

การพัฒนาโครงการบั้งสนามแม่เหล็กบวงความถี่กำลังแบบการชดเชยแฉ็กทีฟ



นายธีรภัทร์ คัมภีรานนท์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

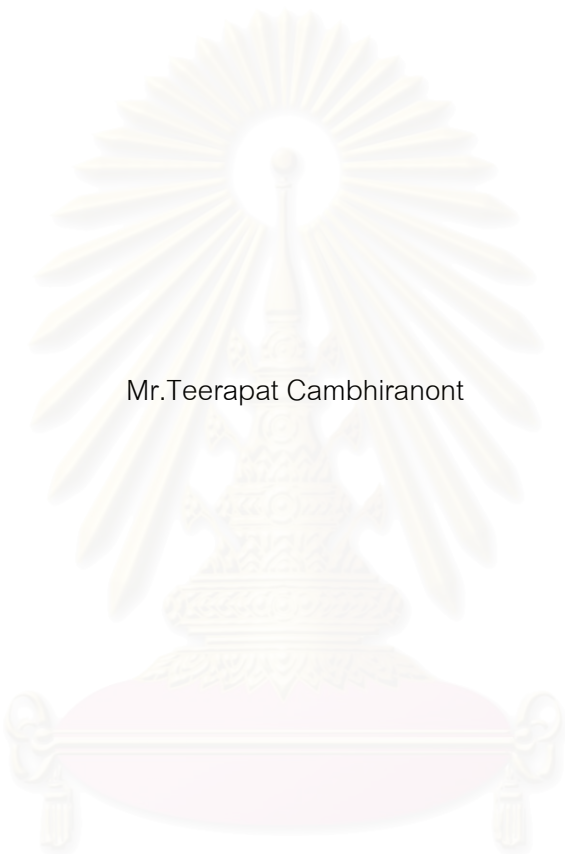
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ACTIVE COMPENSATION SHIELDING FRAME FOR POWER FREQUENCY
MAGNETIC FIELD INTERFERENCE



Mr. Teerapat Cambhironont

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

ธีรภัทร์ คัมภีรานนท์ : การพัฒนาโครงกำบังสนามแม่เหล็กรบกวนความถี่กำลังแบบการชดเชยแอ็กทิฟ (DEVELOPMENT OF ACTIVE COMPENSATION SHIELDING FRAME FOR POWER FREQUENCY MAGNETIC FIELD INTERFERENCE). อ.ที่ปรึกษา: อ.ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 95 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาและออกแบบระบบการกำบังสนามแม่เหล็กความถี่กำลังแบบการชดเชยแอ็กทิฟ ระบบกำบังสนามแม่เหล็กรบกวนแบบการชดเชยแอ็กทิฟใช้หลักการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จากการมีสนามแม่เหล็กคล้องผ่านส่วนรับสัญญาณซึ่งเป็นแบบสายอากาศแบบบ่วงโดยมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมาจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปผ่านส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้แก่ ส่วนวงจรเลื่อนเฟส ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์ ส่วนวงจรปริแอมป์ และส่วนภาคขยายกำลัง ทำหน้าที่จ่ายกระแสในส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กรบกวนให้มีขนาดลดลง ในการตรวจสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก่อนและหลังกำบัง ตามตำแหน่งพิกัด (x, y) บนพื้นที่ทดสอบ และผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอ็กทิฟสามารถลดทอนคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กได้ และให้ค่าประสิทธิผลของการกำบังเท่ากับ 16.03 dB หรือลดทอนได้ประมาณ 6.33 เท่า ที่พิกัด $(0.20, -0.20)$ บนพื้นที่ทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2550

4770312021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : ACTIVE SHIELD / MAGNETIC FIELD / COMPENSATION MAGNETIC
FIELD

TEERAPAT CAMBHIRANONT : DEVELOPMENT OF ACTIVE COMPENSATION
SHIELDING FRAME FOR POWER FREQUENCY MAGNETIC FIELD

INTERFERENCE, THESIS ADVISOR: WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing.
95 pp.

This thesis is presented a study of designing and developing an active compensation shielding frame system for power frequency magnetic field interference by detecting induced voltage from magnetic flux flowing to the square cross-section antenna receiver. The measured voltage is, then, brought to the electronic circuit consisting of phase shifter circuit, integrated circuit, pre-amplifier circuit and power amplifier circuit for driving current in compensating magnetic coil in order to attenuate the magnetic field interference. Moreover, this thesis also examined the comparison of unshielded and shielded magnetic flux density on field test in x-y coordinate and the discussion on the magnetic flux density of its result.

The experimental results have shown that the magnetic field interference can be reduced by the developed active compensation shielding frame system. The measurement of Shielding Effectiveness is 16.03 dB or it can be reduced approximately 6.33 times at (0.20, -0.20) on field test.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering..... Student's Signature.....*T. Cambhiranont*.....
Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's Signature.....*W. Rungseevijitprapa*.....
Academic year2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อ.ดร. วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย, การแก้ไข ปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนั้นต้องขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล และ ดร.ปิยนุตร พฤษานาบุบาล ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆและ ผองเพื่อนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คุณวิทย์ อุดมทรัพย์ากุล, คุณอนุตร์ อรุณานันท์, คุณเกียรติศักดิ์ ขาวนวลและ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ทำงานอยู่กองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า และแผนกซ่อมอุปกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษา และช่วยแบ่งเบาภาระในการทำงาน เพื่อให้สามารถ ปฏิบัติงานวิทยานิพนธ์นี้ควบคู่ไปได้ด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกคน ที่เป็นผู้ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา จนประสบความสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการกำบัง	5
2.1 ทฤษฎีสสนาม	5
2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.2.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ.....	7
2.2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น.....	7
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.3.1 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.3.2 กฎของบีโอดต์-ซาวาร์ต	10
2.3.3 วงจรเลื่อนเฟส.....	12
2.3.4 วงจรควบคุมแบบ I	13
2.3.5 วงจรควบคุมแบบ P.....	14
2.3.5.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส.....	15
2.3.5.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	15

บทที่	หน้า
2.3.6 วงจรขยายคลาสเอบี.....	16
2.3.6.1 การไบอัสด้วยการแบ่งแรงดัน.....	17
2.3.6.2 การไบอัสแบบสะท้อนกระแส.....	19
2.3.6.3 วงจรพิกซ์-พูลแบบด้านเดียว.....	20
2.3.6.4 วงจรพิกซ์-พูลด้านเดียวแบบคอมพลีเมนต์ารี.....	21
2.4 การป้องกันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน.....	22
2.5 การกำบัง.....	22
2.5.1 การกำบังแบบแพสซีฟ.....	22
2.5.2 การกำบังแบบแอ็กทีฟ.....	23
2.6 ประสิทธิภาพของการกำบัง.....	24
3. การออกแบบและประกอบสร้างระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอกทีฟโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	27
3.1 การจำลองระบบเพื่อใช้ในการคำนวณในโปรแกรมสำเร็จรูป.....	27
3.1.1 การจำลองระบบชดเชยตัวนำเดี่ยว.....	28
3.1.2 การจำลองระบบชดเชยตัวนำ 2 ตัวขนานกัน.....	29
3.1.2.1 แบบกระแสเฟสเดียวกัน.....	29
3.1.2.2 แบบกระแสเฟสตรงข้ามกัน.....	30
3.2 การทำงานและการออกแบบระบบกำบังแม่เหล็กแบบการชดเชยแอกทีฟจริง.....	31
3.2.1 หลักการทำงานของระบบ.....	32
3.2.2 ส่วนรับสัญญาณ.....	32
3.2.3 ส่วนวงจรเลื่อนเฟส.....	35
3.2.4 ส่วนวงจรอินทริเกเตอร์.....	36
3.2.5 ส่วนวงจรปริแอมป์.....	37
3.2.6 ส่วนภาคขยายกำลัง.....	38
3.2.7 ส่วนชดเชยชดเชยสนามแม่เหล็ก.....	40
3.3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	40
4. การทดสอบระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอกทีฟโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	46
4.1 การทดสอบและประเมินผลก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอกทีฟ..	47
4.1.1 การทดสอบเพื่อดูลักษณะของขนาดสนามแม่เหล็กแต่ละพิกัดบนพื้นที่ทดสอบ.	47

บทที่	หน้า
4.1.2 การทดสอบและประเมินผลค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของส่วนรับสัญญาณบน พื้นที่ทดสอบก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ.....	59
4.2 การทดสอบและประเมินผลบนพื้นที่ทดสอบหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการ ชดเชยแก็กทิฟ.....	61
4.2.1 พื้นที่ทดสอบอยู่หลังระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ.	61
4.2.2 พื้นที่ทดสอบอยู่ระนาบเดียวกับระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชย แก็กทิฟ	74
4.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....	80
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุป	84
5.2-ข้อเสนอแนะ	84
5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง	85
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก	89
ภาคผนวก ข	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A.....	49
4.2 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A.....	49
4.3 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A.....	51
4.4 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A.....	51
4.5 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A.....	53
4.6 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A.....	53
4.7 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A.....	55
4.8 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A.....	55
4.9 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A.....	57
4.10 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A.....	57
4.25 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำลัง ขณะ จ่ายกระแสขนาด 0.7 A.....	78
4.26 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำลัง ขณะ จ่ายกระแสขนาด 0.9 A.....	79

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 เครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของแต่ละประเทศ.....	1
2.1 แผนแสดงการรบกวนของสัญญาณรบกวน.....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า	6
2.3 รูปภาพแสดงเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด	8
2.4 รูปแสดงมุมระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กกับพื้นที่ตั้งฉาก.....	9
2.5 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุด P เนื่องจากเส้นทางการไหลของคลื่นกระแส Idl	10
2.6 วงจรเลื่อนเฟสแบบนำหน้าและล่าหลังสัญญาณ ตามลำดับ.....	12
2.7 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ I.....	13
2.8 วงจรของระบบควบคุมแบบ I	13
2.9 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ P	14
2.10 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier).....	15
2.11 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)	16
2.12 การผิดเพี้ยนครอสโอเวอร์ (θ), การไบอัสด้วยค่าต่ำ (ψ).....	16
2.13 แสดงจุด Q-POINT ของวงจรรขยายคลาสเอบี	17
2.14 การไบอัสด้วยวงจรแบ่งแรงดัน	17
2.15 ลักษณะการทำงานอย่างง่าย ของวงจรถลาสิบี	18
2.16 การไบอัสแบบสะท้อนกลับ	19
2.17 วิธีแก้ความผิดเพี้ยนที่ช่วงต่อ โดยการเพิ่มไบอัส (θ), โดยการป้อนกลับแบบลบ (ψ)	19
2.18 วงจรพิกซ์-พูลดัดแปลงโดย ใส่ตัวเก็บประจุ (θ), วงจรเสมือนของรูป (ψ), ลักษณะการทำงาน (ค)	20
2.19 วงจรพิกซ์พูลด้านเดียวแบบคอมพลีเมนต์ารีแบบ วงจรอย่างง่าย (θ), แบบดาร์ลิ่งตัน (ψ)	21
2.20 ปฏิกิริยาการณที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะกำบังต่อสัญญาณรบกวน.....	23
2.21 หลักการของการชดเชยแบบเอ็กทิฟ	24
3.1 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กขดลวดตัวนำเดี่ยว	28
3.2 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดตัวนำเดี่ยว	28
3.3 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก 2 ขดลวดตัวนำแบบเฟสเดียวกัน	29
3.4 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่าง 2 ขดลวดตัวนำ	29

ภาพประกอบที่	หน้า
3.5 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก 2 ขดลวดตัวนำแบบเฟสตรงข้ามกัน.....	30
3.6 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่าง 2 ขดลวดตัวนำ	30
3.7 แบบจำลองการทำงานของระบบกำบังแบบการชดเชยแอร์กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็ก.....	31
3.8 ส่วนรับสัญญาณของระบบ	33
3.9 แสดงมุมตั้งฉากระหว่างสนามแม่เหล็กกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด.....	33
3.10 ภาพแสดงมิติร่องบากของท่อ PVC เพื่อพันขดลวดให้เป็นสายอากาศแบบบ่วง.....	34
3.11 ลักษณะของส่วนรับสัญญาณเมื่อพันขดลวดตามรอยบากท่อ PVC แล้ว.....	34
3.12 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดรับสัญญาณ (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิด สนามแม่เหล็ก (กราฟ B).....	34
3.13 วงจรเลื่อนเฟสสามารถเลือกให้เลื่อนเฟสแบบล้ำหลังและนำหน้าได้	36
3.14 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ออกแบบ	37
3.15 วงจรปริแอมป์ที่ออกแบบ	38
3.16 วงจรปริแอมป์ที่ออกแบบ	30
3.17 ส่วนภาคขยายกำลังวงจรขยายแบบไม่มีตัวเก็บประจุเอาต์พุต OCL 50 W _{RMS} พร้อมชุดวงจร กรองความถี่ผ่านต่ำ 40-200 Hz	39
3.18 แสดงการจัดวางองค์ประกอบและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ.....	41
3.19 ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์และส่วนวงจรปริแอมป์	42
3.20 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Fluke รุ่น FLU87-5.....	42
3.21 หม้อแปลงปรับค่าได้ MATSUNAGA ขนาด 1kV A	42
3.22 เครื่องวัดสัญญาณดิจิตอลแบบ 4 ช่อง ยี่ห้อ LeCroy รุ่น 9384 M	43
3.23 เครื่องวัดสัญญาณดิจิตอลแบบ 2 ช่อง ยี่ห้อ Fluke Scope Meter 105B Series II	43
3.24 ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก	44
3.25 Electromagnetic Field Meter ยี่ห้อ EMDEXII	44
3.26 ส่วนวงจรภาคขยายกำลัง	44
3.27 ส่วนวงจรเลื่อนเฟสสามารถเลือกให้เลื่อนเฟสแบบล้ำหลังและนำหน้าได้.....	45
4.1 ลักษณะพื้นที่ทดสอบสนามแม่เหล็กและตัวอย่างพิกัดที่ทำการวัด	47
4.2 แสดงการจัดวางขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเหนือพื้นที่ทดสอบ 40 ซม.....	48
4.3 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และการวัดสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบ	48

ภาพประกอบที่	หน้า
4.4 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.1 \text{ A}$	50
4.5 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.3 \text{ A}$	52
4.6 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.5 \text{ A}$	54
4.7 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.7 \text{ A}$	56
4.8 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.9 \text{ A}$	58
4.9 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ	59
4.10 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น	60
4.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป	61
4.12 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ	62
4.13 แสดงกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s = 0.1 \text{ A}$ (ก), $I_s = 0.2 \text{ A}$ (ข)	62
4.13 แสดงกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s = 0.3 \text{ A}$ (ค), $I_s = 0.4 \text{ A}$ (ง), $I_s = 0.5 \text{ A}$ (จ), $I_s = 0.6 \text{ A}$ (ฉ), $I_s = 0.7 \text{ A}$ (ช), $I_s = 0.8 \text{ A}$ (ซ)	63
4.13 แสดงกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s = 0.9 \text{ A}$ (ณ), $I_s = 1.0 \text{ A}$ (ญ)	64
4.14 แสดงกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B) เมื่อปรับอัตราขยายมากเกินไป	64
4.15 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังระบบกำบัง 5 เซนติเมตร	65
4.16 การวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแล้ว	65
4.17 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.1 \text{ A}$	66

ภาพประกอบที่	หน้า
4.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบก้ำบั้งจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.3 \text{ A}$	67
4.19 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบก้ำบั้งจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.5 \text{ A}$	68
4.20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบก้ำบั้งจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.7 \text{ A}$	69
4.21 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบก้ำบั้งจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.9 \text{ A}$	70
4.22 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, ส่วนขดลวดชดเชย สนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ	74
4.23 ลักษณะพื้นที่ทดสอบสนามแม่เหล็กและตัวอย่างพิกัดที่ทำการวัด	74
4.24 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้งจากการวัด, $I_s = 0.1 \text{ A}$	75
4.25 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้งจากการวัด, $I_s = 0.3 \text{ A}$	76
4.26 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้งจากการวัด, $I_s = 0.5 \text{ A}$	77
4.27 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้งจากการวัด, $I_s = 0.7 \text{ A}$	78
4.28 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้งจากการวัด, $I_s = 0.9 \text{ A}$	79
4.29 ตัวอย่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง (ก) และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม (ข) กรณีขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กสูงห่างจากพื้นที่ ทดสอบ 0.4 เมตร ($I_s = 0.1 \text{ A}$)	80
4.30 ตัวอย่างภาพตัดขวางความหนาแน่นฟลักซ์บนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง กรณีพื้นที่ทดสอบ อยู่หลังระบบก้ำบั้ง 5 เซนติเมตร ($I_s = 0.9 \text{ A}$).....	81
4.31 ตัวอย่างภาพตัดขวางความหนาแน่นฟลักซ์บนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง กรณีพื้นที่ทดสอบ อยู่ระนาบเดียวกับระบบก้ำบั้ง ($I_s = 0.9 \text{ A}$).....	81

ภาพประกอบที่	หน้า
4.32 ลักษณะการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบเมื่อใช้ระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟวดตามแนวความกว้าง (ก) และตามพิสัยในแนวเส้นทแยงของขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (ข).....	82
ก.1 ลักษณะการวางอุปกรณ์บนพื้นที่ทดสอบ	89
ก.2 ขดลวดส่วนซ้าย.....	91
ก.3 ขดลวดส่วนขวา.....	91
ก.4 ขดลวดส่วนบน.....	92
ก.5 ขดลวดส่วนล่าง.....	92
ข.1 แสดงการป้อนข้อมูลและผลลัพธ์การใช้โปรแกรมคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยโปรแกรม.....	94

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การรบกวนกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าส่งผลให้อุปกรณ์ที่ถูกรบกวนนั้นเกิดข้อบกพร่องในการทำงาน และบางครั้งอาจทำให้ผู้ใช้อุปกรณ์นั้นเกิดอันตรายขึ้นได้ ในรายงานต่างๆจากต่างประเทศพบว่า เครื่องมือทางการแพทย์บางรายการ เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจ, เครื่องอ่านจังหวะการเต้นของหัวใจ ตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับเด็กอ่อน และอุปกรณ์อื่นๆในโรงพยาบาล เกิดการทำงานผิดปกติเมื่อมีการใช้งานโทรศัพท์มือถือในบริเวณใกล้เคียง แม้กระทั่งระบบเบรกของรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันควบคุมด้วยการทำงานด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ABS) เกิดการล็อกล้อขึ้นเองเมื่อรถยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้า รีโมทคอนโทรลที่ใช้ควบคุมการเปิดปิดของประตูโรงรถซึ่งอยู่ใกล้สนามบิน ปิดเปิดเองเมื่อมีเครื่องบินผ่าน จากตัวอย่างที่กล่าวมา สาเหตุของปัญหามาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแพร่ออกมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆที่อยู่ในบริเวณข้างเคียง และทำให้การทำงานของอุปกรณ์นั้นๆทำงานผิดปกติไปจากเดิม

ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จึงเป็นบทพิสูจน์ว่าปัญหาเหล่านี้มีความสำคัญกับชีวิตประจำวันอย่างไร ทั้งเรื่องที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและอันตรายต่อทรัพย์สิน ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป จีน ญี่ปุ่น ซาอุดีอาระเบีย เป็นต้น ตัวอย่างยิ่งกับความสำคัญนี้ จึงออกกฎหมายเพื่อคุ้มครองผู้บริโภคขึ้น และบังคับใช้ภายในประเทศและภูมิภาค เช่น สหรัฐอเมริกาตั้งองค์กรขึ้นกำกับดูแลและออกกฎหมายเรียกว่า FCC สหภาพยุโรปก็กำหนดข้อบังคับการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากกลุ่มประเทศอื่นๆจะต้องได้รับการรับรองคือ ได้เครื่องหมาย CE เสียก่อนจึงจะนำผลิตภัณฑ์ไปวางตลาดได้ หากไม่ทำตามข้อกำหนดจะต้องถูกลงโทษตามกฎหมาย สำหรับเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของแต่ละประเทศแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 เครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของแต่ละประเทศ

การศึกษาผลการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, การแพร่หรือวิธีการลดผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน เป็นปัญหาที่มีผู้สนใจทำวิจัยกันมาก อาทิเช่น

L. Hasselgren and J. Luomi (1995) ศึกษาการลดผลกระทบของสนามแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยการใช้โลหะกำบังด้วยวิธีการต่างๆเช่น การกำบังสนามแม่เหล็กด้วยโลหะที่มีแหล่งกำเนิดมาจากภายนอก และการกำบังด้วยโลหะที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ภายในแผ่นโลหะปิดล้อม ด้วยลักษณะการกำบังแบบต่างๆ 3 แบบคือ การกำบังด้วยแผ่นโลหะยาวอนันต์ การกำบังด้วยแผ่นโลหะปิดกั้น 3 ด้าน และการกำบังด้วยแผ่นโลหะปิดกั้น 4 ด้านแบบซ้อนทับกัน ทุกลักษณะการกำบังอธิบายด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบังเทียบกับระยะทาง

A.R. Memari and W. Janischewskyj (1996) ศึกษาถึงการแพร่ของสนามแม่เหล็กใกล้ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง 750 kV ด้วยวงการแพร่ของสนามแม่เหล็ก (Mitigating Loop)

E. Salinas, A. Bondeson, J. Daalder and Y. Hamnerius (2001) ศึกษาและทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical) และทำการทดลองเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กความถี่กำลังจากสถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้เทคนิคการกำบังต่างๆ เพื่อนำไปสู่การลดผลสนามแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยมีแหล่งกำเนิดที่พิจารณาเช่น บัสบาร์, สายเคเบิล และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส รายละเอียดการศึกษาคือ ศึกษาการแพร่ของแหล่งกำเนิดภายในสถานีไฟฟ้าจากนั้นอธิบายการลดผลสนามแม่เหล็กของการกำบังแบบแพสซีฟด้วย Contour Line ของสนามแม่เหล็กจากแผ่นโลหะอลูมิเนียม และแผ่นเหล็ก และอธิบายการลดผลสนามแม่เหล็กการชดเชยแบบแอ็กทีฟด้วยขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก ซึ่งติดตั้งไว้หน้าบัสบาร์

C. Buccella, M. Feliziani, and V. Fuina (2002) ศึกษาถึงการลดผลของสนามแม่เหล็กกำลังด้วยการชดเชยแบบแอ็กทีฟ โดยออกแบบระบบกำบังแอ็กทีฟที่มีความสามารถในการกำบังซึ่งอธิบายด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบังประมาณ 25 dB แต่ความสามารถในการกำบังจะลดลงถ้าความถี่ของสนามแม่เหล็กรบกวนเพิ่มขึ้น โดยช่วงความถี่ที่พิจารณาทำการทดสอบอยู่ในช่วง 50 Hz ถึง 1 kHz

ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มมากขึ้น ในระบบการสื่อสาร ระบบควบคุม เช่น คอมพิวเตอร์ และเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ในพื้นที่ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้ถูกรบกวนจนไม่สามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ และอาจเกิดความเสียหายได้ ตัวอย่างพื้นที่ดังกล่าว เช่นในกรณีโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการเดินสายไฟฟ้าใต้พื้นดินหรือในผนัง หรือใกล้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้ทำงานได้แบบไม่ปกติ ซึ่งสาเหตุของปัญหาเหล่านี้ เกิดขึ้นเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำ ที่มีกระแสสูงภายในตัวอาคาร

ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการแก้ไข หนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ก็คือการกำบัง (Shielding) ซึ่งการกำบังนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน วิธีการที่นิยมในการแก้ไขปัญหาคือการนำแผ่นโลหะมาถักนระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับจอภาพซึ่งมีข้อเสียในเรื่องของน้ำหนักและมีความแพง แต่วิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการชดเชยกันของสนามแม่เหล็ก จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยหาแนวทางที่เหมาะสมเพื่อออกแบบสร้างตัวต้นแบบ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) พัฒนาและออกแบบโครงกำบังสนามแม่เหล็กความถี่กำลังแบบใหม่ ที่มีประสิทธิภาพ มีน้ำหนักเบาและราคาประหยัด
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ความถี่กำลังก่อนและหลังกำบัง
- 3) สร้างต้นแบบและทดลองวัดค่าประสิทธิภาพผลของการกำบังและเปรียบเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดเทียบกับการคำนวณ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ เพื่อที่จะศึกษา, วิเคราะห์ และสร้างตัวต้นแบบโครงกำบังสนามแม่เหล็กที่ครอบคลุมความถี่กำลังแบบการชดเชยแอมป์ ดั้งนั้นในเรื่องใหม่ในการทดลองจึงกำหนดตัวแปรควบคุมดังต่อไปนี้

- 1) การกำบังมุ่งเน้นเฉพาะผลจากสนามแม่เหล็ก 50 Hz เท่านั้น
- 2) ใช้วิธีการวัดสนามแม่เหล็กโดยตรงหรือใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลีเมนต์สำเร็จรูปในการจำลองและตรวจสอบผลของการกำบังจากการวัดด้วยการคำนวณจากโปรแกรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากงานวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาปัญหาการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กผ่านวัตถุปิดกัน ดังนี้

- 1) ได้ความรู้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำทั้งก่อนและหลังการมีวัตถุปิดกันจากการจำลองระบบและการทดลองจริง
- 2) เป็นโครงกำบังที่มีน้ำหนักเบา และราคาถูก
- 3) เป็นหนทางสู่การศึกษาต่อไปในการสร้างห้องกำบังโดยใช้หลักการนี้

1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาส่วนหลักๆ 5 บท คือ

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบข่ายของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 เป็นส่วนของหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะอธิบายถึงองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มาของสมการพื้นฐานการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ การกำบังแบบต่างๆ รวมทั้งดัชนีชี้วัดการลดทอนสนามแม่เหล็กประสิทธิผลของการกำบัง

บทที่ 3 อธิบายการจำลองระบบเพื่อใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เป็นการจำลองรูปแบบเพื่อใช้ศึกษาหนทางที่ถูกต้องในการกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉกทิฟ และนำผลที่ได้เป็นหลักในการออกแบบส่วนต่างๆ ของระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉกทิฟจริง

บทที่ 4 เป็นการตรวจสอบผลการออกแบบและประกอบสร้างระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉกทิฟที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ว่าผลที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉกทิฟเทียบกับผลก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉกทิฟเป็นอย่างไร และนำเสนอการลดทอนด้วยดัชนีการลดทอนสนามแม่เหล็กประสิทธิผลของการกำบัง

บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์

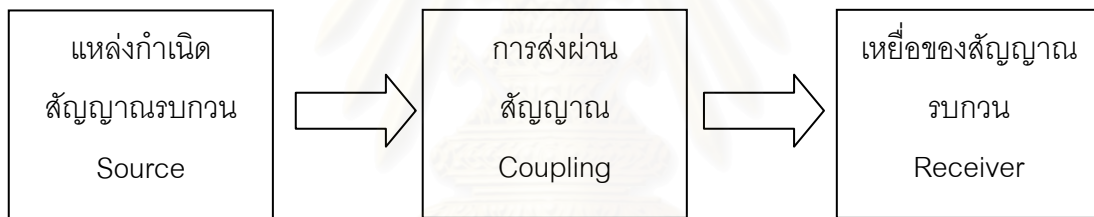
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการกำบัง

บทนี้ จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวนในหลักการของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการป้องกันสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน และยังรวมถึงการศึกษาและพัฒนากำบังสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในอดีต รวมทั้งทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบระบบตรวจจับสนามแม่เหล็กรบกวนโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

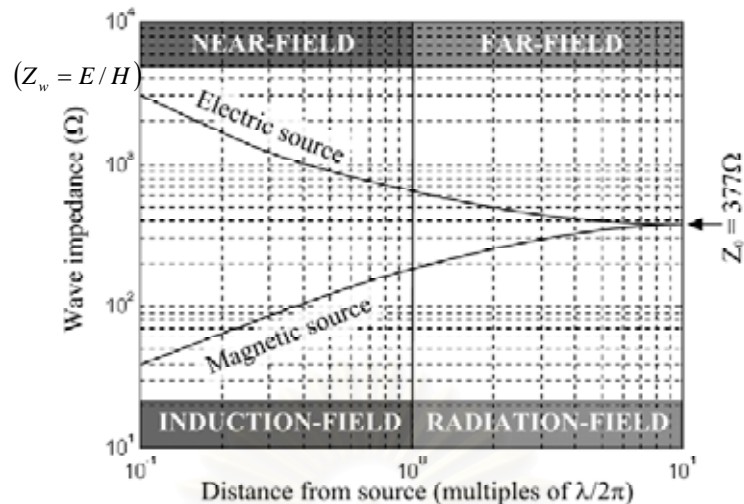
ปัญหาการรบกวนทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องมีองค์ประกอบของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน, ตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า “ช่องทางการเชื่อมโยง” (Coupling channel) [1] และเหยื่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จนส่งผลทำให้เกิดการทำงานที่ผิดปกติ หรือไม่สามารถทำงานต่อได้หรือเกิดความเสียหาย ดังสามารถเขียนเป็นแผนปัญหาของคลื่นรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนแสดงการรบกวนของสัญญาณรบกวน

2.1 ทฤษฎีสนาม [1]

การพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งลักษณะของ คลื่นใกล้ (near field) และคลื่นไกล (far field) นั้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมพีแดนซ์ของคลื่นกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 สามารถอธิบายความหมายของคลื่นใกล้และคลื่นไกล ได้ดังนี้คือ [2]

- จุดที่ $2\pi r/\lambda = 1$ หรือเมื่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น $r = \lambda/2\pi$ จะเป็นจุดที่แบ่งแยกระหว่างคลื่นใกล้และคลื่นไกล
- เมื่อคลื่นใดก็ตามอยู่ในสภาวะ $r \gg \lambda/2\pi$ จะเป็นคลื่นไกลนี้อิมพีแดนซ์ของคลื่น $Z_w = Z_0 = E/H = 377\Omega$ อาจเรียกว่า Radiation field หรือว่าคลื่นระนาบ (Plane wave)
- เมื่อคลื่นใดก็ตามอยู่ในสภาวะ $r \ll \lambda/2\pi$ จะเป็นคลื่นใกล้ หรือ Induction field จะแบ่งออกเป็น 2 แบบประกอบไปด้วย

แบบ Straight wire 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 หรือสนามอิมพีแดนซ์สูง (High impedance field)

แบบ Wire loop ซึ่งอยู่ในสภาวะเดียวกันกับข้อที่แล้ว เพียงแต่ในกรณีนี้ $Z_w \ll Z_0$ เนื่องจาก $\lambda/2\pi r \gg 1$ หรือมีอิมพีแดนซ์ของคลื่น $|Z_w| = |E/H| = Z_0 2\pi r/\lambda$ คลื่นที่อยู่ในเงื่อนไขนี้ก็คือสนามแม่เหล็ก หรือสนามอิมพีแดนซ์ต่ำ (Low impedance field)

สัญญาณรบกวนในหลักการของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นสัญญาณรบกวนทางสนามไฟฟ้า สัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก และสัญญาณรบกวนคลื่นระนาบ ($E + H$) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ พิจารณาที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ซึ่งมีระยะห่างจาก

แหล่งกำเนิดคลื่นน้อยกว่า 954,930 เมตร ($r < v/2\pi f$) โดยเป็นลักษณะของสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว

2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเกิดจากธรรมชาติ หรือมนุษย์สร้างขึ้น

2.2.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติแบ่งตามการเกิดได้แก่

- 1.) เกิดขึ้นบนพื้นโลก ได้แก่
 - ฟ้าผ่า ปรากฏการณ์นี้มีกระแสที่สูงมากทำให้เกิดพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP) ขึ้นในช่วงสั้นๆ เป็นคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงประเภทหนึ่ง
 - สนามแม่เหล็กโลก มีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วโลกเหนือไปขั้วโลกใต้
- 2.) เกิดขึ้นนอกโลก ได้แก่
 - สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีคอสมิก (cosmic) เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเช่น อินฟราเรด อุลตราไวโอเล็ต ฯลฯ แพร่ออกมาจากสุริยะจักรวาล และดวงอาทิตย์ เข้าสู่โลกในลักษณะของคลื่นระนาบ

2.2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น มีอยู่มากมาย แต่ที่สำคัญได้แก่

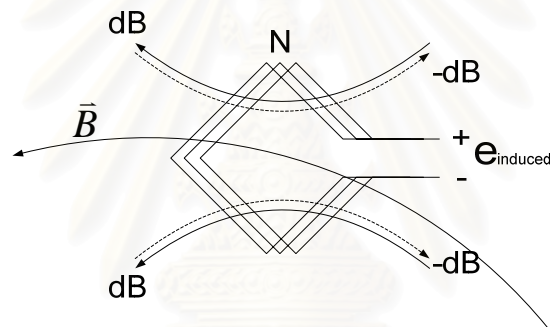
- 1.) สวิตชิงทรานเซียนต์ (switching transient) เป็นแรงดันและกระแสที่มีขนาดสูงผิดปกติ และมีความถี่สูงที่เกิดจากอุปกรณ์โดยกระบวนการสวิตชิงในระบบไฟฟ้ากำลัง สร้างพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันสูง แพร่ออกสู่อวกาศ
- 2.) สัญญาณสื่อสาร เช่น เรดาร์ ระบบโทรศัพท์และวิทยุ สามารถสร้างคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงออกไปรบกวนได้

3.) ระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เช่น สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หรือสายเคเบิลใต้ดิน เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กความถี่กำลัง 50 Hz

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อนำขดลวดที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับ A ตารางเมตร และจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบ มาวางในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในขดลวดในทิศทางตามกฎมือขวา และแรงดันที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้ง 2 ข้างของขดลวด [5] ก็คือแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดตามสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.3 รูปภาพแสดงเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ e คือ แรงดันเหนี่ยวนำ (Induced voltage; Volt: V)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (Number of Turns; Turns: N)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux; Webers: Wb)

จากสมการที่ 2.1 จะหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็ก และพื้นที่ตั้งฉาก คือ

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรือขนาดของสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) มีค่าเท่ากับ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก

(Magnetic flux) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตั้งได้ฉาก ฉะนั้น ค่าของขนาดสนามแม่เหล็กเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{B} = \frac{\phi}{A} \quad (2.2)$$

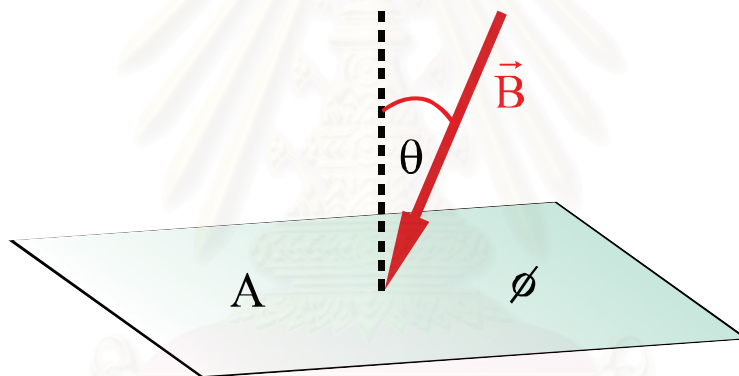
เมื่อ \vec{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density; Tesla: T)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux; Webers: Wb)

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (m^2)

จากสมการที่ (2.2) เมื่อ \vec{B} ตั้งฉากกับ A จะได้

$$\phi = \vec{B}A \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 รูปแสดงมุมระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กกับพื้นที่ตั้งฉาก แต่ถ้า \vec{B} ไม่ตั้งฉากกับ A การหาขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ ต้องแตก \vec{B} ให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับ A ดังรูปที่ 2.4 จะได้

$$\phi = BA \cos \theta \quad (2.4)$$

เราพบว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก \vec{B} ใน Free space มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity; \vec{H}) ตามสมการ

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.5)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ (Permeability of free space) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$

จากสมการ (2.1) และ (2.4) ดังนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับขดลวด ตามสมการ

$$e = 2\pi fNBA \cos \theta \quad (2.6)$$

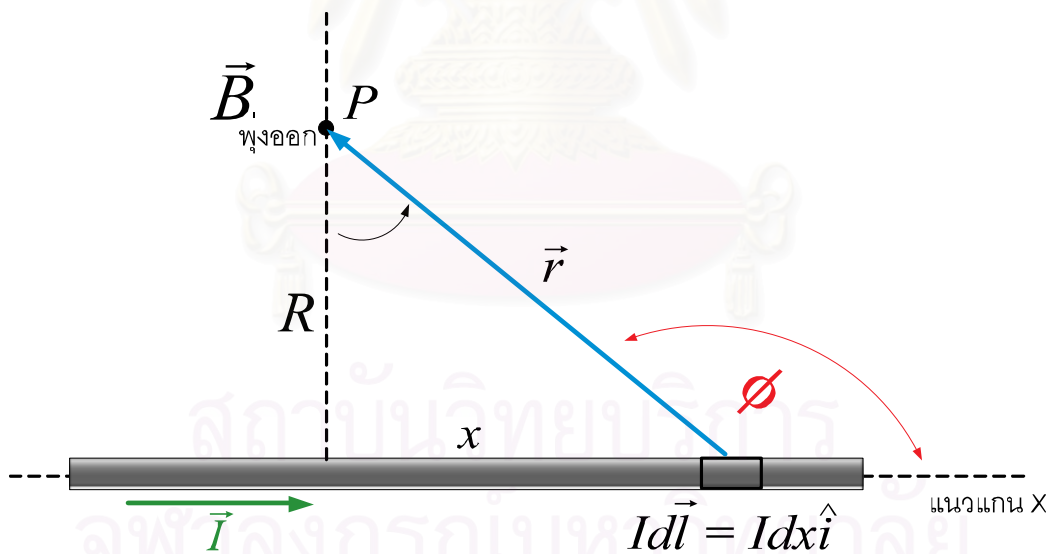
เมื่อ f คือ ความถี่ที่ใช้พิจารณา (frequency; Hertz: Hz)

2.3.2 กฎของบิโอต์-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law)

กฎของบิโอต์-ซาวาร์ต กล่าวว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กย่อย (Magnetic field intensity; dH) ซึ่งเกิดจากส่วนย่อยของกระแส (Idl) หรือส่วนย่อยของแหล่งกำเนิดจะแปรผันตรงกับผลคูณของ Idl กับ $\sin \alpha$ และแปรผกผันกับ R^2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [6]

$$d\vec{H} = \frac{Id\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2.7)$$

เราจะใช้กฎของบิโอต์-ซาวาร์ต ในการหาสนามแม่เหล็ก ณ จุด P เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดยาวตรงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุด P เนื่องจากเส้นทางการไหลของขั้วกระแส

$$Id\vec{l}$$

เลือกให้ทิศทางที่กระแสไหลตามเส้นลวดชี้ไปในแนวแกน x และให้จุด P เป็นจุดที่อยู่ห่างจากเส้นลวดในแนวตั้งฉากกับเส้นลวดเป็นระยะทาง R พิจารณาขั้วกระแส $Id\vec{l}$ ที่ห่างจากจุดกำเนิดไปตามแนวแกน x เป็นระยะทาง x ให้ \vec{r} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งที่ชี้จากขั้วกระแสนี้ไป

ยังจุด P ทิศของสนามแม่เหล็ก ณ จุด P อยู่ในทิศของ $I d\vec{l} \times \vec{r}$ ซึ่งมีทิศพุ่งตั้งฉากออกจากหน้ากระดาษตามกฎมือขวา ดังนั้นสนามแม่เหล็กเนื่องจากชิ้นกระแสในรูปมีขนาดเป็น

$$\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2} \sin \phi \\ dB &= \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2} \sin(90^\circ + \theta) \\ dB &= \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่เราเปลี่ยนไปใช้มุม θ แทนมุม ϕ สังเกตว่าการวัดมุม θ จากแนวแกนตั้งไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาให้เป็นทิศบวก ชิ้นกระแสที่อยู่ทางซ้ายมือของเส้นแนวตั้งที่ผ่านจุด P จะให้มุม θ ที่มีค่าเป็นลบ เพื่อที่จะอินทิเกรตหาสนามแม่เหล็กรวม เราต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่าง θ , r และ x เราจะเลือกเปลี่ยนตัวแปรให้เขียนอยู่ในรูปของมุม θ ได้เป็น

$$x = R \tan \theta, \quad r = R \sec \theta$$

ดังนั้น $dx = R \sec^2 \theta d\theta$
แทนค่าลงในสมการที่ (2.8)

$$\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0 I R \sec^2 \theta d\theta}{4\pi R^2 \sec^2 \theta} \cos \theta \\ dB &= \frac{\mu_0 I \cos \theta d\theta}{4\pi R} \end{aligned} \quad (2.9)$$

สนามแม่เหล็กเนื่องจากชิ้นกระแสทั้งหมดหาได้โดยการอินทิเกรตปริมาณข้างบน จาก $\theta = \theta_1$ ไปจนถึง $\theta = \theta_2$

$$\begin{aligned} B &= \int dB \\ B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta \\ B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (2.10)$$

กรณีกระแสในเส้นลวดตรงซึ่งมีความยาวกึ่งอนันต์ ค่าของมุม $\theta_1 = -90^\circ$ และมุม $\theta_2 = 0^\circ$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.10) จะได้

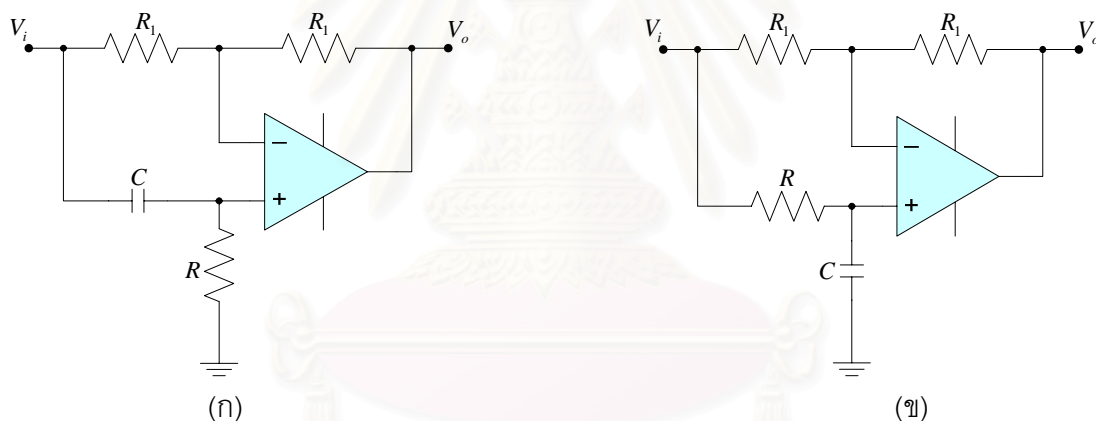
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \quad (2.11)$$

กรณีกระแสในเส้นลวดตรงยาวอนันต์ ค่าของมุม $\theta_1 = -90^\circ$ และค่าของมุม $\theta_2 = 90^\circ$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.10) จะได้

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (2.12)$$

2.3.3 วงจรเลื่อนเฟส

วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter) คือ วงจรที่สามารถปรับเฟสของสัญญาณไซน์อินพุต ให้สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสนำหน้าหรือล่าหลังสัญญาณอินพุตได้ตามต้องการ โดยวงจรเลื่อนเฟสนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ วงจรเลื่อนเฟสแบบล่าหลัง (Lagging Phase Shifter) และวงจรเลื่อนเฟสแบบนำหน้า (Leading Phase shifter)



รูปที่ 2.6 วงจรเลื่อนเฟสแบบนำหน้าและล่าหลังสัญญาณ ตามลำดับ

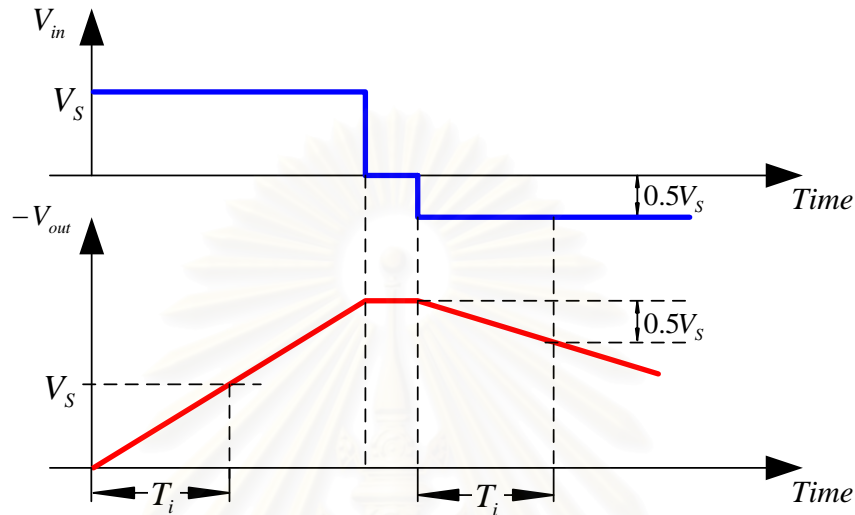
จากรูปที่ 2.6 วงจรเลื่อนเฟสแบบนำหน้าและล่าหลัง ทั้งสองวงจรมีเฟสที่สัญญาณเอาต์พุตที่สามารถปรับเฟสสัญญาณได้ให้นำหน้าหรือล่าหลังสัญญาณอินพุตในช่วง 0 ถึง 180° สามารถเขียนสมการมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ได้ดังสมการนี้

$$\theta = 2 \tan^{-1}(2\pi fRC) \quad (2.13)$$

เมื่อ θ คือ มุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต

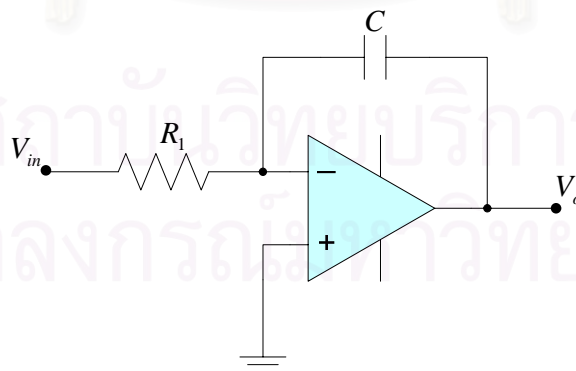
2.3.4 วงจรควบคุมแบบ I (I Controller Circuit Design) [7]

ระบบควบคุมแบบ I (Integral Controller) จะมีคุณสมบัติที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบการอินทิเกรชันของสัญญาณอินพุต ส่วนผลตอบสนองของระบบ แบบขั้นบันได (Step response) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ I

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มมีสัญญาณอินพุต ผลตอบสนองของเอาต์พุตจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากการอินทิเกรชัน และเมื่อสัญญาณเพิ่มสูงขึ้นถึงระดับอินพุต เราจะเรียกช่วงเวลาที่ใช้ว่าช่วงเวลาอินทิเกรชัน (Integration time) หรือ T_i สำหรับวงจรที่ใช้งานจะแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรของระบบควบคุมแบบ I

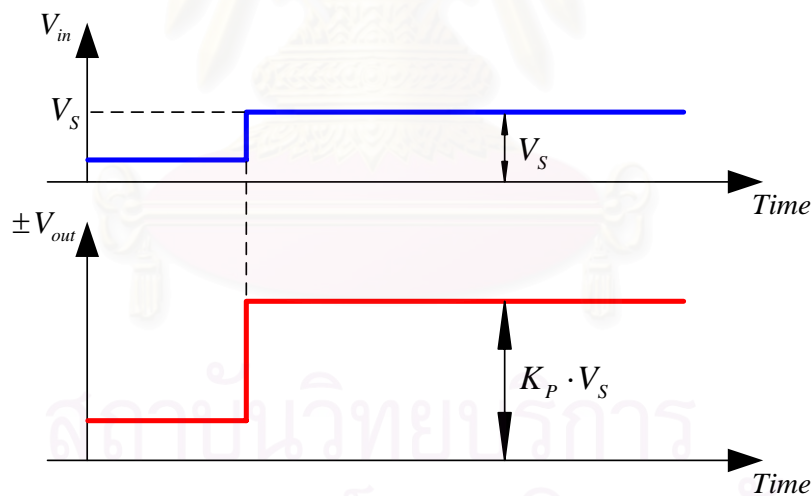
จากวงจรในรูปที่ 2.8 จะเป็นการต่อในลักษณะกลับเฟสสัญญาณ (Inverting Amplifier) โดย R_1 เป็น Element Input และมี C เป็น Feed Back Element วงจรจะต่อกลับกันกับวงจร Differentiator สมการของแรงดันขาออกจะเป็นไปตามสมการของการ Integrator สัญญาณแรงดันขาเข้า

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int V_{in} dt \quad (2.14)$$

จากระบบควบคุมแบบ I ตามวงจรในรูปที่ 2.8 สามารถหาแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ 2.14 ปกติคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบ I นี้ จะนำไปใช้ต่อร่วมกับระบบควบคุมแบบ P ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.3.5 วงจรควบคุมแบบ P (P Controller Circuit Design)

ระบบควบคุมแบบ P (Proportional Controller) โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติใช้สำหรับขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อเป็นการเพิ่มหรือลดอัตราขยายหรือเป็นตัวกำหนดเกนให้กับระบบควบคุม



รูปที่ 2.9 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ P

สำหรับรูปผลตอบสนองของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจะมีลักษณะเหมือนสัญญาณอินพุตแต่มีขนาดแรงดันแตกต่างกันเนื่องจากผลจากอัตราการขยาย ซึ่งสามารถเขียนสมการเอาต์พุตได้เป็น

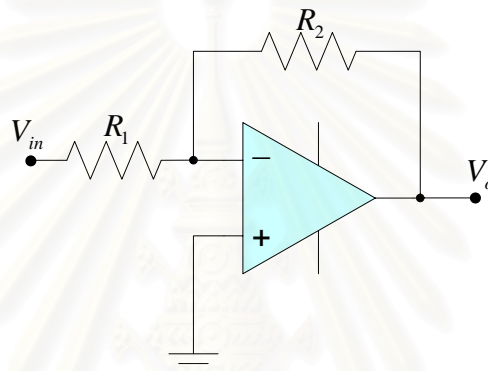
$$V_o = K_p V_{in} \quad (2.15)$$

เมื่อ	V_o	=	แรงดันเอาต์พุต (Output Voltage)
	V_{in}	=	แรงดันอินพุต (Input Voltage)
	K_p	=	อัตราขยายแบบ P (Proportional Controller)

ส่วนวงจรที่สามารถสร้างอัตราขยายได้ เราจะใช้ออปแอมป์ โดยจะขอกว่าถึงวงจร 2 แบบด้วยกัน คือ

2.3.5.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบกลับเฟสสัญญาณสามารถแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะให้สัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา หรือให้เฟสตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.10 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

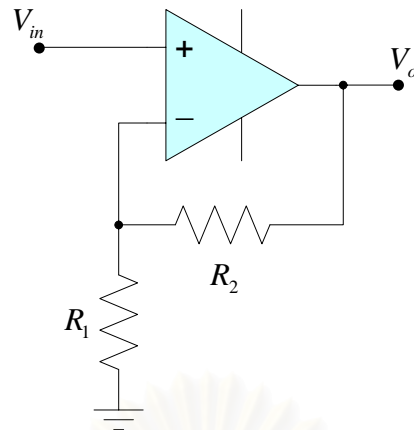
สำหรับสมการของวงจร จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.16 ซึ่งจัดเป็นสมการมาตรฐานของวงจรขยายแบบกลับเฟสทั่วไป

$$V_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)V_{in} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตจะถูกขยายสัญญาณจากค่าอัตราส่วนของความต้านทานระหว่าง R_2 และ R_1 สำหรับเครื่องหมายลบแสดงว่าสัญญาณเอาต์พุตมีการกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต

2.3.5.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีการทำงานที่ให้สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสเหมือนกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.11 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

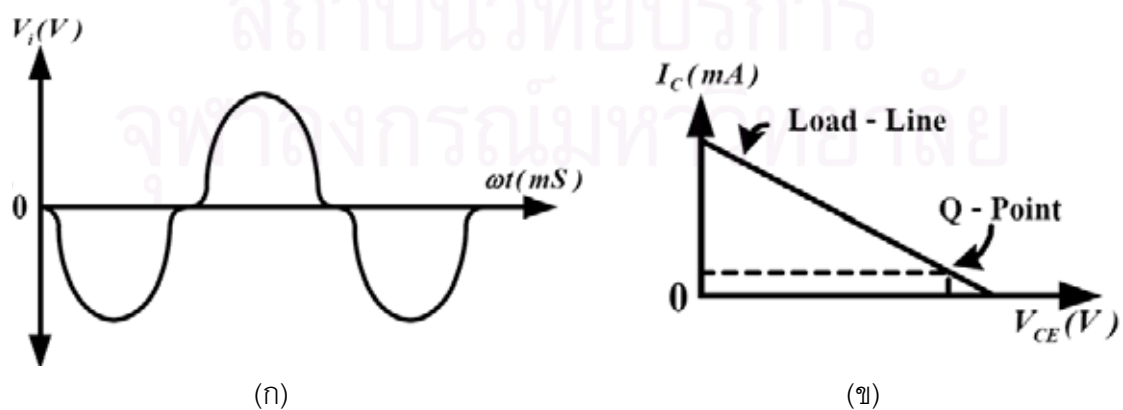
สำหรับสมการของอัตราขยายของวงจรซึ่งจัดเป็นสมการมาตรฐานของวงจรเช่นเดียวกัน จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.17

$$V_o = \left(\frac{1 + R_2}{R_1} \right) V_{in} \quad (2.17)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.17 จะเห็นว่าค่าอัตราขยายที่ต่ำที่สุด จะมีค่าเป็น 1 หรือ เมื่อ R_2 มีค่าน้อยกว่า R_1 มากๆ

2.3.6 วงจรขยายคลาสเอบี (Class AB Power Amplifier Circuit) [8]

การไบอัสให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวนำกระแสเพียงเล็กน้อยเมื่อไม่มีสัญญาณเข้า ดังรูปที่ 2.12 ทำให้สัญญาณออกจะไม่มีค่าเพี้ยน เรียกวงจรขยายชนิดนี้ว่าคลาสเอบี (Class AB) เพราะมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์มากกว่า 180°

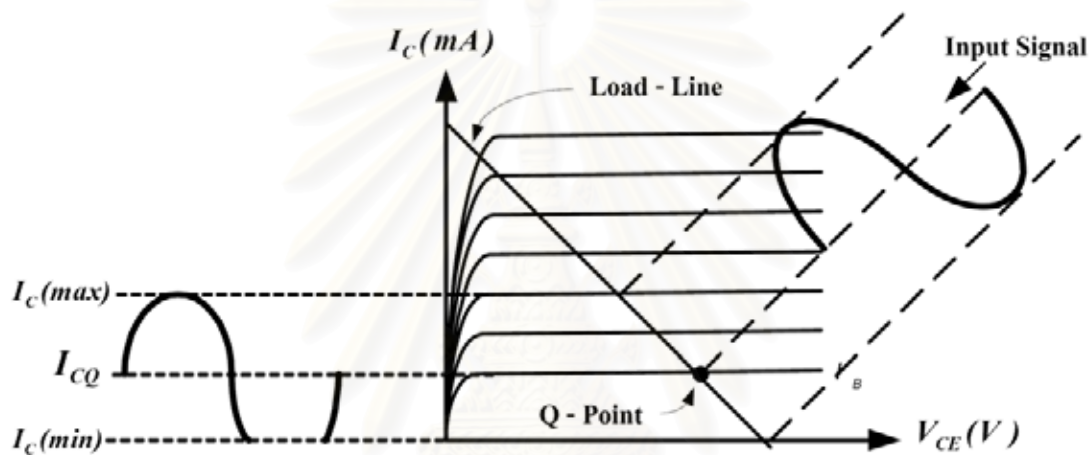


รูปที่ 2.12 การบิดเพี้ยนครอสโอเวอร์ (ก), การไบอัสด้วยค่าต่ำ (ข)

การกำจัดการบิดเพี้ยนครอสโอเวอร์ จะต้องไบอัสตรงด้วยค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งที่มีอิมิตเตอร์ไดโอดแต่ละตัว นั่นคือ จุด Q จะอยู่เหนือจุดคัทออฟไปบนเส้นโหลดไฟสลับเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.13 กระแส I_{CQ} มีค่าประมาณ 1- 5 เปอร์เซ็นต์ ของ $I_{C(sat)}$ ก็เพียงพอที่จะกำจัดการบิดเพี้ยนครอสโอเวอร์และเนื่องจาก I_{CQ} มีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ใช้ในการไบอัส ซึ่งค่าของ I_{CQ} ในรูปที่ 2.12 ควรเป็น

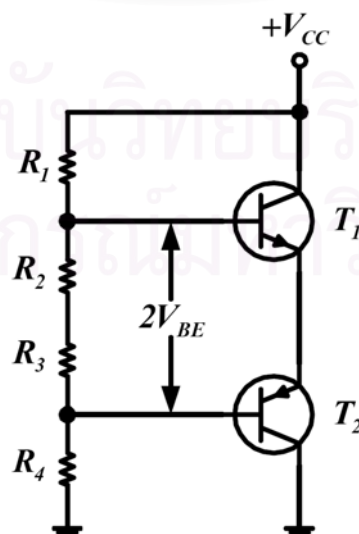
$$I_{CQ} = \frac{(V_{CC} - 2V_{BE})}{2R} \quad (2.18)$$

การไบอัสเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตสมบูรณ์โดยไม่มีการบิดเพี้ยนครอสโอเวอร์แบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่



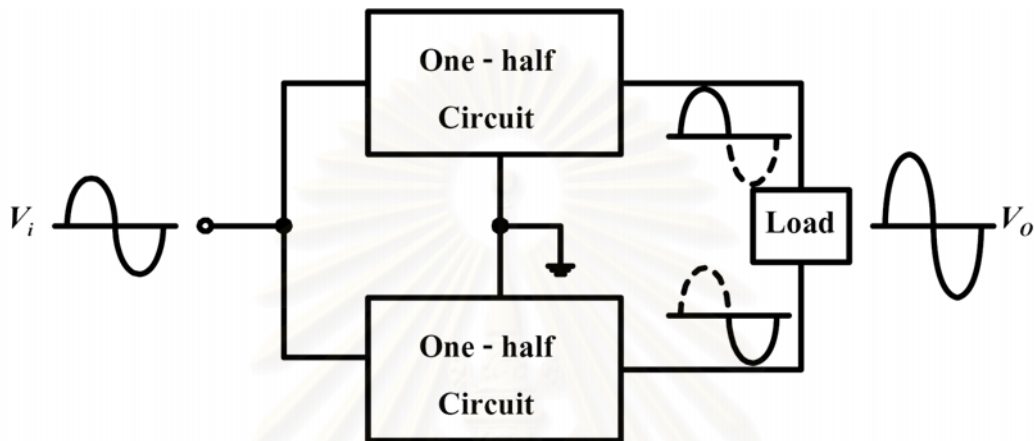
รูปที่ 2.13 แสดงจุด Q-POINT ของวงจรขยายคลาสเอบี

2.3.6.1 การไบอัสด้วยการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider Bias)



รูปที่ 2.14 การไบอัสด้วยวงจรแบ่งแรงดัน

รูปที่ 2.14 แสดงการไบอัสด้วยการแบ่งแรงดันในวงจรขยายคลาส บี อิมิตเตอร์โฟลโลเวอร์ ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะเป็นตัวช่วยกันทำให้รูปสัญญาณ สมบูรณ์ ซึ่งต้องมีเส้นโค้งทรานคอนคักแดนซ์อัตราสูงสุด และอื่นๆ ที่เหมือนกันทั้ง 2 ตัว เรียกว่าทั้งสองช่วยกันทำให้สมบูรณ์ (Complementary) ตามรูปที่ 2.15 ตัว แรกเป็น NPN ตัวหลังเป็น PNP



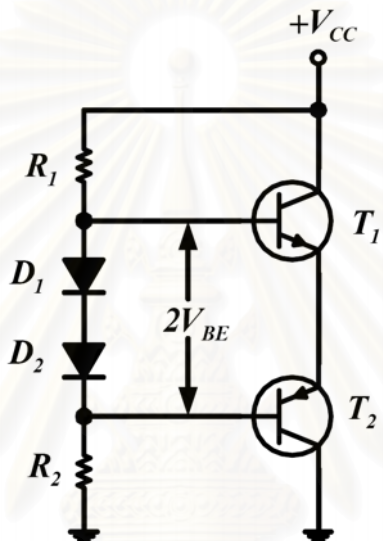
รูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานอย่างง่าย ของวงจรคลาสบี

จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 2.14 ว่า กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ I_C และอิมิตเตอร์ I_E มีทิศทางเดียวกันในทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว เนื่องจากต่อกันอย่างอนุกรม กระแส I_C ทั้งสองจึงเท่ากัน และแรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวเป็น ครึ่งหนึ่งของแรงดันที่จ่ายให้ V_{CC}

การไบอัสแบ่งแรงดัน รูปที่ 2.14 เป็นวิธีที่ไม่ดี การไบอัสวงจรรขยายคลาส บี พุช-พูลในทางปฏิบัติจะต้องป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอยต่อ ซึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นศักย์ไฟฟ้าขวางกั้น (Barrier Potential) ของไดโอดอิมิตเตอร์จะ ลดลง 2.5mV ทุก ๆ 10 องศาของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นแรงดันคร่อม R_2 ที่คงที่ สำหรับไบอัสไดโอดอิมิตเตอร์ก็จะมีค่ามากขึ้นไป และกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ก็ จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิรอยต่อสูงขึ้น

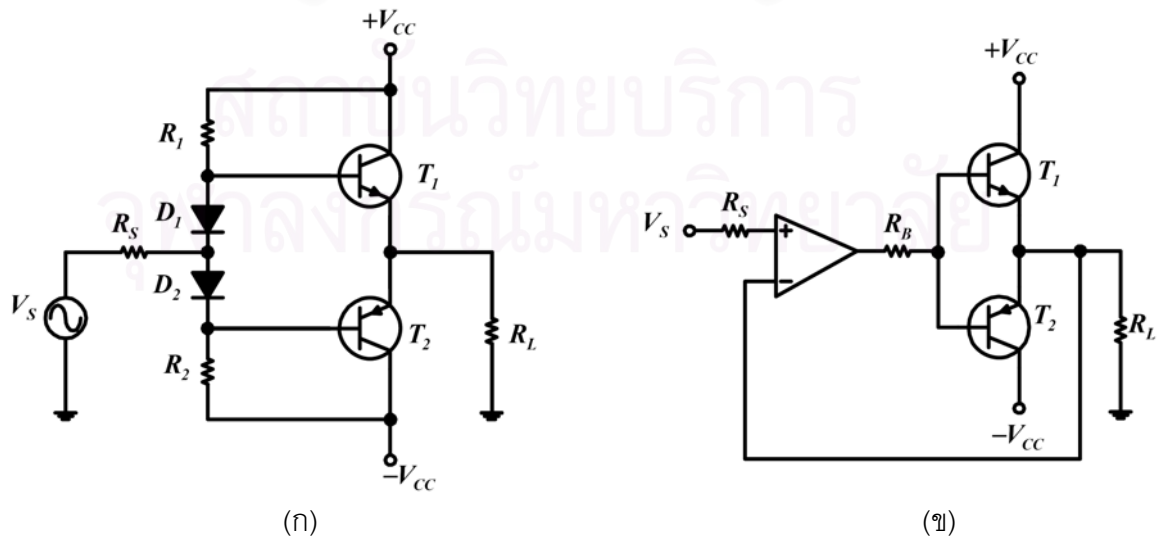
2.3.6.2 การไบอัสแบบสะท้อนกระแส (Current Mirror Bias)

รูปที่ 2.16 แสดงการไบอัสแบบสะท้อนกระแส ซึ่งเป็นการไบอัสที่ใช้ในวงจรขยายคลาสิกบีพูช-พูล ทρανซิสเตอร์ทั้งสองตัวช่วยกันทำให้สมบรูณ์ (Complementary) และเส้นโค้งของลักษณะสมบัติของ ไดโอดชดเชยที่ตำแหน่งแทนที่ความต้านทาน (Compensating Diodes) จะต้องตรงกันกับเส้นโค้งทρανคอนดัคแตนซ์ของทρανซิสเตอร์ ดังนั้น ซีกบนของวงจรจะเป็นแบบ NPN และซีกล่างเป็นแบบ PNP สังเกตได้ว่ากระแส I_C ของทρανซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับกระแสไหลผ่านตัวต้านทานที่ใช้ไบอัส



รูปที่ 2.16 การไบอัสแบบสะท้อนกลับ

การไบอัสแบบนี้นิยมมากเนื่องจากไดโอดชดเชยและอิมิตเตอร์ไดโอดถูกสร้างขึ้นบนแผ่นชิพเดียวกัน จึงมีลักษณะสมบัติแทบจะเหมือนกันทุกประการ



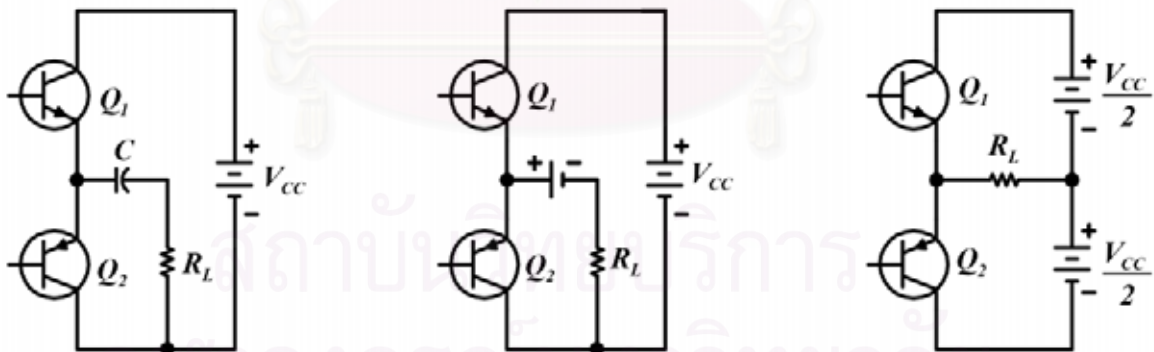
รูปที่ 2.17 วิธีแก้ความผิดเพี้ยนที่ช่วงต่อ โดยการเพิ่มไบอัส (ก), โดยการป้อนกลับแบบลบ (ข)

วงจรในรูปที่ 2.17 (ก) เป็นวงจรแบบสมมาตรเชิงคู่ประกอบ มีการไบอัสโดยใช้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด 2 ตัว ไบอัสระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของ T_1 และ T_2 ให้นำกระแสเล็กน้อยขณะไม่มีสัญญาณเข้า ดังนั้นสัญญาณจาก V_S จะทำให้ T_1 และ T_2 นำกระแสได้ทันทีดังแสดงในรูปที่ 2.12 วงจรในรูปที่ 2.17 (ข) อาศัยอัตราขยายของออปแอมป์ ซึ่งมีค่าสูงมากและการป้อนกลับแบบลบ ดังนั้นเมื่อ V_S เริ่มแปรจากค่าศูนย์ ออปแอมป์จะให้แรงดันด้านออกขนาดใหญ่มากเท่ากับ A_{VS} โดยที่ A_{VS} คืออัตราขยายวงรอบเปิด (Open Loop) ของออปแอมป์ เนื่องจากว่าออปแอมป์ทำงานในสภาพวงรอบเปิดแรงดันด้านออกจากออปแอมป์จะเพียงพอที่จะขับ T_1 และ T_2 นำกระแสโดยทันที จากนั้นแรงดันด้านออกจะถูกป้อนกลับเข้ามายังขาเข้าด้านกลับของออปแอมป์ซึ่งเป็นการป้อนกลับแบบลบลดแรงดันด้านออกลงให้อัตราขยายวงรอบปิดมีค่าเท่ากับหนึ่ง

การต่อวงจรพุช-พูลเพื่อแยกการทำงานแต่ละครึ่งครึ่งคาบสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบได้แก่

2.3.6.3 วงจรพุช-พูลแบบด้านเดียว (Single Ended Push Pull)

ตามรูปที่ 2.18 วงจรพุช-พูลแบบด้านเดียวจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์สองตัวต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรและต่อขนานกับโหลด



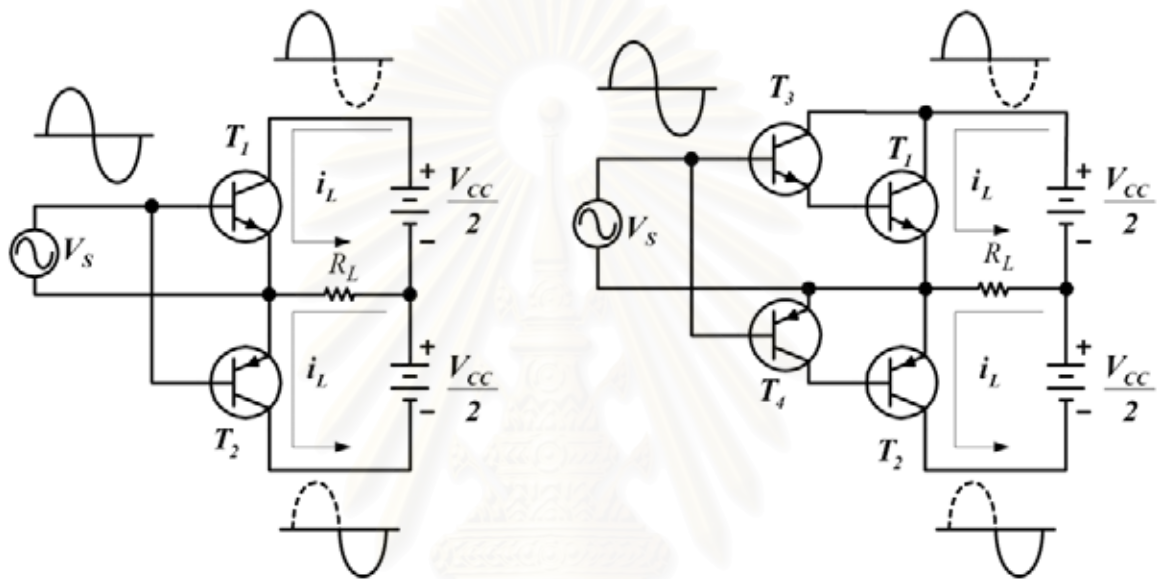
รูปที่ 2.18 วงจรพุช-พูลดัดแปลงโดย ใส่ตัวเก็บประจุ (ก), วงจรเสมือนของรูป (ข), ลักษณะการทำงาน (ค)

รูปที่ 2.18 เป็นการใส่ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมากๆ ใส่ไว้ตัว C จะทำตัวเสมือนแบตเตอรี่ขนาด $\frac{V_{CC}}{2}$ โวลต์ ซึ่งเขียนวงจรเสมือนได้ดังรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งมีการทำงาน ดังรูปที่ 2.18 (ค) แต่เนื่องจากการใส่ตัวเก็บประจุ C จะมีผลไปจำกัดทางด้านความถี่ต่ำ และทำให้เกิดแรงดันกระชากขึ้นเมื่อเปิดไฟจ่ายให้วงจร

ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วมักจะ ไม่ใช้ตัวเก็บประจุ C ซึ่งวงจรนี้เรียกว่าวงจรที่ไม่ใช้ตัวเก็บประจุด้านสัญญาณออกหรือ OCL (Output Capacitor Less)

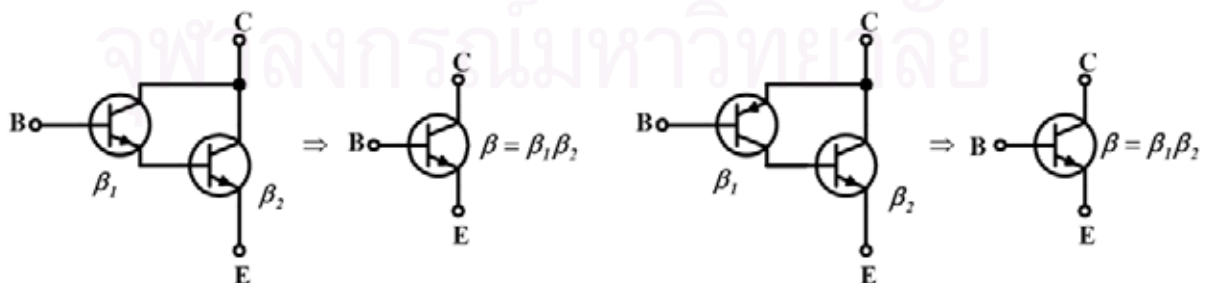
2.3.6.4 วงจรพหุ-พูลด้านเดียวแบบคอมพลิเมนต์ารี (Complementary Type SEPP Circuit)

จากการใช้วิธีนี้จะใช้สัญญาณป้อนเข้าที่จุดสัญญาณเข้าเพียงสัญญาณเดียว ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรพหุพูลด้านเดียวแบบคอมพลิเมนต์ารีแบบ วงจรอย่างง่าย (ก), แบบคาร์ลิงตัน (ข)

จากรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวที่สร้างง่ายที่สุดในการใช้กับโหลดที่ค่าต่ำๆ เมื่อต้องการวงจรมายาวที่ให้อัตราขยายสูงจะเปลี่ยนมาใช้วงจรในรูปที่ 2.19 (ข) ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว การประกอบกันของทรานซิสเตอร์ T_1 และ T_2 กับ T_3 และ T_4 ในรูปที่ 2.19 (ข) จะทำหน้าที่เสมือนทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การนำทรานซิสเตอร์สองตัวมาประกอบกันแบบคาร์ลิงตัน (ก), แบบคอมพลิเมนต์ารี (ข)

2.4 การป้องกันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน

การป้องกันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสามารถทำได้โดย

1. กำจัดแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสำหรับจอภาพคอมพิวเตอร์ เช่น การพิจารณาปรับแต่งตัวแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไม่ให้แพร่สัญญาณรบกวนออกมา
2. เพิ่มขีดความสามารถของอุปกรณ์ในการรับสัญญาณรบกวน เช่น จอภาพ LCD
3. พยายามลดหรือกำจัดช่องเชื่อมโยงที่ ได้แก่ การกำบัง

คลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นสัญญาณรบกวนประเภทหนึ่งได้โดยจัดเป็นสัญญาณสนามแม่เหล็กที่มีความถี่ 50 Hz กระแสที่ไหลในขดลวดหม้อแปลง หรือสายตัวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กนี้เองจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ๆ ได้รับผลกระทบ เช่น อุปกรณ์วีดิโออิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด ภาพที่จอภาพของคอมพิวเตอร์มีอาการสั่น ซึ่งแนวทางขั้นต่ำที่กล่าวมาทั้ง 3 ข้อเป็นแนวทางการป้องกันหรือลดทอนสนามแม่เหล็กได้ เพียงแต่แนวทางที่ 1 และ 2 นั้นบางทีไม่สามารถกระทำได้หรือไม่สะดวกในการทำ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แนวทางที่ 3 ได้แก่ การกำบังมาพิจารณาในการป้องกันสัญญาณรบกวน

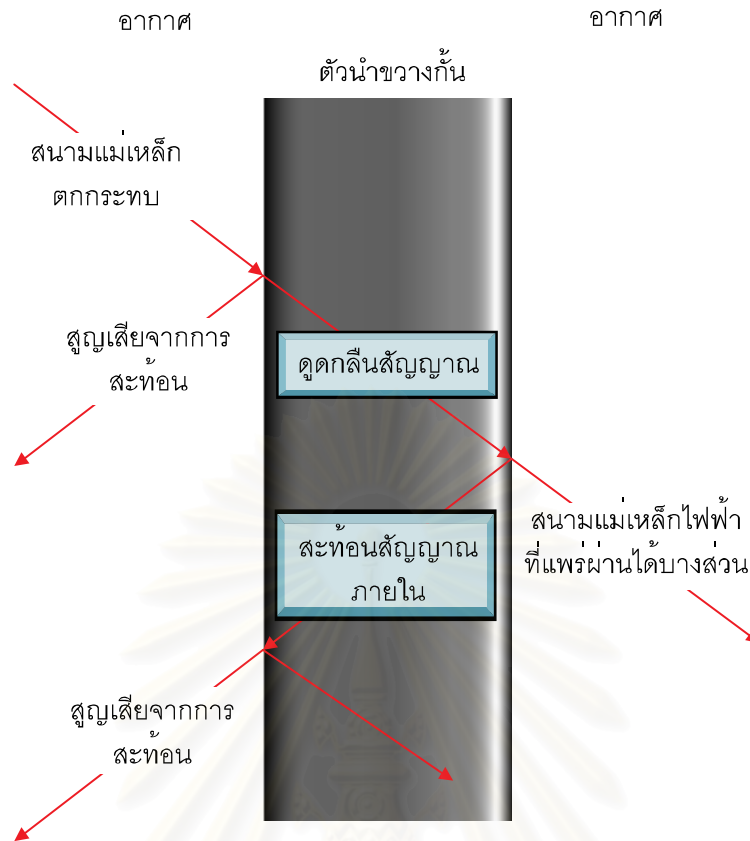
2.5 การกำบัง

เป็นการปิดกั้นเพื่อลดทอนหรือป้องกันการเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กที่ไม่พึงปรารถนา เข้ามายังเหยื่อของสัญญาณรบกวน โดยที่การกำบังนี้จะแบ่งออกเป็นสองวิธีได้แก่

2.5.1 การกำบังแบบแพสซีฟ (passive shielding) [9,10]

เป็นการกำบังที่ใช้วัสดุที่เหมาะสม มาวางกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวรับสัญญาณ เพื่อจำกัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สูญเสียไปกับวัสดุกำบังนี้ ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ดีขึ้นจากรูปที่ 2.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะกำบังต่อสัญญาณรบกวน

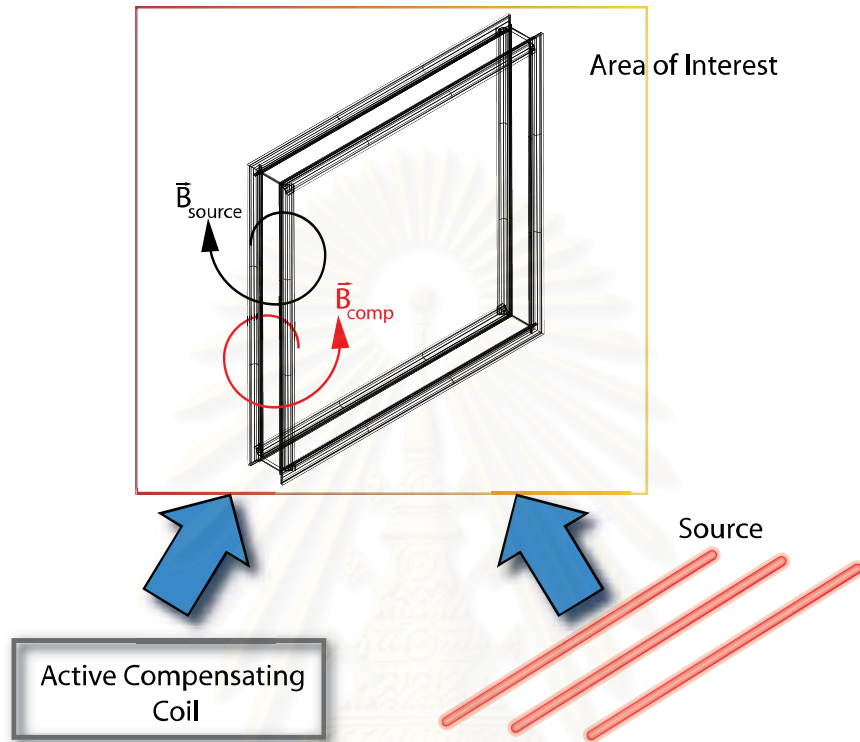
โดยมีหลักการลดทอนสนามแม่เหล็กที่อาศัยการดูดกลืนและการสะท้อนคลื่นดังต่อไปนี้

- การสูญเสียจากการดูดกลืน
สนามแม่เหล็กที่แพร่ผ่านโลหะกำบังจะมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานให้กับค่าความต้านทานโลหะ ด้วยสาเหตุนี้สนามแม่เหล็กจึงมีความเข้มลดลง ตามความหนาของโลหะกำบังและความลึกของผิว (skin depth) ของโลหะ
- การสูญเสียจากการสะท้อนคลื่น
การสูญเสียจากการสะท้อนคลื่นเกิดขึ้นได้เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สนามแม่เหล็กแพร่ผ่านมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเกิดได้ที่รอยต่อของโลหะกำบังกับอากาศเพราะเป็นจุดที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสองตัวกลางต่างกัน

2.5.2. การกำบังแบบแอ็กทีฟ (active shielding) [11]

เป็นการกำบังที่ใช้กระแสในขดลวดเพื่อผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเพื่อทำการชดเชยให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดลง

กระแสไฟฟ้าวน (eddy current) บนแผ่นตัวนำหรือขดลวดตัวนำ ผลที่ได้จะออกมาว่าสนามมีการชดเชยกับแหล่งกำเนิดดังรูปที่ 2.22 ซึ่งแสดงหลักการของการชดเชยแบบแอ็กทิฟ โดยมีหลักการที่จะพยายามหักล้างหรือลดทอนสนามจาก แหล่งกำเนิดแห่งหนึ่งโดยจ่ายสนามออกไปอีกแหล่งหนึ่ง โดยใช้ขดลวดและวงจรควบคุมเพื่อใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 2.22 หลักการของการชดเชยแบบแอ็กทิฟ

เนื่องจากว่าปัญหาสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีสาเหตุมาจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการป้องกันคลื่นรบกวนในที่นี้ ก็จะเป็นการปิดกั้นสนามแม่เหล็ก เป็นการลดทอนหรือป้องกันการเชื่อมโยงของสนามแม่เหล็กที่ไม่พึงปรารถนาเข้ามายังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีสิ่งที่จะบ่งบอกถึงความสามารถในการกำบังก็คือค่าประสิทธิผลของการกำบัง

2.6 ประสิทธิภาพของการกำบัง (Shielding effectiveness)

ประสิทธิภาพของการกำบัง จะกำหนดโดยอัตราส่วนการลดทอนสนามแม่เหล็ก ขณะที่มีการสนามแม่เหล็กแพร่ออกจากแหล่งกำเนิด จะทำการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดหนึ่งก่อนโดยยังไม่มีวัตถุกำบังมาคั่นวางในบริเวณนั้น หลังจากนั้นให้ติดตั้งวัตถุกำบังระหว่างแหล่งกำเนิดกับจุดสังเกต และทำการวัดสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SE = \frac{\vec{H}_{unshielded}}{\vec{H}_{shielded}} \quad (2.19)$$

หรือ
$$SE_{dB} = 20 \log \left[\frac{\vec{H}_{unshielded}}{\vec{H}_{shielded}} \right] \quad (2.20)$$

เมื่อ $\vec{H}_{unshielded}$ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กก่อนกำบัง
 $\vec{H}_{shielded}$ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กหลังกำบัง

การกำบังสนามแม่เหล็กแบบแพสซีฟ จะอาศัยหลักการลดทอนสนามแม่เหล็กเมื่อแพร่ผ่านผนังโลหะกำบัง คือ การสะท้อนสัญญาณ (reflection) และการดูดกลืนสัญญาณ (absorption) ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในรูปที่ 2.21 สำหรับแผ่นโลหะกำบังที่ทราบความหนาแน่นอน ประสิทธิภาพของการกำบังสามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + RR_{dB} \quad (2.21)$$

เมื่อ ตัวแปร 3 ตัว ได้แก่

- A_{dB} คือ การสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ (absorption loss)
- R_{dB} คือ ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนสัญญาณ (reflection loss)
- RR_{dB} คือ ตัวแปรของการสะท้อนไปมา (re-reflection correction)

โดยที่ตัวแปรทั้ง 3 ตัวนี้ สามารถหาได้ ดังต่อไปนี้

- 1) การสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณ (absorption loss)

เป็นการสูญเสียเนื่องจากสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านโลหะกำบังทางเดิน ทำให้สัญญาณที่ผ่านออกไปมีพลังงานลดลง พลังงานสูญเสียจากการดูดกลืนสัญญาณคำนวณได้จากสมการที่ (2.22)

$$A_{dB} = 131.4 t_{mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \quad dB \quad (2.22)$$

- เมื่อ t_{mm} คือ ความหนาของแผ่นโลหะกำบังในหน่วยมิลลิเมตร
 f_{MHz} คือ ความถี่ของสัญญาณรบกวนในหน่วยเมกะเฮิรตซ์
 μ_r คือ ความซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability)
 σ_r คือ สภาพนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative permittivity)

2) การสูญเสียจากการสะท้อนสัญญาณ (reflection loss)

เป็นการสูญเสียพลังงานสัญญาณเนื่องจากการสะท้อนของสัญญาณเมื่อมีโลหะกำบังทางเดินสัญญาณนั้น ซึ่งถ้าโลหะกำบังนั้นสามารถสะท้อนได้มาก แสดงว่าโลหะนั้นลดพลังงานสัญญาณด้วยการสะท้อนได้ดี ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนสัญญาณแสดงได้ดังสมการที่ (2.23)

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{(1+k)^2}{4k} \right| \quad dB \quad (2.23)$$

โดยค่า k พิจารณาดังนี้

สนามไฟฟ้า (High impedance field)

$$k = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0} \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \quad (2.24)$$

สนามแม่เหล็ก (Low impedance field)

$$k = \frac{r}{\sqrt{2\pi f \sigma \mu_0 / \mu_r}} \quad (2.25)$$

คลื่นระนาบ (Plane wave)

$$k = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \mu_r \epsilon_0 / \sigma}} \quad (2.26)$$

3) ตัวแปรของการสะท้อนไปมา (re-reflection correction)

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-0.23 A_{dB}(1+j)} \right| \quad (2.27)$$

ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพของการกำบังแบบแอ็กทิฟและประสิทธิภาพของการกำบังแบบแพสซีฟ หาได้จากการวัดค่าจากการทดลองจริงแทนตามสมการที่ (2.20)

ในวิทยานิพนธ์ที่ทำนี้จะเสนอการลดผลของสนามแม่เหล็กที่รบกวนที่ผ่านมาจากอากาศซึ่งเรียกว่าการกำบังแบบการชดเชย (Compensation Shielding) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการลดผลของสนามแม่เหล็กแบบใหม่ที่น่าสนใจ และสามารถไปใช้ให้กับการป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชย แอมแปร์โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

บทนี้ จะกล่าวถึงการจำลองระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาแนวทางเริ่มต้นในการออกแบบ จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการงานและการออกแบบระบบกำลังแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมแปร์จริงเพื่อประเมินหาขนาดและทิศทางโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กชดเชยให้ค่าสนามแม่เหล็กรวมน้อยลง โดยจะใช้ความรู้ทางทฤษฎีจากบทที่ 2 ในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆของระบบ ส่วนการทดสอบ ผลการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

3.1 การจำลองระบบเพื่อใช้ในการคำนวณในโปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรมสำเร็จรูปที่เลือกใช้คือโปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์อีลิเมนต์ FEMLAB ใช้สมการที่ 3.1 เป็นสมการเริ่มต้นที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นสมการที่สอดคล้องกับสมการแมกซ์เวลล์ [12]

$$j\omega\sigma\vec{A} + \nabla \times \left(\frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu} \right) = \vec{J}_s \quad (3.1)$$

ในที่นี้ ω คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency)

μ คือ ความซึมซาบได้ (permeability)

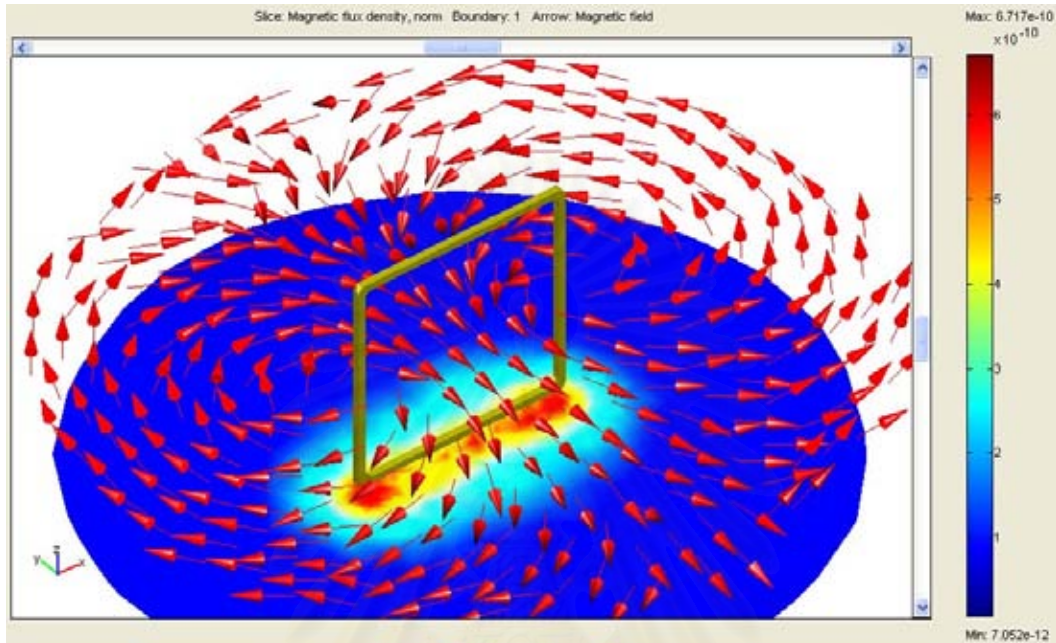
σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)

\vec{J}_s คือ ความหนาแน่นกระแส (current density) ของแหล่งกำเนิด

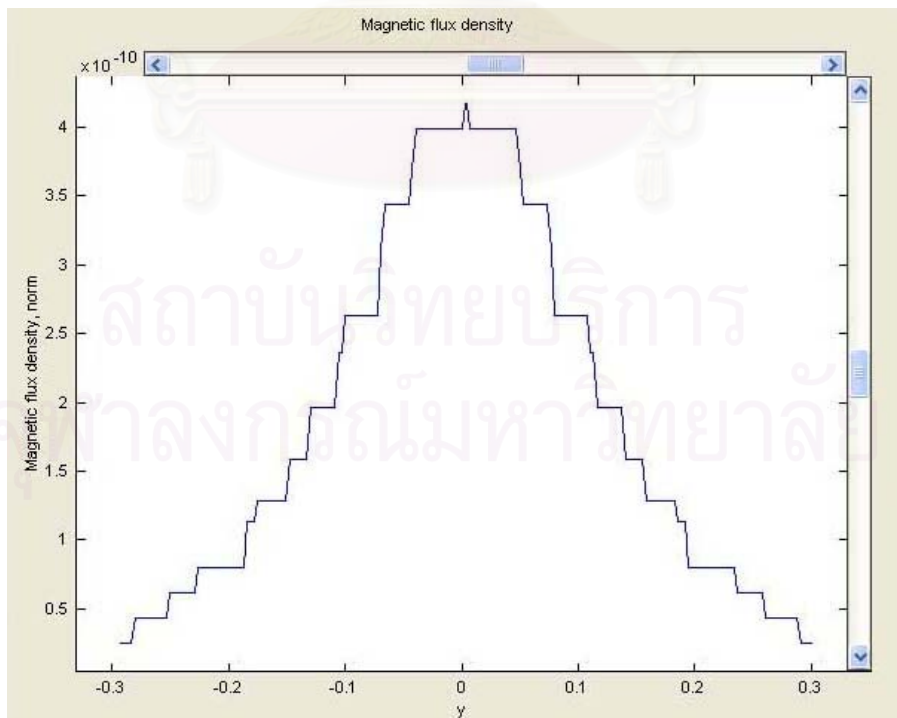
การจำลองระบบนี้จะไม่พิจารณาสนามแม่เหล็กของโลก เนื่องจากมีค่าต่ำมากและเพื่อจะหลีกเลี่ยงสภาวะ numerical instability จึงกำหนดให้สภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 S/m ทุกที่ ความหนาแน่นของกระแสเท่ากับศูนย์ยกเว้นในขดลวด ให้ความหนาแน่นกระแส AC เท่ากับ 1 A/m² (ค่าสูงสุด) ทำให้กระแสในขดลวดเท่ากับ 0.1 mA ความถี่เท่ากับ 50 Hz และ แต่งตัวนำขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 mm² โดยเริ่มการจำลองระบบเป็นสองกรณีเป็นแนวทางการศึกษาและเลือกรูปแบบในการตัดสินใจเลือกใช้

3.1.1 การจำลองระบบขดลวดตัวนำเดี่ยว

ออกแบบให้ขดลวดตัวนำเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30 X 30 ตารางเซนติเมตร ทำการจำลองระบบได้ลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กขดลวดตัวนำเดี่ยว



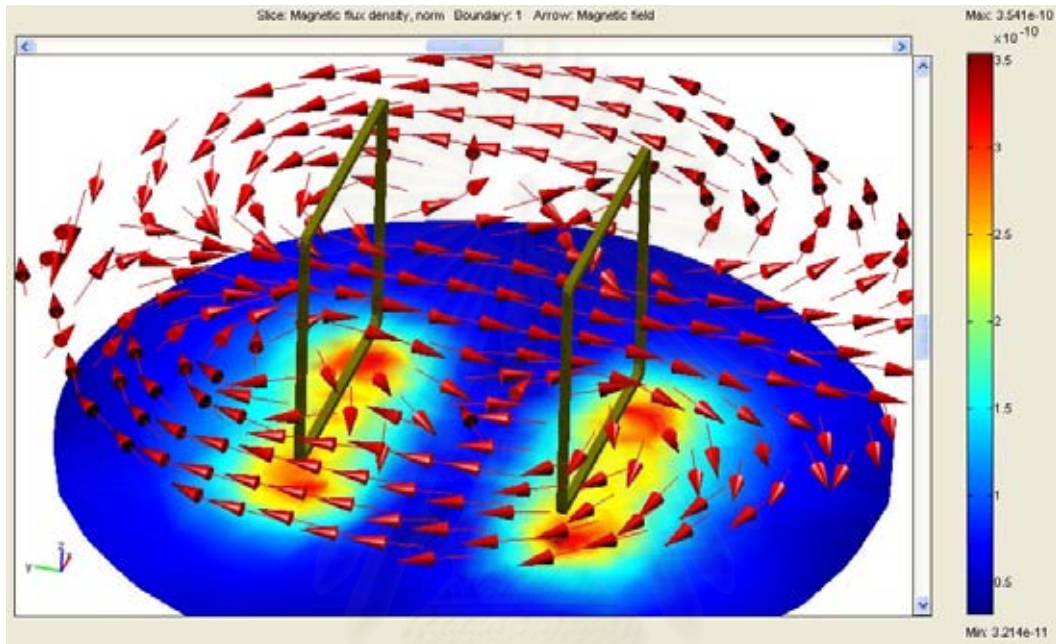
รูปที่ 3.2 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดตัวนำเดี่ยว

3.1.2 การจำลองระบบขดลวดตัวนำ 2 ตัวขนานกัน

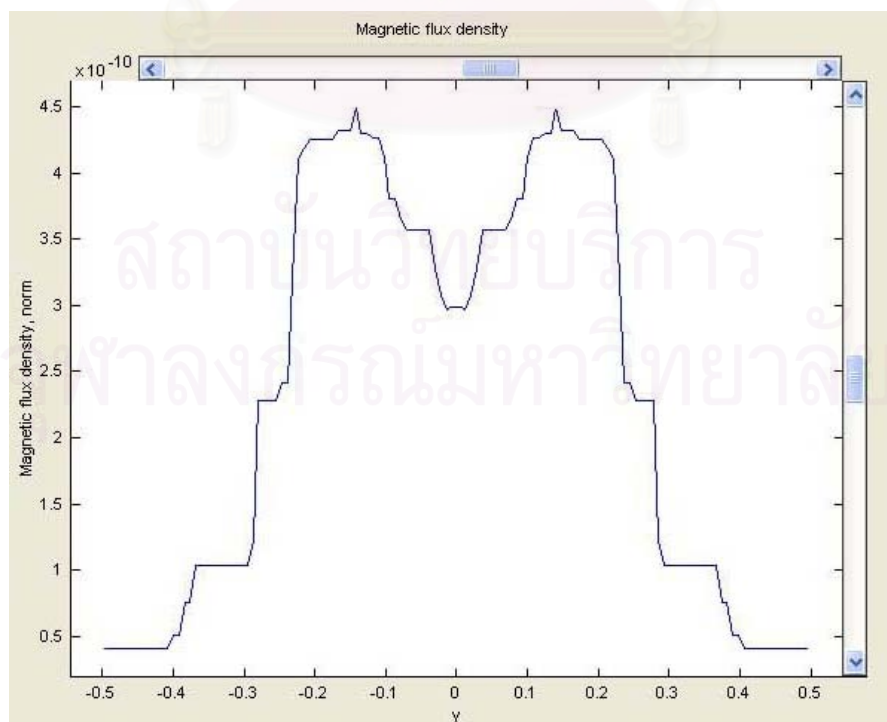
การจำลองระบบขดลวดตัวนำ 2 ตัวขนานกันแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

3.1.2.1 แบบกระแสเฟสเดียวกัน

ออกแบบเหมือนกับการจำลองระบบขดลวดตัวนำเดี่ยวเพียงแต่นำขดลวด 2 ตัวมาวางขนานกันตามแนวแกน y ห่างกัน 30 เซนติเมตร แล้วทำการจำลองระบบได้ลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.3



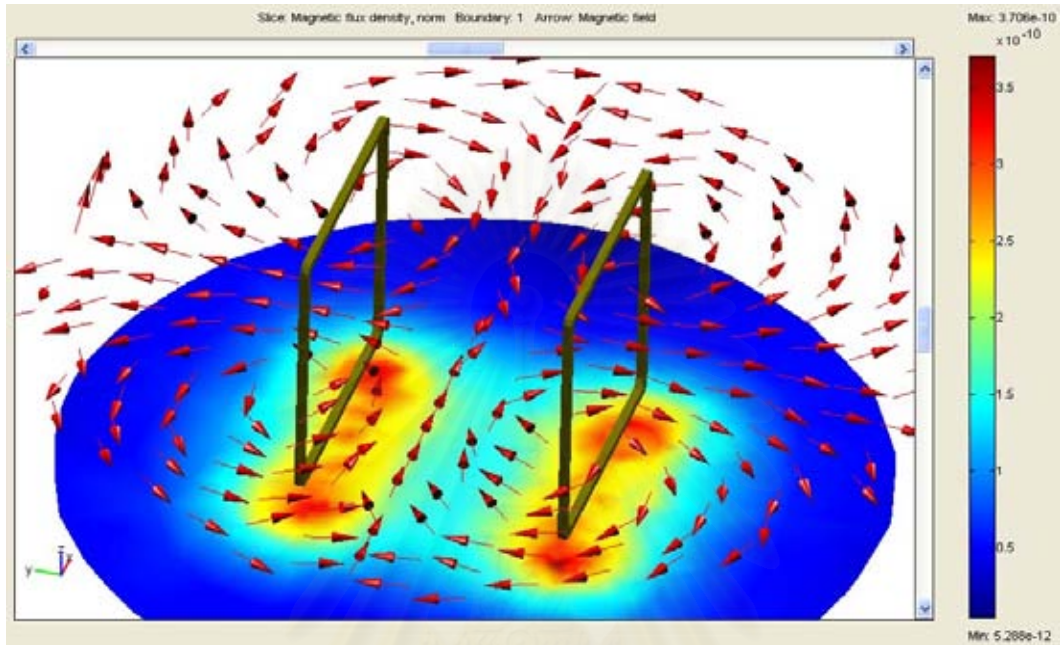
รูปที่ 3.3 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก 2 ขดลวดตัวนำแบบเฟสเดียวกัน



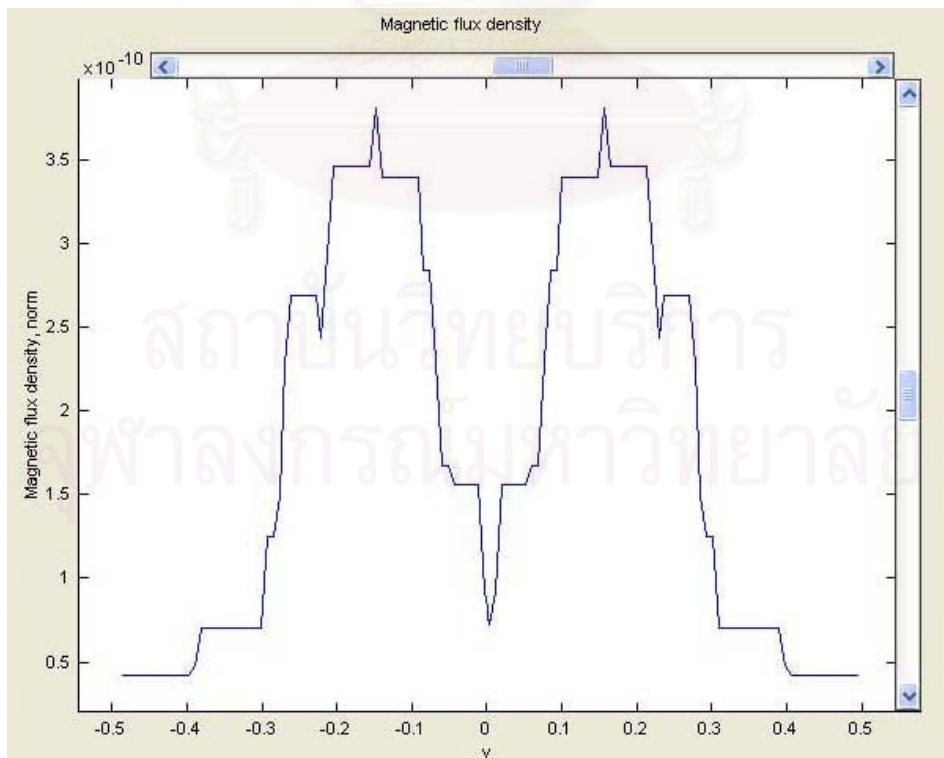
รูปที่ 3.4 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่าง 2 ขดลวดตัวนำ

3.1.2.2 แบบกระแสเฟสตรงข้ามกัน

ออกแบบเหมือนกระแสเฟสเดียวเพียงแต่กลับเฟสกระแสจ่ายให้ขดลวดทั้งสองให้ตรงข้ามกัน ทำการจำลองระบบได้ลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ทิศการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก 2 ขดลวดตัวนำแบบเฟสตรงข้ามกัน



รูปที่ 3.6 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่าง 2 ขดลวดตัวนำ

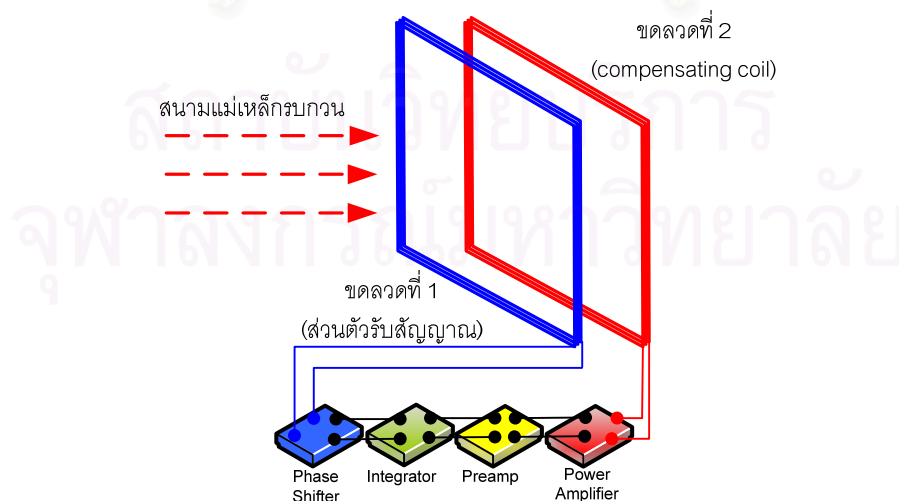
จากการจำลองระบบ แบบที่เหมาะสมที่สุดคือ การวางขดลวดขนานกันแล้วจ่ายกระแสให้เฟสตรงกันข้ามดังรูปที่ 3.6 เพราะความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างขดลวดทั้ง 2 ขดในแบบนี้มีค่าต่ำสุดซึ่งเหมาะแก่การออกแบบระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ โดยแนวการดำเนินการต่อไปคือ การทำชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์จับความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กให้มีเฟสตรงกันข้ามและขนาดพอเหมาะ

3.2 การทำงานและการออกแบบระบบกำลังแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟจริง

การออกแบบระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ จุดประสงค์เพื่อพัฒนาส่วนประกอบหลักทั้ง 6 ส่วนของระบบให้สามารถหาขนาด และทิศทางของสนามแม่เหล็กความถี่กำลัง โดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กชดเชยให้สนามแม่เหล็กครบควมมีค่าน้อยลง ส่วนทั้งประกอบ 6 ส่วนประกอบไปด้วย

1. การออกแบบส่วนรับสัญญาณ
2. การออกแบบส่วนวงจรเลื่อนเฟส
3. การออกแบบส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์
4. การออกแบบส่วนปรีแอมป์
5. การออกแบบส่วนภาคขยายกำลัง
6. การออกแบบส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก

องค์ประกอบต่างของระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการทำงานของระบบกำลังแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

3.2.1 หลักการทำงานของระบบ

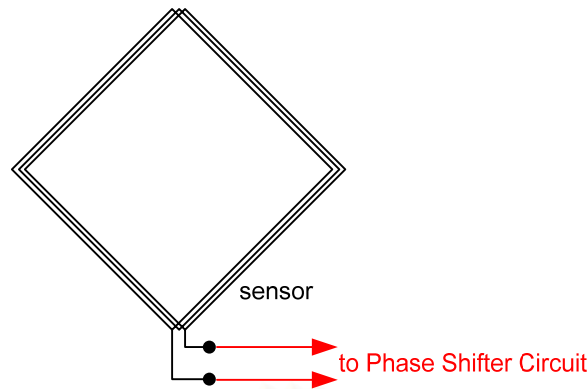
ลักษณะการทำงานของระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่จะทำการออกแบบและประกอบสร้างจะใช้เซ็นเซอร์ 1 ตัว ในการตรวจจับสัญญาณของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก วางในตำแหน่ง พิกัดที่ทราบแน่นอนในระนาบเดียวกัน ตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมา จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กวัดสัญญาณรบกวนด้วยส่วนรับสัญญาณ (ขดลวดที่ 1) ผ่านชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 4 ชุด คือ ชุดวงจรเลื่อนเฟส ชุดวงจรอินทิเกรเตอร์ ชุด วงจรปริเอมป์ และชุดวงจรภาคขยายกำลัง จากนั้นจะจ่ายกระแสเพื่อชดเชยสนามแม่เหล็กรบกวน ให้ลดลง

การทำงานของระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กโดยการวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้

1. เมื่อมีสนามแม่เหล็กรบกวนเคลื่อนที่มาตัดผ่านตัวรับสัญญาณ (ขดลวดที่ 1) ที่เป็นขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและมีกระแสไหลในขดลวด เนื่องจากค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ปลายทั้งสองด้านของขดลวดต่ออยู่กับเครื่องมือสำหรับวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น
2. ชุดวงจร 4 ชุด ทำหน้าที่รับค่าแรงดันและมุมเฟสจากขดลวดที่ 1 เปรียบเทียบกับเกณฑ์อ้างอิงแล้วนำไปขับกระแสสู่ขดลวดที่ 2
3. สนามแม่เหล็กรบกวนจะถูกชดเชยให้ลดลงด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ผ่านขดลวดที่ 2 ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.2.2 ส่วนรับสัญญาณ

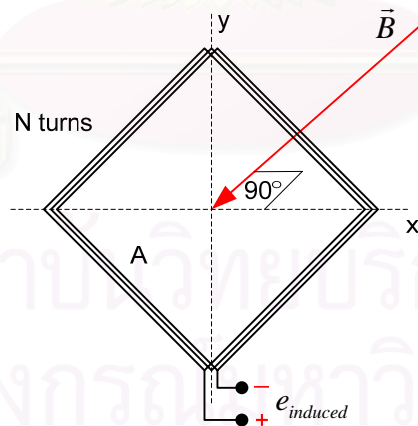
ส่วนรับสัญญาณออกแบบเป็นขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) ประกอบไปด้วย ขดลวดทองแดงที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณพันตามรางท่อพลาสติก เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น หากใช้แกนที่เป็นโลหะ วางในระนาบเดียวกันกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยปลายทั้งสองด้านของขดลวดแต่ละขด จะต่อเข้ากับหัวต่อและสายนำสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปยังเครื่องมือวัดและส่วน วงจรเลื่อนเฟส ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ส่วนรับสัญญาณของระบบ

ในบทที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงทฤษฎีของแรงดันเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากฟ้าผ่า กล่าวคือสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกจากฟ้าผ่าสามารถวัดได้โดยใช้ขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดรับสัญญาณที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A จำนวนรอบเท่ากับ N และวางอยู่ในแนวตั้งฉากกับความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{B} ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลง $\frac{d\vec{B}}{dt}$ ตามรูปที่ 3.3 จากสมการที่ (2.5) จะได้เป็น

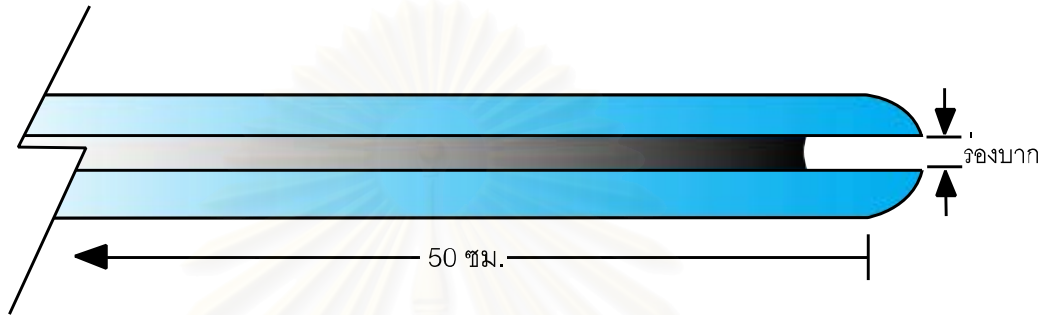
$$e_{induced} = -NA \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.2)$$



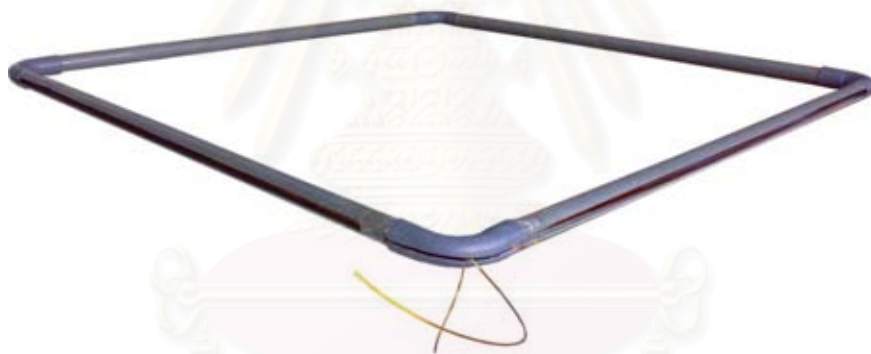
รูปที่ 3.9 แสดงมุมตั้งฉากระหว่างสนามแม่เหล็กกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

จากสมการที่ (3.2) จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก จำนวนรอบของขดลวดและขนาดของพื้นที่ที่ตั้งฉาก โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส (ในที่นี้กระแสหมายถึงกระแสที่ไหลในขดลวดแหล่งกำเนิด) และระยะห่างจากจุดกำเนิดตามสมการที่ (2.12) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่เราต้องการทราบ ดังนั้นตัวแปรที่

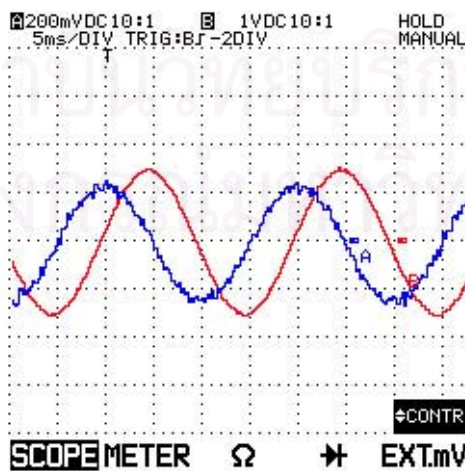
สามารถควบคุมได้ก็คือ จำนวนของขดลวด และพื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด ด้วยขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์นี้ที่เป็นการทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้กังหันน้ำแม่เหล็กจลนพลศาสตร์คอมพิวเตอร์ CRT จึงได้ออกแบบเซ็นเซอร์ในส่วนรับสัญญาณนี้ให้มีขนาดครอบคลุมจอภาพคอมพิวเตอร์ขนาด 21 นิ้ว โดยเบื้องต้นใช้ท่อ PVC บากร่องเป็นรางเพื่อพันขดลวดเป็นขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) จำนวน 20 รอบ ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 250 ตารางเซนติเมตร ตามรูปที่ 3.10 ถึง 3.11



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงมิติร่องบากของท่อ PVC เพื่อพันขดลวดให้เป็นสายอากาศแบบบ่วง



รูปที่ 3.11 ลักษณะของส่วนรับสัญญาณเมื่อพันขดลวดตามรอยบากท่อ PVC แล้ว



รูปที่ 3.12 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดรับสัญญาณ (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B)

จากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นว่ามุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดรับสัญญาณมีเฟสนำหน้ามุมเฟสกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอยู่ประมาณ 90 องศา ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.1 และ 3.2

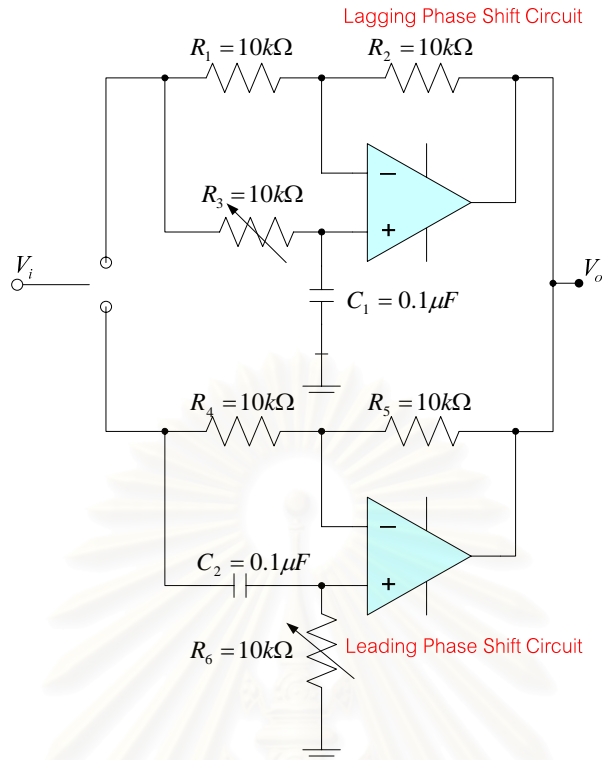
จากนั้นนำปลายทั้ง 2 ด้านต่อไปยังส่วนวงจรเลื่อนเฟส โดยให้ปลายขดลวดขาเข้าเป็นขั้วบวก และปลายขดลวดขาออกเป็นกราวนด์ ซึ่งการออกแบบและรายละเอียดของส่วนวงจรเลื่อนเฟสจะกล่าวในส่วนต่อไป

3.2.3 ส่วนวงจรเลื่อนเฟส

จากทฤษฎีของวงจรเลื่อนเฟสที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยตามปกติแล้วการออกแบบใช้วงจรนี้เมื่อต้องทราบค่ามุมที่ต้องการเลื่อนเฟส θ และความถี่ใช้งานที่ต้องการอยู่ก่อนแล้ว จากนั้นมากำหนดค่าตัวเก็บประจุ C โดยทั่วไปมีการกำหนดค่า อยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.1 μF ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ง่ายทั่วไป ดังนั้นสามารถคำนวณค่ามุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต θ เพื่อปรับให้ได้มุมที่ต้องการจากสมการที่ 2.13 ย้ายข้างสมการจะได้สมการนี้

$$R = \tan\left(\frac{\theta}{2\pi fC}\right) \quad (3.3)$$

ผลของส่วนรับสัญญาณและส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์ทำให้ให้มุมเฟสลัพธ์สุดท้ายคือ มุมเฟสของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกลับเฟสกับมุมเฟสของกระแสในขดลวดชุดเซนสนามแม่เหล็ก อาจเลื่อนหรือไม่หักล้างกันพอดีเล็กน้อย (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อส่วนรับสัญญาณและส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์) จึงออกแบบให้วงจรสามารถเลื่อนมุมเฟสเพียงเล็กน้อย จึงออกแบบให้เลื่อนเฟสประมาณ 30 องศา และใช้ค่าตัวเก็บประจุ C เท่ากับ 0.1 μF แทนค่าต่างๆในสมการที่ 3.3 จะได้ที่ค่าความต้านทานที่ต้องการประมาณ 8.53 $k\Omega$ เลือกใช้ค่าความต้านทาน 10 $k\Omega$ แบบปรับค่าได้ 25 รอบเพื่อปรับแต่งได้ละเอียด รูปที่ 3.13 เป็นวงจรเลื่อนเฟสที่ออกแบบสามารถเลือกให้เลื่อนเฟสนำหน้าหรือล่าหลังได้



รูปที่ 3.13 วงจรเลื่อนเฟสสามารถเลือกให้เลื่อนเฟสแบบล่าหลังและนำหน้าได้

3.2.4 ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์

จากสมการที่ 2.14 ในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปรผันตามค่าลบของอินทิกรัลสัญญาณอินพุต V_{in} และแปรผกผันกับค่า RC เครื่องหมายลบในสมการเอาต์พุตบ่งชี้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุต V_o จะมีขั้ว (Polarity) ตรงกันข้ามกับแรงดันอินพุต ดังนั้นการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์นี้ต้องคำนึงถึง แรงดันเอาต์พุตว่าเป็นสัญญาณแบบใด ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้เป็นสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากขดลวดรับสัญญาณ ซึ่งมุมเฟสนำหน้ามุมเฟสของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก 90 องศา จึงกำหนดให้แรงดันอินพุตของส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์นี้คือ

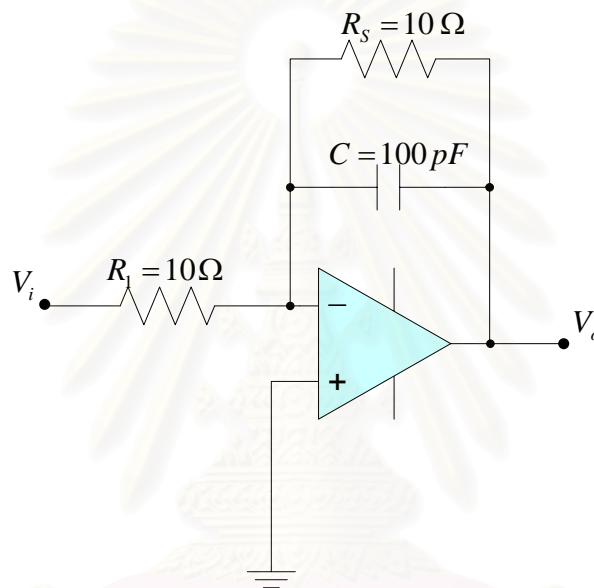
$$\begin{aligned} V_{in} &= V \sin(\theta + 90) \\ V_{in} &= V \cos \theta \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อ θ คือ มุมอ้างอิงเริ่มต้นของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ต้องการทราบมุมเฟสที่เปลี่ยนไปของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์เทียบกับมุมเฟสของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอินพุต จึงแทนค่าสมการที่ 2.4 ในบทที่ 2 ด้วยสมการที่ 3.4 จะได้

$$V_o = -k \sin \theta \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 เครื่องหมายลบในสมการสามารถอธิบายได้ว่า มุมเฟสเอาต์พุตของวงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์มีความต่างเฟสจากมุมเฟสของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเท่ากับ 180 องศา หรือกลับเฟส

ความสัมพันธ์ของความถี่สัญญาณขาเข้าก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออกเช่นกันจึงต้องใช้ R_s ต่อขนานกับ C เพื่อจำกัด Low Frequency Resistor เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ออกแบบให้ $R_s = R_1$ เพราะไม่ต้องการอัตราขยายในส่วนวงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์ และออกแบบขา positive ต่อลงกราวด์เทียบจุดอ้างอิงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นวงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์ที่ถูกออกแบบจึงแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์ที่ออกแบบ

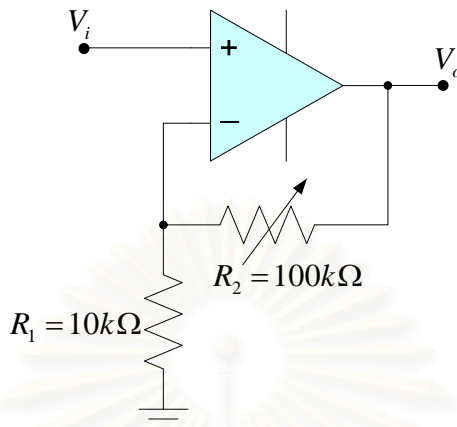
การทำงานของวงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์ ถ้า $f > f_c$ วงจรทำงานเป็น Integrator จะได้ค่า V_o ตามสมการ 2.4 ในบทที่ 2 และถ้า $f < f_c$ วงจรทำงานเป็น Inverting Amp จะได้ $A_v = R_s / R_1$

$$\text{เมื่อ } f_c = \frac{1}{2\pi R_s C} \quad (3.6)$$

3.2.5 ส่วนปริแอมป์

วงจรรขยายปริแอมป์ (pre amplifier) ซึ่งรับสัญญาณมาจากส่วนเอาต์พุตของวงจรรีโวลูชันอินทิเกรเตอร์ เป็นวงจรที่ใช้เพิ่มแรงดันให้กับสัญญาณอินพุตของวงจรรขยาย pre amplifier ออกแบบโดยใช้วงจรรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non Inverting Amplifier) เพื่อคงความต่างเฟส 180 องศา กับมุมเฟสของกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กต่อไป มีอัตราขยายเท่ากับ 10.1

เท่า ตามสมการ 2.17 ในบทที่ 2 และจะส่งให้เป็นอินพุตของวงจรขยายกำลังต่อไป ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.15

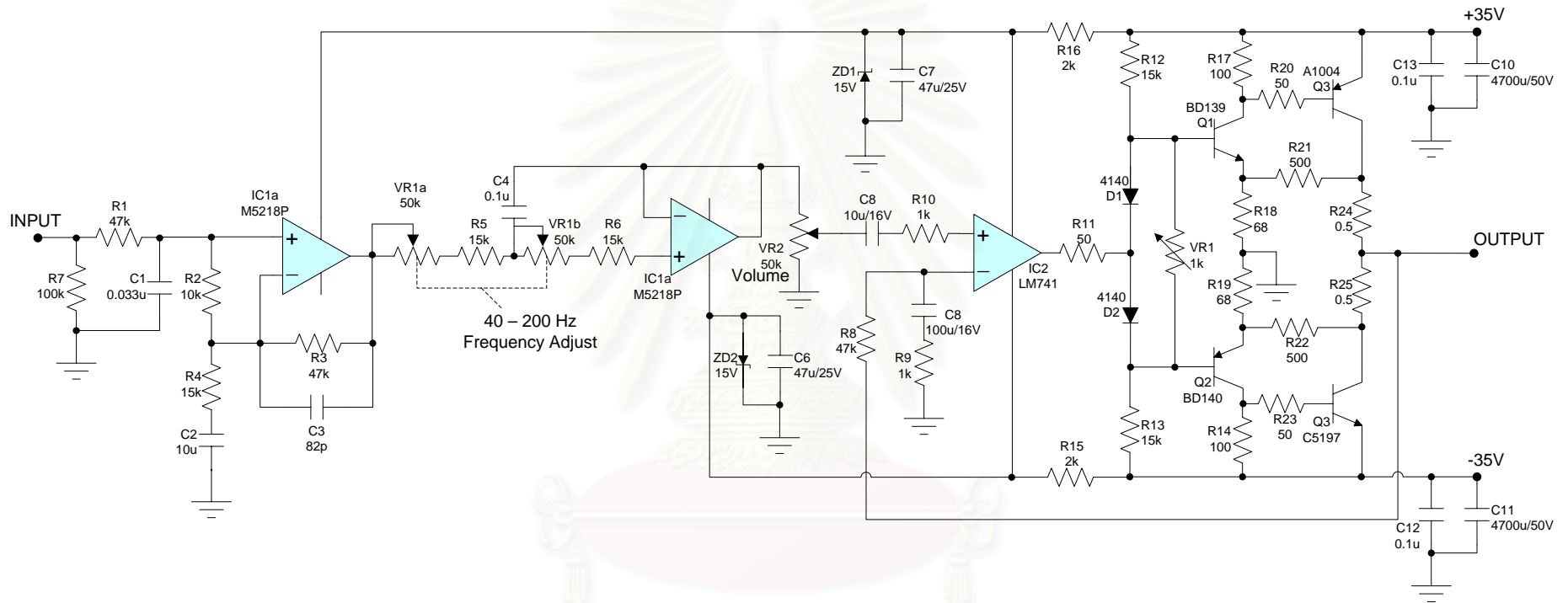


รูปที่ 3.15 วงจรปริแอมป์ที่ออกแบบ

3.2.6 ส่วนภาคขยายกำลัง [8,14]

วงจรภาคขยายกำลังนอกจากจะต้องทำหน้าที่ขยายแรงดันขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว ในหลายกรณียังต้องการให้แรงดันที่ถูกขยายนั้นมีกำลังมากพอสำหรับการขับภาระโหลดด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากวงจรขยายแรงดัน (voltage amplifier) โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพด้านกำลัง (power efficiency) ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นถ้าต้องการให้วงจรเหล่านี้จ่ายกระแสปริมาณมากออกมาขับภาระโหลดได้ โดยทั่วไปจะนำสัญญาณที่ผ่านการขยายแรงดันแล้วมาเข้าวงจรขยายกำลัง (power amplifier) ซึ่งเป็นวงจรที่มีอัตราขยายประมาณหนึ่งแต่จะมีความสามารถในการจ่ายกระแสเอาต์พุตสูง ด้วยเหตุนี้บางครั้งเราจึงเรียกวงจรประเภทนี้ว่าวงจรขับกระแส (current driver) หรือวงจรภาคเอาต์พุต (output stage)

จากทฤษฎีบทที่ 2 การทำงานของส่วนภาคขยายกำลังส่วนนี้ออกแบบให้เป็นวงจรขยายกำลังคลาสเอบีแบบไม่มีตัวเก็บประจุเอาต์พุต (OCL=Output Capacitor Less) ออกแบบใช้การป้อนกลับแบบลบและออกแบบใช้การไบอัสแบบสะท้อนกระแส (Current Mirror Bias) เพื่อแก้ไขปัญหาคอมพิ้นที่จุดตัดผ่านครอสโอเวอร์ และสุดท้ายออกแบบให้มีอัตราขยายสูงมากด้วยการต่อแบบคอมพลีเมนต์ดารีเป็นแบบใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัวมาประกอบกัน ดังรูปที่ 3.16 โดยการทำงานคือสัญญาณอินพุตจะถูกป้อนเข้ามายังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ด้วย VR1 โดยออกแบบให้ความถี่ที่สามารถปรับผ่านได้ให้อยู่ในช่วงความถี่ต่ำคือ 40 ถึง 200 Hz แล้วสัญญาณจึงเข้าสู่ส่วนหลักเพื่อขยายกำลังสูงได้ถึง 50 Watt RMS ด้วยการปรับความต้านทานที่ VR2



รูปที่ 3.16 ส่วนภาคขยายกำลังวงจขยายแบบไม่มีตัวเก็บประจุเอาต์พุต OCL 50 W_{RMS} พร้อมชุดวงจรรองความถี่ผ่านต่ำ 40-200 Hz

3.2.7 ส่วนขดลวดขดเชยสนามแม่เหล็ก

ส่วนขดลวดขดเชยสนามแม่เหล็ก จะรับสัญญาณจากส่วนภาคขยายกำลังเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขดเชยกับสนามแม่เหล็กบริเวณ โดยออกแบบเป็นขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) เหมือนส่วนรับสัญญาณทุกประการต่างกันเพียงแค่จำนวนรอบในการพันขดลวดจาก 20 รอบ เป็น 80 รอบ เพื่อหลีกเลี่ยงขนาดกระแสที่อาจมากเกินไปเมื่อขดลวดส่วนนี้ทำงานในสภาวะขดเชยสนามแม่เหล็ก เนื่องจากในสภาวะขดเชยสนามแม่เหล็กกระแสที่ไหลในขดลวดขดเชยจะมีขนาดกระแสสูงมากอาจทำให้ขดลวดหรือวงจรเสียหายได้

3.3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

การทดสอบเริ่มจากจำลองสนามแม่เหล็กบริเวณจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กด้วยการปรับค่าหม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac) ให้กระแสผ่านขดลวดที่ 1 ขนาด 1×1 ตารางเมตร จำนวนรอบ 250 รอบ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กด้วยความถี่ 50 Hz แผ่กระจายออกมา โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลวนในขดลวดที่ 1 และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆตามระยะทางที่ห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบมีดังนี้

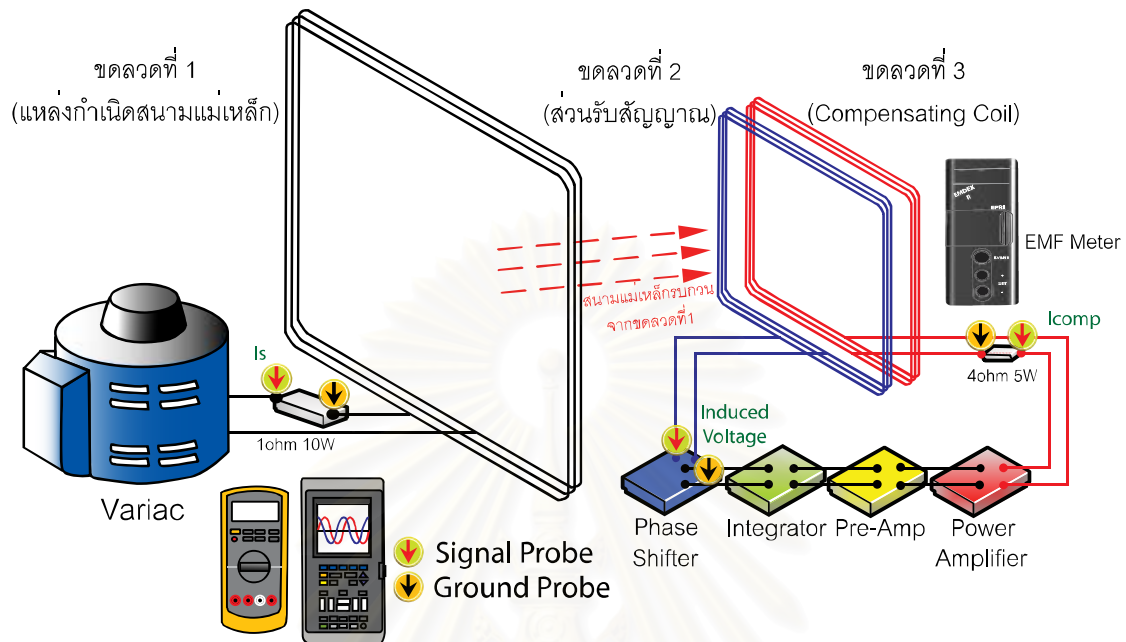
1. จัดเตรียมชุดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กซึ่งประกอบไปด้วย หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac) ขดลวดขนาด 1×1 ตารางเมตร จำนวนรอบ 250 รอบ วางขนานกับระนาบพื้น และต่อความต้านทานขนาด 1Ω 10 W เพื่อจำกัดกระแสและเป็นตำแหน่งในการวัดสัญญาณกราฟด้วยเครื่องวัดสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital Oscilloscope) ดังรูปที่ 3.17 ปรับขนาดสนามแม่เหล็กด้วยการปรับขนาดแรงดันที่หม้อแปลงปรับค่าเพื่อให้ขนาดกระแสในขดลวดที่ 1 เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขนาดแรงดันหม้อแปลง ซึ่งความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและขนาดกระแสในขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกันเป็นไปตามสมการ 2.10

2. นำส่วนรับสัญญาณที่ได้ออกแบบเป็นขดลวดรับสัญญาณ (Sensor Coil) ขนาด 50×50 ตารางเซนติเมตร วางขนานกับขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กเป็นระยะทาง 35 เซนติเมตร เอาต์พุตที่ได้ต่อกับส่วนวงจรเลื่อนเฟส (phase shifter) ต่อไป และทำการวัดสัญญาณแบบดิจิตอลที่ตำแหน่งนี้ ดังรูปที่ 3.17

3. เอาต์พุตที่ได้จากส่วนรับสัญญาณต่อกับส่วนวงจรเลื่อนเฟส จากนั้นนำส่วนวงจรเลื่อนเฟสต่ออนุกรมกับส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์ ส่วนวงจรปริแอมป์ และส่วนภาคขยายกำลังตามลำดับ และทำการวัดสัญญาณแบบดิจิตอลตามตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.17

4. นำเอาต์พุตจากภาคขยายกำลังต่ออนุกรมกับความต้านทาน 4Ω 5 W จากนั้นต่อกับส่วนขดลวดขดเชยสนามแม่เหล็ก แล้วทำการวัดสัญญาณแบบดิจิตอลพร้อมความต้านทาน 4Ω 5 W ดังรูป 3.17

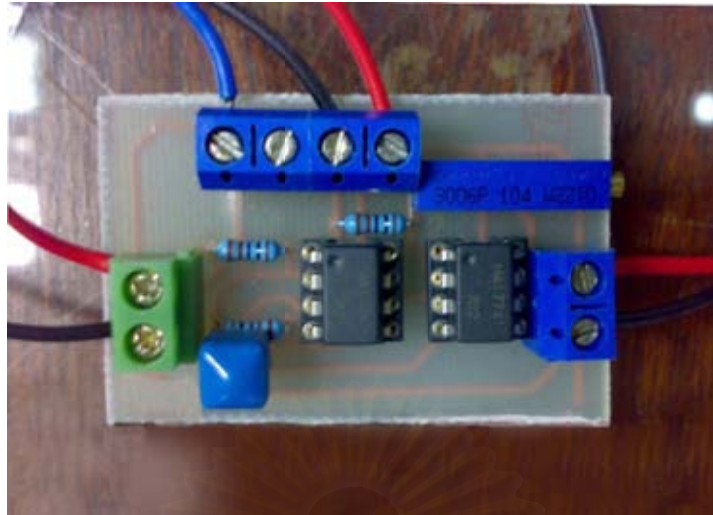
5. จากนั้นปรับค่ามอดูเลชันเฟสที่ส่วนวงจรเลื่อนเฟสและอัตราขยายที่ส่วนปริแอมป์ หรือส่วนภาคขยายกำลังให้เหมาะสม ทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กและบันทึกผลตำแหน่งละ 3 ครั้ง



รูปที่ 3.17 แสดงการจัดวางองค์ประกอบและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

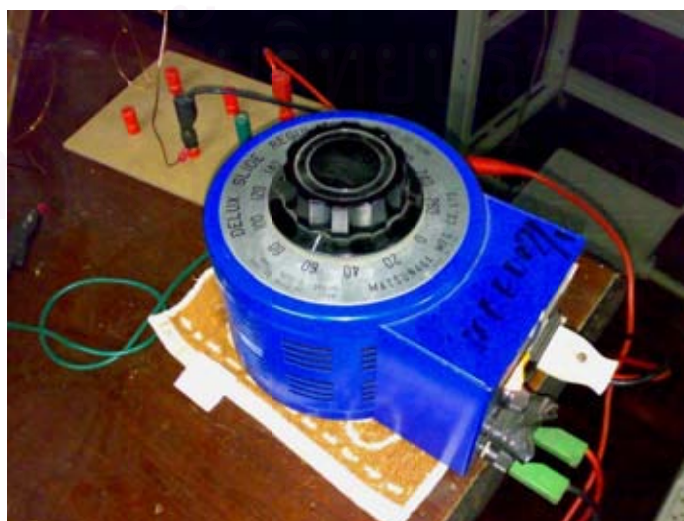
1. หม้อแปลงปรับค่าได้ MATSUNAGA ขนาด 1kV A จำนวน 1 เครื่อง
2. True RMS Digital Multimeter Fluke รุ่น FLU87-5 จำนวน 1 เครื่อง
3. Digital Oscilloscope LeCroy 4 channels รุ่น 9384 M จำนวน 1 เครื่อง
4. Digital Oscilloscope Fluke Scope Meter 105B Series II จำนวน 2 เครื่อง
5. ความต้านทานขนาด 1Ω 10 W และ 4Ω 5 W อย่างละ 1 ตัว
6. ส่วนชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนวงจรเลื่อนเฟส ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์ ส่วนวงจรปริแอมป์ และส่วนภาคขยายกำลัง
7. Electromagnetic Field Meter EMDEXII จำนวน 1 เครื่อง



รูปที่ 3.18 ส่วนวงจรอินทิเกรเตอร์และส่วนวงจรปริแอมป์



รูปที่ 3.19 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Fluke รุ่น FLU87-5



รูปที่ 3.20 หม้อแปลงปรับค่าได้ MATSUNAGA ขนาด 1kV A



รูปที่ 3.21 เครื่องวัดสัญญาณดิจิทัลแบบ 4 ช่อง ยี่ห้อ LeCroy รุ่น 9384 M



รูปที่ 3.22 เครื่องวัดสัญญาณดิจิทัลแบบ 2 ช่อง ยี่ห้อ Fluke Scope Meter 105B Series II



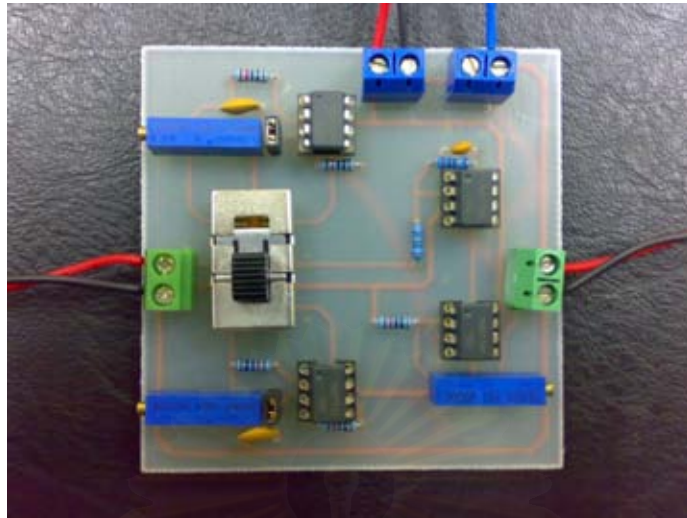
รูปที่ 3.23 ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.24 Electromagnetic Field Meter ยี่ห้อ EMDEXII



รูปที่ 3.25 ส่วนวงจรภาคขยายกำลัง



รูปที่ 3.26 ส่วนวงจรเลื่อนเฟสสามารถเลือกให้เลื่อนเฟสแบบล้าหลังและนำหน้าได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแก้กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

เป้าหมายหลักของการทดสอบเพื่อตรวจสอบผลการออกแบบ และประกอบสร้างระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแ้ก้กทิฟโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กว่าได้ผลตามที่ตั้งเป้าไว้หรือไม่ จึงต้องมีการทดสอบโดยใช้การวัดสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กความถี่กำลังจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กก่อนและหลังใช้ระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแ้ก้กทิฟนี้บนพื้นที่ทดสอบ เพื่อประเมินหาค่าประสิทธิผลของการกำลัง, ขนาด และลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบและประเมินผลบนพื้นที่ทดสอบก่อนใช้ระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแ้ก้กทิฟ
2. การทดสอบและประเมินผลพื้นที่ทดสอบหลังใช้ระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแ้ก้กทิฟ
3. การตรวจสอบการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับการคำนวณโดยซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Basic

จากขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ได้กำหนดเงื่อนไขเพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้และพัฒนาระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแรงแ้ก้กทิฟที่ใช้หลักการของแรงดันเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทดสอบจึงกำหนดตัวแปรควบคุมดังต่อไปนี้

ข้อกำหนดและสมมติฐานในการทดสอบ

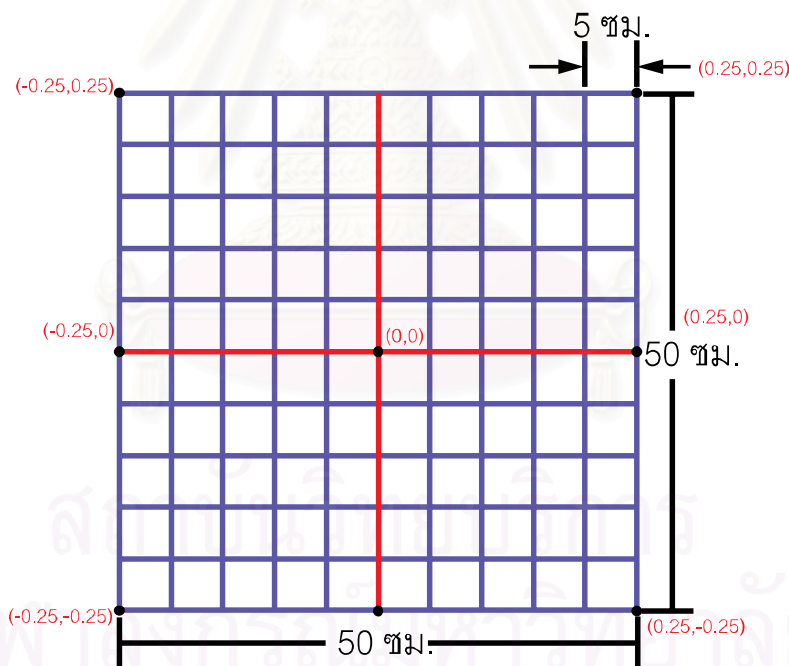
1. สนามแม่เหล็กบริเวณที่ใช้ในการทดสอบเป็นสนามแม่เหล็กความถี่กำลัง สร้างจากหม้อแปลงปรับค่าได้ ขนาด 1 KVA แรงดันเอาต์พุต 0 ถึง 220 V ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสร้างกระแสสลับผ่านความต้านทาน ขนาด $1\ \Omega$ 10 W ให้ไหลวนเป็นรูปตามขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก
2. ระยะห่างระหว่างขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับพื้นที่ทดสอบที่ใช้การทดสอบ โดยต่อขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กด้วยท่อ PVC สูง 40 เซนติเมตร จากพื้นที่ทดสอบ
3. พื้นที่ในการทดสอบ ใช้แผ่นกระดาษขนาด 50 x 50 ตารางเซนติเมตร สร้างตารางขนาด 5 x 5 ตารางเซนติเมตร ภายในแผ่นกระดาษเพื่อแสดงพิกัดในการบอกขนาดของสนามแม่เหล็ก
4. ระยะห่างระหว่างขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับส่วนรับสัญญาณ ทำได้โดยวางส่วนรับสัญญาณให้สูงกว่าพื้นที่ทดสอบ 5 เซนติเมตร

4.1 การทดสอบและประเมินผลก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉีกทึฟ

การทดสอบและประเมินผลก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉีกทึฟ จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 และการออกแบบส่วนรับสัญญาณในบทที่ 3 สำหรับขดลวดรับสัญญาณที่ออกแบบมาให้เห็นได้ชัดว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กกับพื้นที่ตั้งฉากหรือพื้นที่หน้าตัดของสายอากาศ และจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ ส่วนการตรวจสอบด้วยโปรแกรมเพื่อดูลักษณะของขนาดสนามแม่เหล็กแต่ละพิกัดบนพื้นที่ทดสอบ ใช้กฎของบีโอดี-ซาวาร์ต ในบทที่ 2 และรายละเอียดในภาคผนวก ก.

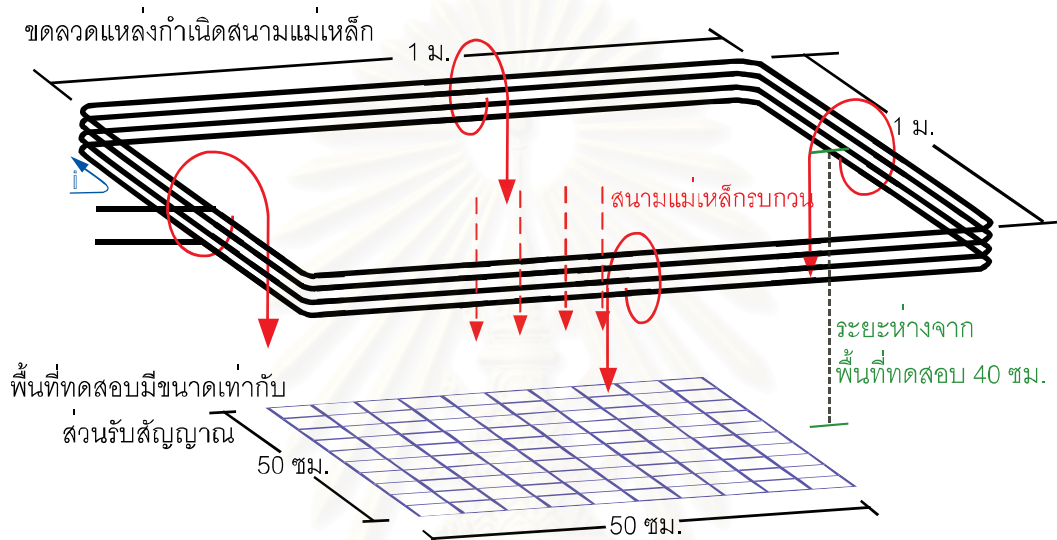
4.1.1 การทดสอบเพื่อดูลักษณะของขนาดสนามแม่เหล็กแต่ละพิกัดบนพื้นที่ทดสอบ

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาถึงลักษณะและขนาดของสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบที่แพร่กระจายมาจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กมายังพื้นที่ทดสอบ ซึ่งพื้นที่ทดสอบนี้มีขนาดเดียวกับหน้าตัดส่วนรับสัญญาณ ทดสอบโดยวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในตำแหน่งพิกัดที่กำหนดบนพื้นที่ทดสอบ บันทึกผลและเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี

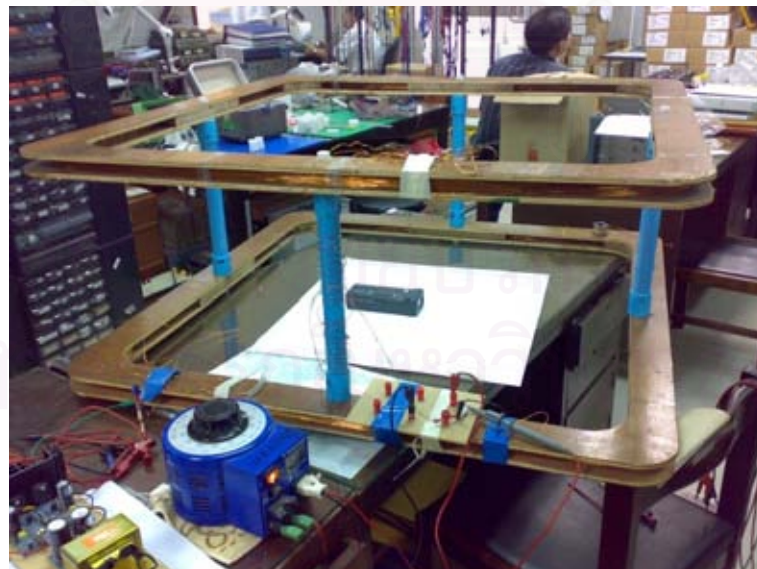


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นที่ทดสอบสนามแม่เหล็กและตัวอย่างพิกัดที่ทำกรวด

เนื่องจากต้องการวางให้ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก และพื้นที่ทดสอบตรงกัน เพื่อง่ายต่อการจัดวางจึงกำหนดให้วางขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ในแนวขนานกับพื้นที่ทดสอบและสูงจากพื้นที่ทดสอบ 40 เซนติเมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 การทดสอบใช้ EMF Meter วัดแต่ละจุดทดสอบนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และเปรียบเทียบกับค่าหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชย แอ็กทิฟ



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเหนือพื้นที่ทดสอบ 40 ซม.



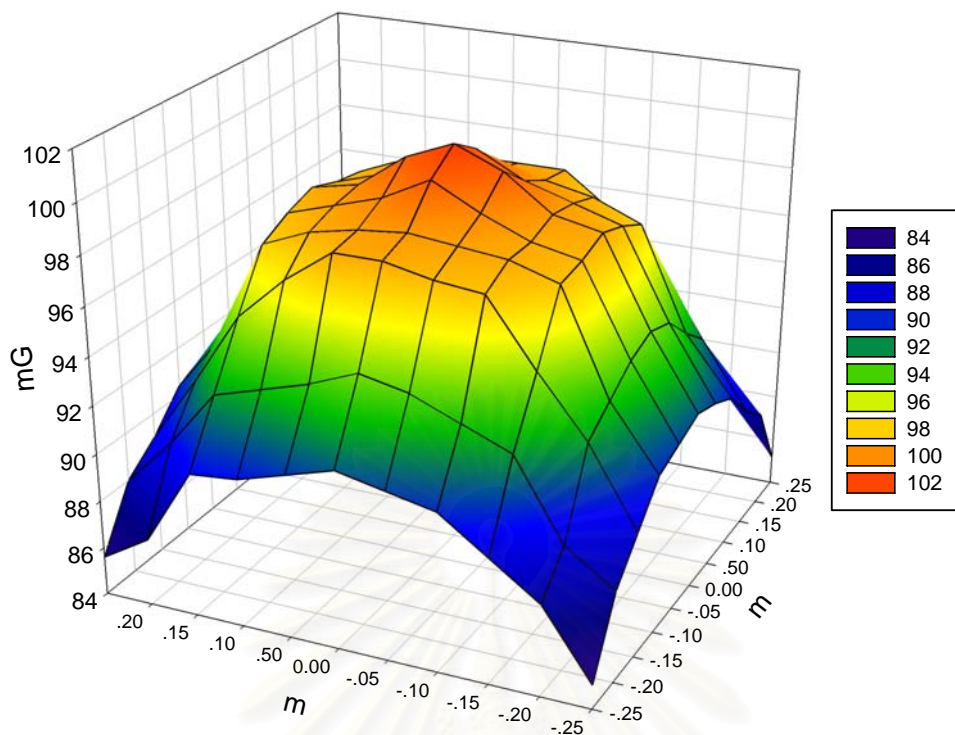
รูปที่ 4.3 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และการวัดสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A

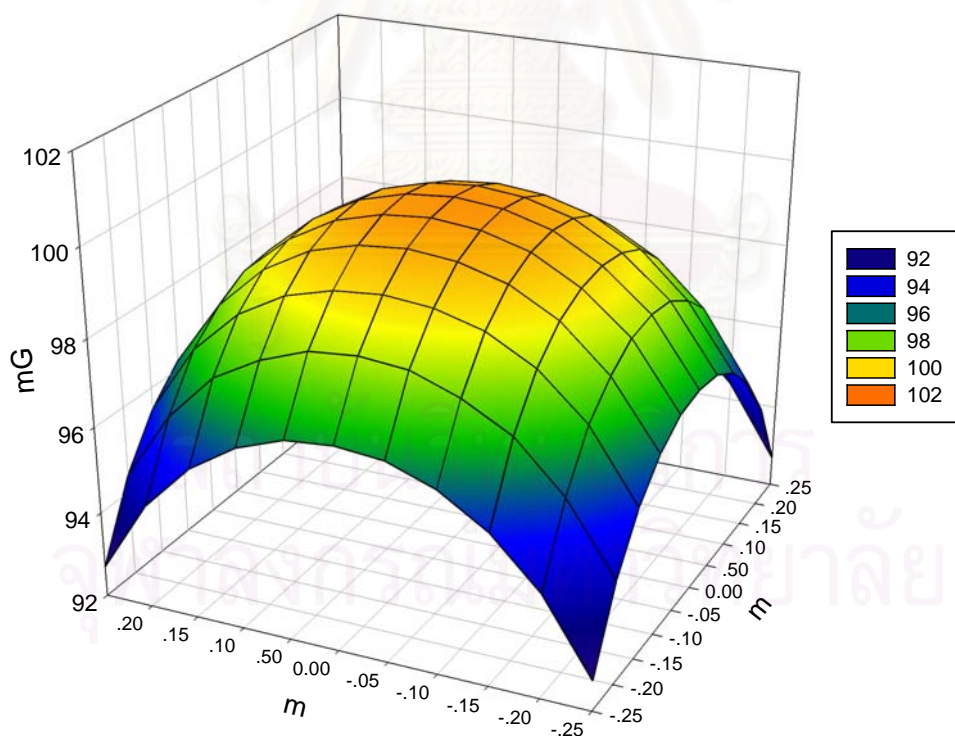
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
-0.25	85.0	87.8	89.2	90.6	91.0	91.4	90.8	90.2	90.0	86.8	85.6
-0.20	87.8	89.2	92.4	93.2	94.0	94.4	93.6	93.0	92.4	90.0	88.0
-0.15	89.2	92.4	94.8	97.4	97.6	98.0	98.0	96.6	94.8	91.8	89.0
-0.10	90.6	93.2	97.4	98.0	98.2	98.4	98.2	97.8	97.0	92.8	90.4
-0.05	91.0	94.0	97.6	98.0	98.8	99.8	98.8	98.2	97.6	93.8	91.0
0.00	91.4	94.4	98.0	98.4	99.8	100.6	99.8	98.4	98.0	94.4	91.4
0.05	91.0	94.0	97.6	98.2	98.8	99.8	98.8	98.2	97.6	94.0	91.0
0.10	90.4	92.8	97.0	97.8	98.2	98.4	98.4	98.2	97.4	93.2	90.6
0.15	89.0	91.8	94.8	96.6	98.0	98.0	98.0	97.6	95.0	92.0	89.2
0.20	88.0	89.2	92.2	92.8	94.0	94.8	94.2	94.0	93.0	90.0	88.2
0.25	85.2	88.0	89.2	91.0	91.2	92.0	92.0	91.2	90.0	88.0	85.0

ตารางที่ 4.2 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
-0.25	92.7	94.4	95.5	96.2	96.6	96.7	96.6	96.2	95.5	94.4	92.7
-0.20	94.4	96	97.1	97.7	98.1	98.2	98.1	97.7	97.1	96	94.4
-0.15	95.5	97.1	98.1	98.7	99	99.1	99	98.7	98.1	97.1	95.5
-0.10	96.2	97.7	98.7	99.3	99.6	99.7	99.6	99.3	98.7	97.7	96.2
-0.05	96.6	98.1	99	99.6	99.9	100	99.9	99.6	99	98.1	96.6
0.00	96.7	98.2	99.1	99.7	100	100.1	100	99.7	99.1	98.2	96.7
0.05	96.6	98.1	99	99.6	99.9	100	99.9	99.6	99	98.1	96.6
0.10	96.2	97.7	98.7	99.3	99.6	99.7	99.6	99.3	98.7	97.7	96.2
0.15	95.5	97.1	98.1	98.7	99	99.1	99	98.7	98.1	97.1	95.5
0.20	94.4	96	97.1	97.7	98.1	98.2	98.1	97.7	97.1	96	94.4
0.25	92.7	94.4	95.5	96.2	96.6	96.7	96.6	96.2	95.5	94.4	92.7



(ก)



(ข)

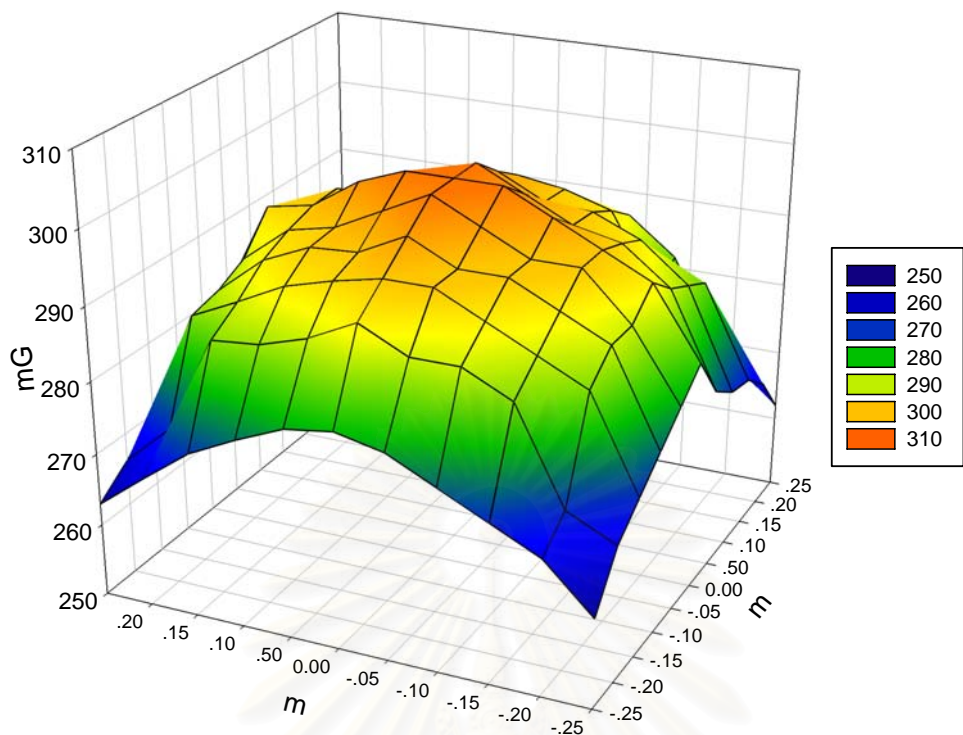
รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก) และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.1$ A

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A

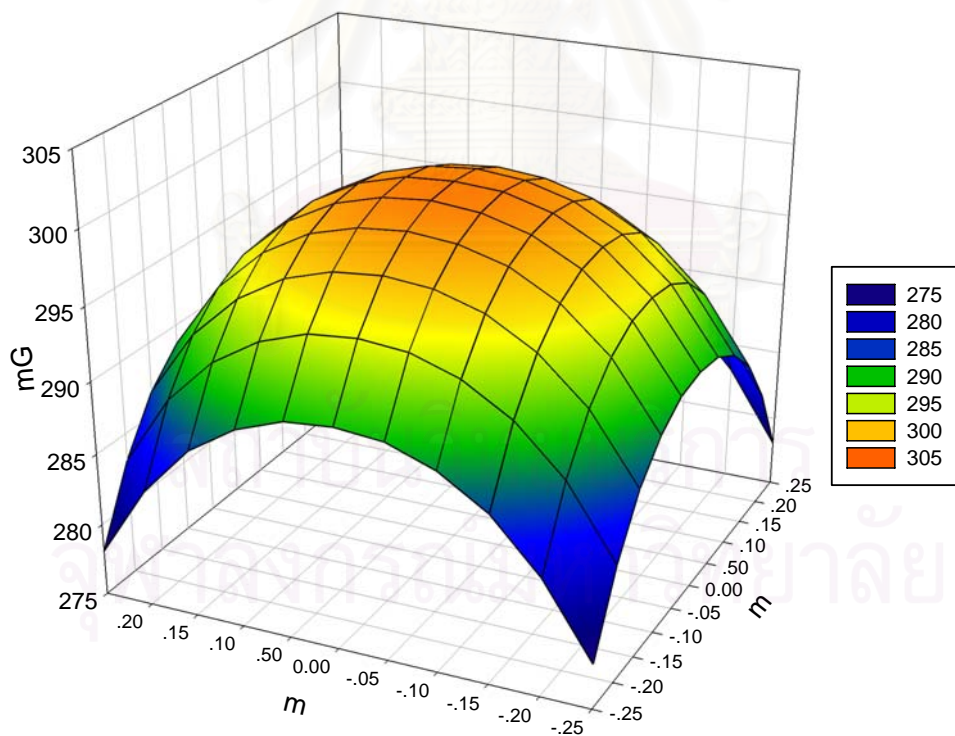
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	262.4	268.8	272.0	275.2	278.4	279.8	278.8	276.0	272.8	268.0	263.0
0.20	268.8	272.0	284.8	288.0	288.0	291.2	288.0	286.0	285.4	272.0	266.2
0.15	272.0	284.8	288.0	291.2	294.4	294.4	293.0	291.2	288.0	285.0	270.0
0.10	275.2	288.0	291.2	294.4	294.4	297.6	294.4	294.0	291.2	286.0	272.2
0.05	278.4	288.0	294.4	294.4	297.6	300.8	297.6	294.4	293.0	288.0	275.0
0.00	281.6	291.2	294.4	297.6	300.8	300.8	300.8	298.4	294.2	293.0	280.0
-0.05	275.0	288.0	293.0	294.4	297.6	300.8	297.6	294.4	294.4	288.0	278.4
-0.10	272.2	286.0	291.2	294.0	294.4	297.6	294.4	293.0	292.0	286.2	272.0
-0.15	271.2	284.0	281.2	292.0	294.0	295.0	293.2	291.2	288.0	285.0	270.0
-0.20	268.0	272.0	284.2	289.2	288.8	292.0	288.0	286.0	285.4	272.2	267.0
-0.25	262.0	268.8	273.0	276.0	278.8	279.8	279.0	275.8	272.8	268.8	261.8

ตารางที่ 4.4 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.2 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	278.1	283.1	286.6	288.7	289.9	290.2	289.9	288.7	286.6	283.1	278.1
0.20	283.1	288	291.2	293.2	294.3	294.6	294.3	293.2	291.2	288	283.1
0.15	286.6	291.2	294.2	296.1	297.1	297.4	297.1	296.1	294.2	291.2	286.6
0.10	288.7	293.2	296.1	297.9	298.8	299.1	298.8	297.9	296.1	293.2	288.7
0.05	289.9	294.3	297.1	298.8	299.7	300	299.7	298.8	297.1	294.3	289.9
0.00	290.2	294.6	297.4	299.1	300	300.2	300	299.1	297.4	294.6	290.2
-0.05	289.9	294.3	297.1	298.8	299.7	300	299.7	298.8	297.1	294.3	289.9
-0.10	288.7	293.2	296.1	297.9	298.8	299.1	298.8	297.9	296.1	293.2	288.7
-0.15	286.6	291.2	294.2	296.1	297.1	297.4	297.1	296.1	294.2	291.2	286.6
-0.20	283.1	288	291.2	293.2	294.3	294.6	294.3	293.2	291.2	288	283.1
-0.25	278.1	283.1	286.6	288.7	289.9	290.2	289.9	288.7	286.6	283.1	278.1



(ก)



(ข)

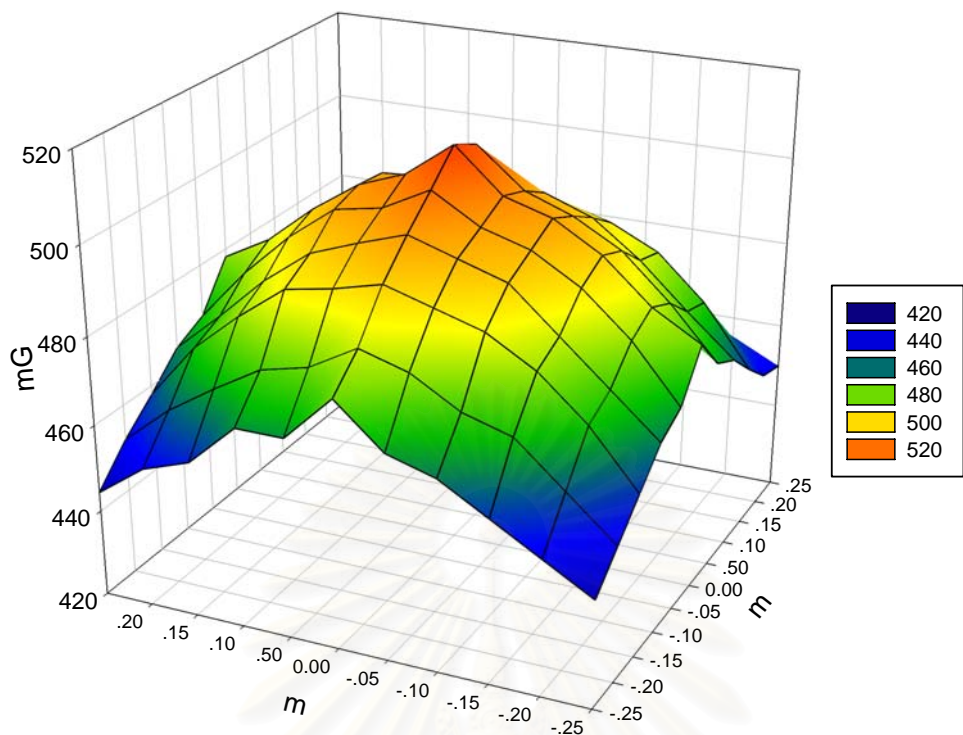
รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก)
และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.3 \text{ A}$

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A

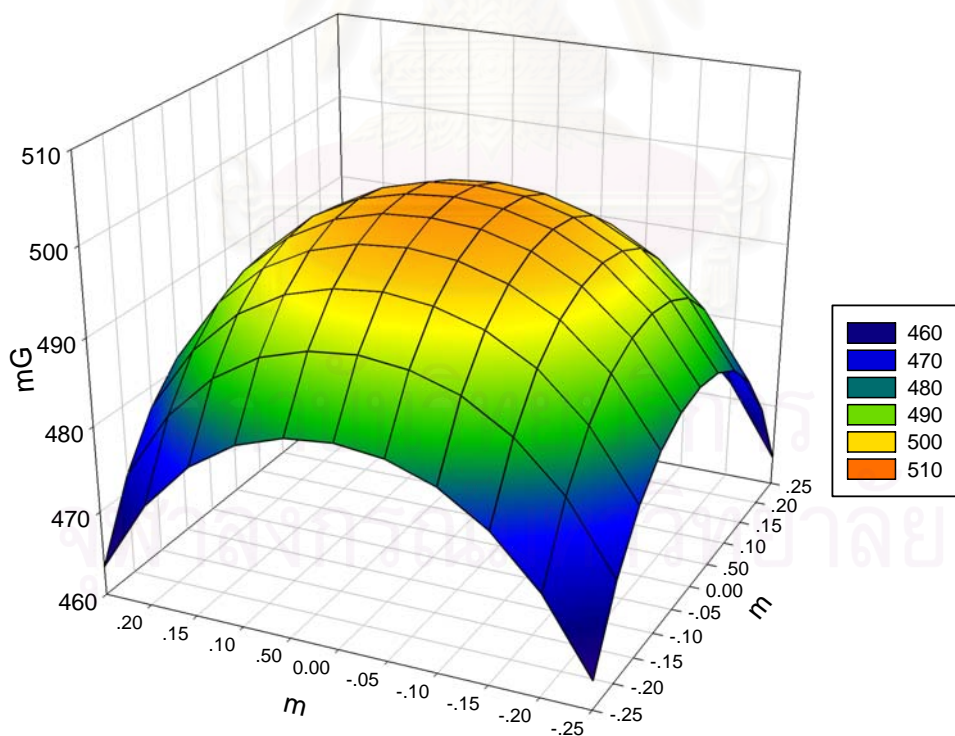
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	444.8	451.2	457.6	464.0	467.2	476.8	466.0	466.0	456.0	452.2	444.4
0.20	451.2	460.8	470.4	473.6	480.0	483.2	477.0	474.4	468.0	461.0	452.0
0.15	457.6	470.4	480.0	486.4	489.6	492.8	490.0	488.0	480.0	470.8	458.0
0.10	464.0	473.6	483.2	492.8	496.2	499.6	496.0	492.0	484.0	474.0	464.6
0.05	467.2	480.0	489.6	496.0	499.2	505.6	500.0	498.0	490.0	480.0	468.0
0.00	476.8	483.2	492.8	499.2	502.4	512.0	504.0	500.0	492.8	484.0	478.2
-0.05	468.2	480.0	490.0	496.0	500.0	508.8	500.0	499.2	488.0	478.0	466.8
-0.10	464.6	474.0	484.0	492.0	496.0	499.6	496.2	492.8	483.2	473.6	464.0
-0.15	458.0	472.0	482.0	487.2	490.2	493.0	490.0	488.0	483.2	472.0	460.0
-0.20	452.0	462.0	472.2	474.6	481.2	484.0	477.4	474.0	468.2	462.2	452.8
-0.25	450.0	452.0	458.0	466.0	468.8	480.0	466.0	462.2	456.0	450.0	442.0

ตารางที่ 4.6 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	463.4	471.9	477.6	481.2	483.1	483.7	483.1	481.2	477.6	471.9	463.4
0.20	471.9	480	485.3	488.7	490.4	491	490.4	488.7	485.3	480	471.9
0.15	477.6	485.3	490.4	493.5	495.1	495.7	495.1	493.5	490.4	485.3	477.6
0.10	481.2	488.7	493.5	496.4	498	498.5	498	496.4	493.5	488.7	481.2
0.05	483.1	490.4	495.1	498	499.5	499.9	499.5	498	495.1	490.4	483.1
0.00	483.7	491	495.7	498.5	499.9	500.4	499.9	498.5	495.7	491	483.7
-0.05	483.1	490.4	495.1	498	499.5	499.9	499.5	498	495.1	490.4	483.1
-0.10	481.2	488.7	493.5	496.4	498	498.5	498	496.4	493.5	488.7	481.2
-0.15	477.6	485.3	490.4	493.5	495.1	495.7	495.1	493.5	490.4	485.3	477.6
-0.20	471.9	480	485.3	488.7	490.4	491	490.4	488.7	485.3	480	471.9
-0.25	463.4	471.9	477.6	481.2	483.1	483.7	483.1	481.2	477.6	471.9	463.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก)

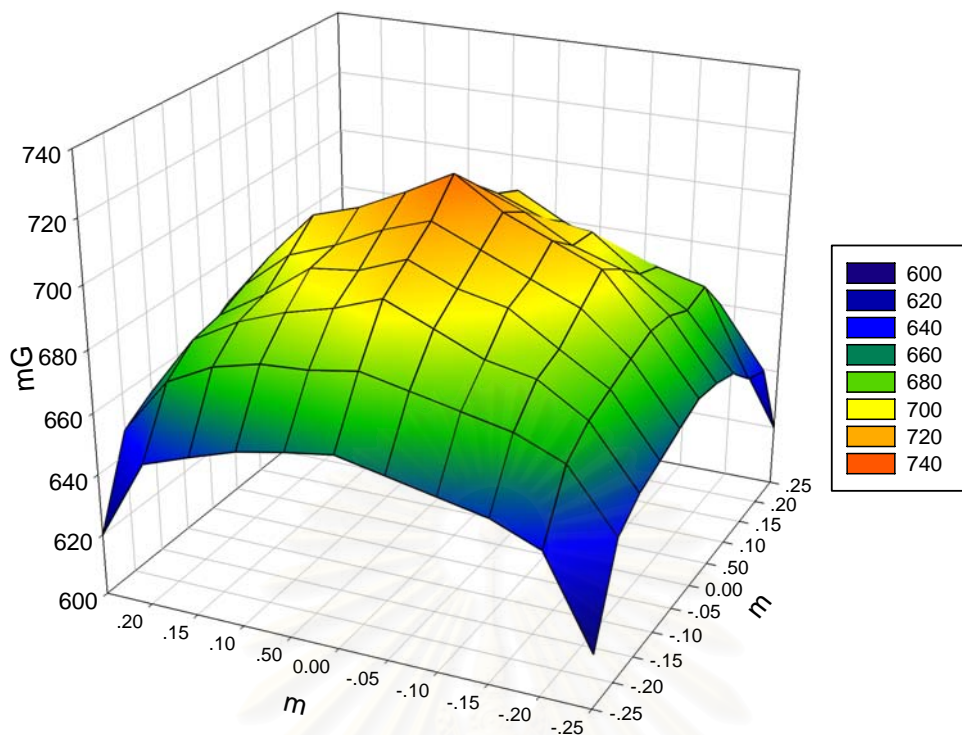
และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.5 \text{ A}$

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A

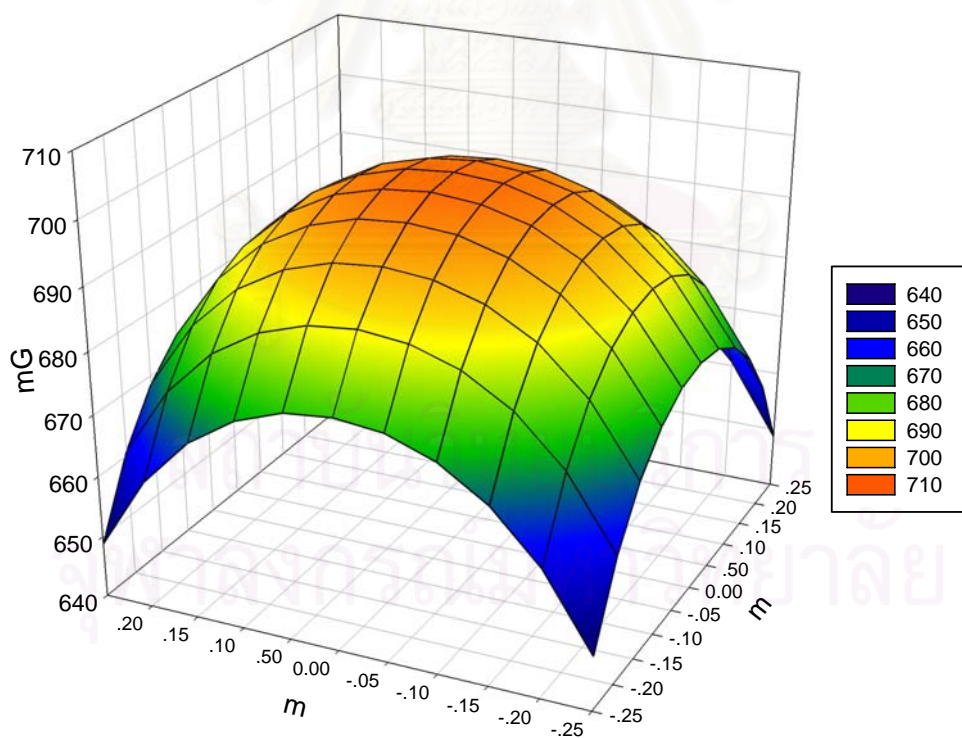
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	617.6	646.4	652.8	656.0	659.2	662.4	660.0	657.0	652.0	646.6	620.0
0.20	646.4	665.6	672.0	675.2	678.4	681.6	679.0	678.0	674.2	666.6	648.0
0.15	652.8	672.0	681.6	684.6	691.2	697.6	692.0	688.0	682.4	674.0	654.0
0.10	656.0	675.2	684.6	694.4	697.6	704.0	698.0	696.2	685.2	676.0	658.0
0.05	659.4	678.4	691.2	697.6	704.0	710.4	705.2	698.0	692.4	680.2	660.0
0.00	662.4	681.0	697.6	704.0	710.4	720.0	712.0	704.8	700.0	684.0	666.0
-0.05	661.0	680.0	692.2	697.2	705.4	711.6	705.2	698.0	692.4	680.8	661.6
-0.10	658.0	676.0	685.2	696.2	698.0	704.0	697.6	694.4	684.6	675.2	656.0
-0.15	650.0	678.0	682.0	686.0	692.0	700.0	694.0	682.0	682.0	675.0	656.0
-0.20	646.4	666.6	672.2	676.0	678.8	682.0	680.0	678.0	675.2	666.6	650.0
-0.25	620.0	646.6	652.0	657.0	660.0	662.4	659.2	656.0	652.8	646.4	617.6

ตารางที่ 4.8 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	648.8	660.7	668.6	673.6	676.4	677.2	676.4	673.6	668.6	660.7	648.8
0.20	660.7	672	679.5	684.1	686.6	687.4	686.6	684.1	679.5	672	660.7
0.15	668.6	679.5	686.6	690.9	693.2	693.9	693.2	690.9	686.6	679.5	668.6
0.10	673.6	684.1	690.9	695	697.2	697.8	697.2	695	690.9	684.1	673.6
0.05	676.4	686.6	693.2	697.2	699.2	699.9	699.2	697.2	693.2	686.6	676.4
0.00	677.2	687.4	693.9	697.8	699.9	700.5	699.9	697.8	693.9	687.4	677.2
-0.05	676.4	686.6	693.2	697.2	699.2	699.9	699.2	697.2	693.2	686.6	676.4
-0.10	673.6	684.1	690.9	695	697.2	697.8	697.2	695	690.9	684.1	673.6
-0.15	668.6	679.5	686.6	690.9	693.2	693.9	693.2	690.9	686.6	679.5	668.6
-0.20	660.7	672	679.5	684.1	686.6	687.4	686.6	684.1	679.5	672	660.7
-0.25	648.8	660.7	668.6	673.6	676.4	677.2	676.4	673.6	668.6	660.7	648.8



(ก)



(ข)

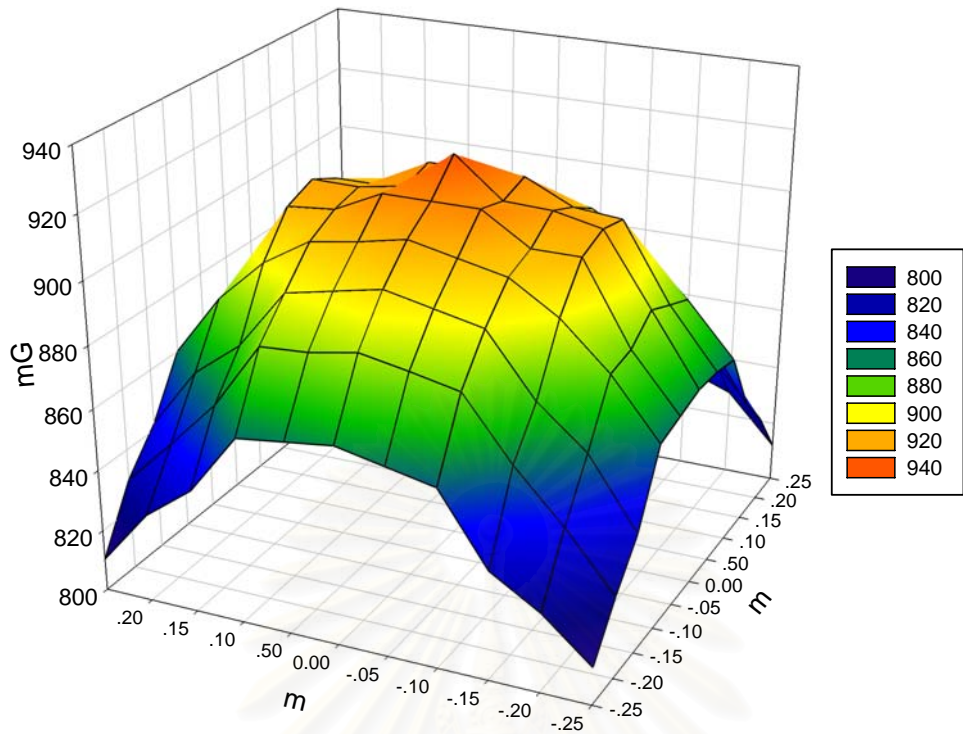
รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก)
และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.7$ A

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A

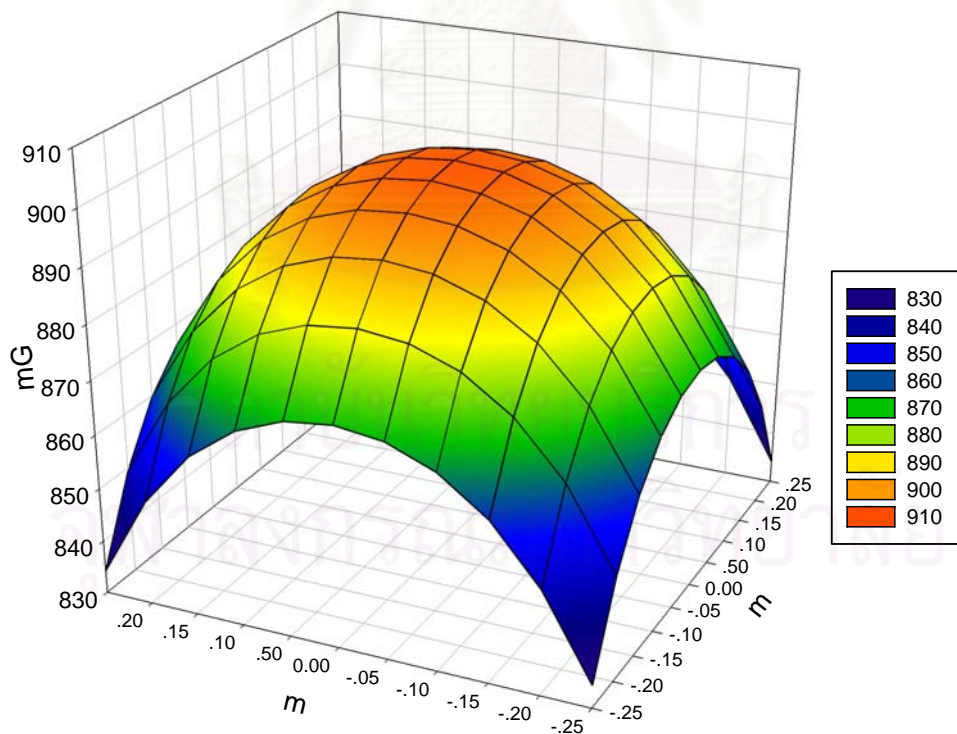
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	812.2	825.6	835.2	857.6	860.8	864.0	862.0	860.0	840.0	828.6	810.4
0.20	826.6	844.8	860.8	880.0	883.2	886.0	883.2	882.2	860.8	845.0	830.0
0.15	838.8	860.8	873.6	892.8	896.0	899.2	896.0	892.8	873.6	862.0	842.0
0.10	860.0	878.6	892.8	902.4	905.6	908.8	905.6	903.2	894.0	880.0	860.0
0.05	862.0	880.0	905.6	905.6	915.2	915.2	915.2	908.0	906.6	882.2	863.4
0.00	864.0	886.4	908.8	912.0	912.6	924.8	912.6	910.0	910.2	886.6	866.0
-0.05	863.4	882.2	906.6	908.0	915.2	915.2	915.2	905.6	905.6	880.0	862.0
-0.10	861.2	878.2	892.8	902.4	905.6	908.8	905.6	903.2	894.0	880.0	860.0
-0.15	840.0	862.2	874.4	893.2	896.0	900.0	898.0	894.2	875.2	863.4	840.4
-0.20	828.2	844.8	860.8	880.8	884.4	886.6	882.2	880.2	860.0	844.4	830.0
-0.25	812.2	828.2	834.0	860.0	862.0	866.8	864.2	858.8	838.8	830.2	806.8

ตารางที่ 4.10 ผลคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	834.2	849.4	859.7	866.1	869.6	870.7	869.6	866.1	859.7	849.4	834.2
0.20	849.4	864	873.6	879.6	882.8	883.8	882.8	879.6	873.6	864	849.4
0.15	859.7	873.6	882.7	888.3	891.3	892.2	891.3	888.3	882.7	873.6	859.7
0.10	866.1	879.6	888.3	893.6	896.4	897.2	896.4	893.6	888.3	879.6	866.1
0.05	869.6	882.8	891.3	896.4	899	899.9	899	896.4	891.3	882.8	869.6
0.00	870.7	883.8	892.2	897.2	899.9	900.7	899.9	897.2	892.2	883.8	870.7
-0.05	869.6	882.8	891.3	896.4	899	899.9	899	896.4	891.3	882.8	869.6
-0.10	866.1	879.6	888.3	893.6	896.4	897.2	896.4	893.6	888.3	879.6	866.1
-0.15	859.7	873.6	882.7	888.3	891.3	892.2	891.3	888.3	882.7	873.6	859.7
-0.20	849.4	864	873.6	879.6	882.8	883.8	882.8	879.6	873.6	864	849.4
-0.25	834.2	849.4	859.7	866.1	869.6	870.7	869.6	866.1	859.7	849.4	834.2



(ก)



(ข)

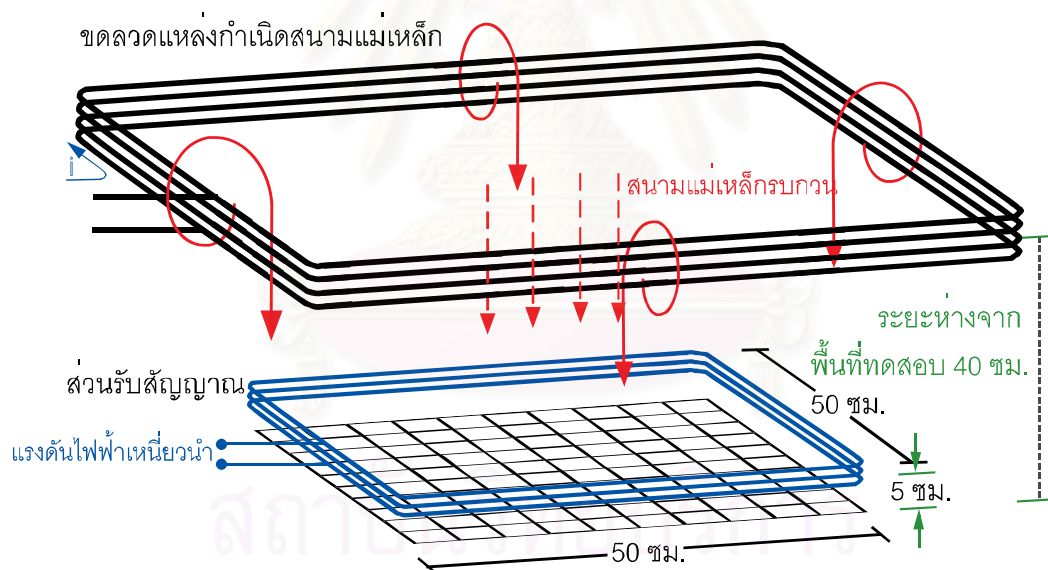
รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบก่อนกำบังจากการวัด (ก)

และการคำนวณ (ข) , $I_s = 0.9 \text{ A}$

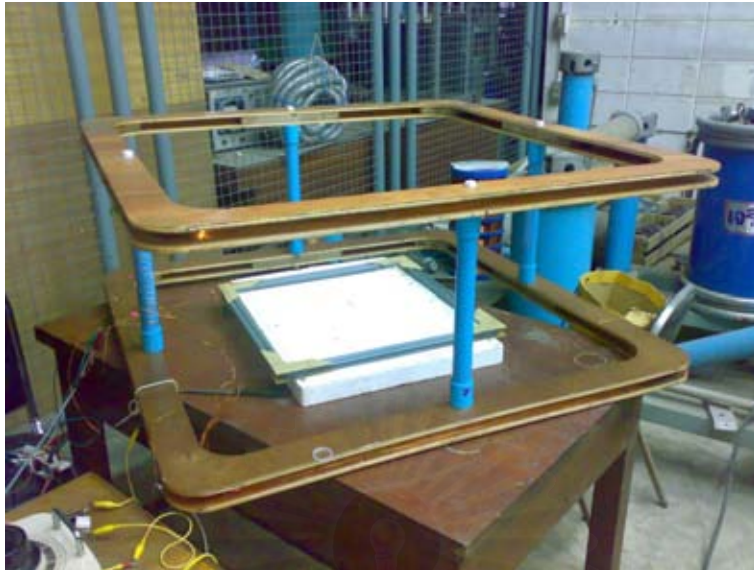
4.1.2 การทดสอบและประเมินผลค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของส่วนรับสัญญาณบนพื้นที่ทดสอบก่อนใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉีกทึฟ

ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับส่วนรับสัญญาณที่อยู่กับที่วางห่างกัน 35 เซนติเมตร ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสที่ไหลวนในขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว เพราะสิ่งที่มีผลต่อขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอื่นๆ เช่น ระยะห่าง พื้นที่หน้าตัด ความถี่ จำนวนรอบ จะให้เป็นตัวแปรควบคุมมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

ส่วนรับสัญญาณวางเหนือพื้นที่ทดสอบ 5 เซนติเมตร และวางใต้ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กรอบวง 35 เซนติเมตร วางให้จุดกึ่งกลางตรงกันทั้งหมด ดังรูปที่ 4.13 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบกับขนาดกระแสที่ไหลวนในขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กรอบวงและขนาดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่พิกัด (0,0) ทำการทดสอบและบันทึกค่า ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11 จากนั้นนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแฉีกทึฟต่อไป



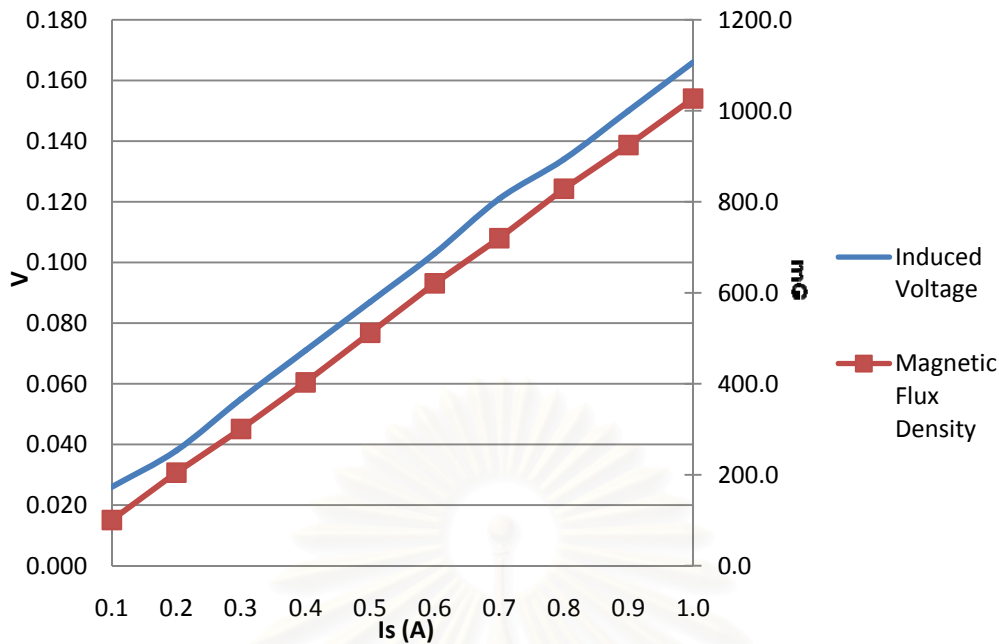
รูปที่ 4.9 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ



รูปที่ 4.10 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่พิกัด (0,0) บนพื้นที่ทดสอบจากการจ่ายกระแสไหลวนในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กด้วยขนาดต่างๆ

Is (A)	Induced Voltage (V)	B (mG)
0.1	0.026	100.6
0.2	0.038	204.8
0.3	0.055	300.8
0.4	0.071	403.2
0.5	0.087	512.0
0.6	0.103	620.8
0.7	0.121	720.0
0.8	0.134	828.8
0.9	0.150	924.8
1.0	0.166	1027



รูปที่ 4.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป

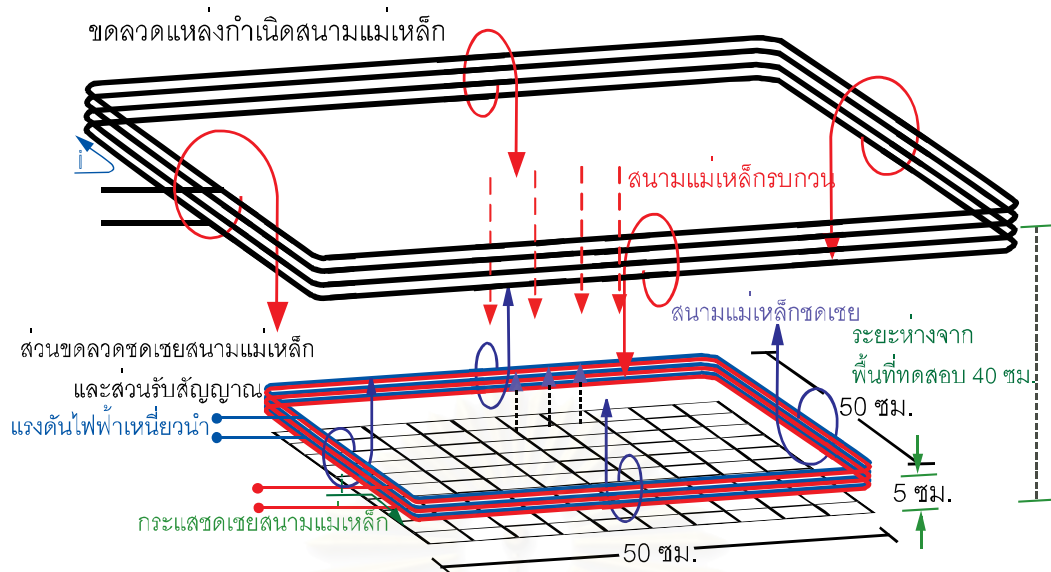
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่ากระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

4.2 การทดสอบและประเมินผลบนพื้นที่ทดสอบหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ

จากการออกแบบที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งออกแบบให้ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและส่วนรับสัญญาณ พันบนแกนอากาศเดียวกัน เชื่อมต่อกันด้วยส่วนวงจรเลียนเฟส ส่วนวงจรอินทรีเกรเตอร์ ส่วนวงจรปริแอมป์ และส่วนภาคขยายกำลัง ทำการทดสอบเพื่อคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบ และการทดสอบนี้ทำให้สามารถบอกถึงความสามารถในการลดทอนสัญญาณสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบังด้วยการใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อนและหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟในการคำนวณ การศึกษาลักษณะของสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่

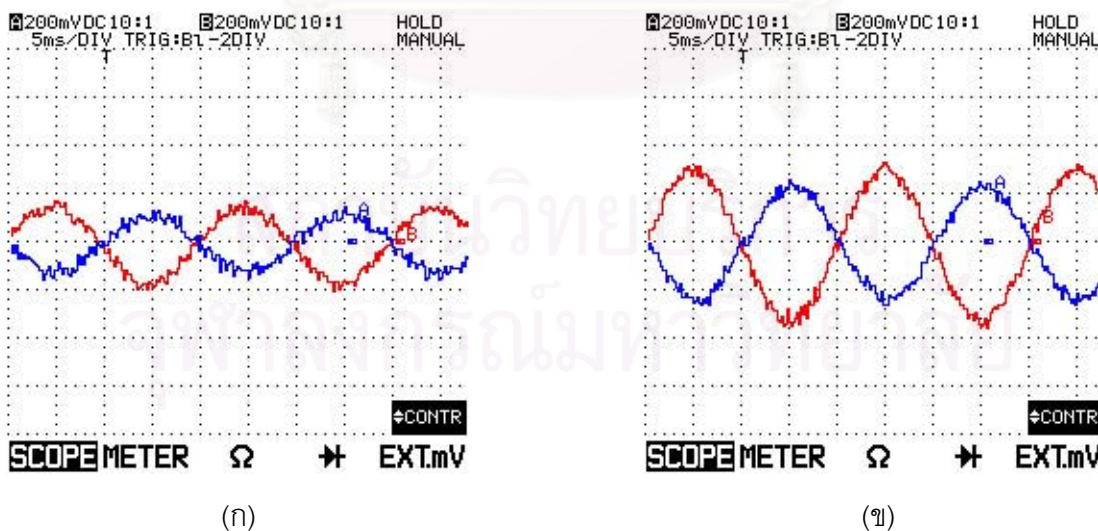
4.2.1 พื้นที่ทดสอบอยู่หลังระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ

เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กลัพธ์หลังการกำบังสนามแม่เหล็กแบบแก็กทิฟว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร ซึ่งการจัดวางขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก , ส่วนรับสัญญาณ, ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก และพื้นที่ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.12

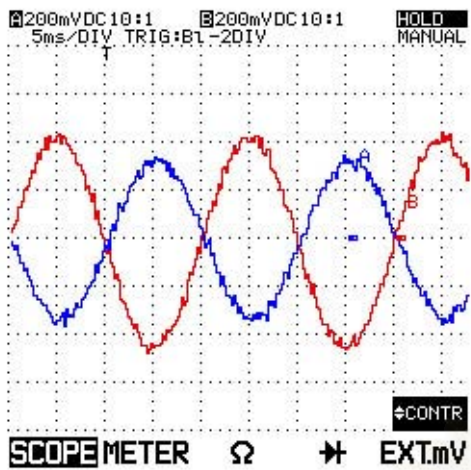


รูปที่ 4.12 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ

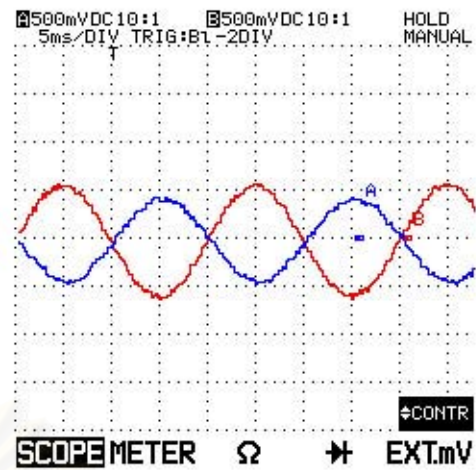
การปรับแต่งของส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จะสามารถปรับมุมเฟสของกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กด้วยส่วนวงจรเลื่อนเฟส ให้มีเฟสตรงข้ามกับกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ตามการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม FEMLAB ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สามารถปรับอัตราขยายแรงดันได้ในส่วนวงจรปริแอมป์ และสามารถปรับอัตราขยายกำลังได้ที่ส่วนขยายกำลัง ลักษณะของกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ปรับแต่งแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.13



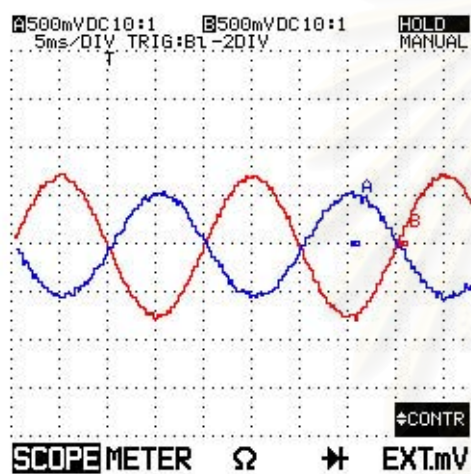
รูปที่ 4.13 แสดงกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s=0.1$ A (ก), $I_s=0.2$ A (ข)



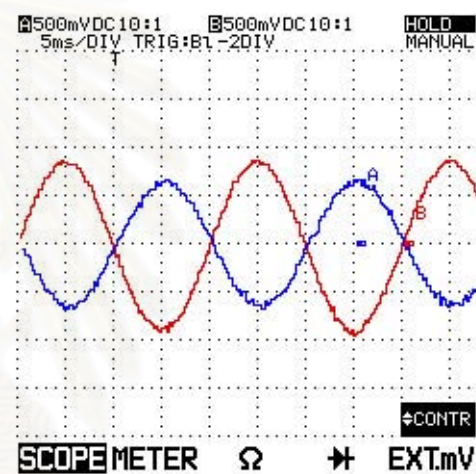
(a)



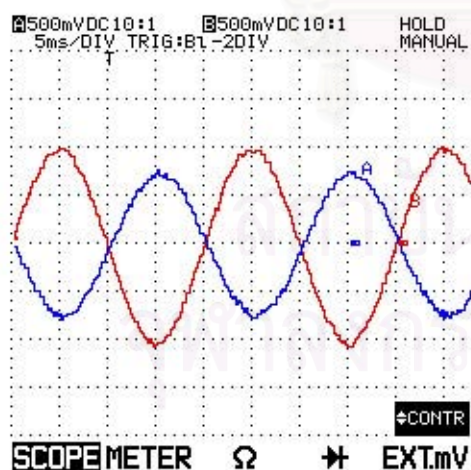
(ง)



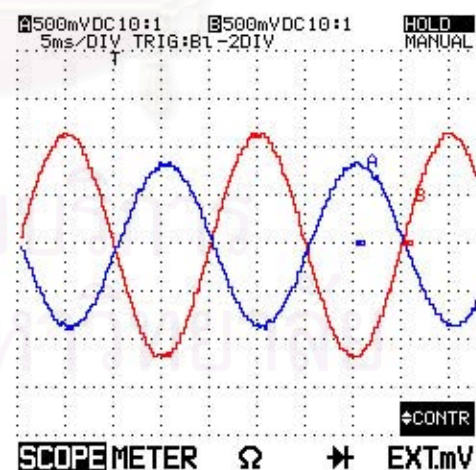
(จ)



(ฉ)

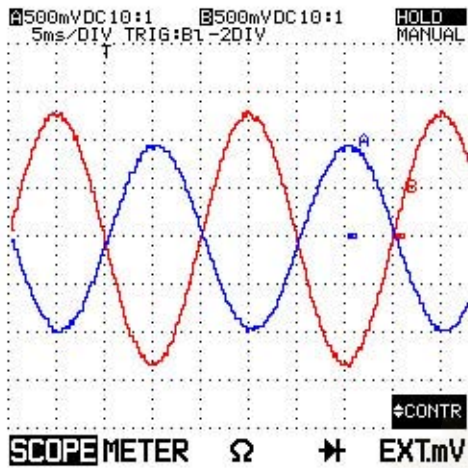


(ช)

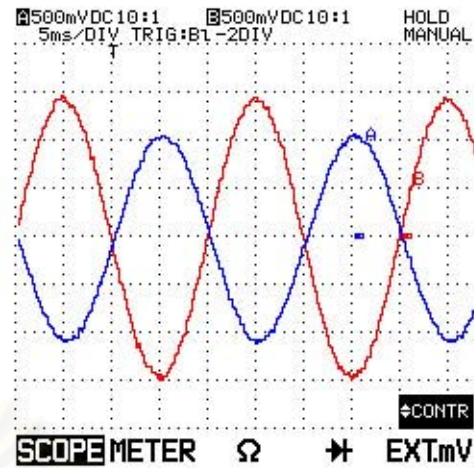


(ซ)

รูปที่ 4.13 แสดงกระแสในขดลวดขดเซยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s=0.3$ A (ค), $I_s=0.4$ A (ง), $I_s=0.5$ A (จ), $I_s=0.6$ A (ฉ), $I_s=0.7$ A (ช), $I_s=0.8$ A (ซ)



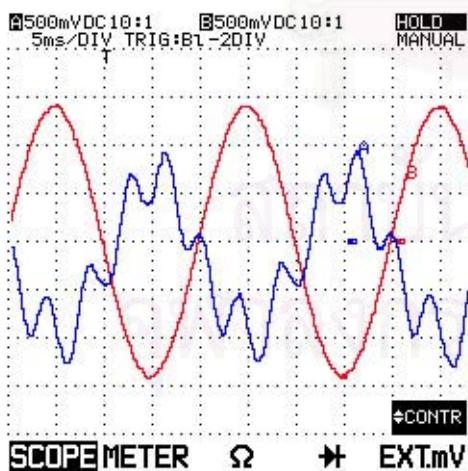
(ฉ)



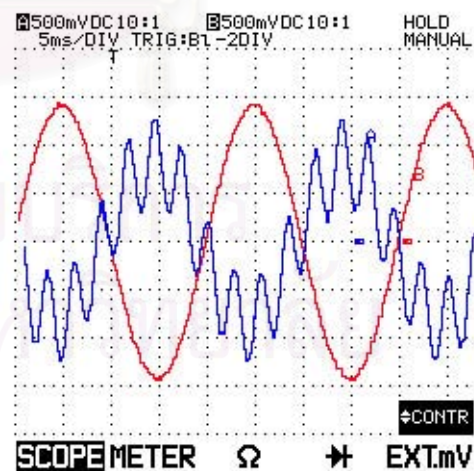
(ญ)

รูปที่ 4.13 แสดงกระแสในขดลวดขดเซยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B); $I_s=0.9$ A (ฉ), $I_s=1.0$ A (ญ)

การปรับอัตราขยายน้อยไปจะทำให้ระบบที่ออกแบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย (set point) ช้าหรือระบบไม่อาจเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เลย จึงจำเป็นต้องปรับอัตราขยายให้มากเข้าไว้ เพื่อให้กระบวนการของระบบเข้าสู่เป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แต่ข้อควรระวังในการปรับแต่งอัตราขยายในส่วนวงจรรีแอมป์และส่วนภาคขยายกำลังที่มากเกินไป จะส่งผลให้ระบบเกิดการแกว่งจนขาดเสถียรภาพ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เป็นระบบที่มีอัตราขยายที่มากเกินไปเล็กน้อยและอัตราขยายที่มากเกินไปมาก

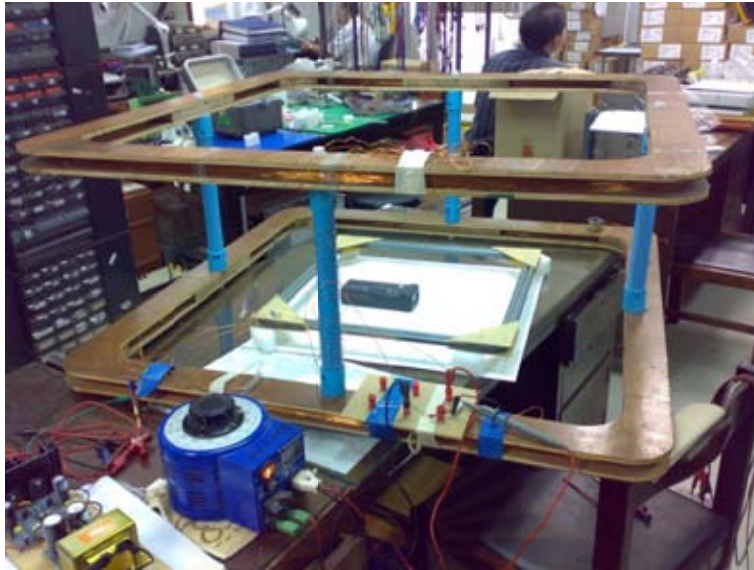


(ก)

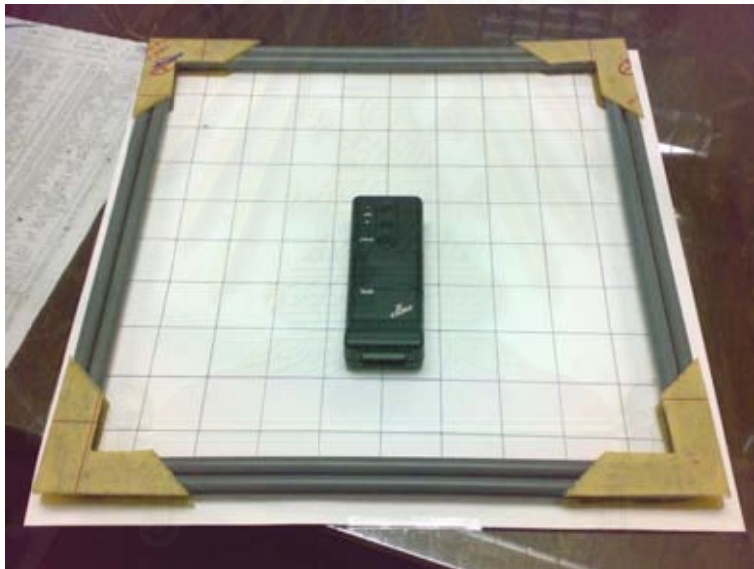


(ข)

รูปที่ 4.14 แสดงกระแสในขดลวดขดเซยสนามแม่เหล็ก (กราฟ A) และกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (กราฟ B) เมื่อปรับอัตราขยายมากเกินไป



รูปที่ 4.15 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังระบบกำบัง 5 เซนติเมตร

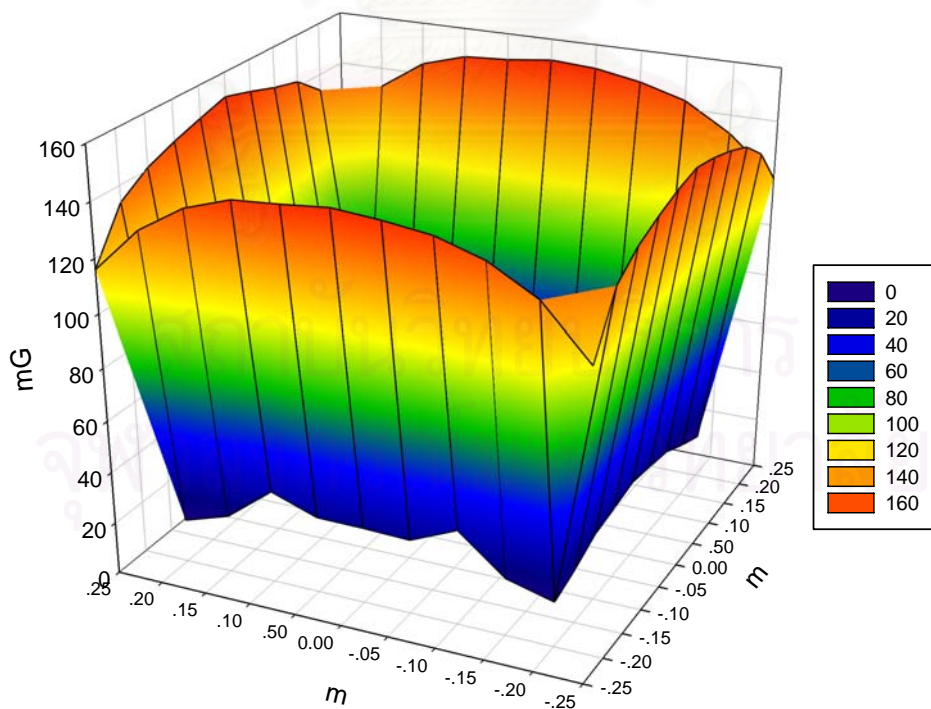


รูปที่ 4.16 การวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแล้ว

การวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังระบบกำบังสนามแม่เหล็ก 5 เซนติเมตรบนพื้นที่ทดสอบ ตำแหน่งพื้นที่ทดสอบนี้เป็นตำแหน่งที่สำคัญ เพราะเป็นตำแหน่งที่วางอุปกรณ์หรือสิ่งที่ต้องการกำบังอยู่ ซึ่งผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตำแหน่งนี้แสดงดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.16 และ รูปที่ 4.17 ถึง 4.21

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A

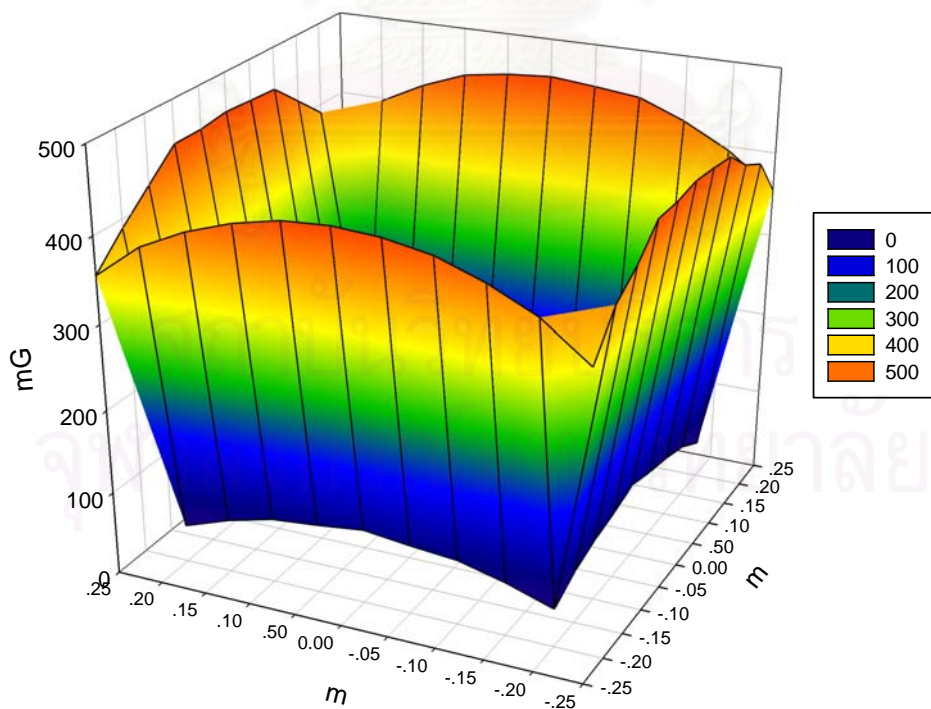
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	114.4	132.8	142.6	148.0	150.2	151.6	150.0	148.8	143.2	132.8	116.0
0.20	134.0	17.4	22.2	36.6	28.8	29.4	29.6	35.8	22.2	16.6	134.0
0.15	140.8	21.0	34.4	40.6	44.4	46.6	44.4	40.0	34.0	20.8	140.8
0.10	144.8	25.8	40.0	53.0	57.2	59.2	58.0	53.0	39.8	24.0	144.8
0.05	148.0	27.6	44.4	58.8	63.2	64.8	63.2	58.8	44.4	27.6	148.0
0.00	150.0	29.6	46.8	60.4	65.4	67.0	65.4	60.2	48.2	28.0	151.0
-0.05	148.0	28.0	43.8	57.8	63.2	64.8	63.2	59.0	44.6	27.6	148.0
-0.10	145.0	26.0	41.0	53.0	57.8	60.0	58.0	52.8	39.6	23.8	144.6
-0.15	141.0	21.0	35.0	41.0	44.8	47.0	44.4	39.8	33.8	20.8	142.0
-0.20	133.0	16.8	20.0	37.0	30.0	31.0	29.6	34.8	20.0	16.6	133.8
-0.25	118.2	133.0	143.2	148.0	151.0	152.0	150.0	149.0	144.0	132.8	117.0



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำลังจากกราวด์, $I_s = 0.1$ A

ตารางที่ 4.13 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A

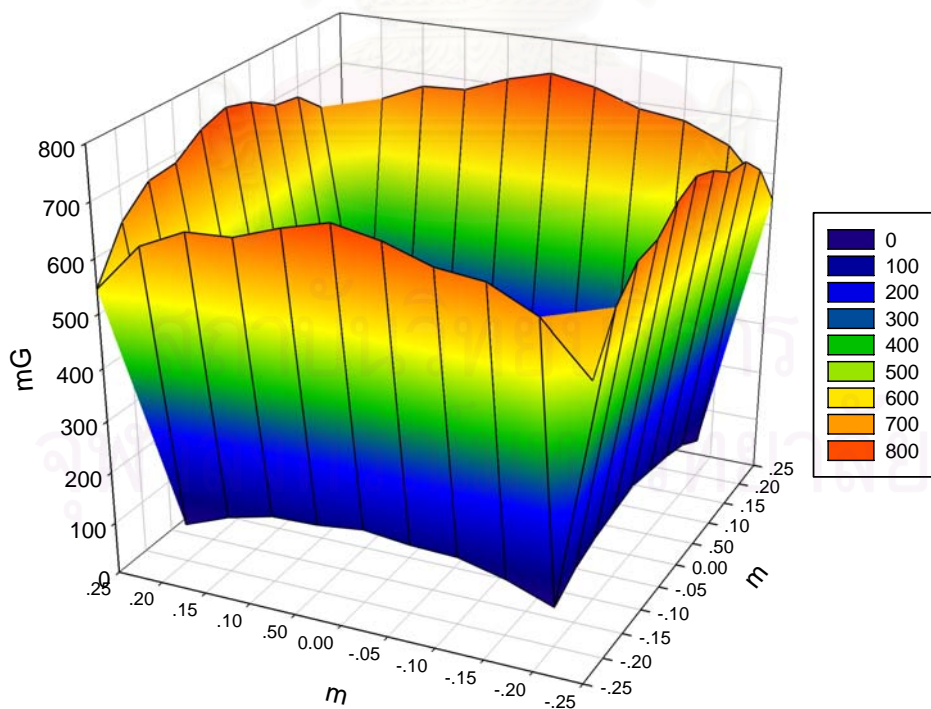
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	356.2	397.0	422.8	442.0	451.6	455.0	451.6	440.0	422.0	396.6	355.8
0.20	399.0	45.8	64.2	78.2	83.2	89.6	83.0	77.8	64.0	45.0	389.8
0.15	420.0	63.4	105.4	128.0	134.4	144.0	135.0	127.8	104.8	64.0	420.0
0.10	449.8	73.8	124.4	160.0	172.8	176.0	172.6	161.0	124.0	72.8	449.8
0.05	450.0	80.2	137.2	172.8	190.0	192.0	190.0	172.8	137.2	80.0	450.0
0.00	454.4	89.6	150.4	175.4	195.2	201.6	195.2	174.0	150.0	89.4	454.4
-0.05	451.0	80.0	136.0	173.0	190.0	192.8	190.0	171.0	136.8	80.0	452.0
-0.10	446.2	73.0	124.0	160.2	173.0	176.2	171.0	160.4	124.2	73.0	449.8
-0.15	420.0	63.0	104.2	127.4	135.0	145.0	134.2	127.0	105.2	63.2	420.0
-0.20	404.0	44.0	62.8	78.2	83.0	90.0	82.2	77.0	65.2	44.0	389.8
-0.25	355.0	395.0	423.0	444.0	450.0	455.0	451.0	443.0	423.0	396.6	356.2



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำลังจากกราวด์, $I_s = 0.3 \text{ A}$

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A

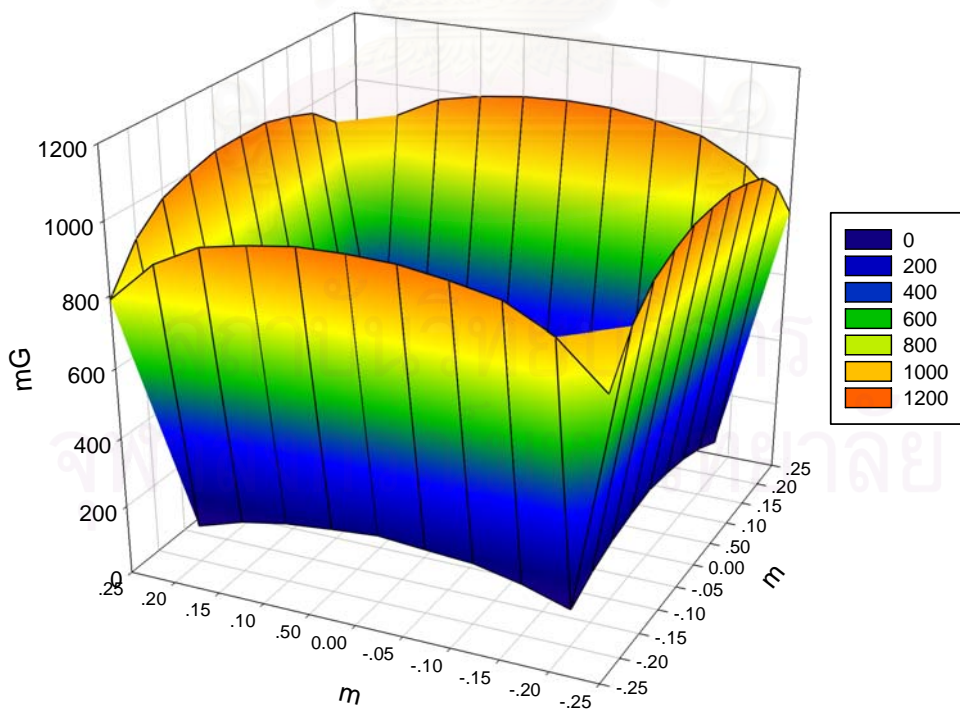
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	547.2	636.0	678.4	688.0	716.8	733.0	710.0	680.0	675.4	636.0	545.0
0.20	634.4	76.6	109.4	131.2	134.4	144.0	133.2	130.2	108.2	74.2	635.2
0.15	678.4	105.8	172.8	204.8	227.2	230.4	226.2	205.2	171.8	104.2	679.8
0.10	684.4	121.8	205.6	259.2	278.0	284.8	276.8	258.8	202.8	121.0	684.8
0.05	718.8	131.2	230.0	274.8	307.2	313.6	307.2	274.6	231.0	131.0	718.8
0.00	735.2	140.8	233.2	284.4	316.8	326.4	316.8	284.8	232.0	139.8	735.2
-0.05	717.0	130.2	232.0	273.2	307.2	313.6	306.6	278.0	232.2	130.2	720.0
-0.10	686.0	120.2	205.6	260.0	277.8	285.0	277.2	258.5	203.0	119.0	688.8
-0.15	678.0	104.8	172.2	203.2	226.2	230.0	226.0	204.4	170.2	104.8	680.2
-0.20	635.0	75.0	108.8	131.4	133.8	144.0	132.2	129.8	107.8	73.0	635.2
-0.25	550.2	642.0	677.8	688.8	718.8	734.4	712.2	679.9	675.2	638.8	544.8



รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำลังจากกราวด์, $I_s = 0.5$ A

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A

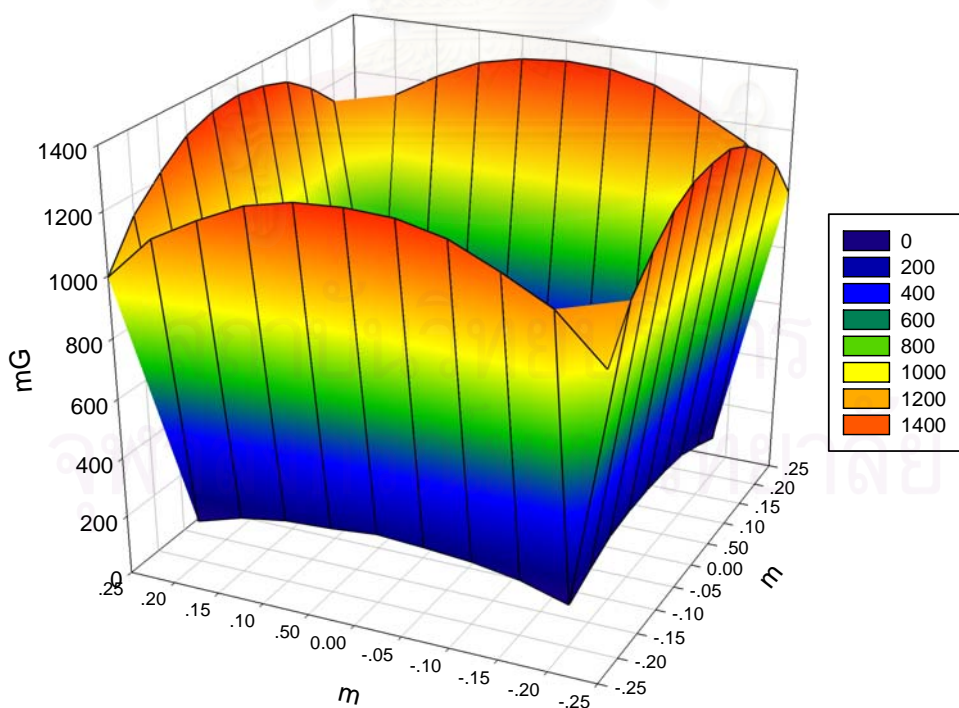
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	787	906	973	998	1017	1021	1018	999	973	906	789
0.20	904	108	150	179	188	198	187	174	149	107	906
0.15	970	147	250	301	314	330	313	300	247	147	972
0.10	1000	173	300	374	406	410	405	374	300	171	1000
0.05	1019	188	316	400	438	448	438	400	316	187	1020
0.00	1020	198	328	402	448	464	448	402	330	198	1022
-0.05	1017	189	316	400	438	448	438	399	314	187	1021
-0.10	998	173	302	375	407	411	405	374	298	171	1000
-0.15	971	146	249	298	314	329	313	299	248	146	972
-0.20	905	108	150	179	188	200	187	176	147	106	907
-0.25	788	906	973	999	1018	1022	1016	1000	973	907	789



รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำลังจากกราวด์, $I_s = 0.7 \text{ A}$

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A

พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	992	1139	1219	1289	1324	1331	1322	1288	1220	1140	996
0.20	1134	143	189	214	227	237	222	214	189	142	1136
0.15	1220	182	307	374	394	429	392	372	307	182	1221
0.10	1287	218	370	477	509	528	508	477	369	217	1290
0.05	1322	230	401	505	557	579	555	505	400	229	1322
0.00	1330	233	435	534	579	598	579	534	434	232	1332
-0.05	1326	229	400	505	555	579	557	505	401	230	1319
-0.10	1288	217	370	477	507	527	508	475	369	216	1290
-0.15	1221	182	307	373	393	428	391	372	306	180	1226
-0.20	1133	142	180	214	227	236	222	212	180	142	1138
-0.25	994	1140	1220	1290	1325	1333	1321	1289	1222	1138	997



รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังระบบกำลังจากการวัด, $I_s = 0.9$ A

เมื่อสร้างระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมป์เสริมแล้วจำเป็นต้องทดสอบหาความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็ก ซึ่งความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบัง จากสมการที่ 2.5 สมการที่ 2.20 ในบทที่ 2 ความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวสามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SE_{dB} = 20 \log \frac{\bar{B}_{unshielded}}{\bar{B}_{shielded}} \quad (4.1)$$

เมื่อ $\bar{B}_{unshielded}$ คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กก่อนกำบัง
 $\bar{B}_{shielded}$ คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังกำบัง

จากสมการที่ 4.1 สามารถหาค่าประสิทธิผลของการกำบังของระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมป์ เพื่อหาความสามารถในการลดทอนสนามแม่เหล็กได้ดังตารางที่ 4.17 ถึงตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพของการกำบังบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A

พิกัด y/x (m)	ประสิทธิภาพของการกำบัง (dB)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	-2.68	-3.59	-4.08	-4.26	-4.35	-4.40	-4.36	-4.35	-4.03	-3.69	-2.80
0.20	-3.67	14.20	12.39	8.12	10.27	10.13	10.00	8.29	12.39	14.68	-3.65
0.15	-3.96	12.87	8.80	7.60	6.84	6.46	6.88	7.66	8.91	12.90	-3.98
0.10	-4.07	11.16	7.73	5.34	4.69	4.41	4.57	5.32	7.74	11.75	-4.09
0.05	-4.22	10.64	6.84	4.44	3.88	3.75	3.88	4.45	6.84	10.63	-4.22
0.00	-4.30	10.07	6.42	4.24	3.67	3.53	3.67	4.27	6.16	10.56	-4.36
-0.05	-4.22	10.52	6.96	4.60	3.88	3.75	3.88	4.43	6.80	10.64	-4.22
-0.10	-4.10	11.05	7.48	5.32	4.60	4.30	4.59	5.39	7.82	11.86	-4.06
-0.15	-4.00	12.81	8.65	7.44	6.80	6.38	6.88	7.79	8.98	12.91	-4.04
-0.20	-3.59	14.50	13.27	7.99	9.92	9.71	10.06	8.63	13.35	14.68	-3.62
-0.25	-2.95	-3.59	-4.11	-4.22	-4.38	-4.36	-4.25	-4.26	-4.08	-3.57	-2.78

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพของการกำบังบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A

พิกัด y/x (m)	ประสิทธิภาพของการกำบัง (dB)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	-2.65	-3.39	-3.83	-4.12	-4.20	-4.22	-4.19	-4.05	-3.79	-3.40	-2.63
0.20	-3.43	15.47	12.94	11.32	10.79	10.24	10.81	11.31	12.99	15.63	-3.31
0.15	-3.77	13.05	8.73	7.14	6.81	6.21	6.73	7.15	8.78	12.97	-3.84
0.10	-4.27	11.83	7.39	5.30	4.63	4.56	4.64	5.23	7.42	11.88	-4.36
0.05	-4.17	11.10	6.63	4.63	3.90	3.90	3.90	4.63	6.59	11.13	-4.28
0.00	-4.16	10.24	5.83	4.59	3.76	3.48	3.76	4.69	5.85	10.31	-4.21
-0.05	-4.30	11.13	6.67	4.62	3.90	3.86	3.90	4.72	6.66	11.13	-4.21
-0.10	-4.29	11.86	7.42	5.27	4.62	4.55	4.72	5.23	7.43	11.87	-4.37
-0.15	-3.80	13.08	8.62	7.20	6.76	6.17	6.79	7.21	8.75	13.08	-3.84
-0.20	-3.56	15.82	13.11	11.36	10.83	10.22	10.89	11.40	12.82	15.83	-3.29
-0.25	-2.64	-3.34	-3.80	-4.13	-4.16	-4.22	-4.17	-4.12	-3.81	-3.38	-2.67

ตารางที่ 4.19 ประสิทธิภาพของการกำบังบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A

พิกัด y/x (m)	ประสิทธิภาพของการกำบัง (dB)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	-1.80	-2.98	-3.42	-3.42	-3.72	-3.74	-3.66	-3.28	-3.41	-2.96	-1.77
0.20	-2.96	15.59	12.67	11.15	11.06	10.52	11.08	11.23	12.72	15.87	-2.96
0.15	-3.42	12.96	8.87	7.51	6.67	6.60	6.71	7.52	8.92	13.10	-3.43
0.10	-3.38	11.80	7.42	5.58	5.03	4.88	5.07	5.58	7.56	11.86	-3.37
0.05	-3.74	11.27	6.56	5.13	4.22	4.15	4.23	5.17	6.53	11.28	-3.73
0.00	-3.76	10.71	6.50	4.89	4.01	3.91	4.03	4.89	6.54	10.79	-3.74
-0.05	-3.70	11.33	6.49	5.18	4.23	4.20	4.25	5.08	6.45	11.30	-3.76
-0.10	-3.38	11.92	7.44	5.54	5.03	4.88	5.06	5.60	7.53	12.00	-3.43
-0.15	-3.41	13.07	8.94	7.60	6.72	6.62	6.72	7.56	9.06	13.07	-3.40
-0.20	-2.95	15.79	12.75	11.15	11.12	10.53	11.15	11.25	12.76	16.03	-2.94
-0.25	-1.75	-3.05	-3.40	-3.39	-3.71	-3.69	-3.68	-3.35	-3.41	-3.04	-1.82

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพผลของการกำบังบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A

พิกัด y/x (m)	ประสิทธิภาพผลของการกำบัง (dB)										
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.25	-2.11	-2.93	-3.46	-3.65	-3.77	-3.76	-3.76	-3.64	-3.48	-2.93	-2.09
0.20	-2.92	15.76	13.00	11.52	11.15	10.72	11.20	11.83	13.12	15.89	-2.91
0.15	-3.44	13.20	8.73	7.14	6.86	6.51	6.88	7.21	8.84	13.25	-3.44
0.10	-3.66	11.84	7.15	5.37	4.70	4.70	4.73	5.41	7.18	11.93	-3.64
0.05	-3.78	11.15	6.80	4.83	4.11	4.00	4.13	4.84	6.82	11.20	-3.78
0.00	-3.75	10.71	6.55	4.86	4.00	3.82	4.02	4.88	6.54	10.78	-3.72
-0.05	-3.74	11.11	6.82	4.83	4.13	4.02	4.14	4.86	6.86	11.23	-3.77
-0.10	-3.62	11.84	7.12	5.38	4.69	4.68	4.73	5.37	7.22	11.93	-3.66
-0.15	-3.49	13.31	8.77	7.24	6.87	6.56	6.91	7.16	8.79	13.31	-3.41
-0.20	-2.92	15.82	13.03	11.55	11.16	10.66	11.22	11.73	13.23	15.94	-2.89
-0.25	-2.08	-2.93	-3.48	-3.64	-3.76	-3.77	-3.76	-3.66	-3.46	-2.95	-2.13

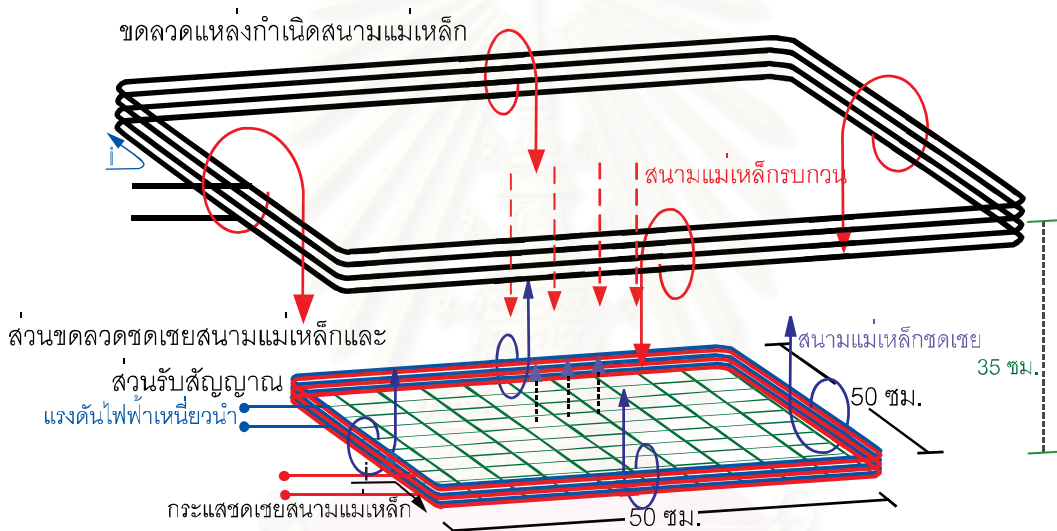
ตารางที่ 4.21 ประสิทธิภาพผลของการกำบังบนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A

พิกัด y/x (m)	ประสิทธิภาพผลของการกำบัง (dB)										
	-1.74	-2.80	-3.28	-3.54	-3.74	-3.75	-3.71	-3.51	-3.24	-2.77	-1.79
0.25	-2.75	15.45	13.18	12.27	11.79	11.46	11.99	12.29	13.18	15.47	-2.73
0.20	-3.25	13.48	9.08	7.55	7.15	6.43	7.17	7.60	9.09	13.52	-3.23
0.15	-3.50	12.12	7.64	5.54	5.01	4.72	5.02	5.55	7.68	12.18	-3.52
0.10	-3.71	11.64	7.08	5.07	4.32	3.97	4.34	5.10	7.11	11.71	-3.70
0.05	-3.75	11.60	6.40	4.64	3.95	3.78	3.96	4.63	6.42	11.63	-3.74
0.00	-3.73	11.71	7.11	5.10	4.34	3.97	4.32	5.07	7.08	11.64	-3.69
-0.05	-3.50	12.16	7.66	5.53	5.04	4.73	5.02	5.58	7.69	12.20	-3.52
-0.10	-3.25	13.50	9.10	7.58	7.16	6.45	7.22	7.62	9.13	13.62	-3.28
-0.15	-2.72	15.49	13.59	12.30	11.82	11.50	11.98	12.36	13.57	15.47	-2.74
-0.20	-1.75	-2.78	-3.30	-3.52	-3.73	-3.74	-3.69	-3.53	-3.27	-2.74	-1.84
-0.25	-1.74	-2.80	-3.28	-3.54	-3.74	-3.75	-3.71	-3.51	-3.24	-2.77	-1.79

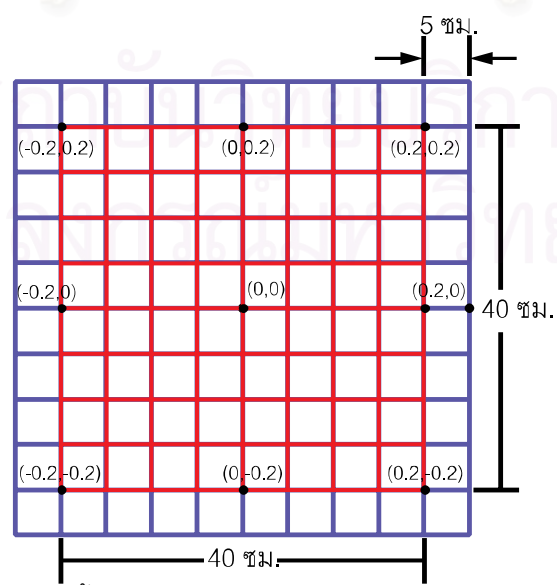
จากตารางที่ 4.17 ถึง 4.21 ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟสามารถลดทอนได้ดีที่สุด 6.33 เท่า เทียบเป็นค่าประสิทธิผลของการกำบังประมาณ 16.03 dB ที่ตำแหน่ง (0.20, -0.20) บนพื้นที่ทดสอบขณะจ่ายกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก 0.5 A

4.2.2 พื้นที่ทดสอบอยู่ระนาบเดียวกับระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ

เพื่อศึกษาลักษณะการชดเชยของสนามแม่เหล็กว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร เนื่องจากพื้นที่ทดสอบที่ศึกษาวางอยู่ระนาบเดียวกับระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับส่วนรับสัญญาณที่เทียบจุดอ้างอิงเท่ากับศูนย์ติดตั้งอยู่ ซึ่งการจัดวางขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, ส่วนรับสัญญาณ, ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก และพื้นที่ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงการจัดวางส่วนรับสัญญาณ, ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก, ส่วนขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและพื้นที่ทดสอบ

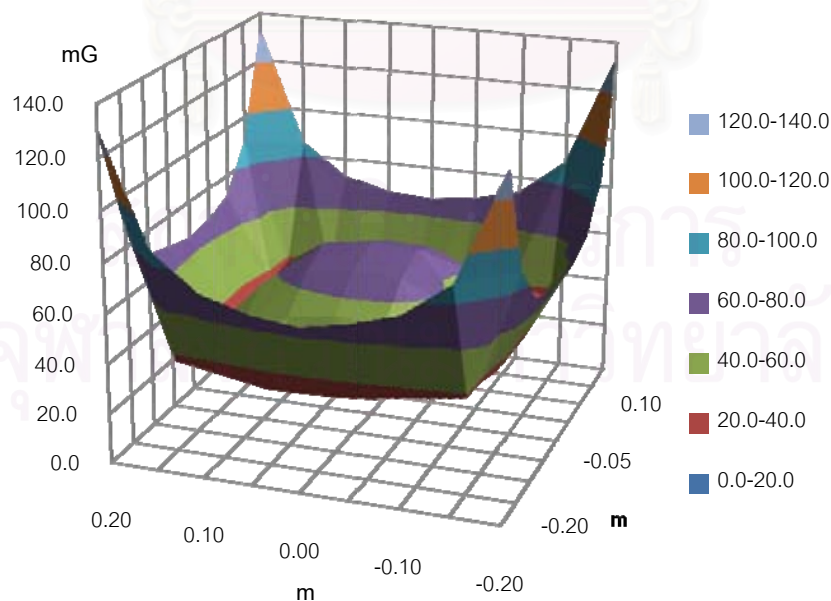


รูปที่ 4.23 ลักษณะพื้นที่ทดสอบสนามแม่เหล็กและตัวอย่างพิกัดที่ทำการวัด

จากรูปที่ 4.23 พื้นที่ทดสอบมีลักษณะคล้ายพื้นที่ทดสอบเดิมแต่มีขนาดเล็กลงด้านละ 5 เซนติเมตร (พื้นที่ตารางสีแดง) เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ขอบพื้นที่ทดสอบเดิมได้ เพราะเป็นตำแหน่งเดียวกับขดลวดส่วนรับสัญญาณ และขดลวดส่วนชดเชยสนามแม่เหล็กติดตั้งอยู่

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำบังขณะจ่ายกระแสขนาด 0.1 A

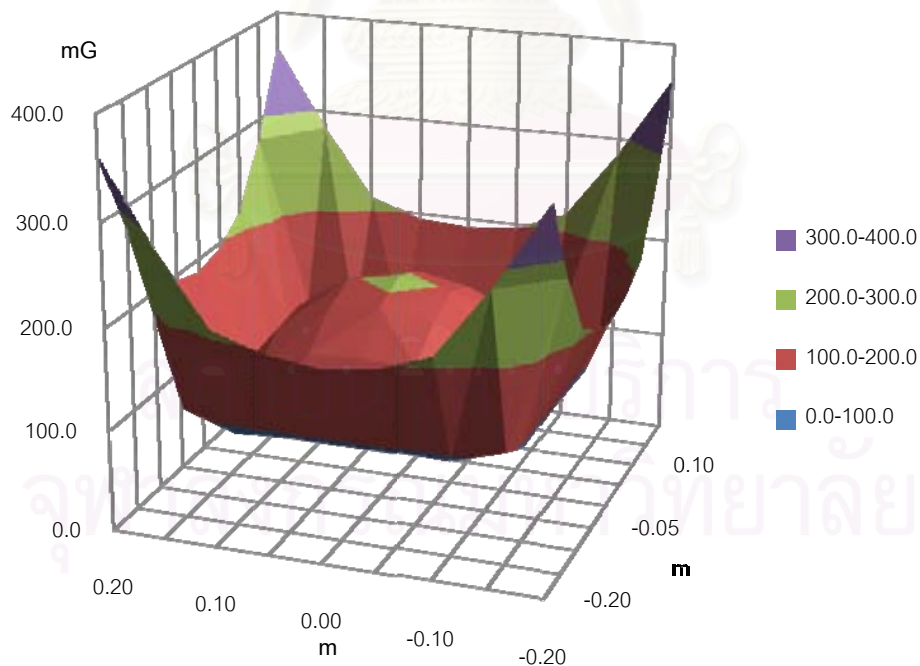
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)								
	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
0.20	130.3	87.1	73.1	67.3	65.3	68.9	74.6	88.7	131.8
0.15	88.7	36.9	33.8	30.7	31.2	32.2	35.4	38.5	89.4
0.10	70.7	35.9	46.3	53.0	55.6	54.6	47.8	37.4	72.8
0.05	67.6	30.7	56.7	64.5	66.8	66.0	58.2	33.8	67.6
0.00	65.0	32.2	48.9	69.9	72.5	71.5	50.4	33.8	66.6
-0.05	66.8	30.7	55.1	63.4	66.8	66.0	57.7	33.5	67.3
-0.10	71.5	36.4	46.8	52.0	56.2	53.6	47.8	38.0	71.5
-0.15	89.4	38.5	35.4	32.2	31.2	30.7	33.8	36.9	88.7
-0.20	132.6	85.8	72.5	67.6	66.6	68.9	73.8	88.7	132.9



รูปที่ 4.24 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำบังจากการวัด, $I_s = 0.1$ A

ตารางที่ 4.23 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลัง
ขณะจ่ายกระแสขนาด 0.3 A

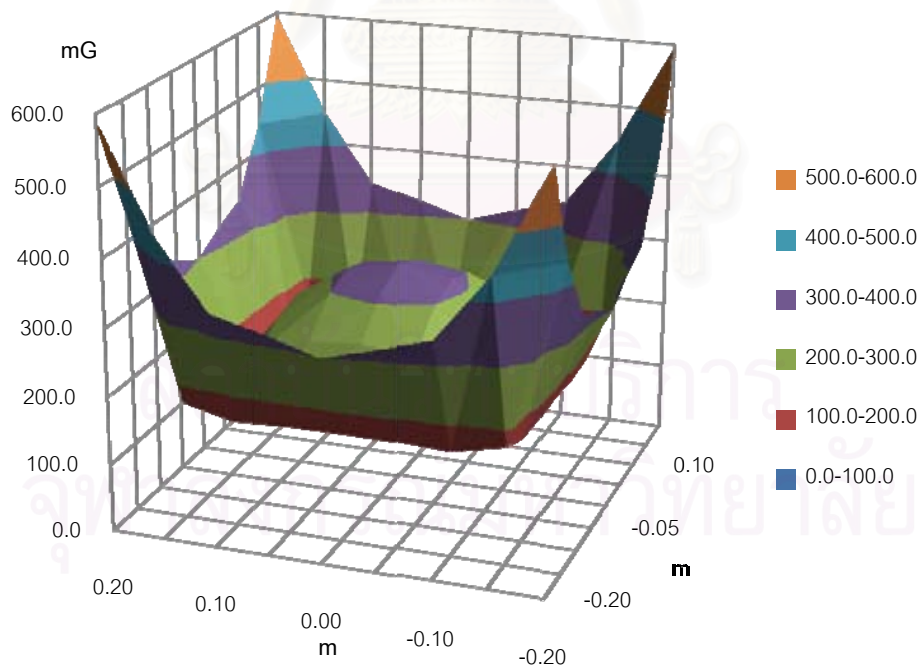
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)								
	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
0.20	361.3	280.5	212.0	195.4	189.0	195.4	213.5	281.2	362.1
0.15	279.2	109.4	92.3	95.0	94.7	95.2	94.2	110.1	280.2
0.10	213.5	92.3	135.7	158.2	161.2	159.2	137.1	93.2	216.3
0.05	193.9	94.0	159.5	184.5	194.4	184.5	161.0	94.2	195.9
0.00	186.2	94.7	164.2	197.9	206.8	197.9	165.4	95.5	188.5
-0.05	194.2	94.2	159.0	185.0	194.4	184.5	159.7	94.0	196.2
-0.10	216.3	93.2	137.1	159.2	160.2	158.2	135.7	92.3	213.5
-0.15	279.2	109.4	92.3	95.0	94.7	95.2	94.2	110.1	281.2
-0.20	363.1	282.7	213.5	194.4	191.2	195.9	215.8	283.7	363.6



รูปที่ 4.25 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลังจากการวัด, $I_s =$
0.3 A

ตารางที่ 4.24 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำลัง
ขณะจ่ายกระแสขนาด 0.5 A

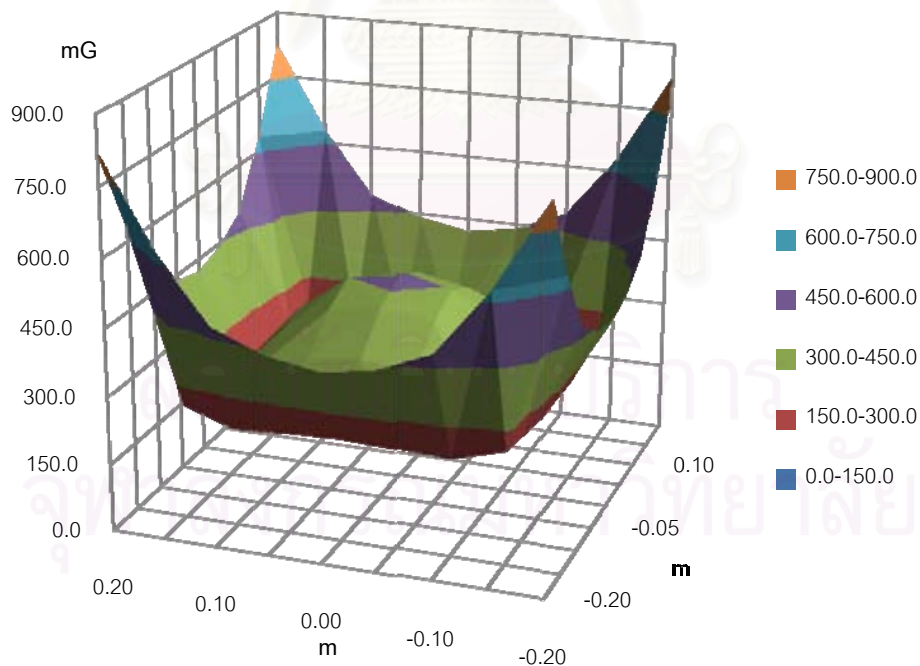
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)								
	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
0.20	588.5	438.3	340.7	321.4	298.1	319.4	342.7	440.0	591.4
0.15	440.0	173.0	154.9	158.8	159.5	158.8	154.9	172.1	441.4
0.10	341.2	154.9	228.4	255.6	263.3	254.3	225.3	153.9	343.9
0.05	322.6	155.1	255.1	298.1	309.8	298.1	254.3	152.5	322.6
0.00	298.1	155.6	266.7	313.6	329.1	314.8	264.7	155.6	295.7
-0.05	324.5	154.6	253.9	300.1	309.3	298.1	253.9	151.0	323.8
-0.10	343.9	153.9	225.3	254.3	263.3	255.6	228.4	154.9	341.2
-0.15	443.1	171.1	152.7	158.3	159.5	157.1	154.9	171.3	445.5
-0.20	592.9	447.5	342.2	321.4	298.6	322.6	343.6	447.7	593.1



รูปที่ 4.26 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบระนาบเดียวกับระบบกำลังจากการวัด, $I_s =$
0.5 A

ตารางที่ 4.25 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลัง
ขณะจ่ายกระแสขนาด 0.7 A

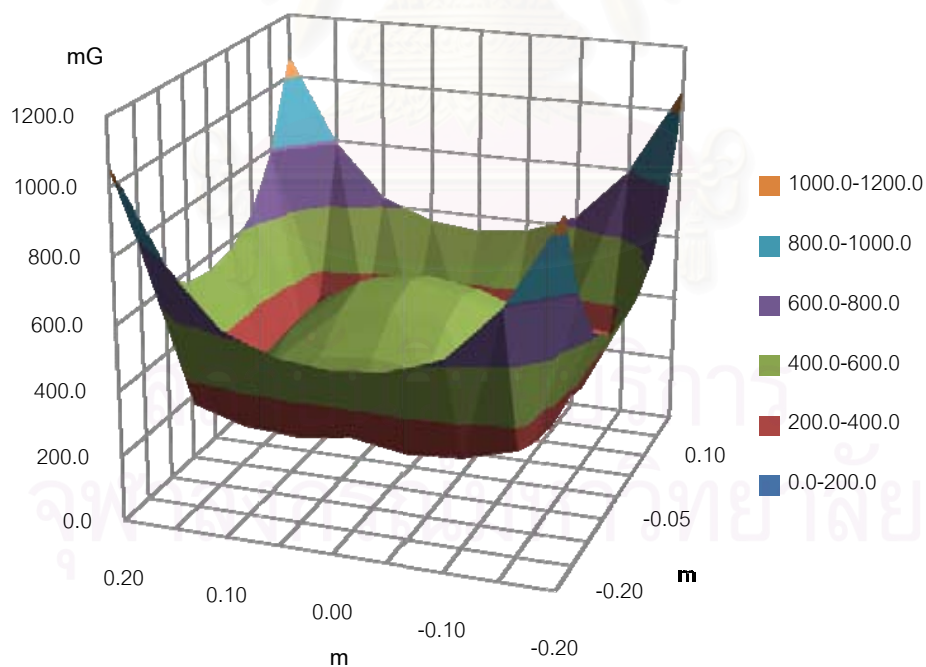
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)								
	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
0.20	821.8	627.8	483.8	437.8	418.6	437.8	485.3	630.0	822.7
0.15	631.7	253.4	215.0	223.2	227.0	222.7	216.0	249.6	634.1
0.10	485.3	238.1	311.0	345.6	361.0	343.9	310.6	236.2	489.6
0.05	438.0	224.6	344.6	414.7	433.9	414.7	343.9	224.2	439.2
0.00	420.0	228.0	363.4	449.3	464.6	447.8	361.4	226.6	419.8
-0.05	441.8	223.9	342.5	413.0	434.4	413.0	341.3	224.2	439.9
-0.10	487.2	236.2	310.6	344.6	358.6	343.2	309.6	235.2	490.6
-0.15	634.1	249.6	216.0	222.7	227.0	223.2	215.0	253.4	631.7
-0.20	822.0	629.0	484.8	441.6	420.2	439.2	487.4	630.0	825.8



รูปที่ 4.27 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลังจากการวัด, $I_s = 0.7$ A

ตารางที่ 4.26 ผลการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลัง
ขณะจ่ายกระแสขนาด 0.9 A

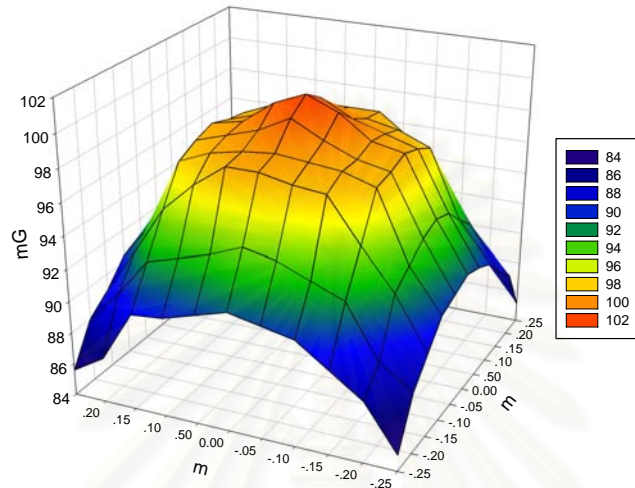
พิกัด y/x (m)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)								
	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
0.20	1057.5	787.6	626.0	563.8	548.2	566.4	627.2	789.8	1059.7
0.15	789.3	322.7	276.0	264.4	287.7	262.9	274.6	321.2	789.3
0.10	627.7	282.9	400.5	451.0	466.6	449.6	399.0	281.4	627.7
0.05	563.8	264.4	453.7	536.5	559.9	535.1	452.2	262.9	563.8
0.00	549.7	288.2	469.0	571.5	598.8	571.5	467.5	286.7	549.7
-0.05	566.2	262.9	452.2	535.1	558.4	533.6	450.8	261.5	568.6
-0.10	629.6	281.4	399.0	449.6	465.1	448.1	397.5	279.9	631.1
-0.15	789.3	321.2	274.6	262.9	287.7	264.4	276.0	322.7	789.3
-0.20	1059.0	789.0	627.4	565.2	549.7	567.9	628.6	791.2	1061.2



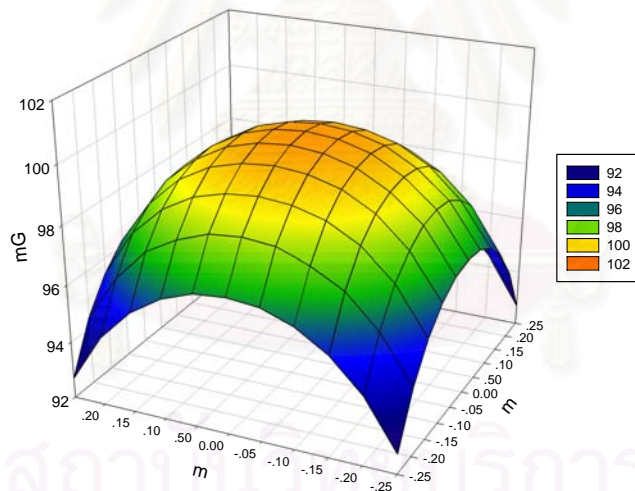
รูปที่ 4.28 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบขนาดเดียวกับระบบกำลังจากการวัด, $I_s =$
0.9 A

4.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

จากผลการวัดค่าและผลจากการคำนวณซึ่งมาจากโปรแกรมที่ถูกพัฒนา เพื่อหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบในกรณีต่างๆที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถพิจารณาได้ตามลักษณะของการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบแบ่งตามกรณีต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 ถึง 4.31



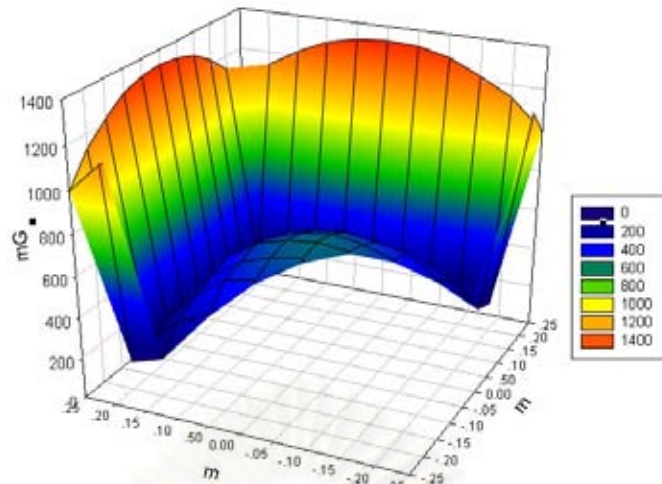
(ก)



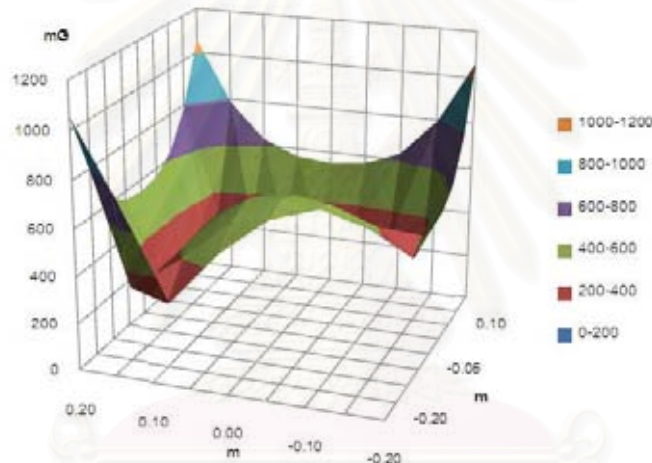
(ข)

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง (ก) และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม (ข) กรณีขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กสูงห่างจากพื้นที่ทดสอบ 0.4 เมตร ($I_s=0.1$ A)

จากผลการทดสอบและกราฟรูปที่ 4.29 จะสังเกตเห็นว่าค่าที่วัดได้เป็นไปตามค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 9% และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงและลักษณะการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของค่าที่วัดได้ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการคำนวณด้วยโปรแกรมทุกพิกัดบนพื้นที่ทดสอบ

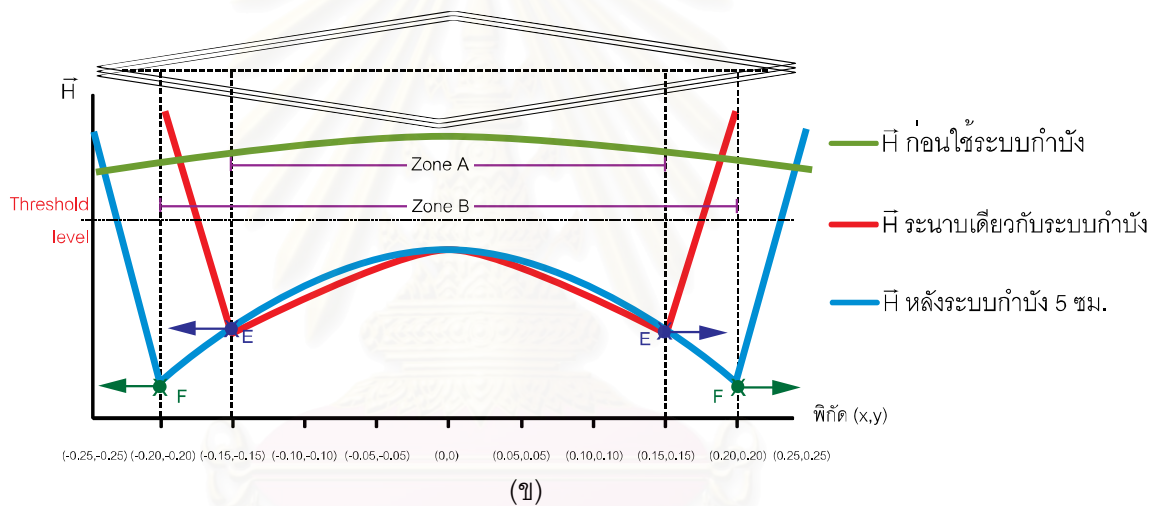
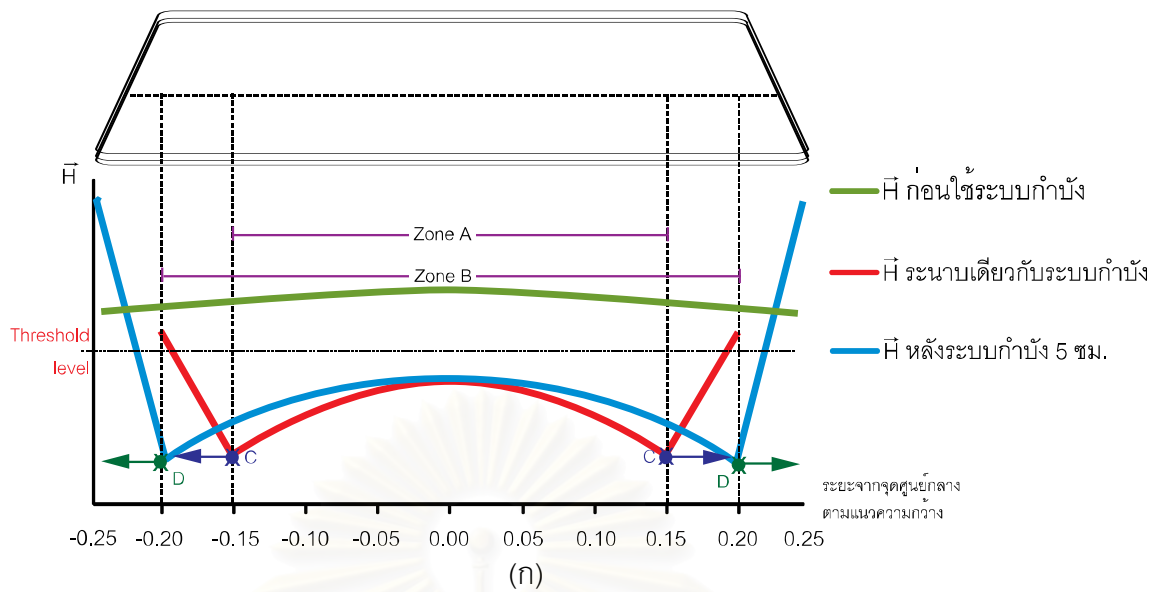


รูปที่ 4.30 ตัวอย่างภาพตัดขวางความหนาแน่นฟลักซ์บนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง กรณีพื้นที่ทดสอบอยู่หลังระบบกำลัง 5 เซนติเมตร ($I_s=0.9$ A)



รูปที่ 4.31 ตัวอย่างภาพตัดขวางความหนาแน่นฟลักซ์บนพื้นที่ทดสอบจากการวัดจริง กรณีพื้นที่ทดสอบอยู่ระนาบเดียวกับระบบกำลัง ($I_s=0.9$ A)

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังใช้ระบบกำลังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอิกทิฟแล้ว จะมีขนาดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงมากบริเวณขอบพื้นที่ทดสอบหรือใต้บริเวณขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กในกรณีพื้นที่ทดสอบอยู่หลังระบบกำลัง 5 เซนติเมตร ส่วนกรณีพื้นที่ทดสอบอยู่ระนาบเดียวกับระบบกำลังความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าสูงมากบริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กและกราฟทั้งสองจะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณจุดศูนย์กลางในระดับหนึ่ง ทำให้เกิดลักษณะนูนที่จุดศูนย์กลางเล็กน้อย ซึ่งลักษณะการกระจายตัวดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 4.32 ต่อไป



รูปที่ 4.32 ลักษณะการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบเมื่อใช้ระบบก้ำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟวัดตามแนวความกว้าง (ก) และตามพิกัดในแนวเส้นทแยงของขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็ก (ข)

จากรูปที่ 4.32 สามารถอธิบายเกี่ยวกับลักษณะการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบหลังใช้ระบบก้ำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ ได้แก่

1. ความเข้มสนามแม่เหล็กโดยรวมหลังการใช้ระบบก้ำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟมีค่าลดลงมาก แสดงว่าระบบก้ำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟนี้มีประสิทธิภาพ

2. จุด C, D, E และ F เป็นตำแหน่งที่เกิดการชดเชยกันอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถอธิบายด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบัง เนื่องจากที่จุด F เป็นตำแหน่งที่มีค่าประสิทธิผลการกำบังดีที่สุดเท่ากับ 16.03 dB

3. พื้นที่ที่พิจารณาออกไปจากจุด C, D, E และ F ตามทิศทางลูกศร เป็นพื้นที่ที่มีการชดเชยสนามแม่เหล็กมากเกินไป ทำให้ที่ตำแหน่งขอบพื้นที่ทดสอบ หรือบริเวณมุมชดเชยสนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงมาก อาจสูงมากจนความเข้มสนามแม่เหล็กหลังใช้ระบบกำบังมีค่ามากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กก่อนกำบัง ซึ่งสามารถอธิบายด้วยค่าประสิทธิผลของการกำบังที่เป็นค่าลบ

4. Zone A ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดจากวิธีการวัดในระนาบเดียวกับระบบกำบัง และ Zone B ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดจากวิธีการวัดหลังระบบกำบังไป 5 เซนติเมตร ทั้ง 2 พื้นที่นี้เป็นพื้นที่ที่มีการชดเชยสนามแม่เหล็กน้อยเกินไป ทำให้ยังคงเหลือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่แพร่มาจากชดเชยแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอยู่ ส่งผลให้กราฟบริเวณจุดศูนย์กลางพื้นที่ทดสอบ มีลักษณะนูนหรือป่องกลาง

5. Threshold level เป็นระดับที่อ้างอิงขึ้นสำหรับอุปกรณ์ใดๆภายใต้สนามแม่เหล็กรบกวน (receiver) ว่ายังสามารถใช้งานได้ปกติ เมื่อจะนำระบบกำบังสนามแม่เหล็กรบกวนแบบการชดเชยแฉีกทีนี้ไปใช้ในการกำบัง ต้องให้อุปกรณ์ใดๆที่อยู่ในระบบการกำบังมีระดับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำกว่า Threshold level ที่กำหนดนี้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากแนวคิดที่ได้ทำการศึกษาและนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำมาประเมินหาขนาดและวิเคราะห์แก้ไขปัญหาในการกำบังสนามแม่เหล็กความถี่กำลังได้ โดยการพัฒนาการกำบังแบบแพสซีฟซึ่งเป็นระบบกำบังแบบเก่าเป็นระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมแปร์ จะเห็นได้จากผลลัพธ์คือค่าประสิทธิผลของการกำบัง และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหลังใช้ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมแปร์มีค่าลดลง จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมแปร์ มีความสามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้จริง โดยให้ค่าประสิทธิผลของการกำบังที่ดีที่สุดเท่ากับ 16.03 dB หรือประมาณ 6.33 เท่าที่ตำแหน่ง (0.20, -0.20) บนพื้นที่ทดสอบ ขณะจ่ายกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.5 A หรือที่ค่าสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางบนพื้นที่ทดสอบประมาณ 512 mG

2. เป็นระบบกำบังที่มีประสิทธิภาพ ราคาถูก และน้ำหนักเบา

3. ผลของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในส่วนต่างๆ ทำให้เกิดการเลื่อนเฟสเปลี่ยนไปจากเดิมได้สามารถปรับแต่งด้วยส่วนวงจรเลื่อนเฟส โดยยึดหลักการจ่ายกระแสในขดลวดชดเชยสนามแม่เหล็กให้เฟสตรงกันข้ามกับกระแสในขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

4. ผลการทดสอบการใช้งานของโปรแกรมคำนวณ สามารถใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ทุกพิกัด มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 9% และค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกันทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในขั้นต่อไป

1. การกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแอมแปร์ในงานวิจัยนี้ อาจไม่ใช่ระบบกำบังที่ดีที่สุดสำหรับการกำบังสนามแม่เหล็ก เนื่องจากอาจสามารถออกแบบให้ส่วนวงจรควบคุม ซึ่งได้แก่ วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรปริแอมป์มีความสามารถมากกว่านี้ หรือใช้อุปกรณ์เหล่านี้แบบสำเร็จรูป แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นการเลือกส่วนอิเล็กทรอนิกส์ใช้งานควรดูถึงราคาและความสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด

2. ระบบกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟขึ้นนี้ควรได้รับการพัฒนาต่อไป โดยแนวทางในการพัฒนาควรเป็นการกำบังให้ได้ทุกทิศทางและทุกความถี่ หรือพัฒนาเป็นโครงหรือกล่องกำบังสนามแม่เหล็กแบบการชดเชยแก็กทิฟ

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

1. ในการทดลองแต่ละครั้ง จะทำให้สภาวะต่างๆเปลี่ยนแปลงไป เช่น ขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, มุมเฟส, ระยะเวลาต่างๆ หรือค่าของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งแก้ไขโดยการทำการทดลองซ้ำหลายครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

2. ในการปรับอัตราขยายในส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆจะมีผลต่อการเลื่อนของเฟส แก้ไขโดยการปรับเฟสด้วยวงจรเลื่อนเลื่อนเฟส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Duff, W.G. Fundamentals of Electromagnetic Compatibility. New York : IEEE Press, 1988.
- [2] ปิยะบุตร พุกขานุกุล. การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมารอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์รีอีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [3] Montrose, M.I., and Nakauchi, E.M. Testing for EMC Compliance Approaches and Techniques. Hoboken, NJ : John Wiley, 2004.
- [4] Tihanyi, L. Electromagnetic Compatibility in Power Electronics. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- [5] Misakian, M. ELF electric and magnetic field measurement methods. 1993 IEEE International Symposium (Aug 1993) : 150-155.
- [6] มงคล ทองสงคราม. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : วิ.เจ.พรินติ้ง, 2541.
- [7] ต่อพงษ์ ชุมนุมนณี. การวิเคราะห์และออกแบบวงจรระบบควบคุม. เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ 273 (มีนาคม 2548) : 203-206.
- [8] สุคนธ์ พุ่มศรี. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2544.
- [9] Neff, H.P. Basic Electromagnetic Fields. New York : Harper & Row, 1987.
- [10] Salinas, E. Passive and active shielding of power-frequency magnetic fields from secondary substation components. International Conference (Dec 2000) : 855-860.
- [11] Salinas, E., Bondeson, A., Daalder, J., and Hamnerius, Y. Towards a global strategy to mitigate power-frequency magnetic fields from secondary substations. IEE Conf. Publ No. 482 (Jun 2001) : 111-111.
- [12] ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล. การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [13] ไชยวัฒน์ ทองช้อย. การออกแบบวงจรขยายกำลังคลาสเอและเอบีอย่างถูกวิธี. เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ 312 (กุมภาพันธ์ 2551) : 197-312.

- [14] Buccella, C., Feliziani, M., and Fuina, V. ELF magnetic field mitigation by active shielding. 2002 IEEE International Symposium (May 2002) : 994-998.
- [15] Goleman, K., Sasada, I. Proposal and theoretical evaluation of the active shield with self-tunable loop current array. Magnetics IEEE Transactions (Oct 2005) : 4084-4086.
- [16] Energetech Consultants. EMDEX-II Electric Power Research Institute.
- [17] Donald, R.J. and et al. Electromagnetic Shielding. New York : EMF-EMI control, 1988.
- [18] Miyajima, K., Tomita, S. Compensating method of CRT display jitter caused by an external magnetic field. 1999 IEEE International Symposium (May 1999) : 508-511.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



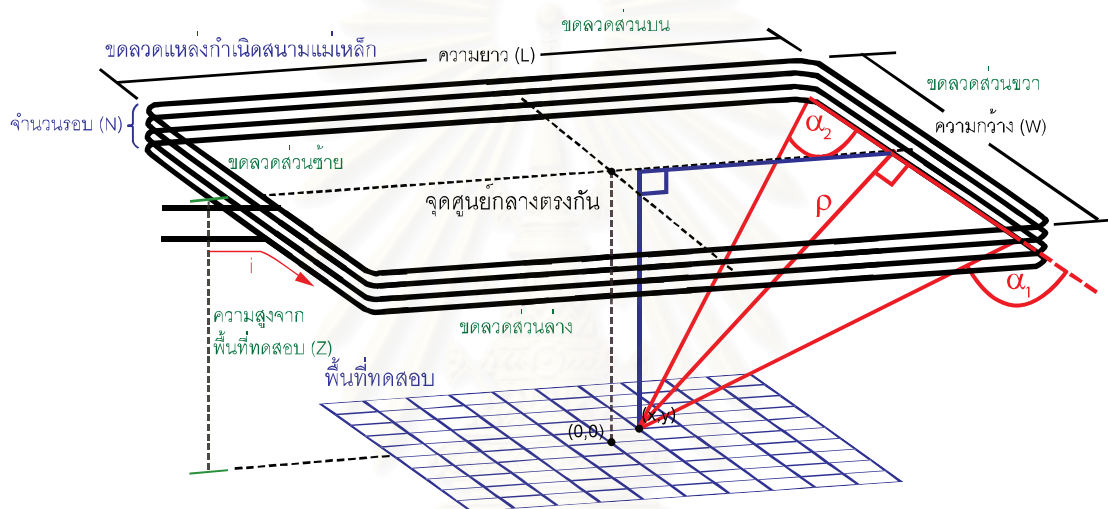
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. วิธีการคำนวณ

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบ

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้ กำหนดให้ ขดลวดแบ่งเป็น 4 ส่วนได้แก่ ขดลวดส่วนซ้าย, ขดลวดส่วนขวา, ขดลวดส่วนบน และขดลวดส่วนล่าง ส่วนตัวแปรอื่นๆที่จำเป็นในการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก จะกล่าวถึงในรูปที่ ก.1 และสมการในภาคผนวก ก. นี้ต่อไป



รูปที่ ก.1 ลักษณะการวางอุปกรณ์บนพื้นที่ทดสอบ

กฎบีโธต์-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law) สามารถอธิบายให้สอดคล้องกับรูปที่ ก.1 คือ กระแสในเส้นลวดใดๆที่มีความยาวจำกัด โดยปลายด้านบนและด้านล่างทำมุม α_2 และ α_1 กับจุด (x, y) ใดๆบนพื้นที่ทดสอบนี้ สามารถหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากสมการ

$$B = \frac{N\mu_0 I}{4\pi\rho} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ N คือ จำนวนขดลวด (รอบ)

μ_0 คือ ค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ (Permeability of free space) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$

I คือ กระแสไฟฟ้าในขดลวด (A)

ρ คือ ระยะห่างระหว่างพิกัดใดๆบนพื้นที่ทดสอบ (x, y) กับเส้นลวด (m)

α_1 และ α_2 คือ มุมระหว่างปลายทั้งสองด้านของส่วนตัวนำไฟฟ้ากับพิคัดไคบน
พื้นที่ทดสอบ (x, y)

จากรูปที่ ก.1 และกฎพีทาโกรัส สามารถหาค่า ρ ของขดลวดทุกส่วนได้ตามสมการ

$$\rho_{ซ้าย} = \sqrt{\left(x + \frac{L}{2}\right)^2 + z^2} \quad (ก.2)$$

$$\rho_{ขวา} = \sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + z^2} \quad (ก.3)$$

$$\rho_{บน} = \sqrt{\left(\frac{W}{2} - y\right)^2 + z^2} \quad (ก.4)$$

$$\rho_{ล่าง} = \sqrt{\left(y + \frac{W}{2}\right)^2 + z^2} \quad (ก.5)$$

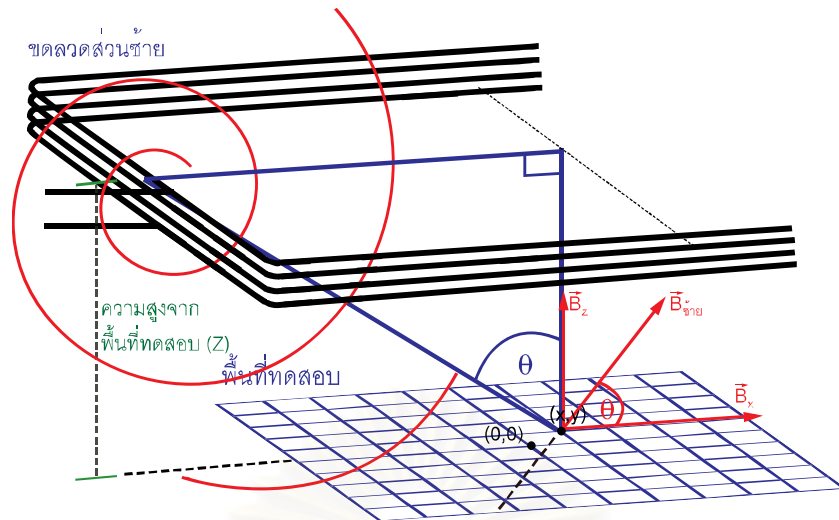
มุม α_1 และ α_2 หาได้จากสมการ

$$\alpha_{1,ซ้าย,ขวา} = 180 - \left(\tan^{-1} \left(\frac{\rho_{ซ้าย,ขวา}}{\frac{W}{2} + y} \right) \right) \quad (ก.6)$$

$$\alpha_{2,ซ้าย,ขวา} = \tan^{-1} \left(\frac{\rho_{ซ้าย,ขวา}}{\frac{W}{2} - y} \right) \quad (ก.7)$$

$$\alpha_{1,บน,ล่าง} = 180 - \left(\tan^{-1} \left(\frac{\rho_{ซ้าย,ขวา}}{\frac{L}{2} + x} \right) \right) \quad (ก.8)$$

$$\alpha_{2,บน,ล่าง} = \tan^{-1} \left(\frac{\rho_{ซ้าย,ขวา}}{\frac{L}{2} - x} \right) \quad (ก.9)$$

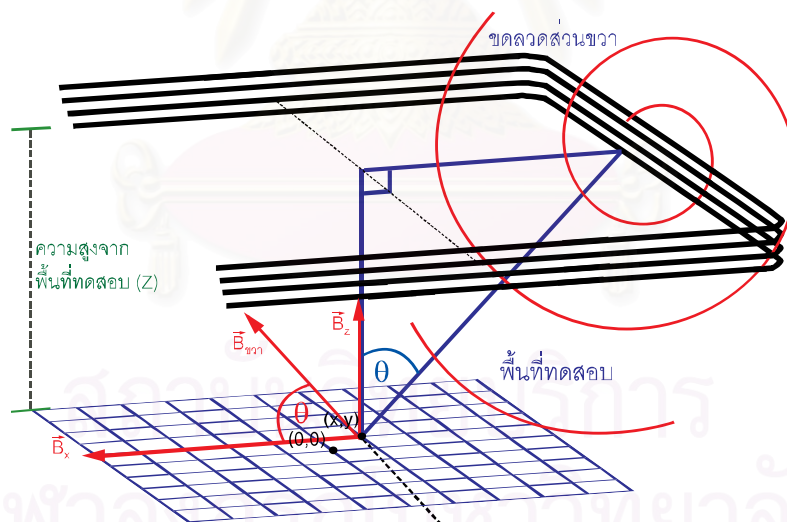


รูปที่ ก.2 ขดลวดส่วนซ้าย

ขดลวดส่วนซ้าย
$$\theta_{\text{ซ้าย}} = \tan^{-1} \left(\frac{L+x}{z} \right) \quad (\text{ก.10})$$

$$\vec{B}_{x,\text{ซ้าย}} = \vec{B}_{\text{ซ้าย}} \cos \theta \quad (\text{ก.11})$$

$$\vec{B}_{z,\text{ซ้าย}} = \vec{B}_{\text{ซ้าย}} \sin \theta \quad (\text{ก.12})$$

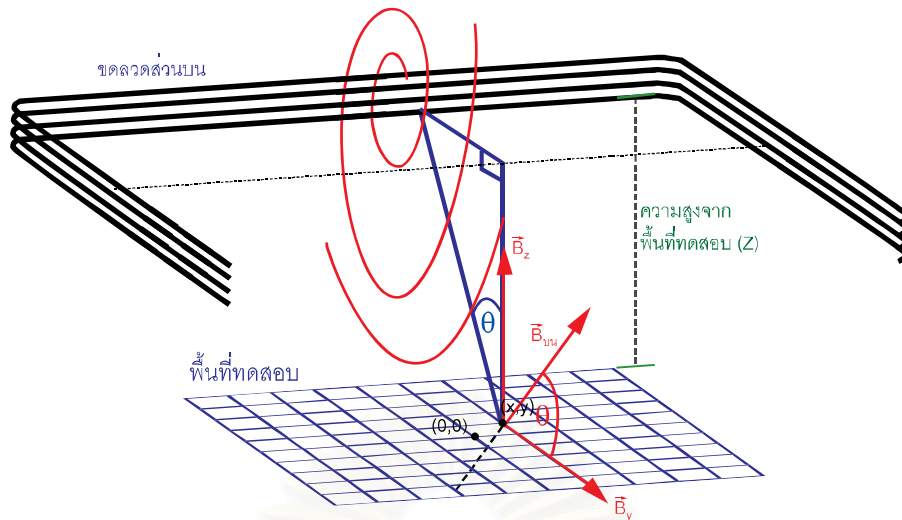


รูปที่ ก.3 ขดลวดส่วนขวา

ขดลวดส่วนขวา
$$\theta_{\text{ขวา}} = \tan^{-1} \left(\frac{L-x}{z} \right) \quad (\text{ก.13})$$

$$\vec{B}_{x,\text{ขวา}} = -\vec{B}_{\text{ขวา}} \cos \theta \quad (\text{ก.14})$$

$$\vec{B}_{z,\text{ขวา}} = \vec{B}_{\text{ขวา}} \sin \theta \quad (\text{ก.15})$$

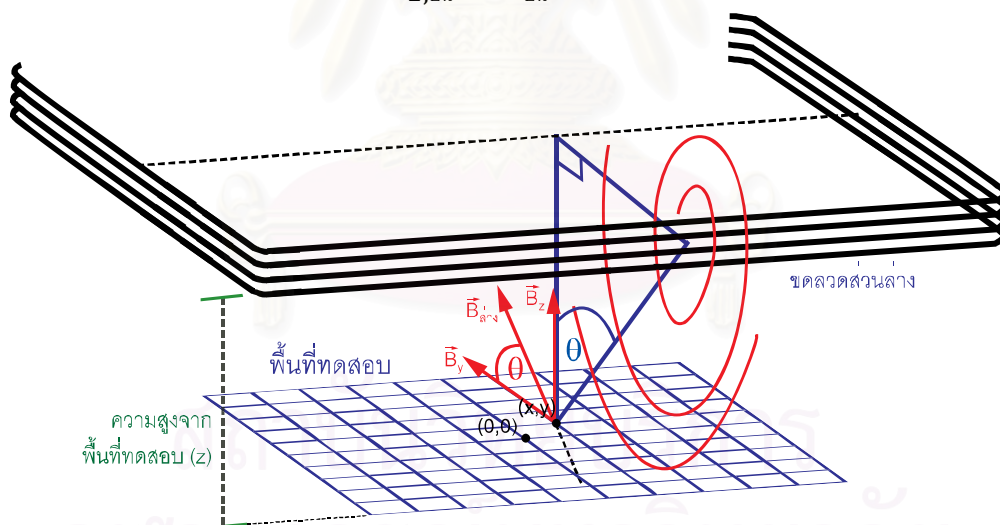


รูปที่ ก.4 ขดลวดส่วนบน

ขดลวดส่วนบน
$$\theta_{บน} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{w}{2} - y}{z} \right) \quad (ก.16)$$

$$\vec{B}_{y,บน} = -\vec{B}_{บน} \cos \theta \quad (ก.17)$$

$$\vec{B}_{z,บน} = \vec{B}_{บน} \sin \theta \quad (ก.18)$$



รูปที่ ก.5 ขดลวดส่วนล่าง

ขดลวดส่วนล่าง
$$\theta_{บน} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{w}{2} - y}{z} \right) \quad (ก.19)$$

$$\vec{B}_{y,บน} = -\vec{B}_{บน} \cos \theta \quad (ก.20)$$

$$\vec{B}_{z,บน} = \vec{B}_{บน} \sin \theta \quad (ก.21)$$

จากการแบ่งพิจารณาขดลวดทั้ง 4 ส่วน เพื่อทำการแตกเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเข้าสู่แกน x , แกน y และแกน z ของแต่ละส่วน จากนั้นจะสามารถคำนวณหาเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมทั้ง 4 ส่วนตามแนวแกนแกน x , แกน y และแกน z ที่พิกัด (x, y) ใดๆได้จากสมการที่ ก.22 ถึง สมการที่ ก.24

$$\vec{B}_x = \vec{B}_{x,\text{ซ้าย}} + \vec{B}_{x,\text{ขวา}} \quad (\text{ก.22})$$

$$\vec{B}_y = \vec{B}_{y,\text{บน}} + \vec{B}_{y,\text{ล่าง}} \quad (\text{ก.23})$$

$$\vec{B}_z = \vec{B}_{z,\text{ซ้าย}} + \vec{B}_{z,\text{ขวา}} + \vec{B}_{z,\text{บน}} + \vec{B}_{z,\text{ล่าง}} \quad (\text{ก.24})$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมา จะสามารถคำนวณหาเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์ที่พิกัด (x, y) ใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ ก.25

$$\vec{B}_{(x,y)} = \sqrt{\vec{B}_x^2 + \vec{B}_y^2 + \vec{B}_z^2} \quad (\text{ก.25})$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมา จะสามารถคำนวณหาเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์ที่พิกัด (x, y) และความสูงเท่ากับ z ใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ ก.25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข การใช้งานโปรแกรม

โปรแกรมคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

เป็นโปรแกรมคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสำหรับ 1 ขดลวดแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ใช้ตรวจสอบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนพื้นที่ทดสอบพิกัดใดๆ ด้วยค่าความสูงใดๆ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นหน่วย mG

ข้อมูลที่ต้องป้อนในโปรแกรม ได้แก่

ขนาดของขดลวด กว้าง x ยาว (เมตร x เมตร)

ความสูง (เมตร)

กระแสในขดลวด (แอมป์)

จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

พิกัด x เริ่มที่จุด (เมตร) ถึงจุด (เมตร) ด้วยระยะห่างกริด (เมตร)

พิกัด y เริ่มที่จุด (เมตร) ถึงจุด (เมตร) ด้วยระยะห่างกริด (เมตร)

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)

	X											
	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	
-0.25	926.87	943.8	955.17	962.32	966.22	967.46	966.22	962.32	955.17	943.8	926.87	
-0.20	943.8	959.97	970.67	977.31	980.89	982.01	980.89	977.31	970.67	959.97	943.8	
-0.15	955.17	970.67	980.8	987	990.3	991.33	990.3	987	980.8	970.67	955.17	
-0.10	962.32	977.31	987	992.86	995.95	996.91	995.95	992.86	987	977.31	962.32	
-0.05	966.22	980.89	990.3	995.95	998.92	999.84	998.92	995.95	990.3	980.89	966.22	
0.00	967.46	982.01	991.33	996.91	999.84	1000.74	999.84	996.91	991.33	982.01	967.46	
0.05	966.22	980.89	990.3	995.95	998.92	999.84	998.92	995.95	990.3	980.89	966.22	
0.10	962.32	977.31	987	992.86	995.95	996.91	995.95	992.86	987	977.31	962.32	
0.15	955.17	970.67	980.8	987	990.3	991.33	990.3	987	980.8	970.67	955.17	
0.20	943.8	959.97	970.67	977.31	980.89	982.01	980.89	977.31	970.67	959.97	943.8	
0.25	926.87	943.8	955.17	962.32	966.22	967.46	966.22	962.32	955.17	943.8	926.87	

รูปที่ ข.1 แสดงการป้อนข้อมูลและผลลัพธ์การใช้โปรแกรมคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยโปรแกรม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรภัทร์ คัมภีรานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2546 และเข้ารับการ studia ต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคต้น ปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย