y และ z โดยการคำนวณสนามไฟฟ้าที่มีการกระจายอยู่รอบๆบริเวณของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้น ได้ตั้งสมมติฐานเพื่อการคำนวณได้ดังนี้ ไม่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ นอกจากประจุที่เกิดสายส่งไฟฟ้าแรงสูง พื้นที่บริเวณที่พิจารณามีความต้านทานน้อยมาก ๆ และมีสภาวะยอมของตัวกลาง ในอากาศคงที่ ($\epsilon = 8.854 \times 10^{-12} F/m$) ค่าประจุ (Q) ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้า (V) และ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient (P) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [2]

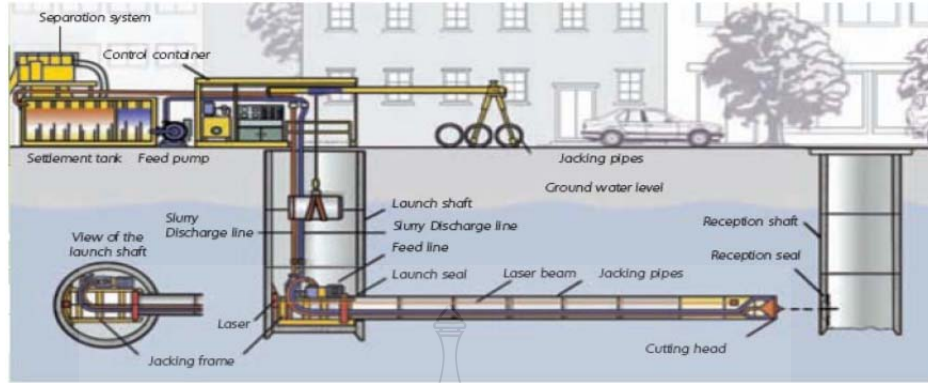
$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (2.5)$$

2.4 ระบบเคเบิลใต้ดินแบบไม่เปิดหน้าดิน

ระบบสายเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันนี้มีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีความแตกต่างกันออกไป เช่น วิธีการดำเนินงาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน และค่าใช้จ่ายมากน้อยแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกวิธีการที่จะสร้างระบบสายเคเบิลใต้ดินให้เหมาะสมกับลักษณะภูมิประเทศ ลดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างโดยรอบ และคุ้มค่ากับการลงทุน โดยรูปแบบการก่อสร้างระบบสายเคเบิลแบบไม่เปิดหน้าดินนั้น มีอยู่ 2 รูปแบบดังนี้

2.2.1 การดันท่อลอด (Pipe Jacking)

งานดันท่อลอดนั้นเป็นงานที่ไม่มีการขุดเปิดแนวท่อ (Trenchless Technology) แต่เป็นการวางท่อโดยใช้แม่แรงดันท่อซึ่งติดตั้งอยู่ในบ่อดันท่อ (Driving Pit) โดยที่แม่แรงจะยันท่อกับผนังของบ่อดันเพื่อให้ท่อทั้งเส้นเคลื่อนที่ไปตามแนวที่ต้องการจนถึงบ่อรับ (Receiving Pit) ที่อยู่ถัดไป ทิศทางของท่อที่มีขนาดใหญ่จะกำหนดโดยหัวเจาะดิน (Shield) เป็นตัวนำทางขุดเพื่อลดแรงต้านทานของดินและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างในแนวใกล้เคียง การดันท่อลอดนั้นจะอาศัยแม่แรงซึ่งถูกติดตั้งอยู่ระหว่างหัวเจาะกับตัวท่อเพื่อเป็นการปรับระดับทิศทางของแนวท่อลอด โดยหัวเจาะจะสามารถบังคับทิศทางได้จากระยะไกล และใช้แสงเลเซอร์ในการควบคุมเส้นทาง [3]

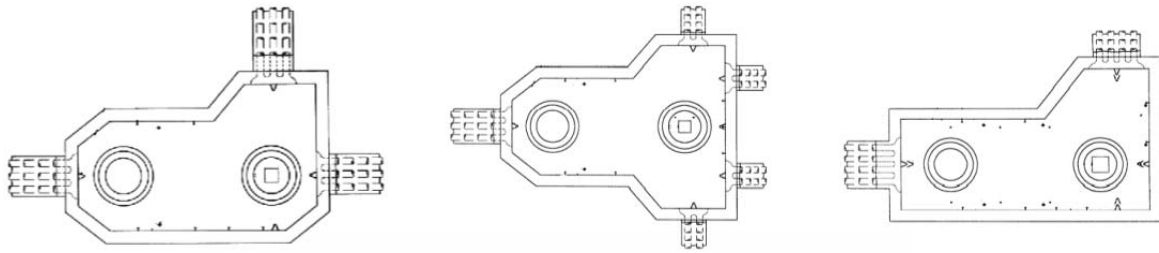


รูปที่ 2.4 การดันท่อลอด (Pipe Jacking) [4]

2.2.1.1 องค์ประกอบของงานดันท่อลอดมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.4

2.2.1.1.1.บ่อต้น (Driving Pit) และบ่อรับ (Receiving Pit)

บ่อต้นและบ่อรับส่วนใหญ่มีรูปร่างที่เป็นขนาดสี่เหลี่ยมพื้นผ้าแต่ก็อาจจะมีลักษณะเป็นรูปวงกลมบ้างตามความเหมาะสมของลักษณะงาน สำหรับงานดันท่อลอดแล้วอาจจะเป็นบ่อชั่วคราวที่ใช้ Sheet Pile เหล็กตอกกันดินหรือเป็นบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กก็ได้ โดยบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถก่อสร้างได้ 2 แบบ คือ แบบบ่อจม (Sunken Shaft) หรือ caisson และแบบ (Diaphragm Wall) ซึ่งจะตัดปัญหาการควบคุมระดับการเอียงของบ่อต้นได้ การก่อสร้างบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Sunken Shaft นั้น สามารถทำได้โดยการหล่อผนังบ่อเป็นช่วง หรือหล่อสำเร็จมาจากโรงงาน (Precast Cement) แล้วนำมาประกอบในการก่อสร้างบ่อ บ่อรับส่วนใหญ่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรืออาจจะเป็นรูปร่างอื่นๆดังรูปที่ 2.5 ก็ได้ตามความเหมาะสมของงานนั้นๆ บ่อต้นคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นบ่อถาวรและจะใช้ลักษณะเป็นบ่อจม (Sunken Shaft) โดยหล่อผนังบ่อที่ละช่วง หรือหล่อสำเร็จจากโรงงานแล้วนำมาประกอบเป็นบ่อต้น บ่อต้นและบ่อรับประเภทนี้จะช่วยแก้ประหาผิวจราจรคอนกรีตรอบๆบ่อได้ หากใช้บ่อแบบ (Sheet Pile) แล้วมีการรื้อถอนจะทำให้ผิวจราจรเกิดการแตกร้าวได้ [4]

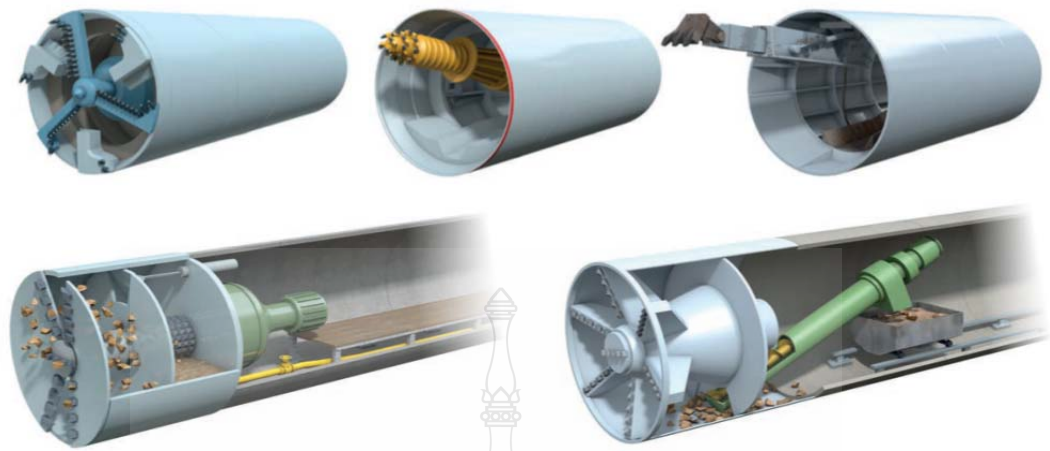


รูปที่ 2.5 บ่อตัน (Driving Pit) และบ่อรับ (Receiving Pit) [5]

2.2.1.1.2. หัวเจาะ (Cutting Head or Shield)

หัวเจาะที่ใช้สำหรับงานดินท่อมืออยู่หลายชนิดดังรูปที่ 2.6 สามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมของสภาพดิน ชั้นหิน และขึ้นอยู่กับงบประมาณ ปัจจุบันที่นิยมใช้กันจะมีหัวเจาะอยู่ 3 ประเภทดังนี้

- 1) Open-Faced Shield เป็นหัวเจาะแบบเปิดหน้าดินเหมาะสำหรับชั้นดินที่แข็งมีความมั่นคงของสภาพชั้นดินสูง ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดิน
- 2) Earth Pressure Balance (EPB) Shield เป็นหัวเจาะที่ได้รับคามนิยมค่อนข้างสูงในปัจจุบัน เหมาะกับการใช้งานที่จำเป็นต้องขุดอุโมงค์ขนาดใหญ่ มีผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างน้อย และมีความปลอดภัยสูง ดังนั้นหัวเจาะประเภทนี้จึงมีราคาสูง
- 3) Blind Shield เป็นหัวเจาะที่เหมาะสมกับท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า 1.5 เมตรขึ้นไป เนื่องจากจำเป็นต้องนำคนลงไปปฏิบัติงานภายในท่อ ที่ด้านหน้าท่อของหัวเจาะจะมีช่องว่างเพื่อให้ดินที่ถูกเจาะนั้นไหลเข้ามา จึงเหมาะสำหรับงานที่ขุดจะชั้นดินอ่อน ราคาหัวเจาะชนิดนี้ค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ [5]



รูปที่ 2.6 หัวเจาะชนิดต่างๆที่ใช้ในงานดันท่อ [6]

2.2.1.1.3 ท่อดัน (Jacking Pipes)

ท่อที่ใช้ในงานดันท่อส่วนใหญ่จะเป็นท่อเหล็ก ท่อคอนกรีต และท่อคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งบางกรณีผิวด้านในท่อจะมีสารเคลือบเพื่อลดการกัดกร่อน ท่อดันจะต้องออกแบบมาเพื่อรับแรงในการดันโดยเฉพาะเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายขณะดัน แรงท่อยังต้องรับแรงที่มากกระทำโดยตรงจากแรงดันดินโดยรอบ โดยทั่วไปความยาวของท่อดันจะอยู่ที่ประมาณ 2-3 เมตรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ท่อดัน (Jacking Pipes)

2.2.1.1.4 แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jacks)

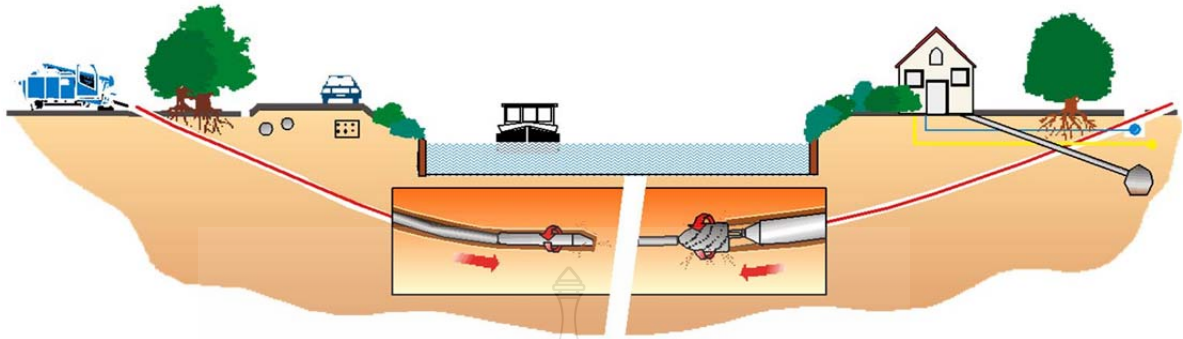
แม่แรงไฮดรอลิกจะถูกติดตั้งอยู่ที่บ่อต้น เพราะฉะนั้นบ่อต้นจึงต้อง ออกแบบเพื่อรองรับกับขนาดของไฮดรอลิก ให้เพียงพอ กับระยะเวลาความยาวของหัวเจาะและระยะช่วงการดัน ของแม่แรงดังรูปที่ 2.8 โดยทั่วไปแม่แรงสำหรับดันท่อจะมีขนาด อยู่ที่ 100-200 ตันต่อ 1 ตัว สำหรับงานที่ใช้ท่อต้นขนาดเล็กกว่า 1200 มม. จะใช้แม่แรง 2 ตัว และงานที่ใช้ท่อขนาด 1200 มม.ขึ้นไปจะใช้แม่แรง 4 ตัว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.8 แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jacks) [7]

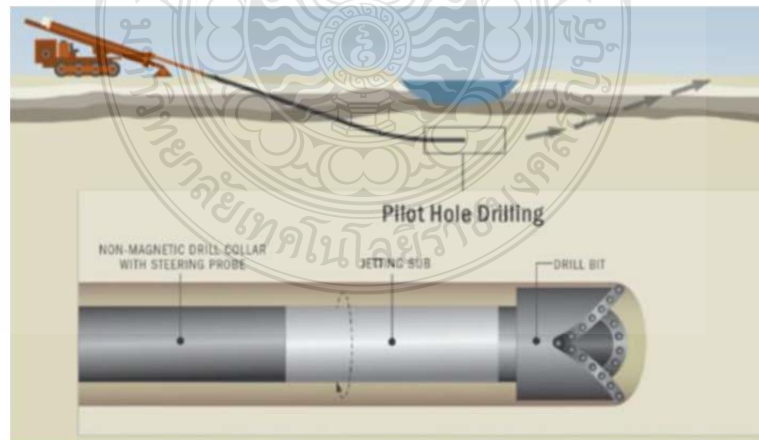
2.2.2 Horizontal Directional Drill (HDD)

การวางท่อลอดใต้ดินแบบเจาะต่องดังรูปที่ 2.9 เป็นการขุดเจาะดินแนวคว้านเพื่อลอดใต้สิ่งกีดขวาง ซึ่งวิธีการขุดเจาะแนวคว้านนี้ได้รับการยอมรับเรื่องความปลอดภัยและเหมาะสมสำหรับการวางท่อสายไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับวิธีการขุดเจาะนั้น จะแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนคือ [8]



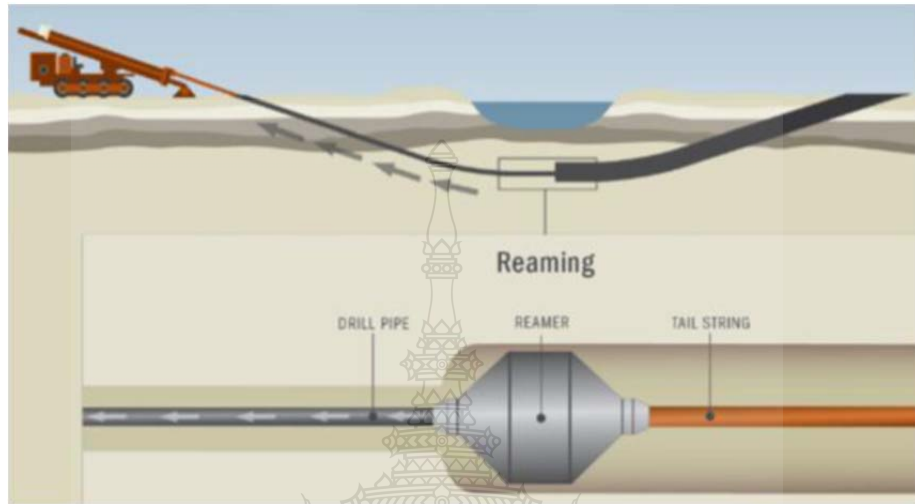
รูปที่ 2.9 Horizontal Directional Drill (HDD) [9]

1. เริ่มจากการสำรวจโดยใช้เครื่องตรวจเช็ค (Gross Power Patting) หรือ GPR เพื่อตรวจสอบหาอุปสรรคสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดินก่อนการทำงาน โดยที่เครื่อง GPR จะทำการตรวจสอบหาสิ่งกีดขวางได้ลึกถึง 5-7 เมตร โดยเครื่องจะอ่านค่าในรูปของคลื่นซึ่งจะสามารถบอกถึงความลึกสิ่งกีดขวางนั้นๆได้
2. การเตรียมการติดตั้งเครื่องจักร (Bore Plan) หลังจากสำรวจแล้ว ต้องกำหนดจุด Bore Plan ลงในคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการติดตั้งเครื่องจักรและกำหนดจุดความลึกของสิ่งกีดขวาง
3. Pilot Bore คือการเจาะโดยใช้หัวเจาะดังรูปที่ 2.10 ติดตั้งไว้ที่บ่อเจาะเข้า (Entry Point) โดยที่หัวเจาะจะถูกติดตั้งไว้ที่ปลายท่อเจาะ จากนั้นดันและหมุนท่อเจาะด้วยระบบไฮดรอลิกซึ่งภายในจะถูกฝังตัวส่งสัญญาณเอาไว้เพื่ออ่านค่าและบอกตำแหน่งของหัวเจาะ



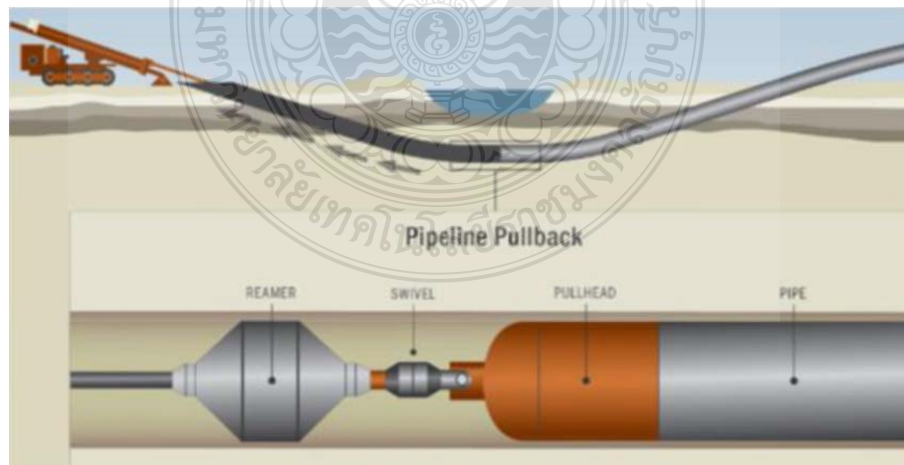
รูปที่ 2.10 การเจาะโดยใช้หัวเจาะ(Pilot Bore) [8]

4. Back Reaming เมื่อหัวเจาะถึงบ่อรับ (Exit Point) ตามกำหนดแล้ว จะถอดหัวเจาะออกและใส่หัวคว้าน (Reaming) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามความต้องการ เพื่อขยายแนวเจาะให้มีขนาดใหญ่กว่า ดังรูปที่ 2.11 ท่อที่จะทำการดึงกับอย่างน้อย 1-1.5 เท่า



รูปที่ 2.11 การเจาะโดยการหัวเจาะแบบคว้านดึงกลับ(Back Reaming) [8]

5. Pulling Pipes เมื่อทำการคว้านชั้นดินจนได้ขนาดตามต้องการแล้วตรวจสอบไม่พบสิ่งกีดขวาง จึงจะทำการต่อท่อเข้ากับท่อเจาะแล้วทำการลากท่อเข้าไปแทนที่ชั้นดินดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลากท่อลอดใต้ดิน(Pulling Pipes) [8]

6. ตรวจสอบความเรียบร้อย หลังจากขั้นตอนการทำงานเสร็จ ต้องตรวจเช็คความเรียบร้อยของท่อและอุปกรณ์อื่นๆ

2.5 การออกแบบระบบเคเบิลใต้ดิน (Underground cable system)

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นมีหลายระบบ ระบบส่งจ่ายเคเบิลใต้ดินก็เป็นหนึ่งในระบบส่งจ่ายที่ได้รับความนิยม การออกแบบระบบไฟฟ้าเป็นงานที่มีขอบเขตกว้าง ต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก เพื่อนำมาประกอบการตัดสินใจ เลือกใช้ระบบและอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับลักษณะงานนั้น จึงต้องมีหลักข้อกำหนดที่ในการออกแบบไฟฟ้าที่ดีดังนี้ [5]

1. ความปลอดภัย
2. ระบบไฟฟ้าต้องมีความมั่นคง
3. ระบบไฟฟ้าจะต้องสามารถขยายไหลดได้
4. ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ามีกำลังสูญเสียต่ำ
5. ค่าลงทุนที่เหมาะสม
6. ค่าบำรุงรักษาต่ำ
7. คุณภาพกำลังไฟฟ้าสูง

ปัจจัยในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินนั้น มีเหตุเกิดจากสภาพของพื้นที่มาเกี่ยวข้องเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากระบบสายไฟฟ้าซึ่งอากาศในเขตเมืองใหญ่มีความต้องการการใช้พลังงานสูงจึงทำให้เสาไฟฟ้าหนึ่งต้น มีจำนวนสายส่งหลายๆวงจรรออยู่ด้วยกัน ทำให้เมื่อเกิดเหตุขัดข้องต่อเสาไฟฟ้าหนึ่งต้นมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเป็นวงกว้าง

2.5.1 การออกแบบบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Man hole and Hand hole)

บ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน ส่วนมากเป็นรูปแบบของการหล่อขึ้นด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยลักษณะการก่อสร้างของบ่อพักสายส่วนใหญ่อยู่ใต้ผิวถนน สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 18 ตัน จากนั้นจะปิดฝาบ่อ (Manhole Frame & Cover) ทำด้วยเหล็ก โดยบ่อพักนั้นมีหลากหลายแบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ต่างๆดังนี้

2.5.1.1 ทิศทางของแนวท่อเคเบิลใต้ดิน ทิศทางนั้นมีการแยกออก หรือเลี้ยวซ้ายเลี้ยวขวาหรือไม่

2.5.1.2 จำนวนท่อเคเบิลร้อยสายใต้ดินที่เข้าบ่อพัก เนื่องจากจำนวนท่อร้อยสายมีจำนวนมากกว่าเข้ามารวมกันในบ่อพัก บ่อพักจึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เพื่อรองรับจำนวนท่อเหล่านั้น จึงมีบ่อพักชนิดฝาปิด 2 ฝาเพื่อให้ระบายความชื้นได้ดีอีกด้วย

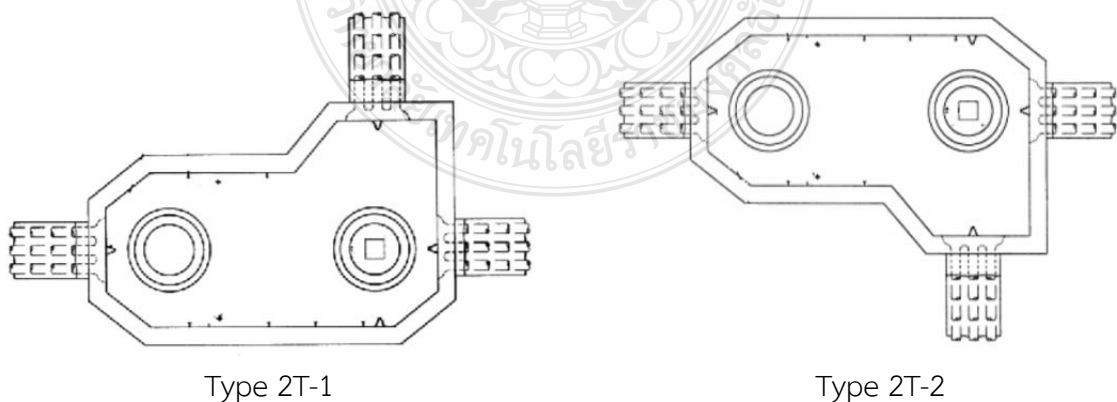
2.5.1.3 โอกาสของการขยายโครงการเพื่อดำเนินการต่อในอนาคต

2.5.2 รูปแบบบ่อพัก (Manhole Type)

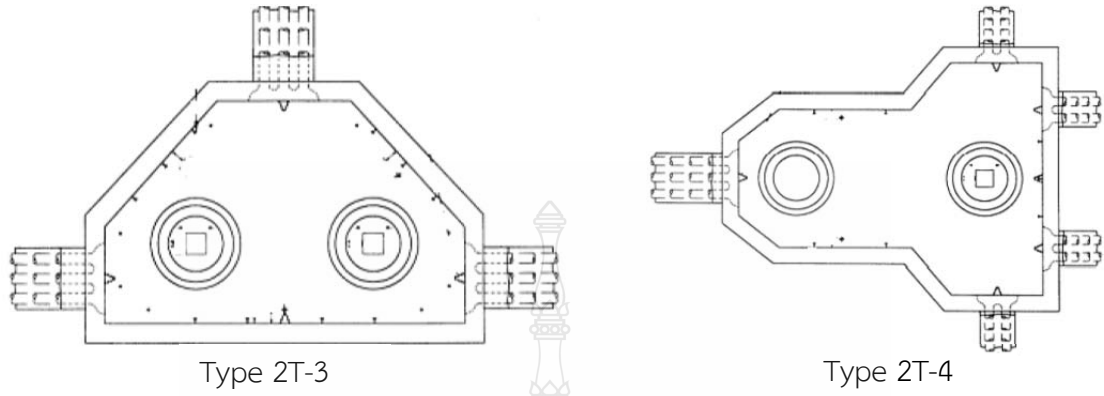
รูปแบบบ่อพักแบบต่างๆที่ถูกออกแบบ เพื่ออำนวยความสะดวกในการก่อสร้างและการทำงาน ดังนั้นผู้ออกจะสามารถเลือกรูปแบบในการก่อสร้างเพื่อให้สามารถดำเนินงานได้สะดวก โดยรูปแบบของบ่อพักนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ดังนี้

2.5.2.1 บ่อพักประเภทที่ใช้กับระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV

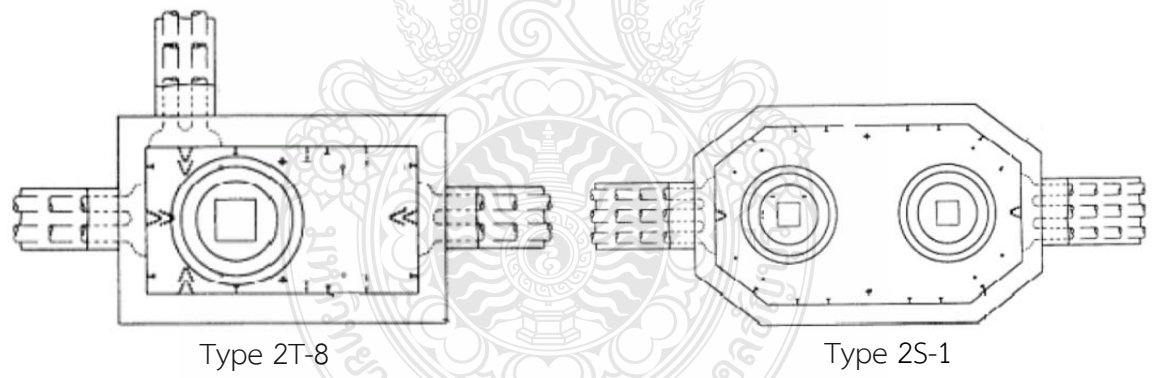
บ่อพักสาย Type 2T-1 และ Type 2T-2 เป็นบ่อพักใช้สำหรับจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน และการเปลี่ยนโคงของแนวสายเคเบิลใต้ดิน บริเวณทางแยก หรือปากบ่อรับจับสามารถรับสายเคเบิลได้สูงสุด 12 วงจร ดังรูปที่ 2.13 บ่อพักสาย Type 2T-3 ดังรูปที่ 2.14 ใช้สำหรับสำหรับการเปลี่ยนโคงหรือจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน บริเวณหน้าสถานีไฟฟ้า และทางแยกของถนนสามารถรับสายเคเบิลได้สูงสุด 12 วงจร บ่อพักสาย Type 2T-4 เป็นจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินที่เหมาะสมกับ บริเวณปากทาง หรือทางแยกของถนนสามารถรับสายเคเบิลได้สูงสุด 12 วงจร ดังรูปที่ 2.15 บ่อพักสาย Type 2T-8 ใช้เป็นจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินที่เหมาะสมกับทางตรงและทางแยก สามารถรับวงจรของสายได้ 8 วงจร บ่อพักสาย Type 2S-1 เป็นบ่อพักสายที่ใช้กับทางตรงอย่างเดียวสามารถรับวงจรสายเคเบิลใต้ดินได้ 12 วงจร ดังรูปที่ 2.15 และบ่อพักสาย Type C2-1 เป็นบ่อพักสายที่ใช้กับทางโคง และเป็นจุดต่อสายรับวงจรของสายเคเบิลใต้ดินได้ 12 วงจร ดังรูปที่ 2.16 [5]



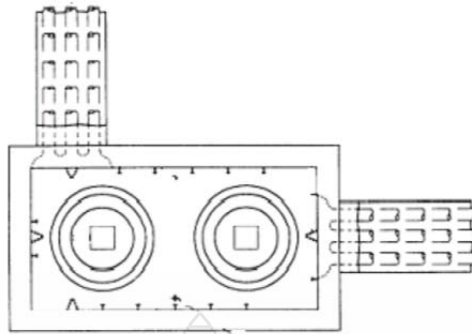
รูปที่ 2.13 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-1และ Type 2T-2 [5]



รูปที่ 2.14 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-3และ Type 2T-4 [5]



รูปที่ 2.15 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-8 และ Type 2S-1 [5]

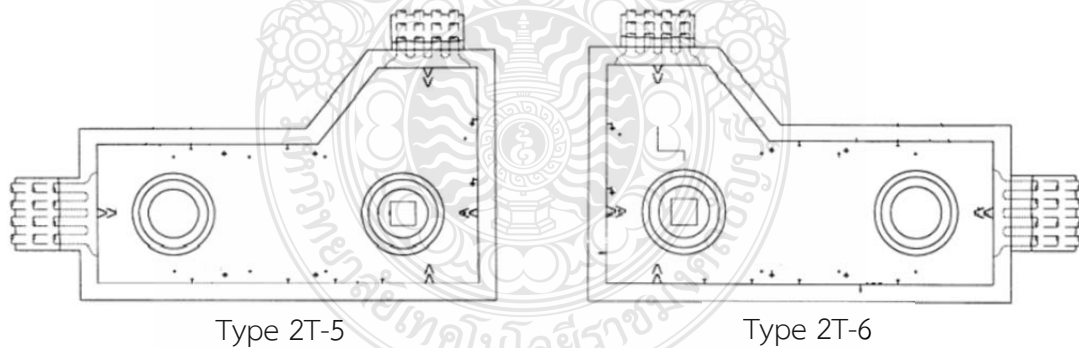


Type 2C-1

รูปที่ 2.16 บ่อพัก (Manhole) Type 2C-1 [5]

2.3.2.1 บ่อพักประเภทที่ใช้กับระบบสายส่ง 115 kV

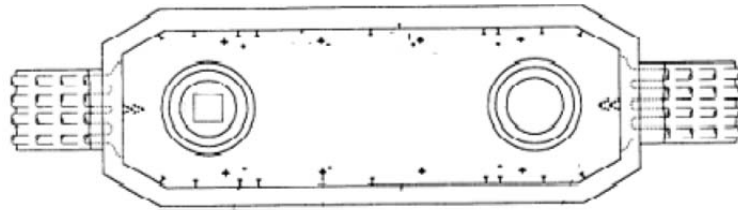
บ่อพักสายเคเบิล Type 2T-5 และ 2T-6 เป็นจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งเหมาะการเลี้ยงของแนวสายเคเบิลใต้ดิน หรือบริเวณปากทาง ดังรูปที่ 2.17 บ่อพักสาย Type 2S-2 เป็นบ่อสำหรับแนวสายเคเบิลแบบช่องทางตรง และเป็นจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน ดังรูปที่ 2.18 และบ่อพักสาย Type 2T-7 เป็นบ่อพักสายที่มีการแยกของแนวสายเคเบิลหลายทิศทาง ซึ่งเหมาะกับทางแยกที่มีจุดรวมสายเคเบิลใต้ดินหลายทิศทาง ดังรูปที่ 2.19 [5]



Type 2T-5

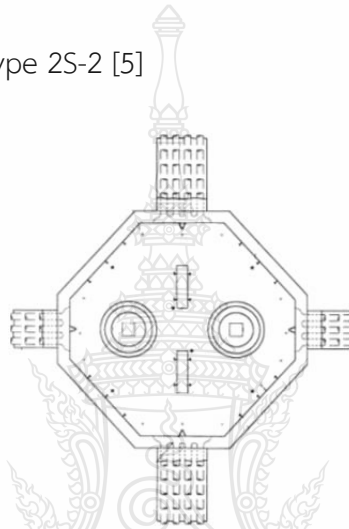
Type 2T-6

รูปที่ 2.17 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-5 และ Type 2T-6 [5]



Type 2S-2

รูปที่ 2.18 บ่อพัก (Manhole) Type 2S-2 [5]

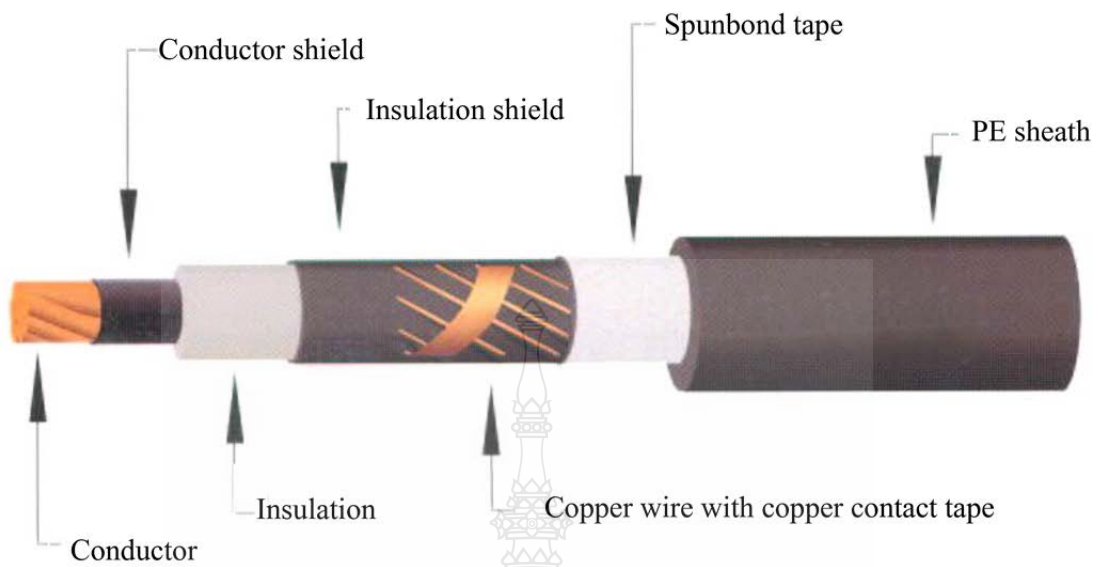


Type 2T-7

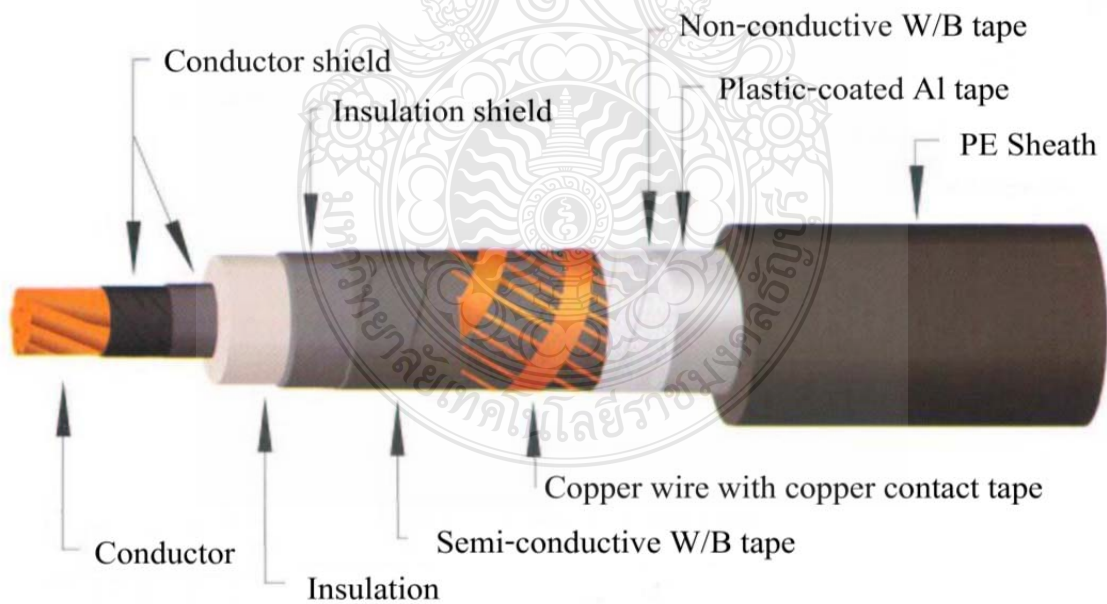
รูปที่ 2.19 บ่อพัก (Manhole) Type 2T-7 [5]

2.5.3 สายเคเบิลใต้ดินและการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable)

2.5.3.1 ปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินในการส่งจ่ายระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ตั้งแต่ขนาด 12 kV ถึง 115 kV จะเรียกว่าระบบจำหน่าย (พลังงานไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้า) ส่วนระบบสายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องจะเรียกสั้นๆว่า ระบบสายจำหน่ายและระบบสายส่งตามลำดับ ปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ส่วนมากเป็นตัวนำทองแดง ชนิด XLPE (Cross Linked Polyethylene) ทั้งระดับแรงดัน 69/115 kV ใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE ดังรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21 ซึ่งมีขนาดสูงสุดที่ 1200 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของสายตัวนำทองแดงหุ้มฉนวน XLPE ระดับแรงดัน 69 kV [5]



รูปที่ 2.21 โครงสร้างสายตัวนำทองแดงหุ้มฉนวน XLPE ระดับแรงดัน 115 kV [5]

โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

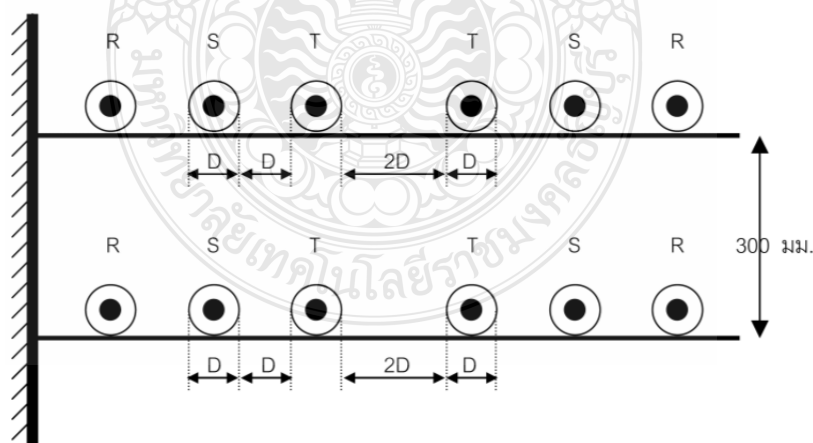
- 1 Conductor (ตัวนำ) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า ทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง
2. Conductor Screen ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งอาจเป็นผ้าอาบ Carbon หรือเป็น Extrude Layer ของสารสังเคราะห์พวกพลาสติกผสมตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบ ไม่มีช่องว่างที่มีศักดาไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด Partial Discharge
3. Insulation (ฉนวน) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่กั้นไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ คุณสมบัติของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) หรือ Polyethylene (PE) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงต่ำ, Oil Impregnated Paper, Cross linked Polyethylene (XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงสูง
- 4 Insulation Screen ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Conductor Screen คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของ Insulation และ Metallic Screen วัสดุที่ใช้ทำ Insulation Screen จะเหมือนกับ Conductor Screen
5. Metallic Screen ทำหน้าที่เป็น Ground สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูงและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร บางครั้ง Metallic ยังทำหน้าที่เป็น Mechanical Protection หรือทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) หรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับ Oil Fill Cable Metallic Screen อาจเป็น Tape หรือ Wire ทำด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียมหรืออาจจะเป็น Lead Sheath (ปลอกตะกั่ว) หรือ Corrugate Aluminum Sheath (ปลอกอะลูมิเนียมลูกฟูก)
6. Reinforcement หรือ Armor เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อ Mechanical Force จากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้น้ำหรือสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง บางครั้งยังใช้เป็นตัวรับแรงดึงในการลากสายด้วย วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ Steel Tape, Steel Wire หรือ Aluminum Wire
7. Water Blocking Tape เป็นชั้นที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นแฉะเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิลในกรณีที่ Jacket ของสายเคเบิลมีการชำรุดจากการลากสายทำให้ส่วนที่เป็นฉนวนสัมผัสกับน้ำเป็นระยะทางยาว สายเคเบิลจึงมีโอกาสชำรุดสูง Water Blocking Tape นี้ทำจากสารสังเคราะห์และมี Swell able Powder (สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัว มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง) โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างชั้น Insulation Screen กับ Jacket

8. Laminated Sheath เป็นชั้นกันน้ำตามแนวขวางในสายเคเบิลแรงสูงมีลักษณะเป็นเทปโลหะหุ้มด้วย Plastic ทั้งสองหน้าจากนั้นนำมาห่อรอบ Ground Screen โดย Plastic ที่ผิวนอกและผิวในของเทปจะถูกละลายให้ติดกันเป็นเนื้อเดียวทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนได้

9. Non Metallic Sheath หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Jacket ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่างๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิล วัสดุที่ใช้ทำมี PVC, PE

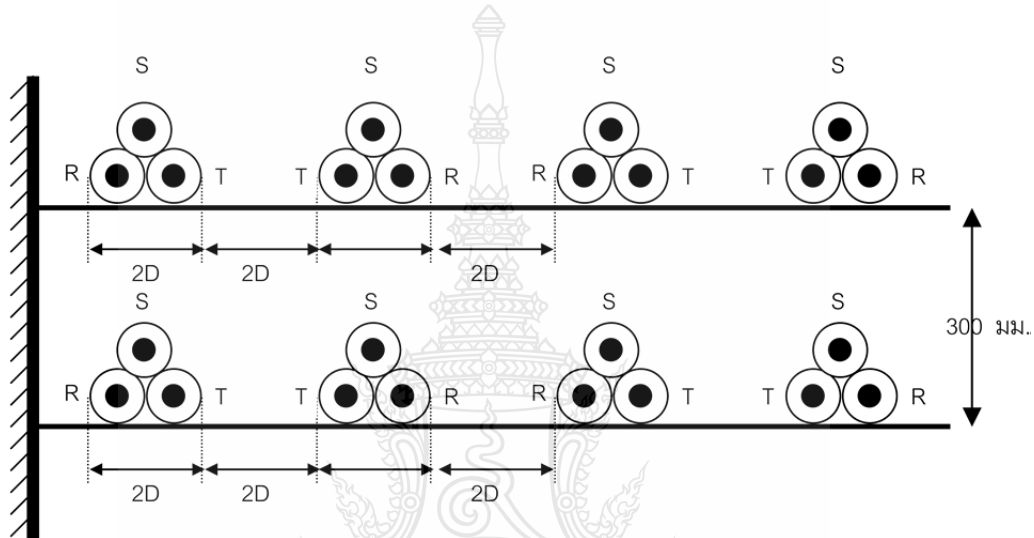
2.5.3.2 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินภายใน Cable Trench หรือภายใน Duct Bank สิ่งที่สำคัญถึงคือการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินต้องให้มีการเรียงตาม Phase Relationship ทั้งนี้หากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดินไม่เป็นไปตาม Phase Relationship จะทำให้ค่า Inductance ของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อมีโหลดที่สูงขึ้นมากๆ จะทำให้กระแสภายในสายแต่ละเส้นแตกต่างกันมาก การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 3 Phase จัดเรียงได้ 2 วิธีคือ

2.5.3.2.1 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat (Flat Formation) โดยเรียงแบบ RST/TSR บน RACK การจัดวางแบบนี้ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน (D) ระยะห่างระหว่างวงจรถือเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน (2D) และระหว่างวงจรถืออยู่ติดกันควรเป็นเฟสเดียวกัน การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat โดยเรียงแบบ RST/RST บน RACK ในลักษณะนี้ ระยะห่างระหว่างชั้นไม่ควรน้อยกว่า 300 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2.22 [5]



รูปที่ 2.22 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat (Flat Formation) [5]

2.5.3.2 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil การจัดเรียงรูปแบบลักษณะนี้จะ
 ได้ค่า inductance แต่ละเฟสในวงจรเดียวกันจะเท่ากันนอกจากนี้การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินตาม Phase
 Relationship ยังส่งผลในเรื่องของ Magnetic Field ที่ออกมาจากสายเคเบิลใต้ดิน และเป็นวิธีที่มี
 ประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดผลของ Magnetic Field จากสายส่งที่วางเรียงตามแบบสายเคเบิลใต้ดิน
 Phase Relationship ดังรูปที่



รูปที่ 2.23 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil [5]

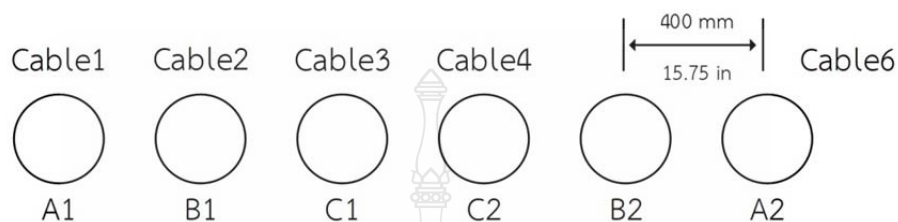
2.5.4 ผลกระทบของการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

ความต้านทานรวม (Total resistance) จะทำหน้าที่ด้านการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก
 องค์ประกอบต่างๆ ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบด้วยปริมาณเชิงซ้อน $(R+jX)$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความถี่
 (f) และมุมเฟสของวงจร (Phase Angle) อิมพีแดนซ์โดยใช้สัญลักษณ์ตัว Z หน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ในรูปแบบ
 คาร์ทีเซียน อิมพีแดนซ์ถูกกำหนดให้เป็น [10]

$$Z = R + jX_L \quad (2.6)$$

โดยที่ค่า R เป็นค่าจริงของอิมพีแดนซ์เป็นค่าความต้านทานและ X_L ส่วนที่เป็นค่าจินตภาพหรือรีแอกแตนซ์

การสูญเสียของกระแสในรูปแบบของการจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat Formation ซึ่งมีรูปแบบดังรูปที่ 2.24 และตารางที่ 2.1 แสดงผลการสูญเสียของกระแสในสายเคเบิล

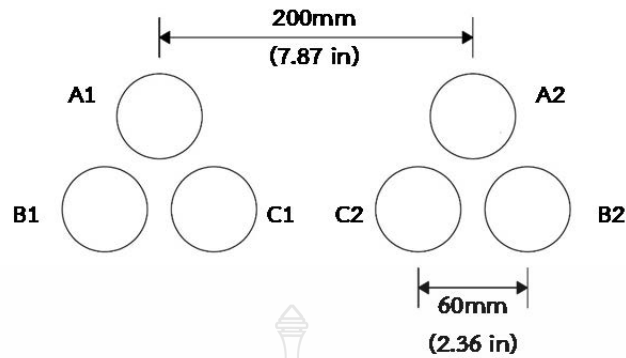


รูปที่ 2.24 การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดิน แบบ Flat Formation

ตารางที่ 2.1 ค่ากระแสและการสูญเสียกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน [11]

Cable/Phase	Phase current (A)	Sheath current (A)	Sheath loss factor
Cable 1, Phase A	46.3	38.4	4.24
Cable 2, Phase A	53.7	34.3	2.85
Cable 3, Phase B	44.6	37.4	4.35
Cable 4, Phase B	55.7	34.8	2.12
Cable 5, Phase C	50.8	43.7	4.56
Cable 6, Phase C	49.6	44.4	4.95

การสูญเสียของกระแสในรูปแบบของการจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation ซึ่งมีรูปแบบดังรูปที่ 2.25 และตารางที่ 2.2 แสดงผลการสูญเสียของกระแสในสายเคเบิล



รูปที่ 2.25 การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดิน แบบ Trefoil Formation

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่ากระแสและการสูญเสียของการจัดสายเคเบิลใต้ดินแบบ Trefoil Formation [11]

Cable/Phase	Phase current (A)	Sheath current (A)	Sheath loss factor
Cable 1, Phase A	50	13.9	0.474
Cable 2, Phase A	50	13.9	0.474
Cable 3, Phase B	50	13.8	0.468
Cable 4, Phase B	50	13.8	0.468
Cable 5, Phase C	50	14.1	0.492
Cable 6, Phase C	50	14.1	0.492

2.6 ผลกระทบและความปลอดภัยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่อร่างกายของมนุษย์นั้น สามารถเกิดได้เนื่องจากโดยธรรมชาติในร่างกายมนุษย์จะมีกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการดำรงชีวิต เมื่อร่างกายของมนุษย์ใช้กระแสไฟฟ้าในการกระตุ้นการทำงานของประสาทในร่างกายเพื่อให้ทำงานได้อย่างปกติ และโดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางไฟฟ้าในการทำงาน เช่น การย่อยอาหาร และที่สำคัญคือการทำงานทางสมอง [12]

ผลกระทบเมื่อมนุษย์ได้สัมผัสสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากภายนอก โดยหลักจะขึ้นอยู่กับขนาดความถี่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยร่างกายของมนุษย์จะสามารถซึมซาบสนามไฟฟ้าและ

สนามแม่เหล็กได้ก็ต่อเมื่อเข้าใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น เมื่ออยู่ในระยะการซึมซาบสนามไฟฟ้าจะผ่านร่างกายของมนุษย์โดยมีประจุไฟฟ้ากระจายบนผิวหนังของร่างกาย และทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน

ผลกระทบทางชีวภาพ เช่น พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งมากระทบกับจอประสาทตา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและการมองเห็นถึงผลกระทบนี้เรียกว่าผลกระทบทางชีวภาพ ไม่ใช่สุขภาพ องค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ได้นิยามความหมายของ (สุขภาพ) ไว้ว่าสภาวะความเป็นอยู่ที่ดีสมบูรณ์ทั้งร่างกาย จิตใจ และการปรับตัวเข้ากับสังคม ดังนั้นความกังวลของประชาชนหรือผู้ใช้ไฟฟ้า จึงเป็นที่มาของผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอย่างหนึ่ง

ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงได้มีการควบคุมค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีการติดตั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่องค์การอนามัยโลก World Health Organization WHO) ได้กำหนด โดยการร่วมกับหน่วยงาน International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้กำหนดระดับค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz โดยที่ประชาชนสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าขีดจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 50Hz [12]

สถานที่	ระยะเวลา	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก
สถานประกอบการ	ตลอดชั่วโมงการทำงาน	10 kV/m	5000 mG
สาธารณะ	ตลอดทั้งวัน	5kV/m	1000 mG

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นเชิงตัวเลขโดยการประมาณค่าของผลเฉลยของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของคณิตศาสตร์สมการเชิงอนุพันธ์ โดยมีการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ต่างๆ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นออกเป็นรูปร่างทางเลขาคณิตศาสตร์หลายๆส่วนเรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยมีการกระจัดและแรงภายในของอิลลิเมนต์นั้นๆ โดยที่จุดต่อของแต่ละอิลลิเมนต์จะต้องเข้ากันได้และมีความสมดุล โดยรูปแบบของอิลลิเมนต์แบบ 2 มิตินั้นจะอยู่ในลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านเท่าและด้านไม่เท่าก็ได้ ดังนั้นความถูกต้องของผล

เฉลยจะมีความถูกต้องมากขึ้นจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของการแบ่งอีลีเมนต์ สมการของแต่ละอีลีเมนต์จะประกอบกันเป็นสมการของระบบ หากแบ่งลักษณะออกเป็นอีลีเมนต์ย่อยๆ จะประกอบด้วย n จุดต่อทำให้เกิดสมการรวม ได้ตั้งสมการที่ (2.11) [2]

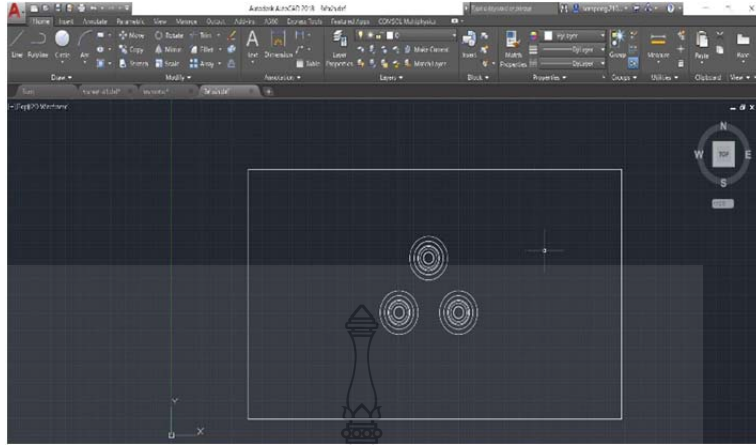
$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) เป็นคุณสมบัติของเมทริกซ์สมมาตร คือการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ จากคุณสมบัติของสมการสมมาตรนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการคำนวณ เนื่องจากจำนวนจุดต่อของอีลีเมนต์มีจำนวนมากทำให้การคำนวณรวดเร็วมากขึ้นและมีความถูกต้องสูง

2.8 โปรแกรม Comsol

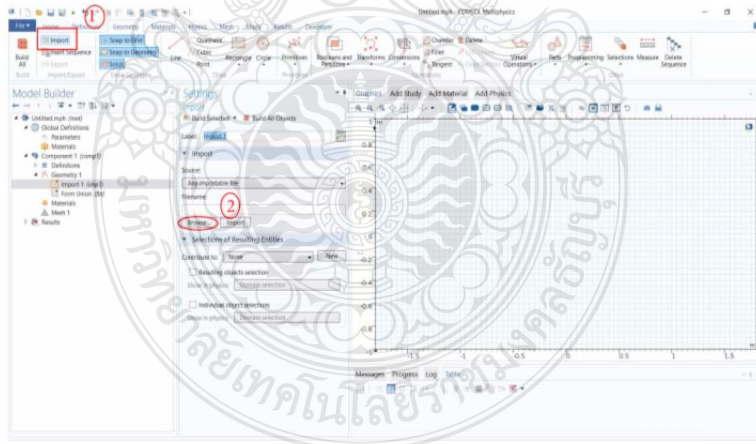
โปรแกรม Comsol Multiphysics เป็นโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของการคำนวณด้วยระเบียบวิธี Finite ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการจำลองเพื่อแก้ปัญหาต่าง ในเชิงของฟิสิกส์อย่างเสมือนจริง ซึ่งการประมวลผลมีความยืดหยุ่นสูงกับการใช้งานและการกำหนดเงื่อนไขจึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขา

2.8.1 การออกแบบสายตัวนำไฟฟ้า 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม. โดยการออกแบบสายไฟฟ้าสามารถออกแบบโดยใช้โปรแกรม Auto cad มาร่วมด้วยดังรูปที่ 2.26

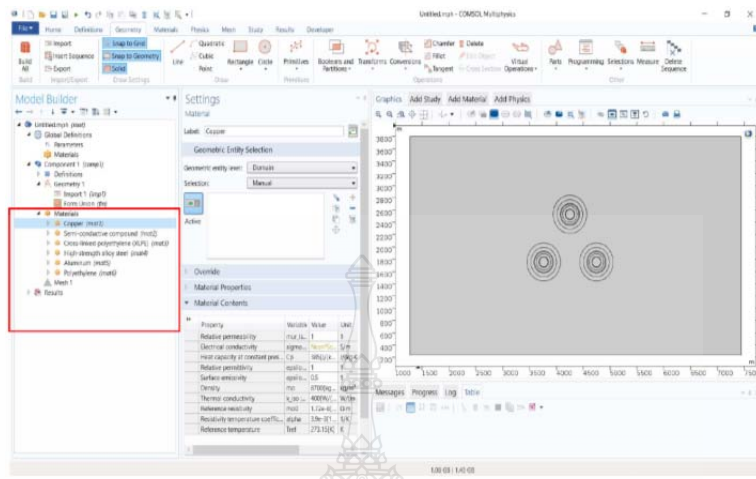


รูปที่ 2.26 การออกแบบสายตัวนำไฟฟ้า 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.ด้วยโปรแกรม Auto Cad

2.8.2 หลังจากที้ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการนำไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol ดังรูปที่ 2.27 เพื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในแบบจำลองเช่น ชนิดของวัสดุ สายไฟฟ้า แรงดัน กระแส ความถี่ สนามแม่เหล็ก ลงในแบบจำลองดังรูปที่ 2.28

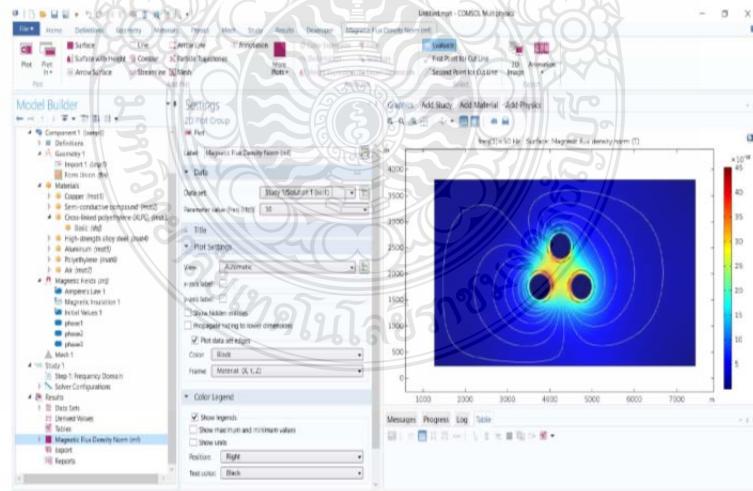


รูปที่ 2.27 วิธีนำเข้าไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol

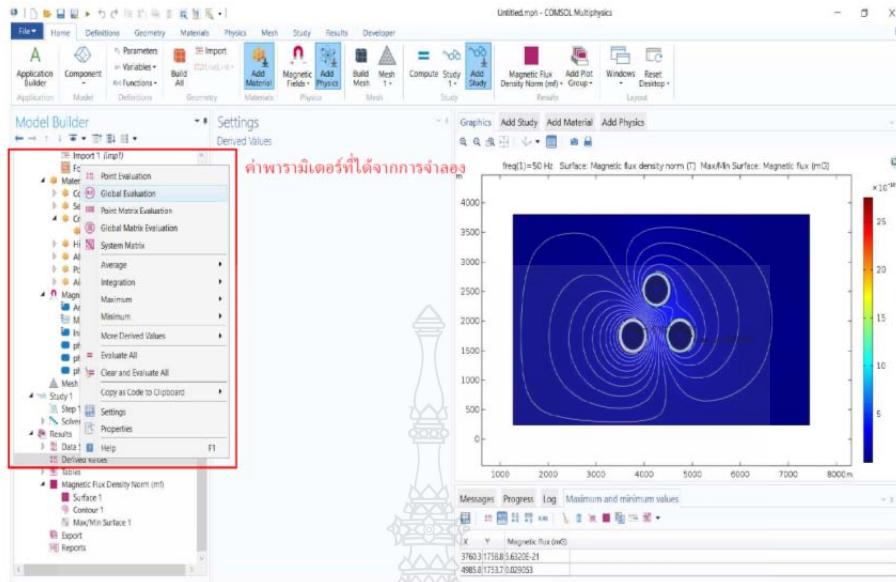


รูปที่ 2.28 การตั้งค่าพารามิเตอร์ลงในสายไฟฟ้า 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.

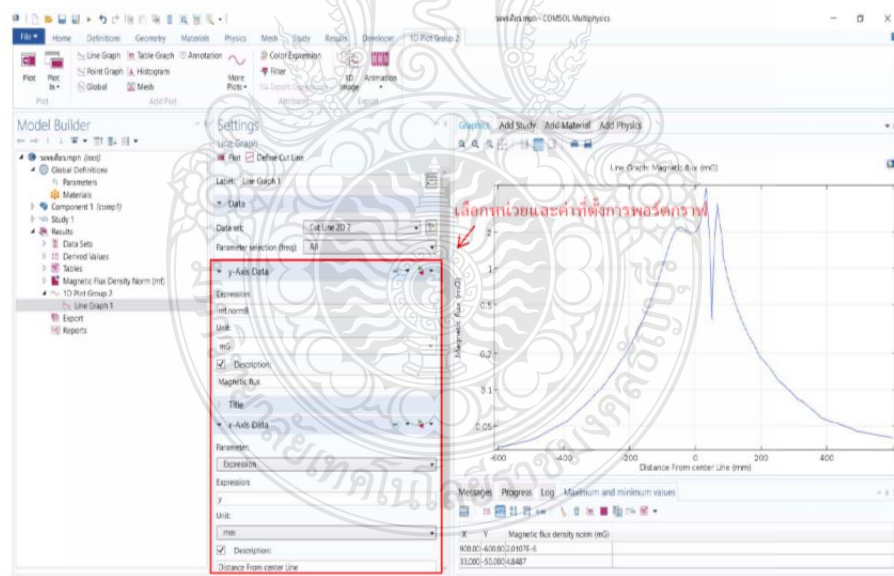
2.8.3 เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เรียบร้อยแล้วจึงเริ่มดำเนินการ กด Run simulation ตามรูปที่ 2.29 เมื่อโปรแกรมทำการจำลองเสร็จสิ้น สามารถเลือกที่จะดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.30 และ เลือกแสดงกราฟของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.29 กดเพื่อเริ่มการจำลองด้วยโปรแกรม Comsol



รูปที่ 2.30 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โปรแกรม Comsol จำลองเสร็จจึ้น



รูปที่ 2.31 การเลือกแสดงกราฟในโปรแกรม Comsol

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสายXLPE ขนาด 400 ตร.มม.

M.M. Dawoud และคณะ [13] การจัดการสนามแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับการลดผลกระทบของสนามดังกล่าวต่อสุขภาพของประชาชนโดยไม่ต้อง การเสียสละประสิทธิภาพหรือความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า เทคนิคการจัดการที่จำเป็นสำหรับใต้ดิน สายส่งประกอบด้วยวิธีการจัดวางเฟสการจัดการรูปทรงเรขาคณิตและการป้องกัน ในบทความนี้ผลการจำลอง ของวิธีมาตรฐานที่แนะนำมีการนำเสนอการกำหนดค่ารูปสามเหลี่ยมและแบน มีการจำลองสถานการณ์สำหรับสายเดี่ยวและสามเฟส ผลลัพธ์สำหรับความลึกที่แตกต่างกันได้รับการประเมินและเปรียบเทียบ ผลลัพธ์นำไปสู่ สรุปได้ว่าการจัดวางเฟสอย่างรอบคอบเป็นเทคนิคการจัดการที่มีประสิทธิภาพมากในการลดสนามแม่เหล็ก ตำแหน่งเฟสที่เหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับค่าสนามแม่เหล็กต่ำขั้นต่ำ

Francisco de Leon [14] เอกสารนี้แนะนำกลไกการถ่ายเทความร้อนในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินและวิเคราะห์ที่มีอยู่วิธีการแก้สมการการแพร่กระจาย แหล่งความร้อนและความต้านทานความร้อนของชั้นต่างๆของการติดตั้งสายเคเบิลมีการอธิบาย แนวคิดพื้นฐานเบื้องหลัง Nether-McGrath วิธีการ (IEEE) จะกล่าวถึงพร้อมกับความแตกต่างกับมาตรฐาน IEC สำหรับการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีอยู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์ออกแบบมาเพื่อให้มีประสิทธิภาพการคำนวณจะแสดงรายการพร้อมกับคำอธิบายของการสร้างแบบจำลองความสามารถของ CYME's CYMCAP

Vitor Maló Machado [15] บทความนี้มีส่วนช่วยในการวิเคราะห์การลดสนามแม่เหล็กที่ป้องกันสายไฟฟ้าใต้ดิน องค์ประกอบ จำกัด แบบไฮบริดจ์วิธีการ Finite-Element Method (FEM) การขยายตัวแบบกึ่งวิเคราะห์ถูกนำมาใช้สำหรับการรักษาเชิงตัวเลขของปัญหาสนามแม่เหล็กขอบเขตเปิดมีการศึกษาวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่แตกต่างกันสำหรับการป้องกันสนามแม่เหล็กและมีการเปรียบเทียบ

ระหว่างวัสดุที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า (อะลูมิเนียม) และเคส ferromagnetic (เหล็ก) มีการพิจารณาโครงสร้างแบบแบนแนวนอนสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน สรุปได้ว่าอลูมิเนียมการป้องกันมีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถลดสนามแม่เหล็กข้อกำหนดได้

สมคิด สีสานชะชัยพงศ์และคณะ [16] บทความนี้นำเสนอการออกแบบจำลองสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ (2D-Electrostatic fields) ที่กระจายอยู่โดยรอบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable) ซึ่งเป็นระบบส่งจ่ายกระแสอีกรูปแบบหนึ่งที่เหมาะแก่การเดินสายในเมืองใหญ่หรือบริเวณชุมชนที่มีพื้นที่จำกัดซึ่งต้องอาศัยวิธีการและเทคนิคทางด้านวิศวกรรมที่จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงพฤติกรรมของศักย์ไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวนแบบ Cross-linked Polyethylene (XLPE) ระดับแรงดันปานกลาง 33 กิโลโวลต์กรณีจัดเรียงสายแบบ Flat แบบ Trefoil และกรณีฝังสายใต้ดินโดยตรง (Direct Burial) โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) รันบนโปรแกรม FEMM

สลักจิต นิลบรรและคณะ [17] บทความนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์การเกิดสนามไฟฟ้าแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังอ่อน หรือ Extremely low frequency Electromagnetic field (ELF-EMF) ในสายส่งระดับแรงดันปานกลาง 33 kV หนึ่งวงจร การวางสายแบบ flat ในสายส่งเหนือหัว เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบ โดยการสร้างโมเดลเสมือนสำหรับการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าภายในระยะปลอดภัย (Right of Way) ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงระดับแรงดันสูงสุดและระดับแรงดันที่ลดลงตามระยะทางที่ห่างออกมาจากเสาส่ง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดินเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานและข้อกำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

ดร.เผด็จ เผ่าละออและคณะ [18] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง โดยได้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นรวมถึงบุคลากรที่ทำงานบริเวณพื้นด้านล่าง โดยได้พิจารณาสายส่งขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งอาศัยการแปลงระบบจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าและ

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากผลลัพท์ที่ได้จากการจำลอง ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ในระดับความสูง 1 m จากพื้นดินที่บุคลากรทำงานอยู่ จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ ICNIRP

สุกัญญา ทัพศรี [2] วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดสายส่งกำลังไฟฟ้า วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เป็นวิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขในรูปแบบสมการที่มีความซับซ้อนที่ได้รับ ความนิยมอีกวิธีหนึ่ง และได้มีการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในงานทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง แม้กระทั่งใช้ในการจำลองผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมินี้ วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามารถแก้ปัญหาสมการของแมกเวลล์ที่ปรากฏในแบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยได้ประยุกต์ใช้การประมาณค่าแบบย้อนหลังกับงานที่ขึ้นกับเวลา วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำประโยชน์ของวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนตลอดสายส่งกำลังไฟฟ้า และนำผลลัพท์ที่ได้จากการจำลองผลตรวจสอบความถูกต้องกับผลการวัดของอุณหภูมิ ซึ่งผลที่ปรากฏมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

Sureyo Bume และคณะ [19] การสร้างบ่อพักใต้ดินและท่อร้อยสายไฟฟ้ามีความเสี่ยงสูงในการใช้เวลานานขึ้นและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการก่อสร้างโครงการเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด การศึกษา มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ผลกระทบของอุปสรรคในการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหามีการศึกษาท่อร้อยสายไฟฟ้าความยาว 131 เมตรระหว่าง Manhole 13 (MH 13) และ Manhole 12 (MH 12) ใกล้สถานีเตาปูน หลังจากท่อลอดท่อร้อยสายไฟ 62 เมตรจาก MH 13 มีนกระแทกที่ระบายน้ำเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตรและลึก -4.00 เมตรจากพื้นผิวถนน ปัญหาได้รับการแก้ไขโดยการสร้างท่อระบายน้ำชั่วคราวเพื่อกู้คืนอุปกรณ์และบ่อพักเพิ่มเติมอีกสองบ่อห่างกัน 15 เมตรโดยมีความลึก -6.00 เมตรจากพื้นผิวถนนเพื่อเชื่อมต่อกับโครงการเดิม เมื่อเกิดปัญหาขึ้นผลผลิตในการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินอยู่ที่ 6.9 เมตรต่อวันโดยมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม 5,470,423 บาทคิดเป็น 88% ของต้นทุนงานเดิมในส่วนนี้ 6,210,486 บาท

สมมาตร ข้าเกลี้ยง [20] การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบแผนสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวางในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียกว่า WGDPTETM รูปแบบของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทำงานด้วยโปรแกรมแมทแล็บในฟังก์ชันจิวไอ (GUI) มีความสามารถดังนี้ 1) แสดงค่าของอิมพีแดนซ์ในโหมด TE และโหมด TM ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ 2) จำลองแบบแผนสนามแม่เหล็กตามขวางในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ 3) จำลองแบบแผนสนามไฟฟ้าตามขวางในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลการวิจัยพบว่า ผลการคำนวณของโปรแกรมมีความถูกต้องตรงตามผลทางทฤษฎี และผลการประเมินของผู้ใช้งานจำนวน 5 คน มีค่าความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด

Mehrdad Firoodi และคณะ [21] ในบทความนี้เป็นวิธีการใหม่สำหรับการกำหนดเส้นทางเฟสเดียวมีการนำเสนอสายเคเบิลในระดับไฟฟ้าแรงสูง วิธีการที่เสนอขึ้นอยู่กับการกระจายของสนามแม่เหล็กของสายเคเบิลผลการจำลองที่ได้รับจากซอฟต์แวร์ CST แสดงถึงไฟล์ความแตกต่างระหว่างการกระจายสนามแม่เหล็กบนพื้นดินพื้นผิวที่เกิดจากสายเคเบิลใต้ดินและในสถานที่ที่ไม่มีสายเคเบิล ผลปรากฏว่าได้สนามแม่เหล็กจากด้านบนของสายเคเบิลใต้ดินได้ตรวจพบโดยเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีอยู่ เพื่อตรวจจับสายเคเบิลเส้นทางโดยใช้การกระจายสนามแม่เหล็กของสายเคเบิลในตอนแรกโดยการสแกนพื้นที่ตามเส้นการวัดแนวตั้งจุดของมีการค้นพบสายเคเบิลจากนั้นสแกนตามแนวขนานสายวัดตรวจพบเส้นทางสายเคเบิล ที่เสนอวิธีนี้เป็นวิธีการตรวจจับแบบพาสซีฟและไม่จำเป็นต้องมีการหยุดชะงักของสายไฟ

Silviu Vomicu และคณะ [22] การสัมผัสกับสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำได้รับประเด็นปัญหาด้านสุขภาพและการรบกวนทางวิทยาศาสตร์ใน ปัญหานี้กระตุ้นความสนใจที่มีต่อการพัฒนาวิธีการและเครื่องมือซอฟต์แวร์สำหรับคอมพิวเตอร์สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยระบบความถี่ไฟฟ้าต่างๆสายไฟใต้ดินใช้กันอย่างแพร่หลายในเขตเมือง แต่พวกเขาไม่ได้รับการตรวจสอบมากเท่ากับแหล่งอื่น ๆ ในเรื่องนี้การศึกษาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่สร้างขึ้นโดยทั่วไปสายไฟฟ้าใต้ดิน 12/20 kV จะได้รับการประเมินโดยทั้งสองการคำนวณเชิงวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นใน Lab View และการจำลองตัวเลขด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า 2 มิติซอฟต์แวร์การสร้างแบบจำลอง ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบวิเคราะห์และตรวจสอบกับซิด

Victor J. Hernandez และคณะ [23] การจัดสรรสายส่งพลังงานไฟฟ้าในอุโมงค์เป็นแนวทางปฏิบัติทั่วไปในการใช้งานหลายอย่างเช่นสายใต้ดินในเขตเมืองการเชื่อมต่อสายเคเบิลกับสถานีย่อยการขุดและระบบรถไฟการก่อสร้างอุโมงค์ต้องใช้งานที่ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ข้อ จำกัด ของแม่เหล็ก

ภายนอกและภายในจำเป็นต้องมีช่องที่สร้างโดยกระแสในสายเคเบิลของอุโมงค์ เอกสารปัจจุบันเสนอและวิเคราะห์วิธีการทางสถิติที่แตกต่างกันสำหรับการคำนวณการจัดจำหน่ายสายเคเบิลและขนาดอุโมงค์ที่เหมาะสมสำหรับการลดสนามแม่เหล็กและค่าใช้จ่ายสำหรับกระแสที่แตกต่างกันในสายเคเบิล การนำวิธีการเหล่านี้ไปใช้กับสิ่งจรรยาณิจริงจะตรวจสอบประสิทธิภาพของพวกเขา



บทที่ 3

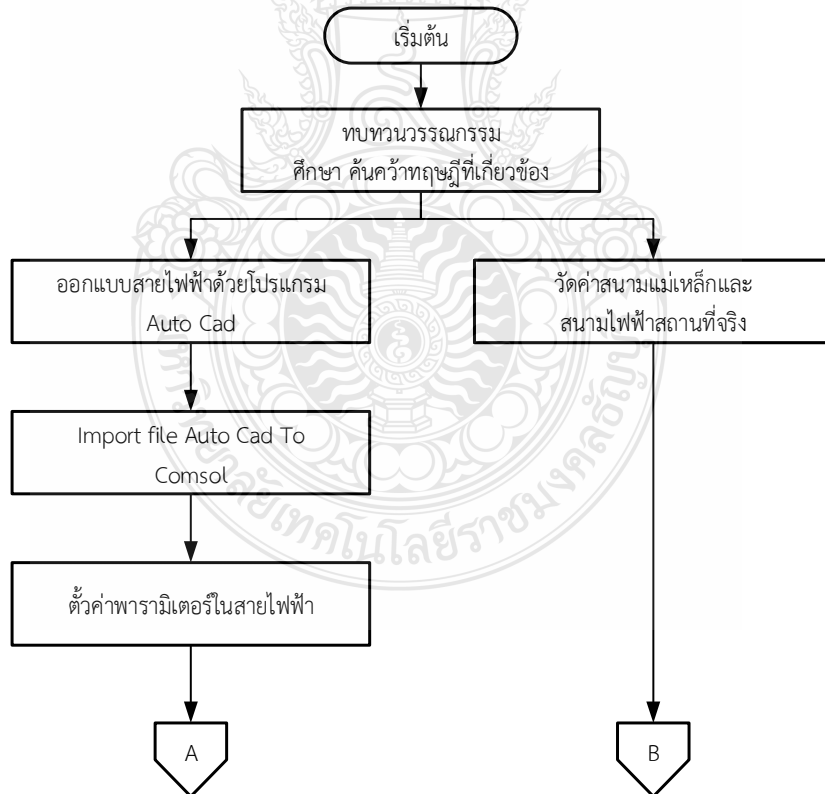
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

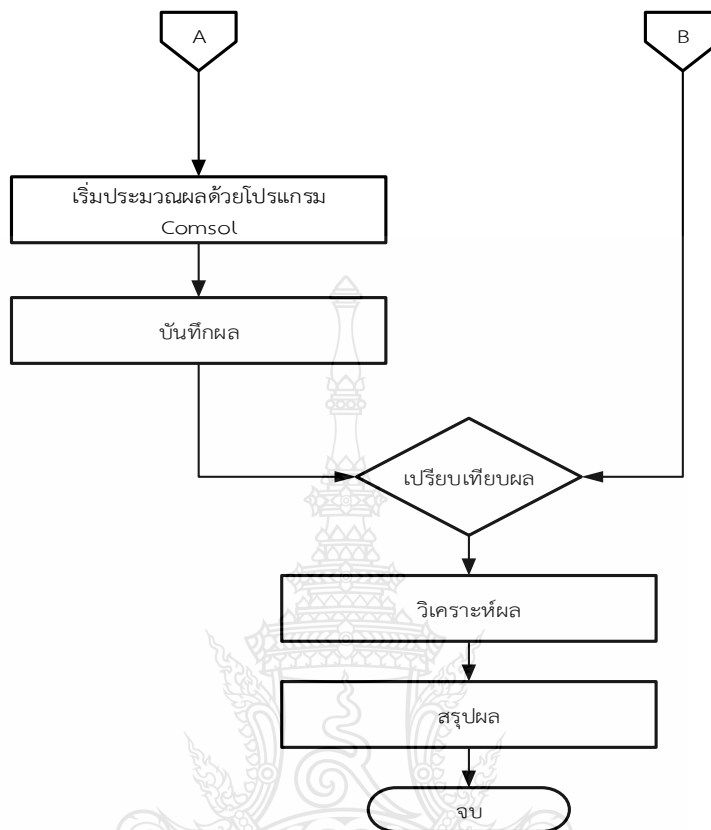
งานวิจัยนี้เป็นนำเสนอการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม. โดยตัวอย่างจะพิจารณาของโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก – พระราม 9 ด้วยโปรแกรม Comsol และผลการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ สถานที่จริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ตาม Flow Chart ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

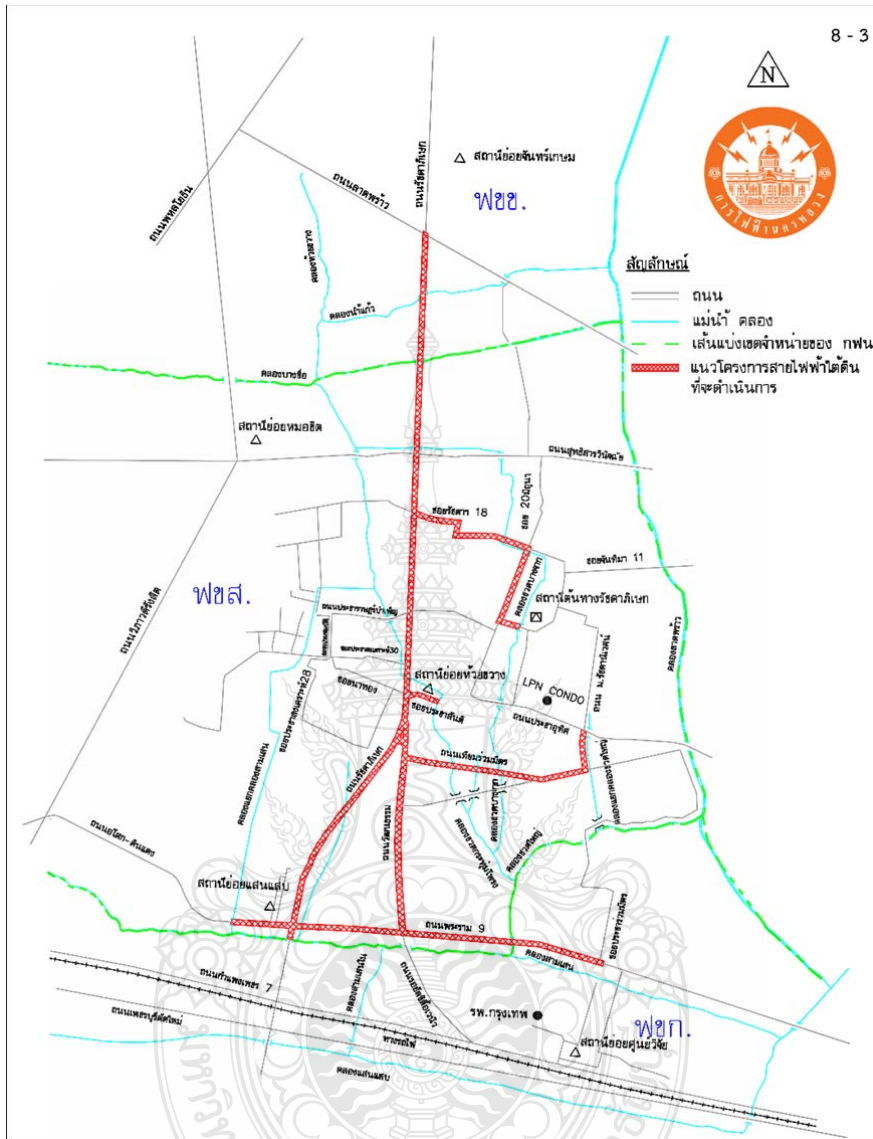


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย [ต่อ]

3.3 ข้อมูลของสายไฟฟ้าใต้ดินของโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก - พระราม 9

3.2.1 สถานที่ตั้ง

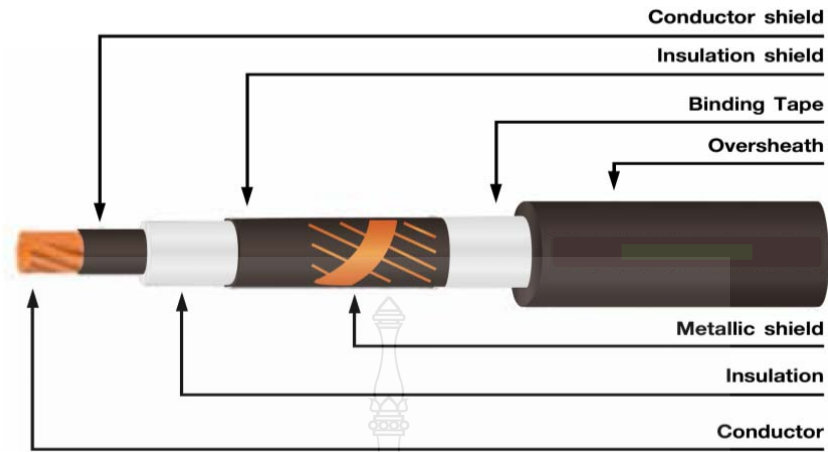
แผนผังโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก - พระราม 9 โดยการเริ่มโครงการตั้งแต่ถนนรัชดาตัดกับถนนลาดพร้าวจนถึงที่ถนนพระราม 9



รูปที่ 3.2 พื้นที่โครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก - พระราม 9

3.2.2 สายไฟฟ้าใต้ดิน

สายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ในระดับแรงดัน 24 kv ในโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศ เป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน รัชดาภิเษก - พระราม 9 เพื่อใช้การจำลองศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและ สนามไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 3.3 ลักษณะของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 kV ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.

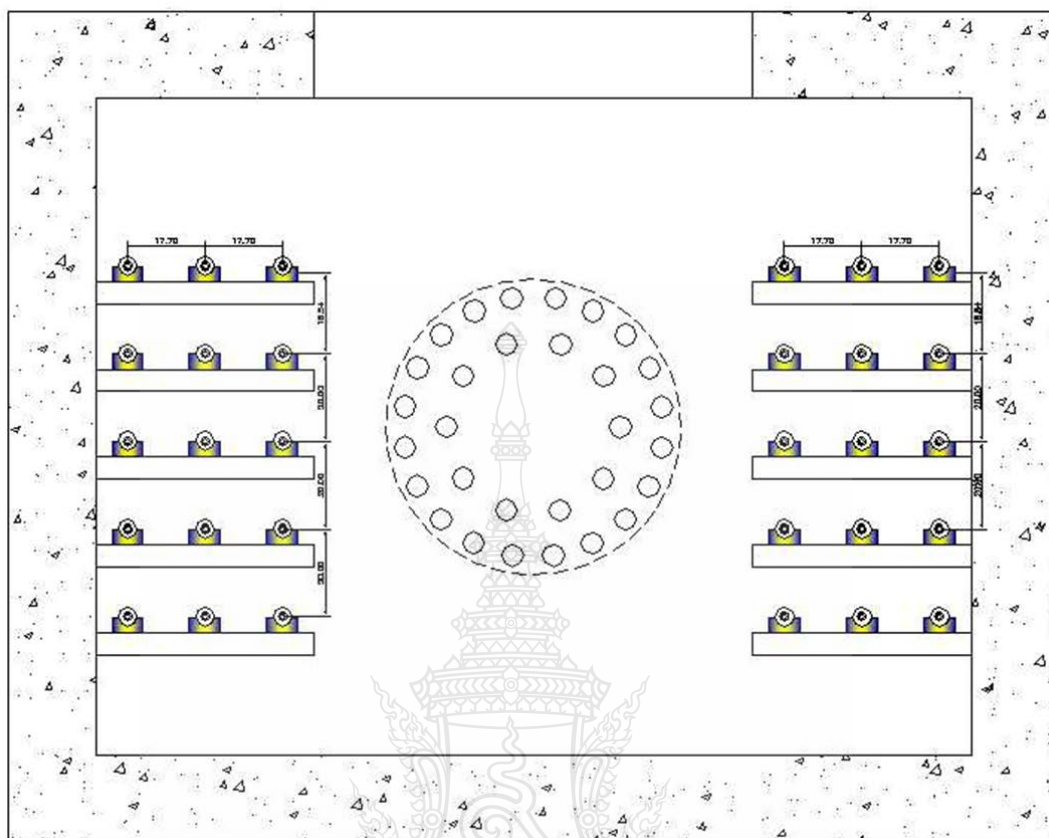
รายการ	หน่วย	ขนาด
Nominal cross-sectional area	mm	400
Minimum number of wire of wire of conductor	mm	53
Diameter of conductor (Approx.)	mm	23
Nominal thickness of insulation	mm	5.5
Diameter over insulation (Approx.)	mm	35.3
Copper wire shield Nominal diameter of wire	mm	1.03
Nominal thickness of over sheath	mm	2.3
Overall diameter (Approx.)	mm.	45
Cable weight (Approx.)	Kg/km	4,665

3.4 จำลองการออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินด้วยโปรแกรม Auto Cad และโปรแกรม Comsol การจำลองด้วยโปรแกรม

การจัดวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat (Flat Formation) โดยเรียงแบบ RST TSR บน RACK การจัดวางแบบนี้ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน(D) ระยะห่างระหว่างวงจรถือเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน(2D) และระหว่างวงจรถืออยู่ติดกันควรเป็นเฟสเดียวกัน ดังรูปที่ 3.4

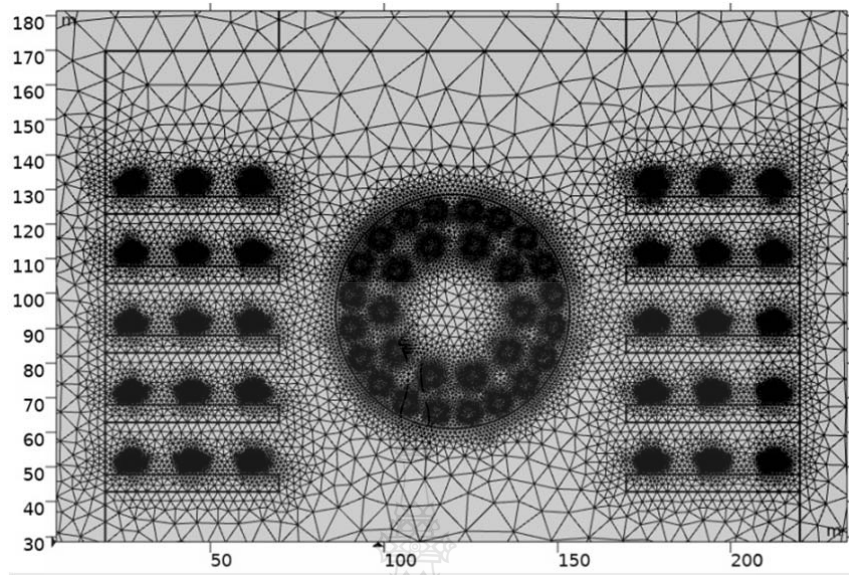


รูปที่ 3.4 การติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดินภายในโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน
รัชดาภิเษก - พระราม 9

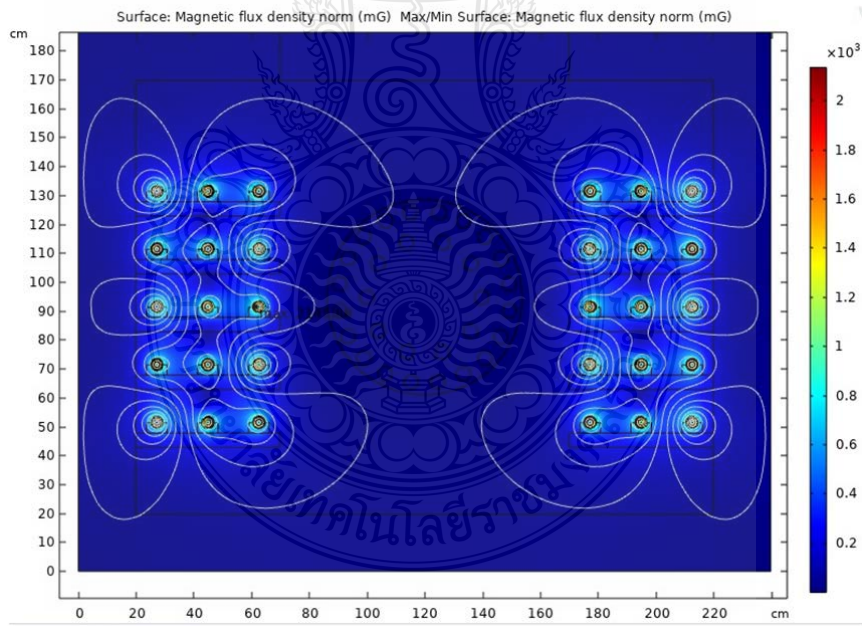


รูปที่ 3.5 การออกแบบการจัดวางสายไฟฟ้าใต้ดินเพื่อการจำลอง โดยโปรแกรม Auto Cad

การออกแบบระบบจัดวางสายไฟฟ้าใต้ดินแบบ Flat (Flat Formation) จากโปรแกรม Auto Cad นั้นอันเนื่องมาจาก ความละเอียดและลักษณะการออกแบบนั้นง่ายกว่าการออกแบบ ด้วยโปรแกรม Comsol ดังรูปที่ 3.5 เมื่อออกแบบเสร็จจึงทำการจำลองด้วยโปรแกรม Comsol โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ต่างๆลงในโปรแกรม Comsol เพื่อจำลองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าใต้ดินดังรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 โครงสร้างไฟไนท์อีลิเมนต์ของสนามไฟฟ้าภายสายเคเบิลใต้ดิน



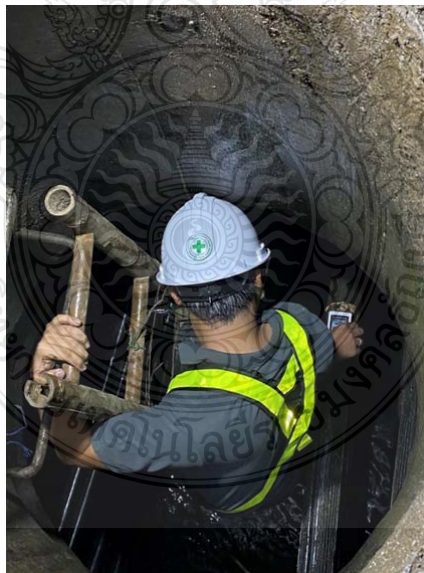
รูปที่ 3.7 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในสายเคเบิลใต้ดิน

3.5 การวัดค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน

การวัดค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินในสถานที่จริงโดยการใช้เครื่องมือวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก คือเครื่อง Tenmars TM-190 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก Tenmars TM-190

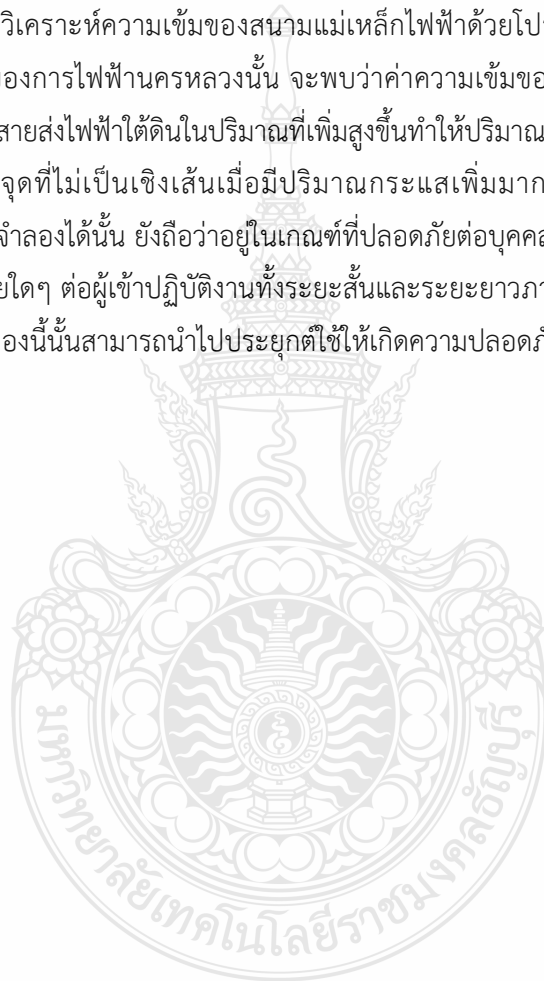


รูปที่ 3.9 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ สถานที่จริง

จากการศึกษาเรื่องสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินโดยการวัดค่าจริงตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงกำหนด โดยค่าของสนามไฟฟ้า ของสถานประกอบการตลอดการทำงานคือไม่เกิน 10 kV/m สาธารณะตลอดทั้งวันไม่เกิน 5 kV/m และสนามแม่เหล็กของสถานประกอบการตลอดการทำงานไม่เกิน 5000 mG และสาธารณะตลอดทั้งวันไม่เกิน 1000 mG ดังรูปที่ 3.8

3.6 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงนั้น จะพบว่าค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีกระแสใช้งานไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าใต้ดินในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณของสนามแม่เหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกันและมีจุดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณกระแสเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จำลองได้นั้น ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อบุคคลหรือผู้ที่เข้าไปปฏิบัติงานได้ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ ต่อผู้เข้าปฏิบัติงานทั้งระยะสั้นและระยะยาวภายในบ่อพักสาย จากข้อมูลการศึกษาด้วยการจำลองนี้นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้



บทที่ 4

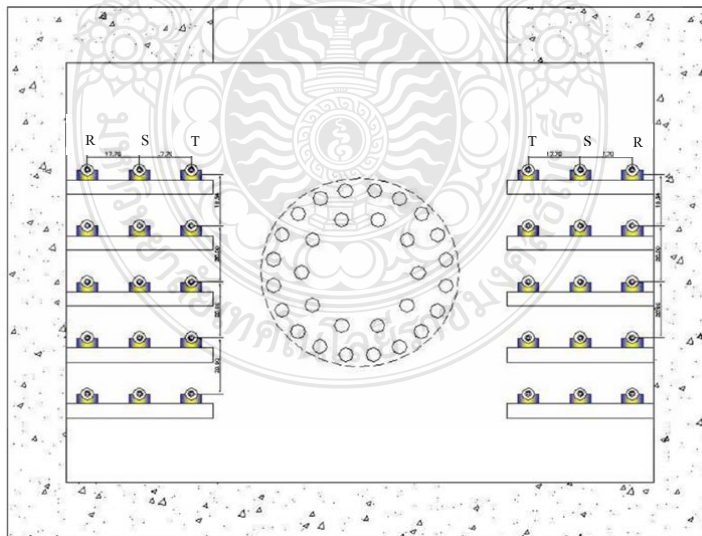
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

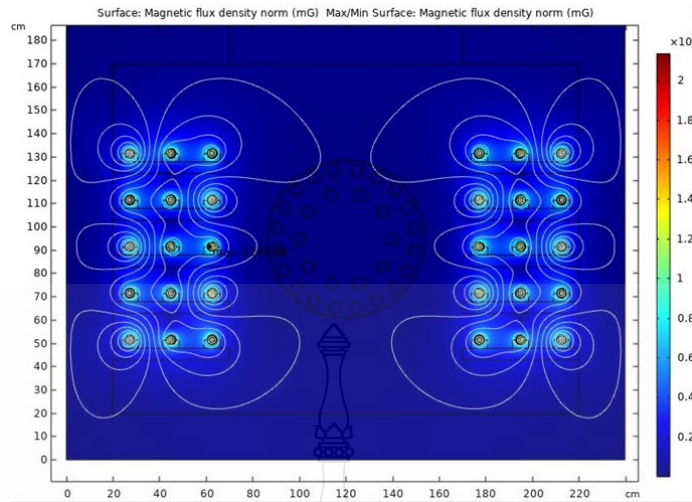
การจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อการศึกษาผลกระทบของเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV ภายในบ่อพักเคเบิลใต้ดิน เนื่องด้วยค่าสนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้ามีผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ โดยการติดตั้งสายไฟฟ้าชนิด Flat Formation บน Rack ซึ่งมีการจัดเรียงสายไฟฟ้ารูปแบบ RST TSR และเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงออกแบบการจัดเรียงแบบ RST RST เพื่อดูค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีวงจรสายส่งจำนวน 10 วงจรภายในบ่อพักสายไฟฟ้า

4.2 ผลการจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน รูปแบบ Flat Formation บน Rack โดยการจัดเรียงแบบ RST/TSR

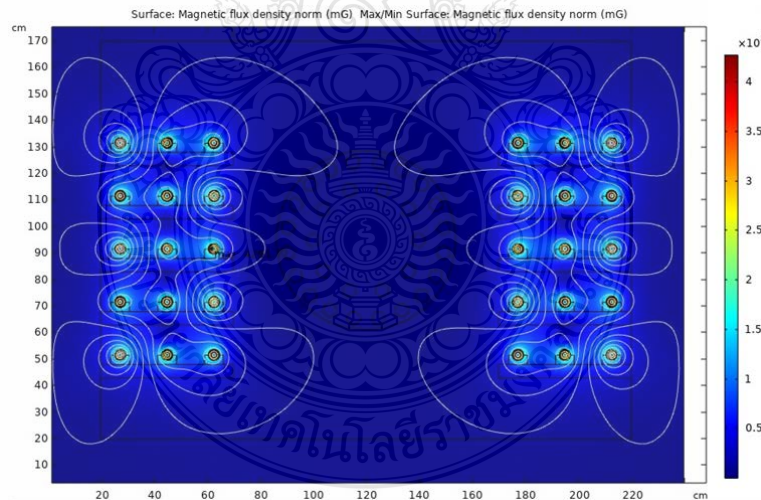
ผลการจำลองของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ระดับแรงดัน 24 kV ในรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า 100 – 315 A เพื่อจำลองผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจัดเรียงแบบ RST/TSR เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการจัดเรียงตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง



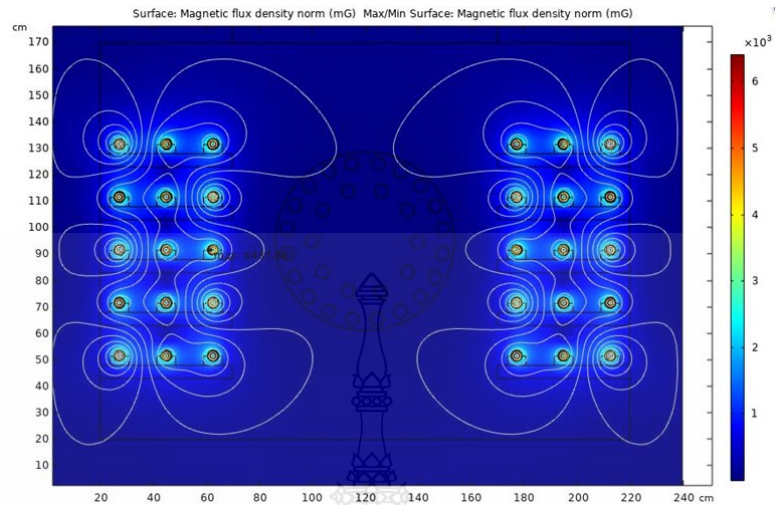
รูปที่ 4.1 การออกแบบการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat โดยการจัดเรียงแบบ RST/TSR



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 100 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/TSR ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 100 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/TSR ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 2536.5 mG ค่าต่ำสุด 0.01mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร

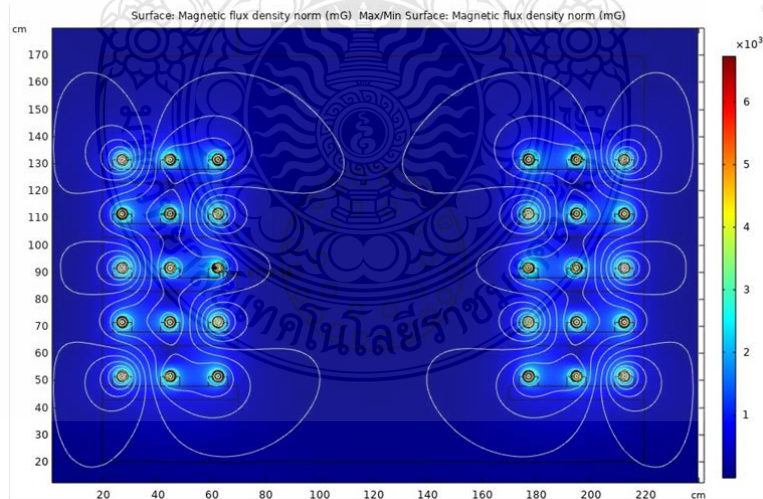


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 200 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/TSR ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 200 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/TSR ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 4291.8 mG และต่ำสุดอยู่ที่ 0.021 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 300 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/TSR

ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 300 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/TSR ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 6437.7 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.0315 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 315 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/TSR

ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 315 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/TSR ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 6759.5 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.033 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร

ตารางที่ 4.1 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST/TSR

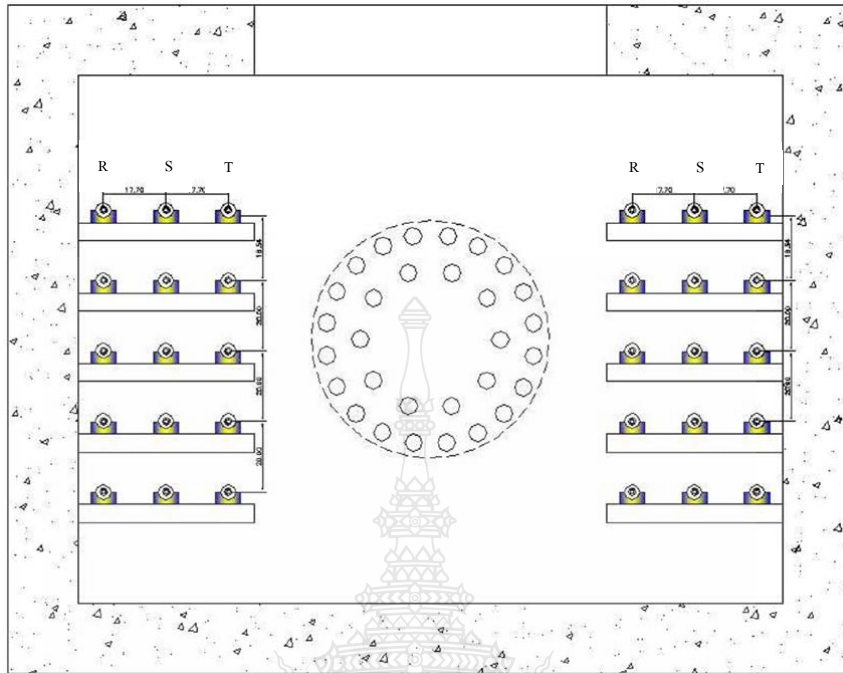
พิกัดการจ่ายกระแสในสาย เคเบิลใต้ดิน	ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (mG)	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ขนาดพิกัดกระแส 100 A	2,145.9	0.01
ขนาดพิกัดกระแส 200 A	4,291.8	0.021
ขนาดพิกัดกระแส 300 A	6,437.7	0.031
ขนาดพิกัดกระแส 315 A	6,759.5	0.033

ตารางที่ 4.2 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณผิวฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST/TSR

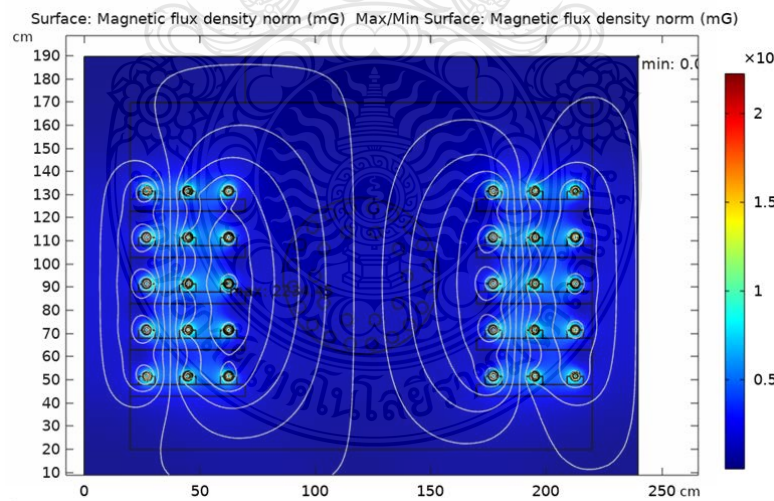
พิกัดการจ่ายกระแสในสาย เคเบิลใต้ดิน	ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบ่อพักสาย เคเบิลใต้ดิน (mG)
	ขนาดพิกัดกระแส 100 A
ขนาดพิกัดกระแส 200 A	1,384.50
ขนาดพิกัดกระแส 300 A	1,881.10
ขนาดพิกัดกระแส 315 A	2,329.40

4.3 ผลการจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน รูปแบบ Flat Formation บน Rack โดยการจัดเรียงแบบ RST/RST

ผลการจำลองของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ระดับแรงดัน 24 kV ในรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า 100 – 315 A เพื่อจำลองผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจัดเรียงแบบ RST/RST เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กของการจัดเรียงแบบ RST/RST ซึ่งเป็นการจัดเรียงที่ไม่ถูกต้องตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

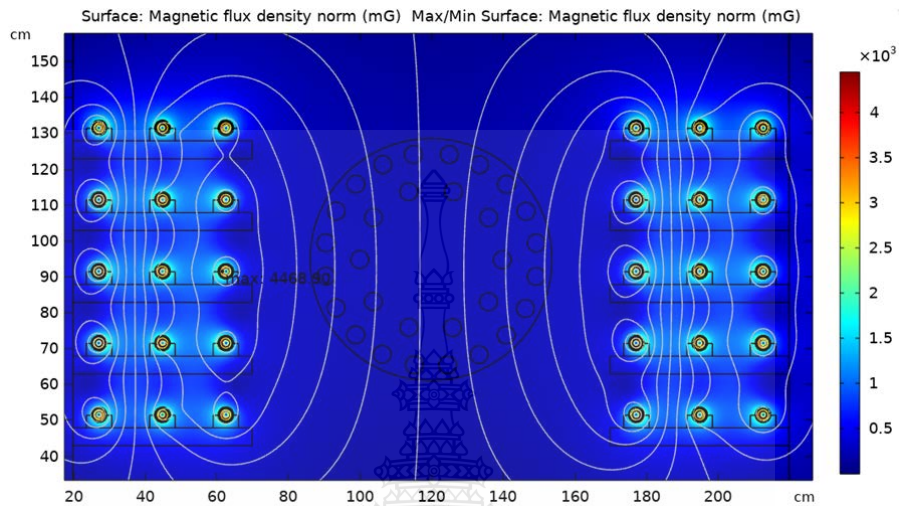


รูปที่ 4.10 การออกแบบการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบ Flat โดยการจัดเรียงแบบ RST/RST

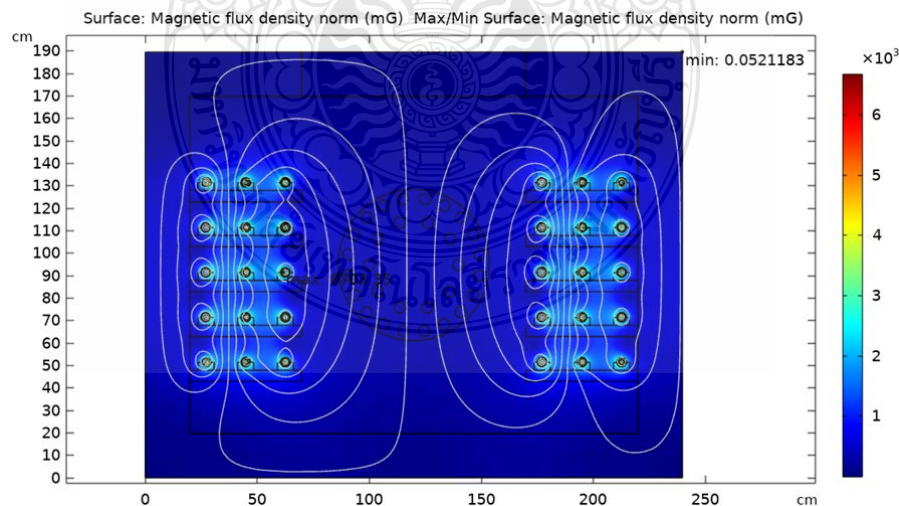


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 100 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อกักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/RST

ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 100 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/RST ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 2234.5 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.0173 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร

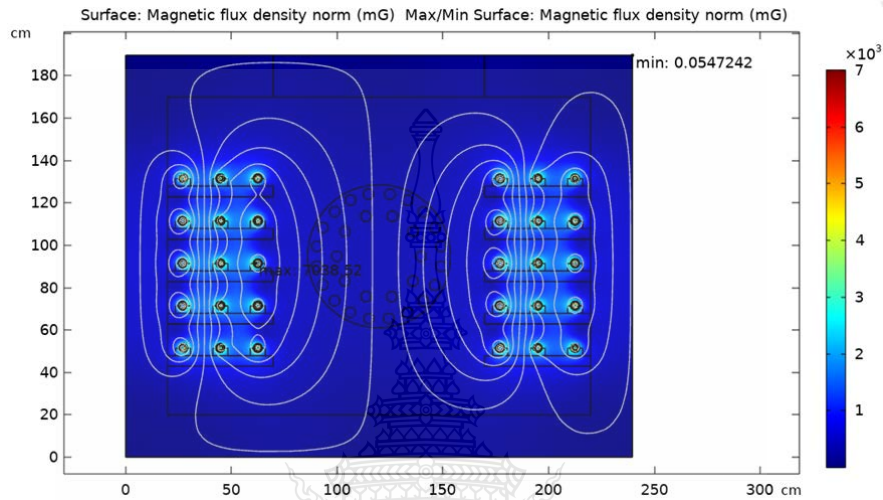


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 200 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/RST ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 200 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/RST ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 4468.9 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.034 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 300 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/RST

ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 300 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/RST ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 6703.4 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.052 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 315 A ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV บน Rack ในบ่อพักสายใต้ดิน การจัดเรียงแบบ RST/RST

ผลการจำลองด้วยการจ่ายกระแส 315 A ของเคเบิลใต้ดิน ที่จัดเรียงสายแบบ RST/RST ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ 7038.5 mG และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.054 mG ของวงจรสายส่ง 10 วงจร จากการจำลองผลการจ่ายกระแสไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 24 kV ในรูปแบบ Flat Fomation บน Rack ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST/RST ด้วยการจำลองระดับพิกัดของกระแสที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่หรือเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ดังแสดงผลค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST/RST

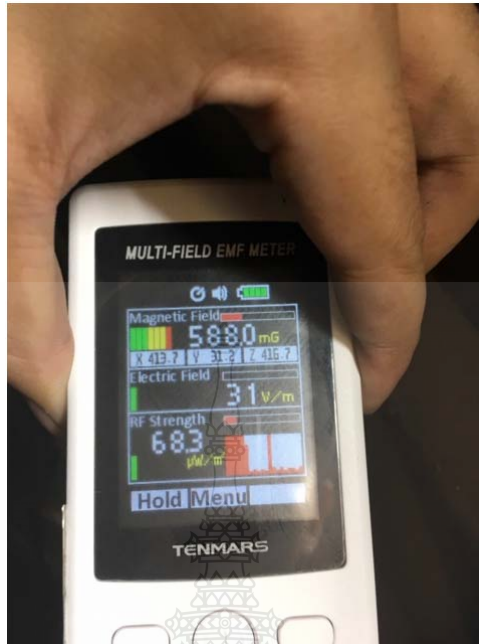
พิกัดการจ่ายกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน	ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (mG)	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ขนาดพิกัดกระแส 100 A	2,234.5	0.017
ขนาดพิกัดกระแส 200 A	4,468.9	0.034
ขนาดพิกัดกระแส 300 A	6,703.4	0.052
ขนาดพิกัดกระแส 315 A	7,038.5	0.054

ตารางที่ 4.4 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณผิวฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ขนาด 24 kV ด้วยวิธีการจัดเรียงแบบ RST/RST

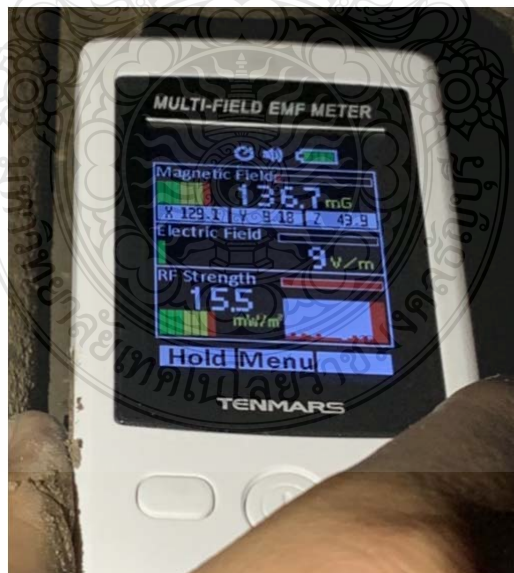
พิกัดการจ่ายกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน	ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (mG)
	เคเบิลใต้ดิน
ขนาดพิกัดกระแส 100 A	601.30
ขนาดพิกัดกระแส 200 A	1,541.40
ขนาดพิกัดกระแส 300 A	2,283.70
ขนาดพิกัดกระแส 315 A	2,436.00

4.4 การวัดผลค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเคเบิลใต้ดินภายในบ่อพักสายใต้ดิน

จากการวัดผลของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในบ่อพักสายใต้ดินในขณะปฏิบัติงาน โดยการใช้เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเคเบิลใต้ดินพิกัดแรงดัน 24 kV ได้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดคือ 588 mG ดังรูปที่ 4.19 และค่าต่ำที่สุดคือ 136.7 mG ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งการวัดค่าสนามแม่เหล็กในขณะนั้น เป็นช่วงเวลาที่อัตราการใช้โหลดทางไฟฟ้ามาค่าต่ำ การวัดค่าจริงจึงไม่สามารถกำหนดกระแสของโหลดได้



รูปที่ 4.19 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดภายในบ่อพักสาย



รูปที่ 4.20 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำสุดภายในบ่อพักสาย

4.5 บทสรุป

การวิเคราะห์การจำลองผลของเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. ที่ระดับแรงดัน 24 kV ในข้อบกพร่องสายใต้ ด้วยการจำลองผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป ในการจัดวางเคเบิลใต้ดิน แบบ Flat Formation บน Rack ที่มีจำนวนสายส่ง 10 วงจร โดยรูปแบบการจัดเรียงแบบ RST TSR ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง และแบบ RST RST เป็นการจัดเรียงเพื่อศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจำลองผลที่เกิดขึ้นของสนามแม่เหล็กจึงได้ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสนามแม่เหล็ก จึงสามารถนำไปสรุปผลต่อภายในบทต่อไป



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินขนาดตัวนำ 400 ตร.มม. พิกัดแรงดัน 24 kV ในบ่อพักสายใต้ดิน โดยการออกแบบจำลองผลระบบสายส่งจำนวน 10 วงจร ภายในบ่อพักสาย เพื่อศึกษาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อจากการจัดเรียงสายส่ง ซึ่งสามารถนำเสนอผลของการทำวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้

5.2 สรุปผลการวิจัย

5.2.1 ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเคเบิลใต้ดินขนาด 400 ตร.มม. พิกัดแรงดัน 24 kV ของสาย XLPE ด้วยการติดตั้งแบบ Flat Formation ที่ติดตั้งบน Rack โดยมีการจัดเรียงเคเบิลทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ 1) การจัดเรียงเคเบิลใต้ดินแบบ RST TSR ซึ่งมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง 2) การจัดเรียงแบบ RST RST ซึ่งเป็นการออกแบบการจัดเรียงเพื่อศึกษาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจำลองจะแบ่งการจ่ายกระแสออกเป็น 4 ระดับ 100 A จนถึง 315 A ในการจัดเรียงเคเบิลใต้ดินแบบ RST TSR ด้วยการจำลองในระดับกระแส 100 A ได้ผลของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.01 mG และค่าสูงสุดอยู่ที่ 2,145.9.5 mG จากการจำลองผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของฉนวนมีค่าสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 529 mG ด้วยค่ากระแสที่ระดับ 315 A จะได้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.033 mG ค่าสูงสุดอยู่ที่ 6,759.5 mG และค่าสนามแม่เหล็กที่ผิวฉนวนมีค่าอยู่ที่ 2,329.40 mG ซึ่งการจำลองการจัดเรียงเคเบิลใต้ดินแบบ RST TSR เป็นการจัดเรียงตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง การจัดเรียงแบบ RST RST ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการจ่ายกระแสในระดับ 100 A จะมีค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.17 mG ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2,234.5 mG และแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวฉนวนมีค่า 601.30 mG จากผลการจำลองการจ่ายกระแสสูงสุดของเคเบิลใต้ดินที่กระแส 315 A ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.054 mG และค่าสูงสุดอยู่ที่ 7,038.5 mG และค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวฉนวนมีค่า 2,436.00 mG ค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบการจัดเรียงแบบ RST TSR ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงนั้นในระดับพิกัดกระแส 100 A ในการจำลองระหว่างการจัดเรียงเคเบิลแบบ RST RST จะเห็นว่าค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของการไฟฟ้าจะมีค่าที่ต่ำกว่าการจัดเรียงแบบ RST RST และซึ่งค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลกระทบต่อระหว่างวงจรสายส่งในแนวตั้งมากกว่าวงจรถูกที่อยู่ในระนาบเดียวกัน เนื่องจากวงจรถูกอยู่ใน

ระนาบเดียวกันมีระยะห่างค่อนข้างไกล ทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กของทั้งสองฝั่งไม่เป็นผลต่อกัน โดยค่าตามมาตรฐานของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้ตลอดชั่วโมงการทำงานของสถานประกอบการไม่ควรเกิน 5000 mG ที่ความถี่ 50 Hz [12] ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวนอนนั้นมีค่าไม่เกินจากที่มาตรฐานกำหนด

5.2.2 ผลจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในบ่อพักสายไฟฟ้า ที่พิกัดแรงดัน 24 kV ของสายส่งไฟฟ้าซึ่งพบว่าในขณะที่ปฏิบัติงานจริงนั้น ค่าที่สูงที่สุด คือ 588 mG ค่าที่ต่ำที่สุดคือ 136.7 mG โดยค่าที่วัดได้นั้นอยู่ในระดับของการจ่ายกระแสที่ประมาณ 100 A ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป และเนื่องจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจริงไม่สามารถกำหนดกระแสที่แน่นอนได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการจ่ายโหลดในขณะนั้นจึงทำการเปรียบเทียบทุกช่วงกระแสค่อนข้างยาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

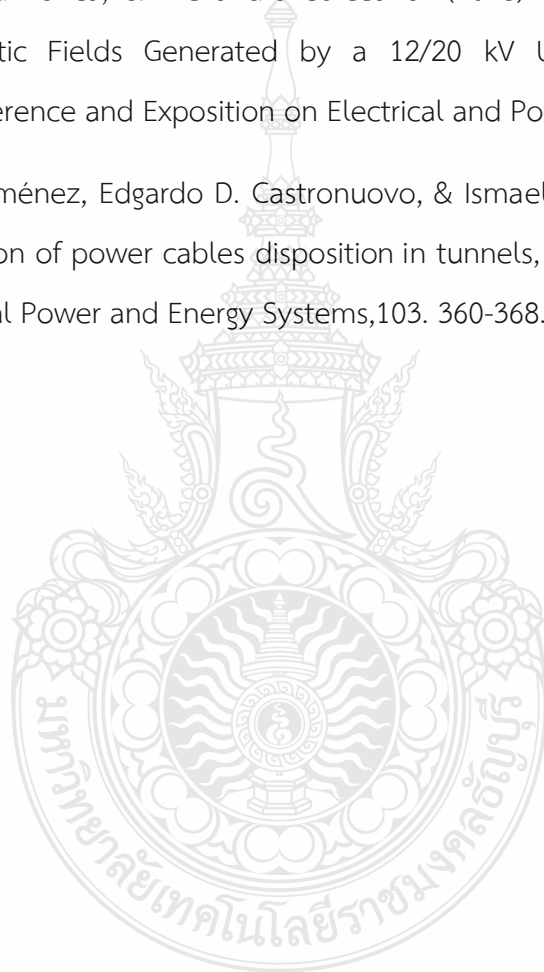
จากการทดลอง การวิเคราะห์ผลจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในบ่อพักสายไฟฟ้า ที่พิกัดแรงดัน 24 kV ของสายส่งไฟฟ้าซึ่งพบว่าผลการวัดผลปฏิบัติงานจริงนั้น ค่อนข้างซับซ้อนและมีอุปสรรคที่ต้อง รอช่วงที่มีการเปิดบ่อพักสายเพื่อลงไปปฏิบัติงานจึงจะทำการวัดค่าปริมาณของสนามแม่เหล็กได้ ส่วนกรณีของการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง รายละเอียดขั้นตอนการใช้โปรแกรมค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นผู้ที่จะใช้โปรแกรมนี้ในการทดลอง หรือวิเคราะห์งานต่อไป ควรศึกษารายละเอียดของโปรแกรมและรายละเอียดของวัสดุต่างๆ ก่อนนำมาวิเคราะห์ผล จะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและรวดเร็ว

บรรณานุกรม

- [1] Raymond A. Serway, & John W. Jewett. (2004). Physics for Scientists and Engineers (6th ed). United States of America: Thomson Brooks.
- [2] นางสาวสุกัญญา ทัพศรี. (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิรอบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- [3] ศรารุฒิ ก่องใจ. (2554). การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคงานวางท่อประปาโดยวิธีดันท่อลอด ของการประปาส่วนภูมิภาค. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [4] Stela D. & Andrei A. (2008). ENVIRONMENTAL FRIENDLY EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR UNDERGROUND CIVIL EXCAVATIONS. In Nicolac Ilias (Ed), Annals of Petrosani University Mechanical Engineering. (pp. 47-52). Romania: University of Petrosani.
- [5] ระบบเคเบิลใต้ดิน. (2548). กรุงเทพฯ: กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย.
- [6] An introduction to pipe jacking and microtunnelling. (2017). United Kingdom: Pipe Jacking Association.
- [7] Zahra Kohankar Kouchesfehiani, Amir Tabesh, & Mohammad Najafi. (2017). RISK IDENTIFICATION FOR PIPELINE INSTALLATION BY HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING. International Congress on Underground Infrastructure, Water Management and Trenchless Technology, 114.
- [8] Horizontal directional drilling with radio control. (2011). Implementation of horizontal bores using HDD directional drilling. Retrieved from <https://www.vilkograd.com/activities/directional-drilling-with-radio-control%E2%80%93hdd-method/horizontal-directional-drilling-with-radio-control/?lang=en>

- [9] นายศรพงษ์ สีแสด และนางสาวจุฬารัตน์ ศรีประทีป. (2562). ศึกษาสนามแม่เหล็กของสายส่งเคเบิลใต้ดิน. (ปริญญาณิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [10] IEEE Power and Energy Society. (2014). IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. USA. New York: IEEE.
- [11] การไฟฟ้านครหลวง. (2551). ความรู้ความเข้าใจ เกี่ยวกับ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้า (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: บริษัท วิสมา เอเชีย จำกัด.
- [12] M.M. Dawoud, I.O. Habiballah, A.S. Farag, & A. Firoz. (1999). Magnetic field management techniques in transmission underground cables. 48.177-192.
- [13] Francisco de Leon. (2005). Calculation of Underground Cable Ampacity. CYME International T&D, 1-6.
- [14] Vitor Malo Machado. (2012). Magnetic Field Mitigation Shielding of Underground Power Cables. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 48(2). 707-710.
- [15] สมคิด ลีลาชนะชัยพงษ์, สลักจิตร นิลบวร, ยูนุช แลมะ และโรชีตี แวญโซะ. (2553). แบบจำลองสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติสำหรับสายส่งใต้ดิน 2 - D Model of Electrostatic Fields for Underground Cable การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 7. 577-584.
- [16] สลักจิตร นิลบวร, สมคิด ลีลาชนะชัยพงษ์ และ กัณตภณ มะหะหมัด. (2554). การศึกษาและวิเคราะห์ความปลอดภัยจากผลกระทบของสนามไฟฟ้าโดยรอบสายส่ง. การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ, 4. 36-40.
- [17] เผด็จ เผ่าละออ และ สุกัญญา ทัทศรี. (2555). การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์ ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- [18] สุริโย บุมิ และ วรณวิทย์ ตั้มทอง. (2557). ผลกระทบของอุปสรรคในงานก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน:กรณีศึกษา โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 24(3). 456-466.

- [19] สมมาตร ขาเกลี้ยง. (2558). โปรแกรมจำลองแบบแผนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางในท่อนาคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้จ็อยไอของแมทแลป. การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ, 8. 31-36.
- [20] Mehrdad Froodi Jahromy, Mohamad Hosein Ostovarzadeh, & Roohalamin ZeinaliDavarani. (2017). Detection of underground power cable route using magneticfield. InternationalConference on Knowledge-Based Engineering andInnovation (KBEI), 4. 533-538.
- [21] Silviu Vornicu, Eduard Lunca, & Alexandru Salceanu. (2018). Computation of the Low Frequency Magnetic Fields Generated by a 12/20 kV Underground Power Line. International Conference and Exposition on Electrical and PowerEngineering, 10. 63633.
- [22] Víctor J. Hernández Jiménez, Edgardo D. Castronuovo, & Ismael Sánchez. (2018). Optimal statistical calculation of power cables disposition in tunnels, forreducing magneticfields and costs. Electrical Power and Energy Systems,103. 360-368.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์



TENMARS

MULTI-FIELD EMF METER

TM-190 User's Manual



CE

B2TM1900001


- Electric field Measurement Precautions: Please perform tests according to the indicated direction  Electric Field SENSOR . Please hold the meter at the bottom of the display, as shown in the figure below:



Fig. 1 Electric Field measurement:

	Magnetic Fields	Electric Field	RF strength
The Green zone	0-10.00mG	0-500V/m	0-0.99mW/m ² ;0-0.59V/m
The Yellow zone	10.01-100mG	501-1000V/m	1-9.99mW/m ² ;0.6-1.9V/m
The Red zone	101-2000mG	>1001V/m	>10mW/m ² ; >2V/m

The color zones are for reference only

- electromagnetic safety reference standard

international 國際的	Council Recommendation 1999/519/EC	42V/m(4.75W/m ²)	59V/m(9.25W/m ²)
international 國際的	ICNIRP Guidelines, April 1998	42V/m(4.75W/m ²)	59V/m(9.25W/m ²)
Austria 奧地利	ONORM S1420	49V/m(6.33W/m ²)	61V/m(10W/m ²)
Belgium 比利時	Belgisch Staatsblad F.2001-1365	21V/m(1.18W/m ²)	30V/m(2.31W/m ²)
Germany 德國	26.Deutsche Verordnung	42V/m(4.75W/m ²)	59V/m(9.25W/m ²)
Italy 意大利	Decreto n.381,1998	20V/m(1W/m ²)	20V/m(1W/m ²)
the netherlands 荷蘭	Health Council	51V/m(6.92W/m ²)	83V/m(18W/m ²)
switzerland 瑞士	Verordnung 1999	4V/m(0.04W/m ²)	6V/m(0.1W/m ²)
united states 美國	IEEE C95.1	49V/m(6.33W/m ²)	68V/m(12W/m ²)
china 中國	Draft: National Quality Technology Monitoring Bureau	49V/m(6.33W/m ²)	61V/m(10W/m ²)
japan 日本	Radio-Radiation Protection Guidelines, 1990	49V/m(6.33W/m ²)	61V/m(10W/m ²)

$$1W/m^2 = 0.1mW/Cm^2 = 100uW/Cm^2. 1mW/m^2 = 0.1uW/Cm^2$$



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่

1. สมชาย ไกรปราบ และคณะ, การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12
The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020
26 - 28 สิงหาคม 2563 ณ โรงแรมรอยัล ซิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

หนังสือรวมบทความวิจัย

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

ระบบควบคุมและการวัด (CT)

พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)

นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (SS)



AUTO DIDACTIC CO., LTD



คณะกรรมการวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

1	รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	ที่ปรึกษา
2	รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	ที่ปรึกษา
3	รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	ประธานกรรมการ
4	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ กุณิกิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	รองประธานกรรมการ
5	รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพนธ์ไพโรจน์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	กรรมการ
6	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
7	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐ ไซดิ รักไทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	กรรมการ
8	รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิน ปิยรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระเบียบกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตติเจ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
12	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยุวดีรัช สว่างเม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
13	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริรัชช บุญปัทสน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
14	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประหยัด กองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
15	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกวิทย์ หัยแก้ว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	กรรมการ
16	รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ถ้ำบ้าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ที่ปรึกษา
2	อาจารย์อัครม ม่วงเขาแดง หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ประธานกรรมการ
3	อาจารย์ธำนิษฐ์ ดวงจันทร์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	รองประธานกรรมการ
4	รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	รองประธานกรรมการ
5	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	กรรมการ
6	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	กรรมการ
7	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมาศกรณ์ อารีย์กุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค ให้อ่องคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นางทิน สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวณ ชูรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุณี ศรีสงคราม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
12	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิ ไกร จันทร์ขามเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	กรรมการ
13	ดร.วีระ ชันยศิริรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	กรรมการ
14	ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
15	ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
16	ดร.ไพวรรณ เกิดตรวจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	กรรมการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

- | | | |
|----|--|---------------------|
| 17 | ดร.กัญญา ช่อมฤต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น | กรรมการ |
| 18 | นายปวิวัติ บุญมา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | กรรมการ |
| 19 | นางสาววราภรณ์ ลือใจ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | กรรมการ |
| 20 | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | กรรมการและเลขานุการ |





คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายวิชาการ

1	รองศาสตราจารย์ ดร.เวศิน ปิยรัตน์	ประธานกรรมการ
2	อาจารย์อาคม ม่วงเขาแดง	รองประธานกรรมการ
3	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรชัย วิริยะสุทธีวงศ์	กรรมการ
4	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยณรงค์ คล้ายมณี	กรรมการ
5	อาจารย์ ดร.ศรีศุภางค์ ทิวสุวรรณ	กรรมการ
6	อาจารย์สุทธิพันธ์ อักษรเนียม	กรรมการ
7	อาจารย์ธิดิพร ประมวน	กรรมการ
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร มาตรา	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาควงศ์ ศรีรมรินทร์	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรภัทร หล่มบุญเรือง	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ ศรีรมรินทร์	กรรมการ
12	อาจารย์ธำนิษฐ์ ดวงจันทร์	กรรมการ
13	อาจารย์นาวี รุจตามพ์	กรรมการ
14	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายสถานที่และประชาสัมพันธ์

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุดนิรันดร์ เพชรรัตน์	ประธานกรรมการ
2	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรภัทร หล่มบุญเรือง	รองประธานกรรมการ
3	อาจารย์ ดร.ศรีศุภางค์ ทิวสุวรรณ	กรรมการ
4	นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบุรณ์	กรรมการ
5	นางธิดา ศรีกงพาน	กรรมการ
6	นายสุกกิจ ขาวเนตร	กรรมการ
7	นายขจรศักดิ์ ศรีกงพาน	กรรมการ
8	นายกนก สุขพูน	กรรมการ
9	นางสาวณานิกา ฤกษ์มหาลิขิต	กรรมการ
10	นายรุ่งโรจน์ ฤกษ์หรรษา	กรรมการ
11	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายจัดหารายได้

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	รองประธานกรรมการ
3	นางสาวมาลี สอนดา	กรรมการ
4	นางสาววันวิสาข์ โกสินทร์	กรรมการ
5	นางสาวอัญชลี เดชอุดม	กรรมการ
6	นางสาววิไล ปรีชา	กรรมการ
7	นางสาวลินดา นิลพัท	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายลงทะเบียน

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	นางสาวยอดแก้ว ผู้ภักดิ์	กรรมการ
4	นางธิดา ศรีกงพาน	กรรมการ
5	นางสาวนิตดา วรพรตกุล	กรรมการ
6	นางสาวณิชชาพัชร พุทธรเมธา	กรรมการ
7	นางสาวอัญชลี เดชอุดม	กรรมการ
8	นางสาวธนิดา ชีรัตน์	กรรมการ
9	อาจารย์ฉัตรพร ประมวน	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายยานพาหนะ

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	นางสาววิไล ปรีชา	กรรมการ
4	นายจำเนียร มนต์ทวี	กรรมการ
5	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายพิธีการ

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ ศรีมรเ็น	ประธานกรรมการ
2	รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล	รองประธานกรรมการ
3	รองศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์	กรรมการ
4	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	กรรมการ
5	อาจารย์ ดร.รักไทย บุรพภาค	กรรมการ
6	อาจารย์ ดร.ปรารถนา ประชานุรักษ์	กรรมการ
7	นางสาวมาลี สอนดา	กรรมการ
8	นางสาวธนิดา ชีรัตน์	กรรมการ
9	นางสาวจันทราภรณ์ พุนดี	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายประเมินผล

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	อาจารย์สุทธิพันธ์ อักษรเนียม	กรรมการ
4	อาจารย์นวี รุจตามพ์	กรรมการ
5	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ



สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณา

ไฟฟ้ากำลัง (PW)	24 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)	7 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	12 บทความ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)	9 บทความ
ระบบควบคุมและการวัด (CT)	6 บทความ
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)	7 บทความ
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)	29 บทความ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)	15 บทความ
หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (SS)	5 บทความ
รวมทั้งสิ้น	114 บทความ





สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน

โรงเรียนนายเรือ	1	บทความ
วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยธนบุรี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยนเรศวร	1	บทความ
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยนครพนม	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่	1	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม	2	บทความ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2	บทความ
มหาวิทยาลัยศิลปากร	2	บทความ
มหาวิทยาลัยสยาม	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	3	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	6	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	7	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	11	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	8	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	6	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	30	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	3	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	4	บทความ

รวมจำนวนสถาบันที่ร่วมนำเสนอบทความ 27 สถาบัน

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดิน 24 เควี ชนิดสาย XLPE ขนาด 400 ตร.มม.

Analysis of Electro Magnetic Fields in an Electrical Manhole of the 24 kV, 400 Sq. mm. XLPE Underground Cable

สมชาย ไกรปราบ^{1*}, อุทธิชัย ราชเป็น¹, ยุทธธนา คงจีน², ชานนท์ ชูพจน์² และ บุญยงค์ ปลั่งกลาง¹¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Email: somchai_k@mail.rmutt.ac.th, *boonyang.p@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดินในบ่อพักสายในระบบจำหน่าย ซึ่งจากการติดตั้งสายของระบบไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงที่ระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์ ที่พิจารณาใช้สายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE เป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน บ่อพักสายจะมีการติดตั้งสายเพิ่มเดิมเข้าไปในท่อร้อยสายเดิม ในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายไฟฟ้าในบ่อพักสาย ที่มีสายส่งไฟฟ้าเดิมอยู่แล้ว และมีการเพิ่มสายส่งที่มีการติดตั้งตามมาตรฐานการติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) จุดประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องลงไปปฏิบัติงานในบ่อพักสายที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ปริมาณของสนามแม่เหล็กในบ่อพักสายไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า ปริมาณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อบุคคลหรือผู้ปฏิบัติงานที่ลงไปทำงานในบ่อพักสายไฟฟ้า

คำสำคัญ: สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานไฟฟ้า

Abstract

This paper presents an analysis of the electromagnetic field of the underground electrical feeder line in the manholes in the distribution system. According to the installation of the underground cable system of the Metropolitan Electricity Authority at a voltage of 24 kilovolts, consider using Cross-Link Polyethylene (XLPE) insulated copper cable as the underground electrical wire. Manholes are equipped with an additional feeder cable into the original conduit. In this article, will analyze the electromagnetic field of the electric feed line in the manholes with the original power transmission lines and there is an additional transmission line installed according to the installation standards of the Metropolitan Electricity Authority (MEA). The

objective is to analyze the safety of the operators that will have to work in the manholes with continuous electricity distribution. The result of using a computer program to analyze the amount of magnetic fields in electrical manholes. It can be seen that the amount of the electromagnetic field is safe for people or workers who work in electrical manholes.

Key words: Electromagnetic field, underground electrical system, Safety in electrical system operation

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการขยายตัวของเมืองใหญ่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วตามนโยบายภาครัฐบาลที่มีความต้องการขยายความเจริญออกนอกเมืองศูนย์กลาง ดังจะเห็นได้จากโครงการที่ภาครัฐบาลเร่งดำเนินการต่างๆ เช่น โครงการรถไฟฟ้าและรถไฟความเร็วสูง โครงการปรับปรุงสนามบิน เป็นต้น ประกอบกับเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องทำให้ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนของประชากร และการขยายตัวของเศรษฐกิจในช่วงต้นปี ประเทศไทยอยู่ในช่วงที่ชุมชนเมืองกำลังเติบโตตามระบบสาธารณูปโภคที่รัฐบาลวางแผนไว้ ซึ่งการจัดเตรียมแหล่งงานในเขตเมืองใหญ่นั้นมีความจำเป็นอย่างมาก[1]

ในอดีตมีการเดินระบบการส่งจ่ายแบบเหนื่อศีรษะ แต่ด้วยในปัจจุบันการไฟฟ้าต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือและทัศนียภาพที่ดีและมีความสวยงามของเมืองทำให้ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบใต้ดิน ด้วยเหตุนี้ทางการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) จึงมีนโยบายให้มีการเปลี่ยนสายเหนื่อศีรษะเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน[2-4] งานระบบไฟฟ้านั้น ต้องติดตั้งให้ถูกต้องตามหลักการทางวิศวกรรมเพื่อเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นได้หากไม่ติดตั้งให้ถูกต้องตามหลักและวิธีการที่ถูกต้อง จากข้อมูลในเบื้องต้นจะพบว่าการวิเคราะห์ในส่วนของการจัดเรียงสายไฟฟ้าใต้ดิน วิธีการติดตั้งท่อร้อยไฟฟ้าด้วยวิธีการดันท่อ (Pipe jacking) นั้นมีความสำคัญและจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาในผลกระทบด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับรูปในการ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12

The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020)

PW-18

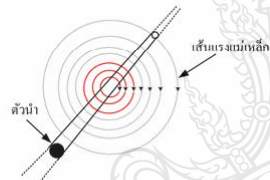


วิเคราะห์สนามแม่เหล็กของการติดตั้งสายบ่อนไฟฟ้าใต้ดิน ปัจจุบันก็ได้รับความนิยมนิ่งในระหว่างการติดตั้งนั้น จะมีสายบ่อนไฟฟ้าเดิมอยู่ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตลอดเวลาเพื่อความปลอดภัยของผู้ที่จะลงไปปฏิบัติงานเพื่อติดตั้งสายบ่อนไฟฟ้าเพิ่มเติม การจำลองผลของสนามแม่เหล็กก็เป็นการวิเคราะห์ในเมืองขึ้นก่อนลงไปวัดค่าจริงและลงไปปฏิบัติงานในบ่อพักสายได้อย่างดี

ดังนั้นการวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของการจัดเรียงวางสายของสายบ่อนไฟฟ้าใต้ดิน ในบ่อพักสายที่มีการจัดเรียงสายบ่อนไฟฟ้าใต้ดินจำนวนหลายชุด เพิ่มเติมเข้าไปภายในบ่อพักสายสายเดิม ซึ่งมีแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายบ่อน ขนาดแรงดัน 24 kV และศึกษาอุปมาของสนามแม่เหล็กที่กักกระแสต่างกัน เพื่อความปลอดภัยของผู้ที่จะลงไปปฏิบัติงานในบ่อพักสายนั้นๆ ตามลำดับดังนี้

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

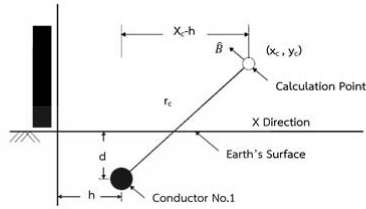
ในปี ค.ศ. 1820 ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) ศาสตราจารย์ทางปรัชญาธรรมชาติในกรุงโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก ได้ทำการทดลองและได้ค้นพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆตัวนำดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆตัวนำเมื่อ

มีกระแสไหลผ่าน [5]

การพิจารณาเทอมของสนามแม่เหล็กโดยทั่วไปนั้นหมายถึง ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ H มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) และความหนาแน่น เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ B มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square meter : Wb/m^2) หรือ เทสลา (Tesla : T) ในระบบ SI Unit หรือเกาส์ (Gauss : G) ในระบบ Gaussian Unit (CGS) โดยค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $1 Wb/m^2 = 1 Tesla = 10,000 Gauss$ สำหรับสนามแม่เหล็กจากระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณในระดับหน่วยขนาดเล็กซึ่งจะวัดกันในหน่วยของ ไมโครเทสลา (μT) หรือ มิลลิเกาส์ (mG) โดย $1 \mu Tesla = 10 mG$ ซึ่งในการวัดค่าทางภาคสนามและค่าการจำลองต้องพิจารณาให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน



รูปที่ 2 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของสายตัวนำ[6]

จากรูปที่ 2 จะพบว่าค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประมาณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้ [5]

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \left(wb / m^2 \right) \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

μ_0 คือ ค่าความซึมขับสนามแม่เหล็กของอากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7} m/H$

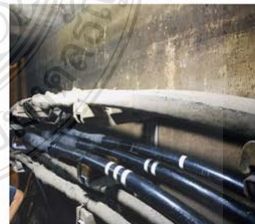
H คือ สนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

a คือ ระยะห่างจากตัวนำสายเคเบิลใต้ดินที่การพิจารณาระยะจาก r_c ที่ระดับความลึกใต้ดิน d หน่วยเป็น เมตร (m)

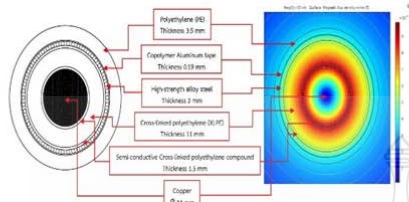
I คือ กระแสที่ไหลในสาย หน่วยเป็น แอมป์ (A)

3.วิธีการดำเนินการและผลการจำลอง

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายบ่อนไฟฟ้าใต้ดินที่ระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์ในบ่อพักสายบ่อนไฟฟ้าใต้ดิน ในระบบจำหน่ายของงานจริงและทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปประกอบการศึกษา โดยรูปแบบการติดตั้งจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 การติดตั้งสาย XLPE 24 kV จริงในบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

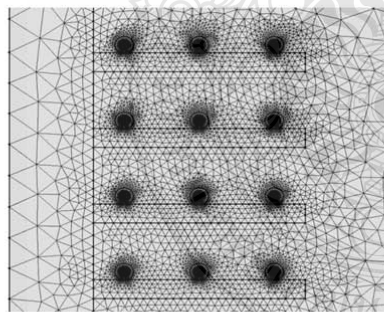


รูปที่ 4 ภาพตัดขวาง XLPE Cable 24 kV.

รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบโดยรวมของสายไฟฟ้า XLPE แรงดันไฟฟ้า 24 kV ของการติดตั้งจริงในบ่อพักสายใต้ดินและได้นำไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปในการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการติดตั้ง 4 ชั้น ระยะห่าง 0.7 ม. ด้วยการจัดเรียงเฟสเริ่มจากซ้ายไปขวามีเริ่มจากเฟส C ไป เฟส A ระยะห่าง 0.2 ม. ตามลำดับ (โดยประมาณ)



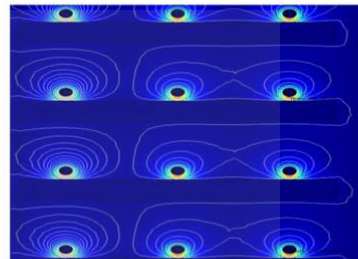
รูปที่ 5 Section XLPE Cable 24 kV. (ภาพจริง)



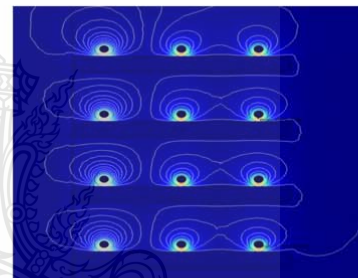
รูปที่ 6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Finite Element

จากรูปที่ 6 การจำลองด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นพบว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบตัวนำและมีการกระจายในสายป้อนแต่

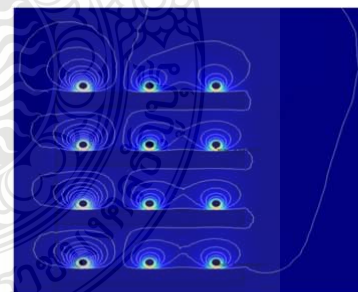
ละเฟสและแต่ละชุดของสายป้อน และจะพบว่าความเข้มของสนามไฟฟ้า จะเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณด้านล่างของสายตัวนำที่ติดกับฐานรองรับ หรือ หัวลอคดังรูปที่นำเสนอ



รูปที่ 7 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้า 100 A. พิกัด แรงดันไฟฟ้า 24 kV



รูปที่ 8 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้า 400 A. พิกัด แรงดันไฟฟ้า 24 kV



รูปที่ 9 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้า 800 A. พิกัด แรงดันไฟฟ้า 24 kV

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12

The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020)

PW-18



จากรูปที่ 7 ถึง 9 จะพบว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสายตัวนำ XLPE ที่ทำการจำลองซึ่งผลดังกล่าวช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทราบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาต้องนำมาพิจารณาประกอบการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม

Finite Element							
พิกัดกระแสไหล (A)	100	200	300	400	500	600	700
ค่าต่ำสุด (mG)	2.41	4.83	7.25	9.67	1.2	1.45	1.69
ค่าสูงสุด (mG)	80.65	161.31	241.96	322.62	403.27	483.93	564.58

จากรูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปจากบ่อพักสาย XLPE ได้คืนที่การเปลี่ยนแปลงกระแสของไหลที่เกิดขึ้นโดยสามารถแสดงผลในค่าสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่าในแต่ละช่วงกระแสไหลค่าสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีค่าจาก 80.65 mG จนถึง 564.58 mG ในขณะที่ในช่วงการเพิ่มขึ้นของไหลที่ค่าสูงสุดการเพิ่มขึ้นจะไม่เป็นแบบเชิงเส้นจะเกิดค่าสูงสุดในช่วง 300 – 400 A และจะมีค่าน้อยกว่าช่วงที่มีกระแสไหลต่ำ

4.บทสรุป

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงนั้น จะพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีกระแสใช้งานไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าใต้ดินในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณของสนามแม่เหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกันและจุดที่มันเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณกระแสเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จำลองได้นั้น ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อบุคคลหรือผู้ที่เข้าไปปฏิบัติงานได้ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ ต่อผู้เข้าปฏิบัติงานทั้งระยะสั้นและระยะยาวภายในบ่อพักสาย จากข้อมูลการศึกษาด้วยการจำลองนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

[1] แผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติฉบับที่ 12 พ.ศ. 2562-2564.

- [2] Metropolitan Electricity Authority, "Configuration and Circuit Arrangement 30 Duct in Jacking Pipe ID 1.8 m. ", DWG. NO. 10A4-0708.
- [3] Metropolitan Electricity Authority, "Manhole Type A/J (Typical) for Underground Construction (Pipe Jacking Method)", DWG. NO. UG-2-050.
- [4] Metropolitan Electricity Authority, "Conduit Steel Spacer for Pipe - Jacking Construction", DWG. NO. 10A4-0885
- [5] มงคล ทองสงคราม "การส่งจ่ายระบบไฟฟ้า," พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : บริษัทรามการพิมพ์จำกัด, 2548.
- [6] Earle C.(Rusty) Bascom, 2016."Technical Considerations for Applying Trenchless Technology Method to Underground Power Cables". III, Senior Member, Electrical Consulting Engineers, P.C. Schenectady, New York, Unites States.
- [7] การไฟฟ้านครหลวง ฝ่ายบริหารโครงการ "ข้อกำหนดมาตรฐาน การก่อสร้างบ่อพักและท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน"



นาย โครปราบ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มทร.ธัญบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มทร.ธัญบุรี งานวิจัยสนใจ ระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน และการออกแบบระบบไฟฟ้า



ดร.ชวณัฐพงษ์ ปลั่งกลาง สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก University of Kassel, Germany ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พลังงานทดแทนและระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสมชาย ไกรปราบ
วัน เดือน ปีเกิด 7 พฤศจิกายน 2521
ที่อยู่ 78/385 ซอยเพชรเกษม 106 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม
จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10160
การศึกษา ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน กรรมการผู้จัดการ
บริษัท เอสซีเค(2011)อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด
พ.ศ.2553 ถึง ปัจจุบัน
วิชาชีพ สามัญวิศวกร สาขาไฟฟ้ากำลัง (สฟก.5889)
เบอร์โทรศัพท์ 08-5213-5878
อีเมล Somchai.kriprab@gmail.com

