

การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ที่มีต่อเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า

นายปิยะบุตร พุกขานูบาท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-630-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**STUDY OF EFFECTS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD
ON ELECTRONIC MEASURING EQUIPMENT IN SUBSTATIONS**



MR.PIYABUTR PRUKSANUBAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

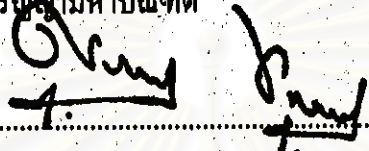
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

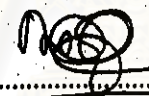
ISBN 974-331-630-2

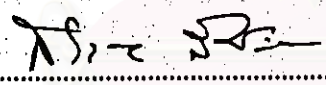
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อเครื่องวัด
 อิเล็กทรอนิกส์
โดย นายปิยะบุตร พดกษานูปาล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

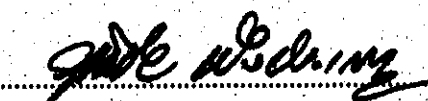
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)


..... กรรมการ
(นายวุฒิชัย พิงประเสริฐ)

ปิยะบุตร พุกขานูบาล : การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่อเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า (Study of Effects of Electric and Magnetic Fields on Electronic Measuring Equipments in Substations) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ตำรวจ ตั้งษ์ตะฮาด, 103 หน้า, ISBN 974-331-630-2

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการสำรวจวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำในสถานีไฟฟ้าย่อย และได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณ อธิบายถึงการสร้างสนามแม่เหล็กแบบสม่ำเสมอในห้องปฏิบัติการโดยใช้ขดลวด ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ พร้อมทั้งหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กวิกฤติซึ่งเริ่มที่จะมีผลรบกวนอุปกรณ์วัดอิเล็กทรอนิกส์ ศึกษาหาวิธีการป้องกันหรือลดทอนคลื่นรบกวนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แสดงตัวอย่างการใช้กล่องชิลด์ป้องกันคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากล่องชิลด์สามารถป้องกันคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิติศ ปิยะบุตร พุกขานูบาล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ตำรวจ ตั้งษ์ตะฮาด
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตำรวจ ตั้งษ์ตะฮาด

971068021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTROMAGNETIC FIELD INTERFERENCE / MAGNETIC FIELD / ELECTRIC FIELD / HELMHOLTZ COIL / SHIELDING

PIYABUTR PRUKSANUBAL : STUDY OF EFFECTS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS ON ELECTRONIC MEASURING EQUIPMENTS IN SUBSTATIONS. THESIS ADVISOR : DR. SAMRAUY SANGKASAAD, 103 PP. ISBN 974-331-630-2

This thesis reports the surveying measurement of low frequency electric and magnetic fields in substations and under transmission lines. The comparison of measured and calculated values were illustrated. A generation of uniform magnetic field in a laboratory by means of a magnetic coil was described. The inception effects of the electric and magnetic field on electronic measuring equipment were carried out. The means of interference protection or reduction were studied. 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.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา.....พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... *ปิยบุตร ปรุกсанубาล*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร. สำราญ สังคสาอาด*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *พ.ด.*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จดั่งใจไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.ตำรวจ ถึงซ์สะอาด ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้คำแนะนำและประสิทธิประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ขอขอบคุณท่านที่ได้ให้โอกาสและความไว้วางใจแก่กระผมในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เชี่ยวชาญฯทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือเกี่ยวกับเอกสารและรายงาน ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำทางด้านเทคนิคและการทดลองในห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณช่างเทคนิคของศูนย์เชี่ยวชาญฯสำหรับความช่วยเหลือในการหาข้อมูลบางอย่างและการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และการไฟฟ้านครหลวง ตั้งแต่ผู้ประสานงานจนถึงเจ้าหน้าที่ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่กระผมได้เข้าไปทำการทดลองภาคสนาม สำหรับการอำนวยความสะดวกในทุก ๆ เรื่อง สุดท้ายที่ลืมไม่ได้คือ คุณพ่อคุณแม่ ขอขอบคุณท่านที่ได้ให้กำลังใจ ความห่วงใย การดูแลเอาใจใส่ และยังคงเตือนให้กระผมทำงานให้ดีที่สุด

ท้ายนี้ กระผมขอขอบคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาอีกครั้งหนึ่ง สำหรับความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ให้กระผมมาโดยตลอด



ปิยะบุตร พฤษานานุก

พฤษภาคม 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 คลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ.....	4
2.1.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น.....	5
2.2 สนามไฟฟ้า.....	5
2.2.1 การคับปลิงสนามไฟฟ้า.....	5
2.2.2 การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	7
2.3 สนามแม่เหล็ก.....	10
2.3.1 การคับปลิงสนามแม่เหล็ก.....	10
2.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	12
2.4 การชีลด์.....	12
2.4.1 ประสิทธิภาพของการชีลด์ (Shielding effectiveness).....	13
2.4.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำและวัตถุที่ใช้ปิดกั้น.....	18
บทที่ 3 การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	22
3.1 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า.....	22
3.1.1 สถานที่ที่ทำการวัด.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด.....	23
3.1.3 วิธีการวัด.....	24
3.1.4 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายใน สถานีไฟฟ้า.....	25
3.1.5 การเปรียบเทียบความถูกต้องในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของเครื่องวัด	33
3.2 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	34
3.2.1 สถานที่ที่ทำการวัด.....	34
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด.....	36
3.2.3 วิธีการวัด.....	36
3.2.4 ผลการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเปรียบ เทียบกับผลการคำนวณ.....	37
3.3 ค่ากำหนดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....	45
บทที่ 4 ผลกระทบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	46
4.1 ผลกระทบของสนามไฟฟ้า.....	46
4.2 ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก.....	46
4.2.1 การสร้างสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ.....	46
4.2.1.1 ขดลวด Helmholtz coil และการออกแบบสร้าง.....	46
4.2.1.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กภายในขดลวด Helmholtz coil.....	49
4.2.1.3 สนามแม่เหล็กซึ่งสร้างโดยขดลวด Helmholtz coil.....	52
4.2.2 วิธีการทดลอง.....	54
4.2.3 ผลการทดลอง.....	54
4.2.3.1 จอคอมพิวเตอร์.....	54
4.2.3.2 เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์.....	57
บทที่ 5 การป้องกันหรือลดทอนค่าสนามแม่เหล็กที่มารบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	59
5.1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ.....	59
5.2 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะซิลิกอน (Silicon steel).....	61
5.2.1 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะซิลิกอนกันเพียงด้านเดียว.....	61
5.2.2 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะซิลิกอน.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การหาประสิทธิภาพของการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องชนิดที่ทำจากโลหะ ชนิดกอน.....	64
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการวัดและการทดลอง.....	68
6.1 ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	68
6.2 ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	69
6.3 ผลการชี้วัดสนามแม่เหล็ก.....	70
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
7.1 บทสรุป.....	71
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้วิจัย.....	103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สภาวะคลื่น โกลและคลื่น โกลซ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	19
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ โด- พารา- และเฟอร์โรแมกเนติก.....	19
3.1	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติระหว่างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 2 ชนิดที่ใช้.....	23
3.2	ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสถานีไฟฟ้า.....	25
3.3	การเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัดความเข้มสนามไฟฟ้า.....	34
3.4	ผลการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	37
3.5	ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz ในสถานที่ที่มี สนาม.....	45
4.1	ผลการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อจอคอมพิวเตอร์.....	55
5.1	ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ.....	60
5.2	ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชิลิกอนกันเพียงด้านเดียว.....	61
5.3	ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะชิลิกอน.....	63
5.4	ประสิทธิภาพการชิลด์ของกล่องชิลด์แต่ละกล่อง.....	65
ก.1	ค่าแรงดันจริงที่ใช้คำนวณของระบบ 500 kV.....	84
ก.2	ผลการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว.....	85
ก.3	ค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่ใช้คำนวณของระบบ 500 kV ขณะมีกระแสต่อเฟส 500 A (สายควว 4 เส้น).....	95
ก.4	ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 500 kV วงจรเดียว 500 A.....	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ 2 เส้น ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าและมีกระแสไหลผ่าน.....	1
2.1 แสดงผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน.....	4
2.2 แบบจำลองความจุไฟฟ้าสแตตริในช่องความถี่ต่ำระหว่างสายตัวนำ 2 เส้น.....	6
2.3 สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นแบบตัวนำเส้นเดี่ยว.....	7
2.4 ระบบสายส่งสมมติซึ่งมีสายตัวนำหลายเส้น.....	8
2.5 สนามแม่เหล็กซึ่งแพร่ออกมาจากสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน.....	10
2.6 แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรที่เป็นรูป ในพื้นที่ที่เต็มไปด้วยสนามแม่เหล็ก.....	11
2.7 ผลกระทบของผนังโลหะต่อสัญญาณรบกวน.....	14
2.8 การลดทอนสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.9 ขอบเขตการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านผนังโลหะ.....	15
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า.....	16
2.11 การแพร่ของสนามไฟฟ้าผ่านตัวนำ.....	17
2.12 การแพร่ของสนามแม่เหล็กผ่านตัวนำ.....	17
2.13 การเบี่ยงเบนของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก.....	20
2.14 ค่าเปอร์มิบิลิตีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกขึ้นอยู่กับความถี่.....	20
2.15 ค่าเปอร์มิบิลิตีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....	21
2.16 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กหลาย ๆ ชั้น.....	21
3.1 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	24
3.2 EMDEX-II เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	24
3.3 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	24
3.4 EFA-3 เมื่อใช้เป็นเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	24
3.5 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ.....	26
3.6 แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในลานสวิตช์ 500 kV พร้อมเส้นทางการวัด.....	26
3.7 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ.....	27
3.8 ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 1 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV สถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่ เกาะ.....	27
3.10 ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวที่ 2 ลานสวิตช์ 500 kV ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่ เกาะ.....	28
3.11 บริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก.....	28
3.12 แผนภาพบริเวณที่ติดตั้ง Reactor-Capacitor bank พร้อมเส้นทางกรวด.....	29
3.13 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ Reactor-Capacitor bank สถานีไฟฟ้าแรงสูง ท่าตะโก.....	29
3.14 ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณ Reactor-Capacitor bank ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่า ตะโก.....	30
3.15 ลานสวิตช์ 69 kV ของสถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิ.....	30
3.16 แผนภาพที่ตั้งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในลานสวิตช์ 69 kV พร้อมเส้นทางกรวด.....	31
3.17 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 1 ของลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าบาง กะปิ.....	32
3.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวที่ 2 ของลานสวิตช์ 69 kV สถานีไฟฟ้าบาง กะปิ.....	32
3.19 การติดตั้งสายส่งในห้องปฏิบัติการ.....	33
3.20 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่อ่านจากเครื่องมือวัด 3 แบบ.....	34
3.21 สายส่ง 500 kV สายควบ วงจรเดี่ยว (MM3-TTK).....	35
3.22 สายส่ง 500 kV สายควบ วงจรคู่ (MM3-TTK).....	35
3.23 สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ (MM3-PL2).....	35
3.24 สายส่ง 230 kV สายเดี่ยว วงจรคู่ (MM2-CR).....	35
3.25 สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดี่ยว (LP1-TE).....	36
3.26 สายส่ง 115 kV สายเดี่ยว วงจรเดี่ยว (LP1-MM2).....	36
3.27 แนวเส้นทางกรวดใต้สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	36
3.28 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง..	38
3.29 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง.....	38
3.30 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ..	38
3.31 ความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.32 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง.....	40
3.33 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง.....	40
3.34 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ.....	40
3.35 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 230 kV วงจรคู่ ตรงตำแหน่งเสาโลหะ.....	41
3.36 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งคกห้องข้าง ที่แรงดัน 115 kV.....	41
3.37 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งคกห้องข้าง ที่แรงดัน 115 kV.....	42
3.38 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV.....	42
3.39 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 230 kV ตำแหน่งเสาโลหะ ที่แรงดัน 115 kV.....	42
3.40 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง...	43
3.41 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ที่ตำแหน่งคกห้องข้าง.....	43
3.42 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ..	44
3.43 ความเข้มสนามไฟฟ้าได้สายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว ตรงตำแหน่งเสาโลหะ.....	44
4.1 Helmholtz coil ที่มีขดลวดสี่เหลี่ยม 4 ขด.....	47
4.2 โครงสร้างของ Helmholtz coil.....	48
4.3 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากเส้นลวดตัวนำ.....	49
4.4 สายตัวนำซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน.....	50
4.5 สายตัวนำซึ่งมีความยาวแน่นอน.....	52
4.6 ตำแหน่งที่ทำการวัดและคำนวณ.....	52
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณ.....	53
4.42 ผลการวัดความสม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวด Helmholtz coil.....	53
4.9 การติดตั้งจอยคอมพิวเตอรืทดสอบในขดลวด Helmholtz coil.....	55
4.10 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอยคอมพิวเตอรืเครื่องที่ 5.....	56
4.11 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของจอยคอมพิวเตอรืเครื่องที่ 9.....	56
4.12 การติดตั้งมิเตอร์ทดสอบในขดลวด Helmholtz coil.....	57
4.13 Multiproduct Calibrator (ซ้าย) และ Variac (ขวา).....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 การศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ.....	60
5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของโลหะชนิดต่างๆ.....	60
5.3 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้โลหะชนิดกั้นเพียงด้านเดียว.....	62
5.4 การทดสอบการปิดกั้นสนามแม่เหล็กของกล่องโลหะชนิดกั้นทีละชั้น.....	63
5.5 ผลการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยใช้กล่องโลหะชนิดกั้น.....	63
5.6 ลักษณะของกล่องชนิดที่สร้างขึ้นเอง.....	64
5.7 กล่องชนิดที่ทำการสร้าง.....	65
5.8 ความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็กของกล่องชนิดแต่ละกล่อง.....	66
5.9 ประสิทธิภาพการshieldของกล่องชนิดแต่ละกล่อง.....	66
5.10 ตัวเลขและตัวอักษรบนหน้าจอกอมพิวเตอร์สั้นเมื่อถูกรบกวนโดยสนามแม่เหล็ก.....	67
5.11 การติดตั้งจอกอมพิวเตอร์ในกล่องชนิด.....	67
ก.1 ระบบสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว พร้อมมิติต่างๆ.....	75
ก.2 รูปคลื่นแรงดันที่มีมุมเฟสนำและตามกันอยู่ 120°.....	81
ก.3 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีมุมเฟสนำและตามกันอยู่ 120°.....	92