



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ
การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

โดย รศ ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะ

30 กันยายน พ.ศ.2544

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. รศ.ดร. สำรวย สังข์สะอาด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. นายปิยะบุตร พุกษานุกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการเมธีวิจัยอาวุโส รศ.ดร. สำรวย สังข์สะอาด

คำนำ

เป็นเวลาหลายปีมาแล้วที่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยโครงการนี้ เพราะได้รับคำถามเป็นระยะๆ อย่างต่อเนื่องและกว้างขวางถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่มีต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีผลกระทบต่อคน เนื่องจากได้มีการสร้างสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มมากขึ้น ทั้งปริมาณและระดับแรงดัน ปัจจุบันมีการใช้ระบบแรงดันสูงถึง 230 kV และ 500 kV ซึ่งบางแห่งก็อาจมีแนวสายส่งแรงสูงเข้าไปใกล้ชุมชน ผู้ที่พักอยู่อาศัยบริเวณใกล้สายส่งแรงสูงก็เกิดความวิตกกังวลถึงผลกระทบจากสิ่งที่มองไม่เห็น คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกว่าจะเป็นต้นเหตุให้เกิดโรคบางชนิดหรือไม่ การศึกษาวิจัยโครงการสำรวจวัดความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายใต้สายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และรวมทั้งในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยในที่ต่างๆ ทุกระดับแรงดันที่มีการใช้งาน จะให้ข้อมูลและคำตอบต่อคำถามได้ระดับหนึ่ง ซึ่งแม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีใครหรือหน่วยงานใดจะสามารถตอบคำถามนี้ได้อย่างกระจ่างชัดว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมาจากระบบสายส่งจ่ายนั้นมีผลต่อคนหรือไม่ อันที่จริงแล้วก็มีการศึกษาวิจัยกันอยู่อย่างต่อเนื่องและกว้างขวางในหมู่นักวิจัยทางด้านอีเอ็มซี (EMC = Electromagnetic Compatibility) ทั่วโลก ผลของการศึกษาวิจัยก็ยังไม่มีความชัดเจนว่ามีผลกระทบ อย่างไรก็ตามได้มีการกำหนดค่าจำกัดสูงสุดที่ยอมให้มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สูงสุดเท่าใดที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต ซึ่งกำหนดโดย IRPA (International Radiation Protection Association) ผลของการสำรวจวัดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กใต้สายส่งแรงสูง และในสถานีไฟฟ้าย่อย อันเป็นบริเวณที่คนทั่วไปจะไม่เข้าไปใกล้อยู่แล้ว พบว่าค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละแห่งมีค่าต่ำกว่าค่าจำกัดที่กำหนดโดย IRPA

อีกด้านหนึ่งก่อนที่ผู้วิจัยจะได้ทำการศึกษาโครงการวิจัยนี้ ก็ได้รับคำถามเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์ในกิจกรรมต่างๆ ถูกรบกวนที่ไม่ทราบสาเหตุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้คอมพิวเตอร์ในห้องควบคุมและสั่งการที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ตัวหนังสือ ตัวเลขและภาพบนจอคอมพิวเตอร์จะสั่นไหว จนไม่สามารถจะอ่านได้ชัดเจน ทำให้ทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ในครั้งแรกที่ได้รับคำถามก็ยังไม่ทราบแน่ชัดเหมือนกันว่าสาเหตุใด แต่ก็พอสันนิษฐานได้ว่า คงจะเนื่องมาจากการใช้คอมพิวเตอร์เหล่านั้นอยู่ใกล้สายส่งจ่าย อะไรเป็นตัวรบกวน ยังไม่สามารถตอบได้ เพราะในขณะนั้นยังไม่มีอุปกรณ์วัดใดๆ จนกระทั่งผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้าร่วมประชุมวิชาการ the 12th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2540 จึงได้ทราบว่าถูกรบกวนบนจอคอมพิวเตอร์นั้นเนื่องจากการรบกวนสนามแม่เหล็ก และได้เห็นวิธีการป้องกันการรบกวนดังกล่าวด้วยชีลด์ (shielding) จึงได้แนวความคิดที่จะทำการศึกษาวิจัยเพื่อวิเคราะห์แก้ปัญหาต่างๆ โดยเสนอเป็นโครงการวิจัยหนึ่งในโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. นี้ ทำให้มีอุปกรณ์วัดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในโครงการวิจัยนี้ พอติดกับทางศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับข้อเสนอโครงการวิจัยการสำรวจวัดความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจาก

Prof. Dr. K.Naito จาก Meijo University และ Prof. Dr. Y. Mizuno จาก Nagoya Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่น ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ความร่วมมือกับผู้เชี่ยวชาญทั้งสองสถาบันก่อให้เกิดการถ่ายทอดเทคโนโลยีหลายประการ นับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยในด้านนี้

การดำเนินงานการศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก ทำการสำรวจวัดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง โดยทำการวัดในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยและภายใต้สายส่งจ่ายแรงสูง ขั้นตอนที่สอง ทำการจำลองสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้ ใช้เป็นต้นกำเนิดของการบวกรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ ออสซิลโลสโคป และเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ และขั้นตอนสุดท้ายก็คือ การศึกษาหามาตรการการป้องกันหรือลดทอนการรบกวนจากสนามแม่เหล็กโดยการพัฒนาออกแบบกล่องชิลด์ การวิจัยได้มอบให้นิสิตปริญญาโท คือ นายปิยะบุตร พุกขานุกูล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการศึกษาวิจัยเป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโท เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. คือ การสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ ที่มีความสามารถสูง นอกจากนั้นแล้วยังได้ขยายการสร้างงานเพิ่มเติม โดยมอบให้นิสิตปริญญาตรีอีก 4 คน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีนายจำนงค์ มีแก้ว และนายธนัญชัย พงษ์เทพนิวัติ ทำการศึกษาออกแบบสร้าง Helmholtz coil แบบวงแหวนคู่ที่สามารถปรับทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ ทำให้สะดวกแก่การศึกษาวิจัยภาคการทดลองผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และกลุ่มที่สองมีนายพรเทพ เชาวนโสภาส และนายสมชัย บุญโพธิ์ธำภาติ ศึกษาการออกแบบประกอบสร้างกล่องชิลด์ เพื่อป้องกันหรือกำบังสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ

ผลของการศึกษาวิจัย ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน IRPA กำหนด ทำให้เกิดองค์ความรู้ที่ช่วยวิเคราะห์และแก้ปัญหาการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากสายส่งจำหน่ายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ให้แก่การไฟฟ้าต่างๆ และหน่วยงานอื่นๆ ทั้งภาครัฐวิสาหกิจ และภาคเอกชน อาจกล่าวได้ว่า การศึกษาวิจัยโครงการนี้ได้มีส่วนช่วยแก้ปัญหาแก่สังคม เกิดการสร้างงาน สร้างบุคลากร และพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ต่อการศึกษา และการวิจัยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้เกิดขึ้นและสำเร็จได้โดยได้รับการสนับสนุนในด้านเงินทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) โครงการเมธีวิจัยอาวุโส จึงขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่สำหรับการทดลอง ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือและประสานงานกับสถาบันต่างประเทศในโครงการความร่วมมือกับ Meijo University และ Nagoya Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งโดยมี Prof. Dr. K. Naito และ Prof. Dr. Y. Mizuno เป็นผู้ถ่ายทอดเทคโนโลยี และการปฏิบัติการภาคสนามในโครงการวิจัยเรื่อง “Surveying measurement of electric and magnetic fields under high voltage transmission lines and in substations of EGAT and MEA” จึงขอขอบคุณทั้งสองสถาบันไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และการไฟฟ้านครหลวง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ให้ความช่วยเหลือในการเข้าไปสำรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้สายส่งจ่ายแรงสูง และในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหลายแห่ง ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรีที่เข้ามามีส่วนร่วมในโครงการในรูปการทำ EE Senior projects คือ นายพรเทพ เชาวัน โอภาส และนายสมชัย บุญโพธิ์รักษาติ ได้ศึกษาเรื่อง “Electromagnetic field shielding box” นายจำนงค์ มีแก้ว และนายธนัญชัย พงษ์เทพนิวัติ ศึกษาโครงการ “การออกแบบสร้าง Helmholtz coil” และขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมช่วยให้โครงการนี้ประสบผลสำเร็จ

หัวหน้าโครงการวิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : EMC40-01

โครงการ : การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

คณะผู้วิจัย : รศ.ดร. สรรวย สังข์สะอาด (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

นายปิยะบุตร พุกษานุกูล (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย : 1 กรกฎาคม 2540 - 30 มิถุนายน 2542

วัตถุประสงค์

เพื่อสำรวจวัดความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่แผ่ออกมาจากสายส่งและสายจำหน่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง ศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ศึกษาถึงมาตรการป้องกันสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยการใช้ชีลด์ (Shielding)

รายงานฉบับนี้เสนอการสำรวจวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำในสถานีไฟฟ้าย่อย และได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณ อธิบายถึงการสร้างสนามแม่เหล็กแบบสม่ำเสมอในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz coil) ทำการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำการทดลองหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่เริ่มจะมีผลรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์วัดอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์รับการรบกวน ศึกษาหาวิธีการป้องกันหรือลดทอนการรบกวนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงตัวอย่างการใช้กล่องชีลด์ป้องกันการรบกวนสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากล่องชีลด์สามารถป้องกันการรบกวนสนามแม่เหล็กได้

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ กล่องชีลด์

Abstract

Project Code : EMC40-01

Project Title : Study of the Effect of Electric and Magnetic Fields in Electronic Equipment

Investigators : Assoc. Prof. Dr. Samruay Sangkasaad (Chulalongkorn University)
Mr. Piyabutr Pruksanubal (Chulalongkorn University)

Project Period : 1 July 1997 – 31 June 2000

Objectives :

To measure electric and magnetic field intensities generated by high voltage transmission and distribution lines. To investigate the effects of electric and magnetic fields on electronic equipment. To study the measures of protection on electric and magnetic interferences by means of shielding.

This report presents the surveying measurement of low frequency electric and magnetic fields in substations and under high voltage transmission lines. The comparison of measured and calculated values were illustrated. A generation of uniform magnetic field in a laboratory by means of Helmholtz coil was described. The inception interferent effects of electric and magnetic fields on electronic equipment were carried out. Computers screen and measuring equipment were used as interference receptors under tested. The means of interference protection or reduction were studies. The protection of magnetic field interference by using shielding box was demonstrated. The experimental results showed that the magnetic field interference can be protected by means of shielding box.

Keywords : Electric and magnetic fields, Helmholtz coil, Shielding box

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายการวิจัย	2
บทที่ 2 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ	4
2.1.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น	5
2.2 สนามไฟฟ้า	5
2.2.1 การคำนวณสนามไฟฟ้า	5
2.2.2 การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	6
2.3 สนามแม่เหล็ก	8
2.3.1 การคำนวณสนามแม่เหล็ก	8
2.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	10
2.4 การชีลด์	10
2.4.1 ประสิทธิภาพของการชีลด์ (Shielding effectiveness)	11
2.4.1.1 การดูดกลืนสัญญาณ	12
2.4.1.2 การสะท้อนของคลื่น	12
2.4.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำและวัสดุที่ใช้ปิดกั้น	15

	หน้า
บทที่ 3 การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	17
3.1 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า	17
3.1.1 สถานที่ที่ทำการวัด	17
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	18
3.1.3 การเปรียบเทียบความถูกต้องในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ของเครื่องวัด	19
3.1.4 วิธีการวัด	20
3.1.5 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ภายในสถานีไฟฟ้า	21
3.2 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	30
3.2.1 สถานที่ที่ทำการวัด	30
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	31
3.2.3 วิธีการวัด	31
3.2.4 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ	32
3.3 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	40
บทที่ 4 ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	41
4.1 ผลกระทบของสนามไฟฟ้า	41
4.2 ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก	41
4.2.1 การสร้างสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ	42
4.2.1.1 ขดลวด Helmholtz coil และการออกแบบสร้าง	42
4.2.1.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กภายในขดลวด Helmholtz coil	43
4.2.1.3 สนามแม่เหล็กซึ่งสร้างโดยขดลวด Helmholtz coil	46
4.2.2 วิธีการทดลอง	48
4.2.3 ผลการทดลอง	48
บทที่ 5 การป้องกันสนามแม่เหล็กที่รบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	52
5.1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ	52
5.2 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะซิลิกอน (Silicon steel)	53
5.2.1 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้แผ่นโลหะซิลิกอนกันเพียงด้านเดียว	54
5.2.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน	55

5.3 การหาประสิทธิภาพของการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องชีลด์ ที่ทำจากโลหะชิลิกอน	57
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผล	60
6.1 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	60
6.1.1 ในบริเวณสถานีไฟฟ้า	60
6.1.2 ใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	61
6.2 ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	61
6.3 ผลการชีลด์สนามแม่เหล็ก	62
บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	63
7.1 สรุปผล	63
7.2 ข้อเสนอแนะ	63
การสร้างทีมวิจัย	64
เอกสารอ้างอิง	65
ผลงานที่ตีพิมพ์	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สภาวะคลื่นไกลและคลื่นไกลซ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	15
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ ไดแมกเนติก พาราแมเนติก และเฟอร์โรแมกเนติก	16
3.1 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติระหว่างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก ที่ใช้ 2 ชนิด	18
3.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัดความเข้มสนามไฟฟ้า	20
3.3 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสนามไฟฟ้า	22
3.4 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	32
3.5 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz ในสถานที่ที่มีสนาม	40
4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อจอคอมพิวเตอร์	49
5.1 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ	53
5.2 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว	54
5.3 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะชิลิกอน	56
5.4 ประสิทธิภาพการชีลด์ของกล่องชีลด์แต่ละกล่อง	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ 2 เส้น ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าและมีกระแสไหลผ่าน	1
2-1 ผังแสดงการรบกวนของสัญญาณรบกวน	4
2-2 แบบจำลองค่าเก็บประจุไฟฟ้าสแตตริคในช่วงความถี่ต่ำระหว่างสายตัวนำ 2 เส้น	5
2-3 ระบบสายส่งที่มีสายตัวนำหลายเส้น	6
2-4 สนามแม่เหล็กซึ่งแพร่ออกมาจากสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	9
2-5 แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรที่เป็นวงรอบ (loop) ในพื้นที่ที่เต็มไปด้วย สนามแม่เหล็ก	9
2-6 ผลกระทบของผนังโลหะต่อสัญญาณรบกวน	11
2-7 การลดทอนสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2-8 ขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านผนังโลหะ	12
2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า	13
2-10 การแพร่ของสนามไฟฟ้าผ่านตัวนำ	14
2-11 การแพร่ของสนามแม่เหล็กผ่านตัวนำ	14
2-12 การเบี่ยงเบนของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	16
3-1 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก	18
3-2 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า	18
3-3 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก	19
3-4 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า	19
3-5 การติดตั้งสายส่งในห้องปฏิบัติการ	19
3-6 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่อ่านจากเครื่องมือวัดทั้ง 3 แบบ	20
3-7 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ	23
3-8 แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในลานสวิตช์ 500 kV พร้อมเส้นทางการวัด	23
3-9 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ	24
3-10 ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ	24
3-11 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ	24

3-12	ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ	25
3-13	บริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก	25
3-14	แผนภาพบริเวณที่ติดตั้ง Reactor-Capacitor bank พร้อมเส้นทางการวัด	26
3-15	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ Reactor-Capacitor bank สถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก	26
3-16	ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก	27
3-17	ลานสวิตช์ 69 kV ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ	27
3-18	แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในลานสวิตช์ 69 kV พร้อมเส้นทางการวัด	28
3-19	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ของลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ	29
3-20	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ของลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ	29
3-21	สายส่ง 500 kV สายควบ วงจรเดียว (MM3-TTK)	30
3-22	สายส่ง 500 kV สายควบ วงจรคู่ (MM3-TTK)	30
3-23	สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ (MM3-PL2)	30
3-24	สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ (MM2-CR)	30
3-25	สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดียว (LP1-TE)	31
3-26	สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดียว (LP1-MM2)	31
3-27	แนวเส้นทางการวัดได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	31
3-28	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	33
3-29	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	33
3-30	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	33
3-31	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	34
3-32	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	35
3-33	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	35
3-34	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	35
3-35	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	36
3-36	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งตกท้องช้าง ที่แรงดัน 115 kV	36
3-37	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งตกท้องช้าง ที่แรงดัน 115 kV	37
3-38	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV	37
3-39	ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV	37

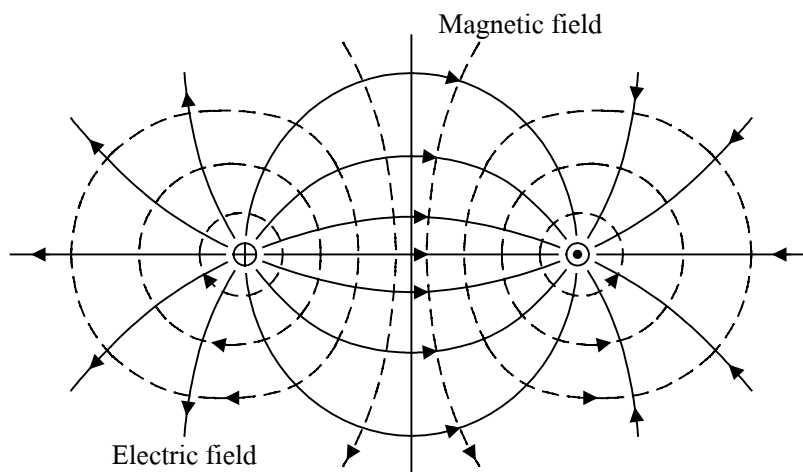
	หน้า
3-40 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดียว ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	38
3-41 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดียว ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง	38
3-42 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดียว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	39
3-43 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดียว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ	39
4-1 Helmholtz coil ที่มีขดลวดสี่เหลี่ยม 4 ขด	42
4-2 โครงสร้างของ Helmholtz coil	43
4-3 สายตัวนำซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	44
4-4 สายตัวนำซึ่งมีความยาวแน่นอน	45
4-5 ขดลวด Helmholtz coil	46
4-6 ตำแหน่งที่ทำการวัดและคำนวณ	46
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก กับกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณ.....	47
4-8 ผลการวัดความสม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวด Helmholtz coil	47
4-9 การติดตั้งจอยคอมพิวเตอรืทดสอบในขดลวด Helmholtz coil	48
4-10 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอยคอมพิวเตอรืเครื่องที่ 5	49
4-11 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอยคอมพิวเตอรืเครื่องที่ 9	50
4-12 การติดตั้งมิเตอร์ทดสอบในขดลวด Helmholtz coil	50
5-1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ	52
5-2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ	53
5-3 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะซิลิกอนกันเพียงด้านเดียว	54
5-4 การทดสอบการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องโลหะซิลิกอนที่ละชั้น	55
5-5 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน	56
5-6 ลักษณะของกล่องชีลด์ที่สร้างขึ้นเอง	57
5-7 ความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็กของกล่องชีลด์แต่ละกล่อง	58
5-8 ประสิทธิภาพการชีลด์ของกล่องชีลด์แต่ละกล่อง	59
5-9 ตัวเลขและตัวอักษรบนหน้าจอยคอมพิวเตอรืส้นเมื่อถูกรบกวนโดยสนามแม่เหล็ก	59
5-10 คอมพิวเตอรืติดตั้งในกล่องชีลด์	69

บทที่ 1

บทนำ

1 บทนำทั่วไป

ตัวนำใดๆ ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า E และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะมีสนามแม่เหล็ก H เกิดขึ้นรอบตัวนำนั้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ จุดใดๆ จะตั้งฉากกันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1-1 [1]



รูปที่ 1-1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ 2 เส้น
ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าและมีกระแสไหลผ่าน

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ รอบตัวนำขึ้นอยู่กับระยะห่างจากตัวนำขนาดแรงดันและกระแสในตัวนำ ฉะนั้นตัวนำของระบบสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง จึงถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ประเภทหนึ่ง เพราะตัวนำในระบบสายส่งจ่ายที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า คือ ผลคูณของแรงดัน V กับกระแส I ($S = V \cdot I$) เมื่อใช้สายส่งจ่ายในการส่งกำลังไฟฟ้า ก็จะมีกระแสไหลในตัวนำ จะมีสนามแม่เหล็กโดยรอบตัวนำสายส่งจ่าย การส่งกำลังไฟฟ้ามากๆ เป็นระยะทางไกลๆ จำเป็นต้องส่งด้วยระบบแรงดันสูง เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน R ในสายส่ง คือ $I^2 R$ เมื่อตัวนำสายส่งมีแรงดันสูงขึ้น จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยรอบตัวนำมีค่าสูงมากขึ้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวตัวนำไฟฟ้าก็จะยิ่งสูงขึ้นด้วย ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสูง มีฝุ่นละอองมาก มีความเปราะเปื้อน ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำเปลี่ยนแปลงในอากาศอาจทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนา (corona) ได้ง่ายขึ้น โคโรนาจะก่อให้เกิดคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่สูงแพร่กระจายออกไปโดยรอบสายไฟ [2] คลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้อาจจะรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระบบสื่อสาร อุปกรณ์วัดอิเล็กทรอนิกส์

เช่น คอมพิวเตอร์ที่เข้ามาอยู่ในบริเวณใกล้ระบบสายส่งจ่าย อาจได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ วิธีการป้องกันสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีผลรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบของการเหนี่ยวนำชิลด์ (Shielding) ที่ทำด้วยโลหะที่สามารถสกัดกั้นการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของคลื่นรบกวน

1.1 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันเพิ่มมากขึ้น ในระบบสื่อสาร ระบบควบคุม อุปกรณ์วัด เช่น คอมพิวเตอร์ และเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ในพื้นที่ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูง ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้ถูกรบกวนจนไม่สามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ และอาจถึงกับเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องหามาตรการป้องกัน หรืออย่างน้อยก็ลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังกล่าวให้น้อยลง ดังตัวอย่าง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และการไฟฟ้านครหลวง ประสบปัญหาตัวเลขและตัวหนังสือที่ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในห้องสั่งการหรือห้องควบคุมสั่นจนไม่สามารถทำงานอย่างปกติ ทั้งนี้เนื่องมาจากคอมพิวเตอร์ ใช้งานอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากสายไฟฟ้าแรงสูงนั่นเอง ปัญหาที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดขึ้นกับหน่วยงานอื่นๆ อีกมากที่ใช้คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกัน

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในประเทศไทยจนถึงปัจจุบันยังไม่ปรากฏว่าได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ประการใด เนื่องจากว่าวิศวกรรมทางด้าน Electro-magnetic Compatibility (EMC) ยังเป็นสาขาวิชาที่ค่อนข้างใหม่ ซึ่งในต่างประเทศ เช่น อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น [3] เกาหลี [4] ออสเตรเลีย [5] และอีกหลายๆ ประเทศในทวีปยุโรป ได้มีการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ โดยบทความของญี่ปุ่นได้รายงานการสำรวจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสถานีไฟฟ้าและใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบ 500 kV ในประเทศอินโดนีเซีย ส่วนบทความของประเทศเกาหลีเป็นการสำรวจในระบบ 345 kV ซึ่งได้ผลการสำรวจขึ้นอยู่กับแนวการติดตั้งของบัสบาร์ สำหรับบทความของประเทศออสเตรเลียจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาการปิดกั้นหรือการชิลด์เพื่อป้องกันสนามแม่เหล็ก โดยใช้แผ่นโลหะกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์วัด ซึ่งพบว่าแผ่นโลหะสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการศึกษผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง

1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายการวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบข่ายของโครงการวิจัยนี้ คือ

- 1) วัดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในสถานีไฟฟ้า และใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่แปรตามระยะทางจากสายส่งจ่าย

- 2) ทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณ
- 3) ทำการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในการสร้างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
- 4) หาค่าวิกฤตของสนามแม่เหล็กที่เริ่มรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 5) ทดลองหาคุนสมบัติของกล่องชีลด์เพื่อใช้ป้องกันคลื่นรบกวน

หมายเหตุ สถานีไฟฟ้าในรายงานฉบับนี้ หมายความว่าทั้งสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้านครหลวง

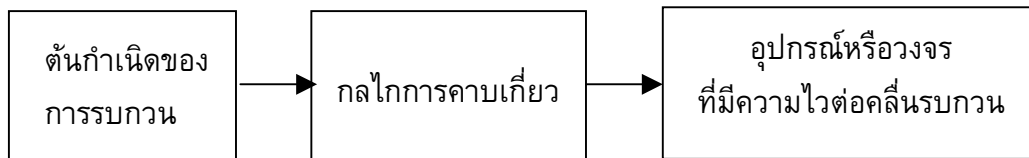
บทที่ 2

การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

2. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การศึกษาปัญหาของคลื่นรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาจแบ่งออกเป็นสามส่วนสำคัญได้ 3 ส่วน ดังในรูปที่ 2-1 คือ [6]

- 1) ต้นกำเนิดของการรบกวน (Source of interference)
- 2) กลไกการคาบเกี่ยวของการรบกวน (Coupling mechanism)
- 3) อุปกรณ์หรือวงจรที่มีความไวต่อการรบกวน



รูปที่ 2-1 ผังแสดงการรบกวนของสัญญาณรบกวน

การรบกวนอาจเข้ามาทางวงจรโดยผ่านตัวนำ หรือผ่านเข้ามาทางอากาศหรือสนาม การศึกษาในที่นี้จะเน้นถึงการรบกวนในลักษณะของสนาม คือ สนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน สนามแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าของกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน

2.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเกิดจากธรรมชาติ หรือมนุษย์สร้างขึ้น [7]

2.1.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่

- 1) ฟ้าผ่า ขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างพื้นโลกกับก้อนเมฆมีค่าค่อนข้างสูง และมีกระแสฟ้าผ่าไหลสูงมาก ปรากฏการณ์ฟ้าผ่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP) ขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งก็คือคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงประเภทหนึ่ง
- 2) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีคอสมิก (cosmic) เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง แพร่ออกมาจากระบบสุริยะจักรวาลและดวงอาทิตย์เข้าสู่โลกในลักษณะของคลื่นระนาบ [8]

2.1.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้นมีอยู่มากมาย แต่ที่สำคัญได้แก่

1) สวิตชิ่งทรานเซียนต์ (switching transient) เป็นแรงดันและกระแสที่มีขนาดสูงผิดปกติ และมีความถี่สูงที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการสวิตชิ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เกิดพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันสูงแพร่ออกสู่บรรยากาศ

2) สัญญาณสื่อสาร เช่น ระบบโทรศัพท์และวิทยุ เป็นต้น อาจเกิดการรบกวนในลักษณะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้

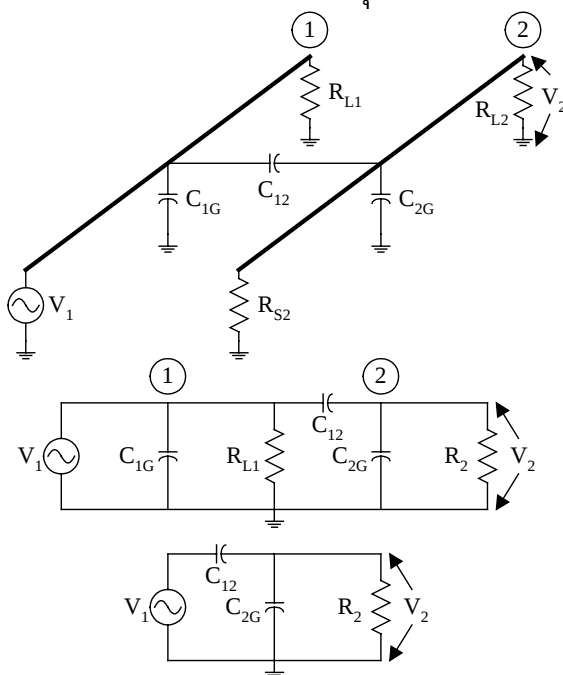
3) สายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ 50-60 Hz

การศึกษาในที่นี้จะเน้นที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำหรือความถี่พลังงาน 50 Hz ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถพิจารณาแยกกันได้ เนื่องจากในช่วงความถี่พลังงานนี้การคาบเกี่ยวระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กจะอ่อน ดังนั้นทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่ขึ้นแก่กัน โดยสนามไฟฟ้าจะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ส่วนสนามแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมีหลายอย่าง แต่ที่จะพิจารณาในที่นี้คือ บริเวณใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และในสถานีจ่ายไฟฟ้า

2.2 สนามไฟฟ้า

2.2.1 การคาบเกี่ยวสนามไฟฟ้า

เมื่อใดก็ตามที่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเสมอ [9] ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ และระยะระหว่างตัวนำทั้ง 2 ชิ้นดังกล่าว การคาบเกี่ยวสนามไฟฟ้าจะผ่านค่าเก็บประจุไฟฟ้า (capacitance) เรียกว่า ค่าเก็บประจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray capacitance) เกิดขึ้นระหว่างตัวนำ 2 ตัวนำ ดังนั้นการคาบเกี่ยวสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าสามารถแสดงเป็นแบบจำลองของค่าเก็บประจุไฟฟ้าสเตรย์ได้ดังรูปที่ 2-2 [9]



รูปที่ 2-2 แบบจำลองค่าเก็บประจุไฟฟ้าสเตรย์ในช่วงความถี่ต่ำระหว่างสายตัวนำ 2 เส้น

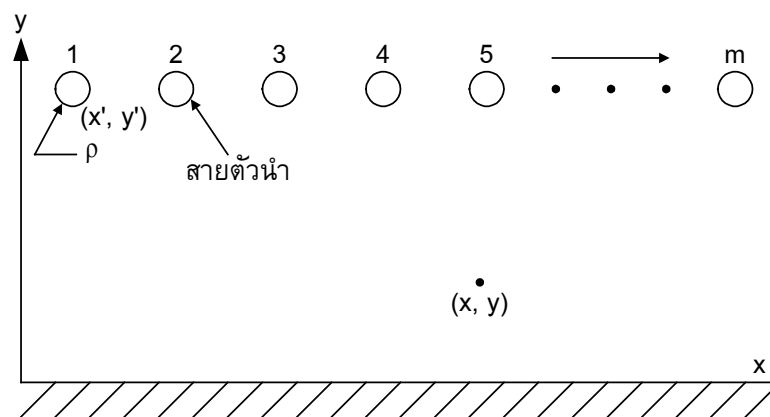
จากรูปที่ 2-2 สายตัวนำเส้นที่ 1 มีแรงดัน V_1 และเส้นที่ 2 เป็นโหลดซึ่งแทนด้วยอิมพีแดนซ์ $R_2 = R_{S2} // R_{L2}$ โดยที่ C_{1G} และ C_{2G} เป็นค่าเก็บประจุไฟฟ้าสถิตย์ลงดินของตัวนำแต่ละเส้น ค่าเก็บประจุไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างตัวนำแทนด้วยค่า C_{12} และ V_2 เป็นแรงดันตกคร่อมโหลด R_2 ในกรณีอุดมคติ V_1 กับ V_2 จะเป็นอิสระต่อกัน และ V_2 ไม่ได้เป็นตัวแปรของ V_1 แต่จากการคาบเกี่ยวสนามไฟฟ้า (C_{12}) ทำให้ไม่สามารถพิจารณา V_1 และ V_2 แยกกันได้ เป็นสาเหตุให้ V_2 มีค่าขึ้นอยู่กับ V_1 ดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2-2 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 กับ V_2 ได้ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$V_2 = \frac{sV_1 C_{12}}{1 + sR_2(C_{12} + C_{2G})} \quad (2.1)$$

สมการที่ (2.1) แสดงให้เห็นว่า V_2 จะมีค่าขึ้นอยู่กับ V_1 จากรูปที่ 2-2 ถ้าสายตัวนำเส้นที่ 1 ซึ่งมีแรงดัน V_1 คือ แหล่งกำเนิดคลื่นรบกวน เช่น สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และสายตัวนำเส้นที่ 2 ซึ่งมีแรงดัน V_2 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งนั่นก็คือ การเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนขึ้นนั่นเอง

2.2.2 การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าใช้แบบจำลอง 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ระบบสายส่งที่มีสายตัวนำหลายเส้น

ศักย์ไฟฟ้าที่จุด (x, y) ใดๆ $V(x, y)$ จะต้องสอดคล้องกับสมการสนามไฟฟ้าสถิตดังนี้คือ

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.2)$$

เมื่อแก้สมการที่ (2.2) พร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าบนสายส่งจ่ายกับกราวด์ ซึ่งสมมติให้เป็นตัวนำชนิดหนึ่งที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก็จะได้ผลเฉลยของแรงดัน $V(x, y)$ และความเข้มสนามไฟฟ้า $\vec{E}(x, y)$ ดังแสดงในสมการที่ (2.3 ก.) และ (2.3 ข.) [10]

$$V(x, y) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(y + y')^2 + (x - x')^2}{(y - y')^2 + (x - x')^2} \right] \quad (2.3 \text{ ก.})$$

$$\vec{E}(x, y) = \frac{-\rho}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(y + y')\vec{a}_y + 2(x - x')\vec{a}_x}{(y + y')^2 + (x - x')^2} - \frac{2(y - y')\vec{a}_y + 2(x - x')\vec{a}_x}{(y - y')^2 + (x - x')^2} \right] \quad (2.3 \text{ ข.})$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของสายตัวนำ
 (x', y') คือ ตำแหน่งที่ตั้งของสายตัวนำในแกน x และ y
 (x, y) คือ จุดที่ต้องการพิจารณาในแกน x และ y

ในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีตัวนำหลายเส้นนี้ จะต้องหาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นเสียก่อน เนื่องจากว่าแรงดันที่กระจายจากสายตัวนำแต่ละเส้นจะมีผลต่อสายตัวนำเส้นอื่นๆ ทำให้ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบ 3 เฟส ซึ่งยังต้องพิจารณาถึงผลของมุมเฟสที่นำหรือตามกัน 120° ด้วย จากรูปที่ 2-3 และสมการที่ (2.3 ก.) ถ้ากำหนดให้

$$(x, y) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{(y + y')^2 + (x - x')^2}{(y - y')^2 + (x - x')^2} \right] = \rho z \quad (2.4)$$

ผลการกระจายแรงดันจากตัวนำแต่ละเส้นที่มีต่อสายตัวนำเส้นอื่นๆ ซึ่งจากสมการที่ (2.4) ก็คือ Z เป็นตัวกำหนดถึงผลดังกล่าว และการกระจายแรงดันจากสายตัวนำนี้จะทำให้ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตัวนำแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะมีแรงดันเท่ากันก็ตาม จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_1 Z_{1,1} + \rho_2 Z_{1,2} + \bullet \bullet \bullet + \rho_n Z_{1,n} &= V_1 \\ \rho_1 Z_{2,1} + \rho_2 Z_{2,2} + \bullet \bullet \bullet + \rho_n Z_{2,n} &= V_2 \\ \bullet & \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \bullet & \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \bullet & \bullet \bullet \bullet \bullet \\ \rho_1 Z_{m,1} + \rho_2 Z_{m,2} + \bullet \bullet \bullet + \rho_n Z_{m,n} &= V_m \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่ $Z_{m,n}$ คือ ผลของสายตัวนำ n บนสายตัวนำ m โดยที่ n เท่ากับ m
 ρ_n คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำ

V_m คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งทราบค่าของสายตัวนำ m

สมการ (2.5) แสดงให้เห็นว่า แรงดันบนสายส่งตัวนำแต่ละเส้น จะได้จากการรวมผลของประจุไฟฟ้าของสายตัวนำเส้นอื่นๆ บนสายตัวนำเส้นนั้น และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{2,1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,1} \\ Z_{1,2} & Z_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{1,n} & Z_{2,n} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_m \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

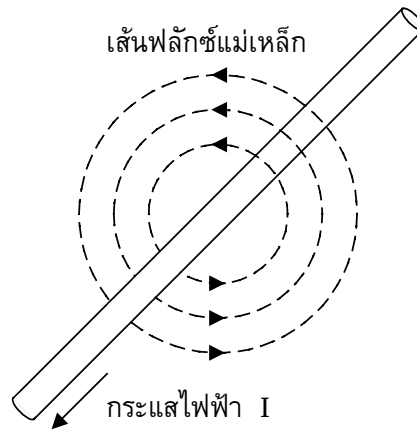
โดยใช้สมการที่ (2.4) – (2.6) จะสามารถแก้สมการหาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นออกมาได้ โดยจะต้องทราบค่า Z ในเมทริกซ์ทั้งหมด และนำค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นที่ได้มาแทนค่าในสมการที่ (2.3 ข.) ซึ่งสามารถคำนวณแยกกันได้ จะได้ค่าสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากสายตัวนำแต่ละเส้น จากนั้นนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากสายตัวนำทั้งหมดมารวมกันตามแนวแกน x และ y และหาขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้า ความถูกต้องของการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ จะอยู่ที่การหาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้น ซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่ามีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันก็ตาม

2.3 สนามแม่เหล็ก

เป็นที่ทราบกันดีว่า ตัวนำใดก็ตามที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ในที่นี้จะเน้นไปที่สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบสายตัวนำสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสำคัญ

2.3.1 การคาบเกี่ยวสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กรอบตัวนำใดๆ จะเกิดขึ้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2-4 เส้นประคือ เส้นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ซึ่งจะครบรอบเสมอ ความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) B มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก H (magnetic field intensity) ที่เกิดจากกระแส I ที่ระยะ x ตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) [1] ดังแสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8)



รูปที่ 2-4 สนามแม่เหล็กซึ่งแพร่ออกมาจากสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.7)$$

$$B = \mu H \quad (2.8)$$

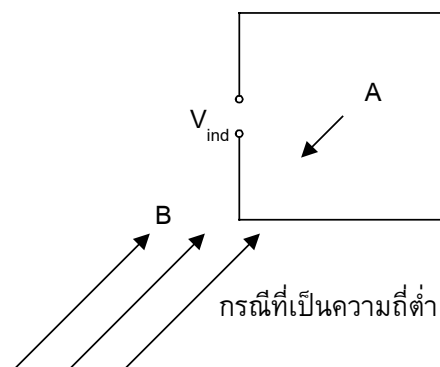
โดยที่ B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/m^2 หรือ Tesla

μ คือ ค่าเปอร์มีบิลิตี (permeability) ของตัวกลางที่เส้นฟลักซ์แม่เหล็กแพร่ผ่าน มีค่า $\mu_0 \mu_r$

μ_0 คือ ค่าเปอร์มีบิลิตีของอากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ และ μ_r คือ ค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์ของวัสดุที่เส้นฟลักซ์แม่เหล็กแพร่ผ่าน

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น A/m

การคาบเกี่ยวระหว่างสนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กตามกฎของฟาราเดย์ และใช้รูปที่ 2-5 ประกอบ



รูปที่ 2-5 แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรที่เป็นวงรอบ (loop) ในพื้นที่ที่เต็มไปด้วยสนามแม่เหล็ก

ในรูปที่ 2-5 เมื่อเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา $B = B_0 e^{j\omega t}$ เมื่อ B_0 คือ ค่ายอดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งผ่านส่วนประกอบที่เป็นวงรอบ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หนึ่งๆ จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นภายในวงรอบนั้น ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรต ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ของลูป A ดังสมการที่ (2.9)

$$V_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{n} dA$$

$$V_{ind} = -j\omega B_0 e^{j\omega t} A \cos\theta \quad (2.9)$$

โดยที่ $\vec{n}$ คือ เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นที่วงรอบ

θ คือ มุมระหว่างทิศทางของ $\vec{B}$ กับ $\vec{n}$

ด้วยเหตุนี้เองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มีส่วนประกอบเป็นวงรอบ จึงมีโอกาสจะถูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่แผ่ร่อออกมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

2.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ สามารถนำกฎของ Biot-Savart [10] มาประยุกต์ใช้ โดยใช้รูป 2-3 มาประกอบการคำนวณ สมมติว่าพื้นดินเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (non-magnetic material) จากกฎของ Biot-Savart [10] จะได้

$$\vec{B}(x, y) = -2I \left[\frac{(y - y')\vec{a}_x - (x - x')\vec{a}_y}{(y - y')^2 + (x - x')^2} \right] \quad (2.10)$$

ในกรณีของระบบ 3 เฟส จะต้องพิจารณาถึงมุมของแต่ละเฟสที่สัมพันธ์กัน 120° ด้วย

2.4 การชิลด์

เนื่องจากว่าปัญหาสัญญานรบกวนส่วนใหญ่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีสาเหตุมาจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการป้องกันการรบกวนในที่นี่ ก็จะเป็นการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก เป็นการลดทอนหรือป้องกันการคาบเกี่ยวของสนามแม่เหล็กที่ไม่พึงปรารถนาเข้ามายังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีวิธีหลักๆ อยู่ 2 วิธี [11] คือ

1) การเบี่ยงเส้นฟลักซ์ (Flux Shunting) คือการใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูง มาวางกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับตัวรับสัญญาณ ในที่นี้คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดไหลในเนื้อโลหะ

2) กระแสไหลวน (Eddy Current) คือการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมากหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เข้ามารบกวน โดยใช้โลหะที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงๆ มาวางกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับตัว

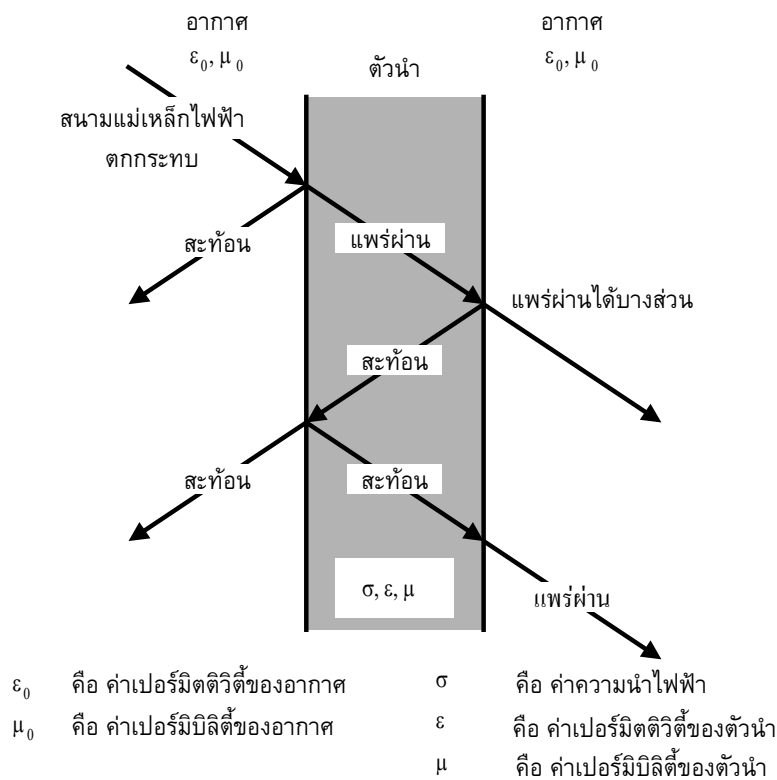
รับสัญญาณ ในลักษณะที่เป็นวงล้อมรอบตัวรับสัญญาณ เพื่อให้กระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นสามารถไหลได้ครบวงจรและสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้าง ทั้งนี้การจัดวางโลหะดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่แพร่เข้ามาด้วย

2.4.1 ประสิทธิภาพของการชีลด์ (Shielding effectiveness)

ประสิทธิภาพของการชีลด์ จะกำหนดโดยอัตราส่วนการลดทอนสนามแม่เหล็ก ขณะที่สนามแม่เหล็กแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิด จะทำการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดหนึ่งก่อนโดยไม่มีการชีลด์ หลังจากทำการติดตั้งชีลด์ระหว่างแหล่งกำเนิดกับจุดสังเกต ก็ทำการวัดที่จุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง ประสิทธิภาพของการชีลด์สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก่อนการชีลด์ และหลังการชีลด์ดังสมการ [7]

$$SE(dB) = 20 \log \left[\frac{|B|_{\text{unshielded}}}{|B|_{\text{shielded}}} \right] \quad (2.11)$$

การปิดกั้นสนามแม่เหล็ก จะอาศัยหลักการการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อแพร่ผ่านผนังโลหะ คือ การสะท้อนสัญญาณ (reflection) และการดูดกลืนสัญญาณ (absorption) [7] ดังในรูปที่ 2-6 หลักการชีลด์มีพื้นฐานมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านผนังโลหะ และการสะท้อนจากผิวของโลหะ คลื่นรบกวนจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนจากผิวของชีลด์ส่วนหนึ่ง และคลื่นรบกวนที่เหลือจะแพร่ผ่านชีลด์ หลังจากถูกดูดกลืนไว้ในชีลด์อีกส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ก็ยังมี การสะท้อนไปมา (multiple reflection) ระหว่างผิวของผนังโลหะด้านในหลักการลดทอนสนามแม่เหล็กจะอาศัยการดูดกลืนและการสะท้อนคลื่น

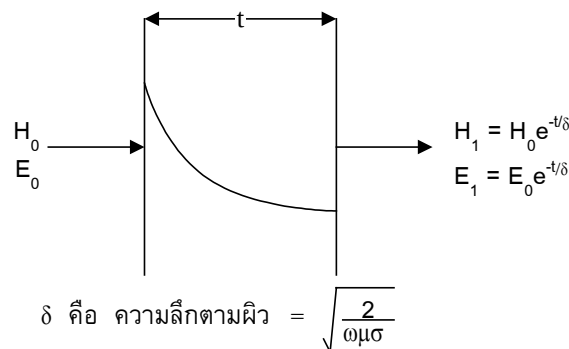


รูปที่ 2-6 ผลกระทบของผนังโลหะต่อสัญญาณรบกวน

2.4.1.1 การดูดกลืนสัญญาณ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ผ่านโลหะตัวนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เพราะการสูญเสียพลังงานให้กับค่าความต้านทานของโลหะ ด้วยสาเหตุนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีค่าความเข้มลดลงแบบ เอ็กโปเนนเชียล ตามความหนาของโลหะตัวนำไฟฟ้า ความลึกตามผิว (skin depth) ของโลหะ ซึ่งหมายถึง ระยะทางใต้พื้นผิวของโลหะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดทอนลงโดยตัวแปร e (exponential) จะเป็นตัวกำหนดค่าคงที่การลดทอนสัญญาณ

จากรูปที่ 2-7 ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่เข้ามายังผนังโลหะกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดทอนลงที่อีกด้านหนึ่งของผนังโลหะ



รูปที่ 2-7 การลดทอนสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

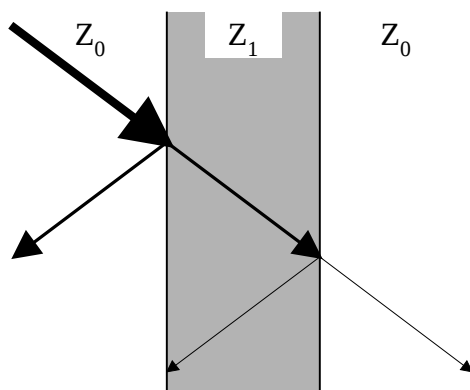
โดยที่ t คือ ความหนาของโลหะตัวนำไฟฟ้า

δ คือ ความลึกตามผิวของโลหะตัวนำไฟฟ้า

$$A = 20 \log \left[\frac{H_0}{H_0 e^{-t/\delta}} \right] \quad (2.12)$$

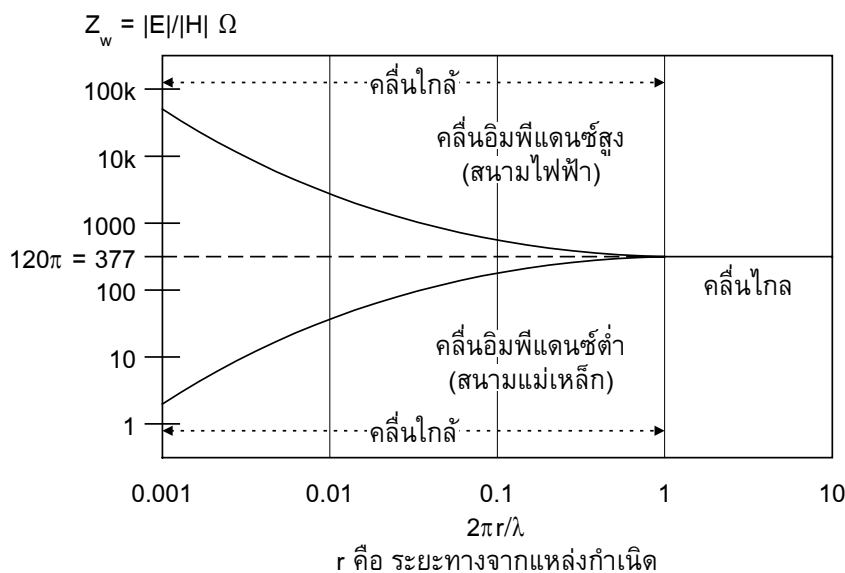
2.4.1.2 การสะท้อนของคลื่น

ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นเกิดขึ้นได้เนื่องจากการที่อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านมีค่าเปลี่ยนไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2-8 ผนังซีลด์มีขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์อยู่ 2 แห่ง แห่งแรกคือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านจากอากาศซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 เข้าสู่โลหะ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 และแห่งที่สอง คือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกจากโลหะสู่อากาศ



รูปที่ 2-8 ขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านผนังโลหะ

การคำนวณค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นจะเริ่มที่การหาค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น (wave impedance, Z_w) เสียก่อน ดังรูปที่ 2-9 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า [12] อิมพีแดนซ์ของคลื่นก็คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า E กับความเข้มสนามแม่เหล็ก H โดยอัตราส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะทาง r จากแหล่งกำเนิดไปยังจุดที่ทำการวัด



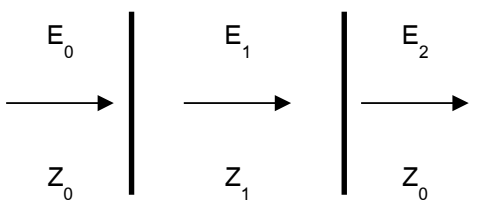
รูปที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 2-9 สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

- จุดที่ $2\pi r/\lambda = 1$ หรือเมื่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น $r = \lambda/2\pi$ จะเป็นจุดที่แบ่งแยกระหว่างคลื่นใกล้ (near field) และคลื่นไกล (far field)
- คลื่นใดๆ ก็ตามจะอยู่ในสภาวะคลื่นไกล ก็ต่อเมื่อ $r \gg \lambda/2\pi$ ซึ่งในสภาวะคลื่นไกลนี้ อิมพีแดนซ์ของคลื่น $Z_w = Z_0 = E/H = 377 \Omega$ คลื่นจะเป็นคลื่นระนาบ (plane wave)
- เมื่อ $r \ll \lambda/2\pi$ คลื่นใด ๆ จะอยู่ในสภาวะของคลื่นใกล้ อิมพีแดนซ์ของคลื่น $Z_w = E/H = Z_0 \lambda/2\pi r$ ในกรณีนี้ $Z_w \gg Z_0$ เนื่องจาก $\lambda/2\pi r \gg 1$ คลื่นที่อยู่ในเงื่อนไขนี้ก็คือ สนามไฟฟ้า หรือ สนามอิมพีแดนซ์สูง (High impedance field)
- ในสภาวะคลื่นใกล้ ถ้าคลื่นมี $Z_w \ll Z_0$ เมื่อ $\lambda/2\pi r \gg 1$ หรือมี $Z_w = E/H = Z_0 2\pi r/\lambda$ คลื่นนี้จะเรียกว่าเป็น สนามแม่เหล็ก หรือ สนามอิมพีแดนซ์ต่ำ (Low impedance field)

สรุปได้ว่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะมีค่าสูงเมื่อจุดที่ทำการวัดอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า และในทางตรงข้ามถ้าจุดที่ทำการวัดอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ของคลื่นก็จะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามถ้าจุดที่ทำการวัดอยู่ไกลทั้งจากแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะมีค่าเข้าใกล้ $120\pi \Omega$ ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นระนาบ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของคลื่นว่าเป็น สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก รูปที่ 2-10 และ รูปที่ 2-11 แสดงการแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนาม แม่เหล็กผ่านตัวนำไฟฟ้าตามลำดับ



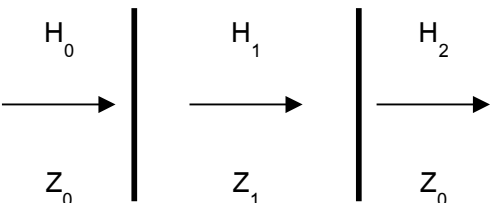
เมื่อละเลยการสะท้อนไปมาภายในจะได้

$$E_1 = \frac{2Z_1}{Z_0 + Z_1} E_0 \quad E_2 = \frac{4Z_0 Z_1}{(Z_0 + Z_1)^2} E_0$$

และเมื่อ $Z_1 \ll Z_0$ จะได้

$$E_2 = \frac{4Z_1}{Z_0} E_0 \quad R_E = 20 \log \left[\frac{Z_0}{4Z_1} \right]$$

รูปที่ 2-10 การแพร่ของสนามไฟฟ้าผ่านตัวนำ



เมื่อละเลยการสะท้อนไปมาภายในจะได้

$$H_1 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_1} H_0 \quad H_2 = \frac{4Z_0 Z_1}{(Z_0 + Z_1)^2} H_0$$

และเมื่อ $Z_1 \ll Z_0$ จะได้

$$H_2 = \frac{4Z_1}{Z_0} H_0 \quad R_H = 20 \log \left[\frac{Z_0}{4Z_1} \right]$$

รูปที่ 2-11 การแพร่ของสนามแม่เหล็กผ่านตัวนำ

จากรูปที่ 2-10 สนามไฟฟ้าความเข้ม E_0 แพร่จากตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 เข้าไปยังตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 ซึ่งสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มลดลงเหลือ E_1 การซีลด์ที่ดีค่า E_1 จะต้องมิต่ำ เพราะนั่นหมายความว่าสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่แพร่เข้ามาจะสะท้อนกลับที่ผนังของตัวนำ ในเนื้อตัวนำ สนามไฟฟ้า E_1 ยังแพร่ต่อไปถึงแม้ว่าจะลดทอนลงเนื่องจากผลของผกผันโลหะ เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของค่าการสูญเสียจากการสะท้อนและค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณสนามไฟฟ้า E_2 ซึ่งแพร่ผ่านออกจากผนังอีกด้านหนึ่งของตัวนำสามารถหาได้โดยใช้สมการข้างรูปที่ 2-10 จากสมการแสดงให้เห็นว่าตัวนำมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำจะลดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนลงได้

จากรูปที่ 2-11 ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนของสนามแม่เหล็กก็สามารถคำนวณได้คล้ายๆ กับของสนามไฟฟ้า ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนของสนามแม่เหล็กจะมีค่าต่ำกว่าของสนามไฟฟ้าในกรณีที่อยู่ในสภาวะคลื่นไกล เพราะว่าอิมพีแดนซ์ Z_0 จะมีค่าต่ำลงเมื่ออยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายในเนื้อตัวนำลักษณะสมบัติของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างจากสนามไฟฟ้า เนื่องจากสภาวะขอบเขตที่แตกต่างกันในเนื้อตัวนำ สนามแม่เหล็ก H_1 จะมีค่าเท่ากับ $2H_0$ ถ้า $Z_1 \ll Z_0$ ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของสนามไฟฟ้า ในกรณีที่ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณมีค่าต่ำ พลังงานที่สะท้อนกลับภายในตัวนำที่ขอบเขตผนังที่สองของตัวนำจะไม่สามารถละเลยได้

2.4.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำและวัสดุที่ใช้ปิดกั้น

ดังที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว สำหรับสถานะคลื่นไกลทั้งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นจะเป็นกลไกการชิลด์ที่สำคัญในการพิจารณาสำหรับในช่วงความถี่ต่ำ ขณะที่ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นเป็นกลไกสำคัญในช่วงความถี่สูง สำหรับสนามไฟฟ้าในสถานะคลื่นไกล ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนเป็นกลไกหลักในช่วงความถี่ต่ำ ขณะที่ในช่วงความถี่สูง ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นจะเป็นตัวแปรสำคัญ แต่สำหรับสนามแม่เหล็กในสถานะคลื่นไกล สถานการณ์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างแตกต่างจากของสนามไฟฟ้า คือ ทั้งค่าการสูญเสียจากการสะท้อนและการดูดกลืน คลื่นจะมีค่าค่อนข้างต่ำในช่วงความถี่ต่ำ และค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่นจะเป็นกลไกหลักของการชิลด์ที่ทุกช่วงความถี่ นั้นหมายถึง การปิดกั้นสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ต่ำจะทำได้ค่อนข้างยาก ข้อความข้างต้นได้ให้ไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถานะคลื่นไกลและคลื่นใกล้ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ชนิดของคลื่น	สถานะ	กลไกการชิลด์ที่สำคัญ	
		ช่วงความถี่ต่ำ	ช่วงความถี่สูง
สนามไฟฟ้า	คลื่นไกล	R	A
	คลื่นใกล้	R	A
สนามแม่เหล็ก	คลื่นไกล	R	A
	คลื่นใกล้	R, A	A

หมายเหตุ R คือ ค่าการสูญเสียจากการสะท้อน

A คือ ค่าการสูญเสียจากการดูดกลืนคลื่น

การปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำมี 2 วิธี คือ การเพิ่มค่าการสูญเสียการดูดกลืนสัญญาณให้กับโลหะที่จะใช้เป็นชิลด์ และการทำให้สนามแม่เหล็กในบริเวณที่ต้องการจะป้องกันมีค่าลดลง ทั้ง 2 วิธีสามารถทำได้โดยใช้วัสดุที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงมาทำเป็นชิลด์ ซึ่งจะช่วยลดความลึกตามผิว $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ และจัดเตรียมส่วนที่มีค่ารีลักแตนซ์ (reluctance) ต่ำเพื่อเป็นเส้นทางไหลของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก

วัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กสามารถแบ่งตามโครงสร้างอะตอมและค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์ (relative permeability) ได้ดังนี้ [13]

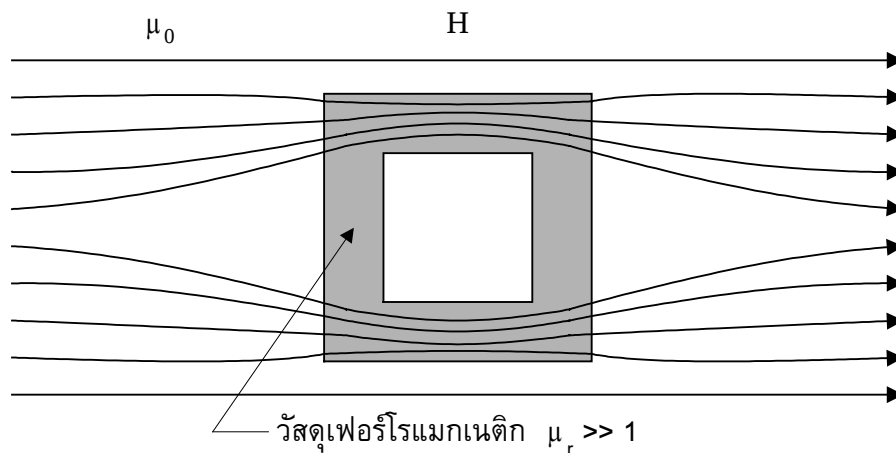
- วัสดุไดแมกเนติก (diamagnetic material) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์ต่ำกว่า 1
- วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic) และแอนตี้เฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์สูงกว่า 1 เล็กน้อย
- วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) และเฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic) มีค่าเปอร์มีบิลิตีสัมพัทธ์สูงกว่า 1 มาก

ในตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุไดแมกเนติก พาราแมกเนติก และเฟอร์โรแมกเนติก

คุณสมบัติ	ไดแมกเนติก	พาราแมกเนติก	เฟอร์โรแมกเนติก
ความไวต่อสนามแม่เหล็ก	ต่ำและเป็นลบ	ต่ำและเป็นบวก	สูงและเป็นบวก
เปอร์มีบิลิตี้	< 1	> 1	$\gg 1$
การเรียงตัวของสารแม่เหล็ก	ตรงกันข้าม	สะเปะสะปะ	ทิศทางเดียวกัน

จากตารางที่ 2.2 วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีความสามารถในการรวมเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือเพิ่มเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในเนื้อวัสดุ เนื่องจากว่ามีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ ทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านเนื้อวัสดุได้ง่ายกว่าไหลไปทางอื่น ดังในรูปที่ 2-12 แสดงการเบี่ยงเบนเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก



รูปที่ 2-12 การเบี่ยงเบนของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

บทที่ 3

การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำการสำรวจวัดในสถานที่ 2 แห่งต่อไปนี้ คือ

- 1) ในบริเวณสถานีไฟฟ้า
- 2) ใต้สายส่งจ่ายแรงสูงไฟฟ้า

3.1 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า

3.1.1 สถานที่ที่ทำการวัด

การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจำทำการวัดในสถานีไฟฟ้าของระบบแรงดันต่างๆ ทั้งระบบส่งและระบบจำหน่าย ซึ่งมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงติดตั้งอยู่ และเป็นสถานที่ที่คาดว่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง การที่ต้องทำการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่หลายๆ ระบบแรงดัน เนื่องมาจากว่าระบบส่งพลังงานไฟฟ้าจะส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันที่ค่อนข้างสูง เช่น 500 kV, 230 kV และ 115 kV ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบมีค่าต่ำ แต่ความเข้มสนามไฟฟ้าแปรตามแรงดันของระบบจะมีค่าสูง ส่วนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าแปรตามกระแสไฟฟ้าในระบบจะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันที่ไม่สูงมากนัก เช่น 69 kV, 24 kV และ 12 kV ทำให้สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมามีค่าต่ำมากสามารถละเลยได้ ส่วนกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าจะสร้างสนามแม่เหล็กออกมาได้สูงกว่า การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก จะปฏิบัติตามข้อกำหนดของ ANSI/IEEE Standard 644-1994 [14]

สถานีไฟฟ้าที่เลือกเพื่อวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้แก่

- 1) สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 จังหวัดลำปาง ระบบแรงดัน 500 kV, 230 kV
- 2) สถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ ระบบแรงดัน 500 kV, 230 kV และ 115 kV
- 3) สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก กรุงเทพฯ ระบบแรงดัน 500 kV
- 4) สถานีไฟฟ้าแรงสูงภูมิพล จังหวัดตาก ระบบแรงดัน 230 kV
- 5) สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ กรุงเทพฯ ระบบแรงดัน 69 kV
- 6) สถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก กรุงเทพฯ ระบบแรงดัน 115 kV
- 7) สถานีไฟฟ้าย่อยบางกอกน้อย กรุงเทพฯ ระบบแรงดัน 69 kV

สถานีไฟฟ้าแรงสูงในอันดับ 1) ถึง 4) เป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นระบบส่งมีหลายระดับแรงดันในสถานี ส่วนสถานีไฟฟ้าย่อยในอันดับที่ 5) ถึง 7) เป็นของการไฟฟ้านครหลวง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

เพื่อให้การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปอย่างถูกต้องและเที่ยงตรง จึงได้ใช้เครื่องมือวัด 2 ชนิด ได้แก่ Electromagnetic Field Analyzer EFA-3 [15] และ EMDEX-II [16] ในการวัดเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการวัด โดยเครื่องมือวัดทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถวัดได้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และมีลักษณะสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1 และในรูปที่ 3-1 ถึงรูปที่ 3-4 แสดงลักษณะภายนอกของเครื่องมือวัด ตามหลักการแล้วผลการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ขนาดของเซนเซอร์สนามไฟฟ้า (electric field sensor) ควรจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อจะได้มั่นใจในความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ารอบๆ ตัวเซนเซอร์ ความต้านทานรั่วตามผิว (leakage resistance) ของตัวฉนวนควรจะมีค่าสูงมากๆ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าบนเซนเซอร์ลงดิน ค่าความต้านทานรั่วตามผิวนี้อาจขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำตัวฉนวน และจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นในบรรยากาศสูง หรือเมื่อผิวของตัวฉนวนเปราะเปื้อน แต่การวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ผลการวัดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเซนเซอร์เท่านั้น ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมจะไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติระหว่างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กที่ใช้ 2 ชนิด

ชื่อ	Electromagnetic field analyzer (EFA-3)	Magnetic and Electric field meter (EMDEX-II)
ลักษณะของตัวเซนเซอร์	แผ่นระนาบคู่ ระยะห่าง 2 ซม. ตั้งในแนวแกน x, y, z สำหรับการวัดสนามไฟฟ้า และขดลวด Triaxial coil สำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก	แผ่นระนาบคู่ ระยะห่าง 5 ซม. สำหรับการวัดสนามไฟฟ้า และขดลวด Orthogonally mounted coil สำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก
พิสัยการวัด	0.1 V/m - 100 kV/m 0.1 mG - 100 G	0.1 kV/m - 13 kV/m 0.1 mG - 3 G
ค่าที่อ่านได้	ค่า rms ในแนวแกนทั้ง 3 แกน ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	เฉพาะในแนวแกนตั้งฉากสำหรับสนามไฟฟ้า และค่า rms ในแนวแกน 3 แกนสำหรับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3-1 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3-2 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3-3 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3-4 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า

3.1.3 การเปรียบเทียบความถูกต้องในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของเครื่องวัด

จากผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ สถานีไฟฟ้าต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัดทั้งสองแบบ คือ EMDEX-II และ EFA-3 พบว่าผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยเครื่องมือวัดทั้งสองวัดค่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันไม่เกิน 3 % ส่วนกรณีของการวัดความเข้มสนามไฟฟ้า EMDEX-II วัดได้ค่าต่ำกว่า EFA-3 ประมาณ 20 % จึงต้องตรวจสอบว่าเครื่องมือวัดเครื่องใดวัดได้ถูกต้อง โดยวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเข้มสนามไฟฟ้าอีกเครื่องหนึ่ง เพื่อจะได้นำผลการวัดที่ถูกต้องมาทำการวิเคราะห์ และได้ทำการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องมือวัด 3 แบบ ได้แก่

- EFM-309 (เป็นของนักวิจัยชาวญี่ปุ่น ซึ่งต่อมาได้บริจาคอุปกรณ์นี้ให้กับศูนย์เชี่ยวชาญฯ)
- Electromagnetic Field Analyzer EFA-3
- EMDEX-II

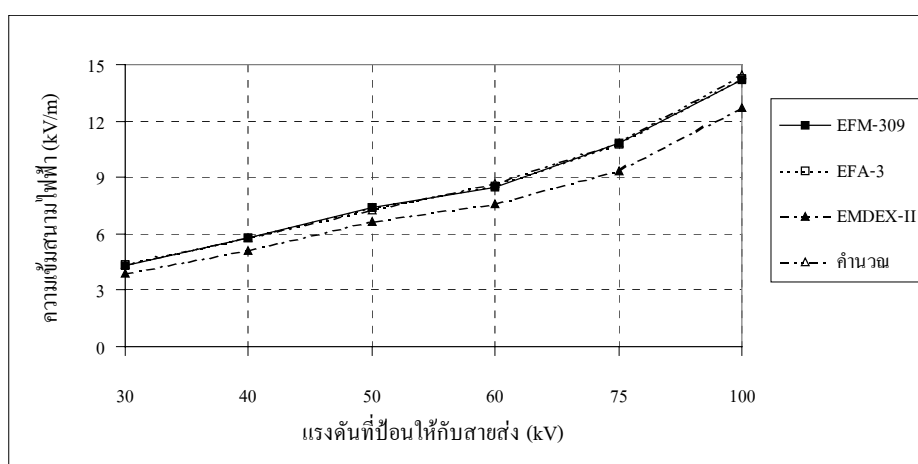
การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบของเครื่องมือทั้ง 3 แบบ โดยใช้สายควบตัวนำ 4 เส้นเป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า ซึ่งในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยขึงสูงจากพื้น 4.5 เมตร ดังรูปที่ 3-5 เครื่องมือทั้ง 3 ได้ติดตั้งสูงจากพื้น 1 เมตร ผลการวัดและการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และสามารถเขียนกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-5 การติดตั้งสายส่งในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัดความเข้มสนามไฟฟ้า

แรงดันที่ป้อนให้กับ สายส่งตัวนำ (kV)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)			
	EFM-309	EFA-3	EMDEX-II	คำนวณ
30	4.3	4.376	3.926	4.345
40	5.8	5.762	5.142	5.793
50	7.4	7.424	6.649	7.242
60	8.5	8.532	7.597	8.69
75	10.8	10.775	9.318	10.863
100	14.2	14.275	12.687	14.483



รูปที่ 3-6 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่อ่านจากเครื่องมือวัดทั้ง 3 แบบ

จากรูปที่ 3-6 จะเห็นว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด EFM-309 และ EFA-3 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ส่วนค่าที่อ่านได้จาก EMDEX-II จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมืออื่นประมาณ 10-20 % ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลกระทบจากด้ามถือของ EMDEX-II ซึ่งต้องใช้คนถือ หรือยึดกับโต๊ะตลอด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า จะยึดถือค่าที่ได้จาก EFA-3 เป็นค่าที่ถูกต้อง

3.1.4 วิธีการวัด

การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในสถานีไฟฟ้า เริ่มแรกจะต้องทำการเลือกเส้นทางการวัด 2-3 แนว ซึ่งขึ้นอยู่กับความใหญ่ของลานสวิตช์ และเลือกแนวเส้นทางการวัดที่มีการเรียงตัวของตัวนำบัสบาร์ในระดับที่ต่ำที่สุด เนื่องจากว่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดตามเส้นทางวัดนี้ การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กจะกระทำที่ตัวนำบัสบาร์นี้ โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดจะติดตั้งและวัดที่ตำแหน่งสูงจากพื้นดิน 1 เมตร และทำการวัดทุกๆ 1 เมตร ตามแนวเส้นทางการวัด การคำนวณค่าความเข้มสนาม

ไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในสถานี่ไฟฟ้าจะทำได้ยาก เนื่องจากว่าในสถานี่ไฟฟ้าหรือลานสวิตช์ (switchyard) มีแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสไฟฟ้ามากมาย ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่มาจากหลายทิศทาง นอกจากนี้ยังไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในบัสบาร์ เพราะการต่อเชื่อมบัสที่สลับซับซ้อนในระบบ

3.1.5 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในสถานี่ไฟฟ้า

การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ทำที่ทุกระดับแรงดันของแต่ละสถานี่ และทำหลายเส้นทางการวัด ทำให้ได้ข้อมูลมากมายซึ่งไม่สามารถนำมาแสดงได้หมด ดังนั้นจึงได้เลือกเพียงบางแห่งขึ้นมาเป็นตัวอย่าง แต่ก็เพียงพอที่จะนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลได้ ส่วนตัวอย่างอื่นๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.3

จากผลของการวัดที่แสดงในตารางที่ 3.3 จะพบว่าความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด 11.3 kV/m ซึ่งเกิดจากบัสบาร์ 500 kV มีระดับสูงจากพื้นดิน 9 เมตร แต่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีเพียง 39.3 mG ส่วนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงสุดถึง 14.15 G (14,150 mG) ที่เกิดในบริเวณติดตั้ง Reactor-capacitor bank อยู่สูงจากพื้นดินไม่มากและมีสายไฟฟ้าทดสอบซับซ้อน แต่ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเพียง 3.3 kV/m

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสถานีไฟฟ้า

Date	Place/Path	System Voltage (kV)	Bus Height	Maximum Electric Field Intensity (kV/m)	Maximum Magnetic Flux Density (mG)
2/2/98	Bhumipol/Path1	230	6.5 m	4.675	72.44
2/2/98	Bhumipol/Path2	230	6.5 m	2.305	19.65
2/2/98	Bhumipol/Path3	230	6.5 m	3.768	92.46
19/2/98	Maemoe3/Path1	230	7 m	1.046	30.14
19/2/98	Maemoe3/Path2	230	7 m	7.207	56.87
19/2/98	Maemoe3/Path1	500	9m + 29m Line	7.453	39.34
19/2/98	Maemoe3/Path2	500	9 m	11.253	39.33
23/2/98	Thatako/RC-bank	230		3.327	14.15 G*
23/2/98	Thatako/Path1	500	9m + 29m Line	8.851	45.28
23/2/98	Thatako/Path2	500	9 m	10.277	58.92
23/2/98	Thatako	115	6 m	3.014	108.31
24/2/98	Thatako/Path1	230	7 m	5.021	174.2
24/2/98	Thatako/Path2	230	7 m	6.113	201.3
23/6/98	Nongchok/Path1	115	5 m	-	153.2
23/6/98	Nongchok/Path2	115	5 m	-	114.4
23/6/98	Nongchok/Path3	115	5 m	-	262.4
26/6/98	Bangkapi/Path1	69	3 m	-	902.4
26/6/98	Bangkapi/Path2	69	3 m	-	966.4
29/6/98	Bangkoknoi/Path1	69	4 m	-	409.6
29/6/98	Bangkoknoi/Path2	69	4 m	-	755.2

หมายเหตุ ช่องที่เว้นว่างไว้ คือ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าต่ำมากในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบจำหน่าย

* ความหนาแน่นฟลักซ์สูงเกิดขึ้นในบริเวณติดตั้ง Reactor capacitor bank

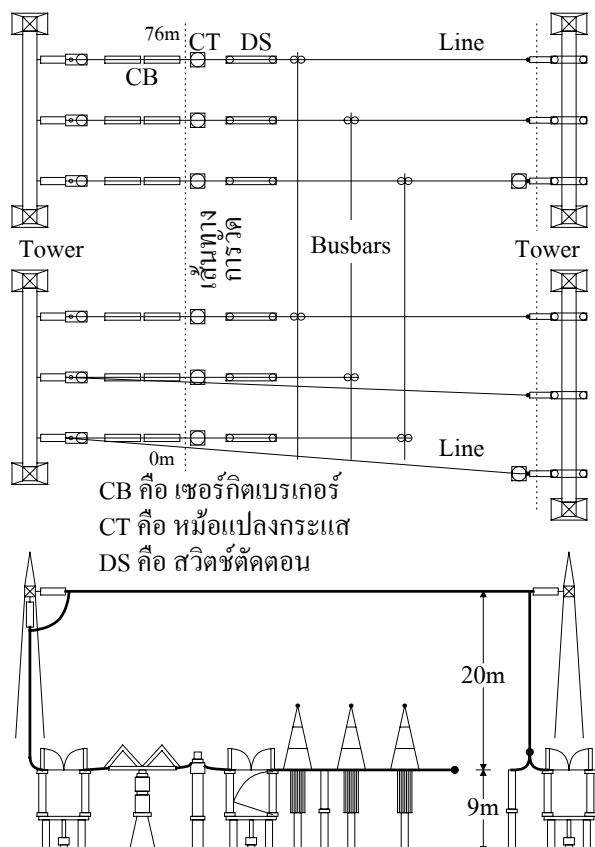
ตัวอย่างที่ 1-5 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ดังในรูปที่ 3-7

สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นสถานีไฟฟ้าต้นทางจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิเกในดแม่เมาะ มีระบบไฟฟ้าทั้ง 500 kV 230 kV และ 115 kV การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้เลือกทั้ง 3 ระบบเป็นสถานที่ทำการทดลอง ระบบ 500 kV เป็นระบบแรงดันที่สูงที่สุดที่มีอยู่ในประเทศไทยขณะนี้ จึงได้ยกตัวอย่างระบบ 500 kV นี้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์

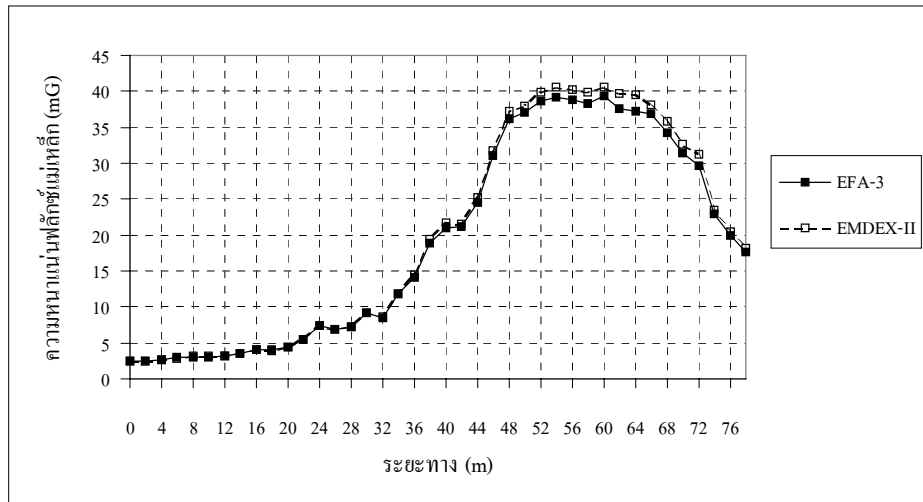


รูปที่ 3-7 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ

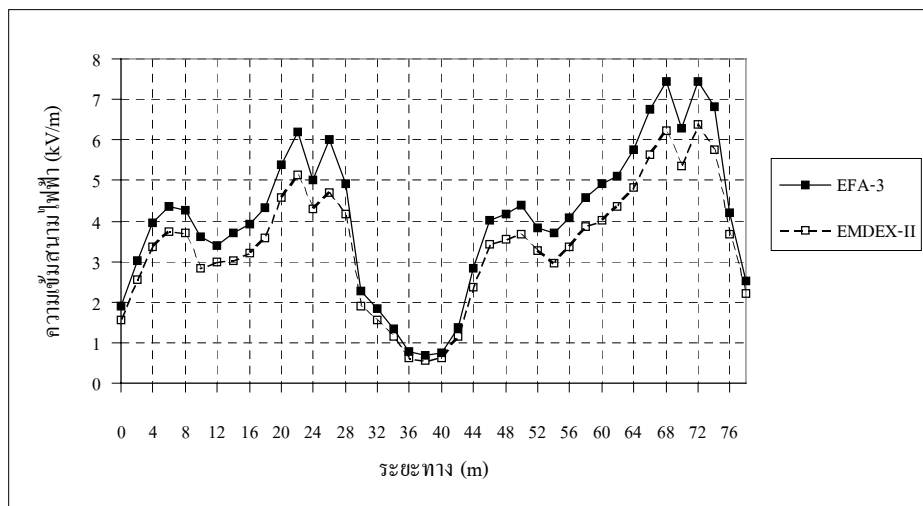
รูปที่ 3-8 แสดงแผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่างๆ ในลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ พร้อมเส้นทางการวัด (เส้นประ) โดยเริ่มวัดที่ปลายล่างของเส้นประตรงกับตำแหน่งเสาโลหะและรูปที่ 3-9 ถึงรูปที่ 3-12 แสดงการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามแนวเส้นทางการวัดภายในลานสวิตช์



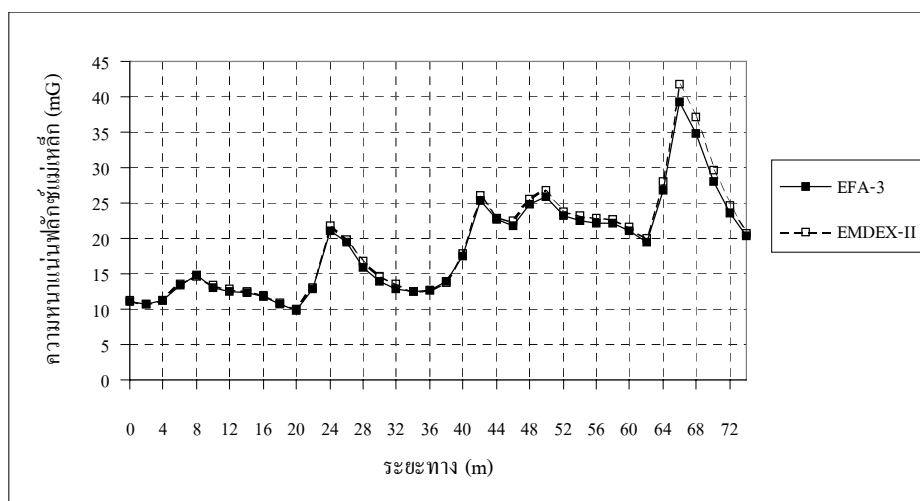
รูปที่ 3-8 แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่างๆ ในลานสวิตช์ 500 kV พร้อมเส้นทางการวัด



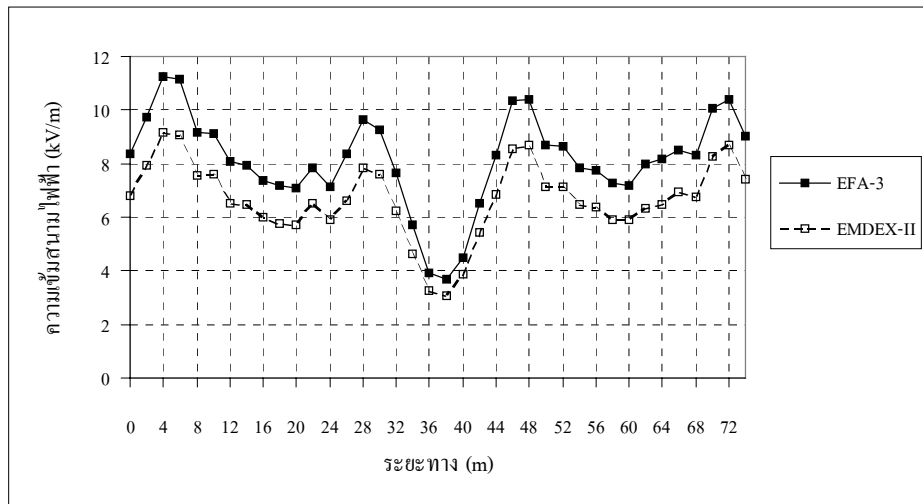
รูปที่ 3-9 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ



รูปที่ 3-10 ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ



รูปที่ 3-11 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ



รูปที่ 3-12 ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ

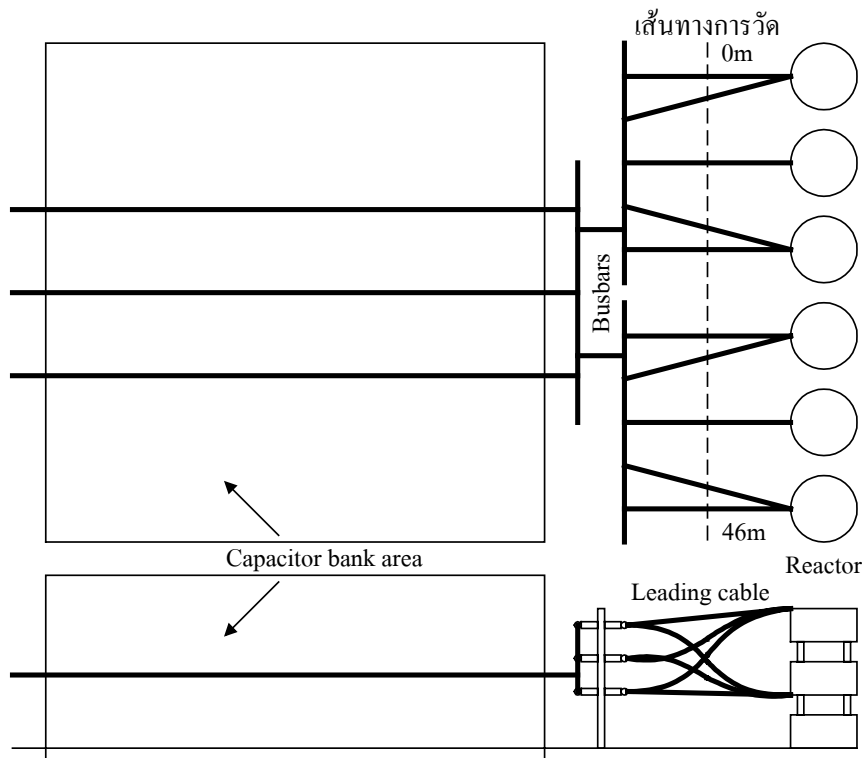
เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในรูปที่ 3-9 กับรูปที่ 3-11 จะเห็นว่าเป็นการวัดที่ได้บัสบาร์เดียวกัน เพียงแต่คนละตำแหน่งของบัสบาร์ แนวโน้มการกระจายสนามแม่เหล็กมีลักษณะสอดคล้องกัน คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่ง 40 เมตรขึ้นไปจะมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง 40 เมตรลงมา และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3-10 กับรูปที่ 3-12 ก็ จะเห็นว่าการกระจายสนามไฟฟ้าสอดคล้องกันเช่นเดียวกัน คือค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 38 เมตรจะมีค่าต่ำสุด โดยที่ทั้งก่อนและหลังตำแหน่ง 38 เมตรนี้มีการกระจายสนามไฟฟ้าเหมือนกัน

ตัวอย่างที่ 2-5 ในบริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดนครสวรรค์ ดังรูปที่ 3-13

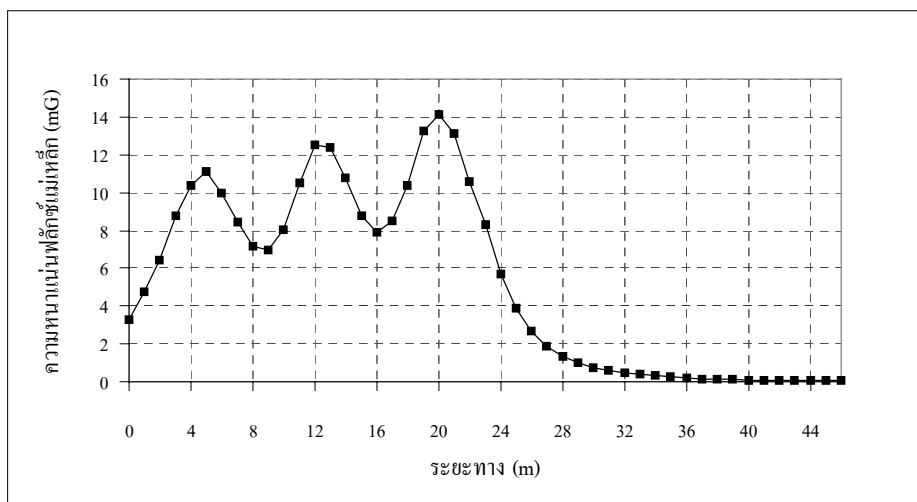


รูปที่ 3-13 บริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก

สถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่ใหญ่ มีทั้งระบบแรงดัน 500 kV 230 kV และ 115 kV เหมือนสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของทั้ง 3 ระบบจะคล้ายๆ กับของที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ แต่มีบริเวณหนึ่งที่น่าสนใจ นั่นคือ บริเวณที่ติดตั้ง Reactor-Capacitor bank เป็นบริเวณที่มีสายไฟฟ้าพาดสลับซับซ้อน อยู่สูงจากพื้นดินไม่มาก มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายสูงหลายพันแอมแปร์ ดังรูปที่ 3-14 ซึ่งแสดงแผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่างๆ พร้อมเส้นทางการวัด (เส้นประ) และรูปที่ 3-15 กับรูปที่ 3-16 แสดงการกระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นทางการวัด ตามลำดับ

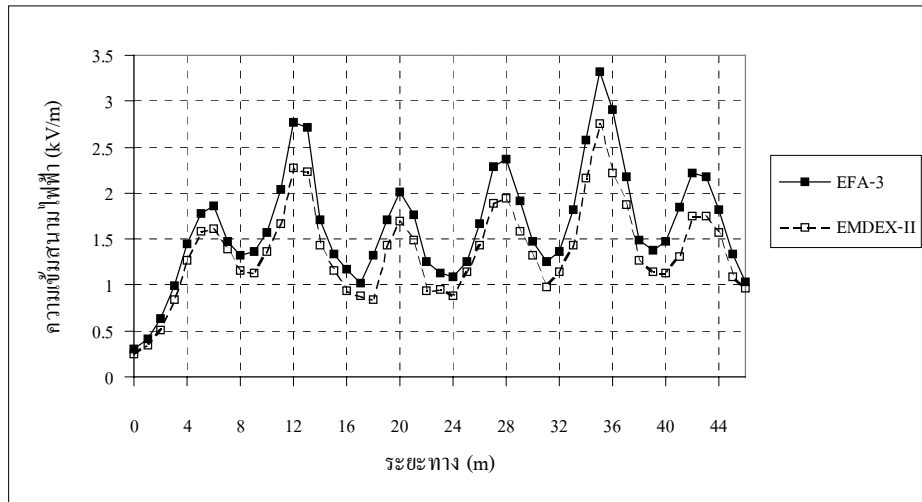


รูปที่ 3-14 แผนภาพบริเวณที่ติดตั้ง Reactor-Capacitor bank พร้อมเส้นทางการวัด



รูปที่ 3-15 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ Reactor-Capacitor bank สถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก

จากรูปที่ 3-15 จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดในตัวอย่างที่ 1 เนื่องจากว่าในบริเวณ Reactor-Capacitor bank นี้มีสายไฟฟ้าพาดสลับซับซ้อนอยู่สูงจากพื้นดินไม่มาก และมีกระแสไฟฟ้าหลายพันแอมแปร์ไหลในสาย ส่วนค่าความเข้มสนามไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3-16 มีค่าสูงไม่มากนัก



รูปที่ 3-16 ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก

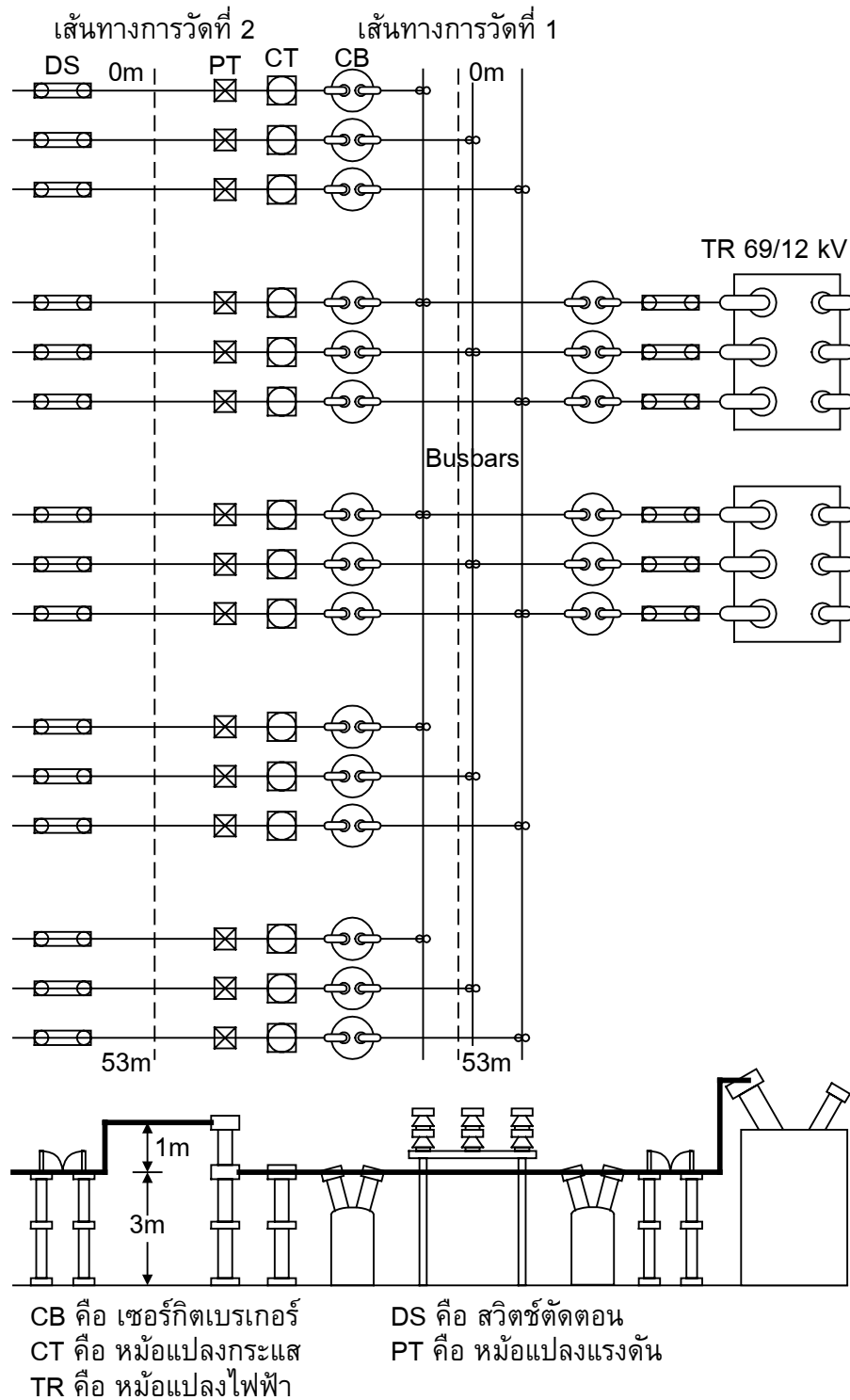
ตัวอย่างที่ 3-5 สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ การไฟฟ้านครหลวง กรุงเทพฯ ดังในรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ลานสวิตช์ 69 kV ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ

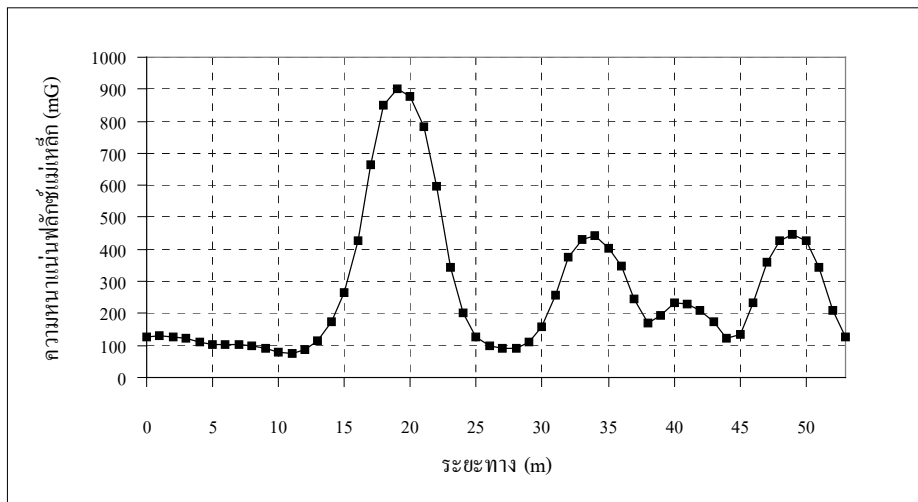
สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ เป็น 1 ใน 3 สถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้านครหลวง ที่ได้เลือกเป็นสถานที่ทำการวิจัย เป็นสถานีไฟฟ้าย่อยที่อยู่ในย่านที่มีการใช้ไฟฟ้าสูง นั่นคือ จะมีกระแสไหลภายในระบบของสถานีไฟฟ้าย่อยสูงนั่นเอง แต่เนื่องจากเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยระบบแรงดัน 69 kV ซึ่งเป็นระบบแรงดันค่อนข้างต่ำ จึงคาดว่าสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากระบบจะมีค่าน้อยมาก เช่นเดียวกับกับสถานีไฟฟ้าย่อยส่วนใหญ่ของการไฟฟ้านครหลวง ที่ใช้ระบบแรงดันสูงไม่มากนัก ดังนั้นในการวัดจะวัดเพียง

เฉพาะค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากระบบเท่านั้น โดยวัดในเส้นทางการวัดที่การติดตั้งบัสบาร์อยู่ในระดับต่ำที่สุด รูปที่ 3-18 แสดงแผนภาพที่ตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในลานสวิตช์ 69 kV พร้อมเส้นทางการวัด (เส้นประ)

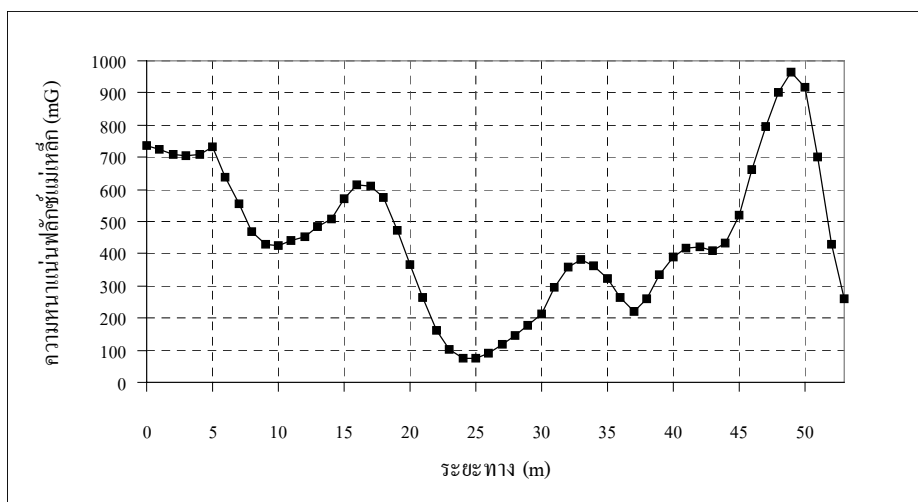


รูปที่ 3-18 แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่างๆ ในลานสวิตช์ 69 kV พร้อมเส้นทางการวัด

ในรูปที่ 3-19 กับรูปที่ 3-20 แสดงการกระจายสนามแม่เหล็กในแนวเส้นทางการวัด



รูปที่ 3-19 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ



รูปที่ 3-20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ

จากผลการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 และ 2 ของลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ พบว่าการกระจายสนามแม่เหล็กตามแนวเส้นทางการวัดทั้งสองแตกต่างกันอย่างมาก จากรูปที่ 3-19 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนเส้นทางการวัดที่ 1 มีค่าสูงสุดที่ระยะ 19 เมตร ซึ่งอยู่ใกล้กับตำแหน่งที่มีการติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เชื่อมต่อไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าพอดิ เซอร์กิตเบรกเกอร์นี้สามารถที่จะสร้างสนามแม่เหล็กเข้ามาเสริม ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตรงจุดนี้มีค่าสูง ส่วนรูปที่ 3-20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนเส้นทางการวัดที่ 2 มีค่าสูงที่ประมาณปลายทั้งสองข้างของเส้นทางการวัด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะสนามแม่เหล็กที่จากสายส่ง 69 kV ที่อยู่ด้านบนแพร่ลงมาเสริมกับสนามแม่เหล็กด้านล่าง ทำให้การกระจายสนามแม่เหล็กตามแนวเส้นทางการวัดทั้งสองแตกต่างกัน

3.2 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

3.2.1 สถานที่ที่ทำการวัด

บริเวณใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นอีกสถานที่หนึ่งที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง และเป็นสถานที่ที่คนทั่วๆ ไปสามารถเข้าไปถึง ดังนั้นจึงได้เลือกสถานที่นี้ในการทดลองวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

สายส่งที่เลือกเพื่อทำการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กนี้ เป็นส่วนหนึ่งของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าทั้ง 500 kV 230 kV และ 115 kV ซึ่งทั้งหมดอยู่ที่จังหวัดลำปาง ได้แก่

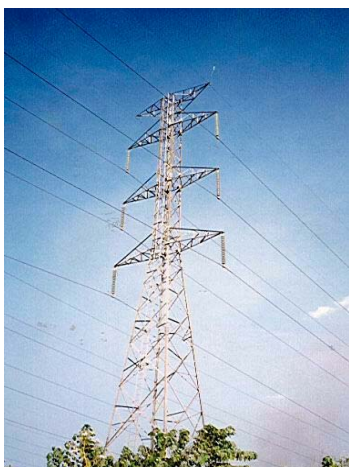
- 1) สายส่งแม่เมาะ 3 ถึงท่าตะโก 500 kV ทั้งระบบวงจรเดียว และคู่ ดังรูปที่ 3-21 และรูปที่ 3-22
- 2) สายส่งแม่เมาะ 3 ถึงพิษณุโลก 2 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ จ่ายแรงดัน 230 kV ดังรูปที่ 3-23
- 3) สายส่งแม่เมาะ 3 ถึงเชียงใหม่ 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ จ่ายแรงดัน 115 kV ดังรูปที่ 3-24
- 4) สายส่งลำปาง 1 ถึง เกิน 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3-25
- 5) สายส่งลำปาง 1 ถึง แม่เมาะ 2 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3-26



รูปที่ 3-21 สายส่ง 500 kV สายควบ
วงจรเดียว (MM3-TTK)



รูปที่ 3-22 สายส่ง 500 kV สายควบ
วงจรคู่ (MM3-TTK)



รูปที่ 3-23 สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว
วงจรคู่ (MM3-PL2)



รูปที่ 3-24 สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว
วงจรคู่ (MM2-CR)



รูปที่ 3-25 สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว
วงจรเดี่ยว (LP1-TE)



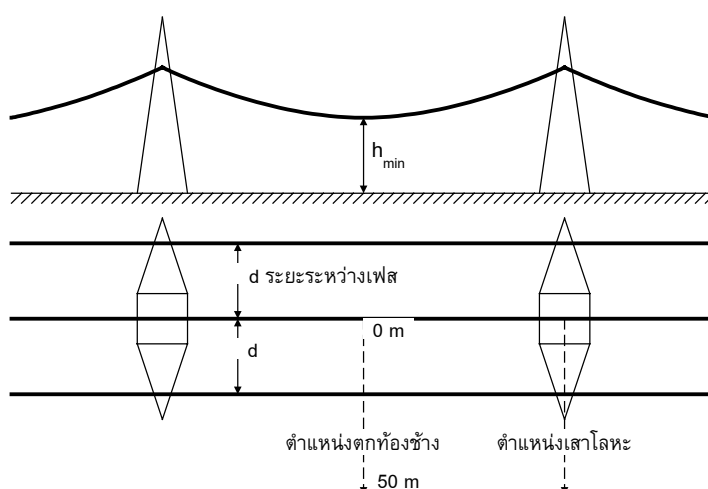
รูปที่ 3-26 สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว
วงจรเดี่ยว (LP1-MM2)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

อุปกรณ์ที่ใช้วัดได้แก่ Electromagnetic Field Analyzer EFA-3 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในหัวข้อที่ 3.1 สามารถใช้วัดได้ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

3.2.3 วิธีการวัด

ในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จะทำการวัด 2 แนว ดังแสดงเป็นแนวเส้นประในรูปที่ 3-27 แนวแรก คือ จากตำแหน่งใต้เสาโลหะตั้งฉากกับสายออกไปประมาณ 50 เมตร เพื่อศึกษาผลกระทบของเสาโลหะ และแนวที่สอง คือ จากตำแหน่งใต้สายส่วนที่ยื่นออกมาต่ำสุด หรือตกท้องช้างของสายเป็นช่วงกลางระหว่างสองเสา (midspan) ตั้งฉากกับสายออกไปประมาณ 50 เมตร เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะปรากฏในแนวนี้ ในการเลือกพื้นที่ทำการวัดเลือกบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบ เช่นทุ่งนา เป็นต้น เพื่อสะดวกในการวัดและสามารถละลายผลของความสูงต่ำของพื้นที่ได้



รูปที่ 3-27 แนวเส้นทางการวัดใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

การศึกษาในส่วนนี้มีการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดด้วย วัตถุประสงค์ของการคำนวณก็เพื่อทำการตรวจสอบกับผลการวัด ว่าเครื่องวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดสามารถวัดค่าได้ถูกต้องจริง ซึ่งจะยืนยันว่าค่าที่วัดได้ถูกต้อง ในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใช้วิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 และนำผลการคำนวณที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวัด

3.2.4 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

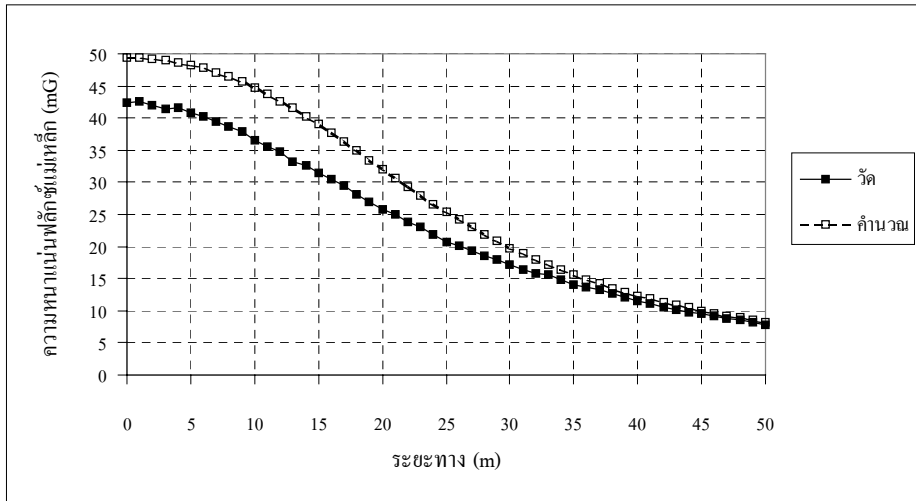
จากการวัดได้ผลการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งทั้ง 6 เส้น ในลักษณะเดียวกัน จึงได้เลือกเพียงบางตัวอย่างมาแสดง ซึ่งเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ผลทั้งหมด ส่วนตัวอย่างอื่นๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

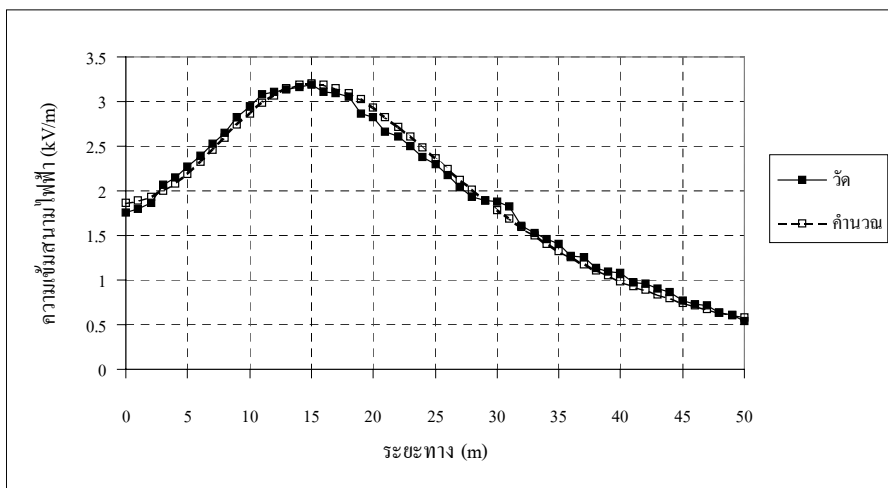
Date	Line	Type of Circuit and Conductor	System Voltage (kV)	Load Current (A)	Minimum Height (m)	Maximum Electric Field Intensity (kV/m)	Maximum Magnetic Flux Density (mG)
23/12/97	LP1-TE	Single/Singl	115	72	9.5	0.733	6.6
23/12/97	LP1-MM2	Single/Singl	115	80	8	1.188	26.2
23/12/97	MM3-CR	Double/Singl	115	75	10	0.442	3.3
20/2/98	MM3-PL2	Double/Single	230	215	11.5	0.746	5.2
20/2/98	MM3-TTK	Single/4bundle	500	512	19	3.187	42.6
20/2/98	MM3-TTK	Double/4bundle	500	500	19	3.351	38.2

ตัวอย่างที่ 1-L (line) ระบบสายส่ง 500 kV สายควบ วงจรเดี่ยว ดังในรูปที่ 3-21 ขณะจ่ายโหลด 512 A

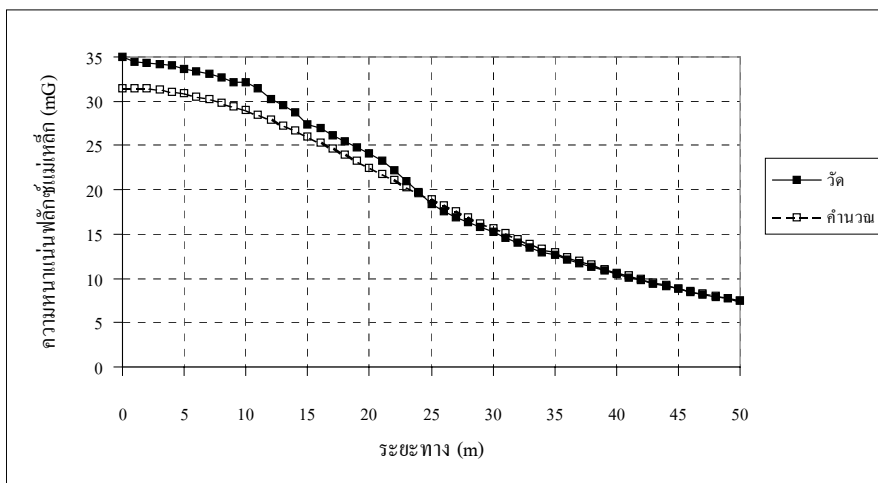
ระบบสายส่ง 500 kV เป็นสายส่งที่มีระบบแรงดันสูงที่สุดที่ใช้อยู่ในประเทศไทยนี้ ส่งจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 จังหวัดลำปาง ผ่านสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ จนมาถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก กรุงเทพฯ (MM3-TTK-NCO) สายส่ง 500 kV นี้มีทั้งหมด 3 วงจร ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง 2 ระบบ คือ ระบบวงจรเดี่ยว และระบบวงจรคู่ ซึ่งใช้สายควบ 4 เส้นทั้งหมด ตัวอย่างที่นำมาแสดงนี้เป็นแบบวงจรเดี่ยว และได้แสดงการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามแนวเส้นทางการวัดที่ตำแหน่งตักทองช้างของสาย และตรงตำแหน่งเสาโลหะ พร้อมการคำนวณเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 3-28 ถึงรูปที่ 3-31



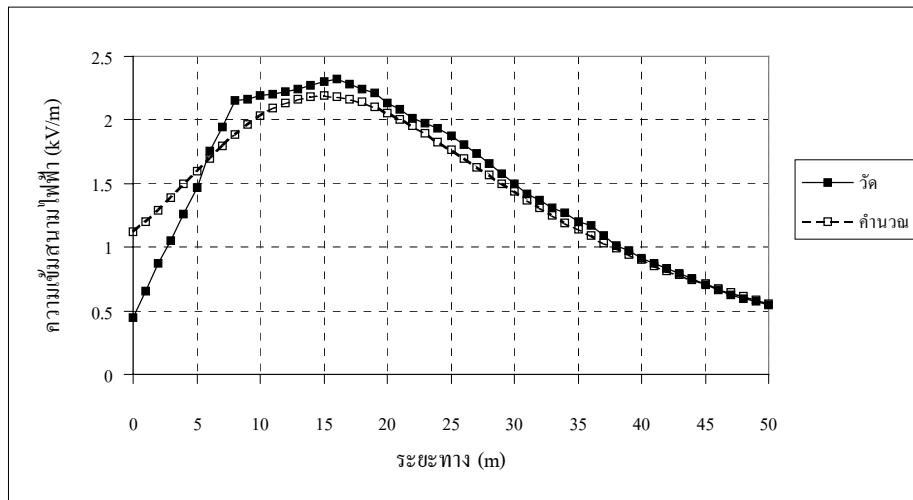
รูปที่ 3-28 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-29 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-30 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ

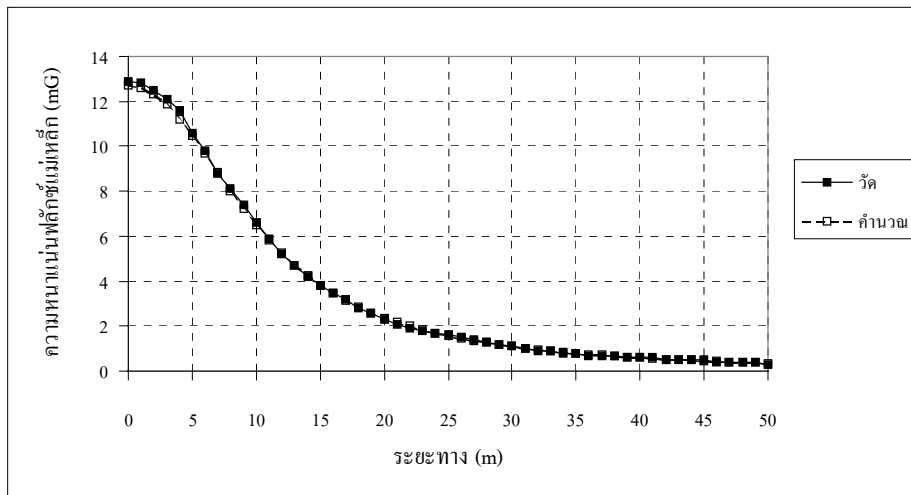


รูปที่ 3-31 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ

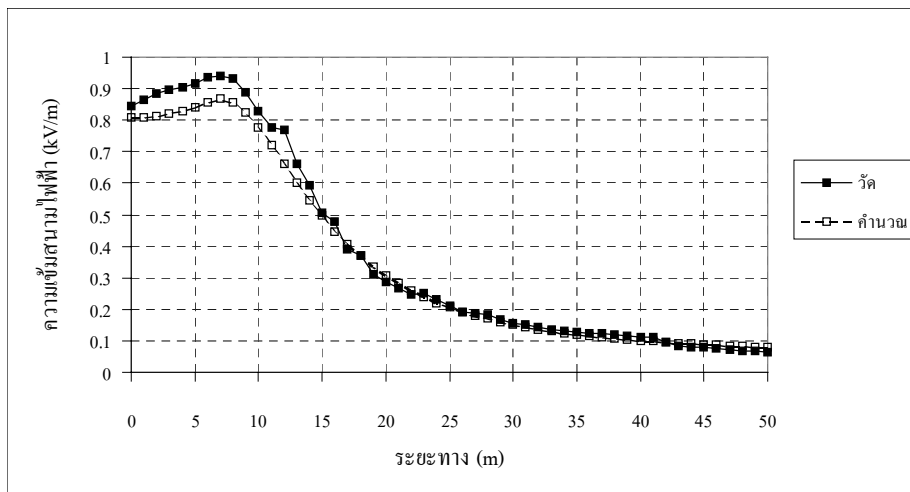
ตัวอย่างที่ 1-L นี้ มีจุดที่น่าสนใจเกิดอยู่จุดหนึ่งได้แก่ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในรูปที่ 3-28 และรูปที่ 3-30 คือความแตกต่างระหว่างผลการวัดและผลการคำนวณ ในรูปที่ 3-28 จะเห็นว่าผลการคำนวณมีค่ามากกว่าผลการวัด ส่วนรูปที่ 3-30 กลับกัน ซึ่งจริงๆ แล้วความแตกต่างที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นไปในลักษณะที่เหมือนกัน ความแตกต่างที่ไม่สอดคล้องนั้นส่วนหนึ่งอาจเกิดจากขณะที่ทำการวัด กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายจะมีค่าขึ้นลงตลอดเวลา ซึ่งต่างจากการคำนวณที่กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าเป็นค่าใดค่าหนึ่งตลอดอุณหภูมิของสายส่งก็มีผลคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งมีค่ามากจะทำให้สายส่งยืดและหย่อนมากขึ้น ในทางกลับกันกระแสไฟฟ้าในสายน้อยจะทำให้สายส่งหดตัวและหย่อนน้อยลง นอกจากนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3-27 ที่ตำแหน่งเสาโลหะ พบว่าสายส่งที่หย่อนลงทั้งสองข้างของจุดสูงสุดของสายสามารถที่จะมีผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ณ จุดที่ทำการวัดตรงตำแหน่งเสาโลหะนี้ จึงทำให้ค่าที่วัดได้สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะสมมติว่าสายมีแนวขนานกับพื้น

ตัวอย่างที่ 2-L ระบบสายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ ดังรูปที่ 3-23 โหลด 215 A ที่แรงดัน 230 kV

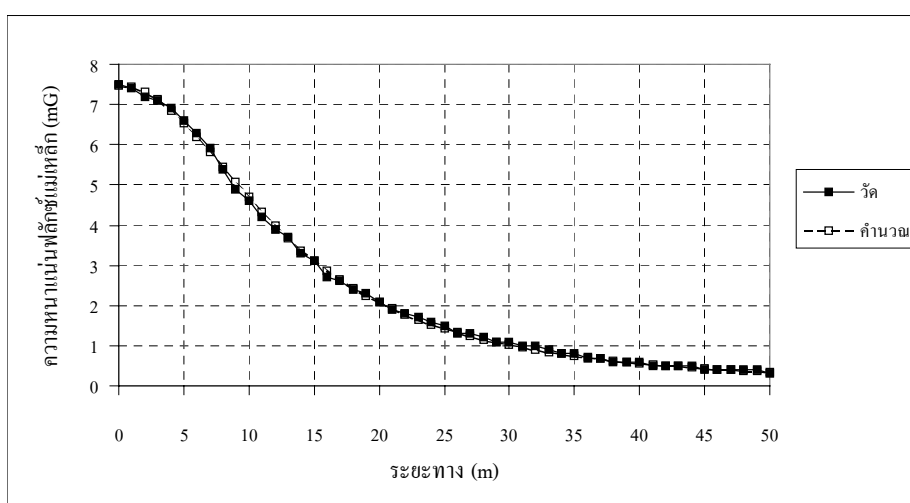
ระบบสายส่ง 230 kV นี้จ่ายแรงดันที่ 230 kV ตามปกติส่งพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงพิษณุโลก 2 (MM3-PL2) เป็นระบบวงจรคู่ การกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้สายส่งของสายส่งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-32 ถึงรูปที่ 3-35



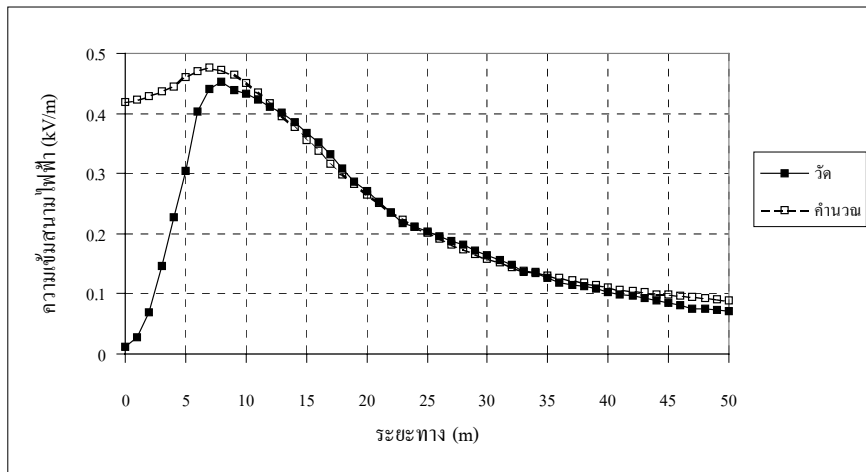
รูปที่ 3-32 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-33 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-34 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ

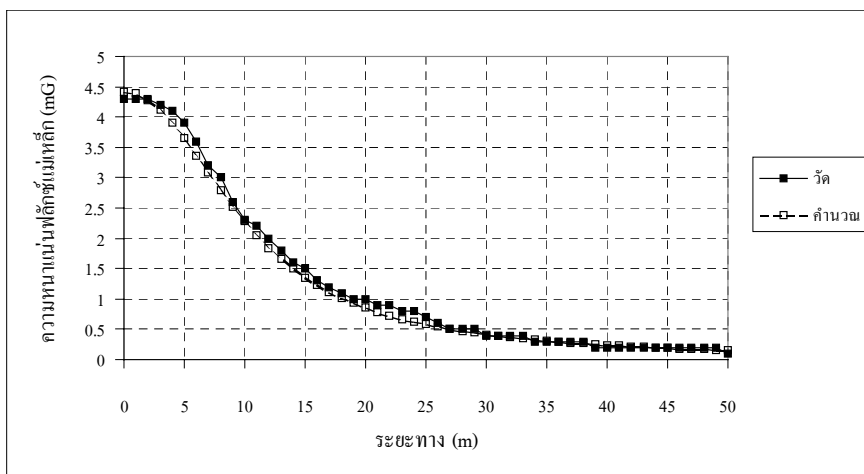


รูปที่ 3-35 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ

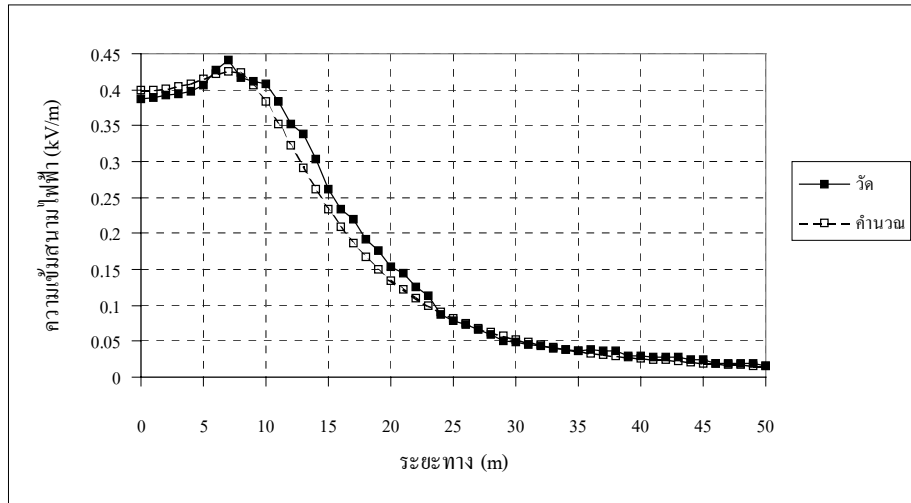
ตัวอย่างที่ 2-L นี้ ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าต่ำกว่าของตัวอย่างที่ 1 มาก เนื่องจากระบบแรงดันและกระแสที่ไหลในสายส่งมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้จากรูปที่ 3-35 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณใต้เสาโลหะมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากผลของเสาโลหะซึ่งต่อลงกราวด์ทำให้การกระจายแรงดันบริเวณเสามีค่าต่ำ ซึ่งเป็นผลให้สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำตามไปด้วย ต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณซึ่งไม่มีการคำนึงถึงผลของเสาโลหะ เหมือนกันกับรูปที่ 3-31 ในตัวอย่างที่ 1-L

ตัวอย่างที่ 3-L ระบบสายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ ดังรูปที่ 3-24 โหลด 75 A ที่แรงดัน 115 kV

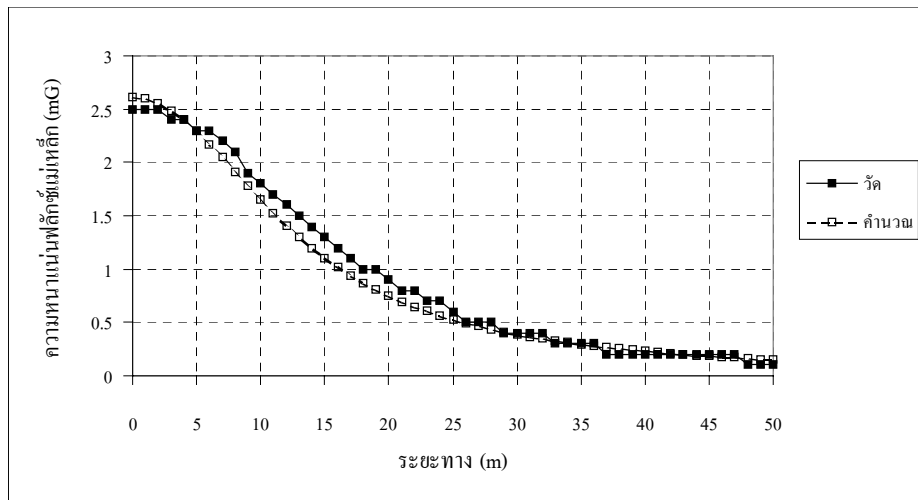
ระบบสายส่ง 230 kV นี้เป็นระบบที่เหมือนกับในตัวอย่างที่ 2 ต่างกันตรงที่ว่าระบบในตัวอย่างที่ 3-L นี้จ่ายแรงดันเพียง 115 kV ส่งพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 2 ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงเชียงราย (MM2-CR) จากการวัดได้ผลการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้สายส่งดังแสดงในรูปที่ 3-36 ถึงรูปที่ 3-39



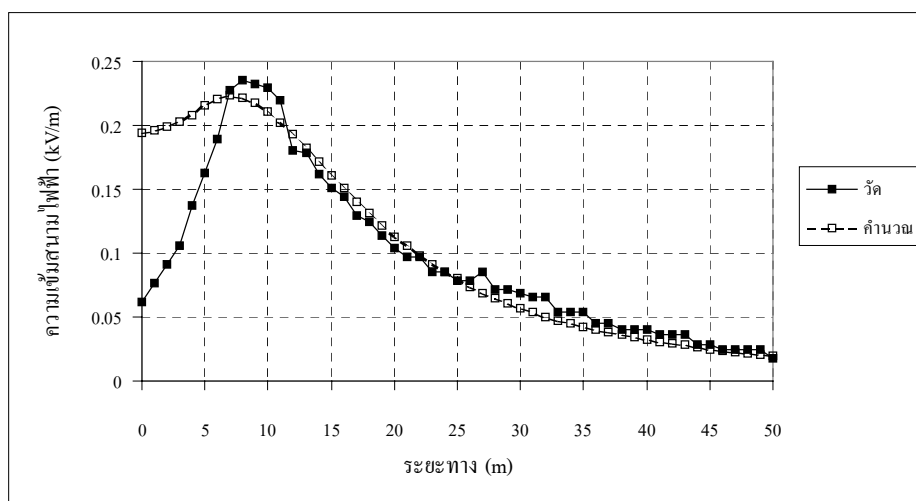
รูปที่ 3-36 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งตักทองช้าง ที่แรงดัน 115 kV



รูปที่ 3-37 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งตักทองช้าง ที่แรงดัน 115 kV



รูปที่ 3-38 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV

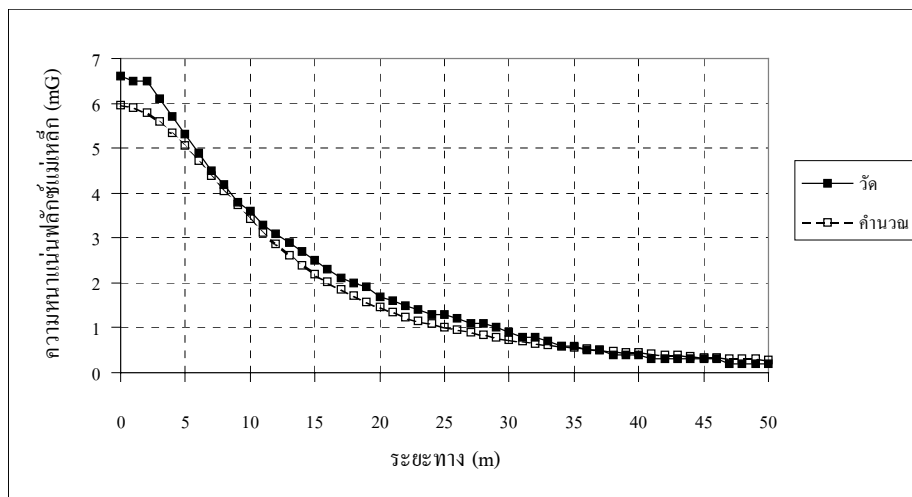


รูปที่ 3-39 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV

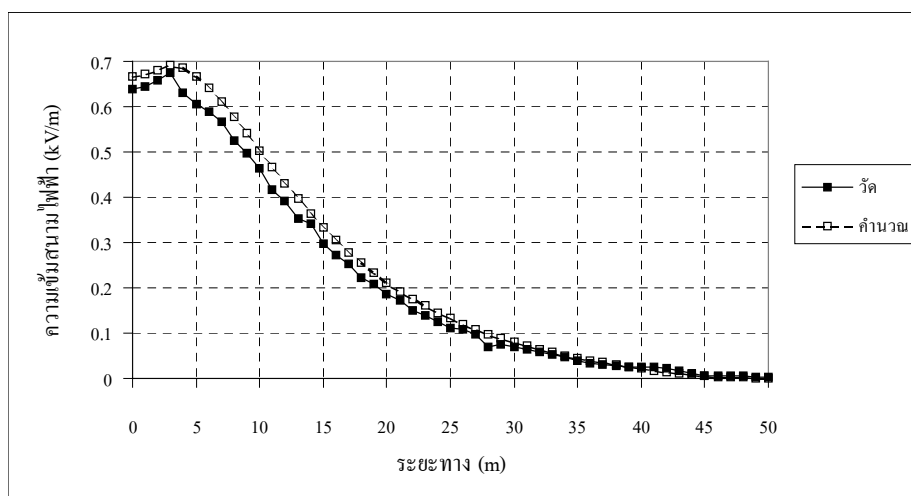
เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ 3-L นี้กับตัวอย่างที่ 2-L ซึ่งทั้งสองตัวอย่างมีระบบโครงสร้างเสาโลหะเหมือนกัน ต่างกันตรงค่าแรงดัน และกระแสไหลดที่ป้อนเข้าระบบ พบว่าทั้งสองตัวอย่างมีการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเหมือนกัน ต่างกันตรงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ตัวอย่างที่ 3-L มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากจ่ายแรงดันและกระแสต่ำกว่า และจากรูปที่ 3-39 เสาโลหะที่ต้องกราวด์ทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้เสาโลหะมีค่าต่ำเช่นกัน

ตัวอย่างที่ 4-L ระบบสายส่ง 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ขณะจ่ายโหลด 72 A

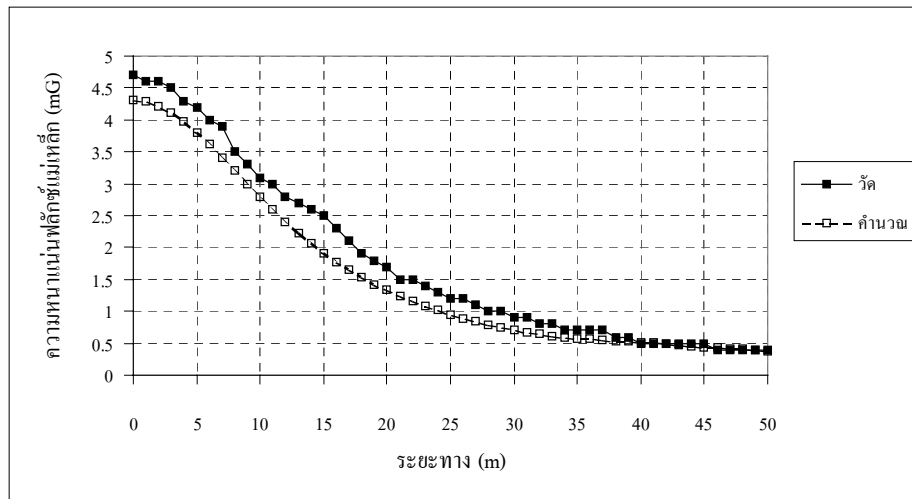
ระบบสายส่ง 115 kV นี้ เป็นสายส่งซึ่งส่งพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงลำปาง 1 ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงเถิน จังหวัดลำปาง (LP1-TE) ระบบวงจรเดี่ยว การกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามแนวเส้นทางการวัดใต้สายส่งที่วัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-40 ถึงรูปที่ 3-43



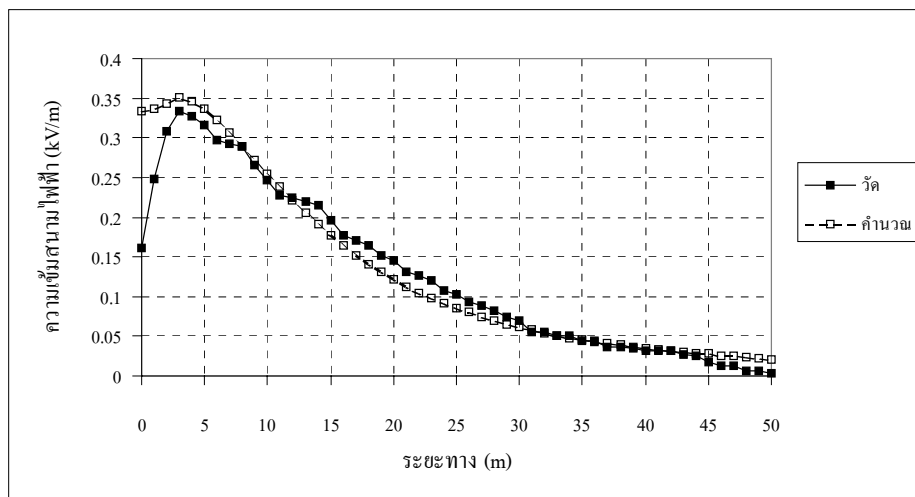
รูปที่ 3-40 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-41 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งตักทองช้าง



รูปที่ 3-42 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ



รูปที่ 3-43 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ

จากตัวอย่างที่ 4-L นี้ซึ่งเป็นสายส่งระบบ 115 kV จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 3-L ซึ่งเป็นสายส่งระบบ 230 kV แต่ป้อนแรงดันเพียง 115 kV เท่ากับตัวอย่างที่ 4-L ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 3-L มีค่าต่ำกว่าของตัวอย่างที่ 4-L และมีค่าสูงสุดที่ระยะ 7 เมตร จากตำแหน่งเฟสกลางของเสา โดยที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4-L มีค่าสูงสุดที่ระยะ 3 เมตร จากตำแหน่งเฟสกลางของเสา ที่เป็นเช่นนี้เพราะลักษณะการติดตั้งสายส่งของระบบ 230 kV และ 115 kV ไม่เหมือนกัน เช่น ระบบ 230 kV จะสูงและมีระยะระหว่างเฟสมากกว่าระบบ 115 kV และจากรูปที่ 3-43 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณใต้เสาโลหะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของเสาโลหะซึ่งต่อลงกราวด์ เช่นเดียวกับตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างที่ยกมา

3.3 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากการใช้ไฟฟ้ากันมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ประชาชนเริ่มที่จะตระหนักถึงอันตรายที่เกิดขึ้นจากการใช้ไฟฟ้า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำที่แพร่จากระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็เป็นตัวอย่างหนึ่งที่มีคนสงสัยกันมากกว่า มีอันตรายต่อร่างกายคนหรือไม่ แต่จนถึงปัจจุบันนี้ยังไม่มีหน่วยงานหรือองค์กรใดสามารถตอบคำถามข้อนี้ได้ รวมทั้งการศึกษาวิจัยต่างๆ ก็ยังไม่สามารถยืนยันผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อมนุษย์ได้ อย่างไรก็ตามก็ได้มีองค์กรหนึ่ง คือ The International Radiation Protection Association (IRPA) ได้กำหนดระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ประชาชนสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-5 [17]

ตารางที่ 3.5 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz ในสถานที่ที่มีสนาม

สถานที่ที่มีสนาม	ความเข้มสนามไฟฟ้า	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
สถานประกอบการ		
- ตลอดชั่วโมงการทำงาน	10 kV/m	0.5 mT หรือ 5000 mG
- ช่วงเวลาสั้นๆ	30 kV/m	5.0 mT หรือ 50000 mG
- จำกัดเฉพาะแขนขา		25.0 mT หรือ 250000 mG
สาธารณะ		
- ตลอด 24 ชั่วโมง	5 kV/m	0.1 mT หรือ 1000 mG
- 2-3 ชั่วโมง/วัน	10 kV/m	1.0 mT หรือ 10000 mG

จากผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในสถานีไฟฟ้า และได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.4 พบว่าค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละแห่งมีค่าไม่เกินค่าจำกัดที่กำหนด จะเห็นว่าแม้แต่ในสถานีไฟฟ้าและได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูง และเป็นสถานที่ที่คนส่วนใหญ่เข้าไปไม่ถึงยังมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่ำกว่าค่าจำกัดสูงสุดที่กำหนด ดังนั้นในบริเวณอื่น ในที่สาธารณะทั่วไปซึ่งห่างไกลจากแหล่งกำเนิด จึงเป็นสถานที่ที่ปลอดภัยจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำการวัดนี้ สามารถมีผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งจะได้รายงานผลการศึกษาในบทต่อไป

บทที่ 4

ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงเป็นแหล่งกำเนิดของทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ได้ทำการสำรวจวัดตั้งที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อให้การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบและได้ผลชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีการจำลองแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ควบคุมได้ขึ้นเพื่อทำการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ โดยการศึกษาได้แยกเป็น 2 ส่วน คือ ผลกระทบของสนามไฟฟ้า และผลกระทบของสนามแม่เหล็ก

4.1 ผลกระทบของสนามไฟฟ้า

การทดลองผลกระทบของสนามไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า โดยได้ทำการติดตั้งสายส่งแบบสายควบ 4 เส้น ที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3-19 ซึ่งสามารถควบคุมขนาดแรงดันเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าได้ ทำการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ ในที่นี้ได้แก่ จอคอมพิวเตอร์ไว้ได้ตรงกึ่งกลางสายส่ง เพิ่มแรงดันจนถึง 60 kV จาก ตารางที่ 3.3 สนามไฟฟ้าที่ค่าแรงดันระดับนี้มีค่าเกิน 8 kV/m ซึ่งมีค่าสูงกว่าสถานที่ส่วนใหญ่ที่ได้ไปทำการวัดสนามไฟฟ้า และจอคอมพิวเตอร์ยังปกติอยู่ คือไม่มีอะไรเกิดขึ้นกับจอคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น และจากการวัดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 60 kV เท่ากับ 8.524 kV/m จึงได้ทดลองกับจอคอมพิวเตอร์อีก 2 เครื่องพบว่าได้ผลเหมือนกับจอคอมพิวเตอร์เครื่องแรก จากการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าไม่เกิน 8 kV/m จะไม่มีผลต่อจอคอมพิวเตอร์

4.2 ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก

ผลกระทบของสนามแม่เหล็กในที่นี้จะทำการศึกษาวิจัยจากสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

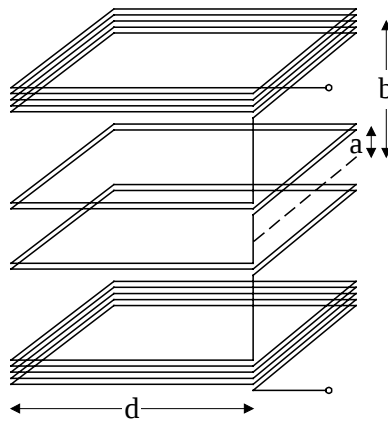
4.2.1 การสร้างสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

การสร้างสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอสามารถทำได้หลายวิธีในที่นี้จะใช้ขดลวด Helmholtz coil [18] เป็นต้นกำเนิดสนามแม่เหล็ก

4.2.1.1 ขดลวด Helmholtz coil และการออกแบบสร้าง

ขดลวด Helmholtz coil เป็นขดลวดที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กแบบสม่ำเสมอ ขดลวดนี้ประกอบด้วยขดลวดวงกลมเพียงไม่กี่ขด อย่างไรก็ตามสำหรับขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 cm นิยมสร้างเป็นขดลวดสี่เหลี่ยม 2 ขด 3 ขด หรือ 4 ขดก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการขนาดปริมาตรของความสม่ำเสมอมากน้อยเพียงไร ถ้าต้องการปริมาตรของความสม่ำเสมอใหญ่เท่าไรก็ต้อง

สร้างขดลวดที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนชั้นของขดลวดสี่เหลี่ยมมากขึ้น งานวิจัยนี้ใช้ระบบ 4 ขดลวด ซึ่งก็ครอบคลุมปริมาตรของความสม่ำเสมอที่เพียงพอต่อการทดลอง รูปที่ 4-1 แสดงขดลวด Helmholtz coil แบบมีขดลวดสี่เหลี่ยม 4 ขด



รูปที่ 4-1 Helmholtz coil ที่มีขดลวดสี่เหลี่ยม 4 ขด

โดยการกระจายสมการของเทเลอร์ (Taylor-series expansion) สำหรับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $B(x)$ สามารถที่จะหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบขดลวด Helmholtz coil ออกมาได้ เนื่องจากขดลวดที่ต้องการจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก รอบๆ จุดกึ่งกลางของขดลวดจะมีค่าสมมาตรกัน ดังนั้นฟังก์ชันคี่จึงไม่ต้องนำมาคิด ระบบขดลวดสี่เหลี่ยม 4 ขด จะสามารถกระจายสมการของเทเลอร์ได้ถึงฟังก์ชันที่ 6 และได้เป็นสมการ (4.1) ออกมา [18]

$$\left. \frac{d^2 B}{dx^2} \right|_{x=0} = \left. \frac{d^4 B}{dx^4} \right|_{x=0} = \left. \frac{d^6 B}{dx^6} \right|_{x=0} = 0 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) และรูปที่ 4-1 สามารถแก้สมการโพลีโนเมียล ได้ดังนี้

$$\frac{a}{d} = 0.128 \quad (4.2)$$

$$\frac{b}{d} = 0.505 \quad (4.3)$$

$$\frac{I'}{I} = 0.424 \quad (4.4)$$

โดยที่ a คือ ระยะห่างระหว่างระนาบตรงกลางของขดลวดกับขดลวดคู่ใน ดูรูปที่ 4-1

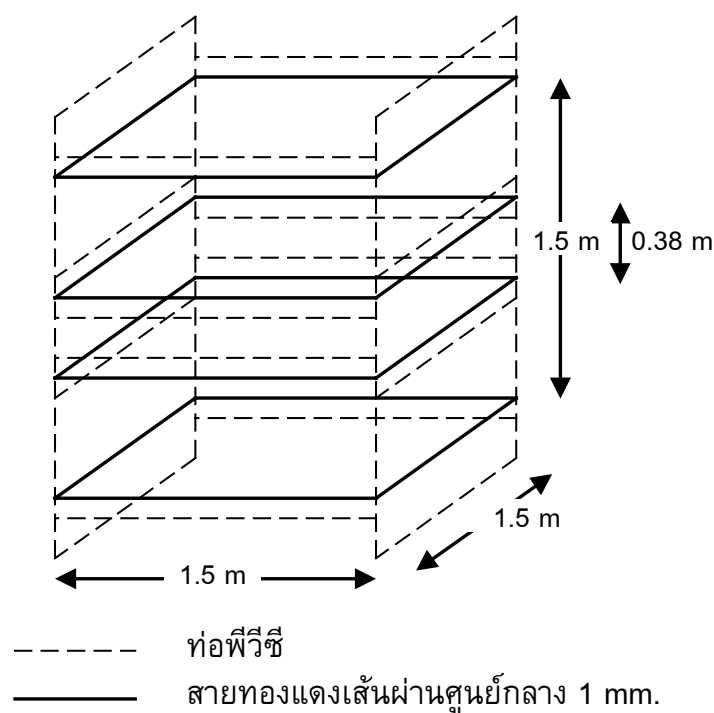
b คือ ระยะห่างระหว่างระนาบตรงกลางของขดลวดกับขดลวดคู่นอก ดูรูปที่ 4-1

d คือ ความกว้างของขดลวด

I' และ N' คือ กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวดคู่ใน

I และ N คือ กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวดคู่นอก

การออกแบบสร้างขดลวด Helmholtz coil ที่มี 4 ขดลวด ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้กำหนดให้ d มีความยาวเท่ากับ 1.5 เมตร โดยใช้ขนาดของอุปกรณ์ทดสอบ ในที่นี้ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวอ้างอิง และเป็นความกว้างของขดลวดที่ไม่เล็กเกินไป และมีปริมาตรความสม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเพียงพอที่จะทำการทดลองในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4.2) และ (4.3) ได้ a และ b เท่ากับ 0.19 และ 0.75 เมตร ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่าง I' กับ I ดังแสดงในสมการที่ (4.4) สามารถเทียบเป็นอัตราส่วนของ N' กับ N เมื่อ N' และ N คือจำนวนรอบของขดลวดคู่ในและคู่นอกตามลำดับ และกำหนดให้เป็น 44/104 รอบ เพราะจำนวนรอบขดลวดขนาดนี้สามารถสร้างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สูงมากพอสมควร คือ 3 G โดยป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดเพียง 2 A เมื่อตัวแปรต่างๆ ของขดลวดสามารถหาออกมาได้แล้วก็สามารถสร้างขดลวด Helmholtz coil ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 โครงสร้างของ Helmholtz coil

4.2.1.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กภายในขดลวด Helmholtz coil

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของ Biot-Savart เนื่องจากขดลวด Helmholtz coil มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สมมติให้กระแสไฟฟ้า I ไหลในเส้นลวด ซึ่งแบ่งเป็นความยาวเวกเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล (differential vector length, $d\ell$) ดังแสดงในรูปที่ 4-3 กฎของ Biot-Savart อธิบายว่า ถ้าให้ P_1 เป็นตำแหน่งของส่วนประกอบย่อยดิฟเฟอเรนเชียล ที่ตำแหน่ง P_2 ใดๆ ขนาดความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งสร้างโดยส่วนประกอบย่อยดิฟเฟอเรนเชียลนี้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า ความยาวดิฟเฟอเรนเชียล และค่าไซน์ของมุมระหว่างเส้นแนวของส่วนประกอบ

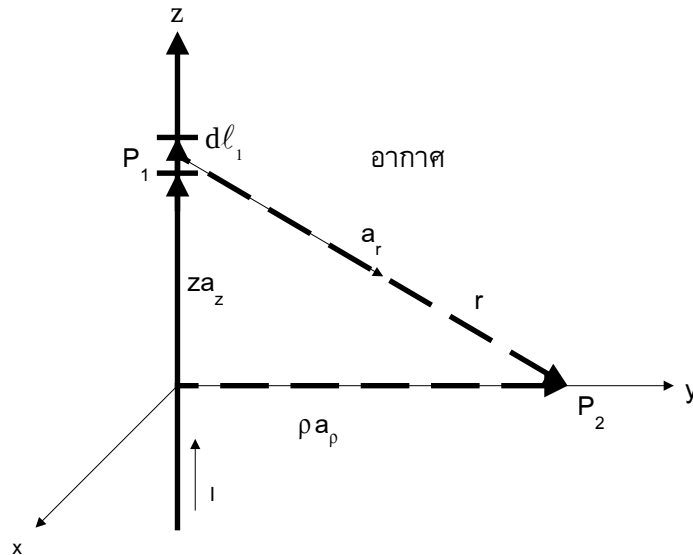
ย่อยกับเส้นที่ลากจากส่วนประกอบย่อยไปยังตำแหน่ง P_2 อย่างไรก็ตาม ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็ก จะเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางจากส่วนประกอบย่อยดิฟเฟอเรนเชียลถึงตำแหน่ง P_2 ยกกำลังสอง ทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก จะเป็นไปตามกฎมือขวา

จากที่กล่าวมาข้างต้นโดยใช้กฎของ Biot-Savart สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [19]

$$d\vec{H}_2 = \frac{Id\vec{\ell}_1 \times \vec{a}_{r12}}{4\pi r_{12}^2} \quad (4.5)$$

โดยที่ $1/4\pi$ เป็นค่าคงตัวค่าหนึ่ง และ H สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 4.5 ดังนี้

$$\vec{H}_2 = \int \frac{Id\vec{\ell}_1 \times \vec{a}_{r12}}{4\pi r_{12}^2} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4-3 สายตัวนำซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

กรณีสายตัวนำที่มีความยาวเป็นอนันต์และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4-3 เมื่อพิจารณาถึงความสมมาตรของสนามแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน Z และ มุม ϕ (มุมระหว่างเส้นตรงที่ทำมุมกับแกน Z) จะหักล้างกันหมด P_2 เป็นจุดพิจารณาบนระนาบ $Z = 0$ เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.5) และรูปที่ 4-3 จะได้

$$d\vec{\ell}_1 = dz\vec{a}_z \quad \vec{r}_{12} = \rho\vec{a}_\rho - z\vec{a}_z \quad \vec{a}_{r12} = \frac{\rho\vec{a}_\rho - z\vec{a}_z}{\sqrt{\rho^2 + z^2}}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.5) และ (4.6) จะได้

$$\bar{H}_2 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho dz \bar{a}_\phi}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} \quad (4.7)$$

การอินทิเกรตจะกระทำบนแนวแกน z และ $\bar{a}$ ก็ไม่ขึ้นอยู่กับ z หรือ ρ ดังนั้นจะได้ค่า H_2 ดังแสดงในสมการที่ (4.8)

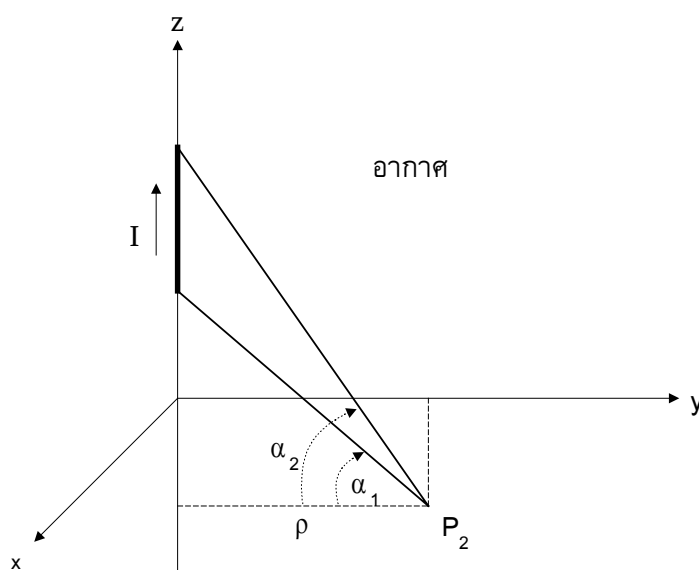
$$\bar{H}_2 = \frac{I \rho \bar{a}_\phi}{4\pi} \cdot \frac{z}{\rho^2 \sqrt{\rho^2 + z^2}} \Big|_{-\infty}^{\infty} \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.8) มีความหมายว่าขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กไม่ได้เป็นฟังก์ชันของ ϕ หรือ z แต่จะแปรผกผันกับระยะห่าง ρ จากสายไฟฟ้า จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กรอบสายตัวนำที่มีความยาวเป็นอนันต์ ดังแสดงในสมการที่ 4.9

$$\bar{H}_2 = \frac{I}{4\pi\rho} \bar{a}_\phi \quad (4.9)$$

การคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวด Helmholtz coil ขนาด 1.5×1.5 m. จะพิจารณาที่เส้นซึ่งทราบความยาวแน่นอนจะต้องทำการประยุกต์สมการ (4.8) ใหม่ คือ เทอม $\frac{z}{\sqrt{\rho^2 + z^2}}$ สามารถแทนได้ด้วย $\sin \alpha$ ดังรูปที่ 4-4 ดังนั้นสมการ (4.8) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (4.10)

$$\bar{H}_2 = \frac{I}{4\pi\rho} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \bar{a}_\phi \quad (4.10)$$



รูปที่ 4-4 สายตัวนำซึ่งมีความยาวแน่นอน

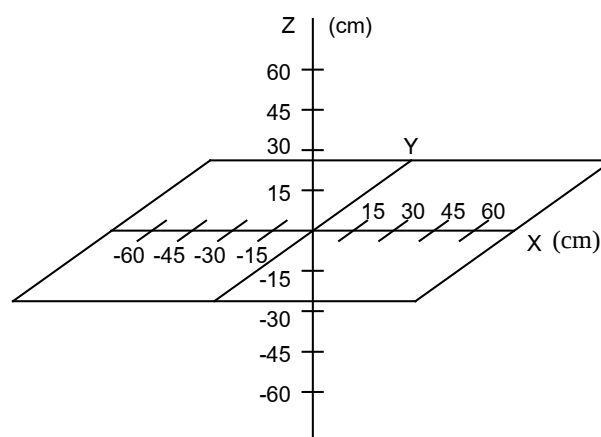
จากรูปที่ 4-4 ถ้าปลายข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้างของสายตัวนำอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าจุด P_2 ค่า α_1 หรือทั้ง α_1 และ α_2 จะเป็นค่าลบ โดยใช้สมการที่ 4.10 จะสามารถคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทุกๆ จุดในขดลวด Helmholtz coil ได้

4.2.1.3 สนามแม่เหล็กซึ่งสร้างโดยขดลวด Helmholtz coil

หลังจากสร้างขดลวด Helmholtz coil ดังรูปที่ 4-5 แล้ว จะต้องทำการพิสูจน์ว่าใช้งานได้หรือไม่ ดังนั้นการคำนวณโดยใช้กฎของ Biot-Savart ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้ว จะนำมาเปรียบเทียบกับ การวัดโดยตรง รูปที่ 4-6 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดและคำนวณ

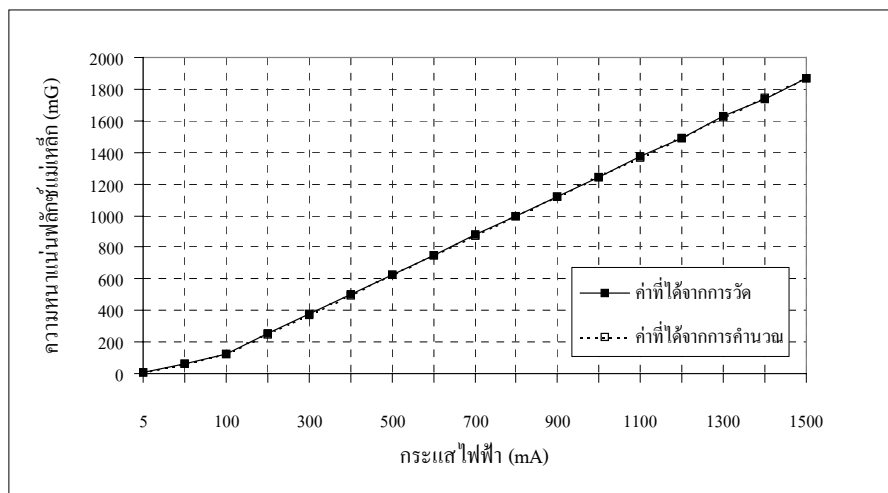


รูปที่ 4-5 ขดลวด Helmholtz coil

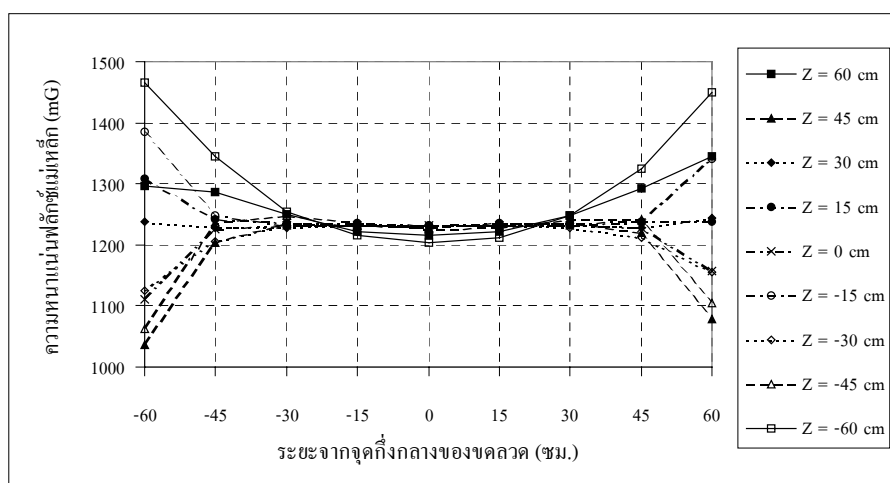


รูปที่ 4-6 ตำแหน่งที่ทำการวัดและคำนวณ

จากรูปที่ 4-6 ได้ทำการวัดและคำนวณที่ความสูงต่าง ๆ บนแกน Z โดยที่แต่ละความสูง Z จะวัดและคำนวณที่ทุก ๆ ระยะ 15 cm บนแกน X ซึ่งจะมีค่าเท่ากับทุกระยะ 15 cm บนแกน Y ในการวัดได้ใช้ Magnetic field meter EMDEX-II ซึ่งจะนำผลการวัดตามทิศทางของทั้ง 3 แกนมาเฉลี่ยเป็นค่า rms นั้นหมายถึงไม่ว่าจะตั้งมิเตอร์อย่างไรก็จะได้ผลการวัดออกมาเท่ากัน ในการวัดที่ทุกตำแหน่งจะวัดทั้งหมด 3 ครั้งและนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด ได้ผลการวัดดังแสดงในรูปที่ 4-7 และ 4-8 โดยรูปที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดกับการคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อเพิ่มกระแสในขดลวดถึง 1.5 A รูปที่ 4-8 แสดงความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวด Helmholtz coil ในปริมาตรขนาดใหญ่ตรงกลางขดลวด



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า
เปรียบเทียบกับผลของการคำนวณ



รูปที่ 4-8 ผลการวัดความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กในขดลวด Helmholtz coil

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด Helmholtz coil ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่จุดกึ่งกลางขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เพิ่มขึ้น ส่วนในรูปที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าในปริมาตรทรงกลมรัศมี 30 เซนติเมตร รอบจุดกึ่งกลางขดลวด ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ นั่นหมายความว่า อุปกรณ์ทดสอบที่ติดตั้งภายในปริมาตรนี้จะได้รับปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากันหมดทุกส่วน สำหรับที่ระยะห่างเกิน 30 เซนติเมตร จากจุดกึ่งกลางของขดลวดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กไม่สามารถเสริมหรือหักล้างกันให้เกิดความสม่ำเสมอได้ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบจึงต้องติดตั้งเฉพาะในบริเวณรัศมี 30 เซนติเมตร รอบจุดกึ่งกลางขดลวดเท่านั้น

4.2.2 วิธีการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้ใช้จอยคอมพิวเตอร์และเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เป็นอุปกรณ์ทดสอบ โดยวางอุปกรณ์ทดสอบไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวด Helmholtz coil ซึ่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางนี้ อุปกรณ์ทดสอบจะได้รับปริมาณสนามแม่เหล็กเท่ากันหมดทุกส่วน เพราะเป็นตำแหน่งที่มีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสเข้าขดลวด จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในขดลวด จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่าหนึ่งเริ่มสังเกตเห็นผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนอุปกรณ์ทดสอบ โดยการทดลองจะทำการเพิ่มค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวด Helmholtz coil แล้วบันทึกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เริ่มรบกวนทำให้ตัวเลขและอักษรบนจอยคอมพิวเตอร์เริ่มสั่น หรือทำให้ตัวเลขบนเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์เริ่มไม่คงที่ ค่าดังกล่าวนี้คือค่าวิกฤติของสนามแม่เหล็กที่เริ่มมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทดสอบ แต่เนื่องจากสายตาของคนแต่ละคนมองเห็นตำแหน่งที่ตัวเลขและตัวอักษรบนอุปกรณ์ทดสอบเริ่มสั่นไม่เหมือนกัน ดังนั้นจะใช้วิธีให้คนดูที่อุปกรณ์ทดสอบทีละคน จำนวน 20 คน เพื่อบันทึกผลเป็นสถิติ

4.2.3 ผลการทดลอง

4.2.3.1 จอยคอมพิวเตอร์

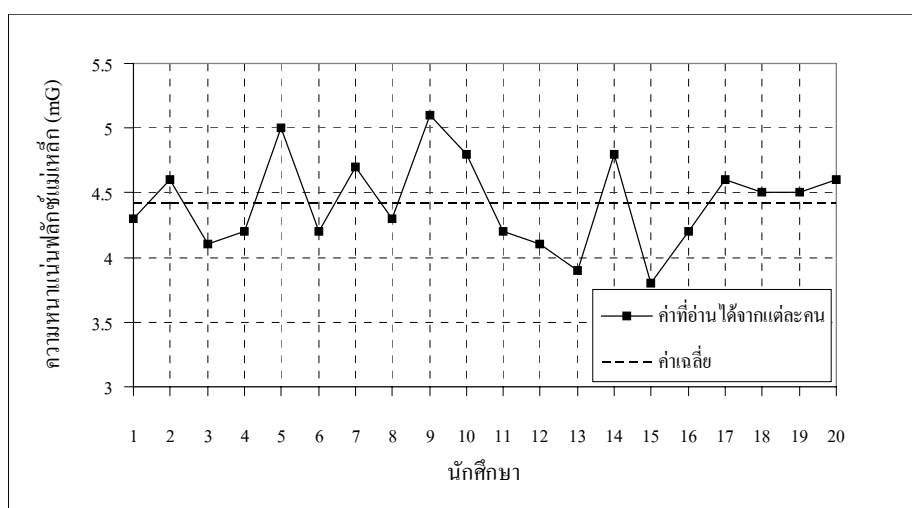
จากการทดลองกับจอยคอมพิวเตอร์ 9 เครื่อง โดยป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด Helmholtz coil แล้วบันทึกค่าวิกฤติของสนามแม่เหล็กที่เริ่มมีผลกระทบต่อจอยคอมพิวเตอร์ จากการสังเกตของนักศึกษา 20 คน โดยทำการติดตั้งจอยคอมพิวเตอร์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-9 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และได้ยกตัวอย่างผลการทดลองกับจอยคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง ไว้ในรูปที่ 4-10 และรูปที่ 4-11



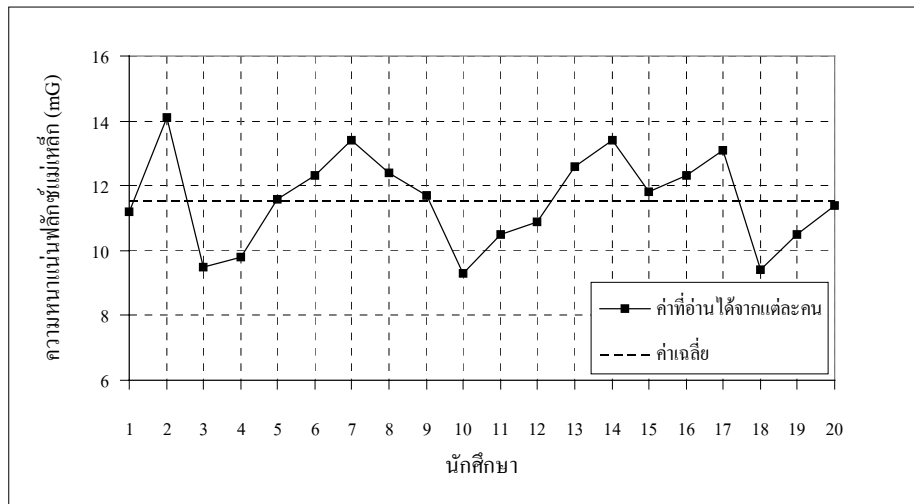
รูปที่ 4-9 การติดตั้งจอยคอมพิวเตอร์ทดสอบในขดลวด Helmholtz coil

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อจอคอมพิวเตอร์

นิสิต	ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง (mG)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4.4	12.2	4.2	8.4	4.3	4.6	9.2	10.6	11.2
2	4.6	6.5	4.3	8.8	4.6	4.2	9.8	9.4	14.1
3	4.8	8	4.6	7.5	4.1	4.3	10.6	12.5	9.5
4	4.4	6.4	4.4	12.4	4.2	4	12.6	11.3	9.8
5	4.2	6	4.8	8.4	5	3.8	9.6	9.5	11.6
6	3.4	10.2	3.9	10.6	4.2	5.1	10.3	10.4	12.3
7	5.9	5.5	4.3	13.8	4.7	4.8	14.3	13.2	13.4
8	6.8	6.9	4.6	18.2	4.3	4.6	12.5	12.5	12.4
9	6.1	11.1	4.2	9.6	5.1	4.9	9.3	11.1	11.7
10	5.9	8.7	4.8	10.3	4.8	4.6	10.3	9.8	9.3
11	6.6	6.9	4.7	10.6	4.2	4.1	10.7	11.2	10.5
12	4.9	7.3	4.5	11.2	4.1	5.2	11.6	13.6	10.9
13	4.1	8.8	4.1	8.4	3.9	4.7	9.9	11.4	12.6
14	5.9	8.7	4.3	9.3	4.8	4.8	11.6	10.9	13.4
15	6.5	9.6	4.4	10.1	3.8	4.3	13.6	11.4	11.8
16	6.6	7.2	4.4	12.2	4.2	4.5	12.8	12.6	12.3
17	4.9	8.3	4.6	9.7	4.6	4.4	14.3	11.3	13.1
18	5.3	6.7	4.5	11.5	4.5	4.5	9.7	9.6	9.4
19	5.4	7.5	4.8	8.5	4.5	4.8	10.4	10.3	10.5
20	4.7	9.1	5	9.6	4.6	4.6	11.3	11.2	11.4
ค่าเฉลี่ย	5.27	8.08	4.47	10.46	4.43	4.54	11.22	11.19	11.56



รูปที่ 4-10 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 5

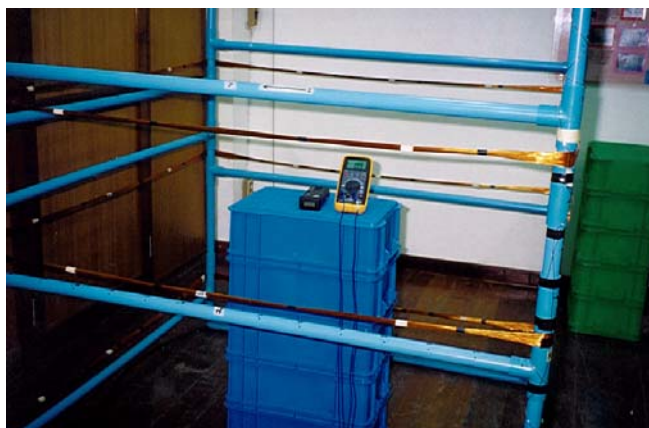


รูปที่ 4-11 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอยคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 9

จากจอยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 9 เครื่องที่ใช้ในการทดลองนี้ จอยคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 5 จะเป็นเครื่องที่ทนต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็กได้ต่ำที่สุด นั่นคือ 4.43 mG (รูปที่ 4-10) และจอยคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 9 เป็นเครื่องที่ทนต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็กได้สูงที่สุด คือ 11.56 mG (รูปที่ 4-11) การใช้จอยคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาในเรื่องนี้ก็เนื่องจากจอยคอมพิวเตอร์จะเป็นส่วนที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กมากที่สุด นั่นคือ ก่อนที่สนามแม่เหล็กจะรบกวนส่วนอื่นๆ ก็จะไปรบกวนส่วนจอยคอมพิวเตอร์ก่อน จากการทดลองจะเห็นว่าจอยคอมพิวเตอร์คนละรุ่นคนละยี่ห้อ จะทนต่อสนามแม่เหล็กได้ไม่เท่ากัน นั่นหมายความว่าจอยคอมพิวเตอร์แต่ละยี่ห้อจะมีการออกแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กได้ไม่เหมือนกัน

4.2.3.2 เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์

จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับจอยคอมพิวเตอร์ ทำให้เกิดความคิดว่าเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ออสซิลโลสโคป มิเตอร์วัดค่าต่างๆ ฯลฯ ก็น่าจะถูกรบกวนได้โดยสนามแม่เหล็กเช่นกัน จึงได้ลองนำ มิเตอร์วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั่วไปมาทดลองดู โดยได้ติดตั้งมิเตอร์ทดสอบ และ EMDEX-II ไว้ที่ กึ่งกลางขดลวด Helmholtz coil ดังรูปที่ 4-12 และได้ทำการป้อนค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งให้กับมิเตอร์ทดสอบ



รูปที่ 4-12 การติดตั้งมิเตอร์ทดสอบในขดลวด Helmholtz coil

จากการทดสอบกับมิเตอร์ทั้งหมด 7 เครื่อง โดยเปลี่ยนโหมดการวัด ทั้งแรงดัน AC, DC กระแส AC, DC ความต้านทาน ฯลฯ พบว่า มิเตอร์ 3 เครื่องไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก ทั้งๆ ที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด Helmholtz coil เต็มที่ และสร้างสนามแม่เหล็กได้ 3500 mG ซึ่งในทางปฏิบัติจากที่เคยทำการสำรวจในหลายบริเวณ ไม่มีที่ใดที่มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงเกิน 3500 mG ยกเว้นที่เดียว คือที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงถึง 14 G ส่วนมิเตอร์อีก 4 เครื่อง เครื่องที่ทนสนามแม่เหล็กได้น้อยที่สุดทนได้ 316.8 mG ส่วนเครื่องที่ทนได้มากที่สุดทนได้ 2092 mG ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมิเตอร์ทดสอบเกิดขึ้นเฉพาะในโหมดการวัดกระแสไฟฟ้า AC เท่านั้น โดยค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดของมิเตอร์ทดสอบ จะมีลักษณะแกว่งเพิ่ม ๆ ลด ๆ ไม่ทราบค่าไหนคือค่าที่ถูกต้อง เมื่อทำการหาข้อมูลของมิเตอร์ทั้ง 7 เครื่อง พบว่ามีเตอร์ 3 เครื่องที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กได้รับมาตรฐาน IEC 1010 [20] ส่วนอีก 4 เครื่องที่มีปัญหาไม่ได้รับมาตรฐานดังกล่าว

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบกับออสซิลโลสโคปจำนวน 3 เครื่อง โดยติดตั้งและป้อนค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทดสอบมิเตอร์ จากการทดสอบพบว่าออสซิลโลสโคปทั้ง 3 เครื่องไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากสนามแม่เหล็กความหนาแน่น 3500 mG เนื่องจากได้รับมาตรฐาน IEC 1010 เช่นกัน

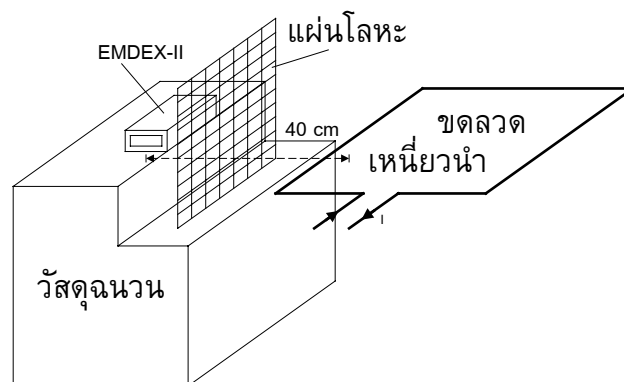
บทที่ 5

การป้องกันสนามแม่เหล็กบริเวณอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากผลการทดลองในบทที่ 3 และ 4 พบว่า สนามไฟฟ้าไม่มีผลกระทบต่อจอคอมพิวเตอร์ และ สนามไฟฟ้ายังป้องกันได้ง่ายโดยการออกแบบระบบกราวด์ที่ดี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่มีกล่องเป็นโลหะต่อลงดินจะไม่มีปัญหาที่เกิดจากสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กมีผลรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากกว่า ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการป้องกันสนามแม่เหล็ก เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถทำงานได้อย่างปกติ การป้องกันได้แก่ การชีลด์ มี 2 วิธี วิธีแรกคือ การเปียงเบนฟลักซ์แม่เหล็ก โดยใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตี้สูงมาวางกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเปียงเบนให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดเข้ามาไหลในเนื้อโลหะ อีกวิธีหนึ่งได้แก่ กระแสไหลวนคือการสร้างสนามแม่เหล็กมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่มารบกวน โดยใช้โลหะที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงๆ มาวางล้อมรอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่แพร่ผ่านผนังโลหะเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในโลหะ กระแสไหลวนนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กส่วนหนึ่งมาหักล้าง ทั้งนี้การจัดวางโลหะดังกล่าวต้องขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่แพร่เข้ามาด้วย ในที่นี้จะเลือกใช้วิธีเปียงเบนฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและง่ายต่อการจัดการ

5.1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่าง ๆ

การป้องกันหรือลดทอนค่าสนามแม่เหล็กในที่นี้ จะใช้การชีลด์ด้วยวิธีเปียงเบนฟลักซ์แม่เหล็ก โดยหาโลหะที่มีคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก นั่นคือโลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตี้สูง มาทำเป็นชีลด์ การศึกษาในส่วนนี้ได้ใช้ขดลวดเหนี่ยวนำและทำการทดลองโดยใช้โลหะชนิดต่างๆ มากั้นระหว่างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กกับขดลวดเหนี่ยวนำ โลหะแต่ละชนิดจะมีขนาด 35×35 เซนติเมตรเท่ากัน การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ จะกระทำดังรูปที่ 5-1

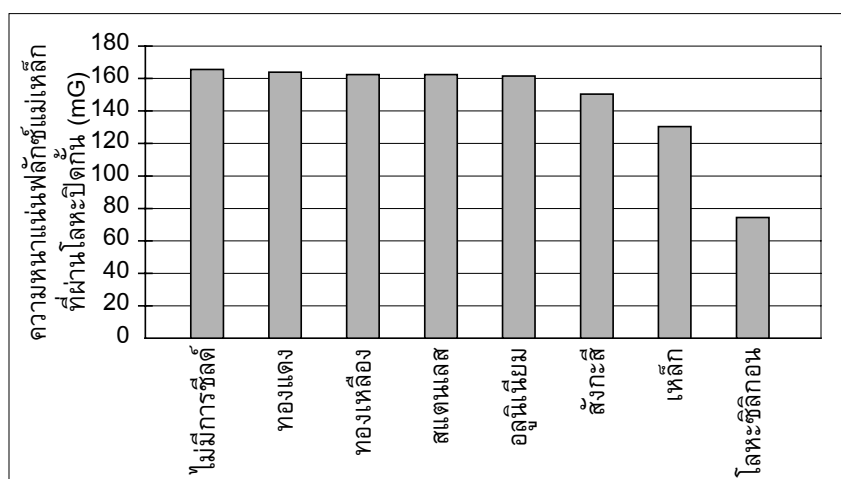


รูปที่ 5-1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ

เมื่อได้นำโลหะหลาย ๆ ชนิด ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม สังกะสี สแตนเลส ทองเหลือง เหล็ก และโลหะซิลิกอน มาทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก ได้ผลการศึกษาดังแสดงใน ตารางที่ 5.1 ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 5-2

ตารางที่ 5.1 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ

โลหะ (ความหนา mm.)	B ก่อนการชิลด์ (mG)	B หลังการชิลด์ (mG)
ทองแดง (0.3)	165	164.2
สังกะสี (0.3)	165	152.2
สแตนเลส (0.3)	165	163
อลูมิเนียม (0.4)	165	162.6
ทองเหลือง (0.3)	165	163
เหล็ก (0.8)	165	136.8
โลหะซิลิกอน (0.3)	165	76



รูปที่ 5-2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 5-2 พบว่าโลหะซิลิกอนหนา 0.3 มิลลิเมตร สามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ประมาณครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นก่อนการชิลด์ ซึ่งปิดกั้นได้มากกว่าโลหะชนิดอื่น ที่เป็นเช่นนั้นเพราะโลหะซิลิกอนเป็นโลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงที่สุดในบรรดาโลหะที่นำมาทดลอง

5.2 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะซิลิกอน (Silicon steel)

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 5.1 โลหะซิลิกอนมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น จึงได้ทดลองหาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะซิลิกอน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

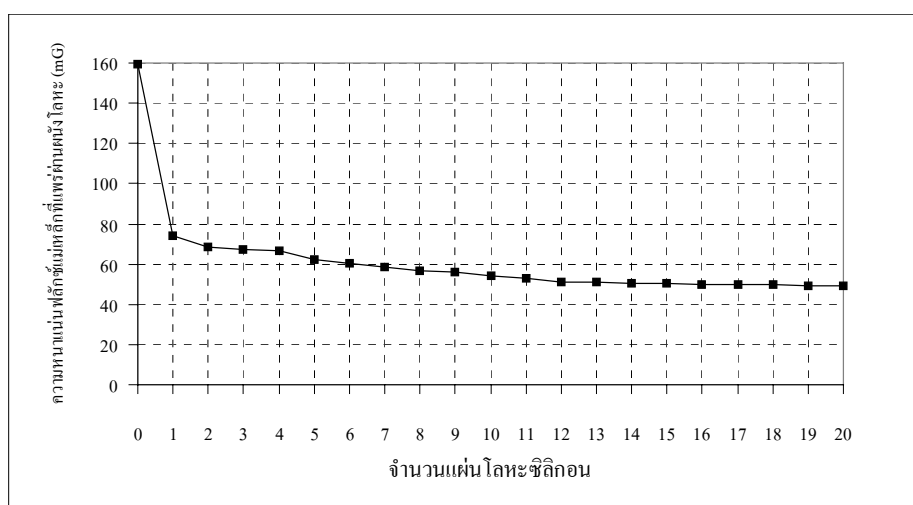
- 1) การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว
- 2) การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะชิลิกอน

5.2.1 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้แผ่นโลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว

การศึกษาคือจะทำเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.1 โดยติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-1 แต่เพิ่มจำนวนแผ่นโลหะชิลิกอนที่ละแผ่นวางซ้อนติดกัน ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5.2 และสามารถเขียนกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5-3

ตารางที่ 5.2 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว

จำนวนแผ่นโลหะชิลิกอน	ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านโลหะชิลิกอน (mG)	จำนวนแผ่นโลหะชิลิกอน	ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านโลหะชิลิกอน (mG)
0	159.4	11	52.8
1	74.2	12	51.2
2	68.2	13	50.8
3	67.4	14	50.6
4	66.6	15	50.3
5	62.4	16	50.0
6	60.4	17	49.8
7	58.4	18	49.6
8	56.6	19	49.4
9	56.0	20	49.3
10	54.0		



รูปที่ 5-3 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว

จากผลการศึกษาการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะซิลิกอนกันเพียงด้านเดียวของอุปกรณ์ทดสอบ พบว่าโลหะซิลิกอนแผ่นแรกเพียงแผ่นเดียวสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่มาจากด้านหน้าได้มาก เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นโลหะซิลิกอน ซึ่งก็เปรียบเสมือนการเพิ่มความหนาของโลหะซิลิกอนให้มากขึ้นก็สามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้มากขึ้นด้วย แต่เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่มาจากด้านหน้าส่วนใหญ่ถูกปิดกั้นโดยโลหะซิลิกอนแผ่นแรกไว้แล้ว โลหะแผ่นต่อๆ ไปจึงสามารถลดทอนสนามแม่เหล็กลงได้อีกเพียงไม่มาก และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของโลหะซิลิกอนไปเรื่อยๆ ปริมาณสนามแม่เหล็กที่ลดลงเริ่มที่จะคงที่ คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีแนวโน้มว่าจะลดลงจนถึงค่าๆ หนึ่ง ซึ่งจะไม่ลดลงไปมากกว่านั้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าสนามแม่เหล็กส่วนที่เหลืออยู่นี้เป็นสนามแม่เหล็กส่วนที่แพร่ข้ามโลหะเข้าหาอุปกรณ์ทดสอบทางด้านบนหรือล่าง ซึ่งไม่มีการปิดกั้นสนามแม่เหล็กไว้

5.2.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน

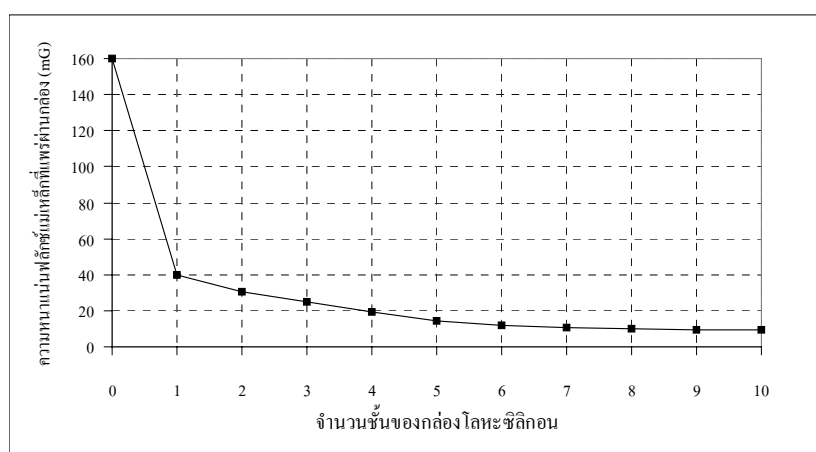
การศึกษาได้นำโลหะซิลิกอนมาพับเป็นกล่องสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5-4 ขนาด $35 \times 35 \times 35$ เซนติเมตร โดยใช้ขดลวด Helmholtz coil เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก การทดลองได้เริ่มที่การสร้างสนามแม่เหล็กขนาดความหนาแน่น 160 mG และติดตั้งอุปกรณ์ดังในรูปที่ 5-4 ภายในขดลวด Helmholtz coil ตรงตำแหน่งกึ่งกลางขดลวด โดยได้ติดตั้งกล่องโลหะซิลิกอนที่ละชั้นซ้อนติดกัน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.3 และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-4 การทดสอบการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องโลหะซิลิกอนที่ละชั้น

ตารางที่ 5.3 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน

จำนวนชั้นของกล่องโลหะซิลิกอน	ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านกล่องโลหะซิลิกอน (mG)
0	160.0
1	40.0
2	30.8
3	24.8
4	19.4
5	14.2
6	12.0
7	10.8
8	9.8
9	9.4
10	9.2



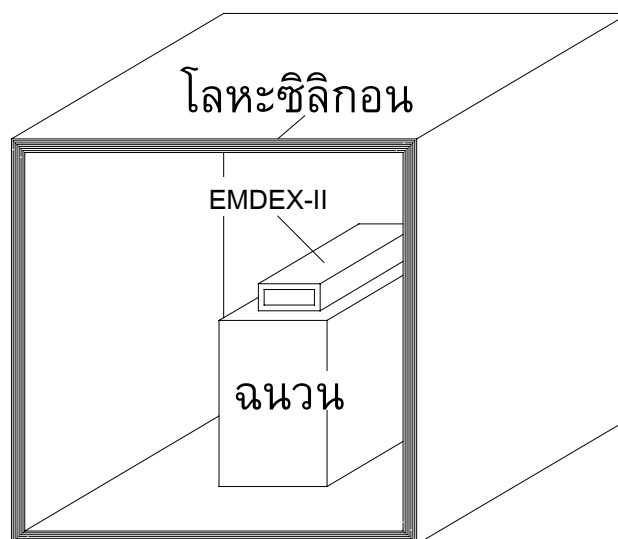
รูปที่ 5-5 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน

จากรูปที่ 5-5 ซึ่งแสดงผลการศึกษาการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน พบว่าได้ผลในลักษณะเดียวกันกับการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะซิลิกอนกันเพียงด้านเดียว คือ ชั้นแรกจะสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้มาก เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของกล่องโลหะซิลิกอน ก็สามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้มากขึ้น สนามแม่เหล็กที่สามารถแพร่ผ่านไปยังเครื่องวัด EMDEX-II มีปริมาณลดลง แต่เนื่องจากสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่ที่เข้ามาทางด้านผนังโลหะถูกปิดกั้นโดยชั้นแรกไว้เกือบหมดแล้ว เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของกล่องโลหะซิลิกอนไปเรื่อยๆ ปริมาณสนามแม่เหล็กที่ลดลงเริ่มที่จะคงที่ ก็เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กส่วนที่เหลืออยู่นี้เป็นสนามแม่เหล็กส่วนที่แพร่เข้าหาอุปกรณ์ทดสอบทางด้านช่องที่เปิดอยู่ ถึงแม้จะเพิ่มจำนวนชั้นโลหะซิลิกอนมากเท่าใด ปริมาณสนามแม่เหล็กที่เข้ามาทางช่องเปิดก็ยังเท่าเดิม

อย่างไรก็ตามการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยทำเป็นกล่องสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้มากกว่าการปิดกั้นเพียงด้านเดียว เมื่อเทียบกันชั้นต่อชั้น

5.3 การหาประสิทธิภาพของการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องชีลด์ที่ทำจากโลหะซิลิกอน

การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะซิลิกอนในหัวข้อที่ 5.2 กับความสัมพันธ์ในรูปที่ 5-5 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของกล่องชีลด์เกิน 8 ชั้น ปริมาณสนามแม่เหล็กที่ลดลงเริ่มที่จะคงที่ และมีประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กเท่ากับ $20 \log \left[\frac{160}{9.8} \right] = 24.26 \text{ dB}$ ซึ่งใกล้เคียงกับกล่องชีลด์ของต่างประเทศ ดังนั้นจึงสร้างกล่องชีลด์ [21] ขนาด $60 \times 60 \times 60$ เซนติเมตร จำนวน 2 กล่อง โดยใช้โลหะซิลิกอนต่างเกรด คือ M-2 (ซิลิกอน 3.5%) และ M-5 (ซิลิกอน 3.75%) ดังแสดงในรูปที่ 5-6 โดยใช้แผ่นโลหะซิลิกอน 8 ชั้นหนาชั้นละ 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 5-6 ลักษณะของกล่องชีลด์ที่สร้างขึ้นเอง

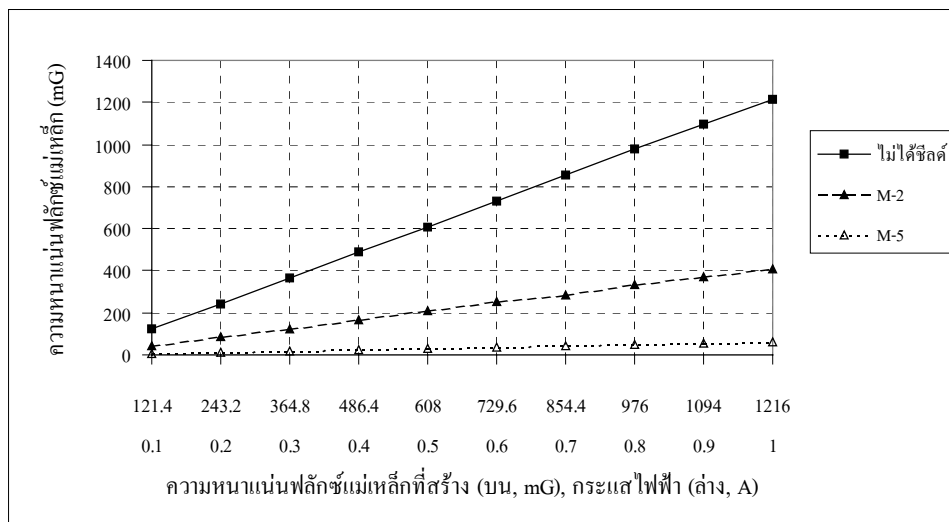
กล่องชีลด์ที่สร้างเสร็จจำเป็นต้องทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องชีลด์ โดยการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก่อนและหลังการชีลด์ เริ่มแรกใช้ EMDEX-II วัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวด Helmholtz coil ก่อนการติดตั้งกล่องชีลด์ โดยป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 A จากนั้นติดตั้งกล่องชีลด์ภายในขดลวด Helmholtz coil และมี EMDEX-II วัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ตรงจุดกึ่งกลางภายในกล่องชีลด์ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับการติดตั้งกล่องชีลด์ ดังในรูปที่ 5-6

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการชีลด์แต่ละกล่องได้แสดงในตารางที่ 5.4 และสามารถแสดงผลการลดทอนสนามแม่เหล็กและประสิทธิภาพการชีลด์ได้ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5-7 และรูปที่ 5-8 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ประสิทธิภาพการชิลด์ของกล่องชิลด์แต่ละกล่อง

		กล่องที่ 1		กล่องที่ 2	
I (A)	B (U, mG)	B (S, mG)	SE	B (S, mG)	SE
0.1	121.4	42.6	9.1	5.9	26.27
0.2	243.2	85.4	9.09	10.0	27.72
0.3	364.8	125.2	9.29	17.4	26.43
0.4	486.4	167.6	9.25	24.4	25.99
0.5	608.0	208.4	9.3	31.4	25.74
0.6	729.6	251.0	9.27	37.8	25.71
0.7	854.4	286.2	9.5	44.4	25.69
0.8	976.0	331.8	9.37	50.6	25.71
0.9	1094.0	373.4	9.34	57.4	25.60
1.0	1216.0	410.6	9.43	63	25.71

หมายเหตุ U คือ Unshielded
S คือ Shielded
SE คือ Shielding Effectiveness (สมการที่ 2.12)

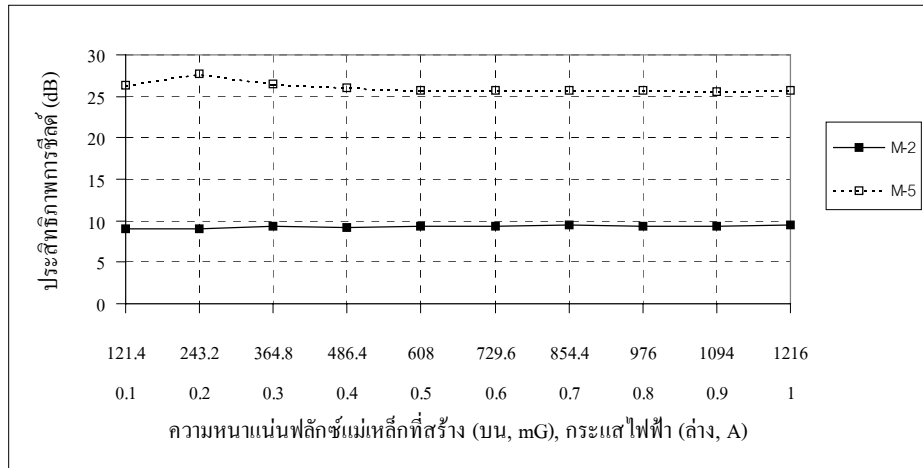


รูปที่ 5-7 ความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็กของกล่องชิลด์แต่ละกล่อง

M-2 เป็นกล่องชิลด์ที่ทำด้วยโลหะซิลิกอน 3.5 %

M-5 เป็นกล่องชิลด์ที่ทำด้วยโลหะซิลิกอน 3.75 %

จากรูปที่ 5-7 กล่อง Shield1 ซึ่งทำจากโลหะซิลิกอนเกรด M-2 สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 3 เท่า เทียบเป็นประสิทธิภาพการชิลด์ประมาณ 9 dB ดังแสดงในรูปที่ 5-8 ส่วนกล่อง Shield2 ที่ทำจากโลหะซิลิกอนเกรด M-5 สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 20 เท่า หรือเทียบเป็นประสิทธิภาพการชิลด์ประมาณ 27 dB รูปที่ 5-8 ประสิทธิภาพการชิลด์ของกล่องชิลด์แต่ละกล่อง



รูปที่ 5-8 ประสิทธิภาพการชิลด์ของกล่องชิลด์แต่ละกล่อง

จากผลการทดลองในรูปที่ 5-7 และ 5-8 พบว่ากล่องชิลด์ที่ได้สร้างขึ้นนี้สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 20 เทา หรือ 27 dB จึงได้ลองนำมาทดสอบเพื่อป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จริงๆ ตามปกติแล้วเมื่อไม่มีกล่องชิลด์ ตัวเลขและตัวอักษรบนหน้าจอคอมพิวเตอร์จะเริ่มสั่นที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กประมาณ 10 mG และสั่นมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5-9 เมื่อติดตั้งกล่องชิลด์ให้กับคอมพิวเตอร์ และติดตั้งในขดลวด Helmholtz coil ดังรูปที่ 5-10 ป้อนกระแสเข้าขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก แล้วดูผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องชิลด์



รูปที่ 5-9 ตัวเลขและตัวอักษรบนหน้าจอคอมพิวเตอร์สั่นเมื่อถูกรบกวนโดยสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5-10 คอมพิวเตอร์ติดตั้งในกล่องชิลด์

จากการทดลองปรากฏว่าต้องสร้างสนามแม่เหล็กขนาดความหนาแน่นถึง 125 mG จึงจะทำให้ตัวเลขและตัวอักษรบนหน้าจอคอมพิวเตอร์เริ่มสั่น ดังนั้นกล่องชิลด์ที่สร้างขึ้นจึงสามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ในระดับหนึ่ง

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลการวัดและการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

- 1) ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
- 2) ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 3) ผลการชิลด์สนามแม่เหล็ก

6.1 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

6.1.1 ในบริเวณสถานีไฟฟ้า

จากผลการวัดทำให้ทราบว่าการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในสถานีไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะที่ไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอน เนื่องจากในสถานีไฟฟ้ามีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงติดตั้งอยู่มากมาย สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่มาจากทุกทิศทางทำให้กำหนดไม่ได้ว่าบริเวณไหนสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีค่าสูงหรือต่ำ อย่างไรก็ตามการกระจายสนามไฟฟ้าบนเส้นทางการวัดเดียวกันจะมีลักษณะเหมือนกันไม่ว่าจะวัดที่เวลาใดก็ตาม เพราะแรงดันก่อนข้างจะคงที่ ส่วนการกระจายของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกันไปตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบขณะเวลาที่ทำการวัด และเนื่องจากระดับแรงดันของระบบส่งมีค่าสูงกว่าของระบบจำหน่าย ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าในระบบส่งมีค่าสูงกว่าในระบบจำหน่าย ในทางตรงกันข้ามความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระบบจำหน่ายจะมีค่าสูงกว่าในระบบส่ง เพราะสถานี ไฟฟ้าย่อยระบบจำหน่ายใช้ระบบแรงดันต่ำกว่า แต่กระแสไฟฟ้าสูง ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงตามไปด้วย

6.1.2 ได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ตำแหน่งตกท้องช้างของสายจะมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งเสาโลหะ เนื่องจากว่าที่ตำแหน่งตกท้องช้างเป็นตำแหน่งที่สายส่งหย่อนลงมาต่ำที่สุด คือ สายส่งอยู่ใกล้กับเครื่องวัดมากกว่า โดยที่การกระจายของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากตำแหน่งเฟสกลางของเสา (ระยะทาง 0 เมตร) จนมีค่าสูงสุดตรงตำแหน่งสายส่งเฟสนอกพอดี ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากว่าที่ตำแหน่งเฟสกลางของเสาจะมีการหักล้างกันของสนามไฟฟ้ามากกว่าที่ตำแหน่งสายส่งเฟสนอกซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการเสริมกันของสนามไฟฟ้ามากที่สุด และจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะทางที่ไกลมากขึ้น ส่วนการกระจายของสนามแม่เหล็ก จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเฟสกลางของเสา เพราะที่ตำแหน่งนี้จะมีการเสริมกันของสนามแม่เหล็กมากที่สุด และมีค่าลดลงตามระยะทางที่ไกลมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณพบว่า ที่ตำแหน่งตกท้องช้างของสาย ทั้งผลการคำนวณและผลการวัดทั้งของความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 10 % ส่วนตรงตำแหน่งเสาโลหะ ผลการคำนวณและผลการวัดเฉพาะค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก็มีค่าแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 10 % เช่นกัน แต่ในกรณีของสนามไฟฟ้า ผลการคำนวณและผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าแตกต่างกันมากที่ตำแหน่งใต้เสาโลหะซึ่งต้องลงกราวด์พอดี โดยค่าที่วัดได้จะมีค่าต่ำเนื่องจากว่าบริเวณใกล้ๆ ส่วนที่ต้องลงกราวด์ การกระจายของแรงดันมีค่าต่ำ ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำตามไปด้วย นี่ก็สาเหตุที่ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณที่ต้องลงกราวด์มีค่าต่ำ ส่วนระยะที่ห่างออกไปจากเสาโลหะมีความ แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย

สาเหตุที่ทำให้ผลการวัดกับผลการคำนวณมีค่าแตกต่างกัน ก็คือ ในขณะที่ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะมีค่าขึ้นลงตลอดเวลา ซึ่งต่างจากการคำนวณที่จะกำหนดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็นค่าใดค่าหนึ่งตลอด นอกจากนี้ในการคำนวณยังไม่พิจารณาผลของเสาโลหะที่ต้องลงกราวด์ และยังสมมติว่าสายส่งมีแนวขนานกับพื้นดิน ในขณะที่จริงๆ แล้วสายส่งจะมีการหย่อนเนื่องจากน้ำหนักและอุณหภูมิของสาย

6.2 ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากผลการทดลองในบทที่ 3 ถึงแม้ว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งได้ทำการสำรวจในสถานที่ต่างๆ เช่น ในสถานีไฟฟ้า ใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และอาคารที่อยู่ใกล้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกินค่าจำกัดสูงสุดซึ่งทาง IRPA กำหนด แต่ก็สามารถมีผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลอดภาพ เมื่ออยู่ในบริเวณใกล้กับแหล่งกำเนิดการรบกวน เช่น ในห้องควบคุมของสถานีไฟฟ้า หรืออาคารที่อยู่ใกล้ๆ กับสายส่ง ทำให้ไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ การศึกษาเพื่อหาว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เหล่านี้จะทำงานอย่างเป็นปกติในสิ่งแวดล้อมที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไม่เกินเท่าไร

จากผลการทดลองกับจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อคลื่นรบกวนพบว่า จอคอมพิวเตอร์จะไม่ถูกรบกวนจากสนามไฟฟ้า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเครื่องและจอคอมพิวเตอร์จะมีโครงหรือกล่องที่เป็นโลหะต้องลงกราวด์ ซึ่งทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าภายในตู้หรือเป็นศูนย์ แต่จอคอมพิวเตอร์จะเริ่มมีปัญหาเมื่อทำงานอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กเกิน 10 mG ส่วนเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เช่น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และออสซิลโลสโคป สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงๆ ได้ ซึ่งในการทดลองได้สร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในปริมาณที่สูงเกินค่าที่วัดได้ในสถานีไฟฟ้าและใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ ได้ออกแบบให้สามารถป้องกันสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ในระดับหนึ่ง และได้รับมาตรฐาน IEC 1010

6.3 ผลการชิลด์สนามแม่เหล็ก

ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าไม่มีผลต่อจอคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการออกแบบให้สามารถป้องกันสนามไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการทดลองศึกษาจึงให้ความสำคัญกับสนามแม่เหล็กมากกว่า จากการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทำให้ทราบว่าสนามไฟฟ้าสามารถป้องกันได้ง่ายโดยใช้หลักการทำบริเวณที่ต้องการจะป้องกันสนามไฟฟ้าให้มีการกระจายแรงดันเป็นศูนย์ ซึ่งก็ทำได้โดยจะต้องมีระบบกราวด์ที่ดี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีกล่องเป็นโลหะ และกล่องโลหะนี้ก็มี การต่อลงกราวด์ ทำให้ภายในกล่องมีการกระจายแรงดันเป็นศูนย์หรือใกล้ศูนย์ ทำให้ชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายในกล่องไม่ถูกรบกวนโดยสนามไฟฟ้า ส่วนการป้องกันสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าการชิลด์สนามแม่เหล็กทำได้ยากกว่า โดยการชิลด์สนามแม่เหล็กมีแนวทางในการปฏิบัติอยู่ 2 วิธี ได้แก่ การเปียงเบนฟลักซ์แม่เหล็ก และหรือ วิธีกระแสไหลวน ซึ่งการชิลด์สนามแม่เหล็กโดยวิธีการ เปียงเบนฟลักซ์แม่เหล็ก จะเป็นวิธีที่นิยมและทำได้ง่ายกว่า โดยการใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงมา ครอบคลุมอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกันสนามแม่เหล็ก เมื่อได้ทำการทดลองพบว่า โลหะซิลิกอนเป็น โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตีสูงที่สุดในบรรดาโลหะที่นำมาทดลอง ดังนั้นจึงได้สร้างกล่องชิลด์ขึ้นมาเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กให้กับอุปกรณ์ทดสอบ ในที่นี้ได้แก่จอคอมพิวเตอร์ พบว่าสามารถลดทอนสนามแม่เหล็กลงได้ประมาณ 20 เท่า หรือ 27 dB ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องชิลด์ที่ผลิตในต่างประเทศ พบว่ามี ประสิทธิภาพการชิลด์ใกล้เคียงกัน

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผล

จากการศึกษาวิจัยของโครงการนี้ พอสรุปผลงานได้ดังนี้

- 1) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสถานีไฟฟ้า และใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ทำการวัดในการทดลองนี้ ส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่าจำกัดสูงสุดที่ทาง IRPA กำหนด
- 2) สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่า 8 kV/m จะไม่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 3) การรบกวนของสนามไฟฟ้านั้นสามารถทำการป้องกันได้ง่ายกว่าสนามแม่เหล็ก ระบบกราวด์ที่ดีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะช่วยให้ป้องกันสนามไฟฟ้าได้
- 4) การสร้างสนามแม่เหล็กแบบสม่ำเสมอ เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบต่อบุคลากรอิเล็กทรอนิกส์ในห้องปฏิบัติการสามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้ Helmholtz coil
- 5) การรบกวนของสนามแม่เหล็กต่อจอคอมพิวเตอร์ จะเริ่มมีผลที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่า 10 mG
- 6) การป้องกันสนามแม่เหล็กทำได้ โดยใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มีบิลิตี้สูงครอบคลุมอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกัน
- 7) กล่องชิลด์โลหะซิลิกอน สามารถป้องกันสนามแม่เหล็กได้ในระดับหนึ่ง คือสามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 20 เท่า หรือ 27 dB

7.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในโครงการนี้ถือว่าประสบความสำเร็จตามเป้าหมาย แต่เป็นเพียงการเริ่มต้นการศึกษาในด้านนี้ ยังมีเรื่องที่ควรจะได้ศึกษาต่อไป จึงใคร่ขอเสนอไว้คือ

- 1) การศึกษาหาคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ ที่เหมาะแก่การปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ความถี่ต่ำไปถึงความถี่สูงถึง 1,000 MHz โดยคำนึงถึงรูปลักษณะและมิติของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการปิดกั้นเป็นกล่องชิลด์หรือเป็นห้องชิลด์
- 2) การศึกษาหาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ ที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และรวมไปถึงความถี่สูงที่ใช้ในการสื่อสาร ว่ามีผลต่อสิ่งมีชีวิตอย่างไร
- 3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับหรือวัด (sensors) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศด้วยราคาที่แพงมาก น่าจะได้มีการศึกษาพัฒนาออกแบบสร้างอุปกรณ์ตรวจจับนี้ขึ้นใช้เอง เพื่อให้เกิดการศึกษาวิจัยในด้านนี้อย่างกว้างขวาง รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรและเทคโนโลยี

การสร้างทีมวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์” ดำเนินการวิจัยโดยคณะวิจัยดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวัย สังข์สะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นหัวหน้าโครงการและร่วมทำการวิจัยบางส่วนโครงการ

2. นายปิยะบุตร พุกษานุกุล นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินโครงการวิจัยส่วนหนึ่งเป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทในหัวข้อ “การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่อเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า” และสำเร็จการศึกษาปริญญาโท (วศ.บ.) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2542

3. นายพรเทพ เซวณโอบาส และนายสมชัย บุญโพธิ์อภิชาติ ได้ศึกษาเรื่อง “Electromagnetic Field Shielding Box” เป็นโครงการ (senior project) ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี จบการศึกษาปริญญาตรี (วศ.บ.) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543

4. นายจำนงค์ มีแก้ว และนายธนัญชัย พงษ์เทพนิวัติ ได้ศึกษาเรื่อง “การออกแบบสร้าง Helmholtz coil” เป็นโครงการ (senior project) ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี จบการศึกษาปริญญาตรี (วศ. บ.) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543

5. นายวิฑูรย์ งามประดิษฐ์ ช่างปฏิบัติการด้านเทคนิค วุฒิการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า ช่วยในการสำรวจวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสถานีไฟฟ้าย่อยและได้สายส่งแรงสูงบางแห่ง และช่วยในการสร้าง Helmholtz coil แบบวงแหวนคู่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kraus, J.D., "Electromagnetics", McGraw-Hill International Editions, 1992, p 575.
- [2] Peier, D., "Electromagnetische Vertraglichkeit", Huthig Buch Verlag, 1990, pp 12-15.
- [3] Naito, K. and et al, "Joint Research on the Electric and Magnetic Field Measurement in Indonesia", Nagoya Institute of Technology, Japan, 1995.
- [4] Lee, B.H. and et al, "Electric and Magnetic Fields from 345 kV Overhead Transmission Lines and Substations", Korea.
- [5] Shihab, S. and et al, "EMI and EMC in High Voltage Energy System", Royal Melbourne Institute of Technology, Australia.
- [6] Schaffner, "Electromagnetic Compatibility", August 1995, p 7.
- [7] Duff, W. G., "Fundamentals of Electromagnetic Compatibility, Vol. I", Interference Control Technologies Inc., Gainesville, Virginia, 1988, p1.11
- [8] Prasad, K.V., "Engineering Electromagnetic Compatibility", IEEE Press, 1996, pp 19-60 and 204-228.
- [9] Heerema, M.D., "Designing for Electromagnetic Compatibility", Hewlett-Packard Company, 1996.
- [10] Olsen, R., "Power System Electromagnetic Compatibility", Center of Excellence in Electrical Power Technology CEPT, 1998.
- [11] Clayton, R.P., "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons, 1992, pp 632-666.
- [12] Donald, R.J. and et al, "Electromagnetic Shielding", EMF-EMI control Inc, 1988, pp 1.1-2.77 and 6.1-6.14.
- [13] Neelakanta, P.S., "Handbook of Electromagnetic materials", CRC Press, Inc, 1995, pp.313-332 and 447-491.
- [14] IEEE Standard Board, "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", IEEE Std. 644-1994, 1994.
- [15] Electronic Measurement Technology, "Electromagnetic Field Analyzer EFA-3", Wandel & Goltermann.
- [16] Enertech Consultants, "EMDEX-II", Electric Power Research Institute.

- [17] International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association, "Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields", U.S.A., 1990.
- [18] Merritt, R., and et al, "Uniform Magnetic Field Produced by Three", Four and Five Square Coils, Dalhousie University, CANADA, 1983.
- [19] Hayt, W.H.Jr., "Engineering Electromagnetics", fifth edition, McGraw-Hill, 1989, pp.216-224.
- [20] International Electrotechnical Commission, "International Standard IEC 1010", 1995.
- [21] Electric Research & Management, Inc, "Magnetic Field Shielding Design Guide", Electric Power Research Institute EPRI, 1997.

ผลงานที่ตีพิมพ์

1. Samruay Sangkasaad, Piyabutr Pruksanubarn, Vitthawat Ngampradit, Katsuhiko Naito, Yukio Mizuno, and Naotsugu Matsubara, "Report of 1997 Joint Research on the Electric and Magnetic Field Measurement in Thailand", The 9th Asian Conference on Electrical Discharge (ACED-98), November 9-11, 1998, pp. D1-4
2. ปิยะบุตร พุกษานุบาล และ สรรวย สังข์สะอาด "การสำรวจคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำและการป้องกันคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแก่คอมพิวเตอร์", วิศวกรรมสาร ปีที่ 52 เล่มที่ 2 กุมภาพันธ์ 2542, หน้า 53-56 และ เล่มที่ 4 เมษายน 2542, หน้า 73-76
3. พรเทพ เชาวนโสภาส, สรรวย สังข์สะอาด และวิทวัส งามประดิษฐ์ "การป้องกันคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำด้วยกล่องชิลด์", สัมมนาวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี (High Voltage Engineering and EMC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 21-22 พฤศจิกายน 2543, EMC-4 หน้า 1-15
4. สรรวย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์ และพรเทพ เชาวนโสภาส "การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสม่ำเสมอด้วยขดลวดเฮล์มโฮลทซ์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 (EECON-23), 23-24 พฤศจิกายน 2543, โรงแรมดิเอ็มเพรส, เชียงใหม่, หน้า 69-72.