



เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

LOW - FREQUENCY MAGNETIC FIELD MITIGATION TECHNIQUES IN UNDERGROUND

POWER SYSTEMS



ศุกลพวรรษ ล่ามกิจจา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2566

เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

LOW - FREQUENCY MAGNETIC FIELD MITIGATION TECHNIQUES IN UNDERGROUND
POWER SYSTEMS



SUKALAPHAT LAMKITJA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์
เรื่อง
เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน
ของ
ศุภลพรพรช ล่ามกิจจา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์) (ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิตร์ มาตรา)

ชื่อเรื่อง	เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน
ผู้วิจัย	ศุภลพรรษ ล่ามกิจจา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิโรเศรษฐ์

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบและผลการจำลองเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย ซึ่งเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) โดยใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้าานครหลวง 3 เฟส 1 วงจร ที่ระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ เป็นกรณีศึกษา สามารถแบ่งการศึกษาได้เป็น 2 รูปแบบตามลักษณะการจัดวางสายส่ง ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การจัดวางสายส่งแบบ best case ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดวางสายส่งห่างกับจุดพิจารณาและทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุด และรูปแบบที่ 2 การจัดวางสายส่งแบบ worst case เป็นรูปแบบการวางสายส่งใกล้กับจุดที่พิจารณาและทำให้สนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุด สำหรับแนวทางการออกแบบจะคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูปตัวนำ คำนวณหาความหนาของแผ่นชีลด์ทั้งสองชนิด และจำลองผลการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) สำหรับการจัดวางสายแบบ best case นั้น เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เทคนิค สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่า 10 ไมโครเทสลา (ค่าสนามแม่เหล็กอ้างอิงจากประเทศอิตาลี) โดยลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงให้ผลการลดทอนดีที่สุด สามารถลดค่าสนามแม่เหล็กจาก 12.86 ไมโครเทสลา (ค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน) เป็น 6.43 ไมโครเทสลา ส่วนการจัดวางสายแบบ worst case ทั้ง 3 เทคนิคไม่สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่า 10 ไมโครเทสลา โดยชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมให้ผลการลดทอนดีที่สุด สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กจาก 20.03 ไมโครเทสลา (ค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน) เป็น 12.03 ไมโครเทสลา อย่างไรก็ตาม ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของลูปและชีลด์ที่กำหนดให้เท่ากับขนาดของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ซึ่งนอกจากขนาดของลูปและชีลด์ที่ส่งผลกระทบต่อลดทอนแล้ว ความหนา วัสดุที่ใช้ และตำแหน่งก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลดทอนสนามแม่เหล็กเช่นกัน สุดท้ายนี้งานวิจัยนี้ได้มีการประมาณค่าใช้จ่ายสำหรับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแต่ละเทคนิค โดยการนำลูปตัวนำเป็นแนวทางที่แนะนำสำหรับการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

คำสำคัญ : ชีลด์ตัวนำ, ชีลด์เฟอร์โรแมกเนติก, ลูปตัวนำ, ลดทอนสนามแม่เหล็ก, ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

Title	LOW - FREQUENCY MAGNETIC FIELD MITIGATION TECHNIQUES IN UNDERGROUND POWER SYSTEMS
Author	SUKALAPHAT LAMKITJA
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Associate Professor Doctor Vuttipon Tarateeraseth

This research presents design techniques and simulation results for mitigating magnetic fields generated by an underground power transmission system constructed in Thailand. The magnetic field mitigation techniques consist of a conductive loop, a conductive shield, and a ferromagnetic shield. This study used a three-phase underground power system of the Metropolitan Electricity Authority (MEA) at 69 kV for the case study. The case study can be separated into two types by the conductor layout, the best-case conductor layout (the conductors lie far from the observation point and generate the lowest magnetic fields) and the worst-case conductor layout (conductors lie near the observation point and generate the highest magnetic fields). The design process of this research involves calculating the dimension of the conductive loop, calculating the thickness of both shields and using the Finite Element Method Magnetics (FEMM) to simulate magnetic field mitigation results. For the best-case conductor layout, all mitigation techniques can attenuate the magnetic fields to be lower than 10 microteslas (Italian standard). In this case, the copper loop gives the most attenuation result. It can attenuate the magnetic field from 12.86 (before applying mitigation techniques) to 6.43 microteslas. For the worst-case conductor layout, all mitigation techniques cannot attenuate the magnetic fields, lower than 10 microteslas. In this case, the aluminum shield gave the highest attenuation. It can attenuate the magnetic field from 20.03 (before applying mitigation techniques) to 12.03 microteslas. However, the mitigation results of this research are limited by the dimensions of the loop and shield. Its dimensions are equal to the duct bank. It is not only the dimensions of the loop and shield affect the magnetic field mitigation results, but also the thickness, the materials, and the position. Finally, the cost of each mitigation technique is estimated. It can be concluded that using the aluminum conductive loop is recommended.

Keyword : Conductive loop, Conductive shield, Ferromagnetic shield, Magnetic field mitigation, Underground power system

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี โดยได้รับความกรุณาอย่างสูง จาก รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ แนวทาง รวมถึงข้อเสนอแนะจนเกิดผลสำเร็จงาน อีกทั้งยังเป็นผู้ชี้แนะให้ผู้วิจัยมีทักษะการคิด วิเคราะห์อย่างเป็นระบบ แก้ปัญหาด้วยเหตุผล ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยตระหนักเป็นอย่างยิ่งถึงความตั้งใจ ความเอาใจใส่ และความหวังดีของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอย ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้เสมอ รวมถึง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ และทุนสนับสนุนการเข้าร่วมประชุมและนำเสนอผลงานของนิสิตบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ซึ่งเป็นทุนที่เปิดโอกาสทางการศึกษาและ สนับสนุนให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวที่เห็นความสำคัญของการศึกษาในทุก ๆ ระดับ และยังคงเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ คอยสนับสนุนให้ทำในสิ่งที่รักและชอบ สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดชอบและยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำ จากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ศุกลพรรณ ล่ำมกิจจา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	5
2.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย	17
2.2.1 แบบเปิดหน้าดิน.....	18
2.1.2 แบบไม่เปิดหน้าดิน (no dig)	18
2.3 สนามแม่เหล็ก (magnetic field).....	21
2.4 ความลึกผิว (skin depth)	24
2.5 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน	25

2.6 ผลกระทบและค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็ก	27
2.7 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบ extrinsic techniques.....	27
2.7.1 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)	28
2.7.2 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield).....	30
2.7.3 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield).....	33
2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method)	35
บทที่ 3	36
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	36
3.2 การออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop).....	41
3.2.1 การออกแบบลูปตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ best case	42
3.2.2 การออกแบบลูปตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case.....	42
3.3 การออกแบบเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield)	43
3.3.1 การออกแบบชีลด์ตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ best case	44
3.3.2 การออกแบบชีลด์ตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case.....	45
3.4 การออกแบบเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield).....	47
3.4.1 การออกแบบชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กสำหรับการจัดวางสายแบบ best case... ..	48
3.4.2 การออกแบบชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case .	49
3.5 การจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)	51
3.5.1 การจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ (conductive loop).....	51
3.5.2 การจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield).....	53

บทที่ 4.....	55
ผลการดำเนินงาน.....	55
4.1 การจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเมื่อจัดวางสายแบบ best case	55
4.1.1 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนเมื่อจัดวางสายแบบ best case.....	55
4.1.2 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยรูปตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ best case.....	56
4.1.3 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ เมื่อจัดเรียงวางแบบ best case.....	58
4.1.4 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ best case.....	59
4.1.5 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยรูปตัวนำ ชีลด์ตัวนำ และชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ best case	60
4.2 การจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเมื่อจัดวางสายแบบ worst case	62
4.2.1 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนเมื่อจัดวางสายแบบ worst case	62
4.2.2 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยรูปตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ worst case.....	62
4.2.3 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ worst case.....	64
4.2.4 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ worst case	65
4.2.5 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยรูปตัวนำ ชีลด์ตัวนำ และชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ worst case	66
บทที่ 5.....	68

สรุปผล	68
5.1 สรุปผล.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
บรรณานุกรม	72
ประวัติผู้เขียน.....	75



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 รูปแบบการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน (16).....	17
ตาราง 2 ข้อดีและข้อเสียของการก่อสร้างแบบเปิดหน้าดิน (16).....	19
ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการก่อสร้างรูปแบบไม่เปิดหน้าดิน (17).....	20
ตาราง 4 ค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็ก (7).....	27
ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับจำลองรูปตัวนำในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)	51
ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับจำลองในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) กรณี worst case	53
ตาราง 7 ประสิทธิภาพการชี้ลัดเมื่อจัดวางสายแบบ best case	61
ตาราง 8 ประสิทธิภาพการชี้ลัดเมื่อจัดวางสายแบบ worst case.....	67
ตาราง 9 ประมาณการต้นทุนการก่อสร้างเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็ก	70

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ตำแหน่งการจัดวางสายส่งแบบ 1 วงจร ในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank)	10
ภาพประกอบ 2 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 1	11
ภาพประกอบ 3 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 2	11
ภาพประกอบ 4 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 3	11
ภาพประกอบ 5 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 4	12
ภาพประกอบ 6 ทิศทางของสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา	22
ภาพประกอบ 7 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุด P เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสายตัวนำ เส้นตรง.....	23
ภาพประกอบ 8 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ที่วางสายแบบ flat formation.....	25
ภาพประกอบ 9 เทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)	28
ภาพประกอบ 10 ไดอะแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ	29
ภาพประกอบ 11 เทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield)	30
ภาพประกอบ 12 ไดอะแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กสำหรับเทคนิคการลดทอน ด้วยชีลด์ ตัวนำและชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก	31
ภาพประกอบ 13 เทคนิคการลดทอนด้วยวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)	34
ภาพประกอบ 14 ไดอะแกรมกรณีศึกษาสำหรับการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก (ก) best case และ (ข) worst case.....	38
ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการทำงานของงานวิจัย	40
ภาพประกอบ 16 ไดอะแกรมจำลองการลดทอนด้วยลูปตัวนำโดยวางบนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) (ก) best case และ (ข) worst case.....	41

ภาพประกอบ 17 ไดอะแกรมการจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (อลูมิเนียม)..... 43

ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมการจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (steel100) โดยวางบนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) (ก) best case และ (ข) worst case 47

ภาพประกอบ 19 ตัวอย่างการจำลองลู่อลูมิเนียมเมื่อจัดวางสายส่งแบบ best case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) 52

ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างการจำลองลู่อลูมิเนียมเมื่อจัดวางสายส่งแบบ worst case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) 52

ภาพประกอบ 21 ตัวอย่างการจำลองชีลด์ steel100 เมื่อจัดวางสายส่งแบบ best case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) 54

ภาพประกอบ 22 ตัวอย่างการจำลองชีลด์ steel100 เมื่อจัดวางสายส่งแบบ worst case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) 54

ภาพประกอบ 23 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนกรณี best case 56

ภาพประกอบ 24 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็ก (best case) เมื่อลดทอนด้วย (ก) ลู่อลูมิเนียม (ข) ลู่อทองแดง 57

ภาพประกอบ 25 ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กกรณี best case สำหรับชีลด์อลูมิเนียม 58

ภาพประกอบ 26 ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กกรณี best case สำหรับชีลด์ steel100 59

ภาพประกอบ 27 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี best case 60

ภาพประกอบ 28 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนกรณี worst case 62

ภาพประกอบ 29 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case เมื่อลดทอนด้วย (ก) ลู่อลูมิเนียม (ข) ลู่อทองแดง 63

ภาพประกอบ 30 ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case สำหรับชีลด์อลูมิเนียม 64

ภาพประกอบ 31 ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case สำหรับชีลด์ steel100 65

ภาพประกอบ 32 เปรียบเทียบผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case 66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากวิสัยทัศน์เชิงนโยบายของรัฐบาลที่ต้องการผลักดันให้ประเทศไทยขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมรวมถึงเป้าหมายการเป็นมหานครอัจฉริยะ (smart metro) โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะช่วยสนับสนุนให้นโยบายดังกล่าวสำเร็จลุล่วงได้ คือ ระบบไฟฟ้าในประเทศต้องมีความมั่นคงและเชื่อถือได้ อีกทั้งจำนวนประชากรและการพัฒนาเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้นบริเวณเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร ภูเก็ต นครราชสีมา เป็นต้น ส่งผลให้ความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังแบบเหนือดิน (overhead transmission line system) เพิ่มนั้นจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการจำหน่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าได้ แต่การก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังเหนือดินมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น พื้นที่การก่อสร้างค่อนข้างมาก ต้องมีระยะความปลอดภัย บดบังทัศนียภาพ เนื่องจากสายไฟและสายสื่อสารที่พาดอย่างระโยงระยางค์ และที่สำคัญปัญหาอุบัติเหตุทางจราจร เช่น รถชนเสาไฟฟ้าก็เกิดขึ้นค่อนข้างบ่อย โดยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนส่งผลต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าโดยตรง (1) ดังนั้น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จึงได้ปรับแผนการพัฒนาระบบไฟฟ้า โดยก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน (underground power system) ทดแทนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังเหนือดิน โดยมีเงื่อนไขในการเลือกพื้นที่ก่อสร้าง คือ เลือกพื้นที่การก่อสร้างบริเวณแหล่งเศรษฐกิจ การคมนาคมขนส่ง รวมถึงแหล่งอสังหาริมทรัพย์ที่มีแนวโน้มจะมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และถึงแม้ว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ลดการเกิดอุบัติเหตุทางจราจร แก้ปัญหาการกีดขวางทัศนียภาพและพื้นที่สีเขียว แต่การติดตั้งสายส่งไฟฟ้าใต้ดินนั้นกลับมีระยะห่างระหว่างสายส่งกับมนุษย์น้อยกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบส่งจ่ายกำลังแบบเหนือดิน (2) และสายส่งดังกล่าวจัดเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ (low frequency magnetic field) โดยค่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายส่งกับจุดที่พิจารณานั้นลดลง นอกจากนี้ค่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำจะรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือ เทคโนโลยีต่าง ๆ แล้ว ยังส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพของผู้สัมผัส หลายงานวิจัยพบว่าสนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในสมอง การเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวหรือลูคีเมียในเด็ก รวมถึงส่งผล

ต่อสุขภาพในระยะยาว (3) จึงเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จำเป็นต้องให้ความสำคัญในการวางแผนเพื่อป้องกันและลดทอนค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวให้มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สำหรับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ intrinsic technique และ extrinsic technique (4) ทั้งสองเทคนิคมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจใน intrinsic technique โดยทำการศึกษาเพื่อใช้สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ซึ่งมีข้อดี คือ ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ภายนอกเสริมเข้ามาในระบบการลดทอน แต่เป็นการจัดการกับสิ่งที่มีอยู่เดิม เช่น การสลับเฟสของสายส่ง การเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางสายส่งจาก flat formation เป็น trefoil formation เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดในจำนวนรูปแบบของการจัดเรียง หรือรูปแบบของการจัดวางสายส่ง ทำให้สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ถึงค่า ๆ หนึ่งเท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการลดทอนแบบ extrinsic technique เข้ามาช่วย โดย extrinsic technique สามารถแบ่งย่อยได้เป็น active technique และ passive technique แม้ว่า active technique จะได้เปรียบในเรื่องของการควบคุมค่ากระแสเหนี่ยวนำให้มีค่าตามที่คำนวณได้ แต่กลับเสียเปรียบในเรื่องของความยุ่งยากและซับซ้อนของระบบควบคุม รวมถึงต้นทุนการก่อสร้างเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นด้วย (1)

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำด้วยเทคนิคการลดทอนแบบพาสซีฟ (passive technique) ได้แก่ การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงระดับแรงดัน 69 kV 3 เฟส สายส่งวางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 ฝังอยู่ใต้ดินที่มีความลึก 0.75 เมตร โดยจำลองผลสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) สำหรับปริญญาโทฉบับนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 บท โดยบทที่ 1 นี้ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้ สำหรับบทที่ 2 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย บทที่ 4 แสดงผลการดำเนินงานวิจัย และบทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กและปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

1.2.2 เพื่อออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กให้สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของการชีลด์สำหรับการลดทอนสนามแม่เหล็กแต่ละเทคนิค

1.2.4 เพื่อเสนอแนวทางการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย โดยใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงที่ระดับแรงดัน 69 kV 3 เฟส สายส่งวางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 เป็นกรณีศึกษา

1.3.2 ศึกษาเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบพาสซีฟ (passive technique) ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดทอนสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และความซาบซึมได้ของวัสดุ (permeability)

1.3.4 ออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) ให้สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ICNIRP และต่ำกว่า 10 μT

1.3.5 จำลองพฤติกรรมกรรมการลดทอนสนามแม่เหล็กโดยใช้ Finite Element Method Magnetics (FEMM)

1.3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการชีลด์ของลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับแนวทางการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เหมาะสมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทยที่สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ ICNIRP และต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$



บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม รูปแบบการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ทฤษฎีสสนามแม่เหล็ก ค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อผู้สัมผัส และเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

ตามที่ได้กล่าวถึงสาเหตุของปัญหาและความสำคัญไปข้างต้น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการจำหน่ายไฟฟ้าให้กับประชาชนกำลังดำเนินการเปลี่ยนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับ กฟน. ได้มีแผนการดำเนินการเปลี่ยนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าให้สามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคตซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรและการเติบโตของเศรษฐกิจในเมืองใหญ่ ซึ่ง กฟน. ได้วางแผนในการเลือกพื้นที่ก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินโดยคำนึงถึงประโยชน์สูงสุดเป็นสำคัญ ดังนั้น กฟน. จึงพิจารณาพื้นที่ก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าบริเวณถนนสายหลักที่ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เช่น ถนนราชปรารภ ถนนเพลินจิต ถนนวิฑู ถนนวิภาวดี เป็นต้น และในขณะเดียวกัน กฟภ. ซึ่งมีหน้าที่ดูแลระบบจำหน่ายครอบคลุมพื้นที่ต่างจังหวัดทั่วประเทศ ยกเว้น กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ และนนทบุรี ก็มีแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในเมืองใหญ่โดยก่อสร้าง ปรับปรุง พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อเพิ่มความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เช่นเดียวกับ กฟน. โดย กฟภ. อยู่ระหว่างดำเนินโครงการ 1 จังหวัด 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ยกตัวอย่างเช่น การก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินในเขตเมืองเก่าและรอบคูเมืองเชียงใหม่ เพื่อเพิ่มความสวยงามในฐานะเมืองท่องเที่ยวและเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณโดยรอบ ไม่เพียงแต่จังหวัดเชียงใหม่เท่านั้น กฟภ. กำลังขยายเขตและพัฒนาก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินอย่างต่อเนื่อง เช่น จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดภูเก็ต จังหวัดนครนายก เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเป็นใต้ดินมีข้อดี คือ ลดปัญหาและอุปสรรค

ด้านการปฏิบัติการและบำรุงรักษา ระบบไฟฟ้ามีความปลอดภัย และภูมิทัศน์สวยงาม อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินไม่ได้มีเพียงข้อดีอย่างเดียว การก่อสร้างดังกล่าวก็มีข้อเสียเช่นกัน และเป็นข้อเสียที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ด้วย

V. Malo' Machado, M. E. Almeida and M. Guerreiro das Neves (2) ได้ศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินวงจรเดียว ขนาด 400 kV จัดเรียงสายแบบ flat formation โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่มีความแม่นยำ (magnetic field accurate model) เปรียบเทียบกับการคำนวณหาสนามแม่เหล็กแบบทั่วไป (standard field evaluation) ซึ่งจุดประสงค์ของการศึกษาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีระยะห่างระหว่างสายส่งกับมนุษย์น้อยกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกัน สายส่งดังกล่าวจัดเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ (low frequency magnetic field) และค่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายส่งกับจุดพิจารณานั้นลดลง

คณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันรังสีที่ไม่ทำให้เกิดไอออน (International Commission on Non - Ionizing Radiation Protection: ICNIRP) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยระบุว่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงต่อสารเคมีในสมอง และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบในระยะยาวพบว่า มีความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวหรือลูคีเมียในเด็ก เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว ICNIRP จึงได้กำหนดค่าสนามแม่เหล็กที่ยอมรับได้ หรือ reference level คือ 200 μT สำหรับที่สาธารณะ และ 1,000 μT สำหรับสถานประกอบการ (5) อย่างไรก็ตาม สหภาพยุโรป (European Union: EU) คำนึงถึงผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพของมนุษย์เป็นสำคัญ จึงได้แนะนำ recommended level ที่มีค่าต่ำกว่า ICNIRP กำหนด และยิ่งไปกว่านั้นหลาย ๆ ประเทศในทวีปยุโรปได้มีการกำหนดค่าสนามแม่เหล็กโดยเฉพาะเจาะจงเป็นรายการกรณีมากขึ้น เช่น ประเทศอิตาลีระบุว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่สาธารณะใกล้กับโรงเรียน บ้านพักอาศัย สนามเด็กเล่น หรือสถานที่อื่น ๆ ที่ประชาชนอยู่อาศัยมากกว่า 4 ชั่วโมง จะต้องควบคุมค่าสนามแม่เหล็กให้ต่ำกว่า 3 μT ในกรณีการสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขึ้นใหม่ และกำหนดให้ควบคุมสนามแม่เหล็กต่ำกว่า 10 μT สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ก่อสร้างและใช้งานอยู่ในปัจจุบัน (6) ส่วนประเทศไทย กฟน. ได้ศึกษาค่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ซึ่งพบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้นั้นอยู่ระหว่าง 0.1 - 10 μT ใต้แนวสาย สำหรับสายส่งระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV เสาสูง 20 เมตร สนามแม่เหล็กมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง

2 μT สำหรับสายส่งระดับแรงดัน 12 - 24 kV เสาสูง 12 เมตร และสนามแม่เหล็กมีค่า 0.1 ถึง 1 μT ใต้แนวสาย สำหรับสายส่งแรงต่ำระดับแรงดัน 200/380 V เสาสูง 8 เมตร ซึ่งจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กไม่สูงมากนัก แต่ความสูงของสายส่งแตกต่างจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินค่อนข้างมาก ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินย่อมมีค่ามากกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ทั้งนี้ ประเทศไทยได้กำหนดระดับของสนามแม่เหล็กให้สอดคล้องกับ ICNIRP และ WHO โดยกำหนดค่าสนามแม่เหล็กไว้ที่ 500 μT สำหรับสถานประกอบการหรือผู้ที่ต้องปฏิบัติงานเกี่ยวข้อง ซึ่งโดยปกติจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันในระดับหนึ่ง และ 100 μT สำหรับสถานที่สาธารณะ เช่น สนามเด็กเล่น โรงเรียน แหล่งที่อยู่อาศัย เป็นต้น (7)

การลดผลกระทบของสนามแม่เหล็กต่อสุขภาพเป็นสิ่งที่สำคัญและละเลยไม่ได้ โดยทั่วไปแล้ว เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ intrinsic techniques และ extrinsic techniques (4) โดย intrinsic techniques เป็นการจัดการกับโครงสร้างในเชิงเรขาคณิตและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กซึ่งในที่นี้หมายถึงสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับวิธีการลดทอนแบบ intrinsic techniques ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การจัดวางสายส่ง (layout and compaction) การจัดการระยะห่างระหว่างสายส่ง (distance management) การแบ่งเฟส (phase splitting) เป็นต้น โดยแต่ละเทคนิคมีหลักการที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันด้วยเช่นกัน (1) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- การจัดวางสายส่ง (layout and compaction) เป็นเทคนิคที่อาศัยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางรูปแบบของสายส่ง (layout) เช่น เปลี่ยนจากการจัดเรียงสายส่งแบบ flat formation เป็น triangular formation หรือสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็วแปรผันตามระยะห่างระหว่างสายส่งที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ค่าสนามแม่เหล็กยังสามารถลดทอนลงได้ด้วยวิธีการลดระยะห่างระหว่างเฟส (phase to phase clearance) หรือที่เรียกว่า compaction ยกตัวอย่างเช่น การใช้ compactor ตลอดระยะทางสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ถึงประมาณ 56% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวมีข้อควรระวังในเรื่องของการเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่บริเวณสายส่งและฉนวน ซึ่งก่อให้เกิดเสียงรบกวนการรบกวนทางคลื่นวิทยุ และมีโอกาสเกิดโคโรนาที่บริเวณดังกล่าวเช่นกัน นอกจากนี้เทคนิค

การลดทอนด้วย layout and compaction มีข้อจำกัดสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ในแง่ของพิกัดกระแส (ampacity)

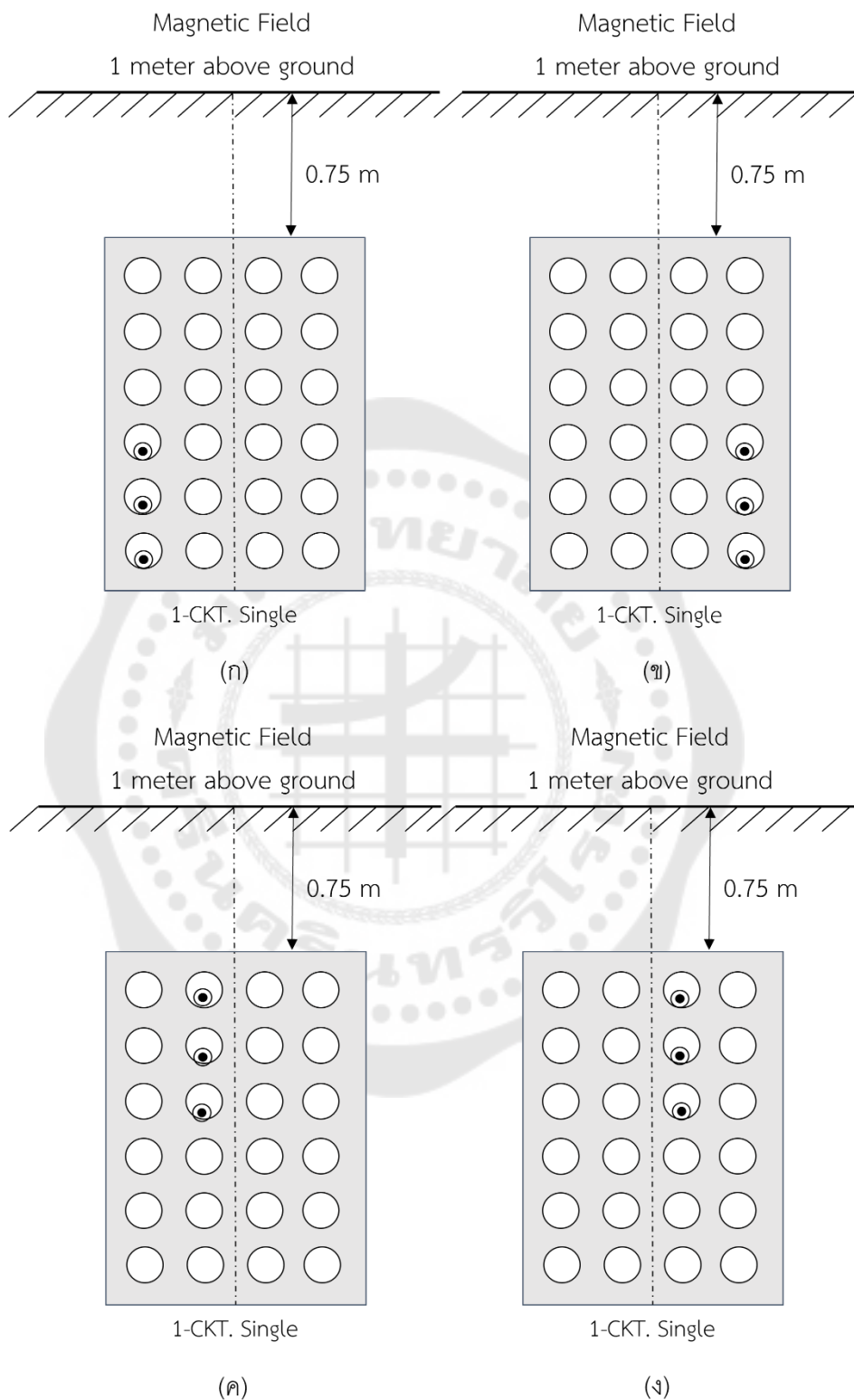
- การจัดการระยะห่างระหว่างสายส่ง (distance management) เนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กจะลดทอนลงเมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น หนึ่งในวิธีการที่ง่ายที่สุด คือ การเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เช่น สายส่งกับจุดที่พิจารณา แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้มีข้อจำกัดทางเทคนิคเนื่องด้วยรูปแบบของการก่อสร้าง เช่น ข้อจำกัดจากความสูงของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน และข้อจำกัดจากระยะความลึกในการฝังสายส่งของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น

- การแบ่งเฟส (phase splitting) โดยปกติแล้วระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสนั้นสามารถแบ่งออกเป็นตัวนำหลาย ๆ ตัวได้ โดยรูปแบบการแบ่งเฟสที่ให้ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุด คือ การแยกเฟสในรูปของ quadrupoles แต่เทคนิคการลดทอนนี้ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน มีราคาแพง และต้องใช้วัสดุอุปกรณ์เสริมด้วย

- Phase cancellation สำหรับเทคนิคนี้เหมาะสมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีมากกว่า 1 วงจร โดยเป็นการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงเฟสหรือสลับเฟสของสายส่งใหม่ เพื่อให้เกิดการหักล้างค่าสนามแม่เหล็กระหว่างกัน โดยไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ใด ๆ เพิ่มเข้ามา จึงถือเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ให้ประสิทธิผลที่ดีทั้งในแง่ของการลดทอนและราคาต้นทุน

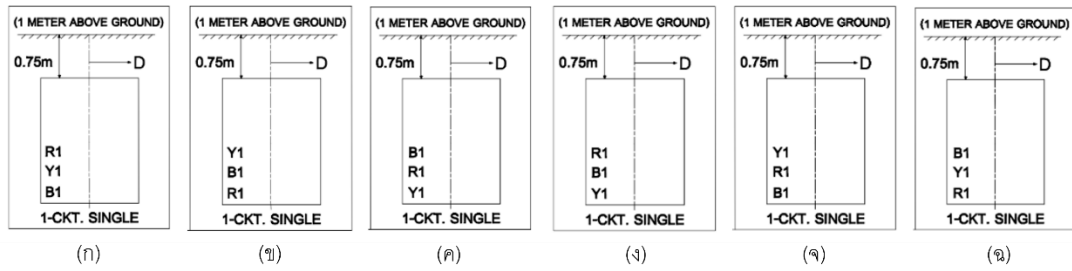
ประเทศในทวีปยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้มีการใช้เทคนิคแบบ intrinsic techniques ในการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก เช่น Omaha, Nebraska ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ใช้ arial spacer กับสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน ที่ระดับแรงดัน 66 kV โดย spacer ใช้กับสายส่งที่มีระยะห่างระหว่างเฟส (phase to phase clearance) เท่ากับ 0.66 เมตร มีรูปแบบการจัดวางแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (triangular formation) ระยะระหว่างเฟสเท่ากับ 2.5 เมตร โดยผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กสามารถลดทอนลงไปได้ประมาณ 25% สำหรับประเทศไทยมีนักวิจัยที่ให้ความสำคัญกับผลกระทบของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำต่อสุขภาพของผู้ใช้ไฟฟ้า รวมถึงผู้ที่อาศัยและทำงานอยู่ใกล้บริเวณแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กดังกล่าว และเลือกใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบ intrinsic techniques ในการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ในปี 2016 กนกวรรณ ประทีปศิริ ญัฐริกา เทียมเสมอ และสุธาสินี นุ่นชื่น (8) ได้ศึกษาเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยการจัดเรียงเฟส (phase arrangement) สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงที่ระดับแรงดัน 69/115 kV โดยสายส่ง

ก่อสร้างแบบท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) และวิธีการดันท่อปลอกขนาดใหญ่ (pipe jacking) สำหรับการศึกษาลดทอนสนามแม่เหล็กในสายส่งที่ก่อสร้างแบบท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) 1 วงจร จะแบ่งรูปแบบตามตำแหน่งการจัดวางสายส่งออกเป็น 4 รูปแบบด้วยกัน ดังภาพประกอบ 1 จากนั้นทำการสลับเฟสของสายส่งทั้ง 4 รูปแบบ ออกเป็น 6 ประเภทย่อย ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ภาพประกอบ 3 ภาพประกอบ 4 และภาพประกอบ 5 ซึ่งผลการจำลอง พบว่าการสลับเฟสของสายส่งในรูปแบบ 1 และ 2 ดังภาพประกอบ 1 (ก) และ (ข) เป็นรูปแบบการจัดวางที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กต่ำที่สุด โดยเมื่อสลับเฟสของสายส่งตามภาพประกอบ 2 (ก - ข) และภาพประกอบ 3 (ก - ข) แล้วค่าสนามแม่เหล็กที่จำลองได้แต่ละแบบมีค่าเท่ากัน ส่วนการจัดวางที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุด ได้แก่ การจัดวางตามภาพประกอบ 4 และ ภาพประกอบ 5 เช่นเดียวกันการสลับเฟสทั้ง 6 รูปแบบของการจัดวางทั้งสองให้ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กเท่ากัน ต่อมา วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ และ สุธาสินี นุ่นชื่น (9) ได้ศึกษาการจัดเรียงเฟสเพื่อลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน. ที่ระดับแรงดัน 69 kV สายส่งจัดเรียงไว้ท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาแบ่งออกเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินแบบ 1 วงจร 2 วงจร และ 3 วงจร โดยก่อนการจัดเรียงเฟสได้ทำการจำลองค่าสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกับการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจริงบริเวณถนนลาดพร้าว - วิภาวดี ซึ่งจะเก็บค่าวัดทุก ๆ 30 วินาที ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 24.00 น. ค่ากระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น เท่ากับ 600 A ผลการจำลองมีค่าสูงกว่าผลการวัดเล็กน้อย แต่แนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 200 μT จากนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กเมื่อเปลี่ยนรูปแบบและตำแหน่งการจัดเรียงเฟสของสายส่งที่วางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) และสามารถสรุปรูปแบบการจัดเรียงเฟสได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 “best case” เป็นรูปแบบการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุด และกรณีนี้ 2 “worst case” เป็นรูปแบบการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กกับค่ามาตรฐานของประเทศในทวีปยุโรปแล้วยังคงมีค่าสูงกว่า 10 μT (อ้างอิงตามมาตรฐานประเทศอิตาลี)



ภาพประกอบ 1 ตำแหน่งการจัดวางสายส่งแบบ 1 วงจร ในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank)

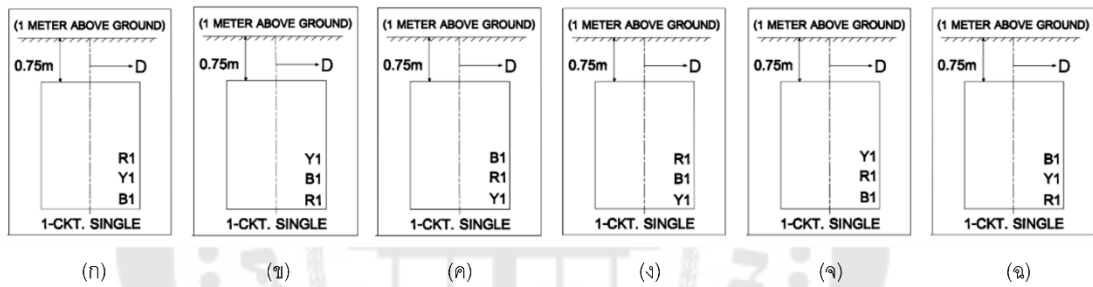
ของการไฟฟ้านครหลวง



ภาพประกอบ 2 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 1

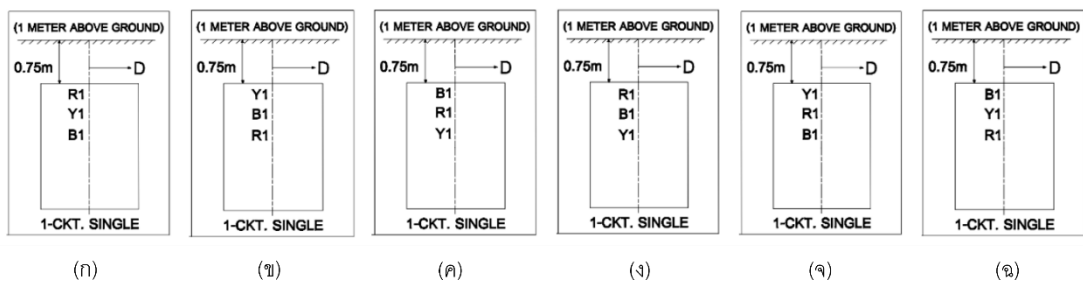
(ก) Case 1 Type 1 (ข) Case 1 Type 2 (ค) Case 1 Type 3 (ง) Case 1 Type 4

(จ) Case 1 Type 5 และ (ฉ) Case 1 Type 6



ภาพประกอบ 3 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 2

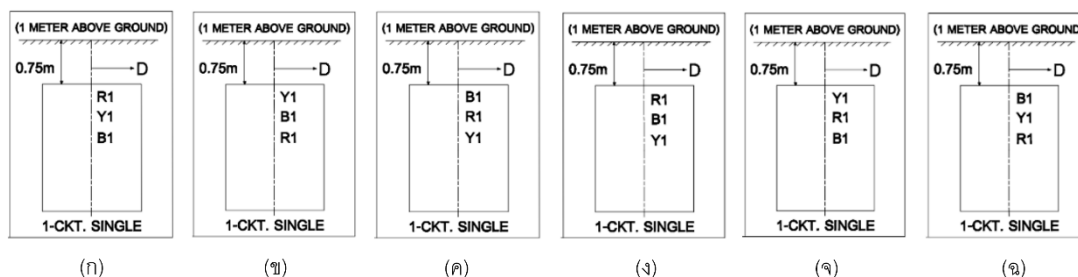
(ก) Case 2 Type 1 (ข) Case 2 Type 2 (ค) Case 2 Type 3 (ง) Case 2 Type 4 (จ) Case 2 Type 5 และ (ฉ) Case 2 Type 6



ภาพประกอบ 4 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 3

(ก) Case 3 Type 1 (ข) Case 3 Type 2 (ค) Case 3 Type 3 (ง) Case 3 Type 4

(จ) Case 3 Type 5 และ (ฉ) Case 3 Type 6



ภาพประกอบ 5 รูปแบบการจัดเรียงเฟสของตัวนำ กรณีที่ 4

(ก) Case 4 Type 1 (ข) Case 4 Type 2 (ค) Case 4 Type 3 (ง) Case 4 Type 4 (จ) Case 4 Type 5 และ (ฉ) Case 4 Type 6

สำหรับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยวิธี extrinsic techniques เป็นเทคนิคที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายเช่นกัน โดยเฉพาะในทวีปยุโรปมีนักวิจัยต่างประเทศให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้ากันมาก ในทางกลับกันสำหรับประเทศไทยยังไม่ค่อยเป็นที่สนใจมากนักสำหรับ extrinsic techniques โดยหลักการแล้วเป็นการนำอุปกรณ์เสริมที่มีคุณสมบัติในการลดทอนสนามแม่เหล็กได้มาวางเสริมในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวางใกล้กับแหล่งกำเนิดหรือบริเวณพื้นที่ที่ต้องการป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน ได้แก่ active techniques และ passive techniques

- active techniques สำหรับเทคนิคนี้จะต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างให้สนามแม่เหล็กไปหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแหล่งกำเนิด โดยกระแสที่จ่ายเข้ามาในระบบจะต้องมีความเสถียร สามารถควบคุมได้ตลอดเวลา จึงส่งผลให้เทคนิคนี้มีแนวทางการออกแบบที่ซับซ้อนมากที่สุด ต้องใช้อุปกรณ์เสริมหลายอย่าง เช่น แหล่งจ่ายพลังงาน ระบบควบคุมและเซ็นเซอร์ตรวจจับ ระบบมอดิเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นการลดทอนด้วย active techniques จึงจัดว่าเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนในการลงทุนสูงที่สุด (1, 4, 10)

- passive techniques สำหรับเทคนิคนี้เป็นการอาศัยอุปกรณ์หรือระบบลดทอนให้ทำงานตอบสนองกับสนามแม่เหล็กจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิด เช่น เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ในลูปตัวนำ และกระแสที่เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางที่สวนทางกับสนามแม่เหล็กจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงทำให้เกิดการหักล้างกัน เป็นต้น สำหรับการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยหลักการนี้มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้ลูปตัวนำ การใช้ซีลด์ตัวนำ หรือซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กในการลดทอนสนามแม่เหล็ก เทคนิคเหล่านี้มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจเช่นกัน เนื่องจากเป็นเทคนิคการลดทอน

ที่ไม่ยุ่งยากมากนัก ต้นทุนต่ำกว่าแบบ active techniques สำหรับเทคนิคการลดทอนด้วยลูป (loop compensation) เป็นวิธีที่ลงทุนไม่สูงมากนัก โดยในปี ค.ศ. 2011 Redy Mardiana และ Majid Poshtan (11) ได้ทำการศึกษาคำการใช้ลูปตัวนำ (conductive loop) ลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน 3 เฟส มีค่ากระแสแต่ละเฟสเท่ากับ 1,500 A พบว่าขนาดความกว้างและความสูงของลูปตัวนำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดทอน โดยลูปที่มีความกว้างมากสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามการลดทอนดังกล่าวจะมีขีดจำกัดอยู่ที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งหลังจากนั้นต่อให้เพิ่มขนาดของลูปมากเท่าไรก็ไม่สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้มากขึ้น และเมื่อศึกษาถึงระยะห่างระหว่างลูปตัวนำกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก พบว่า ยิ่งลูปตัวนำกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กห่างกันมากเพียงใด ยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดทอนต่ำลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างลูปกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กห่างกัน ไม่เพียงแต่การใช้เทคนิคการลดทอนแบบลูปกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเท่านั้น มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการลดทอนแบบลูปกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเช่นกัน Cruz P Hoeffelman J และ Pino Jcd (12) ศึกษาเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อใช้ลูปที่มีโครงสร้าง รูปร่างต่างกัน รวมถึงผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กเมื่อเพิ่มจำนวนลูปได้รับการศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน โดยเมื่อเพิ่มจำนวนลูป จาก 1 ลูป เป็น 2 และ 3 ลูป ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า 1 ลูป มีรูปแบบการก่อสร้างที่ง่าย สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กลงประมาณ 10 เท่าจากเดิม และเมื่อใช้ 2 ลูป ประสิทธิภาพในการลดทอนเพิ่มขึ้นเป็น 30% นอกจากเทคนิคการลดทอนด้วยลูปแล้ว เทคนิคการลดทอนด้วยซิลด์ก็เป็นที่ยอมรับเช่นกัน ในปี ค.ศ. 2013 Juan C. del Pino-Lopez และ Pedro Cruz-Romero (13) ศึกษาการใช้ซิลด์ในการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ขนาด 138 kV ติดตั้งใน ท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 3 x 3 และสายส่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ 630 mm² ขนาดกระแส 750 A โดยการศึกษาเป็นการเปรียบเทียบผลการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อใช้แผ่นซิลด์ที่มีรูปร่างต่างกัน ได้แก่ แผ่นเพลท (horizontal plate) และตัวยูคว่ำ (reverse - u) ร่วมกับการจัดเรียงสายในรูปแบบต่างกัน ได้แก่ การจัดเรียงแบบ flat formation และ trefoil หรือ triangular formation ซึ่งผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กด้วย parametric analysis พบว่า เมื่อพิจารณาที่จำนวนวงจรเท่ากัน การจัดเรียงสายแบบ triangular ร่วมกับการใช้แผ่นซิลด์ สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้มากกว่าการจัดเรียงสายแบบ horizontal และ vertical ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลจากวัสดุที่ใช้ทำแผ่นซิลด์พบว่าซิลด์ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถลดทอนได้ดีกว่าอลูมิเนียม ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 Pedro Daniel Vierra Morgado (14) ให้ความสนใจในเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบ

extrinsic technique เช่นกัน โดยจำลองแผ่นชีลด์รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานวางกั้นระหว่างสายส่ง ดิน และอากาศว่าง ด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) เพื่อศึกษาพฤติกรรม และการลดทอนของสนามแม่เหล็กเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา ระดับความลึก และวัสดุที่ใช้ทำ แผ่นชีลด์ โดยพบว่า เมื่อกำหนดค่าความนำไฟฟ้าของดิน (soil electrical conductivity) เท่ากับ 0.01 S/m ความหนาของแผ่นชีลด์เท่ากับ 3 mm เปลี่ยนระดับความลึกของแผ่นชีลด์ที่ฝังใต้ดิน เป็น 0.5 m 1 m และ 1.352 m ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ไม่ส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กแตกต่างกันมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบผลการลดทอนเมื่อใช้ แผ่นชีลด์ต่างวัสดุกัน พบว่า แผ่นชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ มากกว่าแผ่นชีลด์ที่ทำจากเหล็กกล้า แต่การศึกษาดังกล่าวเป็นเพียงการพิจารณาค่าสนามแม่เหล็ก ภายใต้ง่อนไขการติดตั้งสายส่งแบบฝังดินโดยตรงและจัดเรียงสายแบบ flat formation เท่านั้น นอกจากนี้การศึกษาโดยการจำลองด้วยโปรแกรมต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ก่อนการลงทุน สร้างจริงแล้ว ประเทศเบลเยียมได้พยายามปรับปรุงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุม ค่าสนามแม่เหล็กให้ค่าต่ำมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยออกแบบการลดทอนสนามแม่เหล็ก ด้วยแผ่นชีลด์แบบ horizontal ทำจากอลูมิเนียม เพื่อลดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่ง กำลังไฟฟ้าใต้ดิน ขนาด 150 mm² ที่มีระยะทาง 6 กิโลเมตร สายส่งเป็นชนิด XLPE พื้นที่หน้าตัด เท่ากับ 2,000 mm² จัดเรียงสายแบบ flat formation ซึ่งผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กก่อนก่อสร้าง และหลังก่อสร้างระบบลดทอนสนามแม่เหล็ก พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กลดลงจากเดิม 32 μ T เป็น 4 μ T ส่วนประเทศอิตาลีได้มีการใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ใต้ดินแบบ ferromagnetic pipes ในเมือง Genoa โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นสายส่งชนิด XLPE โดยก่อสร้างชีลด์เป็นระยะทางประมาณ 2 กิโลเมตร โดยสายส่งอยู่ในท่อที่เป็นชีลด์ ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก มีความหนา เท่ากับ 5 mm ฝังอยู่ใต้ดินเป็นระยะ 1.6 m และ 1.0 m ซึ่งผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กหลังจากติดตั้งแล้ว พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กต่ำกว่า 0.2 μ T เสมอ และในประเทศอิตาลีเช่นกัน ที่เมือง Naples ได้มีการใช้ ferromagnetic raceway ในการลดทอน สนามแม่เหล็ก โดยเป็นการออกแบบชีลด์ที่ระยะเท่ากับ 5 กิโลเมตร สำหรับ 132 kV โดย raceway มีขนาดความกว้าง เท่ากับ 220 m ความสูง 210 m และฝาปิดมีความกว้าง เท่ากับ 350 m โดยผลการตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็ก พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำกว่า 0.2 μ T และมี shielding factor มากกว่า 18 (1) เทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ยังคงเป็นที่นิยม มีนักวิจัยให้ความ สนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ต่อมาในปี ค.ศ. 2018 Neuza Gomes, Maria Eduarda Almeida และ Vitor Malo Machado (14) ได้เสนอผลการศึกษารลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิด

จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินด้วยแผ่นซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเช่นกัน และพัฒนาการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนด้วยแผ่นซีลด์ด้วยการพิจารณาแบบ multilayer สำหรับประสิทธิภาพการลดทอนสนามแม่เหล็กจะวิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ได้แก่ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นซีลด์ ความหนาของแผ่นซีลด์ และความลึกของแผ่นซีลด์ที่ฝังไว้ใต้ดิน ซึ่งงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลของการต่ออนุกรมของอิมพีแดนซ์ (series impedance) ค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้า (power losses) จากค่าความนำไฟฟ้าของดินและแผ่นซีลด์ โดยผลการศึกษากล่าวว่า การลดทอนค่าสนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นเมื่อแผ่นซีลด์มีความหนามากขึ้น ความถี่ก็เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมกับเหล็กกล้า พบว่า เหล็กกล้าซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กให้ผลการลดทอนที่ดีกว่าเมื่อความหนาของแผ่นซีลด์มีค่ามากกว่าความลึกผิวของวัสดุแม่เหล็ก (penetration depth) ในขณะที่แผ่นซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมก็ให้ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กที่ดีเช่นกัน และประสิทธิภาพการลดทอนไม่ดีขึ้นอยู่กับความลึกของแผ่นซีลด์ที่ฝังใต้ดิน ต่อมาในปี ค.ศ. 2021 Adel Zein EL Dein Mohamed, Hatim Ghazi Zaini, Osama E. Gouda และ Sherif S. M. Ghoneim (15) ได้ทำการศึกษารลดทอนฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินและผลกระทบในแง่ของอุณหภูมิของสายส่งด้วย Finite Element Method (FEM) ในการจำลองพฤติกรรมของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก โดยงานวิจัยนี้ใช้กรณีศึกษาเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน 3 เฟส วงจรเดี่ยว ที่ระดับแรงดัน 145 kV วางในรูปแบบของ flat formation และใช้แผ่นซีลด์ที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ อลูมิเนียม และเหล็กกล้า โดยการศึกษาพฤติกรรมการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อใช้แผ่นซีลด์จะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความกว้างของแผ่นซีลด์ ความหนาของแผ่นซีลด์ ระยะห่างระหว่างแผ่นซีลด์กับสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งผลการศึกษาของงานวิจัยดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแนวทางการออกแบบสำหรับกรณีศึกษาดังกล่าว และอัตราส่วนระหว่างพิกัดกระแสของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินก่อนและหลังการใช้แผ่นซีลด์เท่ากับ 1.28 สำหรับอลูมิเนียม และ 1.18 สำหรับเหล็กกล้า

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการนำเสนอเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินหลากหลายเทคนิคด้วยกัน โดยส่วนมากจะนำเสนอการใส่ลูปตัวนำกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่ฝังสายส่งโดยตรง รวมถึงการใช้ซีลด์สำหรับลดทอนสนามแม่เหล็กจากสายส่งที่ฝังโดยตรงและสายส่งที่ติดตั้งร่วมกับท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการลดทอนจริง ส่วนใหญ่มีกรณีศึกษาอยู่ที่ประเทศยุโรปเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศเบลเยียมและอิตาลี สำหรับงานวิจัยนี้สนใจเทคนิคการลดทอน

สนามแม่เหล็กแบบ extrinsic technique ได้แก่ การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายและให้ประสิทธิผลในการลดทอนที่ดี รวมถึงต้นทุนไม่สูงมากเมื่อเทียบกับแบบ active techniques โดยงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) เข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งจะใช้กรณีศึกษาจากการไฟฟ้านครหลวง ที่ระดับแรงดัน 69 kV ติดตั้งในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการจัดวางสายส่งที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในที่นี้จะแทนกรณีดังกล่าวว่า “best case” และรูปแบบการวางสายส่งใกล้กับจุดที่พิจารณาหรือทำการวัดค่ามากที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสูงที่สุด (worst case) ซึ่งรูปแบบการจัดวางสายดังกล่าวได้ต่อยอดมาจากการศึกษารูปแบบการจัดเรียงเฟส (phase arrangement) (8, 9)

2.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดิน (overhead transmission line) และ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน (underground power system) สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินจะใช้สายส่งที่มีอากาศเป็นฉนวนหลัก โดยอากาศมีคุณสมบัติในการคืนกลับสภาพความเป็นฉนวนได้ด้วยตัวเองเมื่อเกิดการดีสชาร์จหรือเบรกดาวน แต่ในขณะเดียวกันการใช้สายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประเภทนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม มลภาวะ ความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมถึงปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้และส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง เช่น พายุ เป็นต้น ส่วนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เนื่องจากประเทศไทยมีแผนงานในการปรับเปลี่ยนและปรับปรุงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือดินเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน โดยโครงสร้างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินจะเป็นสายตัวนำหุ้มฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว หรือฉนวนแก๊สอัดความดัน ซึ่งจะมีความสามารถในการทนแรงดันได้สูง ถึงแม้ว่าฉนวนจะมีความหนาไม่มากนักก็ตาม สายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีขนาดเล็ก ทนแรงดันได้สูง สามารถติดตั้งได้ทั้งในรูปแบบการฝังดินโดยตรง หรือเดินสายในอากาศภายในอุโมงค์ ซึ่งข้อดีดังกล่าวทำให้สายส่งจ่ายกำลังประเภทนี้สามารถใช้งานในพื้นที่บริเวณกลางเมืองใหญ่ที่มีข้อจำกัดของพื้นที่การก่อสร้าง ช่วยรักษาสภาพแวดล้อม พื้นที่สีเขียว และไม่บดบังความสวยงามของภูมิทัศน์ (16) โดยปัจจุบันการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 รูปแบบการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน (16)

รูปแบบการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน	
แบบเปิดหน้าดิน	แบบไม่เปิดหน้าดิน
1. วิธีฝังดินโดยตรง (direct burial)	1. วิธีเจาะในแนวราบ (Horizontal Directional Drilling: HDD)
2. วิธีร้อยท่อฝังดิน (semi – direct burial)	2. วิธีการดันท่อปลอกขนาดใหญ่ (pipe jacking)
3. กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีตสำเร็จรูป (precast duct bank)	3. วิธีการดันท่อปลอกขนาดเล็ก (small sleeve pushing)
4. กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต (concrete encased duct bank)	

จากตาราง 1 รูปแบบการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.2.1 แบบเปิดหน้าดิน

1) วิธีฝังดินโดยตรง (direct burial) เป็นรูปแบบการฝังสายส่งกำลังไฟฟ้าลงไปได้ผิวดิน โดยตรงหลังจากเปิดหน้าดินทำงาน ซึ่งความสามารถในการนำกระแสของสายส่งใต้ดินจะทำได้ดีกว่าการก่อสร้างประเภทอื่น ๆ ถ้าหากว่าสภาพดินมีค่าความต้านทานต่ำ

2) วิธีร้อยท่อฝังดิน (semi – direct burial) เป็นการก่อสร้างที่พัฒนาต่อจากวิธีการฝังดินโดยตรง โดยนำท่อเฮดดีพีอี (High Density Polyethylene: HDPE) หรือท่ออาร์ทีอาร์ซี (Reinforced Thermosetting Resin Conduit: RTRC) มาใช้ในการร้อยสายไฟฟ้า พร้อมทั้งมีการเผื่อท่อไว้สำหรับการบำรุงรักษาในอนาคต

3) กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต (concrete encased duct bank) การก่อสร้างวิธีนี้จะใช้กับงานก่อสร้างแบบใช้ท่อ HDPE (High Density Polyethylene) หรือท่อ RTRC (Reinforced Thermosetting Resin Conduit) แล้วหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้าจากผลกระทบทางกล (mechanical protection) โดยการก่อสร้างด้วยวิธีนี้จะต้องมีบ่อพักสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินเป็นระยะ เพื่อใช้ในการลากสาย ต่อสาย หรือใช้ในกรณีที่แนวสายส่งกำลังไฟฟ้าหักมุม

4) กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีตสำเร็จรูป (precast duct bank) เป็นการผลิตท่อหุ้มคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นท่อน ๆ โดยมีความยาวท่อนละ 3 เมตร และเมื่อเปิดผิวดินแล้วจึงนำมาวางเรียงต่อกัน ซึ่งการก่อสร้างแบบนี้มีรูปแบบการก่อสร้างเช่นเดียวกับกลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต แต่ไม่ต้องตั้งบ่อวางท่อร้อยสาย ผูกเสริมเหล็ก และเทคอนกรีตที่บริเวณสถานที่ก่อสร้าง

สำหรับการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินแบบเปิดหน้าดินแต่ละเทคนิค มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 2

2.1.2 แบบไม่เปิดหน้าดิน (no dig)

1) วิธีเจาะในแนวนอน (Horizontal Directional Drilling: HDD) เป็นรูปแบบการก่อสร้างที่จะเปิดหน้าดินเฉพาะตำแหน่งบ่อพักสาย บ่อรับ หรือบ่อส่งสำหรับใช้ในการเจาะดึงท่อ ซึ่งเป็นวิธีการที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าหรือผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงการก่อสร้างน้อย ความสามารถในการนำกระแสจะใกล้เคียงกับวิธีร้อยท่อฝังดิน (semi - direct burial) โดยวิธีการนี้เหมาะสำหรับการก่อสร้างในชุมชนเมืองที่มีการจราจรแออัด ไม่สามารถเปิดหน้าดินทำงานได้

2) วิธีการดันท่อปลอกขนาดใหญ่ (pipe jacking) เป็นรูปแบบที่ไม่ต้องเปิดหน้าดินตลอดความยาวของท่อ จำเป็นต้องมีเครื่องมือดันท่อ (jacking frame) ที่ทำหน้าที่ดันปลอกโลหะหรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่เหมาะสำหรับบริเวณหน้าสถานีไฟฟ้าที่มีจำนวนวงจรมาก ซึ่งต้องการความปลอดภัยสูง

3) วิธีการดันท่อปลอกขนาดเล็ก (small sleeve pushing) เป็นลักษณะการสร้างท่อร้อยสายลอดใต้ถนนโดยวิธีการดันท่อซิปสังกะสี และเมื่อดันท่อเสร็จจะวางท่อร้อยสายภายในท่อเหล็กซิปสังกะสีอีกครึ่งหนึ่ง

สำหรับการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินแบบเปิดหน้าดินแต่ละเทคนิค มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 3

ตาราง 2 ข้อดีและข้อเสียของการก่อสร้างแบบเปิดหน้าดิน (16)

รูปแบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีการฝังดินโดยตรง (direct burial)	<ol style="list-style-type: none"> ขั้นตอนการก่อสร้างน้อยกว่ากลุ่มท่อคอนกรีตและวิธีร้อยท่อฝังดิน ไม่มีการดึงลากสายผ่านท่อร้อยสาย และไม่ต้องก่อสร้างบ่อพักสาย ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงแรงดึงและแรงกดด้านข้างของสายส่ง 	<ol style="list-style-type: none"> ไม่สามารถป้องกันผลกระทบทางกลได้ ค่อนข้างยากต่อการเปลี่ยนขนาด เพิ่มวงจรหรือเปลี่ยนสายส่งเมื่อชำรุด ส่งผลกระทบต่อวงจรวงข้างเคียงได้ง่าย เมื่อเกิดการลัดวงจร
วิธีร้อยท่อฝังดิน (semi - direct burial)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่ากลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต สามารถบำรุงรักษาได้ในท่อสำรองที่ออกแบบ เช่น เปลี่ยนสายที่ชำรุด เพิ่มวงจร เป็นต้น ไม่ทำให้วงจรวงข้างเคียงเสียหาย เมื่อเกิดการลัดวงจร 	<ol style="list-style-type: none"> ไม่สามารถป้องกันผลกระทบทางกลได้
วิธีท่อหุ้มคอนกรีต (concrete encased duct bank)	<ol style="list-style-type: none"> คอนกรีตเสริมเหล็กที่หุ้มท่อจะช่วยป้องกันผลกระทบทางกลจากการขุดเจาะ ทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีความมั่นคงและปลอดภัยสูง สามารถบำรุงรักษาได้ในท่อสำรองที่ออกแบบ เช่น เปลี่ยนสายที่ชำรุด เพิ่มวงจร เป็นต้น ไม่ทำให้วงจรวงข้างเคียงเสียหาย เมื่อเกิดการลัดวงจร รองรับวงจรมากขึ้นในพื้นที่จำกัด 	<ol style="list-style-type: none"> ใช้เวลาในการก่อสร้างค่อนข้างนาน เมื่อจำนวนวงจรเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการนำกระแสลดลง
วิธีท่อหุ้มคอนกรีตสำเร็จรูป (precast duct bank)	<ol style="list-style-type: none"> ลดระยะเวลาในการเปิดหน้าดินและการกีดขวางทางจราจร ทำให้สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าวิธีกลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต คอนกรีตเสริมเหล็กที่หุ้มท่อจะช่วยป้องกันผลกระทบทางกลจากการขุดเจาะ ทำให้สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีความมั่นคงและปลอดภัยสูง การเปลี่ยนขนาด การเพิ่มวงจร สามารถทำได้ในท่อที่ออกแบบไว้ 	<ol style="list-style-type: none"> ต้องมีจุดต่อระหว่างท่อร้อยสายทุก 3 เมตร หากก่อสร้างระหว่างจุดต่อระหว่างท่อคอนกรีตไม่เรียบร้อย จะเป็นอุปสรรคในการดึงลากสาย เมื่อจำนวนวงจรเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการนำกระแสลดลง

ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการก่อสร้างรูปแบบไม่เปิดหน้าดิน (17)

รูปแบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีเจาะในแนวราบ	<ol style="list-style-type: none"> 1.มีความรวดเร็วในการก่อสร้าง ลดปัญหาเกิดขวางการจราจร และดำเนินการก่อสร้างเป็นช่วง ๆ ได้ 2.สามารถบำรุงรักษาได้ในท่อสำรองที่ออกแบบ เช่น เปลี่ยนสายที่ชำรุด เพิ่มวงจร เป็นต้น 3.การก่อสร้างสามารถหลีกเลี่ยงอุปสรรคต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ดินได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1.ยากในการระบุตำแหน่งและความลึกของแนวสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน หลังก่อสร้างเสร็จ 2.ไม่มีการป้องกันผลกระทบทางกล 3.หากแนวเจาะตื่นเกินไป พื้นผิวด้านบนอาจเกิดการยุบตัว ทำให้เสียหายได้
วิธีการดันท่อปลอกขนาดใหญ่	<ol style="list-style-type: none"> 1.สายเคเบิลใต้ดินมีความมั่นคงปลอดภัยสูง เนื่องจากท่อเหล็กหรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่จะช่วยป้องกันผลกระทบทางกลจากการขุดเจาะ 2.สามารถบำรุงรักษาได้ในท่อสำรองที่ออกแบบ เช่น เปลี่ยนสายที่ชำรุด เพิ่มวงจร เป็นต้น 3.เมื่อเกิดการลัดวงจร จะไม่ทำให้วงจรข้างเคียงเสียหาย 4.รองรับจำนวนวงจรได้มาก 5.ลดปัญหาการกีดขวางการจราจรและดำเนินการก่อสร้างเป็นช่วง ๆ ได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1.ความสามารถในการนำกระแสของสายส่งจะลดลงเมื่อจำนวนวงจรเพิ่มมากขึ้น 2.ค่าใช้จ่ายสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างแบบอื่น ๆ
วิธีการดันท่อปลอกขนาดเล็ก	<ol style="list-style-type: none"> 1.สายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีความมั่นคงปลอดภัยสูงโดยท่อเหล็กชุบสังกะสีจะช่วยป้องกันผลกระทบทางกลจากการขุดเจาะ 2.การเปลี่ยนขนาด การเพิ่มวงจร การเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุด สามารถทำได้สะดวกในท่อสำรองที่ออกแบบเตรียมไว้ 3.เมื่อเกิดการลัดวงจรจะไม่ทำให้วงจรข้างเคียงเสียหาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1.อาจมีปัญหาเรื่องการควบคุมทิศทางการดันท่อ

2.3 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

มนุษย์รู้จักสนามแม่เหล็กมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยแม่เหล็กถาวรถูกพบครั้งแรกที่เมืองแมกนีเซียหรือปัจจุบันคือประเทศตุรกี ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กถาวรมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย และในขณะเดียวกันได้มีการค้นพบว่าสนามแม่เหล็กมีทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปขั้วใต้เสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อปี ค.ศ.1820 ศาสตราจารย์ ฮานส์ คริสเตียน เอร์สแตด (Hans Christian Oersted) ได้ค้นพบขณะทำการทดลองประกอบการบรรยายให้กับนักศึกษาฟังเกี่ยวกับอิทธิพลเชิงความร้อนของกระแสไฟฟ้า โดยสังเกตเห็นว่าเข็มทิศที่วางอยู่ใกล้กับเส้นลวดที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ กระดิกทุกครั้งที่เปิดสวิตซ์วงจรดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ศาสตราจารย์ ฮานส์ คริสเตียน เอร์สแตด เป็นผู้ค้นพบว่า ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำทองแดงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ล้อมรอบตัวนำทองแดงดังกล่าว โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กสามารถหาได้โดยใช้ทฤษฎีกฎมือขวา (Right's Hand Rule) ดังแสดงในภาพประกอบ 6 หลังจากนั้น ในปี ค.ศ.1825 ศาสตราจารย์ อังเดร มารี แอมแปร์ (Andre Marie Ampere) ได้นำเสนอ กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law of Force) ซึ่งเป็นกฎที่ใช้อธิบายแรงแม่เหล็กสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ 2 เส้น ถ้ากระแสไฟฟ้าในสายไฟไหลในทิศทางเดียวกันจะทำให้สายไฟดังกล่าวดึงดูดกัน แต่ถ้าหากกระแสไหลในทิศทางตรงข้ามกันจะทำให้สายไฟดังกล่าวผลักกัน ซึ่งกฎของแอมแปร์มีความคล้ายคลึงกับกฎของคูลอมบ์สำหรับกรณีของไฟฟ้าสถิต และในช่วงเวลาเดียวกัน ปี ค.ศ.1820 ศาสตราจารย์ฌอง แบปติสต์ บิโอดต์ (Jean – Baptiste Biot) และ เฟลิซ ซาวาร์ต (Felix Savart) ได้นำเสนอกฎของบิโอดต์ - ซาวาร์ต โดยทำการทดลองซ้ำตามแนวทางของศาสตราจารย์เอร์สแตด โดยกฎของบิโอดต์ - ซาวาร์ตแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรว ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานในการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสถิตที่จุดใด ๆ ที่เกิดจากประจุที่มีการเคลื่อนที่ (หรือไฟฟ้ากระแสตรง) ที่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณจุดที่สนใจนั้น โดยจากกฎของบิโอดต์ - ซาวาร์ต ค่าอนุพันธ์ความเข้มสนามแม่เหล็กสถิต $d\vec{H}$ ที่จุด P ที่เกิดจากกระแสส่วนย่อย (differential current element) หรือ $I d\vec{l}$ ที่วางห่างจากจุด P ด้วยระยะ R สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$dH = k \frac{Idl \sin(\alpha)}{R^2} \quad (2.1)$$

หรือเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$d\vec{H} = k \frac{I d\vec{l} \times \vec{a}_R}{R^2} \quad (2.2)$$

โดย k เป็นค่าคงที่ ซึ่งในหน่วย SI ค่า $k = \frac{1}{4\pi}$ ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{R}}{4\pi R^3} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 6 หากให้ทิศทางของนิ้วหัวแม่มือขวาแทนทิศทางของกระแสไฟฟ้า นิ้วทั้งสี่ที่เหลือจะแทนทิศทางความเข้มของสนามแม่เหล็กสถิตที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 6 ทิศทางของสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา

ที่มา: Right Hand Rule [Available from: <https://www.pasco.com/products/guides/right-hand-rule>].(18)

ในการทำงานเดียวกันกับสนามไฟฟ้าสถิตที่มีลักษณะของการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เช่น จุดประจุ ประจุเชิงเส้น ประจุเชิงแผ่น และประจุเชิงปริมาตร สำหรับกรณีของสนามแม่เหล็กสถิตจะมีลักษณะการกระจายตัวของกระแสส่วนย่อยในลักษณะต่าง ๆ เช่นกัน ได้แก่ กระแสเชิงเส้น กระแสเชิงแผ่น และกระแสเชิงปริมาตร สำหรับการหาค่าสนามแม่เหล็กสถิตที่เกิดจากกระแสเชิงเส้น พิจารณาภาพประกอบ 7 ตัวนำเส้นตรงที่มีกระแสไหลผ่านวางอยู่บนแกน z และมีความยาวสายเท่ากับ ab หากต้องการหาค่าสนามแม่เหล็กสถิต (\vec{H}) ที่จุด P เนื่องจากกระแสที่ไหลอ่านในสายตัวนำดังกล่าว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4)

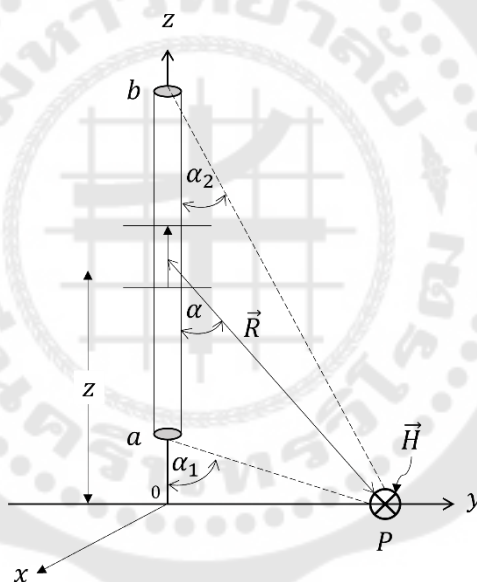
$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{a}_R}{R^3} \quad (2.4)$$

เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ พิจารณาจากภาพประกอบ 7 โดยอาศัยหลักความสมมาตร เลือกระบบพิกัดทรงกระบอกในการแก้ไขปัญหา จะเห็นว่า $d\vec{l} = dz\vec{a}_z$ และ $\vec{R} = r\vec{a}_r - r\vec{a}_z$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I d\vec{l} \times \vec{R} = rdz\vec{a}_\phi \quad (2.5)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.5) ในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$\vec{H} = \int_l \frac{I d\vec{l} \times \vec{a}_R}{4\pi R^2} = \int_a^b \frac{Irdz}{4\pi(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \vec{a}_\phi \quad (2.6)$$



ภาพประกอบ 7 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุด P เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสายตัวนำ
เส้นตรง

$$\vec{H} = \frac{I\vec{a}_\phi}{4\pi r} \left[\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right]_{z=-a}^b = \frac{I\vec{a}_\phi}{4\pi r} \left[\frac{b}{\sqrt{r^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{r^2 + b^2}} \right] \quad (2.7)$$

เปลี่ยนรูปสมการที่ (2.7) ให้อยู่ในเทอมของ α_1 และ α_2 จะได้

$$\vec{H} = \frac{I\vec{a}_\phi}{4\pi r} [\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่า สำหรับกรณีกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำเส้นตรง ความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนว \vec{a}_ϕ เท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของสายตัวนำหรือจุด P ที่พิจารณาแต่อย่างใด และถ้าหากให้สายตัวนำมีความยาวอนันต์ ที่ซึ่ง $a \rightarrow (0, 0, -\infty)$ และ $b \rightarrow (0, 0, \infty)$ จากสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$\vec{H} = \frac{I\vec{a}_\phi}{4\pi r} [\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1] = \frac{I\vec{a}_\phi}{4\pi r} [\cos(0^\circ) - \cos(180^\circ)] \quad (2.9)$$

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \vec{a}_\phi \quad (2.10)$$

และค่าสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.11)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.10) ในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

$$\vec{B} = \frac{\mu_o\mu_r I}{2\pi r} \vec{a}_\phi \quad (2.12)$$

โดย	\vec{B}	คือ	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก [T]
	\vec{H}	คือ	ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก [A/m]
	μ_o	คือ	ความซึมซาบของอากาศ [H/m]
	μ_r	คือ	ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์
	μ	คือ	$\mu_o\mu_r$
	\vec{a}_ϕ	คือ	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

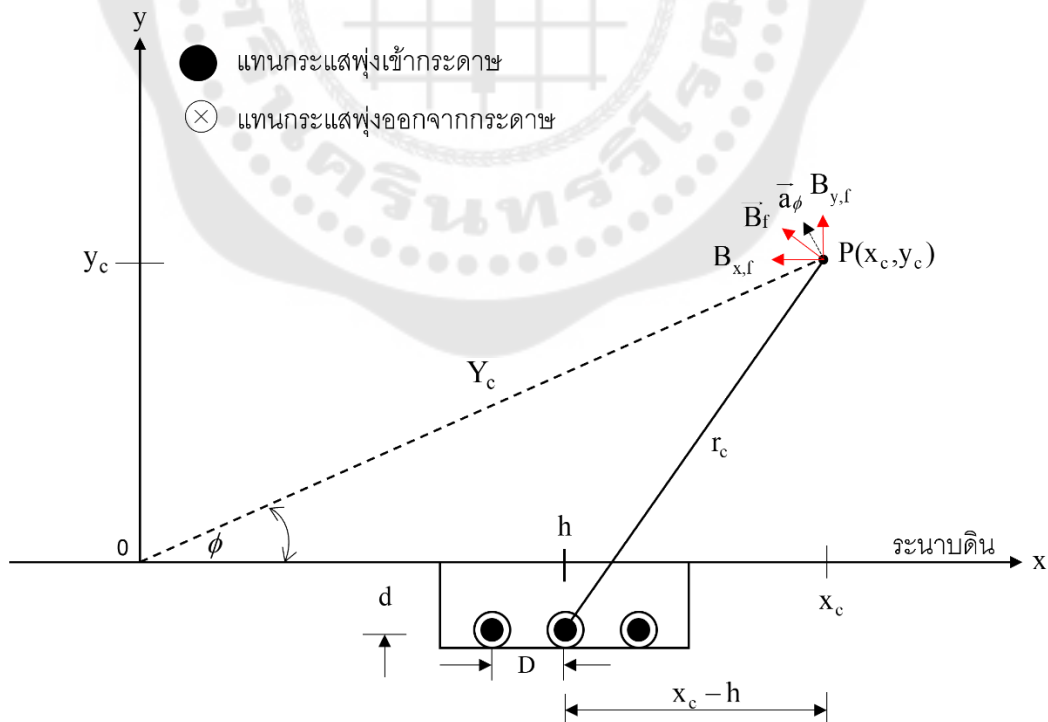
2.4 ความลึกผิว (skin depth)

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เมื่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นคลื่นจรเคลื่อนที่ผ่านวัสดุดังกล่าว ขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะลดทอนลงด้วยแฟคเตอร์ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเรียกว่าเป็นผลของปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) หรืออาจกล่าวได้ว่า ความลึกผิว (skin depth) คือ ค่าความลึกที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายได้ภายในตัวนำ ซึ่งระยะที่ขนาดของรูปคลื่นจะลดลงนั้น จะลดลงด้วยแฟคเตอร์เท่ากับ e^{-1} หรือ 37% โดยความลึกผิวจะมีค่าเล็กลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ยิ่งความถี่มีค่าสูงมาก ๆ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถแผ่กระจายเข้าสู่ภายในเนื้อผิวตัวนำได้น้อยลงมากขึ้นเท่านั้น เช่น ถ้าค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 100 ที่ระยะจากบริเวณผิวตัวนำลึกเข้าไปเท่ากับ ความลึกผิว คลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือเพียง 37 เท่านั้น ดังนั้น ในการเลือกใช้สายตัวนำที่เหมาะสมนั้น ถ้าหากไม่นำค่าความลึกผิวมาพิจารณา จะไม่มีประโยชน์ในการนำกระแส เพราะ ยิ่งความถี่สูงมากเท่าไร ค่ากระแสจะไหลเฉพาะบริเวณที่ความลึกผิวเท่านั้น

2.5 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

สำหรับการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินจะเปลี่ยนแบบจำลองตามภาพประกอบ 8 เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินแบบ 3 เฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลา เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส จะผลิตกระแสสลับที่แปรตามเวลา แต่มีความถี่คงที่ 50 Hz ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มความถี่ต่ำมาก และเหตุผลดังกล่าวทำให้ความยาวคลื่น (wavelength) ที่เกิดขึ้นในอากาศมีความยาวกว่าความลึกของการฝังสายส่ง ระยะห่างระหว่างสายส่งแต่ละเส้น รวมถึงรัศมีของสายส่ง จะมีค่าไม่เกิน 10 เมตร โดยตัวแปรดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 600,000 เท่า (ที่ความถี่ 50 Hz มีความยาวคลื่น เท่ากับ 6,000 กิโลเมตร) ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินวางสายส่งในรูปแบบของ flat formation ตามทิศทางในแนวแกน z และฝังอยู่ใต้ดินลึกเท่ากับ d เมตร ระยะห่างระหว่างสายส่งมีค่าเท่ากับ D เมตร จุดที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) คือ จุด $P(x_c, y_c)$



ภาพประกอบ 8 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่วางสายแบบ flat formation

ดังนั้น ค่าสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) เกิดจากกระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\vec{B} = \frac{\mu_o \mu_r I_c}{2\pi r_c} \vec{a}_\phi \quad (2.13)$$

โดย \vec{B} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในสายส่งแต่ละเส้น [T]

I_c คือ กระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น [A]

μ_o คือ ความซาบซึ่มได้ของอากาศ [H/m]

μ_r คือ ความซึบซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

r_c คือ ระยะห่างระหว่างสายส่งกับจุดที่พิจารณา $P(x_c, y_c)$ [m]

จากภาพประกอบ 8 จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กประกอบด้วย 2 ส่วนตามแนวแกน x และตามแนวแกน y ดังนี้

$$B_{x,f} = -\frac{\mu_o \mu_r I}{2\pi} \left[\frac{(y_c - d)I \angle 120^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h)^2} + \frac{(y_c - d)I \angle 0^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h + D)^2} + \frac{(y_c - d)I \angle 240^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h - D)^2} \right] \quad (2.14)$$

$$B_{y,f} = -\frac{\mu_o \mu_r I}{2\pi} \left[\frac{(x_c - h)I \angle 120^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h)^2} + \frac{(x_c - h + D)I \angle 0^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h + D)^2} + \frac{(x_c - h - D)I \angle 240^\circ}{(y_c - d)^2 + (x_c - h - D)^2} \right] \quad (2.15)$$

โดย h คือ ระยะระหว่างจุด (0,0) กับสายส่ง [m]

d คือ ความลึกระหว่างพื้นดินกับสายส่งที่ฝังลงไป [m]

D คือ ระยะห่างระหว่างสายส่งแต่ละเส้น [m]

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) ผลรวมสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในสายส่งของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เมื่อจัดวางสายแบบ flat formation สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16)

$$B_f = \sqrt{B_{xr,f}^2 + B_{xi,f}^2 + B_{yr,f}^2 + B_{yi,f}^2} \quad (2.16)$$

โดยที่ $B_{xr,f}$ และ $B_{xi,f}$ เป็นส่วนจริงและจินตภาพของ $B_{x,f}$ ส่วน $B_{yr,f}$ และ $B_{yi,f}$ เป็นส่วนจริงและจินตภาพของ $B_{y,f}$ ตามลำดับ

2.6 ผลกระทบและค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็ก

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการติดตั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานและควบคุมค่าสนามแม่เหล็กที่มีความปลอดภัยให้เป็นที่องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ร่วมกับหน่วยงาน (International Commission on Non – Ionization Radiation Protection: ICNIRP) ทำการวิจัยและพัฒนาด้านความปลอดภัยสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก (7) ซึ่งได้สรุปไว้ว่าการสัมผัสสนามแม่เหล็กมากเกินไปอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวในเด็ก และอาจก่อให้เกิดมะเร็งอื่น ๆ เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อย่างไรก็ตามหน่วยงานดังกล่าวได้กำหนดระดับสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำที่ประชาชนสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัยได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 ค่าความปลอดภัยของสนามแม่เหล็ก (7)

สถานที่	ระยะเวลา	สนามแม่เหล็ก (μT)
สถานประกอบการ	ตลอดชั่วโมงการทำงาน	1,000
สาธารณะ	ตลอดทั้งวัน	200

2.7 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบ extrinsic techniques

โดยทั่วไปแล้ว เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ intrinsic techniques และ extrinsic techniques (4) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน รวมถึงสถานีไฟฟ้า ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนสนามแม่เหล็กแบบ extrinsic techniques ซึ่งเป็นวิธีการที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ

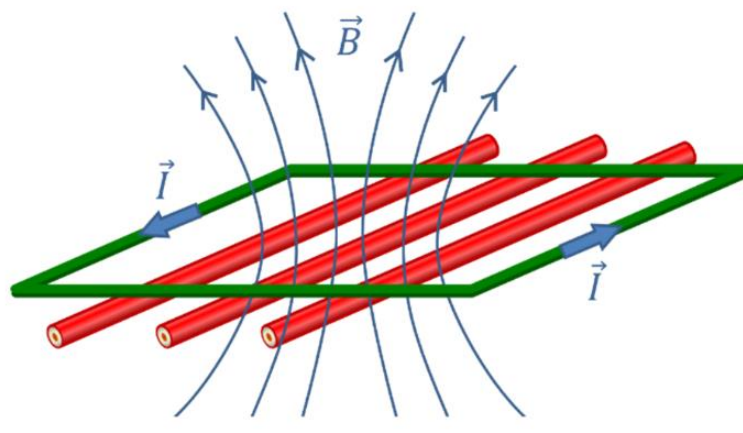
สำหรับ extrinsic techniques โดยหลักการแล้วเป็นการนำอุปกรณ์เสริมที่มีคุณสมบัติในการลดทอนสนามแม่เหล็กได้มาวางเสริมในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวางใกล้กับแหล่งกำเนิดหรือบริเวณพื้นที่ที่ต้องการป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็ก ซึ่งงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง 3 เทคนิค ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

2.7.1 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)

สำหรับการลดทอนด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) โดยหลักการแล้วจะเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน 3 เฟส สร้างสนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลา (time-varying magnetic field) ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กแปรตามเวลา (electromotive force: V_{emf}) จึงทำให้เกิดกระแสขึ้นในลูปตัวนำ (conductive loop) ดังสมการที่ (2.17) โดยทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นในลูปนั้นจะไหลในทิศทางที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศทางต้านกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากสายส่ง ดังสมการที่ (2.17) จึงทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง

$$V_{emf} = -\frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\Psi_m}{dt} \quad [\text{V}] \quad (2.17)$$

โดย N คือ จำนวนรอบของขดลวดในวงจร
 Ψ_m คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดแต่ละรอบ [Wb]

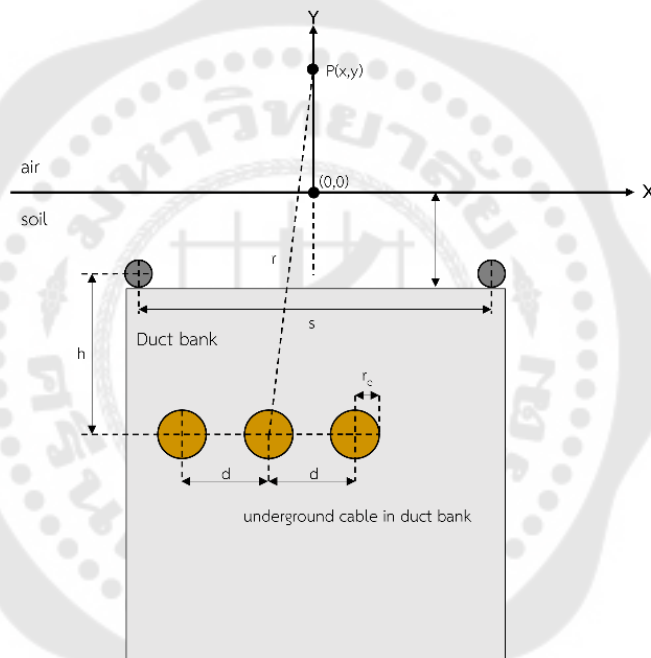


ภาพประกอบ 9 เทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)

ที่มา: Bravo-Rodríguez J, del-Pino-López J, Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. Energies. 2019;12(7).

โดยส่วนมากแล้วมักนิยมใช้สายหุ้มฉนวนชนิด Cross-linked Polyethylene หรือ XLPE แทนลูปตัวนำ (conductive loop) และการลดทอนด้วยลูปดังกล่าวนี้เป็นวิธีการลดทอนที่ไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกระแสหรือแหล่งจ่ายแรงดันจากภายนอกเข้ามาช่วยในการควบคุมการลดทอน อย่างไรก็ตาม การใช้ลูปตัวนำ (conductive loop) ในการลดทอนจำเป็นต้องพิจารณาข้อควรระวัง ถ้าหากลูปตัวนำเชื่อมต่อกับสายส่งแต่ละเส้นอย่างไม่สมมาตร จะส่งผลให้โครงสร้างของสนามแม่เหล็กและพารามิเตอร์ของสายส่งไม่สมมาตรเช่นกัน เหตุผล

ดังกล่าวสามารถทำให้เกิดกระแสไหลอย่างไม่สมมาตร (unbalance current) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็ก และยิ่งไปกว่านั้น สำหรับกรณีนี้จะเพิ่มกระแสสูญเสียในลูปตัวนำด้วยเช่นกัน (1) และหากตำแหน่งของการวางลูปใกล้กับสายส่งและกระแสที่ไหลมีทิศทางเดียวกัน อาจส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางส่งเสริมกันได้ ดังนั้นในการออกแบบเทคนิคนี้จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อการออกแบบการลดทอนด้วยลูปตัวนำ เช่น รูปร่างของลูปตัวนำ ตำแหน่งของลูปตัวนำ ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของลูป จำนวนลูป ค่าความสูญเสียของลูป เป็นต้น โดยคณะทำงาน CIGRÉ (1) ได้เสนอวิธีการคำนวณหากระแสเหนี่ยวนำของลูป ดังสมการที่ (2.18)



ภาพประกอบ 10 โดอะแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ

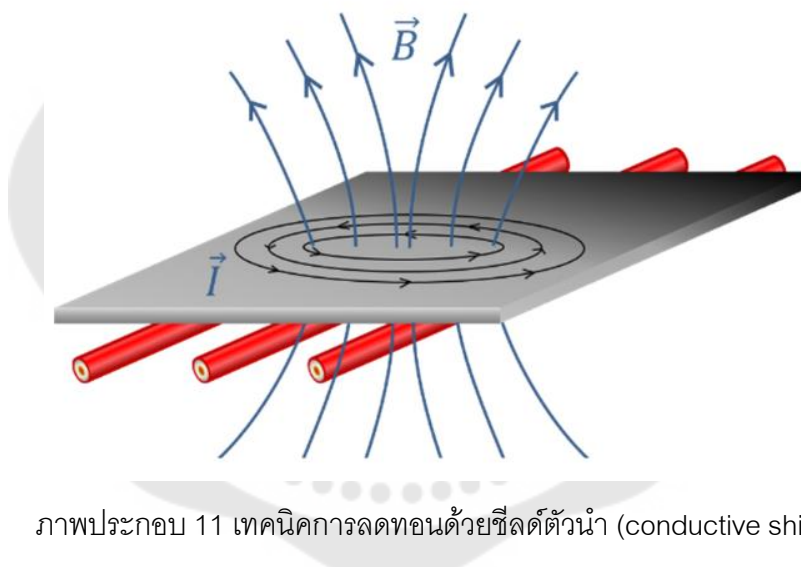
$$I_l = \frac{-\ln\left(\frac{h^2 + (s+d)^2}{h^2 + (s-d)^2}\right)}{2\ln\left(\frac{s}{GMR}\right)} I_s \quad (2.18)$$

โดยที่	I_l	คือ	ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่ไหลในลูป [A]
	h	คือ	ระยะห่างแนวตั้งระหว่างลูปตัวนำกับสายส่งกำลังไฟฟ้า [m]
	d	คือ	ระยะห่างสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้น [m]
	s	คือ	ระยะห่างระหว่างลูปตัวนำ [m]
	I_s	คือ	กระแสที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้น [A]

GMR คือ รัศมีเฉลี่ยทางเรขาคณิต

2.7.2 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield)

สำหรับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) เป็นการใช้วัสดุที่มีสภาพนำหรือความนำไฟฟ้าสูง ๆ เช่น ทองแดง มีความนำไฟฟ้า เท่ากับ 58×10^6 S/m อลูมิเนียม มีความนำไฟฟ้า เท่ากับ 38.2×10^6 S/m เป็นต้น โดยหลักการ เมื่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน 3 เฟส สร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อนำชีลด์ตัวนำวางบนสนามแม่เหล็กดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุตัวนำดังกล่าวตามกฎของฟาราเดย์ จากนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) บนผิวของชีลด์ตัวนำ ซึ่งกระแสไหลวนจะสร้างสนามแม่เหล็กมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนจึงมีค่าลดลง

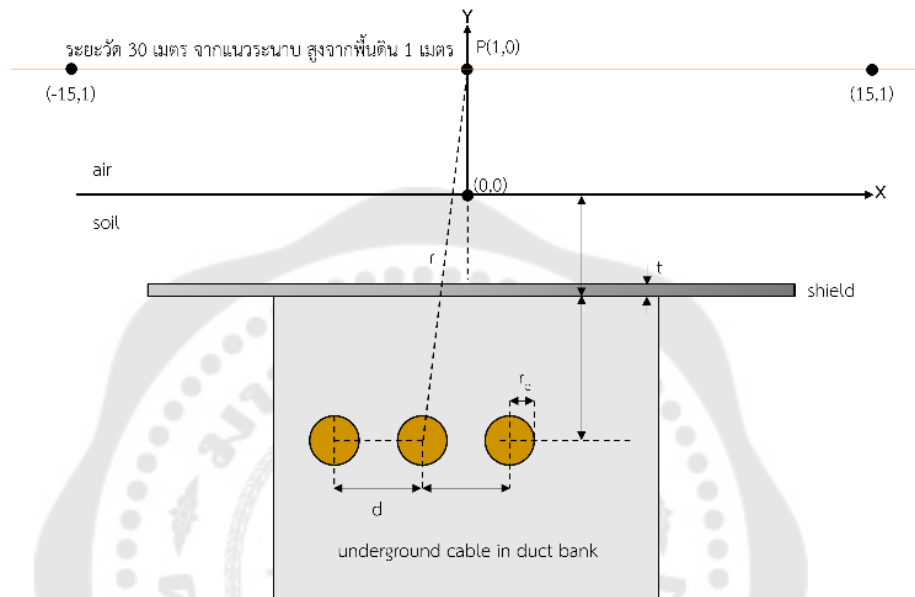


ภาพประกอบ 11 เทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield)

ที่มา: Bravo-Rodríguez J, del-Pino-López J, Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. Energies. 2019;12(7).

สำหรับวัสดุตัวนำที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงจำเป็นต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อติดตั้งไว้ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่อาจส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าได้ แม้ว่าข้อเท็จจริงดังกล่าวโดยทั่วไปแล้วอาจไม่สำคัญมากนัก แต่บางครั้งจำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพื่อคำนวณการถ่ายเทพลังงาน (energy transfer) และการสูญเสีย (loss) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความคุ้มค่าของการลงทุน อย่างไรก็ตามชีลด์ตัวนำมีข้อดีในการลดความเสี่ยงในการบำรุงรักษา เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสามารถป้องกันผลกระทบทางกลที่อาจเกิดขึ้นได้

การออกแบบชีลด์ตัวนำให้สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นสามารถออกแบบโดยพิจารณาได้หลายปัจจัย เช่น ขนาดของแผ่นชีลด์ รูปแบบของแผ่นชีลด์ รวมถึงความหนาของแผ่นชีลด์ โดย (19) ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กหลังจากใช้เทคนิคการลดทอนดังกล่าว ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.19)



ภาพประกอบ 12 ไดอะแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กสำหรับเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำและชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก

$$B = \frac{\sqrt{3}\mu_o Id}{\pi r^3} \left| \frac{2\sqrt{2}\mu_r \delta}{e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}}} \right| \quad (2.19)$$

โดยที่	I	คือ	กระแสที่ของสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้น [A]
	r	คือ	ระยะห่างระหว่างสายตัวนำกับจุดที่พิจารณาวัดค่าสนามแม่เหล็ก [m]
	d	คือ	ระยะห่างสายส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้น [m]
	t	คือ	ความหนาของแผ่นชีลด์ [mm]
	δ	คือ	ค่าความลึกในการซึมผ่านพื้นผิว [m]
	μ_o	คือ	ค่าความซาบซึมในสุญญากาศ [H/m]
	μ_r	คือ	ค่าความซาบซึมสัมพัทธ์ของวัสดุ

ในการหาความหนาของแผ่นซีดี จะต้องแปลงรูปสมการ เพื่อหาค่า t และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ กำหนดให้ k แทนสมการ (2.20)

$$k = \left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| \quad (2.20)$$

ให้ $x = (1+j)\frac{t}{\delta}$ และ $e^x = u$ และเมื่อแทนค่า u ในสมการ (2.20) จะได้ว่า

$$k = \left| u - \frac{1}{u} \right| \quad (2.21)$$

จาก $|A| = k$, $A = +k, -k$ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ค่า (+)

$$k = u - \frac{1}{u} \quad (2.22)$$

คูณ u ทั้งสองข้างของสมการ จะได้ตั้งสมการ (2.23)

$$u^2 - 1 = uk \quad (2.23)$$

$$u^2 - uk - 1 = 0 \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) เปลี่ยนให้อยู่ในรูป $ax^2 + bx + c = 0$, $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ จะได้ตั้งสมการ (2.25)

$$u = \frac{k \pm \sqrt{k^2 - 4(1)(1)}}{2(1)} \quad (2.25)$$

$$u = \frac{k \pm \sqrt{k^2 - 4}}{2} \quad (2.26)$$

เลือกค่า $u > 0$ จะได้ว่า

$$e^x = u \quad (2.27)$$

จากนั้นใส่ \ln ทั้งสองข้างของสมการ

$$x \ln e = \ln u \quad (2.28)$$

$$x = \ln u \quad (2.29)$$

แทนค่า x ในสมการ (2.29) จะได้ตั้งสมการ (2.30)

$$(1+j)\frac{t}{\delta} = \ln u \quad (2.30)$$

ย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า t จะได้ดังสมการ (2.31)

$$t = \frac{\delta \ln u}{(1+j)} \quad (2.31)$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการ สูตรท้ายจะได้สมการหาความหนาของแผ่นชีลด์

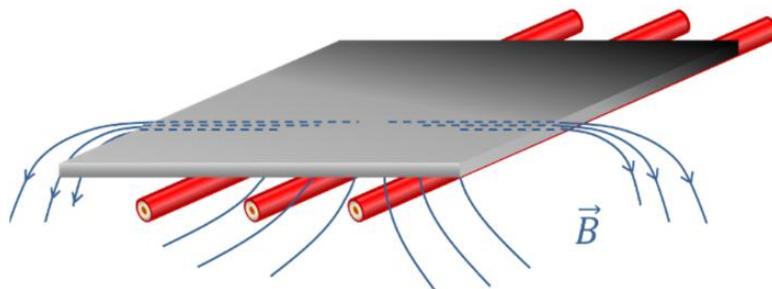
$$t = \frac{\delta \ln \left(\frac{k + \sqrt{k^2 + 4}}{2} \right)}{(1+j)} \quad (2.32)$$

$$t = \frac{\delta \ln \left(\frac{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| + \sqrt{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|^2 + 4}}{2}}{(1+j)} \right)}{(1+j)} \quad (2.33)$$

2.7.3 เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

ในกรณีนี้จะไม่มีการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเพื่อหักล้างกันเหมือนกับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนเส้นทางจากการเดินทางในอากาศมาเดินทางและเคลื่อนที่ไหลวนอยู่ในแผ่นชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กแทน ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซับเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุแม่เหล็กหรือ ferromagnetic เป็นวัสดุที่มีค่าความซาบซึมได้ หรือ μ , สูง ๆ เช่น เหล็กกล้า ซิลิกอน เป็นต้น โดยเมื่อวางแผ่นชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กลงในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดิน ความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณผิวของวัสดุแม่เหล็ก จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข 2 ประการ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กต้องต่อเนื่องกันตลอดในวัสดุแม่เหล็กและอากาศ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กต้องต่อเนื่องกันตลอดในวัสดุแม่เหล็กและอากาศ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎของเกาส์ เมื่อความแตกต่างของความซาบซึมได้ระหว่างวัสดุแม่เหล็กและอากาศมีมาก จึงเป็นสาเหตุให้ทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก และทิศทางของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณผิวรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพประกอบ 13 อย่างไรก็ตามการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุแม่เหล็กยังขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นชีลด์ด้วย

เช่นกัน ถ้าแผ่นชีลด์มีความหนามาก ฟลักซ์แม่เหล็กจะสามารถผ่านเข้าไปสู่วัสดุแม่เหล็กได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กบริเวณอากาศที่สามารถวัดได้มีค่าน้อยลง



ภาพประกอบ 13 เทคนิคการลดทอนด้วยวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

ที่มา: Bravo-Rodríguez J, del-Pino-López J, Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*. 2019;12(7).

สำหรับการลดทอนด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กนั้นมีความความสูญเสียต่ำกว่าการชีลด์ด้วยตัวนำ แต่อย่างไรก็ตามมีโอกาสเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อพิกัดของกระแส (ampacity) และการชีลด์ด้วยวิธีนี้เป็นการป้องกันผลกระทบทางกลที่ดีเช่นกัน แต่มีข้อเสียในการซ่อมบำรุงที่ยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การชีลด์ด้วยตัวนำ ปฏิกริยาระหว่างชีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กกับแหล่งจ่ายอาจก่อให้เกิดความเค้นทางกล (mechanical stress) ในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจร (short circuit) และการสั้นสะพานภายใต้เงื่อนไขของสภาวะการทำงานปกติทั่วไป ในการออกแบบชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กสามารถออกแบบได้จากหลายพารามิเตอร์ เช่นเดียวกับการออกแบบชีลด์ตัวนำ และในกรณีที่ต้องการหาค่าความหนาของแผ่นชีลด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.33) เช่นเดียวกับการออกแบบชีลด์ตัวนำ

2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) จัดเป็นหนึ่งในเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ เพื่อหาคำตอบโดยประมาณของปัญหาที่สนใจ ซึ่งมักถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ได้ถูกค้นพบและพัฒนาอย่างยาวนานกว่า 150 ปี หนึ่งในผู้ค้นพบ คือ Ray William Clough ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโครงสร้าง สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) โดยหลักการแล้วจะแบ่งโดเมนของโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ (element) หรือองค์ประกอบย่อย ๆ ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะกระจายตัวอยู่ในแบบจำลอง การกระจายตัวดังกล่าวแทนตัวแปรที่พิจารณา โดยแต่ละตำแหน่งที่เอลิเมนต์กระจายตัวจะมีค่าไม่เท่ากัน ระเบียบวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีจุดเด่น คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น การวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงาน (heat transfer) ของไหล (fluids) รวมถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาเชิงขอบเขตได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็มีข้อเสีย หรือ ข้อควรระวังในการใช้งานเช่นกัน เช่น ระเบียบวิธีนี้เป็นการประมาณเชิงตัวเลข ซึ่งอาจมีการคลาดเคลื่อนได้เสมอ ทั้งจากการเก็บค่าเลขนัยสำคัญผิดพลาด การสะสมของตำแหน่งทศนิยม การวิเคราะห์ปัญหาควรเลือกใช้คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมที่น่าเชื่อถือ มีสมรรถนะในการใช้งานที่ดี เพื่อให้คำตอบของปัญหาดังกล่าวมีความแม่นยำ นอกจากนี้การจำลองปัญหาจำเป็นต้องเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม การกำหนดขนาดที่สอดคล้องกับปัญหาจริง สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

2.8.1 การเตรียมแบบจำลอง เป็นการสร้างรูปร่างของแบบจำลองหรือปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ แบ่งเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่ประกอบไปด้วยโนด (node) จำนวนมาก กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

2.8.2 ขั้นตอนการหาคำตอบ โดยคำตอบที่จากขั้นตอนนี้เป็นค่ากระจัดที่โนดต่าง ๆ ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาหรือคำตอบของสมการที่อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น

2.8.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ คือ ผลลัพธ์ที่สนใจ เช่น งานวิจัยนี้สนใจผลลัพธ์ของค่าสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทยเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อเป็นการป้องกันและลดผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพของมนุษย์ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถควบคุมค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอกรอบแนวความคิด ขั้นตอนการดำเนินงาน และแนวทางการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

3.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

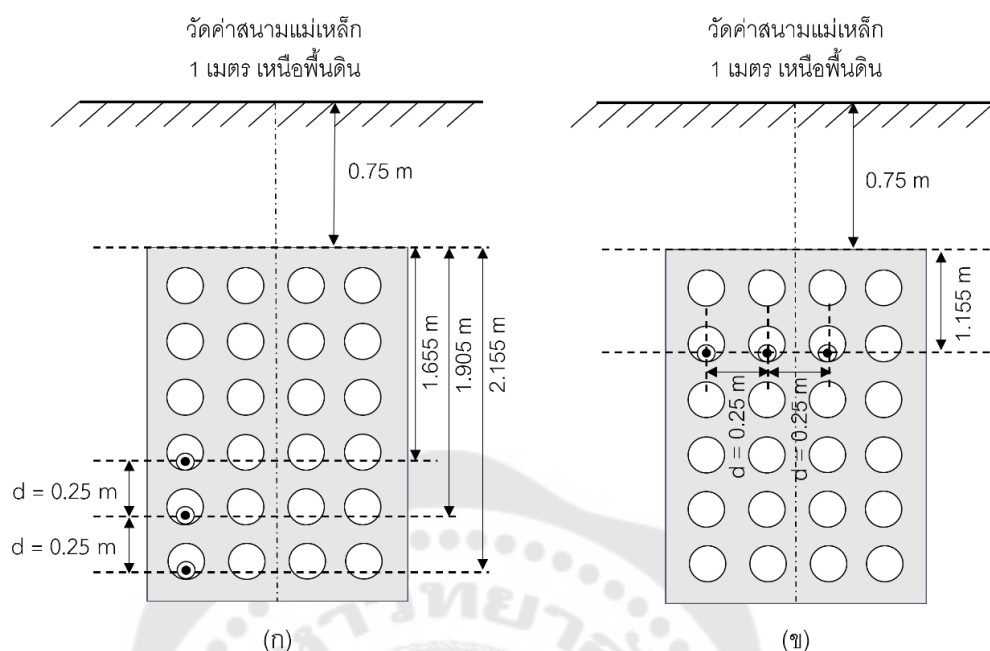
ตามที่ได้กล่าวไปในบทก่อนหน้า เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กมีด้วยกันหลายวิธี และแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ จะนำเสนอเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย จำนวน 3 เทคนิค ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีศึกษาจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง ที่ระดับแรงดัน 69 kV 3 เฟส 1 วงจร สายส่งเป็นสาย XLPE ที่มีขนาดกระแสไหลในแต่ละสาย เท่ากับ 1,063 A วางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 ซึ่งฝังอยู่ใต้ดินเป็นระยะ 0.75 เมตร สายส่งแต่ละเส้นวางห่างกัน 0.25 เมตร โดยจุดวัดหรือจุดที่พิจารณา ค่าสนามแม่เหล็กจะวัดเหนือจากระดับพื้นดิน 1 เมตร เป็นระยะ 30 เมตร (-15,15) ตามแนวแกน x

สำหรับการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กในงานวิจัยนี้จะออกแบบสำหรับรูปแบบการจัดเรียงสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน 2 รูปแบบ ซึ่งเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยของ กนกวรรณ ประทีปศิริ ญัญจิกา เทียมเสมอ และสุภาสินี นุ่นชื่น (8) ตามที่กล่าวไปในการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยงานวิจัยดังกล่าวเป็นการศึกษาการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วย intrinsic techniques แบบการจัดเรียงเฟส (phase arrangement) สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง โดยผลการศึกษานำเสนอรูปแบบการจัดเรียงเฟสของสายส่งสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงแบบ 1 วงจรที่ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุด (best case) และรูปแบบการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงที่สุด (worst case) แสดงดังภาพประกอบ 1 โดยสายส่งดังกล่าวจัดเรียงอยู่ในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ฝังอยู่ใต้ดิน

ที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.75 เมตร และสามารถแบ่งรูปแบบการจัดเรียงเฟสออกเป็น 4 รูปแบบ โดย (ก) และ (ข) เป็นรูปแบบที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กต่ำที่สุด (best case) ส่วน (ค) และ (ง) เป็นรูปแบบการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงที่สุด (worst case) ซึ่งผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กมีค่าระหว่าง 0.869 μT และ 16.12 μT

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำรูปแบบการจัดเรียงเฟส (phase arrangement) ข้างต้น มาประยุกต์สำหรับการศึกษาแนวทางการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็ก โดยแสดงดังภาพประกอบ 14 (ก) ไดอะแกรมรูปแบบการจัดเรียงสายส่งที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุด โดยวางสายส่งจะเรียงในแนว vertical ที่ด้านซ้ายล่างสุดของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ในที่นี้จะแทนกรณีดังกล่าวว่า “best case” และภาพประกอบ 14 (ข) เป็นการเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงสายส่งที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุด โดยได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางสายส่งจากงานวิจัยก่อนหน้า (8) ที่วางในแนว vertical เป็น horizontal :ซึ่งวางสายส่งในตำแหน่งใกล้กับจุดวัดมากที่สุด เพราะในทางทฤษฎียิ่งสายส่งซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กวางใกล้กับจุดที่พิจารณาเท่าไร ยิ่งส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้มีค่ามากขึ้น โดยจะเรียกกรณีดังกล่าวว่า “worst case” สำหรับการออกแบบและจำลองเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กจะมีเงื่อนไขในการพิจารณา ดังนี้

- พื้นดินไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาแม่เหล็กในสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน
- ละเว้นการพิจารณาผลกระทบของกระแสเหนี่ยวนำบนปลอกหุ้มต่อการเกิดสนามแม่เหล็ก
- สายส่งแต่ละเส้นเป็นเส้นตรงและมีความยาวเป็นอนันต์
- การออกแบบลูปและซีลด์จะออกแบบให้มีขนาดเท่ากับความกว้างของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) เท่านั้น โดยลูปและซีลด์จะวางอยู่เหนือบนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6
- กำหนดให้ค่ากระแสที่ไหลในสายส่งทุกเส้นมีค่าเท่ากับ 1,063 A



ภาพประกอบ 14 ไดอะแกรมกรณีศึกษาสำหรับการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก

(ก) best case และ (ข) worst case

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย จะประกอบไปด้วย 7 ขั้นตอน แสดงดังภาพประกอบ 15 สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1.1 ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทย เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็ก รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 วิเคราะห์สมการสนามแม่เหล็กสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินก่อนการลดทอน และสมการสนามแม่เหล็กสำหรับการลดทอนด้วยลูปตัวนำ ซีลด์ตัวนำ และซีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก

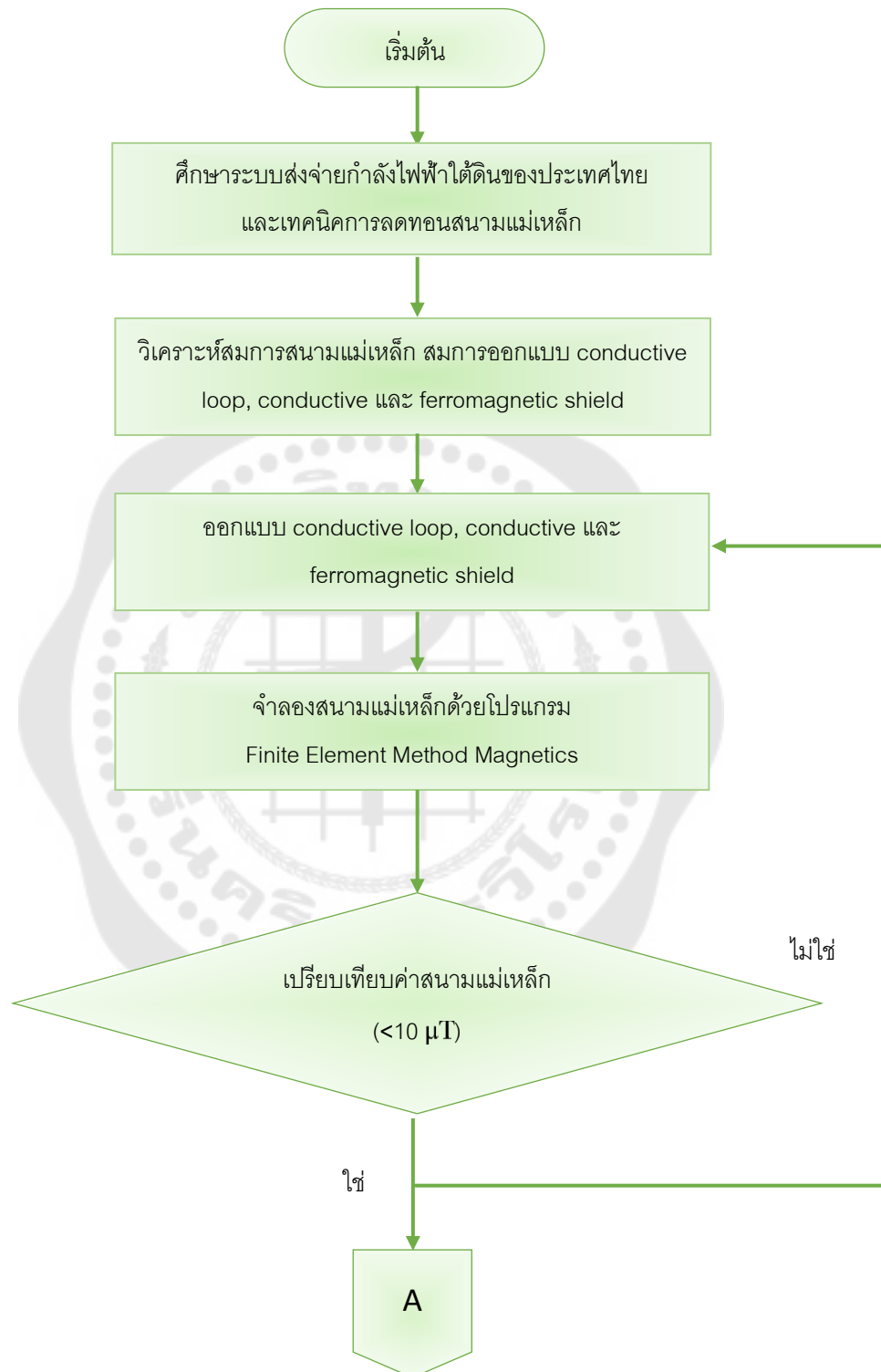
3.1.3 ออกแบบลูปตัวนำ ซีลด์ตัวนำ และซีลด์ที่ทำจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก โดยกำหนดให้ค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนต้องน้อยกว่า $10 \mu\text{T}$

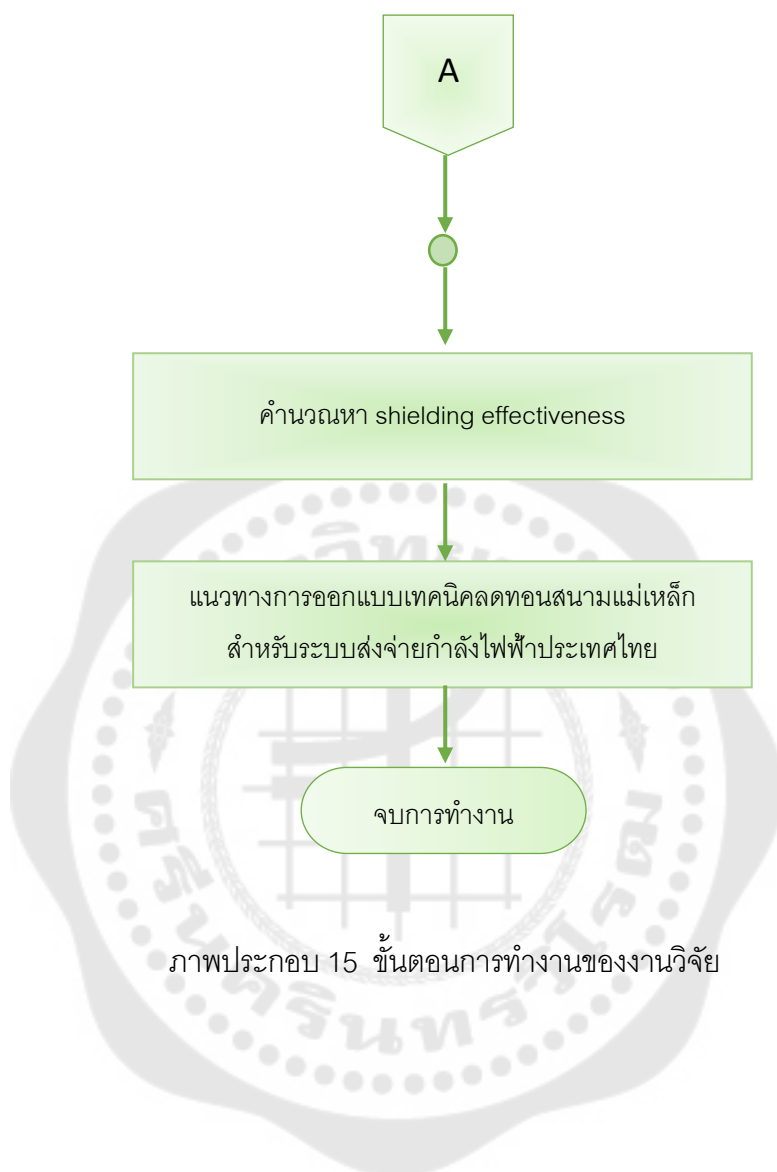
3.1.4 จำลองสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

3.1.5 เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กหลังจากการลดทอนโดยอ้างอิงจากมาตรฐานสหภาพยุโรป ($10 \mu\text{T}$)

3.1.6 คำนวณหาประสิทธิภาพของการลดทอนสนามแม่เหล็ก

3.1.7 นำเสนอแนวทางการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย โดยเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กก่อนและหลังการลดทอน รวมถึงประสิทธิภาพของการลดทอน

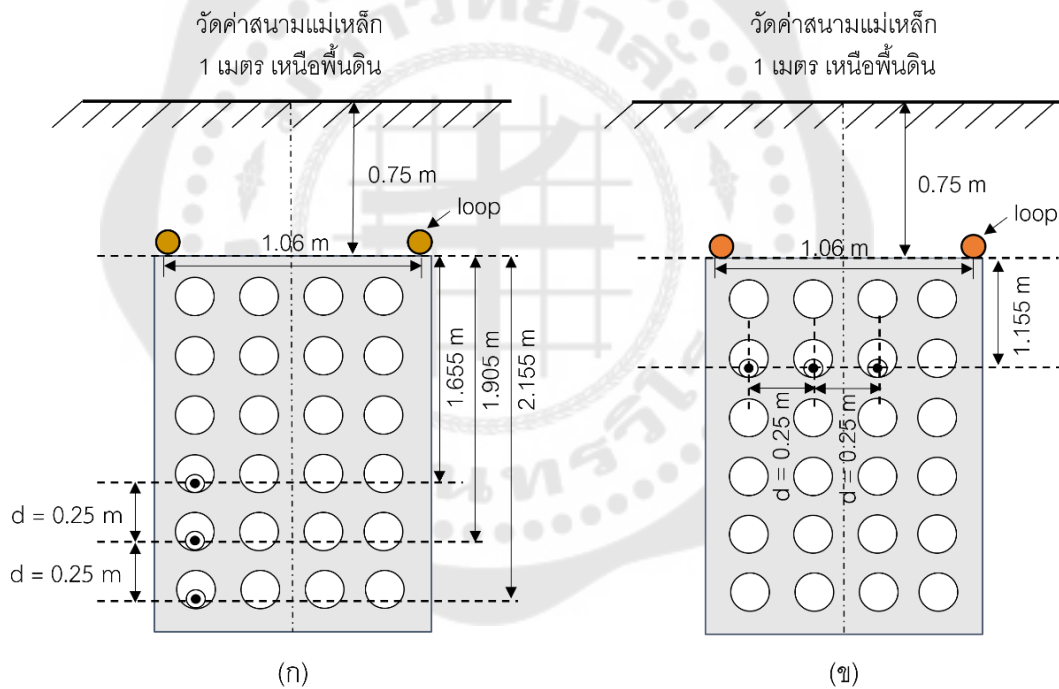




3.2 การออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)

สำหรับการออกแบบการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ จะใช้ลูปตัวนำที่ทำจากวัสดุ 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน ได้แก่ ลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงและลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม โดยลูปตัวนำจะวางไว้บน duct bank ขนาด 4 x 6 ดังภาพประกอบ 16 (ก) และ (ข) ซึ่งการลดทอนสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องเลือกลูปที่มีขนาดที่เหมาะสม โดยใช้สมการ (3.1) ในการหาค่ากระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลูปตัวนำ

$$I_l = \frac{-\ln\left(\frac{h^2 + (s+d)^2}{h^2 + (s-d)^2}\right)}{2\ln\left(\frac{s}{GMR}\right)} (I_s) \quad (3.1)$$



ภาพประกอบ 16 ไดอะแกรมจำลองการลดทอนด้วยลูปตัวนำโดยวางบนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank)

(ก) best case และ (ข) worst case

3.2.1 การออกแบบลูปตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ best case

สำหรับกรณีที่ 1 best case แทนค่าพารามิเตอร์จากภาพประกอบ 16 (ก) ได้แก่
 $s = 1.06 \text{ m}$ $d = 0.25 \text{ m}$ $h = 1.905 \text{ m}$ $I = 1063 \text{ A}$ ลงในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$I_l = \frac{-\ln\left(\frac{h^2 + (s+d)^2}{h^2 + (s-d)^2}\right)}{2\ln\left(\frac{s}{GMR}\right)}(I_s)$$

$$I_l = \frac{-\ln\left(\frac{1.905^2 + (1.06 + 0.5)^2}{1.905^2 + (1.06 - 0.5)^2}\right)}{2\ln\left(\frac{1.06}{0.7788(0.017)}\right)}(1063)$$

$$I_l = -52.22 \text{ [A]}$$

ดังนั้น ค่ากระแสเหนี่ยวนำในลูปตัวนำ สำหรับกรณีของ best case มีค่าเท่ากับ 52.22 A โดยทิศทางการไหลสวนทางกับกระแสที่ไหลในสายส่ง จากค่ากระแสที่ได้นำไปเปิดตารางมาตรฐานสายไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายส่งที่จะนำมาใช้เป็นลูปตัวนำ จะได้ว่า สาย XLPE ที่จะนำมาใช้เป็นลูปตัวนำมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของสาย เท่ากับ 6 mm^2 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.1 mm

3.2.2 การออกแบบลูปตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับกรณีที่ 2 worst case แทนค่าพารามิเตอร์จาก ภาพประกอบ 16 (ข)
 $s = 1.161 \text{ m}$ $d = 0.5 \text{ m}$ $h = 1.06 \text{ m}$ $I = 1063 \text{ A}$ ลงในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$I_l = \frac{-\ln\left(\frac{1.161^2 + (1.06 + 0.5)^2}{1.161^2 + (1.06 - 0.5)^2}\right)}{2\ln\left(\frac{1.06}{0.7788(0.017)}\right)}(1063)$$

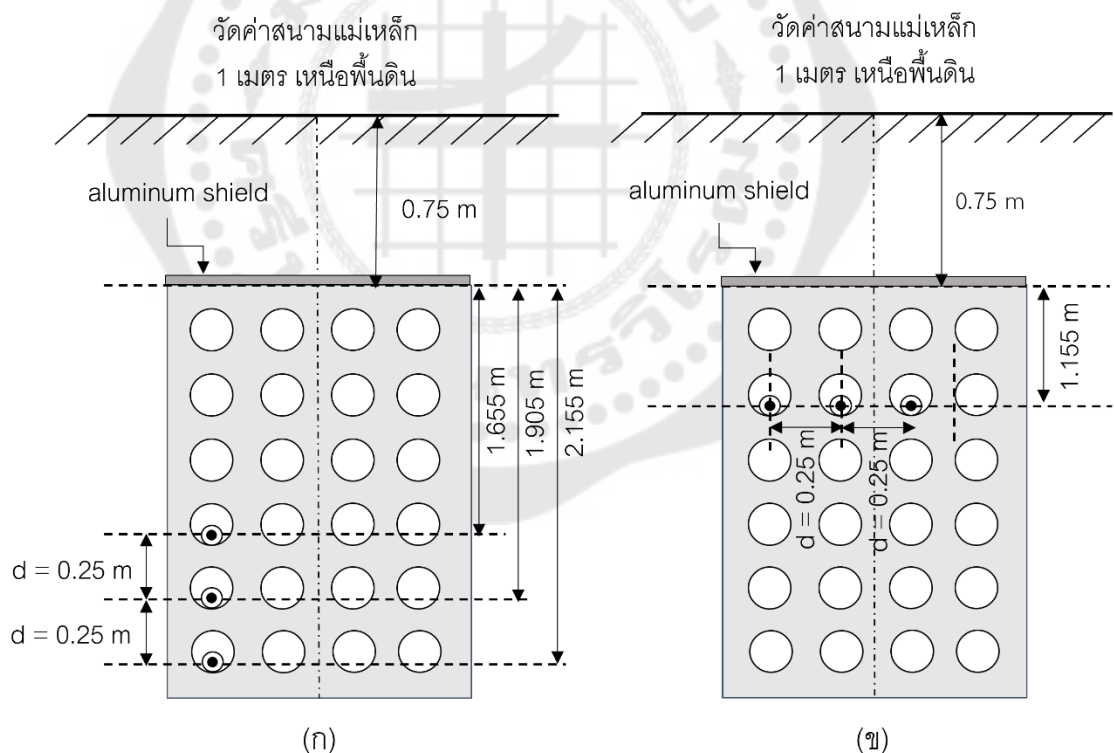
$$I_l = -99.74 \text{ [A]}$$

ดังนั้น ค่ากระแสเหนี่ยวนำในลูปตัวนำ สำหรับกรณีของ worst case มีค่าเท่ากับ 99.74 A โดยทิศทางการไหลสวนทางกับกระแสที่ไหลในสายส่ง จากค่ากระแสที่ได้นำไปเปิดตารางมาตรฐานสายไฟฟ้าของประเทศไทย เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายส่งที่จะนำมาใช้เป็น

ลูปตัวนำ จะได้ว่า สาย XLPE ที่จะนำมาใช้เป็นลูปตัวนำมีขนาดพื้นที่หน้าตัด เท่ากับ 10 mm^2 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.7 mm

3.3 การออกแบบเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield)

สำหรับการออกแบบการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำนั้น จะออกแบบแผ่นชีลด์ให้มีขนาดเท่ากับความกว้างของ duct bank โดยวางในแนวระนาบเหนือท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) สำหรับการศึกษาก็จะแบ่งเป็น 2 รูปแบบเช่นเดียวกันดังภาพประกอบ 17 (ก) best case และ (ข) worst case ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้ชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมในการศึกษา เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูกกว่าทองแดง และในทางปฏิบัติ การใช้แผ่นทองแดงมีโอกาสเสี่ยงถูกขโมยได้ง่ายกว่าค่อนข้างมาก โดยการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์อลูมิเนียมจำเป็นต้องคำนวณหาความหนาของแผ่นชีลด์ ซึ่งจากสมการที่ (3.2) เปลี่ยนรูปสมการเพื่อหาความหนาของแผ่นชีลด์จะได้ตั้งสมการที่ (3.3)



ภาพประกอบ 17 ไตอะแกรมการจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (อลูมิเนียม)

(ก) best case และ (ข) worst case

$$B = \frac{\sqrt{3}\mu_0 Id}{\pi r^3} \frac{2\sqrt{2}\mu_r \delta}{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|} \quad (3.2)$$

$$t = \frac{\delta \ln \left(\frac{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| + \sqrt{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|^2 + 4}}{2} \right)}{(1+j)} \quad (3.3)$$

3.3.1 การออกแบบขีลัดตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ best case

สำหรับการหาความหนาของแผ่นขีลัดลุ่มิเนียม จะต้องคำนวณหาค่าความลึกผิว (skin depth) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความหนาของแผ่นขีลัดลุ่มิเนียม โดยแทนค่าพารามิเตอร์จากภาพประกอบ 17 (ก) ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่า

คำนวณหาค่า skin depth:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_n \mu_0 \mu_r f}}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi (38.2 \times 10^6) (4\pi \times 10^{-7}) (1) (50)}}$$

$$\delta = 0.012 \text{ [m]}$$

เมื่อได้ค่า skin depth แล้ว จะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่าความหนาของแผ่นขีลัด

$$(10 \times 10^{-6}) = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(2.71)^3} \frac{2\sqrt{2}(1)(0.012)}{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25) 2\sqrt{2}(1)(0.012)}{\pi(2.71)^3 (10 \times 10^{-6})}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = 0.0314$$

$$\left| u - \frac{1}{u} \right| = 0.0314$$

$$u - \frac{1}{u} = 0.0314$$

$$u^2 - 0.0314u - 1 = 0$$

$$u = \frac{-(-0.0314) + \sqrt{(-0.0314)^2 - 4(1)(-1)}}{2(1)}$$

$$u = \frac{(0.0314) + 2.0002}{2(1)}$$

$$u = 1.0158$$

$$t = \left| (9.4059 \times 10^{-5}) - j(9.4059 \times 10^{-5}) \right|$$

$$t = 1.3302 \times 10^{-4} = 0.1330 \text{ [mm]}$$

ดังนั้น สำหรับชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมจะต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 0.1330 มิลลิเมตร จึงจะสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้มีค่าต่ำกว่า 10 μT ได้

3.3.2 การออกแบบชีลด์ตัวนำสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับกรณีการจัดวางสายแบบ worst case การหาความหนาของแผ่นชีลด์อลูมิเนียม จะดำเนินการเช่นเดียวกับการจัดเรียงสายแบบ best case โดยจะต้องคำนวณหาค่าความลึกผิว (skin depth) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความหนาของแผ่นชีลด์อลูมิเนียม โดยแทนค่าพารามิเตอร์จากภาพประกอบ 17 (ข) ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่า

คำนวณหาค่า skin depth:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_n \mu_o \mu_r f}}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi(38.2 \times 10^6)(4\pi \times 10^{-7})(1)(50)}}$$

$$\delta = 0.012 \text{ [m]}$$

เมื่อได้ค่า skin depth แล้ว จะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่าความหนาของแผ่นซีลด์

$$(10 \times 10^{-6}) = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(1.61)^3} \frac{2\sqrt{2}(1)(0.012)}{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(1.61)^3} \frac{2\sqrt{2}(1)(0.012)}{(10 \times 10^{-6})}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = 0.1497$$

$$\left| u - \frac{1}{u} \right| = 0.1497$$

$$u - \frac{1}{u} = 0.1497$$

$$u^2 - 0.1497u - 1 = 0$$

$$u = \frac{-(-0.1497) + \sqrt{(-0.1497)^2 - 4(1)(-1)}}{2(1)}$$

$$u = \frac{(0.1497) + 2.0055}{2(1)}$$

$$u = 1.0776$$

$$t = \frac{(0.012) \ln(1.0776)}{(1+j)}$$

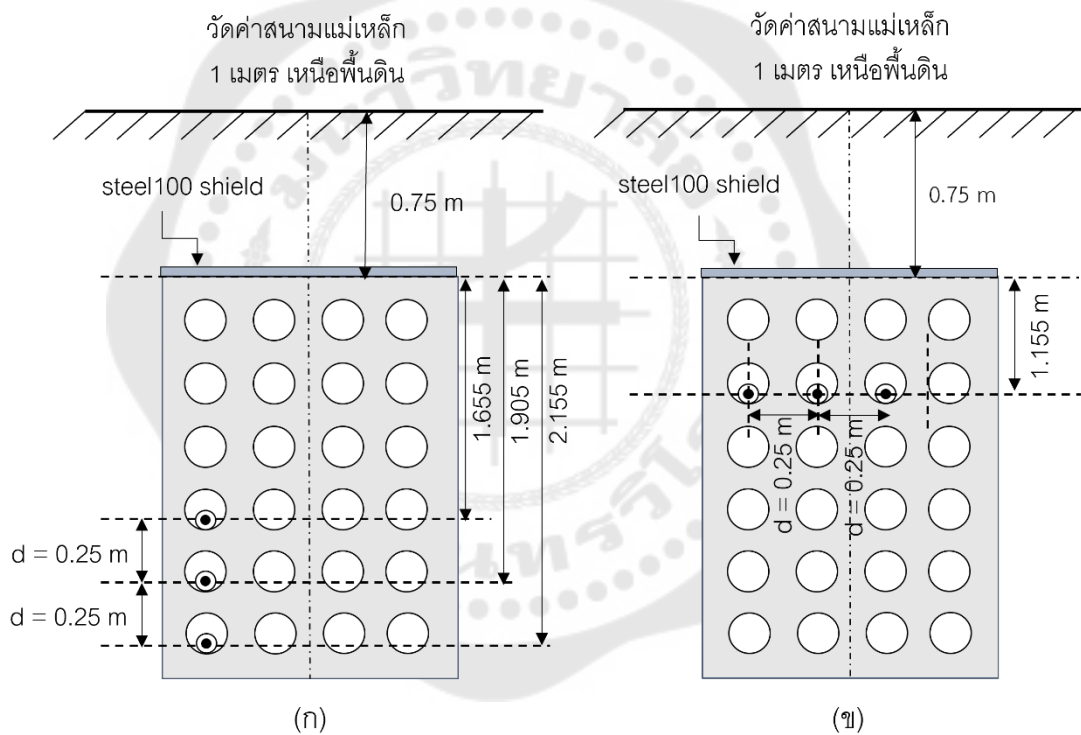
$$t = \left| (4.4842 \times 10^{-4}) - j(4.4842 \times 10^{-4}) \right|$$

$$t = 6.3416 \times 10^{-4} = 0.6345 \text{ [mm]}$$

ดังนั้น สำหรับซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมจะต้องใช้ความหนาน้อยกว่า 0.6345 มิลลิเมตร จึงจะสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้ค่าต่ำกว่า 10 μT

3.4 การออกแบบเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

สำหรับการออกแบบการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กนั้น จะออกแบบแผ่นชีลด์ให้มีขนาดเท่ากับความกว้างของ duct bank เช่นเดียวกับกรณีของรูปตัวนำ และชีลด์ตัวนำ โดยวางในแนวระนาบเหนือ duct bank สำหรับการศึกษาค่าจะแบ่งเป็น 2 กรณี ดังภาพประกอบ 18 (ก) best case และ (ข) worst case ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้ชีลด์ที่ทำจาก เหล็กกล้า หรือ steel100 ในการศึกษา โดยการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ steel100 จำเป็นต้องคำนวณหาความหนาของแผ่นชีลด์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) และ เปลี่ยนรูปสมการเพื่อหาค่าความหนาของแผ่นชีลด์จะได้ดังสมการที่ (3.3)



ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมการจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (steel100) โดยวางบนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) (ก) best case และ (ข) worst case

3.4.1 การออกแบบซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กสำหรับการจัดวางสายแบบ best case

สำหรับการหาความหนาของแผ่นซีลด์ steel100 จะต้องคำนวณหาค่าความลึกผิว (skin depth) ก่อนเช่นเดียวกับเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยซีลด์ตัวนำ จากนั้นจึงคำนวณหาความหนาของแผ่นซีลด์ โดยแทนค่าพารามิเตอร์จากภาพประกอบ 18 (ก) ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่าคำนวณหาค่า skin depth:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_n \mu_o \mu_r f}}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi (1.11 \times 10^6) (4\pi \times 10^{-7}) (100) (50)}}$$

$$\delta = 6.7558 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

เมื่อได้ค่า skin depth แล้ว จะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหาความหนาของแผ่นซีลด์

$$(10 \times 10^{-6}) = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(2.71)^3} \frac{2\sqrt{2}(1)(6.7558 \times 10^{-3})}{\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right|}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(2.71)^3} \frac{2\sqrt{2}(100)(6.7558 \times 10^{-3})}{(10 \times 10^{-6})}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = 1.7736$$

$$\left| u - \frac{1}{u} \right| = 1.7736$$

$$u - \frac{1}{u} = 1.7736$$

$$u^2 - 1.7736u - 1 = 0$$

$$u = \frac{-(-1.7736) + \sqrt{(-1.7736)^2 - 4(1)(-1)}}{2(1)}$$

$$u = \frac{(1.7736) + 2.6731}{2(1)}$$

$$u = 2.2234$$

$$t = |(2.6991 \times 10^{-3}) - j(2.6991 \times 10^{-3})|$$

$$t = 3.8171 \times 10^{-3} = 3.8171 \text{ [mm]}$$

ดังนั้น สำหรับซีลด์ที่ทำจาก steel100 จะต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 3.8171 มิลลิเมตร จึงจะสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้ค่าต่ำกว่า 10 μT

3.4.2 การออกแบบซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับรูปแบบการจัดวางสายส่งแบบ worst case จะต้องคำนวณหาความหนาของแผ่นซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก โดยเริ่มจากการคำนวณหาความลึกผิว (skin depth) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณหาความหนาของแผ่นซีลด์ โดยแทนค่าพารามิเตอร์จากภาพประกอบ 18 (ข) ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่า

คำนวณหาค่า skin depth:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_n \mu_o \mu_r f}}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi (1.11 \times 10^6) (4\pi \times 10^{-7}) (100) (50)}}$$

$$\delta = 6.7558 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

เมื่อได้ค่า skin depth แล้ว จะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหาความหนาของแผ่นซีลด์

$$(10 \times 10^{-6}) = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(1.61)^3} \frac{2\sqrt{2}(1)(6.7558 \times 10^{-3})}{\left| \begin{matrix} (1+j)\frac{t}{\delta} & -(1+j)\frac{t}{\delta} \\ e & -e \end{matrix} \right|}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = \frac{\sqrt{3}(4\pi \times 10^{-7})(1063)(0.25)}{\pi(1.61)^3} \frac{2\sqrt{2}(100)(6.7558 \times 10^{-3})}{(10 \times 10^{-6})}$$

$$\left| e^{(1+j)\frac{t}{\delta}} - e^{-(1+j)\frac{t}{\delta}} \right| = 8.4302$$

$$\left| u - \frac{1}{u} \right| = 8.4302$$

$$u - \frac{1}{u} = 8.4302$$

$$u^2 - 8.4302u - 1 = 0$$

$$u = \frac{-(-8.4302) + \sqrt{(-8.4302)^2 - 4(1)(-1)}}{2(1)}$$

$$u = \frac{(0.1497) + 8.6442}{2(1)}$$

$$u = 8.5472$$

$$t = \frac{(6.7558 \times 10^{-3}) \ln(8.5472)}{(1+j)}$$

$$t = \left| (7.2476 \times 10^{-4}) - j(7.2476 \times 10^{-4}) \right|$$

$$t = 0.01025 = 10.25 \text{ [mm]}$$

ดังนั้น สำหรับชีลด์ที่ทำจาก steel100 จะต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 10.25 มิลลิเมตร
จึงจะสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้ค่าต่ำกว่า 10 μT

3.5 การจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

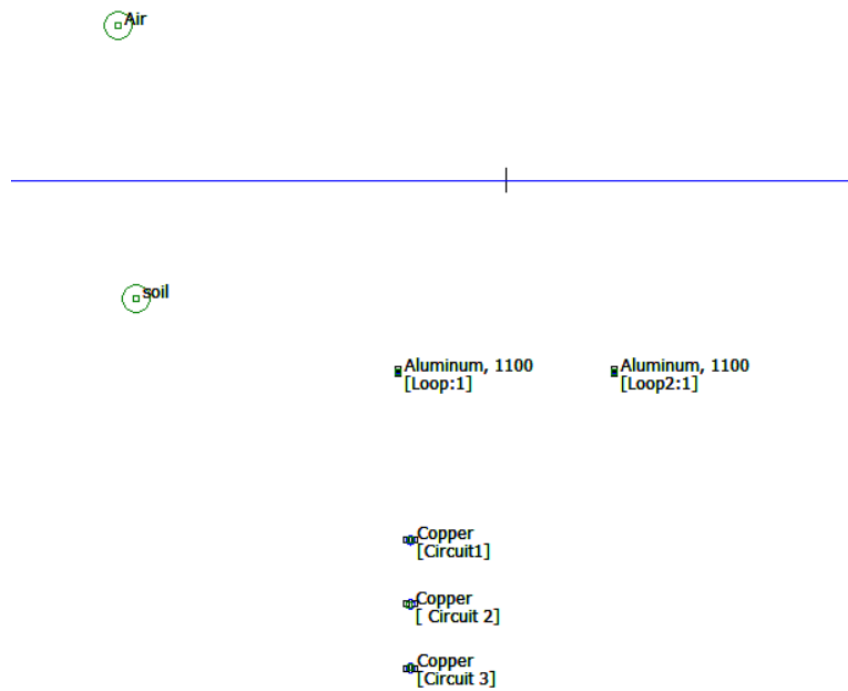
จากการออกแบบลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และ ชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) ในหัวข้อ 3.2 - 3.4 สามารถสรุปผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามรูปแบบการจัดวางสายทั้ง 2 รูปแบบ โดยจะใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ในการจำลองค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอน

3.5.1 การจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยลูปตัวนำ (conductive loop)

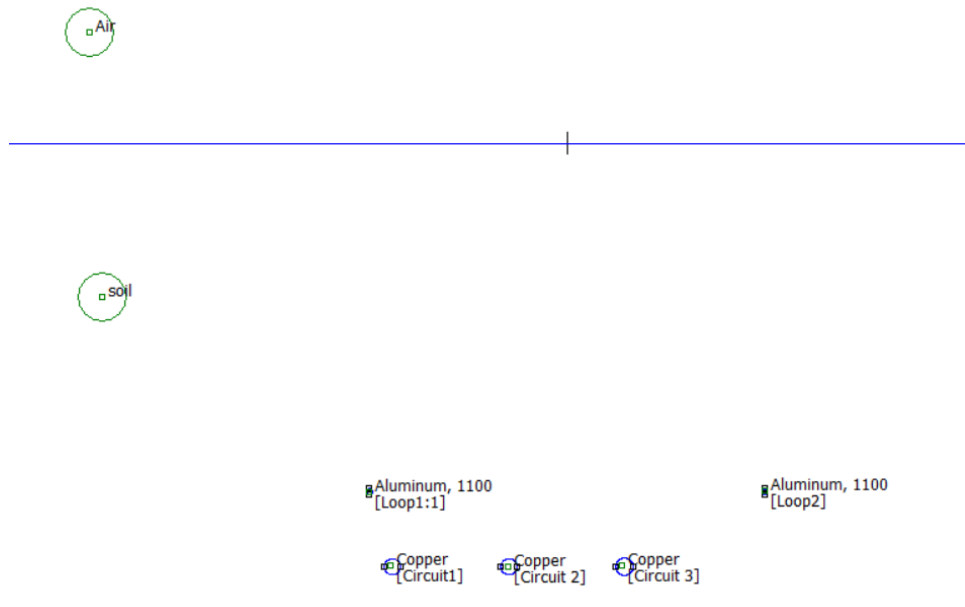
สำหรับการจำลองผลการลดทอนสนามแม่เหล็กในกรณีนี้ จะใช้ข้อมูลจากตาราง 5 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญที่ได้จากการออกแบบและคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูปตัวนำ ค่ากระแสเหนี่ยวนำในลูป ค่าความนำไฟฟ้า เป็นต้น ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับจำลองลูปตัวนำในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

พารามิเตอร์	best case	worst case
กระแสเหนี่ยวนำในลูป (A)	52.22	99.74
เส้นผ่านศูนย์กลางของลูปตัวนำ (mm)	3.1	3.7
Electrical Conductivity of Copper (S/m)	58.0 x 10 ⁶	
Electrical Conductivity of Aluminum (S/m)	38.2 x 10 ⁶	
Relative Permeability of Copper	1	
Relative Permeability of Aluminum	1	

สำหรับการจำลองเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังตาราง 5 สำหรับทั้งลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมและลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงจะกำหนดให้สาย XLPE ที่ใช้เป็นลูปตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร และกำหนดกระแสไหลในลูป เท่ากับ 52.22 A ทิศทางสวนทางกับกระแสที่ไหลในสายส่ง จากนั้นกำหนดขนาดและตำแหน่งของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) สายส่ง และลูปตัวนำจากภาพประกอบ 16 (ก) best case และ (ข) worst case โดยภาพประกอบ 19 แสดงตัวอย่างการจำลองลูปอลูมิเนียมเมื่อจัดเรียงสายแบบ best case และ ภาพประกอบ 20 เมื่อจัดเรียงสายแบบ worst case ในโปรแกรม ซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่ากระแสที่ไหลในสายส่ง ค่ากระแสที่ไหลในลูป ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด สำหรับการจำลองลูปตัวนำด้วยทองแดงจะทำเช่นเดียวกับลูปอลูมิเนียม แต่จะเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเป็นค่าเฉพาะของทองแดง



ภาพประกอบ 19 ตัวอย่างการจำลองลูปอลูมิเนียมเมื่อจัดวางสายส่งแบบ best case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)



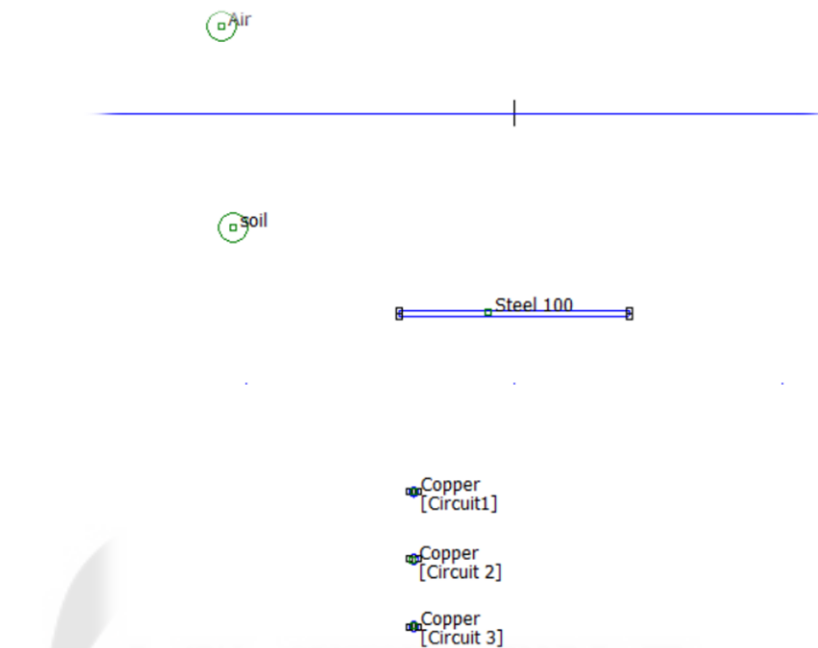
ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างการจำลองลูปอลูมิเนียมเมื่อจัดวางสายส่งแบบ worst case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

3.5.2 การจำลองเทคนิคการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield)

สำหรับการจำลองผลการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ในกรณีนี้ จะใช้ข้อมูลจากตาราง 6 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ เช่น ความหนาของแผ่นชีลด์ ค่าความนำไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับการจำลองชีลด์ตัวนำและชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน แต่มีความแตกต่างที่ความหนาและค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวัสดุ 2 ชนิด โดยในการจำลองจะกำหนดตำแหน่งและขนาดของวัสดุต่าง ๆ เช่น ตำแหน่งของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาดของแผ่นชีลด์ เป็นต้น สำหรับตัวอย่างการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 21 เมื่อจัดวางสายแบบ best case และภาพประกอบ 22 เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับจำลองในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) กรณี worst case

พารามิเตอร์	best case	worst case
ความหนาของแผ่นชีลด์อลูมิเนียม (mm)	0.1054	0.6345
ความหนาของแผ่นชีลด์ Steel100 (mm)	3.81	10.25
Electrical Conductivity of Aluminum (S/m)	38.2×10^6	
Electrical Conductivity of Steel100 (S/m)	1.11×10^6	
Relative Permeability of Aluminum	1	
Relative Permeability of Steel100	100	



ภาพประกอบ 21 ตัวอย่างการจำลองซีลด์ steel100 เมื่อจัดวางสายส่งแบบ best case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)



ภาพประกอบ 22 ตัวอย่างการจำลองซีลด์ steel100 เมื่อจัดวางสายส่งแบบ worst case ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

บทที่ 4

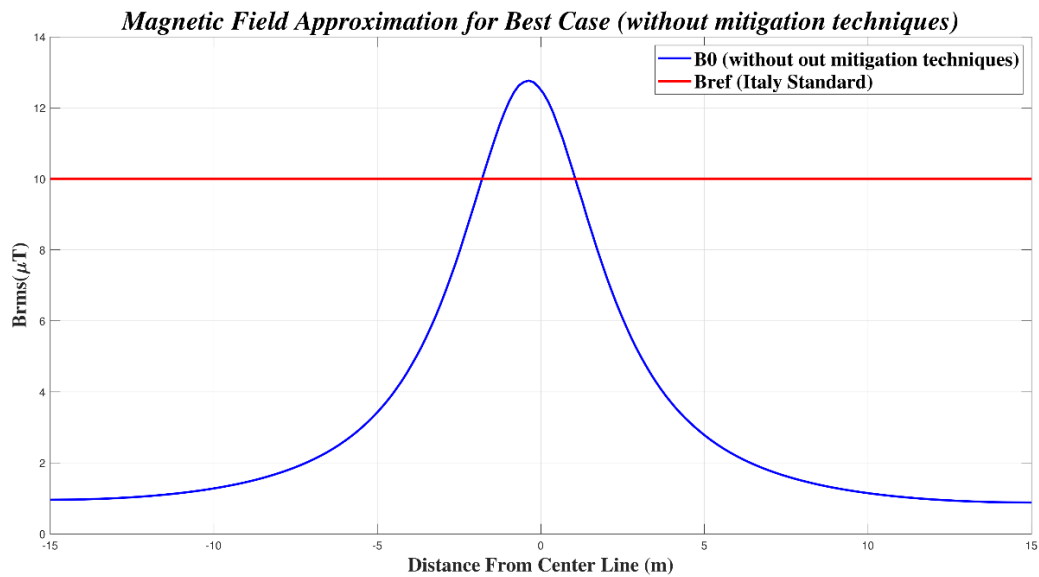
ผลการดำเนินงาน

ในส่วนของบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนและหลังการลดทอนด้วยเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กทั้ง 3 วิธี ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 รูปแบบตามการจัดวางสายส่ง ได้แก่ รูปแบบที่ 1 best case และรูปแบบที่ 2 worst case โดยก่อนการจำลองนั้นงานวิจัยนี้ได้แนะนำแนวทางการออกแบบประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของแนวทางที่เสนอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปริมาณนิพจน์ของ Pedro Daniel Vieira Morgado (20) โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณหาความหนาของแผ่นชีลด์ รวมถึงเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กจากแบบจำลองในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กที่ได้นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าเท่ากัน

4.1 การจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเมื่อจัดวางสายแบบ best case

4.1.1 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนเมื่อจัดวางสายแบบ best case

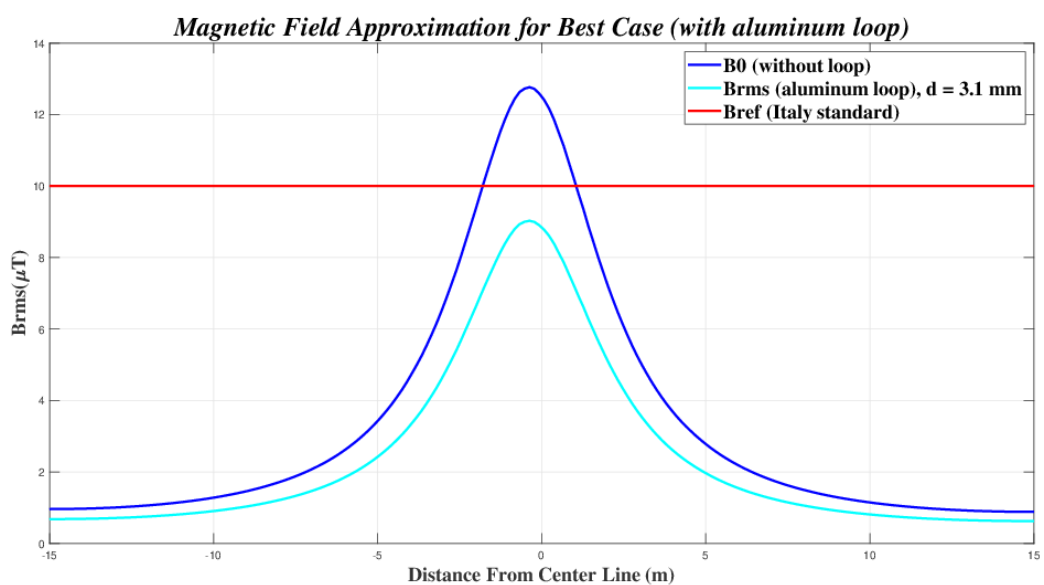
เมื่อจำลองค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน. ที่ระดับแรงดัน 69 kV 3 เฟส 1 วงจร มีขนาดกระแสไหลในสาย เท่ากับ 1,063 A วางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) แสดงค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนดังภาพประกอบ 23 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็ก โดยแกน y คือ ค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน และแกน x คือ ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง (0,0) จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน. ก่อนการลดทอน (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) มีค่าเท่ากับ 12.86 μT ณ จุดสูงสุดของกราฟ ซึ่งเกินกว่าค่าอ้างอิงของประเทศอิตาลี คือ 10 μT (กราฟเส้นสีแดง) อยู่ 2.86 μT ถือว่าเกินค่ามาตรฐานของประเทศอิตาลีเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ค่าสนามแม่เหล็กที่เกินค่าอ้างอิงเพียงเล็กน้อย เมื่อสะสมอยู่ในร่างกายเล็กน้อยเป็นเวลานาน อาจเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพได้เช่นกัน ดังนั้นเราจึงไม่ควรละเลยค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น



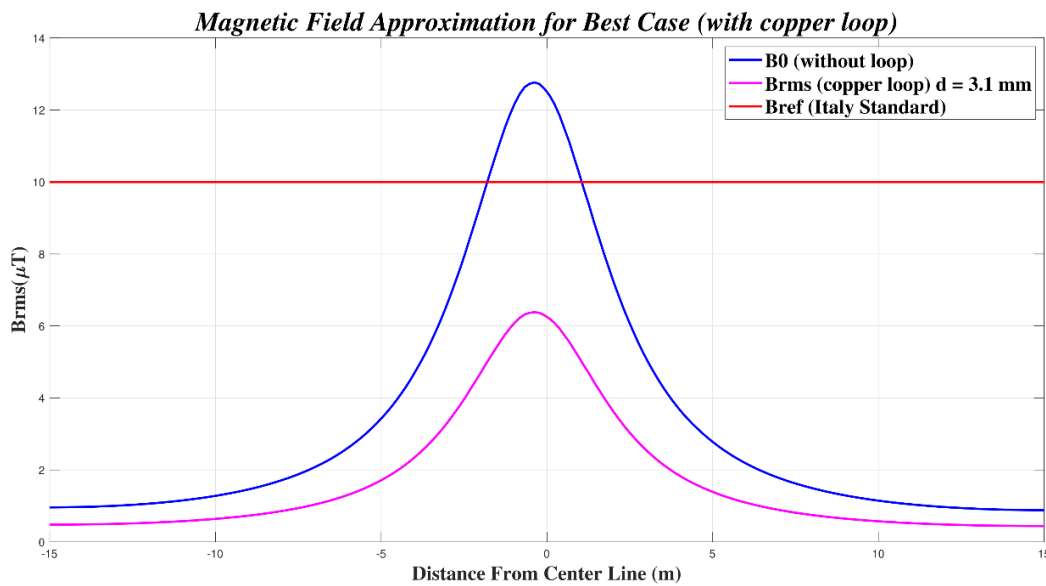
ภาพประกอบ 23 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนกรณี best case

4.1.2 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ best case

สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากลูปตัวนำขนาด 3.1 mm โดยใช้วัสดุตัวนำ 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน ได้แก่ อลูมิเนียม และ ทองแดง โดยลูปวางอยู่บน duct bank เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 24



(ก)



(ข)

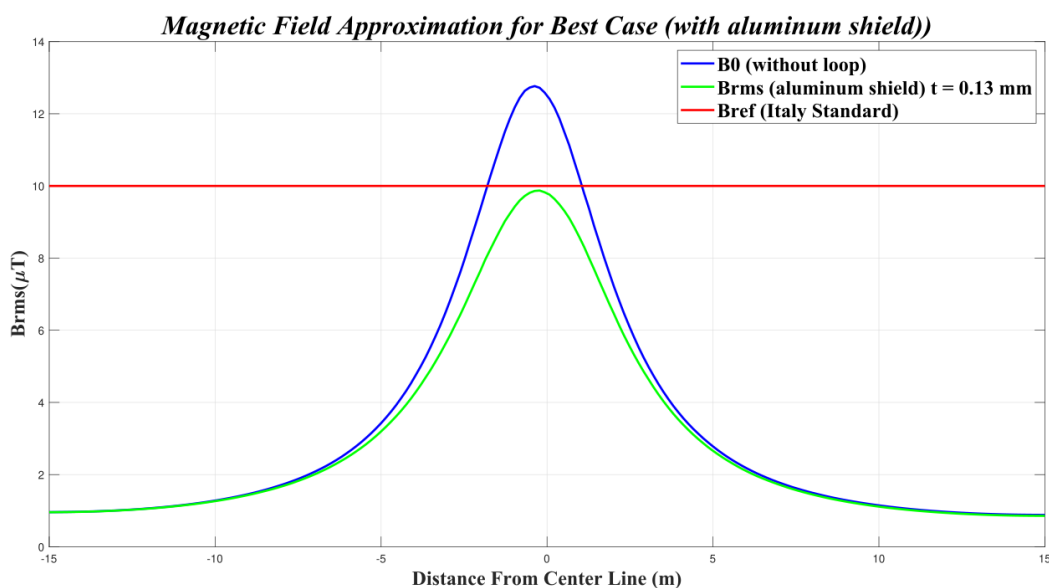
ภาพประกอบ 24 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็ก (best case) เมื่อลดทอนด้วย

(ก) ลูปอลูมิเนียม (ข) ลูปทองแดง

จากภาพประกอบ 24 จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ $9.09 \mu\text{T}$ และเมื่อพิจารณาผลการลดทอนที่เกิดจากลูปตัวนำที่ทำจากทองแดง พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนมีค่าเท่ากับ $6.43 \mu\text{T}$ ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนที่ได้จากการใช้ลูปที่มีวัสดุต่างชนิดกันมีค่าแตกต่างกัน $2.66 \mu\text{T}$ การใช้ลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงให้ผลการลดทอนที่ดีกว่าลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนและหลังการลดทอนด้วยลูปตัวนำ ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ซึ่งเป็นจุดที่กราฟสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด จะเห็นว่า ลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดงสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ โดยก่อนการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กเท่ากับ $12.86 \mu\text{T}$ (กราฟสีน้ำเงิน) อลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ $3.76 \mu\text{T}$ (กราฟสีฟ้า) ส่วนทองแดงลดทอนลงได้ $6.43 \mu\text{T}$ (กราฟสีชมพู) หรืออาจกล่าวได้ว่า ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ซึ่งเป็นจุดที่กราฟสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด การใช้ลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 29.28% และลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงสามารถลดทอนสนามแม่เหล็กลงได้ 49.98%

4.1.3 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ เมื่อจัดเรียงวางแบบ best case

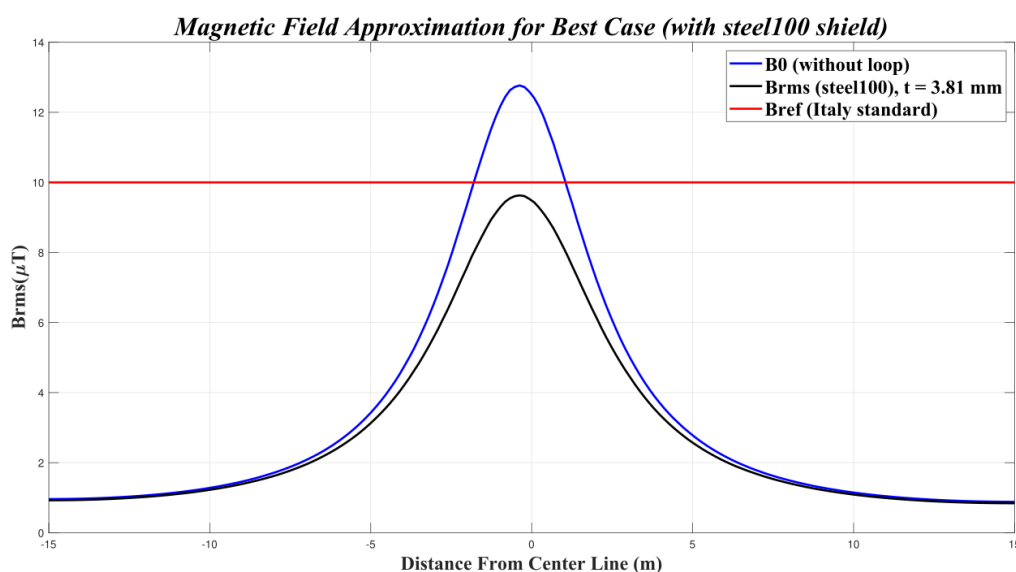
สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากับ 0.1054 มิลลิเมตร โดยแผ่นชีลด์วางขนานอยู่บน duct bank เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 25 จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 9.92 μT (กราฟสีเขียว) และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนและหลังการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ จะเห็นว่า ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ชีลด์อลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ โดยก่อนการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กเท่ากับ 12.86 μT (กราฟสีน้ำเงิน) อลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ 2.94 μT หรือคิดเป็น 22.84% ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ซึ่งเป็นจุดที่กราฟสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด



ภาพประกอบ 25 ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กกรณี best case สำหรับชีลด์อลูมิเนียม

4.1.4 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ best case

สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กที่มีความหนาเท่ากับ 3.81 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุเป็นเหล็ก (steel100) โดยแผ่นชีลด์วางอยู่บน duct bank เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 26

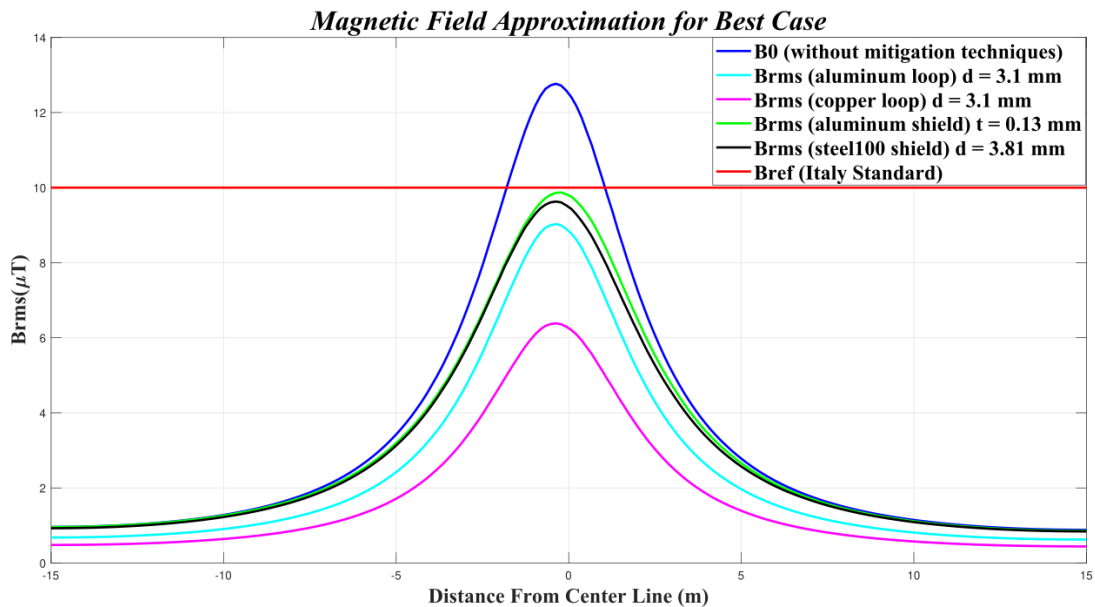


ภาพประกอบ 26 ผลการลดทอนสนามแม่เหล็กกรณี best case สำหรับชีลด์ steel100

จากภาพประกอบ 26 จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กที่ทำจากเหล็กกล้า หรือ steel100 มีค่าเท่ากับ 9.69 μT และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนและหลังการลดทอนด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก จะเห็นว่าชีลด์ดังกล่าวสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ พิจารณาที่ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด โดยก่อนการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 12.86 μT (เส้นสีน้ำเงิน) แผ่นชีลด์ที่ทำจาก steel100 สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 3.17 μT หรือ 24.63% (เส้นสีดำ)

4.1.5 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ ซีลด์ตัวนำ และซีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ best case

จากการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน. โดยใช้เทคนิคการลดทอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ลูปตัวนำ ซีลด์ตัวนำ และซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก สามารถเปรียบเทียบผลการจำลองได้ดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี best case

จากภาพประกอบ 27 แสดงผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กสำหรับการจัดวางสายส่งแบบ best case เมื่อใช้เทคนิคการลดทอนแบบลูปตัวนำ (conductive loop) ซีลด์ตัวนำ (conductive shield) และซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) โดยผลการจำลองเมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ค่าสนามแม่เหล็กที่จำลองได้มีค่าสูงที่สุด จะเห็นว่า ทั้ง 3 เทคนิคสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้ต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$ โดยลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงให้ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กดีที่สุด กล่าวคือ สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 49.98% เมื่อเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน รองลงมาเป็นลูปที่ทำจากอลูมิเนียม สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 29.28% ส่วนซีลด์ตัวนำและซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กให้ผลการลดทอนที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยซีลด์ตัวนำสามารถลดทอนลงได้ 22.84% ส่วนซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งในที่นี้ใช้ steel100 เป็นวัสดุหลักและมีความหนาแน่นมากกว่าซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียม สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กลงได้ประมาณ 24.63% ทั้งนี้เมื่อเลื่อนจุดวัด

ค่าสนามแม่เหล็กออกไปทั้งทางซ้ายและขวาของตำแหน่ง $x = -1$ เมตร นั้น จะเห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กจะลดลงเรื่อย ๆ ถ้าระยะห่างจากตำแหน่งดังกล่าวเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เพื่อให้เห็นภาพรวมของการลดทอน สามารถสรุปผลได้ดังตาราง 7 ประสิทธิภาพการลดทอนสนามแม่เหล็กสำหรับการจัดเรียงสายแบบ best case ของการไฟฟ้านครหลวง ลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงมีประสิทธิภาพการลดทอนสูงที่สุด รองลงมาเป็นลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม ซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (steel100) และซีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมตามลำดับ

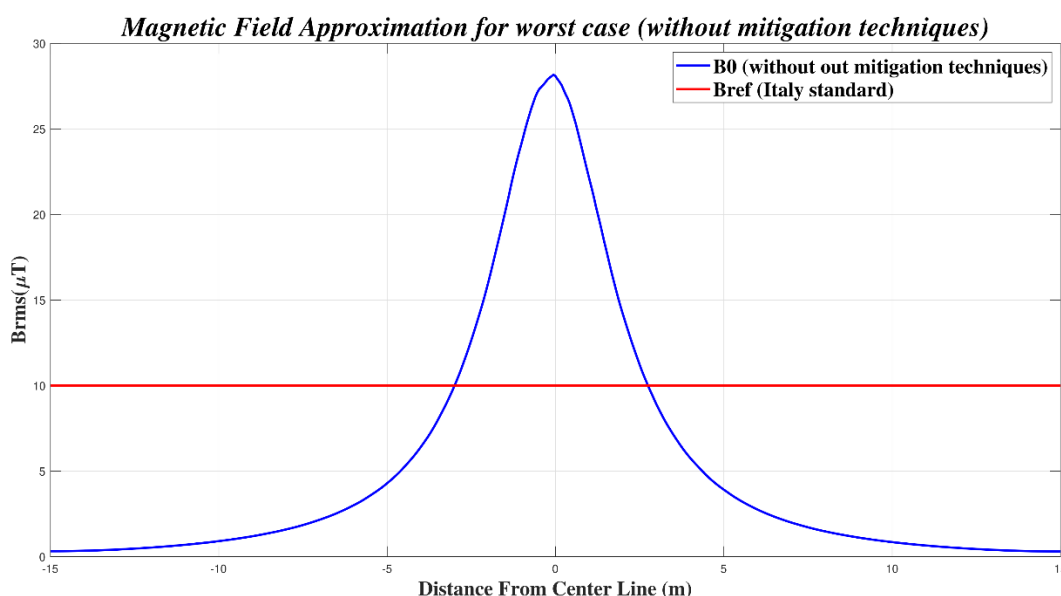
ตาราง 7 ประสิทธิภาพการซีลด์เมื่อจัดวางสายแบบ best case

เทคนิคการลดทอน	วัสดุที่ใช้	สนามแม่เหล็กก่อนลดทอน (μT)	สนามแม่เหล็กหลังลดทอน (μT)	ประสิทธิภาพการซีลด์
ลูปตัวนำ	อลูมิเนียม	12.86	9.09	1.41
	ทองแดง	12.86	6.43	2.00
ซีลด์ตัวนำ	อลูมิเนียม	12.86	9.92	1.30
ซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก	Steel100	12.86	9.69	1.33

4.2 การจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเมื่อจัดวางสายแบบ worst case

4.2.1 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนเมื่อจัดวางสายแบบ worst case

เมื่อจำลองค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน. ที่ระดับแรงดัน 69 kV 3 เฟส 1 วงจร มีขนาดกระแสไหลในสาย เท่ากับ 1,063 A วางใน duct bank ขนาด 4 x 6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) แสดงค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอน แสดงดังภาพประกอบ 28

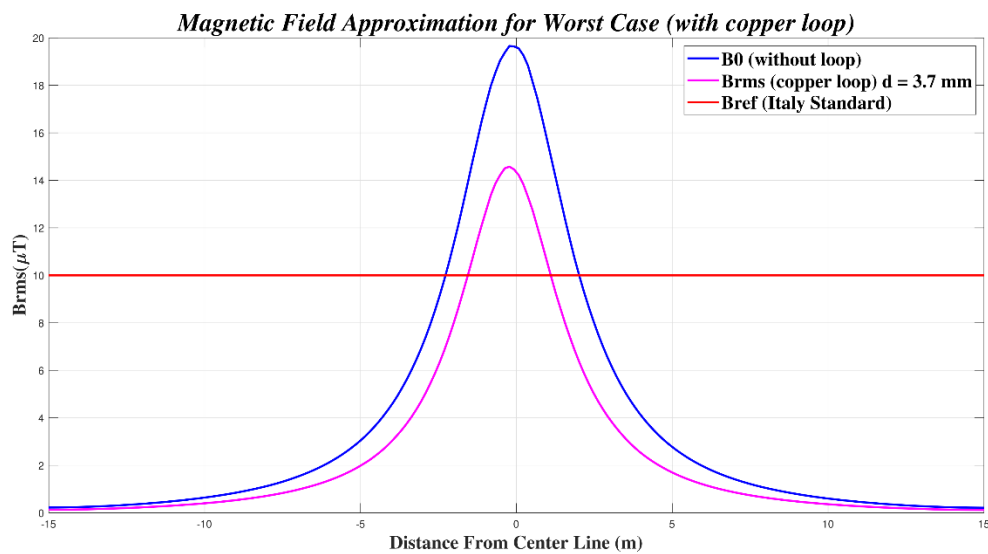
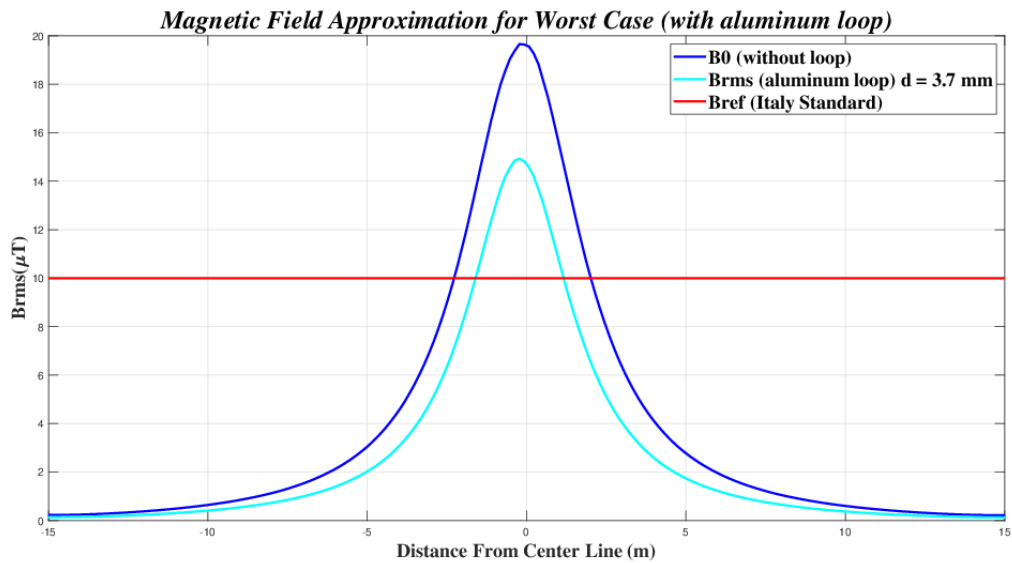


ภาพประกอบ 28 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กก่อนการลดทอนกรณี worst case

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 28 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กเมื่อวางสายส่งใกล้กับพื้นดินหรือจุดวัดมากที่สุด พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ 20.03 μT ซึ่งเกินกว่าค่าอ้างอิงถึง 10.03 μT

4.2.2 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากลูปตัวนำขนาด 3.7 mm โดยใช้วัสดุตัวนำ 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน ได้แก่ อลูมิเนียม และ ทองแดง โดยลูปวางอยู่บนท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case เมื่อลดทอนด้วย

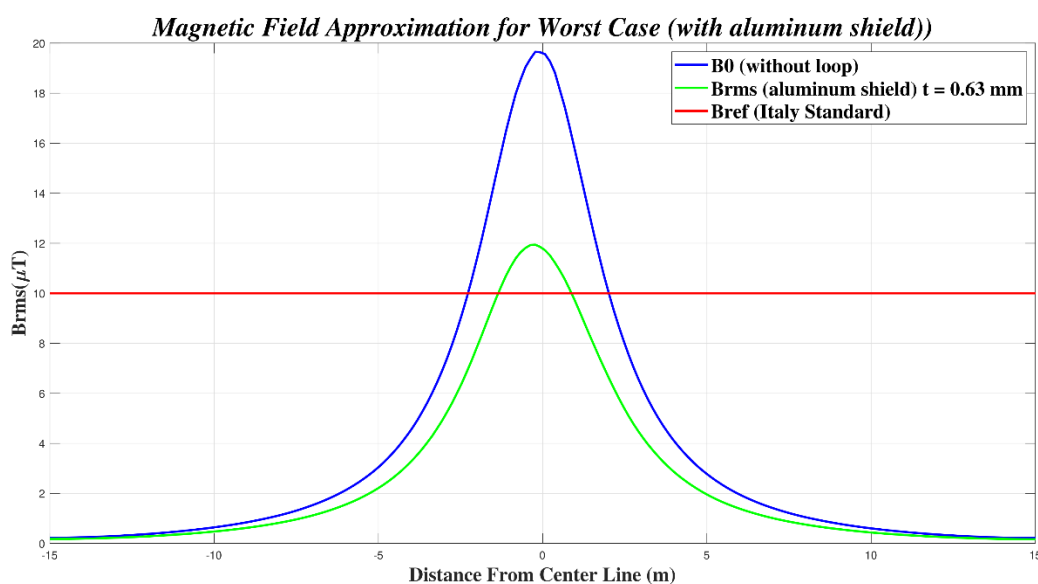
(ก) ลูปอลูมิเนียม (ข) ลูปทองแดง

จากภาพประกอบ 29 เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x = -0.5$ เมตร จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ $15.17 \mu\text{T}$ (กราฟเส้นสีฟ้า) คิดเป็น 24.23% เมื่อเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน และเมื่อพิจารณาผลการลดทอนที่เกิดจากลูปตัวนำที่ทำจากทองแดง พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนมีค่าเท่ากับ $14.81 \mu\text{T}$ (กราฟเส้นสีชมพู) หรือ 26.06% เมื่อเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน ซึ่งค่าสนามแม่เหล็ก

หลังการลดทอนที่ได้จากการใช้ลูปต่างชนิดกันมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การใช้ลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงให้ผลการลดทอนที่ดีกว่าลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม $0.37 \mu\text{T}$ ซึ่งทองแดงเป็นวัสดุที่มีค่าความนำไฟฟ้ามากกว่าอลูมิเนียม

4.2.3 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากับ 0.6342 มิลลิเมตร โดยแผ่นชีลด์วางขนานและมีขนาดเท่ากับท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 30

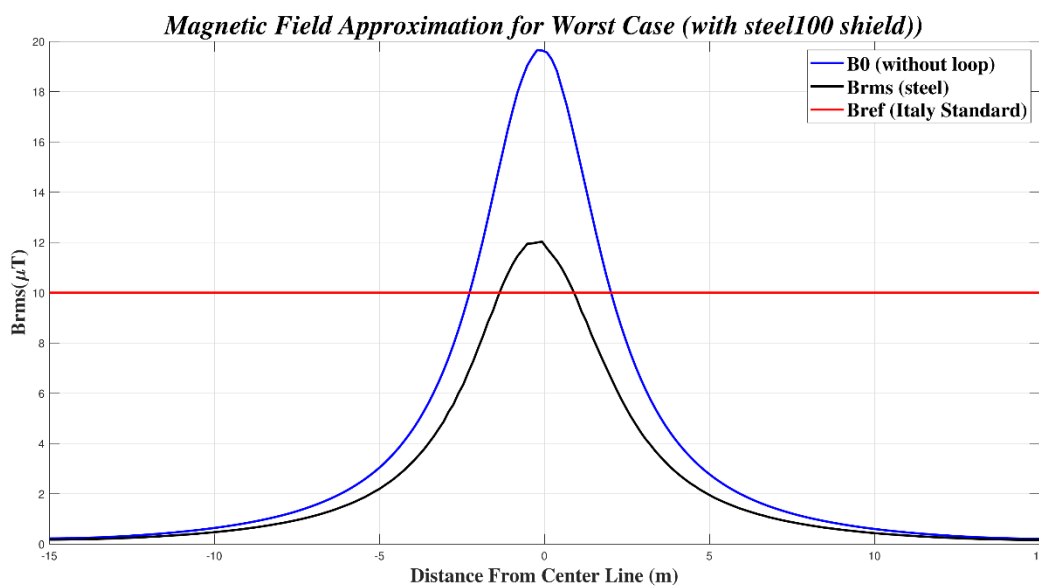


ภาพประกอบ 30 ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case สำหรับชีลด์อลูมิเนียม

จากภาพประกอบ 30 เมื่อพิจารณากราฟสนามแม่เหล็กเส้นสีเขียว จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ $12.03 \mu\text{T}$ หรืออาจกล่าวได้ว่าชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 39.92% เมื่อเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กก่อนลดทอน (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) และเมื่อพิจารณาผลต่างของค่าสนามแม่เหล็กก่อนและหลังการลดทอนด้วยชีลด์ตัวนำ จะเห็นว่า ชีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลง $7.99 \mu\text{T}$ ณ ตำแหน่ง $x = -0.5$ เมตร ซึ่งเป็นจุดที่กราฟสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้การใช้แผ่นชีลด์อลูมิเนียมสำหรับการจัดวางสายแบบ worst case ยังไม่สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้ต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$

4.2.4 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

สำหรับกรณีนี้จะจำลองผลการลดทอนของสนามแม่เหล็กจากชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กที่มีความหนาเท่ากับ 10.25 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้า หรือ steel100 เมื่อจำลองโดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ผลการจำลองจะแสดงดังภาพประกอบ 31

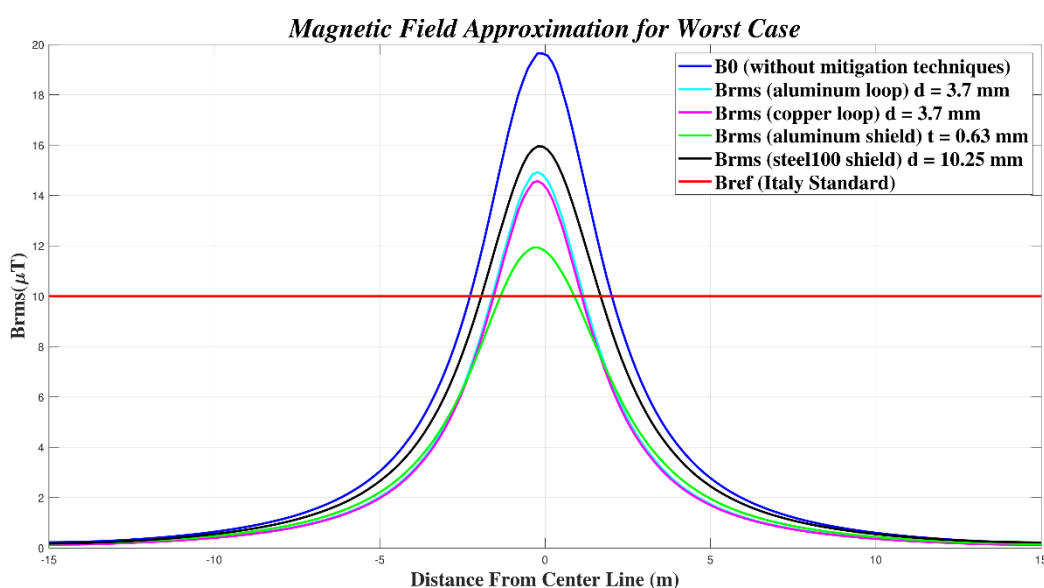


ภาพประกอบ 31 ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case สำหรับชีลด์ steel100

จากภาพประกอบ 31 เมื่อพิจารณากราฟสี่ด้าน ตำแหน่ง $x = -0.5$ เมตร ซึ่งเป็นผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กเมื่อใช้ชีลด์ที่ทำจากเหล็กกล้า steel100 จะเห็นว่า ผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชีลด์ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 16.04 μT หรืออาจกล่าวได้ว่าชีลด์ที่ทำจากเหล็กกล้า steel100 สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 3.99 μT หรือคิดเป็น 19.92% ทั้งนี้ถ้าเปลี่ยนจุดพิจารณาเลื้อนออกไปด้านซ้ายและขวา ค่าสนามแม่เหล็กจะยิ่งลดลงเมื่อจุดที่พิจารณาห่างออกไปจากตำแหน่ง $x = -0.5$ เมตร

4.2.5 ผลการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ ซีลด์ตัวนำ และซีลด์วัสดุแม่เหล็ก เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

จากการจำลองการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง เมื่อจัดวางสายแบบ worst case โดยใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ซีลด์ตัวนำ (conductive shield) และซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) สามารถเปรียบเทียบผลการจำลองได้ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 เปรียบเทียบผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กกรณี worst case

จากภาพประกอบ 32 แสดงผลการจำลองการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กสำหรับการจัดเรียงสายแบบ worst case พบว่า ณ ตำแหน่ง $x = -0.5$ เมตร ทั้งสามเทคนิคไม่สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$ โดยซีลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถลดทอนได้ดีที่สุด โดยสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 39.92% ถัดมาลูปตัวนำที่ทำจากทองแดงสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ 26.06% ส่วนลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ 24.23% และเช่นเดียวกับการจัดเรียงสายแบบ best case การลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยซีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งในที่นี้ใช้เหล็กกล้า (steel100) มีความสามารถในการลดทอนต่ำที่สุด โดยสามารถลดทอนได้ 19.92%

ทั้งนี้ เพื่อให้เห็นภาพผลการลดทอนที่ชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิผลของการชิลด์เมื่อจัดวางสายแบบ worst case ได้ดังตาราง 8 ประสิทธิภาพการลดทอนสนามแม่เหล็กสำหรับการจัดเรียงสายแบบ worst case ของการไฟฟ้านครหลวง ชิลด์ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมมีประสิทธิภาพการลดทอนสูงที่สุด รองลงมาเป็นลูปตัวนำที่ทำจากทองแดง ลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม และชิลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กหรือ steel100 ตามลำดับ

ตาราง 8 ประสิทธิภาพการชิลด์เมื่อจัดวางสายแบบ worst case

เทคนิคการลดทอน	วัสดุที่ใช้	สนามแม่เหล็กก่อนลดทอน (μT)	สนามแม่เหล็กหลังลดทอน (μT)	ประสิทธิภาพการชิลด์
ลูปตัวนำ	อลูมิเนียม	20.03	15.17	1.32
	ทองแดง	20.03	14.81	1.35
ชิลด์ตัวนำ	อลูมิเนียม	20.03	12.03	1.66
ชิลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก	Steel100	20.03	16.04	1.25

จากตาราง 8 จะเห็นว่า สำหรับกรณี worst case ที่จัดวางสายใกล้จุดที่พิจารณามากที่สุด ลูปตัวนำที่ทำทองแดงให้ประสิทธิภาพการชิลด์ที่ดีกว่าลูปตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียม โดยทองแดงมีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดีกว่าอลูมิเนียม ส่วนชิลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมหรือชิลด์ตัวนำนั้นให้ประสิทธิผลที่ดีกว่าชิลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก หรือ steel100 เช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย 1 วงจร ที่ระดับแรงดัน 69 kV กระแส 1,063 A โดยสายส่งวางในท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ขนาด 4 x 6 ซึ่งการจำลองค่าสนามแม่เหล็กจะใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) เปรียบเทียบผลการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เทคนิค ได้แก่ ลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) ซึ่งการจำลองผลการลดทอนสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้มีข้อจำกัด คือ ขนาดของลูปตัวนำ (conductive loop) ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) และชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) จะออกแบบให้มีขนาดเท่ากับท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) เท่านั้น สำหรับการจำลองจะออกเป็น 2 รูปแบบตามการจัดวางสาย ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การจัดเรียงสายแบบ best case โดยจัดวางสายแบบแนวตั้งวางอยู่มุมซ้ายล่างของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) และรูปแบบที่ 2 การจัดวางสายแบบ worst case วางตามแนวขวางหรือ horizontal formation ใกล้กับจุดที่พิจารณามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า

5.1.1 สำหรับการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยลูปตัวนำ (conductive loop) เมื่อจัดวางสายแบบ best case พบว่า ลูปที่ทำจากทองแดงสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้มากกว่าลูปที่ทำจากอลูมิเนียม 2.66 μT และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของทองแดง พบว่า มีค่าความนำไฟฟ้า 58 S/m มากกว่าอลูมิเนียม 38.2 S/m จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการชีลด์ด้วยลูปที่ทำจากทองแดงมีค่ามากกว่าลูปที่ทำจากอลูมิเนียม ส่วนรูปแบบที่ 2 worst case ลูปที่ทำจากทองแดงและอลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้มากกว่า 20% แต่ยังไม่สามารถลดทอนให้ต่ำกว่า 10 μT ได้ โดยลูปที่ทำจากทองแดงสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้มากกว่าลูปที่ทำจากอลูมิเนียมเช่นเดียวกันกับการจัดเรียงสายแบบ best case ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการชีลด์ที่ดีกว่าด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ลูปตัวนำสำหรับการศึกษาของงานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดที่ขนาดของลูปเท่ากับขนาดของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ซึ่งส่งผลในตำแหน่งของลูปที่ใช้ในงานนี้ถูกจำกัดด้วยเช่นกัน การวางลูปด้วยข้อจำกัดดังกล่าว ในบางตำแหน่งของการวางลูปอาจมีการ

สร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เสริมกับสนามแม่เหล็กจากสายส่ง จึงอาจเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้การลดทอนค่าสนามแม่เหล็กมีข้อจำกัดได้เช่นกัน

5.1.2 สำหรับการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ตัวนำ โดยใช้อลูมิเนียมแทนตัวนำในการจำลอง เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติ คือ น้ำหนักเบา และมีราคาถูกกว่าทองแดง โดยผลการจำลองสำหรับการจัดวางสายแบบ best case สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ 15.17% โดยค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนมีค่าเท่ากับ 9.92 μT ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 10 μT โดยจากที่กล่าวไปข้างต้นชีลด์ที่จำลองมีขนาดเท่ากับท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว สายส่งในกรณีของ best case ที่วางอยู่ด้านซ้ายของท่อหุ้มคอนกรีตสร้างสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎมือขวา แต่ชีลด์ที่มีขนาดจำกัดอาจไม่สามารถป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งนั้นได้ทั้งหมด จึงส่งผลต่อประสิทธิผลของการลดทอน ส่วนรูปแบบที่ 2 การจัดวางสายแบบ worst case แผ่นชีลด์อลูมิเนียมสามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กได้ดีเช่นกัน แต่ยังไม่สามารถลดทอนให้ต่ำกว่า 10 μT ได้ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากข้อจำกัดในการจำลองที่กำหนดขนาดของชีลด์ไว้เท่ากับขนาดของ duct bank เท่านั้น และเป็นไปได้ว่าถ้าชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมมีขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้มีค่าต่ำกว่า 10 μT ได้ และช่วยเพิ่มประสิทธิผลของการลดทอนให้ดียิ่งขึ้น

5.1.3 สำหรับการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก หรือเฟอร์โรแมกเนติก สำหรับการจำลองของงานวิจัยนี้เลือกใช้ steel100 เป็นวัสดุที่ใช้ทำแผ่นชีลด์ โดยวัสดุแม่เหล็กมีคุณสมบัติในการซาบซึมได้ดี เนื่องจากมีค่าความซาบซึมได้สูง แต่มีข้อเสียคือแตกหักง่าย โดยการจำลองใช้ชีลด์ที่ทำจาก steel100 กับการจัดวางสายแบบ best case พบว่า สามารถลดค่าสนามแม่เหล็กลงได้ประมาณ 24.63% ผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กหลังการลดทอนมีค่าเท่ากับ 9.69 μT ณ ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุด ซึ่งประสิทธิผลของการลดทอนทำได้ดีกว่าชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่แผ่นชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็กมีความหนามากกว่าชีลด์ที่ทำจากตัวนำค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณาการจัดเรียงสายแบบ worst case พบว่า สามารถลดทอนค่าสนามแม่เหล็กลงได้ 16.04% โดยประสิทธิผลของการลดทอนต่ำกว่าชีลด์ที่ทำจากตัวนำ แม้ว่าแผ่นชีลด์จะมีความหนามากกว่าก็ตาม

5.1.4 เมื่อพิจารณาในแง่ของต้นทุนค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง โดยปกติแล้ววัสดุที่เป็นทองแดงจะมีราคาสูงกว่าอลูมิเนียม และเพื่อให้เห็นยอดประมาณการค่าใช้จ่ายมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้สำรวจข้อมูลราคาจากท้องตลาดสามารถสรุปได้ตามตาราง 9 โดยเงื่อนไขในการพิจารณาจะกำหนดขอบเขตการก่อสร้างที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร และเนื่องจากความหนาแผ่นชีลด์

ที่คำนวณได้ในบทที่ 3 นั้น เป็นความหนาพิเศษที่จะต้องสั่งผลิตเป็นรายกรณี ดังนั้นข้อมูลในตารางนี้จะเป็นการประยุกต์จากแผ่นชีลด์และสายส่งที่มีขายในตลาดแล้วเทียบให้เข้ากับรูปแบบการก่อสร้างของงานวิจัยนี้

ตาราง 9 ประมาณการต้นทุนการก่อสร้างเทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็ก

เทคนิคการลดทอน	เส้นผ่านศูนย์กลาง / ความหนา (mm)	ขนาดรูป/แผ่นชีลด์ (m)	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ปริมาณที่ต้องใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ลูปตัวนำ	d = 3.1	1.25 x 1,000	110	2002.5 เมตร	220,275.00
	d = 3.7	1.25 x 1,000	165	2002.5 เมตร	330,412.50
ชีลด์ตัวนำ (อลูมิเนียม)	t = 0.2	0.9 x 1.8	185	720 แผ่น	133,200.00
	t = 0.6	1.22 x 2.43	563.5	412 แผ่น	232,162.00
	t = 3.8	1.22 x 2.43	12,972	412 แผ่น	5,344,464.00
	t = 12	1.22 x 2.43	38,640	412 แผ่น	15,919,680.00

จากตาราง 9 เป็นการประมาณการต้นทุนในการก่อสร้าง โดยคำนวณขนาดของลูปและแผ่นชีลด์เท่ากับขนาดของท่อหุ้มคอนกรีต (duct bank) ซึ่งประมาณการที่การก่อสร้างระยะทางเท่ากับ 1 กิโลเมตร จะเห็นว่า การใช้ลูปตัวนำ (conductive loop) และชีลด์ตัวนำ (conductive shield) มีต้นทุนอยู่ที่ประมาณหลักแสนบาท ส่วนแผ่นชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) ค่าใช้จ่ายสูงถึงหลักล้านบาท เมื่อพิจารณาขนาดจะเห็นได้ว่ายิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของลูปและความหนาของแผ่นชีลด์มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น สำหรับการประมาณการชีลด์ที่ทำจากอลูมิเนียมมีราคาต่ำสุด เมื่อพิจารณาทั้งราคาต้นทุนและประสิทธิผลในการลดทอนสนามแม่เหล็ก ชีลด์ตัวนำ (conductive shield) ที่ทำจากอลูมิเนียมเหมาะสมที่จะเป็นตัวเลือกแรกในการพิจารณาเลือกใช้ รองลงมาเป็นลูปตัวนำ (conductive loop) ส่วนลำดับสุดท้าย คือ ชีลด์ที่ทำจากวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic shield) ที่มีต้นทุนสูงกว่าประเภทอื่น

5.1.5 จากการศึกษาการใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เมื่อจัดวางสายส่ง 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การจัดวางสายแบบ best case ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดวางโดยใช้ phase arrangement หารูปแบบการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำที่สุดมาก่อน และรูปแบบที่ 2 การจัดวางสายแบบ worst case เป็นรูปแบบการจัดวางสายแบบ horizontal formation ที่วางใกล้กับจุดที่พิจารณามากที่สุด ซึ่งผลการจำลองเมื่อใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เทคนิค ร่วมกับ รูปแบบการจัดวาง

ทั้ง 2 รูปแบบ สามารถสรุปได้ว่า การใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กทั้ง 3 รูปแบบ ร่วมกับการจัดวางสายแบบ best case ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$ ได้ แต่เมื่อใช้เทคนิคการลดทอนสนามแม่เหล็กกับการจัดวางสายแบบ worst case กลับไม่มีเทคนิคใดที่ให้ผลการลดทอนค่าแม่เหล็กได้ต่ำกว่า $10 \mu\text{T}$ ดังนั้น แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยแนะนำให้ใช้ intrinsic technique ร่วมกับการใช้ extrinsic technique เช่น ใช้การจัดเรียงเฟสของสายส่ง (phase arrangement) ในการลดทอนในขั้นแรกก่อน ซึ่งการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วย intrinsic technique เป็นวิธีการที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริมอยู่แล้ว จากนั้นจึงใช้ชีลด์หรือลูปเข้ามาช่วยเพื่อลดทอนค่าสนามแม่เหล็กให้มีค่าต่ำมากยิ่งขึ้น โดยการประยุกต์ใช้ตามที่กล่าวข้างต้น จะช่วยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูป รวมถึงความหนาของแผ่นชีลด์ลงด้วย จึงส่งผลให้ต้นทุนการก่อสร้างไม่สูงมากเกินไปด้วยเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเลือกเทคนิคการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน นอกจากจะพิจารณาประสิทธิภาพการชีลด์แล้ว ควรมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในแง่มุมอื่น ๆ เช่น ต้นทุนในการก่อสร้าง ความร้อนที่อาจเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มชีลด์เข้าไปในระบบ ความยุ่งยากในการบำรุงรักษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น

5.2.2 การลดทอนสนามแม่เหล็กอาจให้ประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น เมื่อใช้ลูปหรือแผ่นชีลด์ที่มีความกว้างมากกว่าท่อหุ้มคอนกรีต (duct back) มีตำแหน่งการวางลูปแบบแผ่นชีลด์ที่เหมาะสม ไม่ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กเสริมกันเอง รวมถึงการเพิ่มจำนวนลูปก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนสนามแม่เหล็กเช่นกัน ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาต่อไปในอนาคต

5.2.3 เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) การจำลอง ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ การจำลองจะต้องระบุพิกัดการจัดวางที่แน่ชัด ต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น relative permeability และ electrical conductivity อย่างถูกต้อง จึงจะให้ผลการจำลองที่เชื่อถือได้

บรรณานุกรม

1. Group CW, C4.204. Mitigation Techniques of Power-Frequency Magnetic Fields Originated from Electric Power Systems. CIGRÉ Technical Brochure. 2009.
2. Machado VM, Almeida ME, Neves MGd. Accurate magnetic field evaluation due to underground power cables. European Transactions on Electrical Power. 2009;19(8):1153-60.
3. Looock WV, editor Elementary effects in humans exposed to electromagnetic fields and radiation. 2009 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics; 2009; Xi'an, China: IEEE.
4. Bravo-Rodríguez JC, del-Pino-López JC, Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. Energies. 2019;12(7).
5. International Commission on Non-Ionizing Radiation P. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 2010;99(6).
6. Comparison of international policies on electromagnetic fields : (power frequency and radiofrequency fields) [Internet]. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. 2018. Available from: <http://hdl.handle.net/10029/623629>.
7. การไฟฟ้านครหลวง. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้า 2006.
8. สุธาสินี นุ่นชื่น. การศึกษาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายส่งเคเบิลใต้ดินโดย กฟน. : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2016.
9. Nunchuen VTaS. Optimal Phase Arrangements of Underground Transmission Lines Installed by Metropolitan Electricity Authority of Thailand. International Review of Electrical Engineering. 2020; Vol 15:304.
10. Manuel Reta-Hernández GGK. Attenuation of low frequency magnetic fields using active shielding. Electric Power Systems Research. 1998;45(1):57-63.
11. Redy Mardiana, Poshtan M. Mitigation of magnetic fields near transmission lines using a passive loop conductor. 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC); 19 -

22 February 2011; Dubai, United Arab Emirates: IEEE; 2011. p. 4.

12. Cruz P, Hoeffelman J, Pino JCD. Passive loop-based mitigation of magnetic fields from underground power cable. IEEE Latin America Transactions. 2008;6(1):59–65.

13. Pino JCD, Cruz P. Magnetic field shielding of underground cable duct banks. Progress in Electromagnetic Research. 2013;138:1-19.

14. Neuza Gomes, Maria Eduarda Almeida, Machado VM. Series Impedance and Losses of Magnetic Field Mitigation Plates for Underground Power Cables. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018;60:1761 - 8.

15. Adel Z. El Dein, Osama E. Gouda, Matti Lehtonen, Darwish MMF. Mitigation of the Electric and Magnetic Fields of 500 -kV Overhead Transmission Lines. IEEE Access. 2022;10:33900 - 8.

16. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า. ระบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) 2005.

17. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, สายงานวิศวกรรม. คู่มือการออกแบบเคเบิลใต้ดิน 2017.

18. Right Hand Rule [Available from: <https://www.pasco.com/products/guides/right-hand-rule>].

19. Du Y, Cheng TC, Farag AS. Principles of Power-Frequency Magnetic Field Shielding with Flat Sheets in a Source of Long Conductors IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1996;38(3):450 - 9.

20. Morgado PDV. Mitigation plates for the magnetic field of underground cables: Technical University of Lisbon; 2014.

ประวัติผู้เขียน

