

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
ชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SEPARATOR



โดย

นาย กิตติชัย เหลืองอร่าม

นาย ภัทรุฒิ ภาณุวดีพงศ์

นาย วชิรินทร์ ศรีรัตนวิชัยกุล

นาย วิษณุ เทือกทรายคำ

รฟ.
ก ๕๖๓๘
๑๕๔๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 73013
วัน,เดือน,ปี..... 27 ส.ย. 2550

b. 1117633x
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

ชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SEPARATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตติชัย เหลืองอร่าม
2. นาย อนุรักษ์ ถานะวุฒิพงศ์
3. นาย วชิรณ ศรีรัตนวิชัยกุล
4. นาย วิษณุ เทือกทรายคำ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

นาย กิตติชัย เหลืองอร่าม
นาย ญัฐวุฒิ ถานะวุฒิพงศ์
นาย วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล
นาย วิษณุ เทือกทรายคำ
รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาวัดผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ วัดดูประสงค์ของงานวิจัยเพื่อสร้างตัวต้นแบบของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างออกจากกัน และได้นำเสนอการออกแบบและสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมและมีขั้วต่อสองขั้วเพื่อนำไปต่อร่วมกับชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากผลการทดลองจะใช้โพรบวัดกระแสความถี่สูงเป็นตัวเปรียบเทียบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้แทนโพรบวัดกระแสความถี่สูงได้ โดยมีเงื่อนไขในการทดลองในกรณีเช่น การต่อและไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์, การทำงานที่ความถี่สวิตซ์ค่าต่างๆ และการสวิตซ์แบบฮาร์ดและซอฟท์ ซึ่งความสามารถในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากกันได้นั้นจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ และการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) ให้เหมาะสมต่อไป

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SEPARATOR

Kittichai Lueng-a-ram

Nuttawut Tanawuttipong

Watcharin Srirattanawichaikul

Wisanu Thueksaikhum

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2006

ABSTRACT

This thesis presents the study of the conducted EMI emission measurement. The aim of this work is to study about building a prototype of common mode (CM) and difference mode (DM) separator. The line impedance stabilization network (LISN) is designed to provide proper impedance to the measuring system and provide the two input ports for the noise separator. The experimental results have been compared with the RF current probe to ensure the result. Electromagnetic interference (EMI) results have been tested in various conditions such as with/without heat-sink to ground of the boost converter, switching frequency variation and hard/soft switching.

The achievement of this work can be applied for analysis in CM and DM of the EMI filter.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนวทางรวมทั้งปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำโครงการด้วยความเอาใจใส่เสมอมาทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ พี่ตำรวจ สกุลศิริรักษ์, พี่ปวิวัติ บุญมา, พี่ Chanthea Khun และรุ่นพี่ปริญญาโทห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา และชี้แนะการวางระเบียบในการทำโครงการ คอยช่วยสอนวิธีใช้เครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งความห่วงใยที่ดีต่อคณะผู้วิจัย

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่คอยให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือจนทำให้โครงการครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี และขอบคุณเพื่อนรุ่น 16 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรปริญญาตรีต่อเนื่องทุกคนที่ได้ร่วมทุกข์ร่วมสุขในการเรียน ร่วมกันตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ด้วยความเคารพอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XVIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 ความรู้พื้นฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.2.3 การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวน ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	11
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.4.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน	12
2.4.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ	14
2.5 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง	16
2.5.1 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common – Mode Interference: CM)	16
2.5.2 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential – Mode Interference: DM)	16
2.6 สัญญาณรบกวนในวงจรรอเล็กทรอนิกส์กำลัง	17
2.6.1 ส่วนประกอบแฉีกที่ฟ	18
2.6.2 ส่วนประกอบพาสซีฟ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.7	มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
2.7.1	มาตรฐาน Federal Communications Commission: FCC.....	24
2.7.2	มาตรฐาน CISPR.....	24
2.7.3	มาตรฐานทางการทหาร.....	25
2.7.4	มาตรฐาน Verband Deutscher Elektrotechniker: VDE.....	25
2.7.5	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.).....	25
2.8	การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำตามมาตรฐาน CISPR.....	27
2.8.1	AMN/LISN.....	27
2.8.2	แผ่นกราวด์.....	29
2.8.3	เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัด.....	30
2.8.4	การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ.....	30
2.8.5	การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศ ตามมาตรฐาน CISPR.....	31
2.9	สรุป.....	32
บทที่ 3	วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	33
3.1	ที่มาของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	33
3.2	หน้าที่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	35
3.3	โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ V – Network.....	36
3.4	โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ Delta – Network.....	39
3.5	วงจรสมมูลย์โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์และพิกัดค่าอุปกรณ์.....	41
3.5.1	วัตถุประสงค์ของการจำลองระบบ.....	42
3.5.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ.....	42
3.5.3	เงื่อนไขของการจำลองวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ อิมพีแดนซ์.....	43
3.6	ส่วนประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	44
3.7	รูปแบบภายในและลักษณะการวางอุปกรณ์ของวงจรโครงข่าย รักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	67
3.8	การทดสอบอิมพีแดนซ์ของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ อิมพีแดนซ์.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ในโหมดต่างๆ.....	69
3.8.2 การทดสอบอุณหภูมิอุปกรณ์ภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ อิมพีแดนซ์.....	73
3.8.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	74
3.9 สรุป.....	80
บทที่ 4 ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator).....	82
4.1 บทนำ.....	82
4.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	82
4.3 การออกแบบและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	85
4.3.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	85
4.3.2 ส่วนประกอบสำคัญของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	87
4.3.3 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูง.....	88
4.3.4 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า.....	92
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	95
4.5 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ค่าสูงสุด ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก EMI Toolkit.....	96
4.5.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	96
4.5.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม.....	97
4.6 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบาย ความร้อนลงกราวด์ (Without heat sink).....	98
4.6.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	98
4.6.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

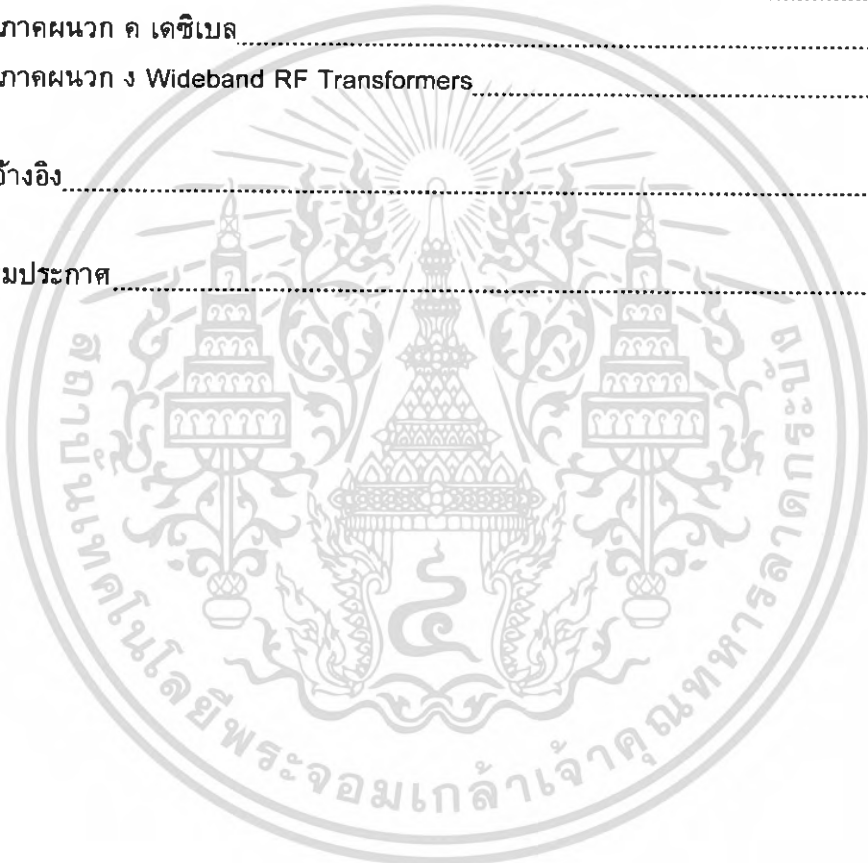
	หน้า
4.7 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz.....	100
4.7.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	100
4.7.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม..._	101
4.8 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall Time มีค่ามาก.....	102
4.8.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	102
4.8.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม..._	103
4.9 สรุป.....	104
บทที่ 5 RF current probe.....	105
5.1 บทนำ.....	105
5.2 หลักการทำงาน RF current probe.....	105
5.3 หลักการวัดการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ RF current probe..._	110
5.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ของ RF current probe.....	112
5.5 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ค่าสูงสุด ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก EMI Toolkit.....	113
5.5.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	113
5.5.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม..._	114
5.6 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบาย ความร้อนลงกราวนด์ (Without heat sink).....	115
5.6.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise).....	115

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม	116
5.7 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz	117
5.7.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)	117
5.7.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม	118
5.8 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall Time มีค่ามาก	119
5.8.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)	119
5.8.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม	120
5.9 สรุป	121
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	122
6.1 บทนำ	122
6.2 การพิสูจน์ความถูกต้องของประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า	122
6.3 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการไม่ต่อแผ่น ระบายความร้อนลงกราวด์ (Without heat sink)	123
6.4 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการต่อแผ่น ระบายความร้อนลงกราวด์ (With heat sink)	127
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	131
7.1 บทวิจารณ์โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	131
7.2 บทสรุปโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	131
7.3 บทวิจารณ์ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	132
7.4 บทสรุปชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	132
7.5 บทวิจารณ์ RF Current probe	132

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.6 บทสรุป RF Current probe.....	133
7.7 ข้อเสนอแนะ.....	133
7.8 สิ่งที่ควรดำเนินการต่อ.....	133
ภาคผนวก.....	134
ภาคผนวก ก รูปภาพอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	135
ภาคผนวก ข มาตรฐานท่อ PVC.....	146
ภาคผนวก ค เดซิเบล.....	152
ภาคผนวก ง Wideband RF Transformers.....	154
เอกสารอ้างอิง.....	157
กิตติกรรมประกาศ.....	158



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 Flow chart ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
2.1 องค์ประกอบและรูปแบบการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.4 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
2.5 ความสัมพันธ์ของนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	12
2.6 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น.....	13
2.7 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ.....	15
2.8 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	15
2.9 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	16
2.10 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	17
2.11 เส้นทางเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	18
2.12 ตัวอย่างองค์ประกอบแฝงภายในแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	18
2.13 ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด.....	20
2.14 ตัวอย่างผลขององค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ขณะสวิตช์เริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส.....	20
2.15 ตัวอย่างส่วนประกอบแฝงในหม้อแปลงความถี่สูงและฟาราเดย์ซิลด์.....	21
2.16 ตัวอย่างผลของส่วนประกอบแฝงในอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า และสายตัวนำที่ความถี่สูง.....	22
2.17 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของข้อกำหนด และมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ.....	26
2.18 เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR.....	27
2.19 วงจร AMN/LISN ตามมาตรฐาน CISPR.....	28
2.20 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN.....	28
2.21 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ.....	30
2.22 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แพร่กระจายทางอากาศแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ.....	31
3.1 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ.....	34
3.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกวงจร.....	34
3.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรสู่ระบบภายนอก.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การทำงานของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN).....	35
3.5 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50 \Omega / 50 \mu\text{H} + 5 \Omega$	37
3.6 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50 \Omega / 50 \mu\text{H}$	37
3.7 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50 \Omega / 5 \mu\text{H} + 1 \Omega$	38
3.8 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150Ω	39
3.9 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150Ω แบบ Delta – Network	40
3.10 วงจรสมมูลของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN).....	41
3.11 วงจรภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	42
3.12 วงจรภายในของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ เมื่อเขียนในรูปแบบของโปรแกรม PSpice version 9.1	43
3.13 ผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองระบบวงจร โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	43
3.14 ตัวถังของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	44
3.15 ลายวงจรเลือกการวัดแรงดันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	45
3.16 การติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนลายวงจร	45
3.17 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่สูง	46
3.18 ตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W	46
3.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W	47
3.20 ค่าความต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	47
3.21 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W	48
3.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W	48
3.23 ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	49
3.24 ตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5Ω 2 W	49
3.25 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5Ω 2 W	50
3.26 ค่าความต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5Ω 2 W ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.27	ค้วต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W.....	51
3.28	กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W.....	51
3.29	ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	52
3.30	ค้วต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1 k\Omega$ 2 W.....	52
3.31	กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1 k\Omega$ 2 W.....	53
3.32	ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1 k\Omega$ 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	53
3.33	องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุที่ความถี่สูง.....	54
3.34	ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu F$	54
3.35	กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu F$	55
3.36	ค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu F$ ที่ความถี่ 50 kHz – 500 kHz.....	55
3.37	ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu F$	56
3.38	กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu F$	56
3.39	ค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu F$ ที่ความถี่ 1 kHz – 300 kHz.....	57
3.40	ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polyester C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 มีค่าเท่ากับ $0.47 \mu F$	57
3.41	กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polyester C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 มีค่าเท่ากับ $0.47 \mu F$	58
3.42	ค่าความเก็บประจุ C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 มีค่าเท่ากับ $0.47 \mu F$ ที่ความถี่ 150 kHz – 2 MHz.....	58
3.43	ท่อ PVC ที่ใช้ในการทำแกนของตัวเหนี่ยวนำ.....	59
3.44	ขนาดแกนตัวเหนี่ยวนำใช้ท่อ PVC ที่พิทคอุณหภูมิจึงไม่เกิน $80^\circ C$	59
3.45	ลักษณะการพันขดลวดของ L_1 และ L_2 เท่ากับ $250 \mu H$	61
3.46	ลักษณะการพันขดลวดของ L_3 และ L_4 เท่ากับ $50 \mu H$	63
3.47	องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่สูง.....	64
3.48	ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu H$	64
3.49	กราฟค่าความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu H$	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.50 ค่าความตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	65
3.51 ค่าความตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$	66
3.52 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$	66
3.53 ค่าความตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	67
3.54 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่นำเสนอ.....	67
3.55 ภาพถ่ายตัวถังโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์เมื่อประกอบเสร็จ.....	68
3.56 ภาพถ่ายด้านบนสำหรับการวางอุปกรณ์ภายในและการต่อ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	68
3.57 ภาพถ่ายแสดงการวางอุปกรณ์ภายในโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	69
3.58 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	69
3.59 กราฟอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G).....	70
3.60 ตารางอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G).....	70
3.61 กราฟอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G).....	71
3.62 ตารางอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G).....	71
3.63 กราฟเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G) ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	72
3.64 กราฟเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G) ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	72
3.65 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ อิมพีแดนซ์.....	74
3.66 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ Simplified LISN.....	74
3.67 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO.....	75
3.68 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO.....	75
3.69 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.70 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO	76
3.71 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO	77
3.72 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ Simplified LISN	77
3.73 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO	78
3.74 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO	78
3.75 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ Simplified LISN	79
3.76 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO	79
3.77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO	80
4.1 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายดัดนำโดยใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	83
4.2 หลักการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า: DM Rejecter	84
4.3 หลักการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า: CM Rejecter	84
4.4 วงจรสมมูลภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	85
4.5 การออกแบบลายวงจรและการจัดวางอุปกรณ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	86
4.6 ลักษณะภายนอกและภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	86
4.7 หม้อแปลงคุณภาพสูง (Wideband RF transformer) WB 2010 – PCL	87
4.8 วงจรสมมูลภายในหม้อแปลงคุณภาพสูง WB 2010 – PCL	87
4.9 ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100 Ω	87
4.10 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 1 กับขา 3	88
4.11 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 1 กับขา 3	88
4.12 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 5	89
4.13 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 5	89
4.14 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 6	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 6.....	90
4.16 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6.....	91
4.17 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6.....	91
4.18 การต่อวัตติมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	92
4.19 การต่อวัตติมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้าน Line to Ground (L – G) และ Neutral to Ground (N – G).....	92
4.20 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G).....	93
4.21 ตารางค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G).....	93
4.22 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Neutral to Ground (N – G).....	94
4.23 ตารางค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Neutral to Ground (N – G).....	94
4.24 วงจรสมมูลการต่อชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	95
4.25 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	96
4.26 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	96
4.27 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	97
4.28 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	97
4.29 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	98
4.30 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	98
4.31 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	99
4.32 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	99
4.33 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	100
4.34 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	101
4.36 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	101
4.37 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	102
4.38 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	102
4.39 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	103
4.40 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	103
4.41 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	104
5.1 RF current probe Model F33 – 1.....	105
5.2 กราฟคุณสมบัติของ RF current probe Model F33 – 1.....	106
5.3 ลักษณะการวัดสายตัวของ RF current probe.....	106
5.4 หลักการพื้นฐานของ RF current probe.....	107
5.5 RF current probe is transformer.....	108
5.6 การ Transfer function ของ RF current probe.....	109
5.7 การ Transfer function ของ RF current probe ในย่านความถี่สูง.....	110
5.8 หลักการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe.....	110
5.9 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม.....	111
5.10 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม.....	111
5.11 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง.....	111
5.12 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	113
5.13 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	113
5.14 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	114
5.15 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	114
5.16 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	115
5.17 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	116
5.19 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	116
5.20 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	117
5.21 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	117
5.22 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	118
5.23 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	118
5.24 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	119
5.25 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Line to Ground (L – G).....	119
5.26 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมด้าน Neutral to Ground (N – G).....	120
5.27 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}).....	120
5.28 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM}).....	121
6.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe.....	123
6.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe.....	124
6.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ระหว่าง Noise separator และ RF current probe.....	125
6.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ระหว่าง Noise separator และ RF current probe.....	126
6.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe.....	127
6.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe.....	128
6.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ระหว่าง Noise separator และ RF current probe.....	129

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8	
กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ระหว่าง Noise separator และ RF current probe.....	130



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางการดำเนินงาน	3
2.1 สรุปผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ	23
2.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	26
3.1 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega$	36
3.2 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 50\ \mu\text{H}$	37
3.3 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 5\ \mu\text{H} + 1\ \Omega$	38
3.4 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $150\ \Omega$	39
3.5 องค์ประกอบค่าของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $150\ \Omega$ แบบ Delta – Network	40
3.6 ชนิดและค่าพิกัดภายในวงจรสมมูลที่นำเสนอ	41
4.1 คุณสมบัติของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	87
5.1 คุณสมบัติของ RF current probe	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

จากการที่ได้มีการนำวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มาใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ทำให้วงจรต่างๆ ต้องทำงานในระยะเวลาใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นผลที่ได้ก็คือผลิตภัณฑ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยส่วนมากจะสร้างสัญญาณรบกวนให้กับอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังนำวงจรจำนวนมากมารวมกัน เพื่อให้วงจรจำนวนมากนั้นสามารถทำงานร่วมกันได้ภายใต้พื้นที่ที่เล็กลง ซึ่งจะมีส่วนเพิ่มปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ดีในสภาวะแวดล้อมจริง ผู้ออกแบบวงจรจำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กด้วย โดยวงจรนั้นต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนแก่วงจรอื่นจนเกินขอบเขต อีกทั้งจะต้องสามารถทนการรบกวนจากวงจรอื่นได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

เนื่องด้วยโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) มีหน้าที่ป้องกันผลการรบกวนระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับเครื่องมือที่จะทำการวัด (Equipment Under Test: EUT) และต้องรักษา Matching Impedance ที่ 50Ω โดยโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านไปยังเครื่องวัดสัญญาณตามสายตัวนำ (Spectrum analyzer) ในรูปของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม (Total Noise Interference) คือมีทั้งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential – Mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common – Mode Interference: CM) รวมกันซึ่งจะทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ว่าผลของสัญญาณรบกวนส่วนใดส่งผลมากกว่ากันเพียงใด ถ้าสามารถรู้ที่มาและระดับของสัญญาณรบกวนก็จะสามารถออกแบบวงจรกรองได้เหมาะสม และเมื่อทำการกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่พิจารณา เราก็สามารถที่จะลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในโหมดผลต่างหรือโหมดผลร่วมได้โดยขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้วงจรกรองสัญญาณแบบพาสซีฟ (Passive filter) มาช่วยลดผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหมดผลต่างหรือโหมดผลร่วมที่เกิดขึ้นได้

จากการค้นคว้าในเรื่องของวงจรการแยกสัญญาณรบกวน (Noise separator) นั้นทำให้เราทราบว่า จะต้องมีการมีทั้งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางด้าน Line to Ground (L – G) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral to Ground (N – G) ซึ่งส่งผ่านมาจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ป้อนสัญญาณให้กับด้านขาเข้าของชุดแยกสัญญาณพร้อมกัน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์ในการทดสอบ จากการที่ภายในห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN Model 3810/2 EMCO) ซึ่งไม่สามารถแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างและโหมดผลร่วม

ออกมาพร้อมกัน ด้วยเหตุนี้ในโครงการจึงได้ออกแบบสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ขึ้นมา เพื่อที่จะสามารถแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างและโหมดผลร่วมออกมาพร้อมกันได้โดยในการออกแบบสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่นำเสนอ ในโครงการนี้ได้ยึดถือเอาวงจรมูลฐาน รวมไปถึงค่าอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่เป็นมาตรฐาน International Special Committee on Radio Interference (CISPR 16) แต่เนื่องด้วยอุปกรณ์บางตัวไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ใช้ค่าของอุปกรณ์ที่ใกล้เคียงและบางตัวก็ได้ออกแบบสร้างขึ้นมาเองโดยยึดหลักการตามทฤษฎีและรวมทั้งผลของการจำลองการทำงาน (Simulation)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) ในสายตัวนำ
2. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแยกสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง (Differential – mode) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common – mode Interference)
3. ศึกษาการใช้อุปกรณ์แยกสัญญาณรบกวนต่อร่วมในวงจร เพื่อแยกสัญญาณรบกวนและวิเคราะห์การแยกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential – mode Interference) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common – mode Interference) ได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) ขนาด 16 A
2. ศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ (Noise Separator)
3. วิเคราะห์ผลการสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ จากชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator) และ RF current probe
4. ศึกษาคุณลักษณะแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และแนวทางการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ เพื่อนำมาพิจารณาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน

ภาคการเรียนการศึกษาที่ 1												
ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2549											
	ก.ค.		ส.ค.		ก.ย.		ต.ค.					
1. ศึกษาทฤษฎีและโครงการในอดีตที่เกี่ยวข้อง												
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ อิมพีแดนซ์												
3. ออกแบบและเก็บค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพ												
4. สร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ขนาด 16 A และทดสอบประสิทธิภาพ												
5. เก็บค่าผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์โครงข่าย รักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์												



วางแผนงาน



ปฏิบัติงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ตารางการดำเนินงาน

ภาคการเรียนการศึกษาที่ 2												
ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2549						พ.ศ. 2550					
	พ.ย.		ธ.ค.				ม.ค.		ก.พ.			
1. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์												
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ RF current probe และชุดแยกสัญญาณรบกวน												
3. ทดสอบอุปกรณ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวน												
4. สร้างชิ้นงานชุดแยกสัญญาณรบกวน												
5. ทดสอบผลการแยกสัญญาณรบกวนของ RF current probe และชุดแยกสัญญาณรบกวน												
6. เรียบเรียงและจัดทำปริิญาณิพนธ์												

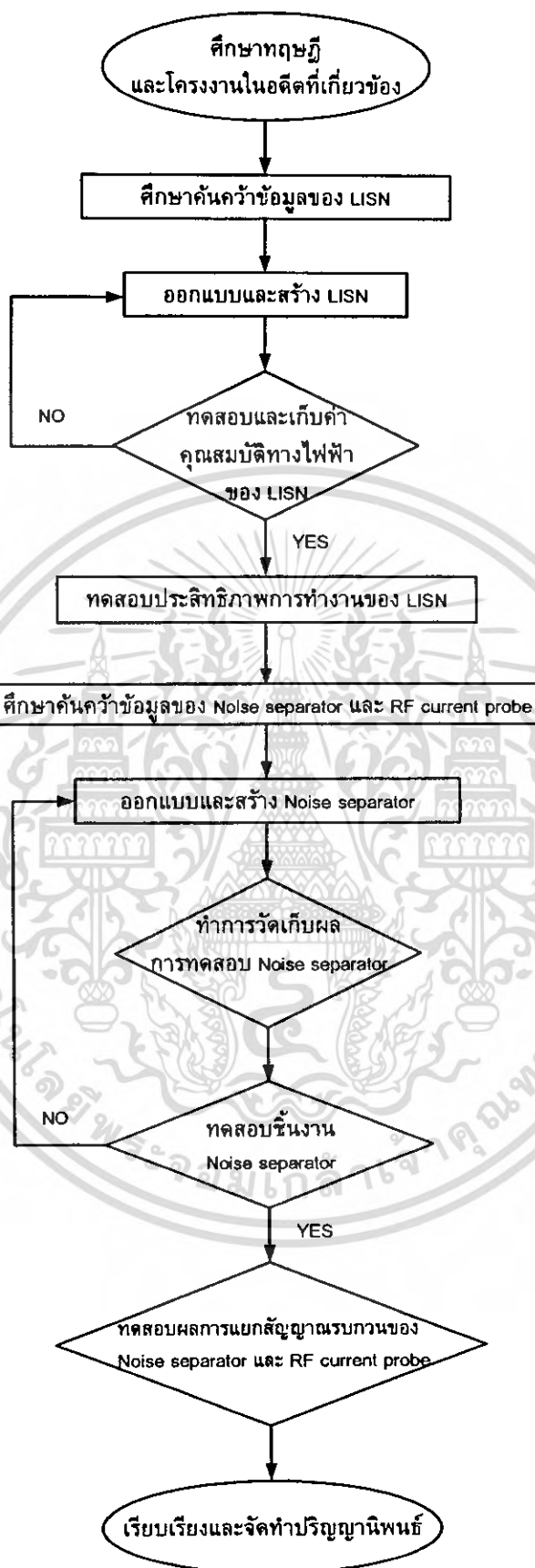


วางแผนงาน



ปฏิบัติงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 Flow chart ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดต่างๆ
2. สามารถออกแบบโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ขนาด 16 A ได้ตามมาตรฐาน (CISPR 16)
3. สามารถออกแบบชุดแยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำได้
4. สามารถแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำและวิเคราะห์ผลได้
5. สามารถนำความรู้ที่ได้รับมาไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ซึ่งจะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนทั้งที่มาตามสายตัวนำ และการแพร่กระจายทางอากาศ โดยอธิบายถึงสาเหตุที่มาจากปัญหาของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และมาตรฐานในการวัดสัญญาณรบกวนโดยสังเขป โดยอ้างอิงมาตรฐาน International special committee on radio interference (CISPR) เป็นหลัก

2.2 ความรู้พื้นฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

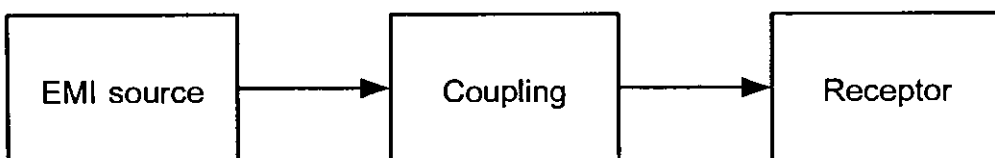
2.2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึงความสามารถของอุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (System) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติภายใต้สิ่งแวดล้อมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic: EM) โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียหรือผลกระทบใดๆ ต่ออุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Electromagnetic interference source: EMI source) เป็นแหล่งที่กำเนิดคลื่นความถี่เข้ามารบกวนในระบบ เช่นมอเตอร์ เครื่องส่งวิทยุ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า วงจรจุดระเบิด คอมพิวเตอร์และระบบต่อพ่วง ฟ้าผ่า เป็นต้น

2. ส่วนที่ได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Receptor หรือ Victim) ส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อสัญญาณรบกวน เช่นเครื่องรับวิทยุ วงจรตรวจจับสัญญาณคอมพิวเตอร์ สิ่งมีชีวิต เป็นต้น

3. ส่วนของการเชื่อมต่อ (Coupling) คือ ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก ซึ่งสามารถแบ่งเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำต่างๆ เช่น สายสัญญาณ ซึ่งการเชื่อมต่อแบบนี้เราจะเรียกว่า "Conduction" กับอีกเส้นทางการเชื่อมต่อ คือการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายผ่านไปสู่อากาศโดยเสมือนว่ามีอากาศเป็นตัวนำหรือเรียกว่า "Radiation"



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบและรูปแบบการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance: EMD)

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึง ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่อาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อ อุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณที่เข้ามาแทรกสอดสัญญาณหลัก

2.2.3 การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI)

การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึงการที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การเกิดเสียงดังขึ้นในลำโพงเนื่องจากสัญญาณความถี่ของโทรศัพท์ไร้สาย โดยเสียงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนคลื่นโทรศัพท์ไร้สายคือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ชนิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้นและสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากธรรมชาติ ซึ่งในทางความเป็นจริงสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดจากสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้นมาเป็นส่วนใหญ่ เพราะผลจากธรรมชาติที่จะทำให้เกิดคลื่นความถี่สัญญาณรบกวนได้นั้น เป็นไปได้ยาก เช่น การเกิดฟ้าผ่า การเกิดไฟฟ้าสถิต เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ซึ่งสิ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ระบบจุดสตาร์ทรถยนต์ แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง เครื่องจักรกลไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของมอเตอร์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เวดาร์ เครื่องส่งวิทยุ การเกิดโคโรนาในสายส่ง และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

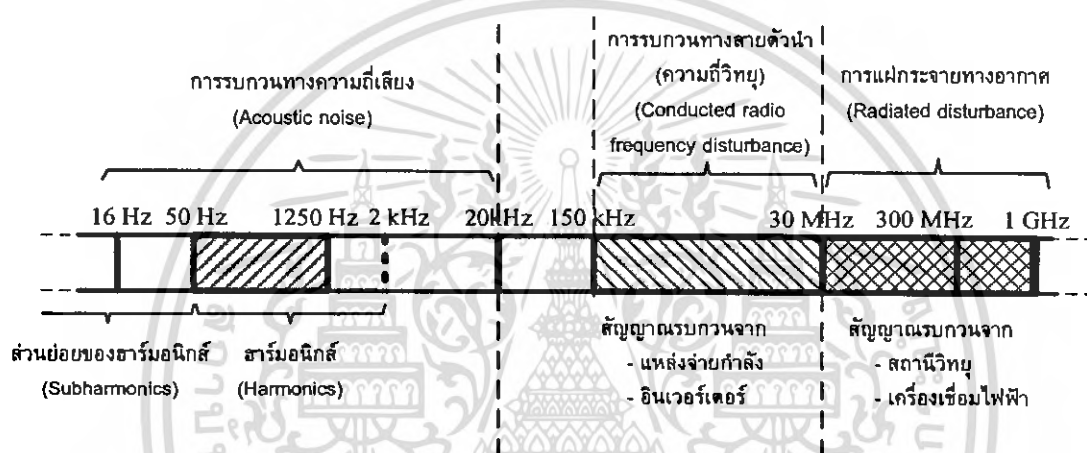
ปรากฏการณ์ EMC สัญญาณรบกวนที่เชื่อมต่อในรูปที่ 2.1 สามารถจำแนกตามลักษณะสัญญาณได้ เช่นหากวัดสัญญาณที่มาตามสายตัวนำจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (V) หรือกระแสไฟฟ้า (A)

หากวัดสัญญาณที่มาทางอากาศจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปสนามไฟฟ้า (V/m) หรือสนามแม่เหล็ก (A/m) หรือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Plane wave: W/m^2) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น (r/λ)

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) อาจจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบมีความผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าวก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าวจะเรียกว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) ซึ่งก็หมายถึงสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบนั่นเอง

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ในย่าน 0 Hz ถึงประมาณ 2,000 Hz จะจัดอยู่ในย่านการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือที่นิยมเรียกกันว่า “ฮาร์มอนิกส์” (Harmonics) ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และนอกจากนั้นยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

สำหรับความถี่ในย่าน 1.25 kHz ถึง 150 kHz ในปัจจุบันยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Engineers) แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายย่านความถี่ฮาร์มอนิกส์ ให้ครอบคลุมถึงย่านความถี่ดังกล่าวบ้างแล้ว



รูปที่ 2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

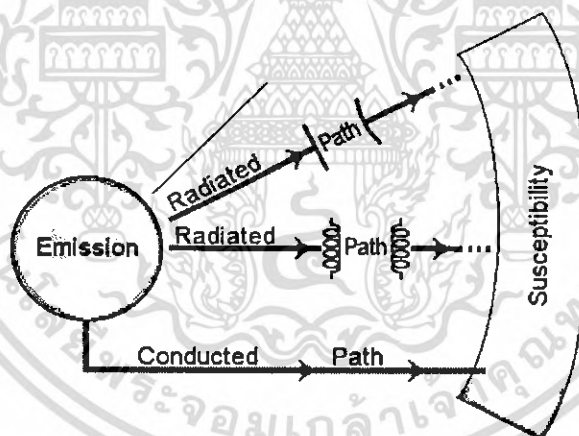
ส่วนย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือบางครั้งจะเรียกแทนว่าการรบกวนความถี่วิทยุ (Radio frequency disturbance) จะจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกัน คือที่ความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีในการตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามโดยแท้จริงแล้วคำว่า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” กับ “การรบกวนความถี่วิทยุ” จะไม่สามารถนำมาใช้แทนกันได้เพราะการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเพียงส่วนหนึ่งในย่านความถี่วิทยุเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

กล่าวในทำนองเดียวกัน สำหรับการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกของวงจรหนึ่ง จะนับว่าเป็น การแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ความถี่ถึง 20 kHz เท่านั้น ยังไม่ ถือว่าเป็นการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์

อีกกรณีหนึ่ง คือการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบ ไม่ถือว่าเป็นการป้องกันการ รบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์เช่นกัน เพราะเป็นการแก้ปัญหาในย่านความถี่ 50 Hz ถึงประมาณ 2,000 Hz (ย่านความถี่ฮาร์โมนิก) ซึ่งเป็นรูปแบบของสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ต่ำ ซึ่งจะไม่ครอบคลุมถึงการแก้ไขสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ความถี่สูง (150 kHz ถึงประมาณ 30 MHz)

เครื่องมือหรือระบบบางแบบจะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและตัวรับ ผลกระทบดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิด สัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ

1. การแผ่กระจาย (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือ วัตถุอื่นๆ
2. การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



รูปที่ 2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

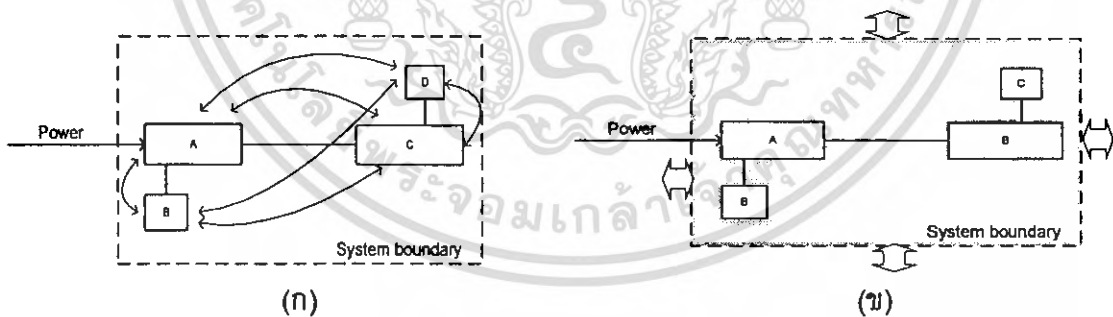
การเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปที่ 2.3 สามารถแทนให้อยู่ในรูป ของไฟฟ้า (Electrically) ซึ่งสามารถแทนให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (Capacitor) หรืออยู่ในรูป ของแม่เหล็ก (Magnetically) ก็สามารถแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ได้ ยกตัวอย่าง เช่น กรณีที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้เป็นตัวเชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถส่งผ่านสัญญาณ รบกวนดังกล่าวไปยังสายตัวนำอื่น

2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งที่ว่าด้วยเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวข้อที่ว่าด้วยเรื่องเกิดการรบกวนกัน (Interference) หรือความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรบกวน (Susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบที่สามารถทำงานอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และต้องไม่เป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งมาจากตัวระบบเดียวกันเองและจากระบบภายนอก ดังนั้นความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (Intra – system EMC) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (Inter – system EMC) ซึ่งนิยามของทั้ง 2 ประเภทเป็นดังนี้

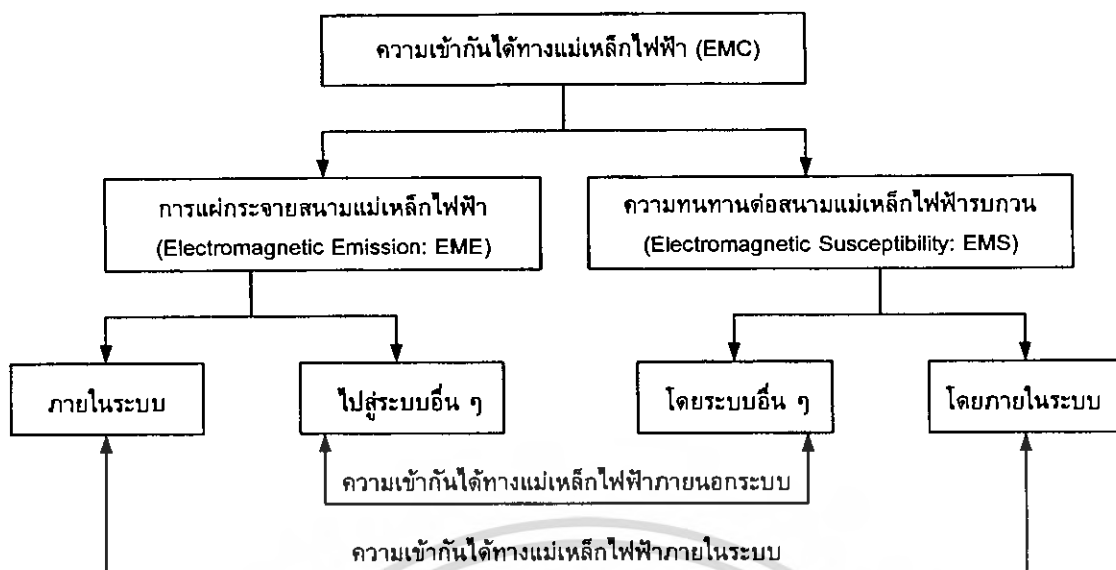
1. ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันและไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่นๆ ในระบบเดียวกันทนไม่ได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 (ก)

2. ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นโดยระบบภายนอก และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่ระบบอื่นภายนอกไม่สามารถทำงานได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ
(ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ของนิยามต่างๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.5

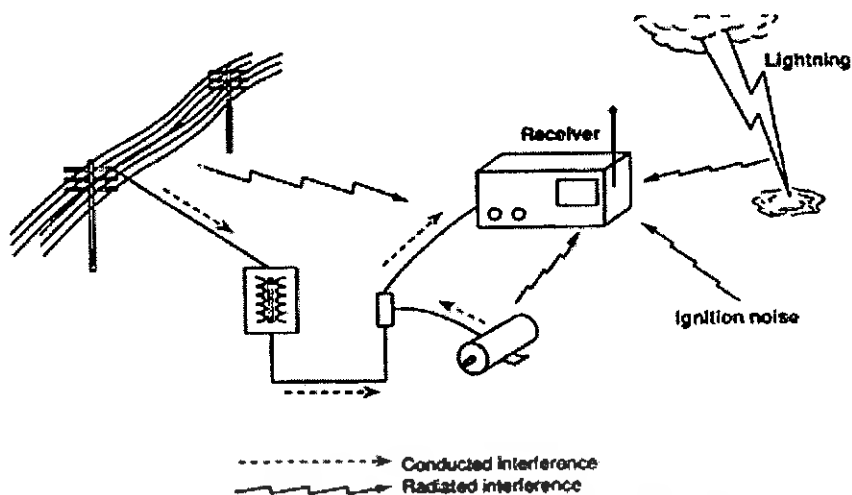


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Noise source)

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใด ๆ ทำงานอยู่หรือปนเข้ามา กับสัญญาณที่พึงประสงค์ ซึ่งบ่อยครั้งสัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดการผิดพลาดถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไปกว่าอุปกรณ์หรือระบบจะรับได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนมีหลายประเภทไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้เกิดได้จากที่สร้างโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์หรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” หมายถึงสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์หรือเครื่องมือใด ๆ ก็ตาม ที่สร้างออกมารบกวนอุปกรณ์ข้างเคียงหรือรบกวนตัวมันเองในขณะที่ทำงาน เป็นผลให้เกิดความผิดปกติในการทำงานหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ การรบกวนนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Electromagnetic Interference Source: EMI source) ส่วนที่ได้รับผลการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Receptor) และการเชื่อมต่อระหว่างสองส่วนแรก (Coupling) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้สองลักษณะ คือโดยผ่านทางตัวนำ เช่น สายไฟฟ้าหรือสายสัญญาณหรือที่เรียกว่า Conduction และการเชื่อมต่อโดยผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจะแผ่กระจายผ่านตัวกลางทางอากาศเรียกการเชื่อมต่อแบบนี้ว่า Radiation



รูปที่ 2.6 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่จะเป็นการแผ่กระจายทางอากาศที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น

- สัญญาณรบกวนในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric noise) เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าระหว่างที่เกิดฝนตกหรือฟ้าผ่า
- สัญญาณรบกวนคอสมิก (Cosmic noise) จากดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ กลุ่มดวงดาวขนาดใหญ่ หรือแกแลกซี โดยจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกมายังโลก
- การเกิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge: ESD)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์นั้น จะมีทั้งการแผ่กระจายทางอากาศและทางตัวนำ โดยเป็นผลเนื่องมาจากการที่มนุษย์ได้สร้างสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ทำงานก็จะสร้างสัญญาณรบกวนออกสู่ระบบเดียวกันและระบบอื่นๆ โดยรอบทั้งทางอากาศและทางสายตัวนำ การรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่ออุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันเองและระบบภายนอกด้วย ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนหลักที่มนุษย์สร้างขึ้น คือ

- เครื่องเชื่อม
- เครื่องให้ความร้อนโดยใช้ความถี่ (Radio frequency: RF)
- สายส่งกำลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง
- หลอดฟลูออเรสเซนต์
- การสันดาปของเครื่องยนต์
- เตาอบไมโครเวฟ
- ระบบการสื่อสาร
- มอเตอร์ไฟฟ้า และอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทางเดินของสัญญาณรบกวน ซึ่งทางเดินของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นตัวกลางที่สำคัญสำหรับการนำพาสัญญาณรบกวนออกไปสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งมีหลายทางเดินทั้งทางธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น

- พื้นดิน
- กลุ่มเมฆ
- สิ่งก่อสร้างและยานพาหนะ
- ตัวถังของอุปกรณ์และส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
- การเดินสายสัญญาณของแผ่นวงจร หรือสายตัวนำในวงจรหรือระบบ

3. สิ่งที่ได้รับผลกระทบและผลของสัญญาณรบกวน สำหรับสิ่งที่รับผลกระทบ (Receptor) คืออุปกรณ์หรือระบบใดๆ ที่ไม่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องมือ หรือระบบทำงานไม่เป็นดังเป้าหมายหรือไม่ทำงานเลย หรืออาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ ตัวอย่างของสิ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบเช่น

- ตัวขยายสัญญาณ
- ตัวรับสัญญาณ
- คอมพิวเตอร์
- เครื่องวัดทางอุตสาหกรรมและเครื่องมือทางการแพทย์
- มนุษย์และสัตว์

4. การแก้ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีหลักการดังนี้

4.1 ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิด (Noise source) โดยทำให้มีการส่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้น้อยที่สุด

4.2 ทำให้สัญญาณมีคุณภาพมากขึ้น นั่นคือการลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการในส่วนของเส้นทางเชื่อมโยง (Coupling) โดยสามารถทำได้ คือหากเส้นทางเชื่อมโยงผ่านสายตัวนำ (Conducted) จะแก้ปัญหาโดยใช้วงจรกรอง (Filter) กรองสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ และถ้าเส้นทางเป็นแบบผ่านอากาศ (Radiated) การแก้ปัญหาทำได้โดยการใช้วัสดุป้องกัน (Shielding) กันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

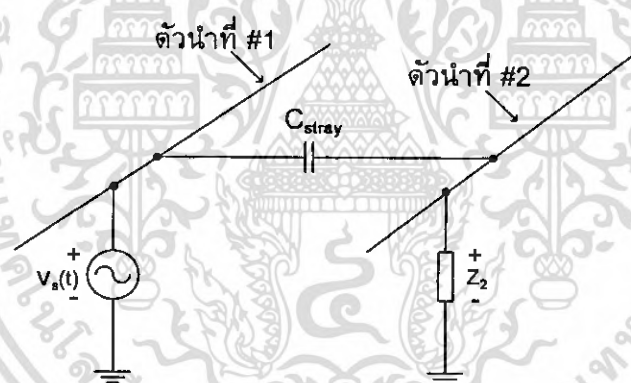
4.3 เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถทนการรบกวนจากสัญญาณรบกวนได้ (Increase immunity)

2.4.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ (Conducted interference)

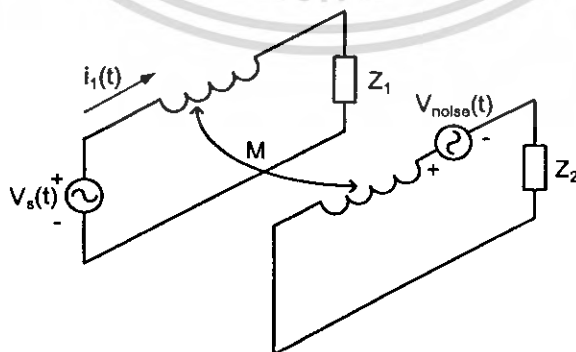
การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ จะเกิดกับอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ต่ำถึงปานกลาง การรบกวนเกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ในย่านตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำคือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

ด้วยกัน คือการเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม (Common – mode Interference: CM) และ โหมดแตกต่าง (Differential – mode Interference: DM) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป และการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานของการเกิดสัญญาณรบกวนไปสู่ตัวที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งการส่งผ่าน (Coupling) และการกระจาย (Propagation) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive coupling) และการส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำ (Inductive coupling)

- การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวน โดยกระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝง (Stray capacitance) ไปยังตัวนำอีกตัวหนึ่งที่อยู่ติดกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 และถ้ากระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุลงกราวด์จะเป็นการสร้างสัญญาณรบกวนชนิดโหมดผลร่วม
- การส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวนโดยวิธีทางแม่เหล็ก โดยในสายตัวนำจะค่าการเหนี่ยวนำเสมือน (Mutual inductance: M) อยู่ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลผ่านก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้ก็ไปเหนี่ยวนำกับค่าการเหนี่ยวนำของอีกตัวนำหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.8 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

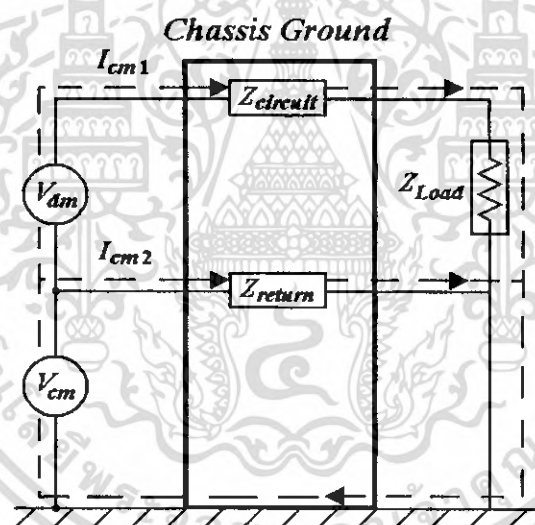
2.5 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

2.5.1 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common – Mode Interference: CM)

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากับกราวด์ของระบบทั้งในส่วนของ Line และ Neutral โดยจะถือว่าทั้ง Line และ Neutral ของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไหลลงกราวด์ของระบบโดยผ่านทางตัวเก็บประจุปรสิต (Parasitic capacitor) ที่อยู่ระหว่างตัวนำกับกราวด์ของวงจร

$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \quad (2.1)$$

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Line กับ Ground
 V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Neutral กับ Ground
 V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Line กับ Neutral



รูปที่ 2.9 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

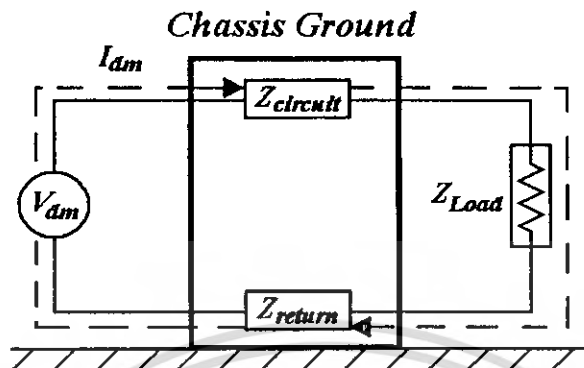
2.5.2 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential – Mode Interference: DM)

คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าเฉพาะใน Line และ Neutral เท่านั้น ให้ถือว่าวงจรนี้ไม่มีส่วนใดต่อลงกราวด์

$$V_{DM} = \frac{V_{LG} - V_{NG}}{2} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Line กับ Ground
 V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Neutral กับ Ground
 V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย Line กับ Neutral



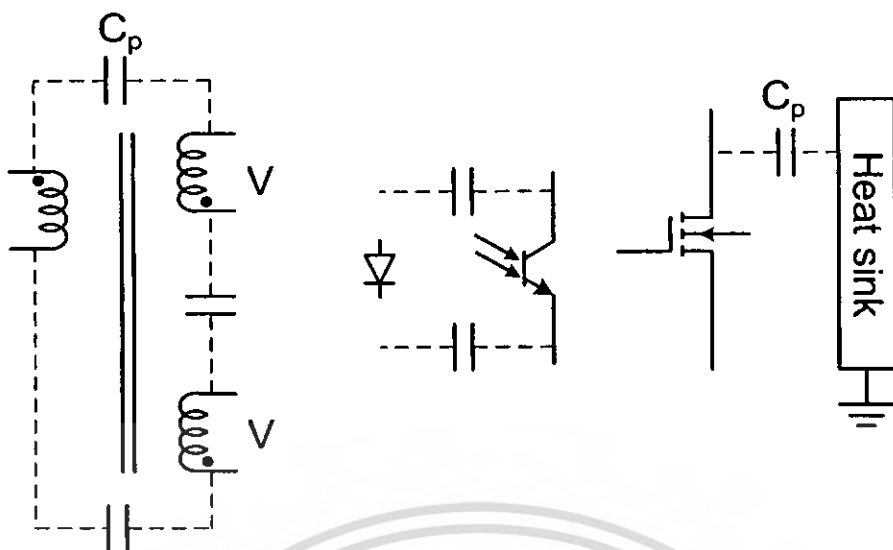
รูปที่ 2.10 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

2.6 สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

วงจรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มักจะมีการสวิตชิงที่ความถี่สูงและก่อให้เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา ($\frac{dv}{dt}$) ซึ่งมักจะเกิดในช่วงเริ่มนำกระแส (turn off) และผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลา ($\frac{di}{dt}$) ซึ่งมักจะเกิดในช่วงเริ่มนำกระแส (turn on) อันนำไปสู่การเกิดสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังและสิ่งแวดล้อมที่อยู่ข้างเคียง เช่นการเกิดสัญญาณรบกวนไปทางสายตัวนำต่อเชื่อมกับสายเมนหรือสายประธาน หรืออาจจะแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปทางอากาศ ตัวอย่างวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีใช้ทั่วไป เช่นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ อินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง เป็นต้น

รูปที่ 2.11 แสดงถึงเส้นทางเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนภายในอุปกรณ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่นค่าตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitance) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง หรือจะเป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเชื่อมต่อแยกสัญญาณด้วยแสง (Opto coupler) หรืออาจเป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวสวิตชิงกับตัวแผ่ระบายความร้อน เป็นต้น เมื่อพิจารณาจัดกลุ่มอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เป็นต้นเหตุให้เกิดการรบกวน จะแบ่งตามหน้าที่การทำงานได้สองกลุ่ม คือกลุ่มแอ็คทีฟและกลุ่มพาสซีฟได้ดังนี้

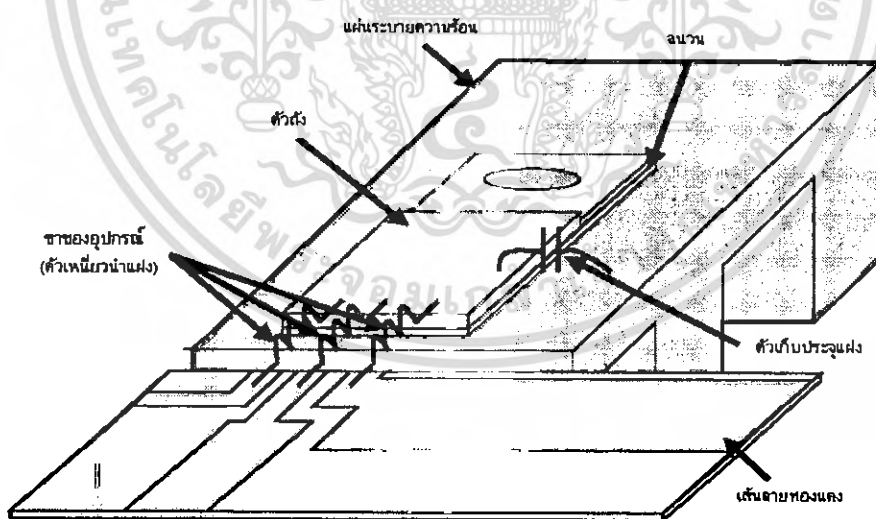
73013



รูปที่ 2.11 เส้นทางเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.6.1 ส่วนประกอบแอ็กทีฟ (Active component)

ส่วนประกอบแอ็กทีฟ สวิตช์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไปจะเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะส่วนประกอบแฝง (Parasitic) ที่อยู่ในตัวอุปกรณ์นั่นเอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำแฝง (L_p) ซึ่งเกิดจากความยาวขาของตัวอุปกรณ์หรือตัวเก็บประจุแฝง (C_p) ซึ่งเกิดจากการระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อน (Heat sink) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างองค์ประกอบแฝงภายในแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ตัวเหนี่ยวนำแฝงจะทำให้เกิดริงกิง (Ringing) ความถี่สูงที่รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์ตามกฎหมายของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังในสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = L_p \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

$$i_{C,PARA} = C_{PARA} \frac{dv}{dt} \quad (2.4)$$

ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันเค้น (Voltage stress) ที่ตัวสวิตช์ และยังเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าในรูปของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential – Mode noise current) อีกด้วยโดยที่สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างดังกล่าวจะเชื่อมต่อ (Coupling) ไปยังความต้านทานของตัวโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยผ่านทางตัวเก็บประจุภายในสวิตช์นั่นเอง (Miller capacitance)

ในขณะที่รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างตัวอุปกรณ์กับกราวนด์จะทำให้เกิดผลของตัวเก็บประจุแฝง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าในรูปของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common – Mode noise current)

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเนื่องจากสมการทั่วไปของตัวเก็บประจุแฝงเท่ากับในสมการที่ 2.5

$$C_{PARA} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

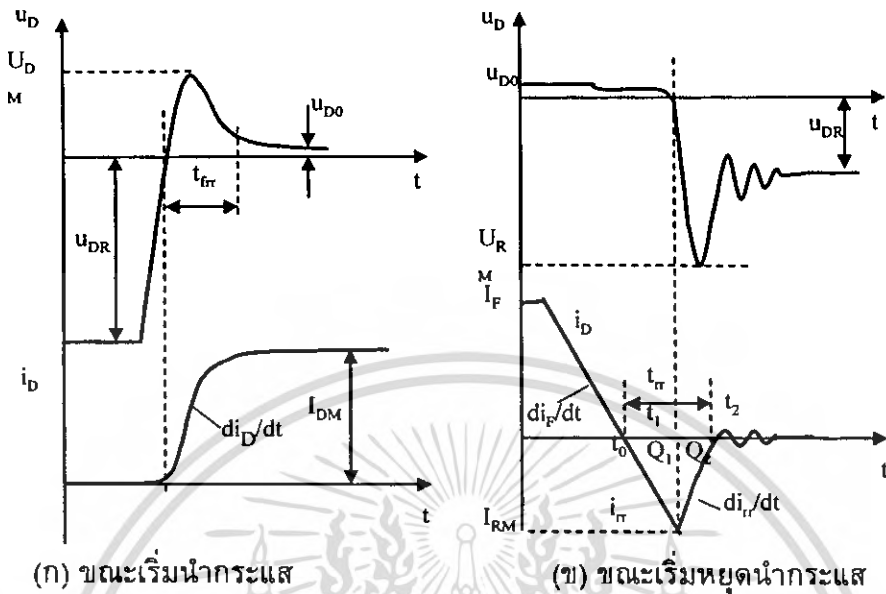
โดยที่ ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (Absolute permittivity)
 A คือค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ
 d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์จะเปรียบเหมือนกับการทำให้ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่ามาก ซึ่งก็จะเป็นผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุแฝงมีค่าลดลง ซึ่งนั่นก็หมายถึงเป็นการตัดเส้นทางเชื่อมต่อ (Coupling path) ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายดังกล่าวนั้นเอง แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำได้เพราะเหตุผลทางด้านความปลอดภัย (Safety issues) และเหตุผลทางความแข็งแรงของโครงสร้าง (Mechanical consideration)

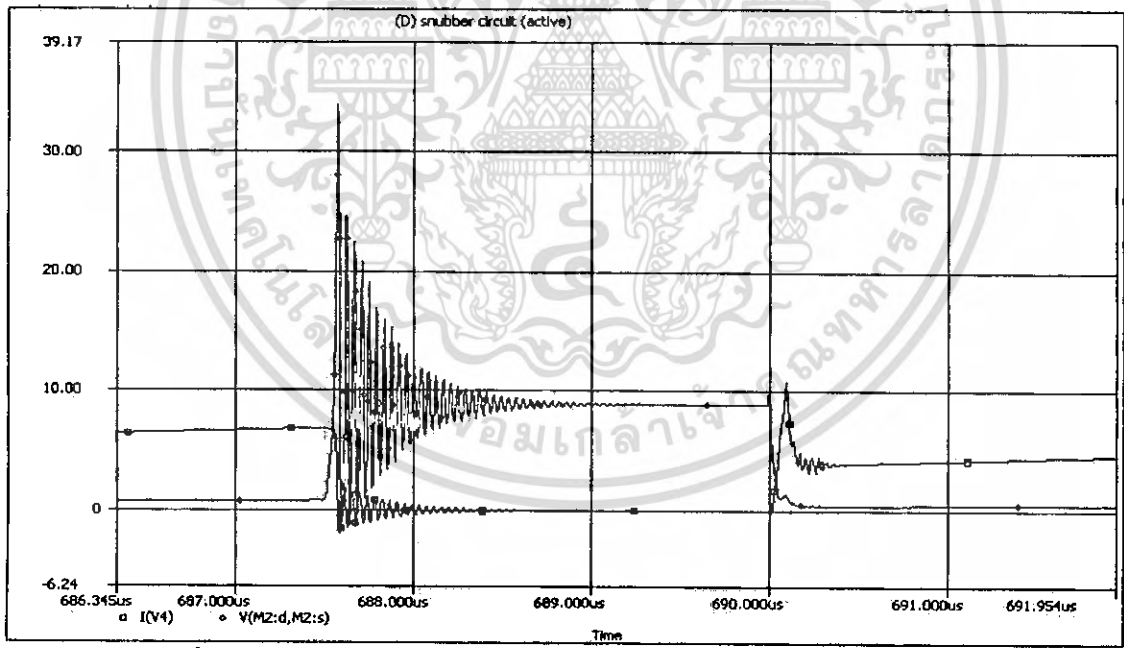
นอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้วยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์สวิตซ์อื่นๆ อีก เช่นช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด (Diode reserve – recovery time) เป็นต้น

ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสในรูปที่ 2.13 มีผลทำให้เกิดริงกิงของแรงดันทางด้านลบ และยืนยันผลด้วยผลการจำลองระบบใน

รูปที่ 2.14 แรงดันเกิดการริงกิงในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส จึงทำให้เกิดผลสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงๆ ซึ่งอาจรบกวนระบบสื่อสารได้



รูปที่ 2.13 ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด

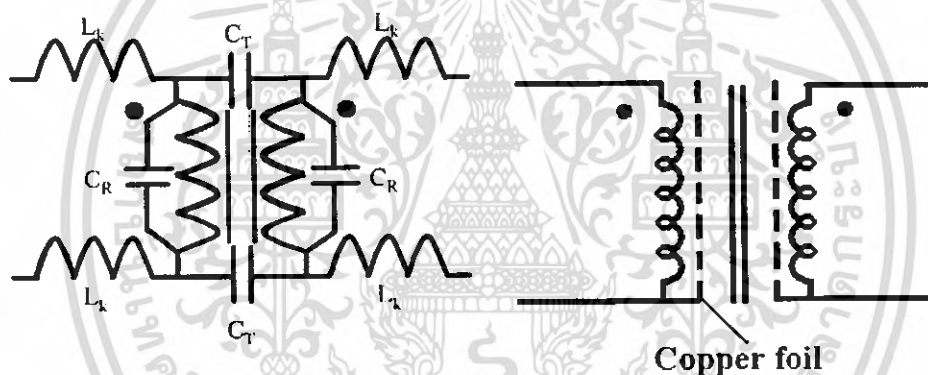


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผลขององค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ขณะสวิตช์เริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ส่วนประกอบพาสซีฟ (Passive component)

ส่วนประกอบพาสซีฟ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (High frequency isolation transformer) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM) ที่สำคัญของส่วนประกอบพาสซีฟ สำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (Switching power supply) โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ระหว่างขดลวด (Cross-coupling capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงดังกล่าวเป็นทางผ่านที่สำคัญของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมในรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นค่าส่วนประกอบแฝงในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เช่น ตัวเหนี่ยวนำรั่ว (L_k) ตัวเก็บประจุแฝงของขดลวด (C_R) และตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด (C_T) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวดดังกล่าวสามารถทำให้มีค่าลดลงได้ด้วยการเพิ่มระยะห่างระหว่างขดลวด กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการเพิ่มฟลักซ์รั่ว (Leakage flux) นั้นเอง หรืออาจจะทำได้โดยการใช้ฟาราเดย์ชิลด์รอบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ตัวฟาราเดย์ชิลด์จะเป็นการแยกกันระหว่างขดลวดด้วยการใช้แผ่นอลูมิเนียมหรือทองแดง (Aluminum or Copper foil) ต่อลงกราวนด์และคั่นกลางอยู่ระหว่างขดลวดดังกล่าว



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างส่วนประกอบแฝงในหม้อแปลงความถี่สูงและฟาราเดย์ชิลด์

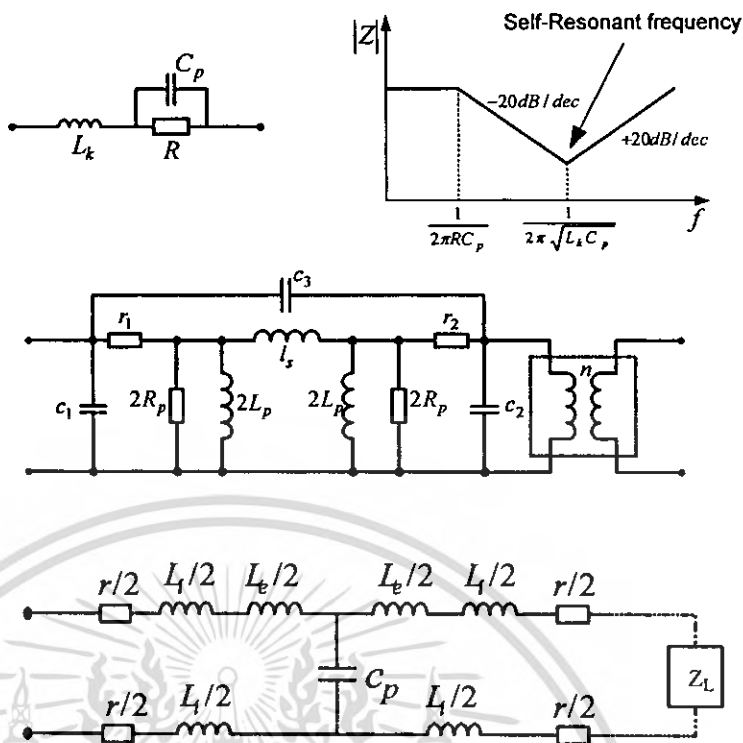
ตัวต้านทาน

ตัวเก็บประจุ

ตัวเหนี่ยวนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า

สายตัวนำ

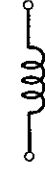
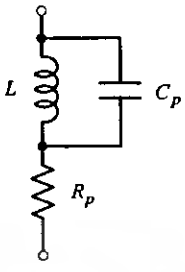
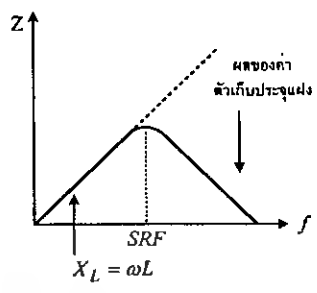


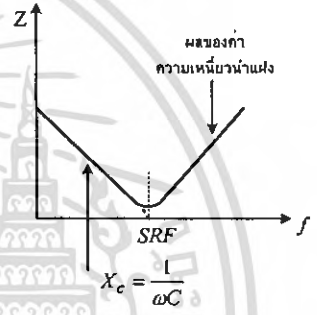


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างผลของส่วนประกอบแฝงในอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า และสายตัวนำที่ความถี่สูง

นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบค่าต่างๆ ที่แฝงอยู่ในตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าองค์ประกอบแฝงดังกล่าว จะเป็นตัวจำกัดย่านความถี่ใช้งานสูงสุดสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว (Self resonant frequency: SRF) โดยที่สำหรับตัวเก็บประจุจะถูกจำกัดความถี่ใช้งานสูงสุดด้วยค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดจากความยาวขาของตัวเก็บประจุเอง ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำจะถูกจำกัดโดยค่าตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขด และในส่วนของตัวต้านทานจะถูกจำกัดด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุแฝงซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระบวนการในการผลิตตัวต้านทานดังกล่าว เป็นต้น

ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ ซึ่งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือจุดความถี่ (Self resonant frequency: SRF) ดังที่ได้สรุปในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ

	ย่านความถี่ต่ำ	ย่านความถี่สูง	ผลตอบสนองเชิงความถี่
ตัวเหนี่ยวนำ			
ตัวเก็บประจุ			

ในตารางที่ 2.1 แสดงย่านความถี่ที่สูงกว่า ค่าเรโซแนนซ์จะเป็นย่านที่มีผลต่อสัญญาณรบกวนความถี่สูง เนื่องจากการสูญเสียคุณลักษณะของตัวอุปกรณ์ จึงทำให้มีการเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนได้ง่ายขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ตัวอุปกรณ์ที่มีค่าเรโซแนนซ์ให้สูงที่สุดเพื่อคงคุณลักษณะตัวอุปกรณ์ไว้

2.7 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่าต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านตัวรับ และจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (Antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว ไม่ได้เป็นการรับประกันว่าอุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เพียงแต่เป็นการยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้าดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.7.1 FCC REGULATIONS FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission ซึ่งเป็นของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (Wire and radio communications) ซึ่งก่อตั้งในปี ค.ศ. 1927 และสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (Radio – frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (Telephone network)

สำหรับ Part 15 จะแบ่งมาตรฐานออกเป็น 4 ฉบับ และยังได้นิยามความหมายของอุปกรณ์ความถี่วิทยุว่าคือ อุปกรณ์ใดๆก็ตามที่การทำงาน ทำให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ (Radio – frequency energy) ไม่ว่าจะเป็นทางสาย (Conduction) หรือทางอากาศ (Radiation) ก็ตาม โดย FCC ได้นิยามพลังงานที่ความถี่วิทยุ (Energy in the radio frequency range) ว่าคือพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่วิทยุ (9 kHz – 3000 GHz) โดยมีจุดประสงค์ในการออกมาตรฐานเพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (Transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้มีใบอนุญาตในการติดตั้ง (Radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อสารสื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (Radio communications) โดยอุปกรณ์ดิจิตอล (Digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดดังกล่าว

2.7.2 CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (ย่อมาจากคำเต็มซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศสว่า Comite International Special des Perturbations Radioelectrique) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1933 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ นอกจากนั้นตัว CISPR ไม่ได้เป็นกฎข้อบังคับหรือมาตรฐานบังคับใช้แต่อย่างใด แต่มาตรฐานดังกล่าวจะถูกดัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในประเทศจึงกลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย โดยมาตรฐาน

CISPR Publication 22 เป็นการออกมาเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกรณีของเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งก็หมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (Digital electronics) ซึ่งได้เกิดขึ้นในปี ค.ศ.1985 และหลังจากนั้นหลายๆประเทศทางยุโรป หรืออาจจะกล่าวได้ว่าทั่วโลกได้นำมาตรฐานดังกล่าวออกบังคับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติของตน (National standard) เช่นประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

2.7.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards) MIL – STD – 461B และ MIL – STD – 462 เป็นมาตรฐานที่ออกโดยการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL – STD – 461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL – STD – 462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ โดยที่มาตรฐานดังกล่าวจะมีรายละเอียดและเข้มข้นกว่า FCC เพราะมาตรฐานดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility)” และย่านความถี่ที่พิจารณาอย่างกว้างกว่าอีกด้วย (30 Hz – 40 GHz)

2.7.4 VDE ย่อมาจาก Verband Deutscher Elektrotechniker ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมัน ซึ่งในประเทศเยอรมันได้กำหนดไว้ว่าอุปกรณ์ที่มีความถี่ในการทำงานสูงกว่า 10 kHz จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ถ้าไม่มีใบอนุญาต ทำให้โรงงานในประเทศเยอรมันทั้งหมดต้องมีการทดสอบสินค้าตามมาตรฐานดังกล่าว โดย VDE 0875 ใช้สำหรับอุปกรณ์ที่มีย่านความถี่รบกวนที่กว้าง (Broadband interference) เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้านเป็นต้น ในขณะที่ VDE 0871 ใช้สำหรับย่านความถี่รบกวนที่กว้างและแคบ (Broad – and narrow-band) ซึ่งได้แก่อุปกรณ์สารสนเทศ (Information Technology Equipments) เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานของประเทศเยอรมันดังกล่าว นั้น จะมีภาพรวมคล้ายกับมาตรฐานของยุโรป EN 55014 และ EN 55022 ตามลำดับยกเว้นเพียงแต่ย่านความถี่ที่พิจารณาจะมีความแตกต่างกัน

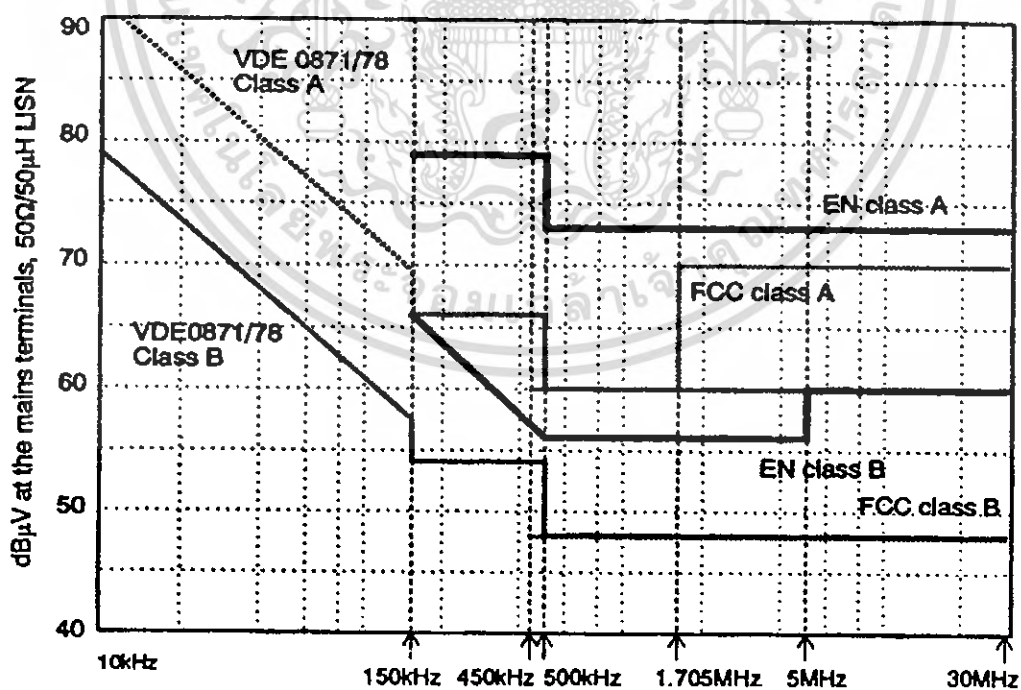
2.7.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยเพิ่งได้มีการเริ่มต้นนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 โดยได้มีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้วได้แก่ มอก.1955 – 2542 (บริษัทส่งส่องสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และ มอก.1956 – 2542 (บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งอยู่ในระหว่างดำเนินการให้มีการบังคับใช้

อนึ่งมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้าน EMC ของ IEC เช่นเทคนิคการทดสอบด้านสิ่งแวดลอมมาใช้ โดยออกเป็นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.)

ตามลำดับโดยที่ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.17 ตารางสรุปมาตรฐานนานาชาติ และเส้นขีดจำกัดตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

International Regulations Summary (Emissions)			
CISPR	FCC	EN's	Description
11	Part 18	EN 55011	Industrial, Scientific and Medical
12	(SAE)		Automotives
13	Part 15	EN 55013	Broadcast Receivers
14		EN 55014	Household Appliances/tools
15		En 55015	Fluorescent lights/luminaries
16			Measurement apparatus/methods
22	Part 15	EN 55022	Information technology equipment
		EN 50081-1, 2	Generic emissions standards



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของข้อกำหนดและมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

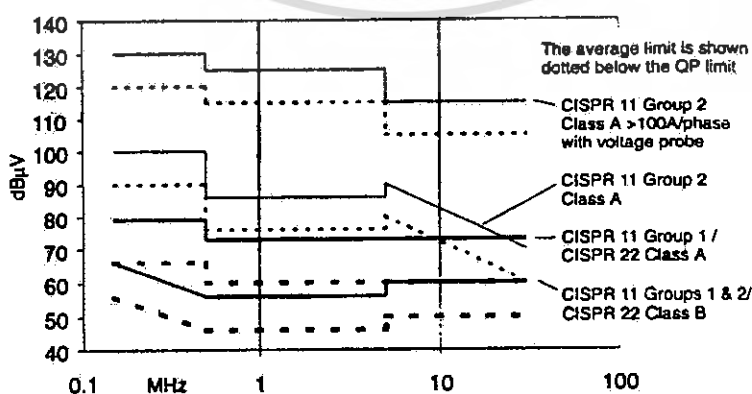
2.8 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกต้องนั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ที่จำเป็นต้องใช้หลายอย่างและเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำในโหมดรวม ซึ่งได้แปลและเรียบเรียงมาจากมาตรฐาน CISPR 11 และ CISPR 22 โดยมีเงื่อนไขของอุปกรณ์ดังนี้

2.8.1 AMN/LISN

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้ง่าย โดยการต่อไว้ที่ทางด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test: EUT) ซึ่งสาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟเพราะที่ด้านออกของแหล่งจ่ายไฟเป็นเส้นทางหลักของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์จะไปรบกวนวงจรอื่นทางตัวนำ และเพราะว่าสายที่ต่อจากแหล่งจ่ายจะทำตัวคล้ายกับเป็นสายอากาศแผ่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลองจาก EN 55022 (CISPR 22) ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 3 เมื่อปี 1997 ได้นำเสนอการทดลองการรบกวนทางตัวนำที่พอร์ตโทรคมนาคม (Telecommunication ports) แต่ที่กล่าวไว้ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อีกมาก ในรูปที่ 2.18 คือ ระดับเส้นเปรียบเทียบหรือกลุ่มเส้นจำกัด (Limit) ที่ความถี่ต่าง ๆ ของ CISPR เกือบทุกมาตรฐาน โดยที่ Class A (เส้นทึบ) ใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในเชิงการค้า และอุตสาหกรรม และ Class B (เส้นประ) ใช้สำหรับอุปกรณ์สำนักงาน ที่พักอาศัย ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการค้า และอุตสาหกรรม

เส้นจำกัดเหล่านี้ได้สมมุติความต้านทานที่ความถี่วิทยุเพื่อเตรียมสำหรับการทดลอง ซึ่งโดยทั่วไปความต้านทานหลักสามารถปรับค่าได้กว้างแค่ไหนขึ้นอยู่กับสิ่งที่แวดล้อมที่จะทำการวัด เมื่อทำการวัดแรงดันที่ตกรวมความต้านทานและถ้าอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบมีความต้านทานต่ออยู่กับแหล่งจ่าย โดยไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าไรแต่อาจจะมีค่าค่อนข้างสูง ในการทดลองให้ทำการวัดค่าหลาย ๆ ครั้ง จากหลาย ๆ ห้องทดลองที่มีค่าเท่ากันความต้านทานหลักที่ต่อเข้าไปจะต้องมีความเสถียรภาพ นั้นเป็นที่มาของ Artificial Main Network หรือ AMN ตามมาตรฐาน CISPR หรือ Line Impedance Stabilization Network: LISN ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา และรวมไปถึงโครงข่ายชนิดอื่น ๆ ด้วย

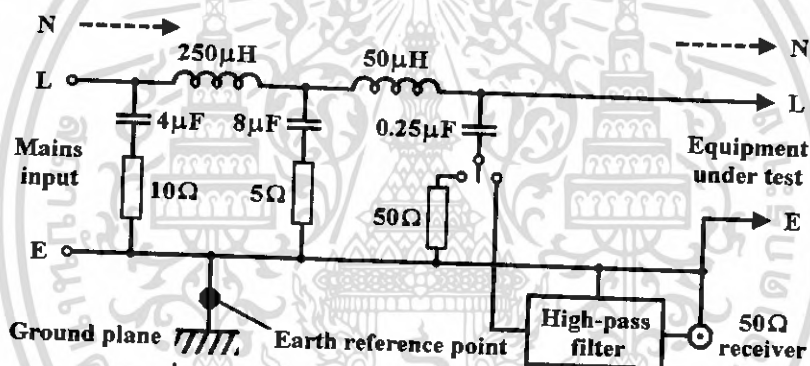


รูปที่ 2.18 เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

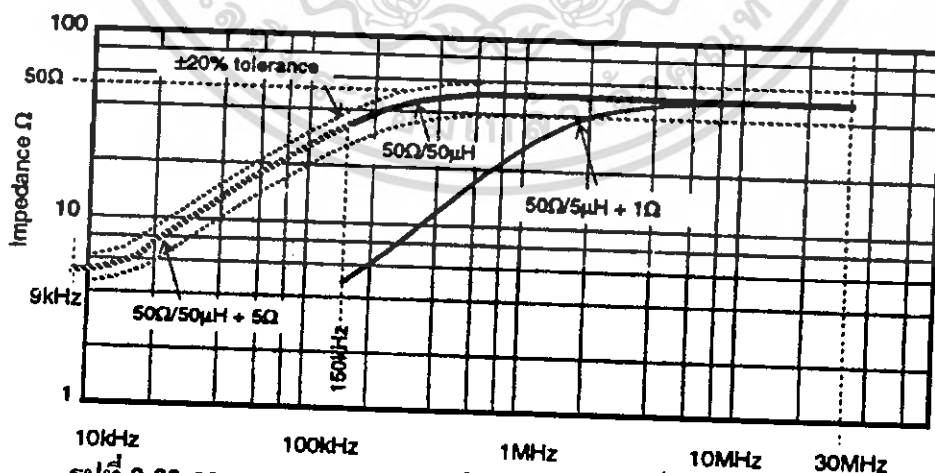
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบังคับเกี่ยวกับ AMN/LISN จะอยู่ใน CISPR 16 - 1 ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป แต่ที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบคือ $50\ \Omega / 50\ \mu\text{H} \pm 5\ \Omega$ AMN/LISN จากข้อบังคับต้องการหมายถึง ความต้านทานระหว่างสายแต่ละเส้นกับจุดดิน (Earth) จะมีค่าเป็น $50\ \Omega$ ขนานกับ $50\ \mu\text{H}$ ที่ความถี่ 150 kHz ถึง 30 MHz แต่ถ้าต้องการทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz จะใช้ตัวต้านทาน $5\ \Omega$ ต่ออนุกรมกับ $50\ \mu\text{H}$ แทนรูปที่ 2.19 เป็นวงจรพื้นฐานของโครงข่ายดังกล่าว และรูปที่ 2.20 เป็นการตอบสนองต่อความถี่ตามมาตรฐาน CISPR 16 - 1 โครงข่ายที่ใช้ในแต่ละสายจะต้องมีค่าที่เท่ากันทั้ง 2 สาย ในกรณี 1 เฟส และ 3 หรือ 4 สายในกรณี 3 เฟส วงจรกรองแบบความถี่สูงผ่านอาจไม่ต้องมีก็ได้ แต่ในเชิงพาณิชย์จะต่อไว้กับ AMN/LISN เพื่อช่วยลดความถี่ต่ำ (50 Hz และฮาร์มอนิกส์) ที่ไหลผ่านเครื่องมือวัด และป้องกันผลที่เกิดจากกระแสเกิน

AMN/LISN จะต้องนำสัญญาณที่จะวัดทั้งสองสายมาต่อเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณที่มีความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) ต่ำ และสามารถปรับระดับของสัญญาณที่จะวัดได้เพื่อยกระดับให้แยกออกจากแหล่งจ่ายไฟ วิธีการเหล่านี้สามารถทำได้โดยใช้ส่วนต่างๆ ในโครงข่าย



รูปที่ 2.19 วงจร AMN/LISN ตามมาตรฐาน CISPR



รูปที่ 2.20 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CISPR 16 - 1 ได้กำหนดโครงข่าย $50 \Omega / 50 \mu\text{H} \pm 5 \Omega$ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อความถี่ดังรูปที่ 2.20 สามารถใช้ได้กับกระแสสูงสุด 500 A อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถใช้เป็นวงจรอ้างอิงให้กับทุกมาตรฐานของ CISPR ได้ เพราะค่อนข้างจะเป็นเชิงพาณิชย์จึงใช้ได้ในช่วงที่ไม่กว้างมาก สิ่งสำคัญในการใช้ AMN/LISN คือต้องต่อจุดเปรียบเทียบเข้ากับแผ่นกราวด์ (Ground plane) ซึ่งพบได้ตามมาตรฐานในการวัดทั่วไปจะเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ $12 \mu\text{F}$ ต่ออยู่ระหว่างแต่ละสายกับกราวด์ ถ้าเป็นเหตุการณ์จริงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230 V ความถี่ 50 Hz และมีค่าความจุไฟฟ้านี้ต่ออยู่ด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดกระแสประมาณ 0.9 A ไหลผ่านตัวเก็บประจุลงดิน กระแสนี้จะเป็นอันตรายอย่างมาก หากไม่มีการป้องกันโดยการต่อสายลงดิน ดังนั้นจะต้องมีแหล่งจ่ายและระบบสายดินที่เชื่อถือได้เมื่อต้องการใช้ AMN/LISN การทดลองโดยทั่วไปจึงต้องมีข้อบังคับในเรื่องนี้เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ อุปกรณ์ที่ใช้จึงต้องมีฉลากเกี่ยวกับวิธีใช้อย่างปลอดภัยจากผู้ประกอบการเพื่อป้องกันกระแสรั่วที่มีค่าสูง และต้องต่อสายดินทุกครั้ง ถ้าไม่ได้ทำการแยกระบบ (Isolate) ของ AMN/LISN ออกจากแหล่งจ่ายไฟและจุดเปรียบเทียบหลัก

ผลกระทบที่สองของกระแสรั่วจากแหล่งจ่ายไฟของ AMN/LISN ไม่สามารถจะป้องกันโดยใช้ Earth leakage หรือ RCB ได้ ดังนั้นถ้าต้องการความปลอดภัยที่แน่นอน ควรใช้หม้อแปลงแยกระบบที่จะวัดออกจากแหล่งจ่ายไฟและวิธีนี้จะไม่มีผลต่อความถี่วิทยุที่ต้องการจะวัดด้วย ถึงแม้ว่าจะถูกจำกัดกระแสโดยแหล่งจ่ายซึ่งอาจเป็นปัญหาในของวงจรแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายไฟตรงแบบใหม่ซึ่งเป็นที่นิยม อาจทำให้หม้อแปลงอิมพัลส์ด้วยกระแสที่สูงมากในทุกครั้งคาบ วิธีนี้จะทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไป และทำให้การวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนผิดจากความเป็นจริง ทำให้ต้องใช้พิทช์โวลต์แอมแปร์ที่สูงในการทดลอง

2.8.2 แผ่นกราวด์

เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด หรือ Equipment Under Test: EUT ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงวัสดุที่ใช้หากล่อง ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร

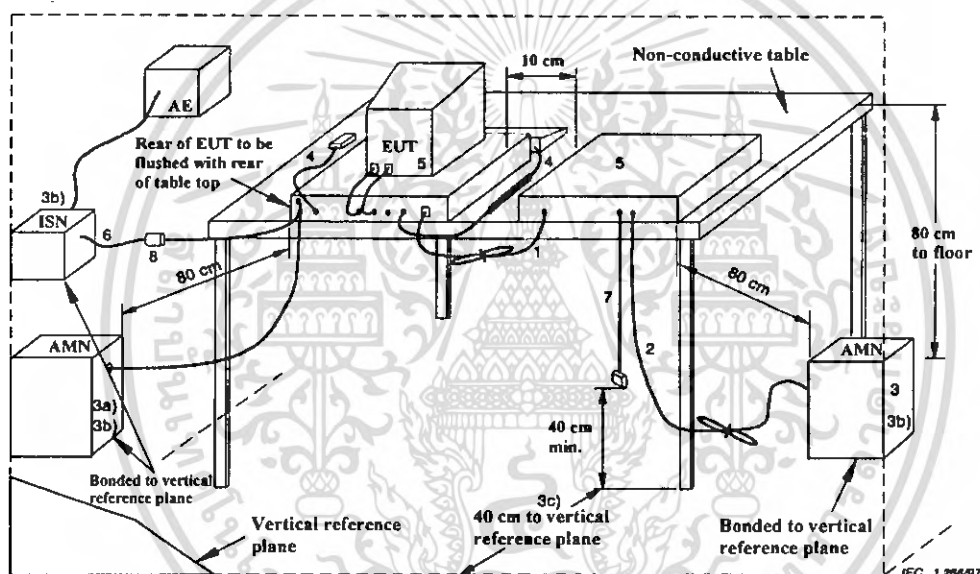
แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบได้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลอง และต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคงด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้ และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดไม่น้อยกว่า 0.5 เมตร มีขนาดไม่ต่ำกว่า 2 เมตรคูณ 2 เมตร จุดกราวด์อ้างอิงของ AMN/LISN และ Impedance Stabilization Network (ISN) จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำ โดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จำทำได้

2.8.3 เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัด

เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัดปกติมักจะใช้ Spectrum analyzer เป็นเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในการวัดแบบ Quasi – peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16 – 1 เครื่องรับสัญญาณแบบ Average จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16 – 1 และจะต้องมี Bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16 – 1 ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบ Peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 3 ของ CISPR 16 – 1 และจะต้องมี Bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16 – 1

2.8.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

จากรูปที่ 2.21 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้



AMN: Artificial mains network

AE: Associated equipment

EUT: Equipment under test

ISN: Impedance stabilization network

รูปที่ 2.21 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เหนือแนวระดับของแผ่นกราวด์และไม่สามารถทำให้สั้นได้ จะต้องมัดทบปลายสายให้มีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟจากแหล่งจ่ายจะต้องมัดทบกันให้สายสั้นที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดต้องต่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ AMN/LISN และ ISN ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ที่อยู่ในแนวระดับ

- แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องต่อมาจาก AMN/LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีปลายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์
- AMN/LISN และ ISN ที่ใช้เป็นที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด 80 เซนติเมตร และอย่างน้อย 80 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่นโลหะอื่นๆ
- สายไฟหลักและสายสัญญาณควรวางให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่ทำได้และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร

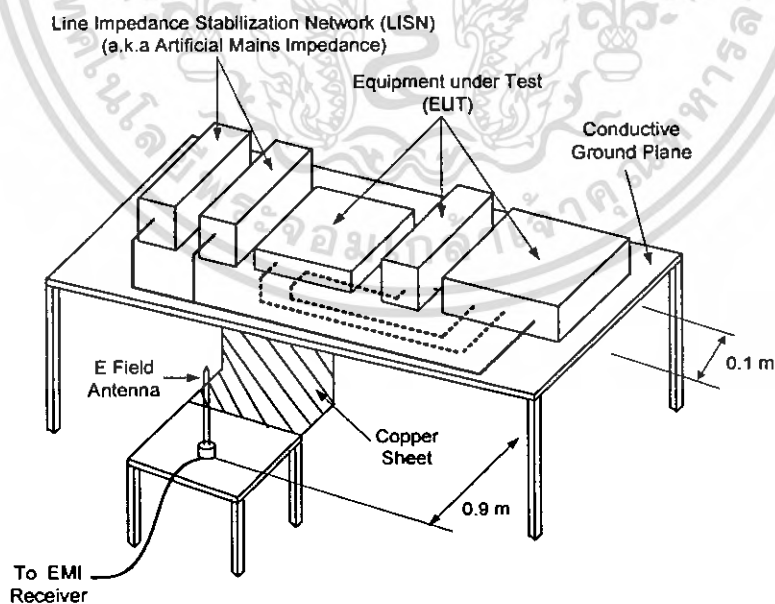
4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น สายคีย์บอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆให้วางในเหมือนการใช้งานทั่วไป

5. สิ่งที่อยู่รอบๆ ภายนอกจะต้องอยู่ห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นข้างเคียงและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางอยู่บนตัวควบคุมได้

6. มีสายสัญญาณเข้าออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ Current probe ควรวางห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร

2.8.5 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR



รูปที่ 2.22 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้

1. ต้องมีระยะห่างในการวัด 10 เมตร (หรือ 3 เมตร หรือ 30 เมตร ในบางกรณี แต่ต้องแก้ไขแฟคเตอร์ $\frac{1}{D}$)
2. สถานที่ทดสอบต้องเป็นที่โล่งและจัดห้องให้ไม่มีการสะท้อนของสัญญาณ
3. จัดวางสายเคเบิล อินพุท เอาท์พุท ควรจัดวางให้เหมาะสมกับชนิด
4. สำหรับกรณีหาสนามแม่เหล็กสูงสุด
 - ให้สายอากาศหันไปทางแม่เหล็กทั้งแนวตั้งและแนวนอน
 - ปรับความสูงของสายอากาศจาก 1 ถึง 4 เมตร เพื่อหาจุดสูงสุดของผลการสะท้อนกลับของกราวนด์ (Ground)
 - หมุน EUT 360° เพื่อหาจุดที่มีการแผ่รังสีที่แย่มากที่สุดของแบบอุปกรณ์ (หรือทำให้สายอากาศเคลื่อนที่รอบๆ EUT)
5. ตัวรับสัญญาณต้องให้สอดคล้องกับข้อประกาศข้อ 16 ของ CISPR มี Band width (6 dB) ที่ 9 kHz สำหรับใช้งานที่ความถี่ $0.15 < f < 30$ MHz หรือ 120 kHz ที่ความถี่ $30 < f < 1,000$ MHz
6. ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบควอซี – พีค (Quasi – peak detector) ตัวตรวจจับสัญญาณแบบควอซี – พีค ควรกำหนดค่า Band width ไว้ต้องมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณระหว่างสัญญาณ Broadband (BB) และสัญญาณ Narrowband (NB) ข้อบังคับในการออกแบบการป้องกันสัญญาณรบกวนทั้ง 2 ชนิด กรณีใช้เกี่ยวกับบ้านพักอาศัย เกี่ยวกับโรงงาน และเกี่ยวกับการค้า ควรใช้มาตรฐานพลเรือนของ CISPR

2.9 สรุป

จากเนื้อหาในบทที่ 2 นี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ซึ่งได้อธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ในช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz โดยจะมีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมและโหมดผลต่างเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากค่าองค์ประกอบแผ่ภายในอุปกรณ์ต่างๆ และในงานวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐานในการวัดสัญญาณรบกวน โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน International special committee on radio interference (CISPR) เป็นหลัก

บทที่ 3

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

Line Impedance Stabilization Network: LISN

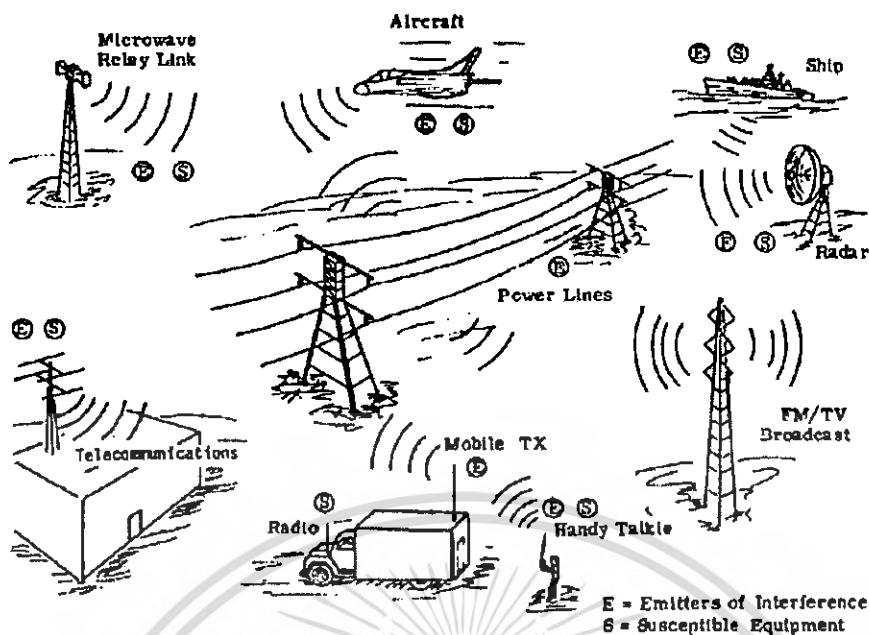
3.1 ที่มาของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

ในปัจจุบันได้มีการนำวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งวงจรเหล่านี้ สามารถเป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ว่าจะทางตัวนำหรือโดยการแผ่กระจายผ่านตัวกลางทางอากาศ การที่วงจรเหล่านี้มีระยะห่างระหว่างวงจรสั้นลง จะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรไปรบกวนการทำงานของวงจรอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ นอกจากนี้การนำวงจรจำนวนมากมาทำงานร่วมกันภายใต้พื้นที่เล็กๆ ก็มีส่วนในการเพิ่มสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

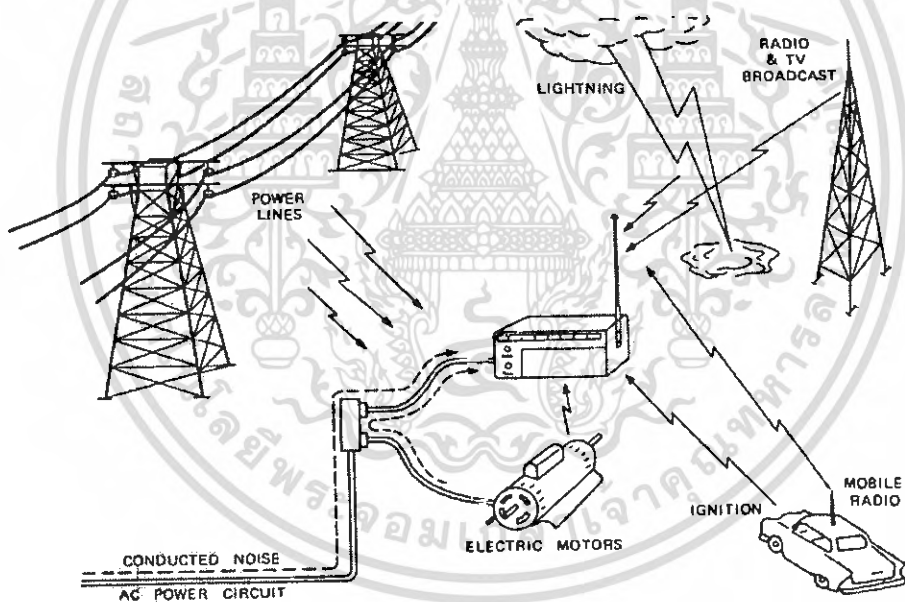
การวิเคราะห์และออกแบบวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ จะเป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำชั้นเดียว และหลายชั้น อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 50Ω ตลอดย่านความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$ ตามมาตรฐาน CISPR 16 - 1 และอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุถูกทำการทดสอบองค์ประกอบแฝงภายใน ในการที่จะทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ดีในสภาวะแวดล้อมจริง ในการออกแบบวงจรจำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนด้วย โดยวงจรต้องถูกออกแบบไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนแก่วงจรอื่น อีกทั้งจะต้องทนต่อสัญญาณที่มารบกวนได้ ในระดับมาตรฐานที่ยอมรับ และปัญหาที่พบอีกอย่าง คือนอกจากจะถูกสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ แล้วอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบนั้นอาจจะเป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ด้วย เพราะฉะนั้นนอกจากจะต้องป้องกันไม่ให้ถูกรบกวนจากวงจรอื่นๆ แล้วอุปกรณ์ที่ออกแบบจะต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ด้วย

ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความถี่สูงนั้น ขณะที่ทำการวัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง จะต้องทำการแยกสัญญาณจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงกับสัญญาณจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะทำการวัดนั้นออกจากกัน เพื่อที่จะได้ทำการวัดสัญญาณได้ถูกต้อง จึงมีการสร้างวงจรโครงข่ายสร้างเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) เพื่อแยกสัญญาณที่มาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปลงกราวนด์และวงจร โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์นี้ สามารถใช้งานในช่วงย่านความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$ และค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีความเสถียรภาพสูงให้ได้ประมาณ 50Ω ตลอดการใช้งาน การที่จะสร้างวงจรกรองสัญญาณความถี่ เพื่อนำมาป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไม่ให้นำรบกวนสัญญาณจากอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อเป็นการแก้ไขวงจรกรองสัญญาณความถี่ให้หมดและไม่เป็นการรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

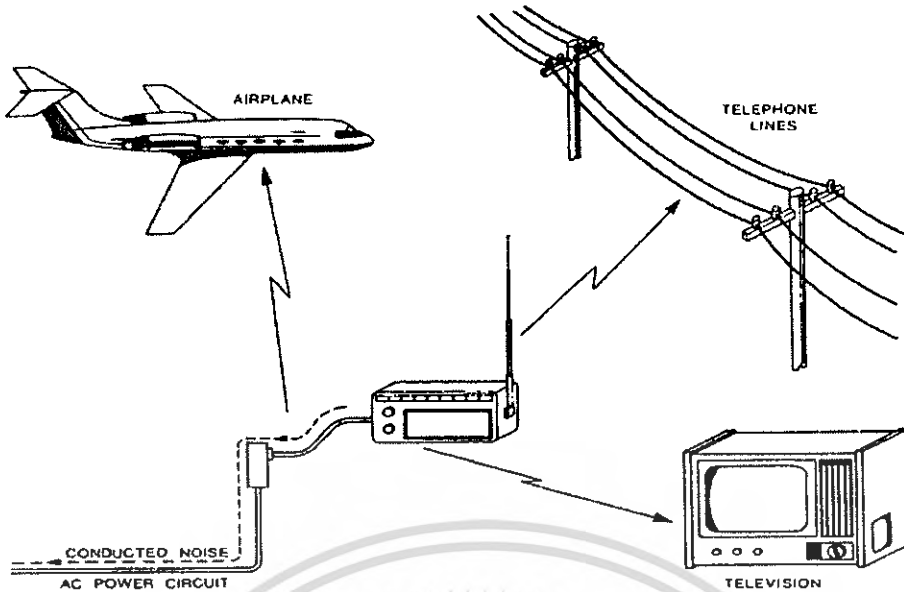


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ

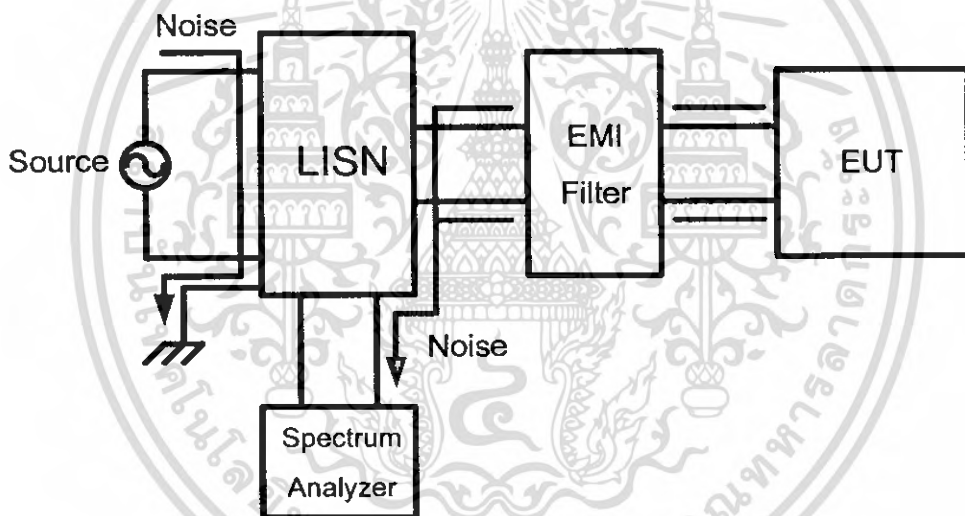


รูปที่ 3.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรสู่ระบบภายนอก



รูปที่ 3.4 การทำงานของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์
(Line Impedance Stabilization Network: LISN)

3.2 หน้าที่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) หรือ (Artificial Mains Network: AMN) จะเป็นเครื่องมือที่จำเป็นในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ตามมาตรฐาน CISPR 16 – 1 โดยโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ จะมีหน้าที่หลักอยู่ 3 อย่างคือ

1. ป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไปสู่ระบบทดสอบ และจากระบบทดสอบไปสู่แหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ให้ค่าอิมพีแดนซ์คงที่เท่ากับ $50\ \Omega$ ภายใต้ค่าผิดพลาดที่กำหนดตลอดย่านความถี่ที่ทำการทดสอบ

3. ให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันระหว่างขั้วต่อ (RF terminal) กับเครื่องมือวัด (EMI receiver)

โดยปกติโครงข่ายหลักในการวัดค่าสัญญาณในช่วง Radio – frequency voltage หรือช่วงที่มีความถี่มากกว่าอยู่ในช่วง 9 kHz – 100 MHz และสามารถวัดค่ากระแส เมื่อนำมาเปรียบเทียบได้ถึง 500 A ซึ่งโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบ V – Network และ แบบ Delta – Network

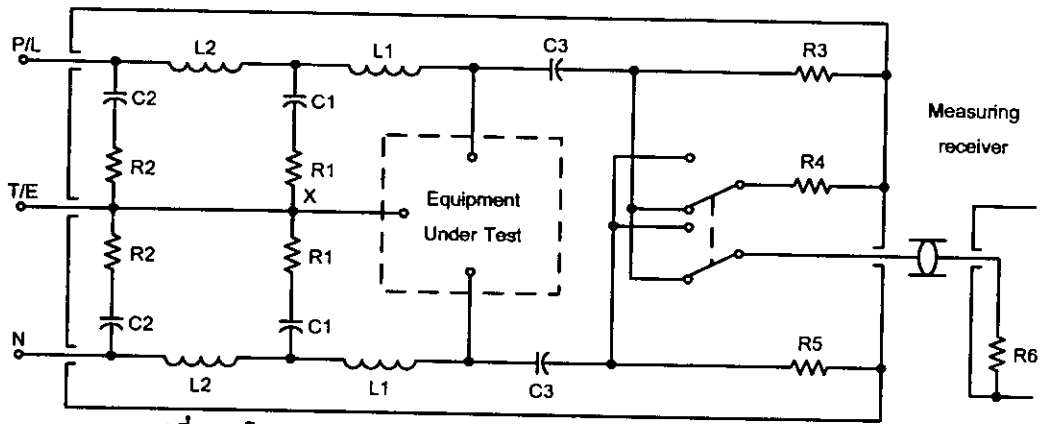
3.3 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ V – Network

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ V – Network จะใช้สำหรับวัดค่าของแรงดันระหว่างตัวนำของแหล่งจ่ายและใช้จุดดิน (Earth) เป็นแกนอ้างอิง โดยสามารถแบ่งออกได้ 4 แบบด้วยกันคือ

1. โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega$

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega$

Component	Value
R_1	$5\ \Omega$
R_2	$10\ \Omega$
R_3	$1000\ \Omega$
R_4	$50\ \Omega$
R_5	$50\ \Omega$ (Input impedance of the measuring receiver)
C_1	$8\ \mu\text{F}$
C_2	$4\ \mu\text{F}$
C_3	$0.25\ \mu\text{F}$
L_1	$50\ \mu\text{H}$
L_2	$250\ \mu\text{H}$

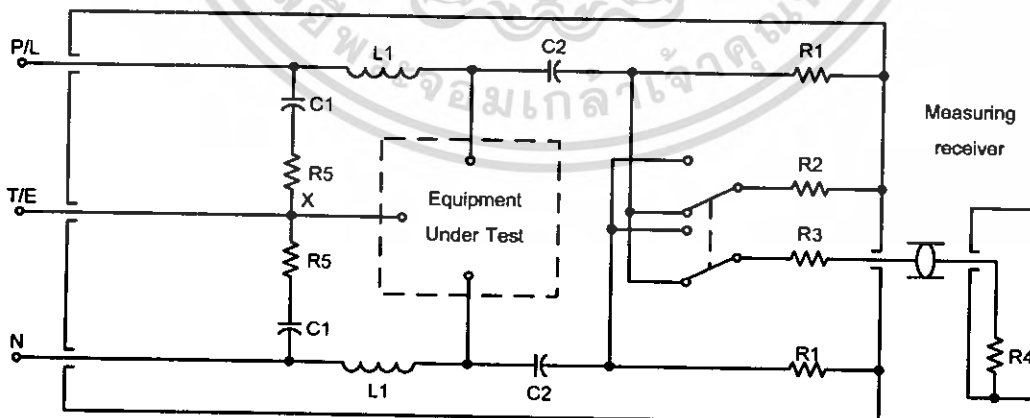


รูปที่ 3.5 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 50 Ω / 50 μH + 5 Ω

2. โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 50 Ω / 50 μH

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 50 Ω / 50 μH

Component	Value
R ₁	1000 Ω
R ₂	50 Ω
R ₃	-
R ₄	50 Ω (Input impedance of the measuring receiver)
R ₅	-
C ₁	1 μF
C ₂	0.1 μF
L ₁	0.1 μH
L ₂	50 μH



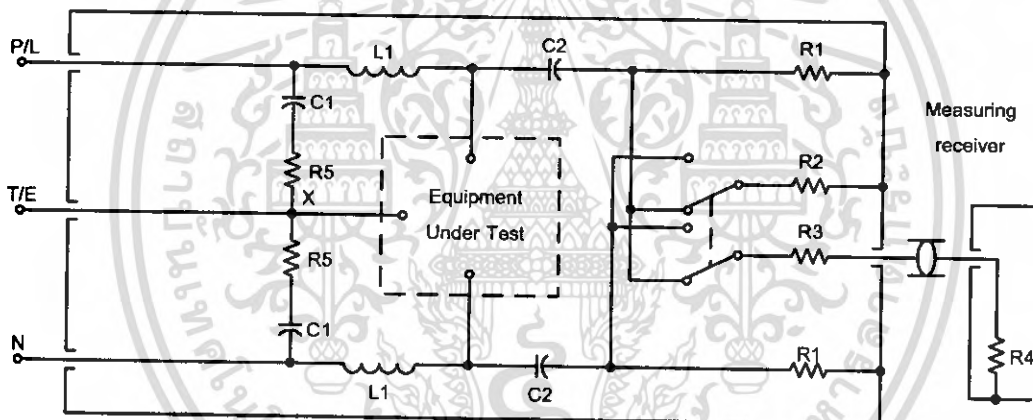
รูปที่ 3.6 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 50 Ω / 50 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 5\ \mu\text{H} + 1\ \Omega$
 จะสังเกตเห็นว่ารูปโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะเหมือนกับรูปที่ 3.3 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงตรงที่ค่าของพารามิเตอร์ดังที่แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 5\ \mu\text{H} + 1\ \Omega$

Component	Value
R_1	$1000\ \Omega$
R_2	$50\ \Omega$
R_3	-
R_4	$50\ \Omega$ (Input impedance of the measuring receiver)
R_5	-
C_1	$2\ \mu\text{F}$ (Minimum)
C_2	$0.1\ \mu\text{F}$
L_1	$5\ \mu\text{H}$



รูปที่ 3.7 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ $50\ \Omega / 5\ \mu\text{H} + 1\ \Omega$

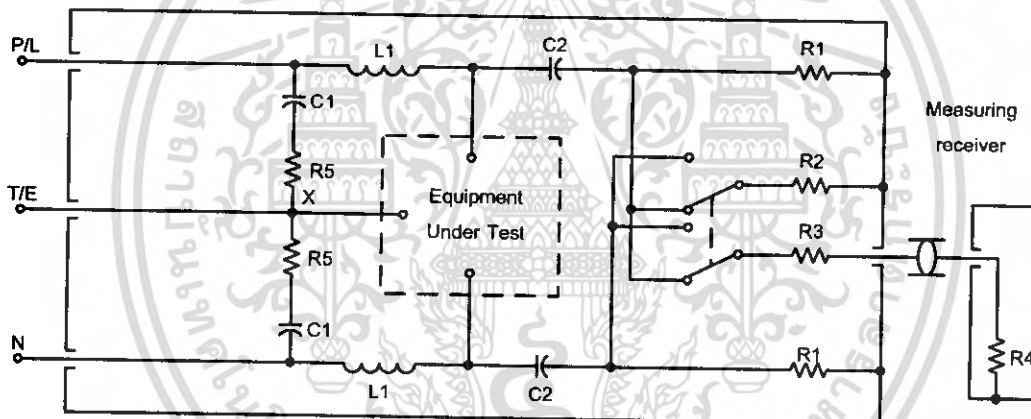
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω

จะสังเกตเห็นว่ารูปโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะเหมือนกับรูปที่ 3.3 จะมีการเปลี่ยนแปลงตรงที่ค่าของพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω

Component	Value
R_1	1000 Ω
R_2	150 Ω
R_3	100 Ω
R_4	50 Ω (Input impedance of the measuring receiver)
R_5	-
C_1	1 μF
C_2	0.1 μF
L_1	Suitable value to achieve the specified impedance



รูปที่ 3.8 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω

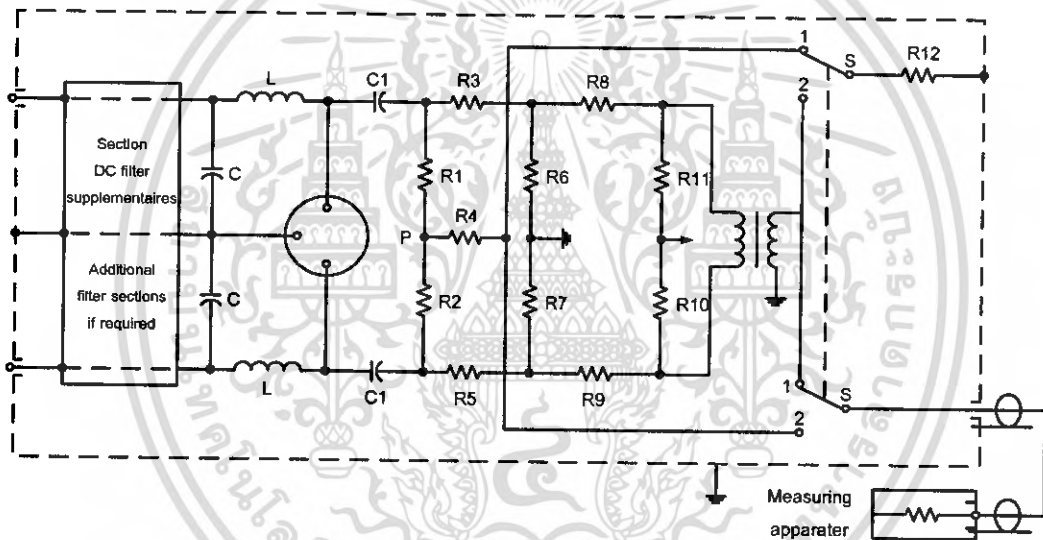
3.4 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ Delta - Network

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ Delta - Network จะใช้สำหรับวัดค่าของแรงดันระหว่างตัวนำของแหล่งจ่ายและระหว่างจุดกึ่งกลางของตัวนำของแหล่งจ่ายหลักโดยใช้จุดดิน (Earth) เป็นแกนอ้างอิง โดยโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบ Delta - Network ที่แนะนำคือโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω แบบ Delta - Network

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบค่าของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω

แบบ Delta – Network

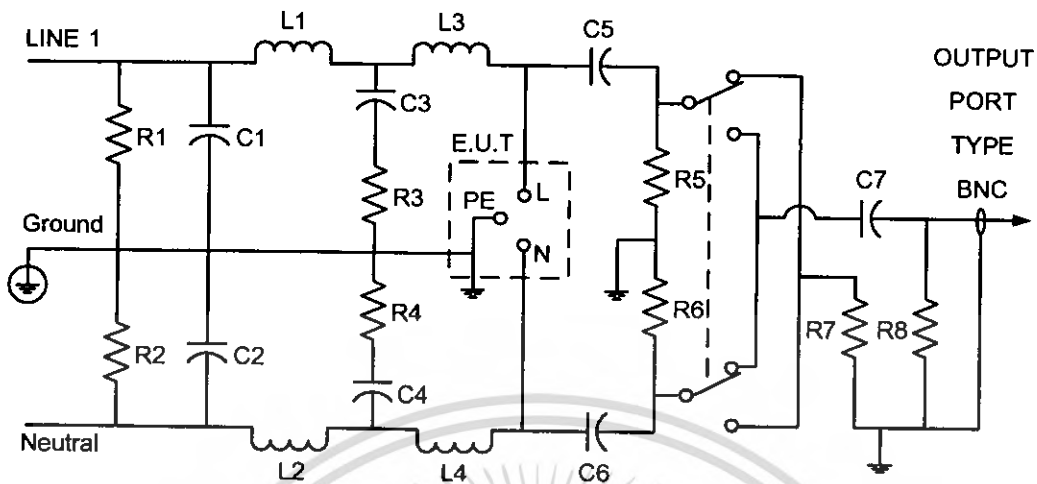
Component	Value
R_1, R_2	118.7 (120) Ω
R_3, R_5	152.9 (150) Ω
R_4	390.7 (390) Ω
R_6, R_7	275.7 (270) Ω
R_8, R_9	22.8 (22) Ω
R_{10}, R_{11}	107.8 (110) Ω
R_{12}	50 Ω
C_1, C_2	0.1 μF
L, C	Suitable value to achieve the specified impedance



รูปที่ 3.9 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ 150 Ω แบบ Delta – Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรสมมูลโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์และพิกัดค่าอุปกรณ์



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์
(Line Impedance Stabilization Network: LISN) [10]

ตารางที่ 3.6 ชนิดและค่าพิกัดภายในวงจรสมมูลที่นำเสนอ

Component	Value
R_1	5Ω (5 W)
R_2	$39 \text{ k}\Omega$ (1 W)
R_3, R_4	$39 \text{ k}\Omega$ (1 W)
R_5	50Ω (1/2 W)
R_6	$1 \text{ k}\Omega$ (1/2 W)
C_1	$7.5 \mu\text{F}$ (450 V)
C_2	$2.3 \mu\text{F}$ (275 V)
C_3	$0.47 \mu\text{F}$
L_1	$50 \mu\text{H}$
L_2	$250 \mu\text{H}$

L_1 , C_1 , R_1 , R_4 และ R_5 เป็นตัวกำหนดอิมพีแดนซ์ทางด้านขาออกของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ส่วน L_2 , C_2 และ R_2 ทำหน้าที่แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย และ C_3 จะทำหน้าที่เป็นตัวแยกระหว่างเครื่องวัดกับแหล่งจ่ายออกจากกัน

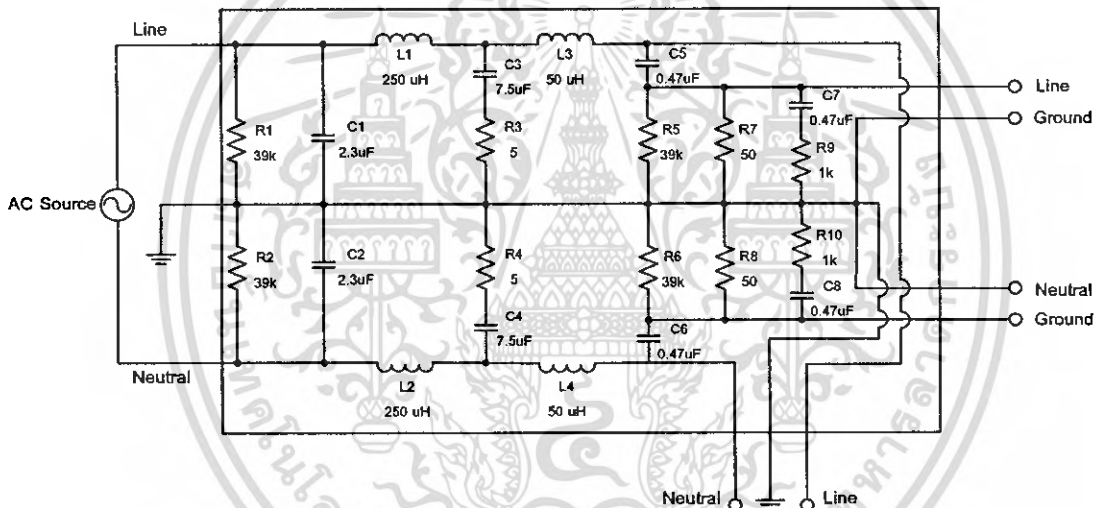
ในการทำงานจะนำเสนอผลที่ได้จากการจำลองวงจรการทำงานของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรจะเป็นค่าอุปกรณ์จริงที่นำมาต่อในวงจรของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.5.1 วัตถุประสงค์ของการจำลองระบบ

วัตถุประสงค์ของการจำลองระบบนั้น เพื่อต้องการทราบแนวโน้มของผลจากการจำลองและผลของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าในเบื้องต้นว่ามีค่าเป็นอย่างไร มีแนวโน้มตรงกับค่ามาตรฐานของ International special committee on radio interference (CISPR) ที่กำหนดไว้หรือไม่

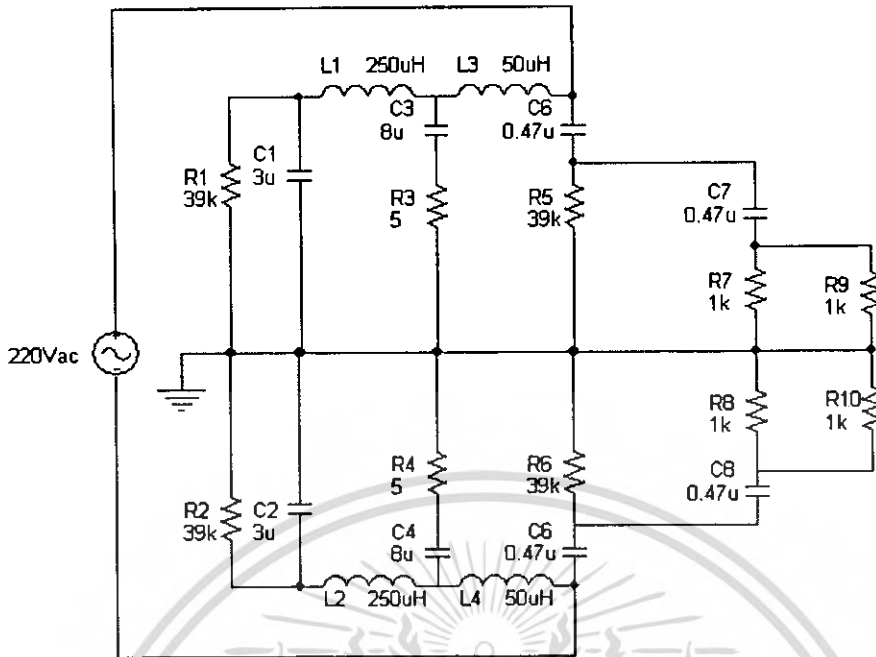
3.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม PSpice Version 9.1
2. แผ่น CD – R และแผ่นดิสก์เก็ต สำหรับบันทึกข้อมูล
3. วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)



รูปที่ 3.11 วงจรภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

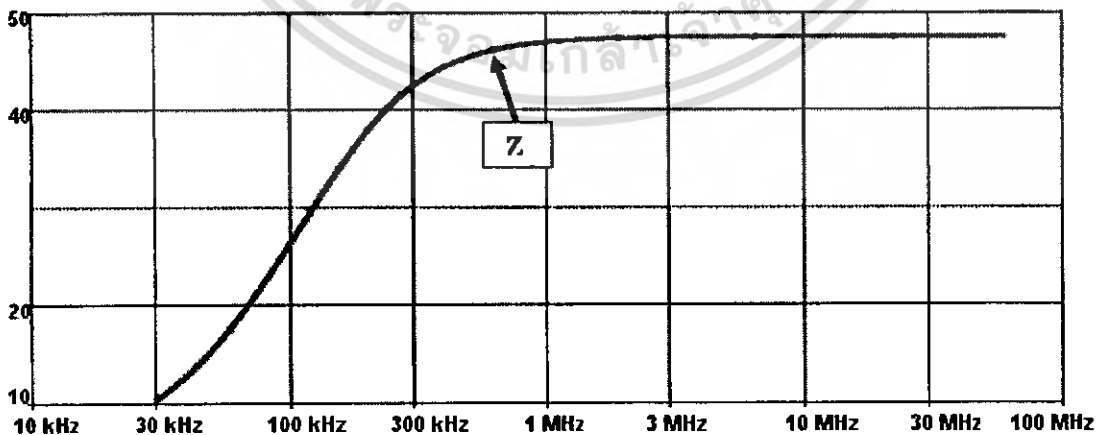
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรภายในของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์
เมื่อเขียนในรูปแบบของโปรแกรม PSpice version 9.1

3.5.3 เงื่อนไขของการจำลองวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

1. จำลองในระบบ AC Sweep/noise
2. จำลองในระบบ AC Sweep type แบบ Loarithmic
3. ความถี่ Start 30 kHz, ความถี่ Stop 60 MHz
4. Points/Decade 10 kHz



รูปที่ 3.13 ผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองระบบวงจร
โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.13 ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสต้านออก จากนั้นนำผลที่ได้มาหาค่าอิมพีแดนซ์ตามสมการที่ 3.1

$$Z = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

จากการจำลองวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการวัดค่าจะพบว่า ช่วงความถี่จะอยู่ในช่วง 30 kHz – 30 MHz แต่จะเริ่มต้นที่พิจารณาอยู่ที่ 150 kHz จะมีค่าความต้านทานประมาณ 40 Ω และมีค่าความต้านทานเชิงซ้อนใกล้เคียง 50 Ω ตลอดจนถึงค่าความถี่ที่ 30 MHz ซึ่งผลจากการจำลองวงจรการทดลองแสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามมาตรฐาน CISPR 16 ที่ได้กำหนดไว้

3.6 ส่วนประกอบของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

1. ตัวถัง (Case of network)

ตัวถังของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ นั้นจะต้องทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ ซึ่งต้องมีฝาปิดที่ทำจากโลหะด้วยเช่นกัน โดยที่ฝาปิดด้านข้าง และด้านใต้จะต้องมีช่องระบายอากาศ เพื่อเป็นการระบายความร้อนที่แผ่ออกมา โดยตัวถังที่เลือกมีขนาดเท่ากับ 300 x 280 x 175 มิลลิเมตร และเป็นตัวถังที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป โดยขนาดของตัวถังจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมตามมาตรฐาน CISPR 16



รูปที่ 3.14 ตัวถังของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

2. วงจรเลือกการวัดแรงดันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ชนิด V – Network นั้นใช้ทำการวัดแรงดันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายสองสายในระบบแรงดัน 220 V สามสาย (Line, Neutral และ Ground) คือระหว่างตัวนำแต่ละตัวเปรียบเทียบกับกราวนด์ หรือสายไลน์เทียบกับกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนลายวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวต้านทาน (Resistance)

ตัวต้านทานทั้งหมดที่ใช้ในวงจรจะเป็นตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon resistance) และความต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire-wound Resistance) ซึ่งควรมีค่าผิดพลาดที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในความเป็นจริงตัวต้านทานที่ทำจากคาร์บอนผสมจะมีผลตอบสนองต่อความถี่สูงน้อยมาก



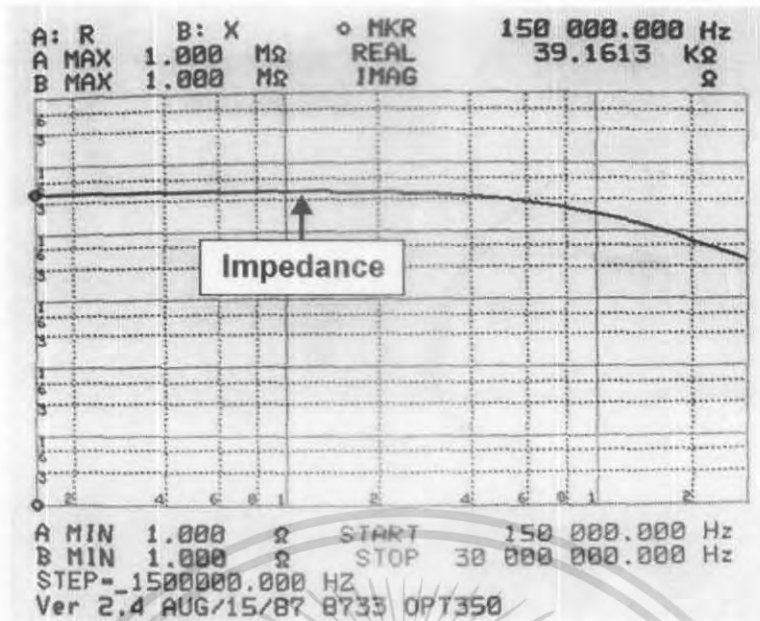
รูปที่ 3.17 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่สูง

3.1 การวัดค่าความต้านทานแบบไวร์วาวด์ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$



รูปที่ 3.18 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39 \text{ k}\Omega$ 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบไวรัวร์วาร์ด R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39\text{ k}\Omega$ 2 W

N	FREQUENCY [Hz]	REAL [Ω]	IMAG [Ω]
1	150 000.000	39.1613 K	-630.000
10	155 490.199	39.1504 K	-623.186
20	254 796.970	39.1418 K	-1.06654 K
30	352 882.323	39.1204 K	-1.38455 K
40	432 809.972	39.0891 K	-1.79491 K
50	504 890.464	39.0275 K	-2.33419 K
60	575 191.120	38.9297 K	-3.03427 K
70	645 810.272	38.7674 K	-3.92957 K
80	715 829.811	38.4104 K	-5.20362 K
90	785 826.515	37.8454 K	-6.86873 K
100	855 820.944	37.1348 K	-8.48948 K
110	925 762.032	35.8757 K	-10.6579 K
120	1000 603.302	33.9437 K	-13.0942 K
130	1080 606.353	31.1353 K	-16.5913 K
140	1170 857.320	27.2776 K	-17.7575 K
150	1270 977.443	22.6000 K	-19.0626 K
160	1380 392.172	17.6238 K	-19.1178 K
170	1500 550.856	12.8209 K	-17.9233 K
180	1630 661.120	8.82924 K	-15.6791 K
190	1770 810.114	5.82255 K	-13.3006 K
200	30 000 000.000	3.75758 K	-10.7959 K

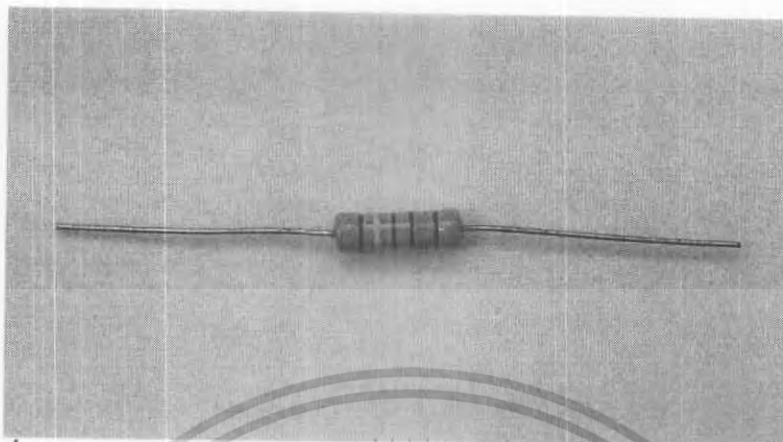
MEASURE N= 1 START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP=1500000.000 HZ
 Ver 2.4 AUG/15/87 8733 OPT350

รูปที่ 3.20 ค่าความต้านทานแบบไวรัวร์วาร์ด R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ $39\text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$

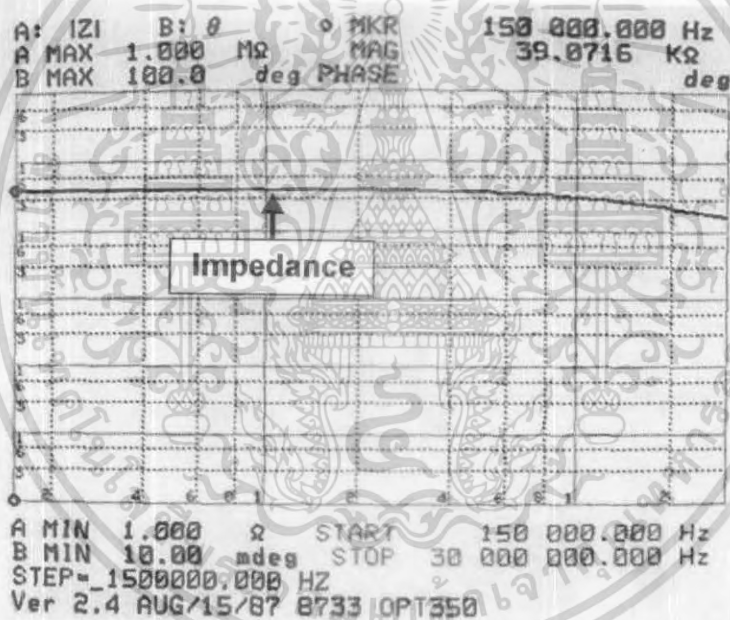
จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$ สังเกตเห็นว่า ตัวต้านทาน แบบไวรัวร์วาร์ด R_1 และ R_2 จะมีค่าความต้านทาน $39\text{ k}\Omega$ ที่ช่วงความถี่ประมาณ $150\text{ kHz} - 432\text{ kHz}$ และค่าความต้านทานจะลดลงที่ความถี่เพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การวัดค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39\text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$



รูปที่ 3.21 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39\text{ k}\Omega$ 2 W



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ $39\text{ k}\Omega$ 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	FREQUENCY [Hz]	MAG [Ω]	PHASE [deg]
1	150 000.000	39.0716	-590.740
1	195 498.198	39.0650	-766.753
1	254 796.970	39.0697	-992.485
1	332 082.323	39.0640	-1.28717
1	432 809.972	39.0618	-1.67584
1	564 090.464	39.0430	-2.17149
1	735 191.128	39.0284	-2.82446
1	958 190.272	38.9956	-3.65741
1	1 248 829.811	38.9072	-4.98897
1	1 627 626.519	38.7853	-6.43169
1	2 121 320.344	38.5800	-8.34465
1	2 764 762.032	38.2814	-10.8237
1	3 603 373.302	37.7766	-13.9262
1	4 696 353.250	36.9716	-17.8130
1	6 120 857.320	35.7589	-22.6871
1	7 977 443.845	33.9457	-28.3839
1	10 397 172.647	31.5217	-34.6651
1	13 550 856.785	28.2755	-42.8578
1	17 661 120.560	24.5487	-48.8563
20	23 018 114.970	20.4675	-55.8775
21	30 000 000.000	16.5851	-62.0519

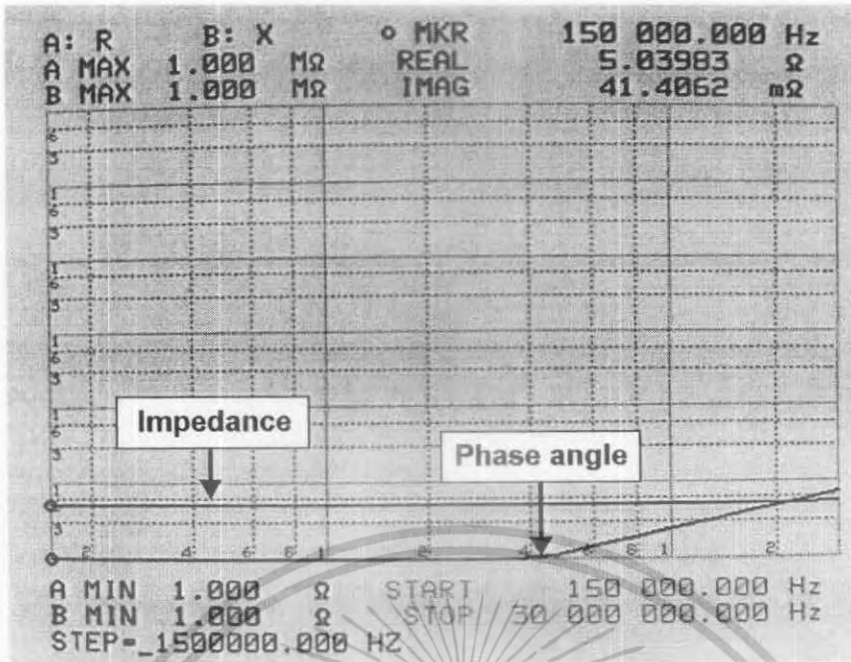
MEASURE N= START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP= 1500000.000 HZ
 Ver 2.4 AUG/15/87 8733 OPT350

รูปที่ 3.23 ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากับ 39 kΩ 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz

3.2 การวัดค่าความต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5 Ω 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz

รูปที่ 3.24 ตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ด R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5 Ω 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบไว้วรวัต R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ $5\ \Omega$ 2 W

N	FREQUENCY [Hz]	REAL [Ω]	IMAG [Ω]
10	150 000.000	5.06487	389.093
11	195 498.199	5.06637	506.243
12	254 796.978	5.06833	659.087
13	332 082.323	5.07241	855.218
14	432 009.972	5.07960	1.10958
15	564 090.464	5.09088	1.44014
16	735 191.128	5.09932	1.86876
17	958 190.272	5.10519	2.42038
18	1 248 029.817	5.10759	3.14856
19	1 627 626.519	5.14119	4.08838
20	2 121 320.344	5.16437	5.30830
21	2 764 762.032	5.19883	6.89449
22	3 603 373.302	5.22780	8.95401
23	4 696 353.250	5.27175	11.6341
24	6 120 857.320	5.32319	15.1116
25	7 977 443.845	5.39660	19.6278
26	10 397 172.647	5.49062	25.4956
27	13 550 856.785	5.62915	33.1495
28	17 661 120.560	5.80175	43.1490
29	23 018 114.970	5.93960	56.1692
30	30 000 000.000	6.08548	72.9981

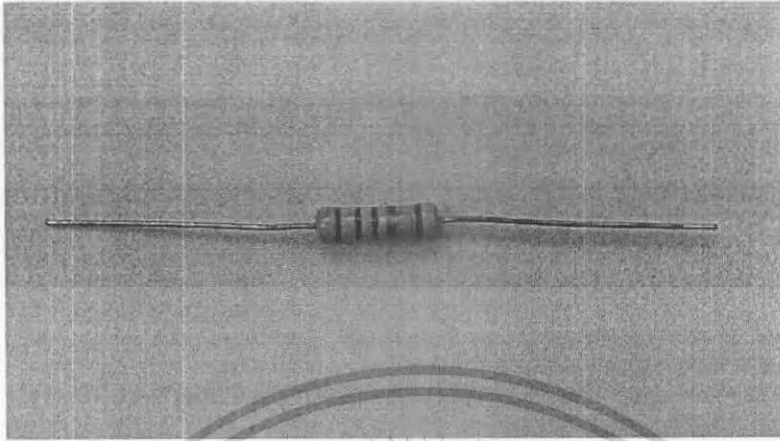
MEASURE N= START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP = 1500000.000 HZ

รูปที่ 3.26 ค่าความต้านทานแบบไว้วรวัต R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ $5\ \Omega$ 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz

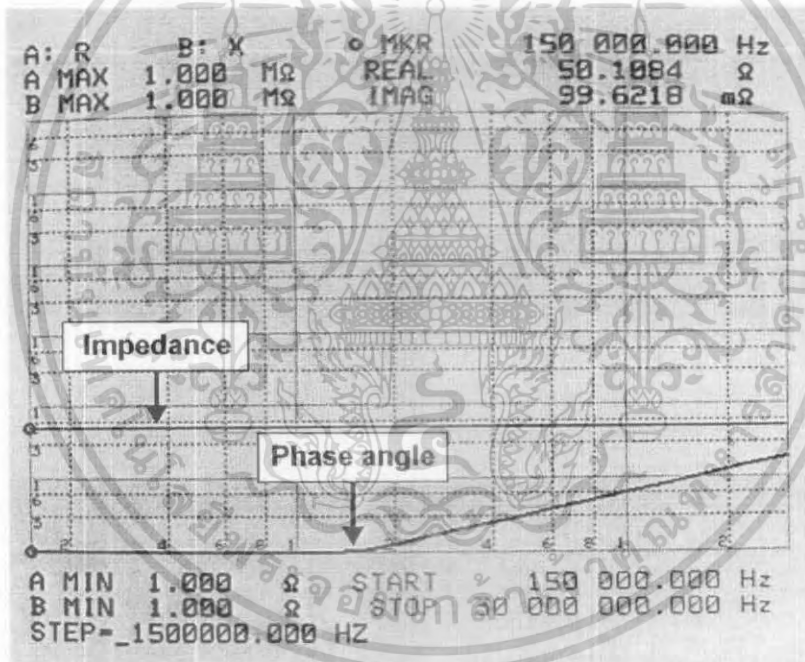
จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz สังเกตเห็นว่า ตัวต้านทาน แบบไว้วรวัต R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ $5\ \Omega$ ที่ช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$



รูปที่ 3.27 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	FREQUENCY [Hz]	REAL [Ω]	IMAG [Ω]
1	150	000.000	50.1084
2	195	498.198	50.0973
3	254	796.978	50.0911
4	332	082.323	50.0922
5	432	809.972	50.0931
6	564	090.464	50.0912
7	735	191.128	50.0946
8	958	190.272	50.1054
9	1	248	829.811
10	1	627	626.519
11	2	121	320.344
12	2	764	762.032
13	3	603	373.302
14	4	696	353.250
15	6	120	857.320
16	7	977	443.845
17	10	397	172.647
18	13	550	856.785
19	17	661	120.560
20	23	018	114.970
21	30	000.000	50.1499

MEASURE N= START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP= 1500000.000 HZ

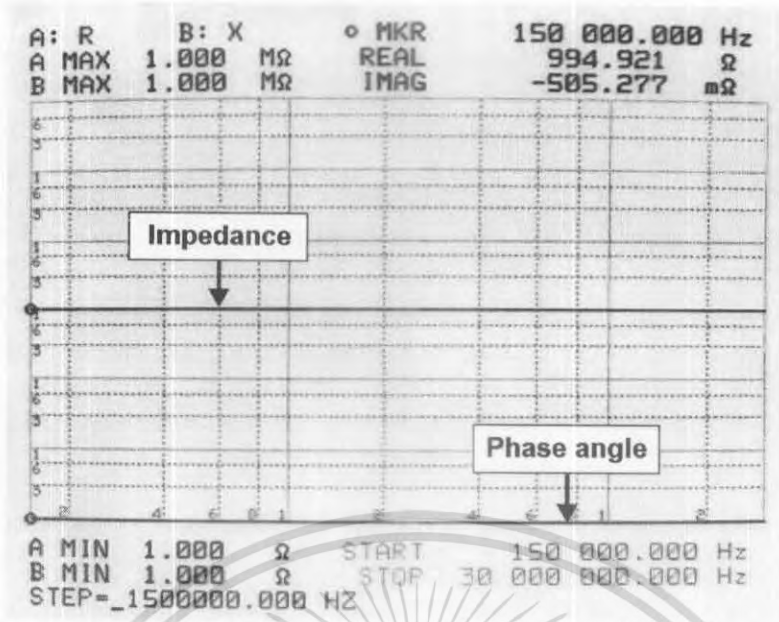
รูปที่ 3.29 ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz

จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz สังเกตเห็นว่า ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_7 มีค่าเท่ากับ 50Ω ที่ช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz

3.4 การวัดค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1 \text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz

รูปที่ 3.30 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1 \text{ k}\Omega$ 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 กราฟแสดงค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1\text{ k}\Omega$ 2 W

N	FREQUENCY [Hz]	REAL [Ω]	IMAG [Ω]
1	150 000.000	994.921	-505.277
2	195 498.193	995.027	-652.290
3	254 796.970	995.054	-852.725
4	332 7082.323	995.128	-483.239
5	432 889.975	995.795	-1.15063
6	564 090.464	995.062	909.039
7	735 191.126	994.895	-1.18049
8	958 190.270	994.893	-1.64258
9	1 248 829.811	994.724	-1.81829
10	1 627 626.519	994.848	-2.24444
11	2 121 320.344	995.905	-3.75021
12	2 764 762.032	994.654	-5.51130
13	3 603 373.302	994.717	-4.51340
14	4 696 355.298	995.065	-3.87224
15	6 120 857.328	994.587	-7.29866
16	7 977 443.845	994.780	-9.46772
17	10 397 172.647	994.403	-12.5837
18	13 550 856.785	994.506	-16.4765
19	17 651 120.569	994.561	-21.6806
20	23 018 114.970	993.093	-28.3879
21	30 000 000.000	991.724	-37.3836

MEASURE N=1 START 150 000.000 Hz
 SWEEP N=1 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP=1500000.000 HZ

รูปที่ 3.32 ค่าความต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1\text{ k}\Omega$ 2 W ที่ความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$

จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$ สังเกตเห็นว่า ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม R_8 มีค่าเท่ากับ $1\text{ k}\Omega$ ที่ช่วงความถี่ $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตัวเก็บประจุ (Capacitance)

ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ควรมีค่าในการทนแรงดันที่สูงเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดย C_1 , C_2 , C_3 และ C_4 เป็นตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene ส่วน C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 เป็นแบบ Metallized polyester การทดสอบวัดค่าองค์ประกอบแฝงภายในเพื่อหาค่า Self Resonance Frequency (SRF)



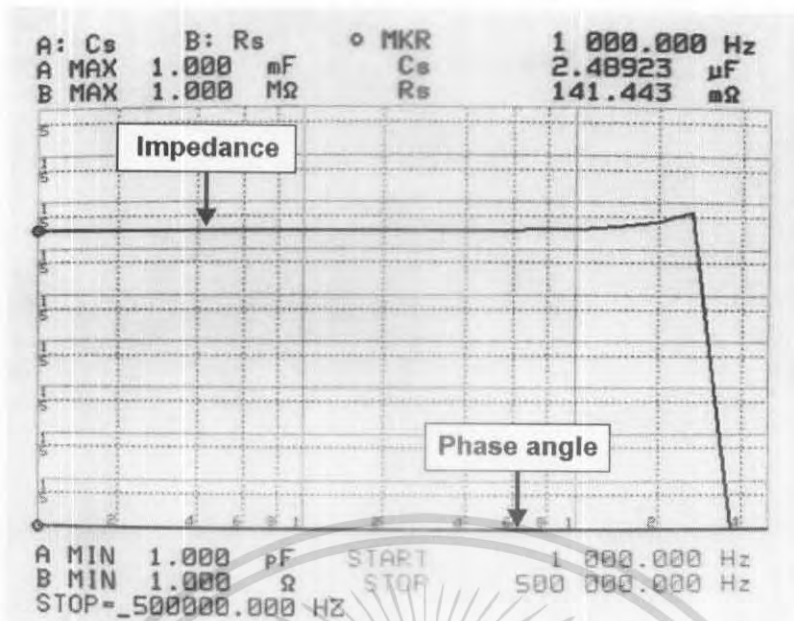
รูปที่ 3.33 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุที่มีความถี่สูง

4.1 การวัดค่าตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene และ Self Resonance Frequency (SRF) ของ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu\text{F}$ ที่ความถี่ $1 \text{ kHz} - 500 \text{ kHz}$



รูปที่ 3.34 ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu\text{F}$

N	FREQUENCY [Hz]	Cs [F]	Rs [Ω]
1	1 000.000	2.48923	141.443
2	1 354.421	2.48759	185.965
3	1 806.645	2.48453	244.125
4	2 500.000	2.47690	152.525
5	3 465.724	2.47317	192.564
6	4 728.789	2.47050	157.063
7	6 451.950	2.47070	165.752
8	8 803.170	2.47126	145.072
9	12 011.244	2.47188	146.516
10	16 308.399	2.46767	136.328
11	22 360.660	2.46402	126.603
12	30 509.380	2.47215	116.676
13	41 627.660	2.48354	110.822
14	56 797.660	2.51356	106.971
15	77 495.941	2.57533	104.854
16	105 737.126	2.70253	104.427
17	143 269.091	2.85806	104.683
18	196 845.052	3.06495	104.140
19	268 529.588	6.33280	105.502
20	366 455.319	-17.3349	110.334
21	500 000.000	2.47167	114.757

MEASURE N= START 1 000.000 Hz
SWEEP N= 1 + 21 STOP 500 000.000 Hz
STOP = 500000.000 HZ

รูปที่ 3.36 ค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ $2.3 \mu\text{F}$ ที่ความถี่ 50 kHz – 500 kHz

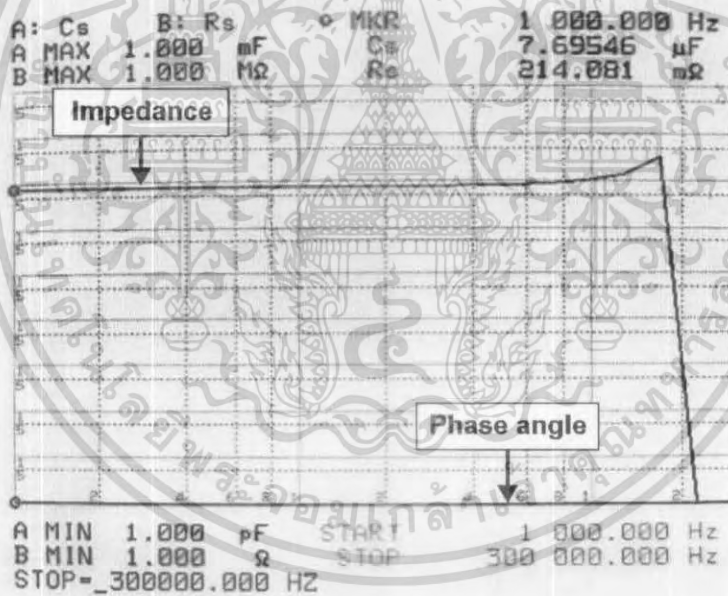
จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์สังเกตเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะมีค่าความเก็บประจุ $2.3 \mu\text{F}$ ที่ช่วงความถี่ประมาณ 1 kHz – 268 kHz และจะเสียสภาพความเป็นตัวเก็บประจุ (Self resonance frequency) ที่ความถี่ประมาณ 366 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดค่าตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene และ Self Resonance Frequency (SRF) ของ C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu\text{F}$ ที่ความถี่ $1 \text{ kHz} - 300 \text{ kHz}$



รูปที่ 3.37 ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu\text{F}$



รูปที่ 3.38 กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C_3 และ C_4 มีค่าเท่ากับ $7.5 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	FREQUENCY [Hz]	Cs [F]	Rs [Ω]
1	1 000.000	7.69546	214.081
1	1 330.014	7.68484	112.587
1	1 768.936	7.67496	173.268
2	2 352.709	7.68246	142.147
3	3 129.135	7.69603	165.763
4	4 161.791	7.69199	166.466
5	5 535.239	7.70329	171.122
7	7 361.943	7.72258	170.650
9	9 791.484	7.72552	175.946
11	13 022.806	7.73747	179.142
17	17 320.508	7.77012	178.007
23	23 036.510	7.81792	180.257
30	30 638.871	7.92281	177.892
40	40 750.113	8.07483	172.615
54	54 198.202	8.38719	172.387
72	72 084.342	9.00884	172.365
95	95 873.152	10.3721	173.750
127	127 512.590	13.8000	173.661
169	169 593.471	33.2357	175.719
225	225 561.613	-21.7944	177.841
300	300 000.000	5.75196	181.125

MEASURE N= START 1 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 300 000.000 Hz
 STOP= 300000.000 HZ

รูปที่ 3.39 ค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene C₃ และ C₄ มีค่าเท่ากับ 7.5 μ F ที่ความถี่ 1 kHz – 300 kHz

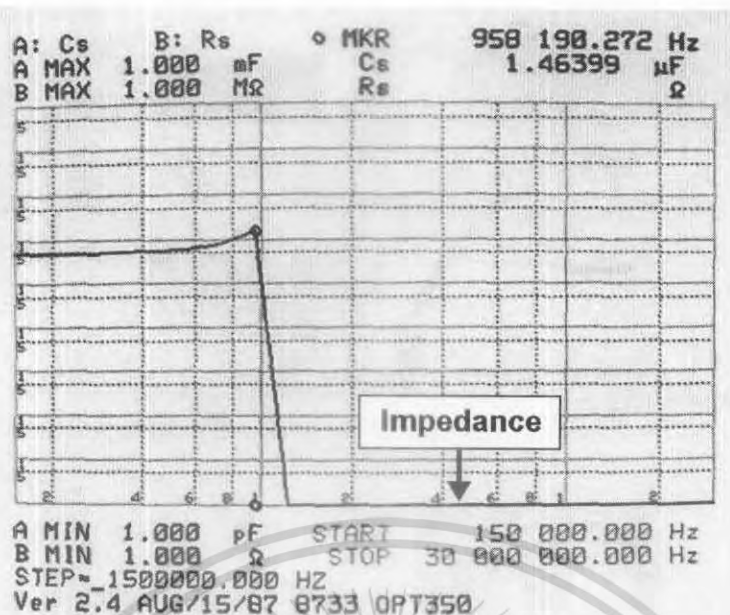
จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์สังเกตเห็นว่าตัวเก็บประจุ C₃ และ C₄ จะมีค่าความเก็บประจุ 7.5 μ F ที่ช่วงความถี่ประมาณ 1 kHz – 169 kHz และจะเสียสภาพความเป็นตัวเก็บประจุ (Self resonance frequency) ที่ความถี่ประมาณ 225 kHz

4.3 การวัดค่าตัวเก็บประจุชนิด Metallized polyester และ Self resonance frequency (SRF) ของ C₅, C₆, C₇ และ C₈ มีค่าเท่ากับ 0.47 μ F ที่ความถี่ 150 kHz – 2 MHz



รูปที่ 3.40 ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polyester C₅, C₆, C₇ และ C₈ มีค่าเท่ากับ 0.47 μ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 กราฟค่าความเก็บประจุชนิด Metallized polyester C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 มีค่าเท่ากับ $0.47 \mu\text{F}$

N	FREQUENCY [Hz]	Ce [F]	Rs [Ω]
1	150 000.000	467.020	605.897
2	195 498.198	471.713	597.149
3	254 796.970	480.729	593.760
4	332 082.323	498.623	591.345
5	432 009.972	532.502	588.362
6	564 090.464	600.617	599.278
7	735 191.128	768.621	590.579
8	958 198.272	1.46399	591.182
9	1 248 829.011	-2.86904	593.994
10	1 627 626.519	-4.78 272	598.759
11	2 121 320.344	-1.98 141	602.386
12	2 764 762.032	-9.8782	606.151
13	3 603 373.302	-54.2569	613.339
14	4 696 353.250	-30.6038	623.568
15	6 120 857.320	-17.5900	634.654
16	7 977 443.845	-10.2110	648.621
17	10 397 172.647	-5.91439	707.223
18	13 550 856.785	-3.66678	767.819
19	17 661 120.560	-2.13948	724.860
20	23 018 114.970	-1.25736	773.711
21	30 000 000.000	-7.43 940	808.118

MEASURE N= START 150 000.000 Hz
SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
STEP= 1500000.000 HZ
Ver 2.4 AUG/15/87 8733 OPT350

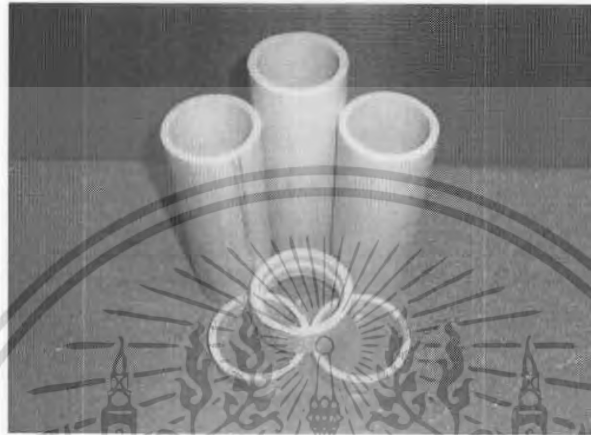
รูปที่ 3.42 ค่าความเก็บประจุ C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 มีค่าเท่ากับ $0.47 \mu\text{F}$ ที่ความถี่ 150 kHz – 2 MHz

จากผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์สังเกตเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_5 , C_6 , C_7 และ C_8 จะมีค่าความเก็บประจุ $0.47 \mu\text{F}$ ที่ช่วงความถี่ประมาณ 150 kHz – 1 MHz และจะเสียสภาพความเป็นตัวเก็บประจุ (Self resonance frequency) ที่ความถี่ประมาณ 1.1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แกนของตัวเหนียวน้ำ

แกนของตัวเหนียวน้ำนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านการลดค่าใช้จ่าย โดยทั่วไปแล้ว การพันขดลวดของตัวเหนียวน้ำจะพันอยู่บนแกน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้ท่อ Unplasticized polyvinyl chloride (PVC) เป็นแกนของตัวเหนียวน้ำ เนื่องจากมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย และมีความสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 80°C [7]



รูปที่ 3.43 ท่อ PVC ที่ใช้ในการทำแกนของตัวเหนียวน้ำ



รูปที่ 3.44 ขนาดแกนตัวเหนียวน้ำใช้ท่อ PVC ที่พิกัดอุณหภูมิไม่เกิน 80°C

6. การออกแบบตัวเหนียวน้ำแกนอากาศ

6.1 การคำนวณหาจำนวนรอบของ L_1 และ L_2 เท่ากับ $250\ \mu\text{H}$ ที่ $150\ \text{kHz}$

การออกแบบจำนวนรอบตัวเหนียวน้ำ L_1 และ L_2 เท่ากับ $250\ \mu\text{H}$ ในวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ นั้นเป็นการออกแบบสำหรับการพันขดลวดในแกนอากาศ โดยใช้ท่อ PVC เป็นแกนซึ่งมีความยาว (l_m) เท่ากับ $120\ \text{mm}$. เส้นผ่าศูนย์กลาง $0.048\ \text{mm}$. โดยจำนวนรอบของขดลวด L_1 และ L_2 สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 ซึ่งเป็นสมการหาจำนวนรอบของตัวเหนียวน้ำแบบ Multi Layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(\text{turns}) = \sqrt{\frac{L \cdot \left[6 \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) + 9l_m + 10(r_2 - r_1) \right]}{0.0315 \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2}} \quad (3.2)$$

เมื่อ r_1 = รัศมีภายในของท่อ (mm.)
 r_2 = รัศมีภายนอกของท่อ (mm.)

$$N = (N_1 \cdot N_2) - (N_2 / 2) \quad (3.3)$$

เมื่อ N_1 = จำนวนรอบต่อชั้น (รอบ)
 N_2 = จำนวนชั้น (ชั้น)

จากสมการที่ 3.2 โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะสามารถคำนวณหาจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ได้ดังนี้

$$N = \sqrt{\frac{250 \cdot \left[6 \cdot \left(\frac{24 + 31.53}{2} \right) + (9 \cdot 120) + 10(31.53 - 24) \right]}{0.0315 \cdot \left(\frac{24 + 31.53}{2} \right)^2}}$$

$$N \approx 116 \text{ รอบ}$$

เมื่อ r_1 = รัศมีท่อ + ความหนาผนัง + เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด
 $= 24 + (0.3 \cdot 4 \cdot 2) + (1.71 \cdot 3)$
 $= 31.53 \text{ mm.}$

ซึ่งในการออกแบบต้องการพื้นที่ขดลวดจำนวน 3 ชั้น ดังนั้น $N_2 = 3$ สามารถหาจำนวนรอบต่อชั้นได้ โดยใช้สมการที่ 3.3

$$\text{จาก} \quad N = (N_1 \cdot N_2) - (N_2 / 2)$$

$$N_1 = \frac{N + (N_2 / 2)}{N_2}$$

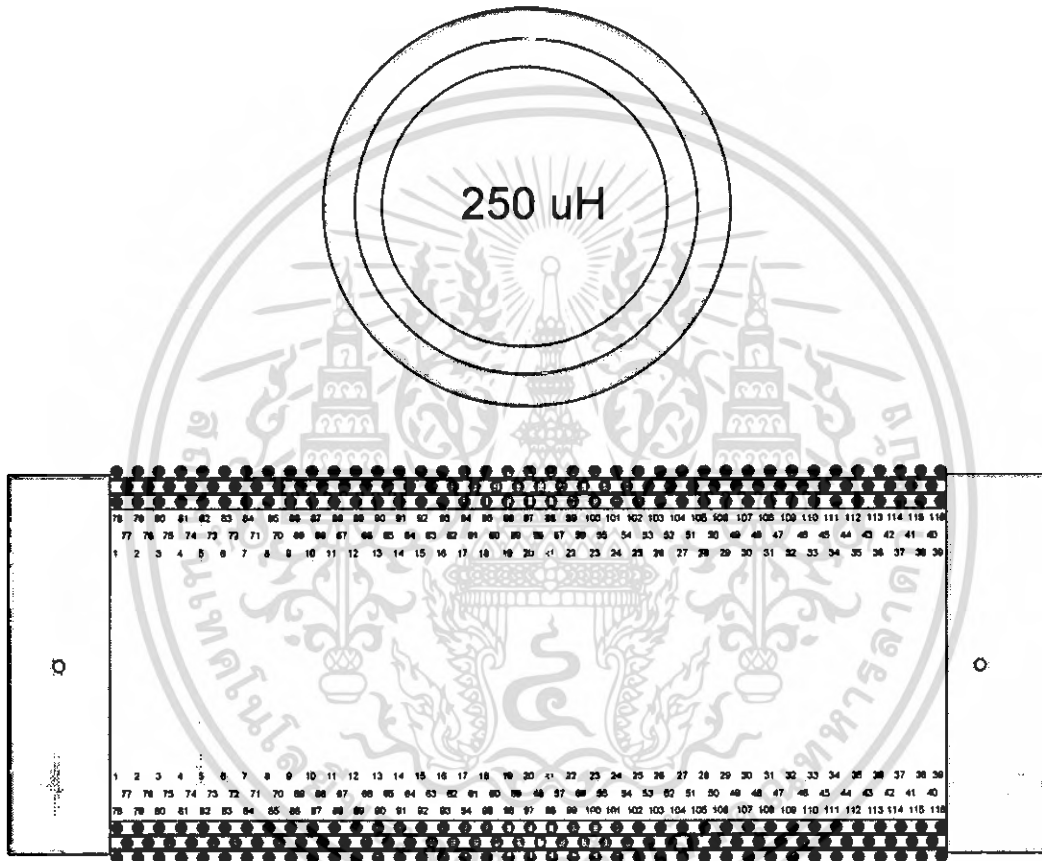
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1 = \frac{116 + (3/2)}{3}$$

ดังนั้น

$$N_1 \approx 39 \text{ รอบ}$$

ในสมการที่ 3.2 ใช้ในการคำนวณจำนวนรอบของ L_1 และ L_2 จะเลือกใช้จำนวนชั้นจากการคำนวณคือ 3 ชั้น ดังที่ได้แสดงการพันขดลวดจริงในรูปที่ 3.45 โดยชั้นที่ 1 จะมีจำนวนชั้นเท่ากับ 39 ชั้น ชั้นที่ 2 มีจำนวนชั้นเท่ากับ 38 ชั้น และชั้นที่ 3 มีจำนวนชั้นเท่ากับ 39 ชั้น



รูปที่ 3.45 ลักษณะการพันขดลวดของ L_1 และ L_2 เท่ากับ $250 \mu\text{H}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การคำนวณหาจำนวนรอบของ L_3 และ L_4 เท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ที่ 150 kHz

การออกแบบจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 เท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ในวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ นั้นเป็นการออกแบบสำหรับการพันขดลวดในแกนอากาศ โดยใช้ท่อ PVC เป็นแกนซึ่งมีความยาว (l_m) เท่ากับ 130 mm . เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.048 mm . โดยจำนวนรอบของขดลวด L_3 และ L_4 สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$N = \sqrt{\frac{LI_m}{A_c \mu_0}} \quad (3.4)$$

เมื่อ	N	=	จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
	L	=	ค่าความเหนี่ยวนำ เท่ากับ $50 \mu\text{H}$
	l_m	=	ความยาวเฉลี่ยของแกน เท่ากับ 120 mm .
	A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของแกน เท่ากับ 0.048 mm^2
	μ_0	=	ค่าความซึมซับในอากาศ เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

จากสมการที่ 3.4 โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะสามารถคำนวณหาจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 เท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ได้ดังนี้

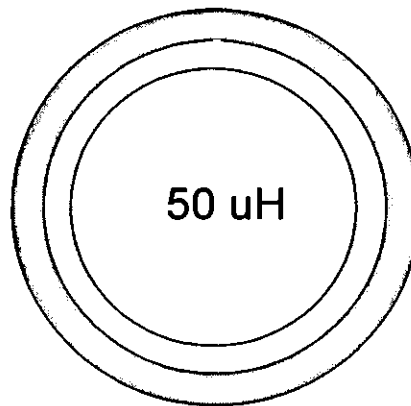
จากสมการที่ 3.4

$$N = \sqrt{\frac{LI_m}{A_c \mu_0}}$$

$$= \sqrt{\frac{50 \times 10^{-6} \times 0.12}{\frac{\pi \times 0.048^2}{4} \times 4\pi \times 10^{-7}}}$$

$$N \approx 52 \text{ รอบ}$$

ในสมการที่ 3.4 จะเป็นการคำนวณหาจำนวนรอบของ L_3 และ L_4 เท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณประมาณ 52 รอบ โดยกำหนดให้ความยาวเฉลี่ยของแกน (l_m) คือ 120 mm . ดังรูปที่ 3.46 จะเป็นการแสดงการพันขดลวดจริง โดยที่ตัวเหนี่ยวนำจะเป็นแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3.46 ลักษณะการพันขดลวดของ L_3 และ L_4 เท่ากับ 50 μH

6.3 การหาขนาดขดลวดตัวนำ

การคำนวณหาขนาดตัวนำของขดลวดได้จากสมการที่ 3.3

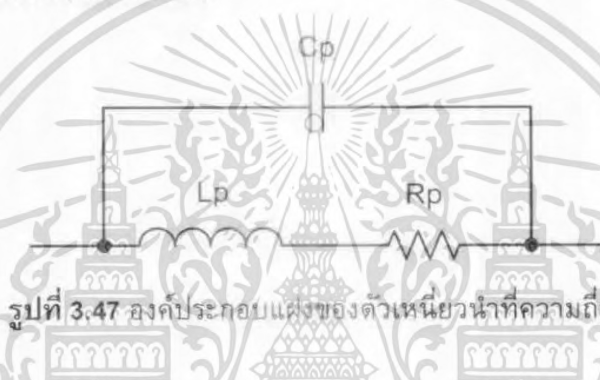
$$a = \frac{l}{J} \quad (3.5)$$

เมื่อ	a	=	พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)
	l	=	ค่ากระแส (A)
	J	=	ความหนาแน่นของกระแส (A/m^2)

ขนาดของขดลวดตัวนำโดยกำหนดพิสัยกระแสในการออกแบบเท่ากับ 16 A สำหรับความหนาแน่นกระแส (J) ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นกระแสมีค่าต่ำๆ สำหรับค่ากระแสที่กำหนดจะทำให้ตัวนำที่ใช้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ต้องใช้แกนแม่เหล็กที่มีขนาดพื้นที่ในการพัน (Window area) ใหญ่ขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีขนาดใหญ่จะเป็นผลทำให้ความต้านทานภายในตัวนำดังกล่าวจะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการลดผลของความต้านทานในตัวนำที่ความถี่สูงๆ จะไม่สามารถกระทำได้ด้วยการเพิ่ม

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำได้ เพราะที่ความถี่สูงจะมี "ปรากฏการณ์ทางผิว" เกิดขึ้น เพราะฉะนั้น โดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะเลือกค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ $2 - 5 \text{ A/mm}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมระหว่างความต้านทานในตัวนำกับพื้นที่ในการพัน สำหรับในตัวอย่างเลือกค่า 5 A/mm^2 สาเหตุที่เลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแส 5 A/mm^2 นั้นเนื่องจากการพันขดลวดจะเป็นการพันแบบเว้นระยะห่างในการพันแต่ละรอบ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้น และจะสามารถระบายความร้อนระหว่างขดลวดได้จากสมการที่ 3.5 จะได้ $a = \frac{16}{5} = 3.2 \text{ mm}^2$ ซึ่งจากการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ จะใช้ขดลวดในการพันตัวเหนี่ยวนำตามมาตรฐาน American Wire Gauge: AWG เบอร์ 14 ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานพื้นที่หน้าตัดของขดลวดไว้ที่ 3.56 mm^2

7. ตัวเหนี่ยวนำ (Inductance)



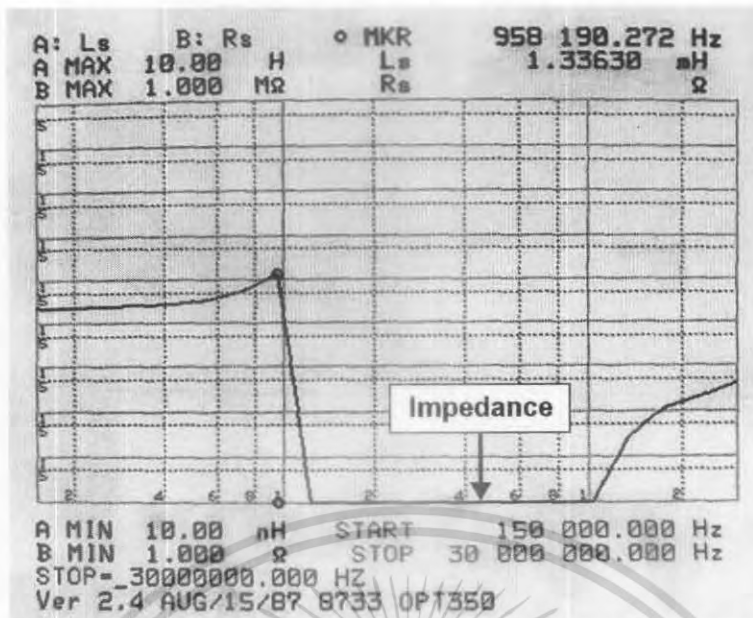
รูปที่ 3.47 องค์ประกอบแฉ่งของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่สูง

7.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$



รูปที่ 3.48 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.49 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$

N	FREQUENCY [Hz]	Le [H]	Rs [Ω]
1	150 000.000	225.347	4.33302
2	195 498.198	229.053	5.19517
3	254 796.970	235.960	7.03527
4	332 082.625	248.602	10.8909
5	432 809.972	273.749	20.4107
6	564 090.464	300.650	50.4471
7	735 191.128	338.832	220.337
8	958 190.272	393.530	18.0094
9	1 248 829.811	429.832	360.614
10	1 627 626.519	418.077	101.215
11	2 121 320.644	55.0310	55.2895
12	2 764 782.032	-28.6808	30.5707
13	3 603 370.302	-12.4120	22.1919
14	4 696 353.250	-4.64242	36.1458
15	6 120 857.520	-6.61787	27.9898
16	7 977 443.845	-2.16577	29.0855
17	10 397 172.647	-02.448	9.63338
18	13 550 856.785	247.589	13.7743
19	17 661 120.560	1.07961	13.1032
20	23 018 114.970	1.92423	49.4924
21	30 000 000.000	3.91806	543.192

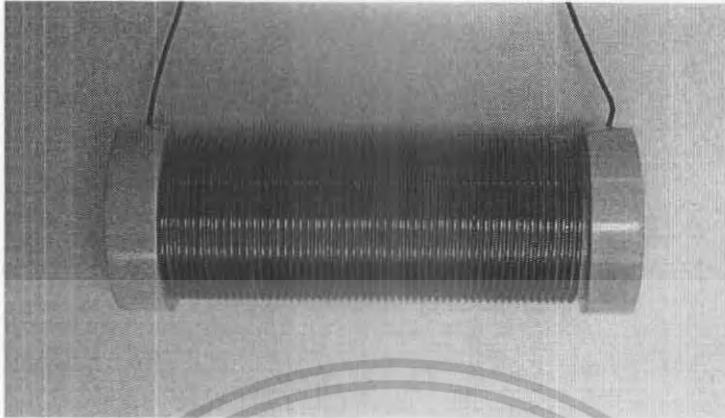
MEASURE N= 1 START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 STOP 30 000 000.000 Hz
 STOP=30000000.000 HZ
 Ver 2.4 AUG/15/87 8733 OPT350

รูปที่ 3.50 ค่าความตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าเท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$

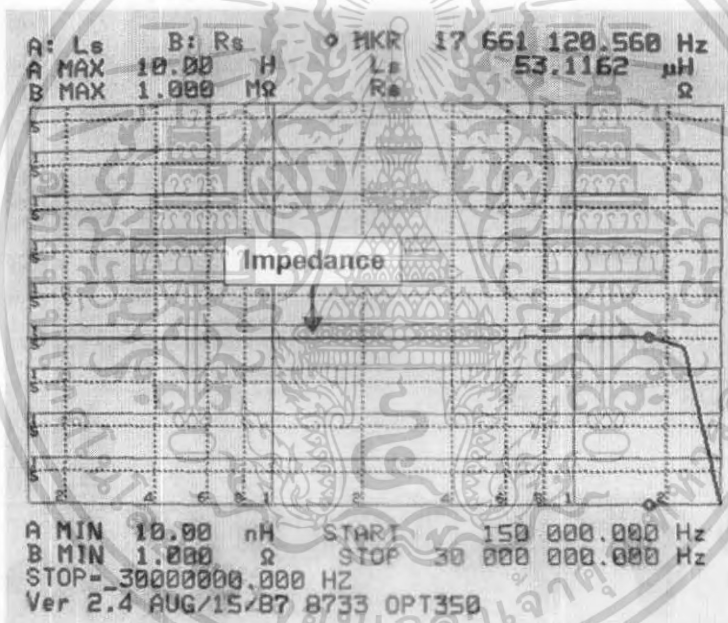
จากผลการทดสอบ สังเกตเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ที่ออกแบบขึ้นมา จะมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ประมาณ 332 kHz และจะเสียสภาพความเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Self resonance frequency) ที่ความถี่ประมาณ $1,250 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$



รูปที่ 3.51 ตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$



รูปที่ 3.52 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	FREQUENCY [Hz]	Ls [H]	Rs [Ω]
1	150 000.000	50.4837	797.905 m
	195 498.198	50.4614	878.905 m
	254 796.970	50.3945	915.544 m
	332 082.323	50.3537	984.431 m
	432 809.972	50.2921	1.07766
	564 090.464	50.2608	1.17241
	735 191.128	50.2266	1.21138
	958 190.272	50.1821	1.54704
1	240 829.811	50.2357	1.33306
11	1 627 626.519	50.2289	1.29251
12	2 121 320.344	50.2459	1.19002
13	2 764 762.032	50.3034	1.08419
14	3 603 373.302	50.3890	563.721 m
15	4 696 353.250	50.5364	-3.04870
16	6 120 857.320	50.9733	-2.17209
17	7 977 443.845	51.3080	-8.78610
18	10 397 172.647	52.5851	-80.4429
19	13 550 856.785	53.2876	-72.4813
20	17 661 120.560	53.1162	-150.961
21	23 018 114.970	29.0696	-247.941
22	30 000 000.000	16.4873	-7.31567

MEASURE N= START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STOP= 3000000.000 HZ
 Ver 2.4 AUG/15/87 0733 OPT350

รูปที่ 3.53 ค่าความตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 มีค่าเท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$

จากผลการทดสอบ สังเกตเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำ L_3 และ L_4 ที่ออกแบบขึ้นมา จะมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ $50 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ประมาณ $150 \text{ kHz} - 1.7 \text{ MHz}$ และจะเสียสภาพความเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Self resonance frequency) ที่ความถี่ประมาณ 30 MHz

3.7 รูปแบบภายในและลักษณะการวางอุปกรณ์ของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในและรูปร่างภายนอกของตัวโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

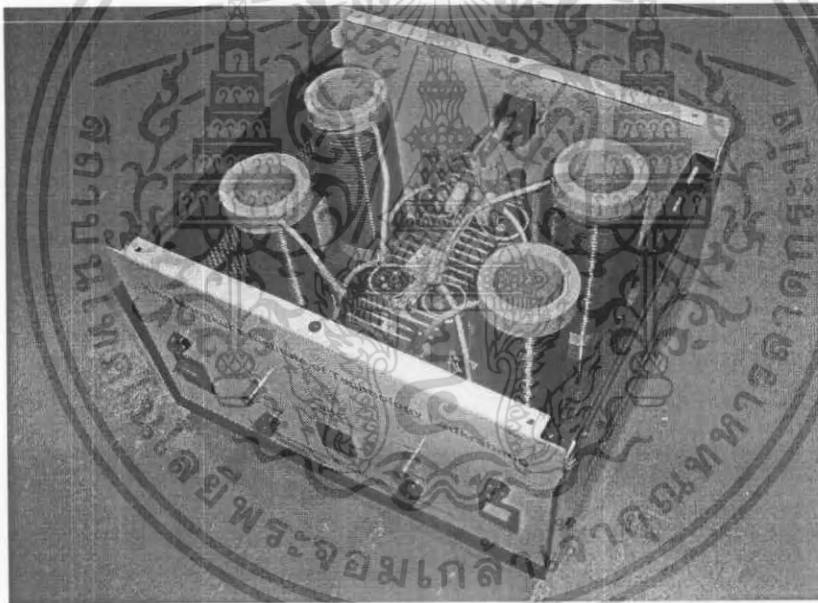


รูปที่ 3.54 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

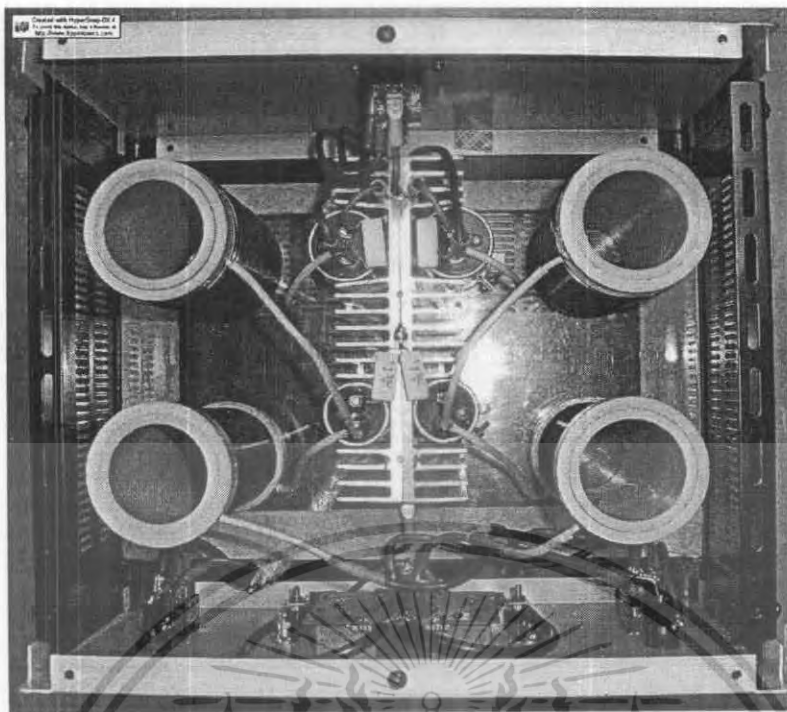


รูปที่ 3.55 ภาพถ่ายตัวถังโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์เมื่อประกอบเสร็จ



รูปที่ 3.56 ภาพถ่ายด้านบ้นสำหรับการวางอุปกรณ์ภายในและการต่อโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

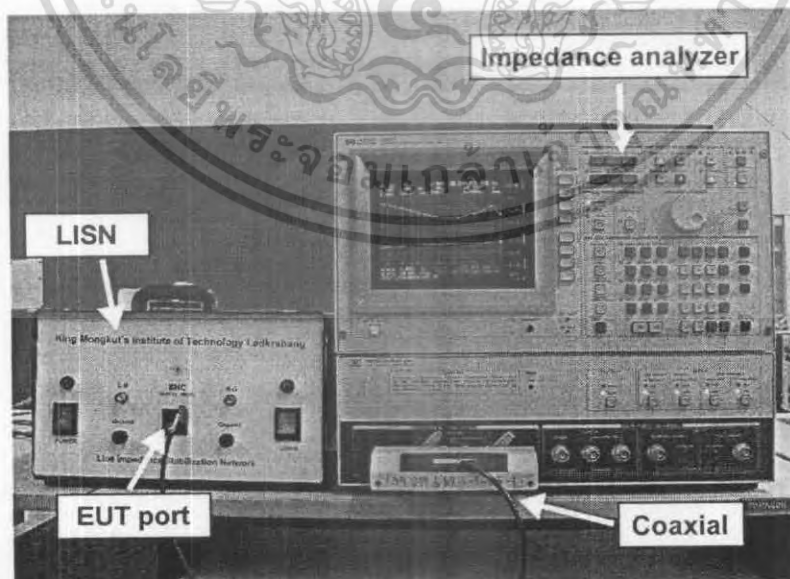


รูปที่ 3.57 ภาพถ่ายแสดงการวางอุปกรณ์ภายในโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

3.8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

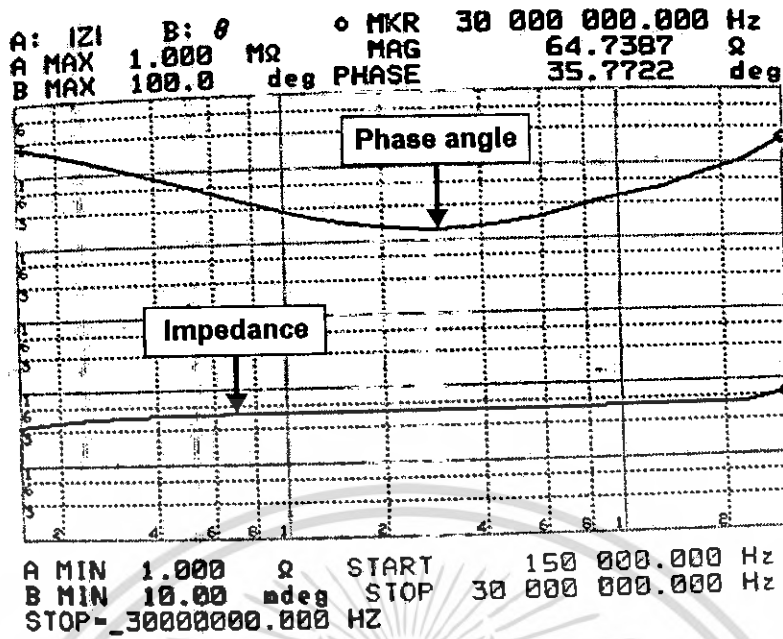
3.8.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ในโหมดต่างๆ

ในการทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะเป็นการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 16-1 ที่ขั้วต่อของอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment under test: EUT)



รูปที่ 3.58 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



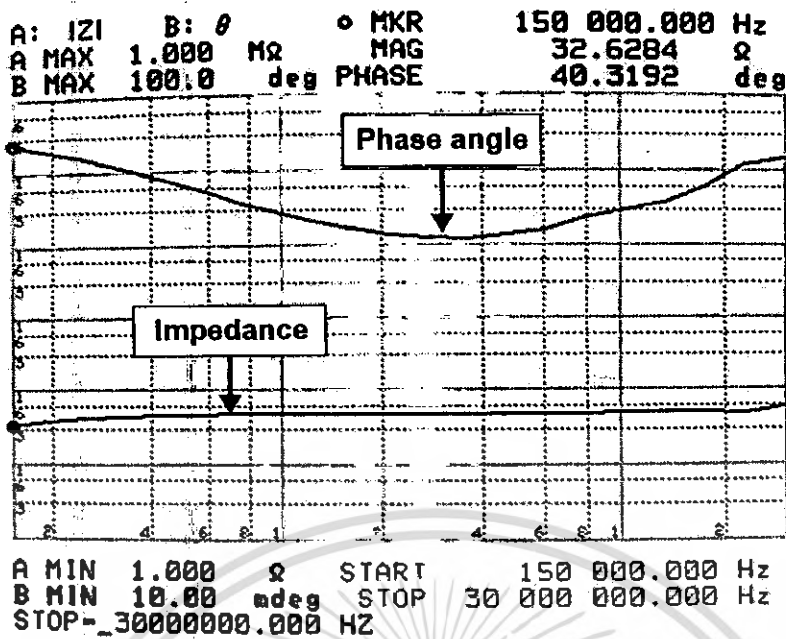
รูปที่ 3.59 กราฟอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G)

N	FREQUENCY [Hz]	MAG [Ω]	PHASE [deg]
1	150 000.000	32.9770	39.8958
2	195 498.198	37.1740	33.9569
3	254 796.970	40.5486	28.1097
4	332 082.323	43.0445	22.7784
5	432 009.972	44.7728	18.2140
6	564 090.464	45.9108	14.5099
7	735 191.128	46.6334	11.5934
8	958 190.272	47.0646	9.37992
9	1 248 029.811	47.3516	7.74245
10	1 627 626.519	47.5472	6.64781
11	2 121 320.344	47.6772	6.01613
12	2 764 762.032	47.7884	5.74922
13	3 603 373.302	47.8998	5.89625
14	4 696 353.250	48.0526	6.55845
15	6 120 857.320	48.1803	7.42020
16	7 977 443.845	48.3603	9.29400
17	10 397 172.647	49.7232	11.1123
18	13 550 856.785	49.8310	13.0973
19	17 661 120.560	50.2232	17.3955
20	23 018 114.970	49.1727	22.6954
21	30 000 000.000	64.7387	35.7722

MEASURE N= START 150 000.000 Hz
 SWEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STOP= 30000000.000 HZ

รูปที่ 3.60 ตารางอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.61 กราฟอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G)

N	FREQUENCY [Hz]	MAG [Ω]	PHASE [deg]
1	150 000.000	32.6284	40.3192
10	195 490.190	36.8739	34.4263
20	254 796.970	40.3382	28.5312
30	332 002.323	42.9128	23.1148
40	432 809.972	44.6949	18.4914
50	564 090.464	45.8585	14.6764
60	735 191.128	46.6138	11.6821
70	958 190.272	47.0671	9.37606
80	1 248 829.811	47.3573	7.65226
90	1 627 626.519	47.5573	6.45168
100	2 121 320.344	47.6867	5.70151
110	2 764 762.032	47.7774	5.31335
120	3 603 373.302	47.8360	5.29509
130	4 696 353.250	47.9562	5.77801
140	6 120 857.320	48.0341	6.38091
150	7 977 443.845	48.0288	8.07294
160	10 397 172.647	49.2914	9.54237
170	13 550 856.785	49.2741	11.1257
180	17 661 120.560	49.0570	15.1717
190	23 018 114.970	48.1506	24.8491
200	30 000 000.000	57.2656	28.1297

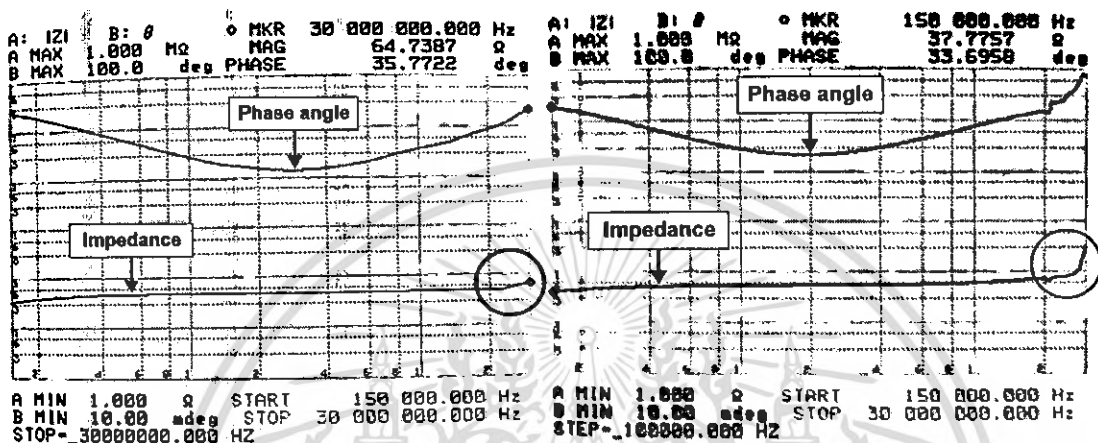
MEASURE N- START 150 000.000 Hz
SWEEP N- 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
STOP- 30000000.000 HZ

รูปที่ 3.62 ตารางอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G)

จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ จะต้องคำนึงถึง การรักษาค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในช่วง $\pm 20\%$ ของอิมพีแดนซ์ 50Ω Matching Impedance ที่ 50Ω เพื่อสร้างประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานสูงสุด และเป็นไปตามมาตรฐานการวัดและการทดสอบของ CISPR 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

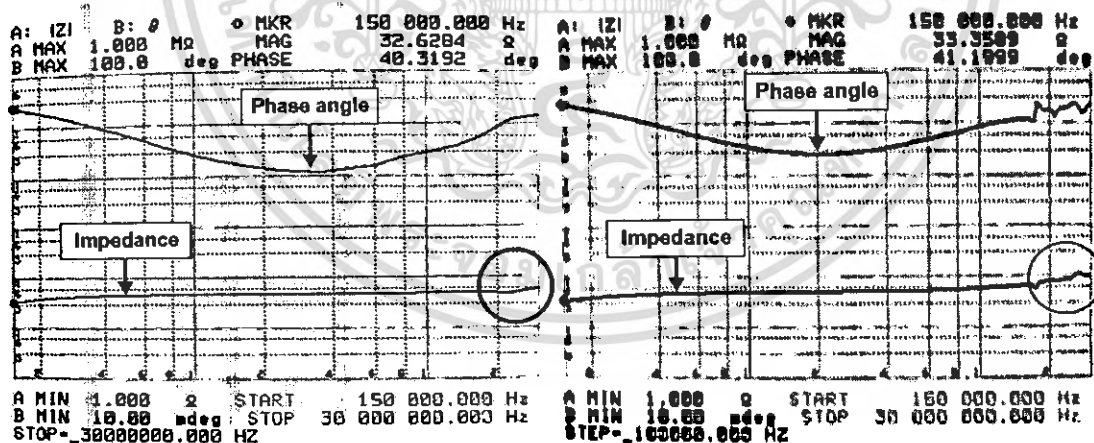
เมื่อนำผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่สร้างขึ้นนั้นมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ของปีการศึกษา 2548 จะเห็นว่าโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่มีการรักษาเสถียรภาพได้ดีกว่า ซึ่งสังเกตได้จากได้ดังรูปที่ 3.63 และรูปที่ 3.64 ที่ความถี่สูงจะเห็นว่าโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ปีการศึกษา 2548 จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้น แต่โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่สร้างขึ้นมาใหม่สามารถรักษาอิมพีแดนซ์ไว้ที่ 50 Ω ได้ดีกว่า



(ก) LISN 2549

(ข) LISN 2548

รูปที่ 3.63 กราฟเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Line – Ground (L – G) ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์



(ก) LISN 2549

(ข) LISN 2548

รูปที่ 3.64 กราฟเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ทดสอบในโหมด Neutral – Ground (N – G) ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 การทดสอบอุณหภูมิอุปกรณ์ภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ การทดสอบอุณหภูมิการใช้งานโดยกำหนดอุณหภูมิห้องไว้ที่ 25°C จ่ายกระแสที่ 8 A เป็นเวลา 30 นาที ได้ค่าอุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละตัวดังนี้

ตัวเก็บประจุ

$$C_1 = 32^{\circ}\text{C} \quad C_2 = 31^{\circ}\text{C}$$

$$C_3 = 34^{\circ}\text{C} \quad C_4 = 32^{\circ}\text{C}$$

ตัวเหนี่ยวนำ

$$L_1 = 47^{\circ}\text{C} \quad L_2 = 48^{\circ}\text{C}$$

$$L_3 = 46^{\circ}\text{C} \quad L_4 = 46^{\circ}\text{C}$$

ตัวต้านทาน

$$R_1 = 44^{\circ}\text{C} \quad R_2 = 33^{\circ}\text{C}$$

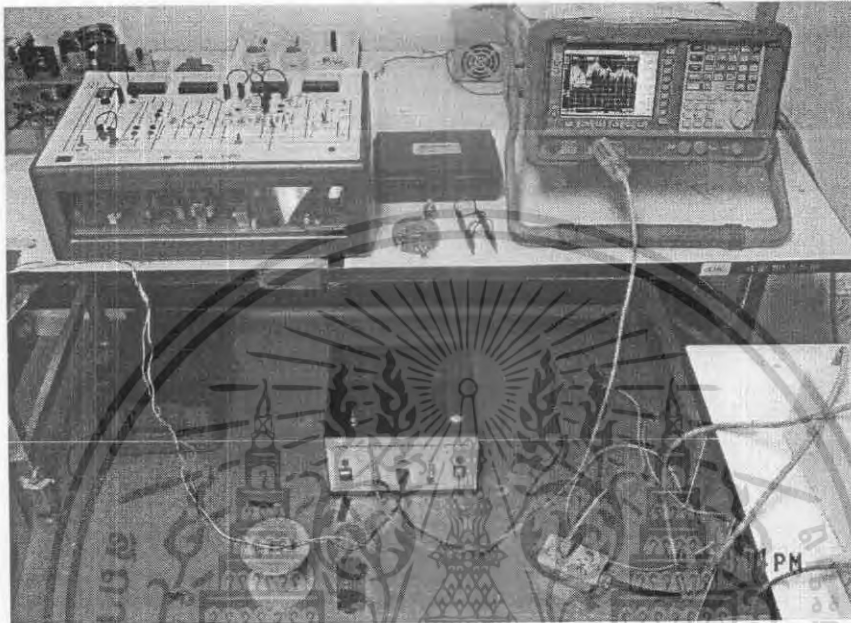
$$R_3 = 45^{\circ}\text{C} \quad R_4 = 32^{\circ}\text{C}$$

จากการทดสอบจะเห็นว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ภายในโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ที่กระแสโหลด 8 A นั้นมีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก โดยเฉพาะตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 , L_3 และ L_4 ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าพิกัดตามมาตรฐานของท่อพีวีซีที่ใช้ทำแกนของตัวเหนี่ยวนำคือที่พิกัดไม่เกิน 80°C

เมื่อนำผลการทดสอบอุณหภูมิภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่สร้างขึ้นนั้นมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบอุณหภูมิของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ของปีการศึกษา 2548 จะเห็นว่าเมื่อการทดสอบที่กระแสที่มากขึ้นโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มสูงขึ้นด้วย

3.8.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor และ Noise ในโหมด Line to Ground และ Neutral to Ground ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ทำการออกแบบ และโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่มีอยู่ในห้องวิจัย (LISN Model 3810/2 EMCO)



รูปที่ 3.65 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

1. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ Simplified LISN

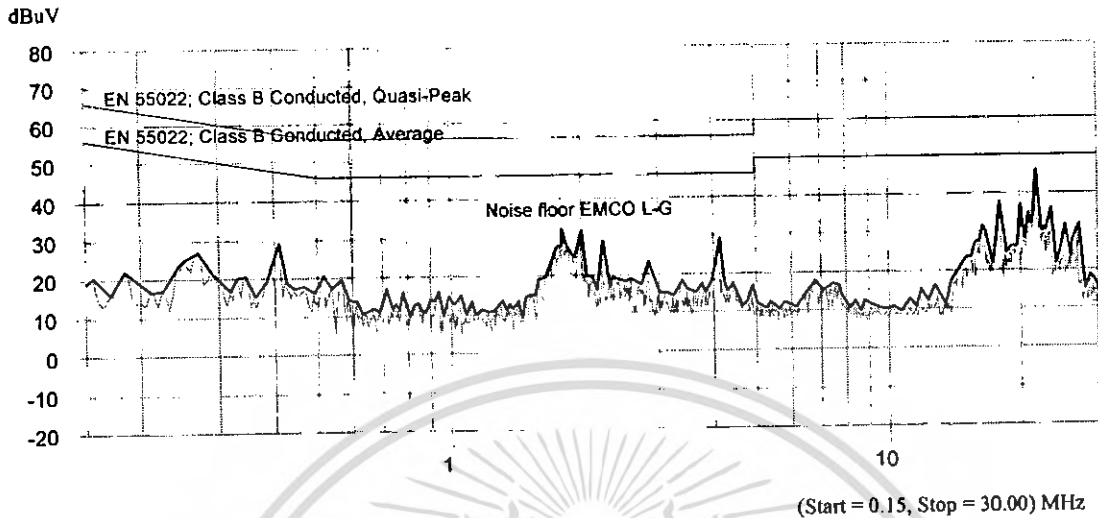


รูปที่ 3.66 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ Simplified LISN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

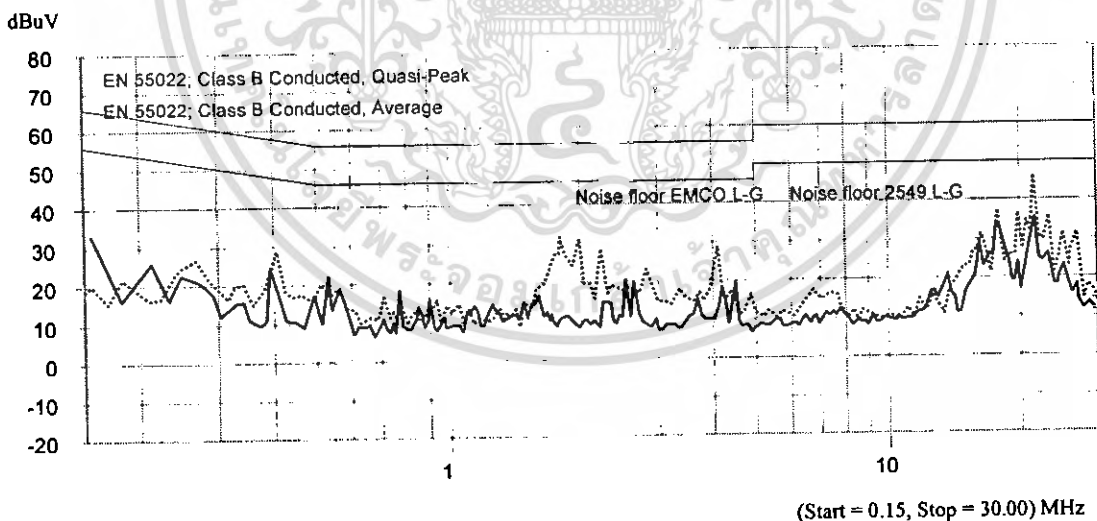
2. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ LISN Model 3810/2

EMCO



รูปที่ 3.67 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G)
ของ LISN Model 3810/2 EMCO

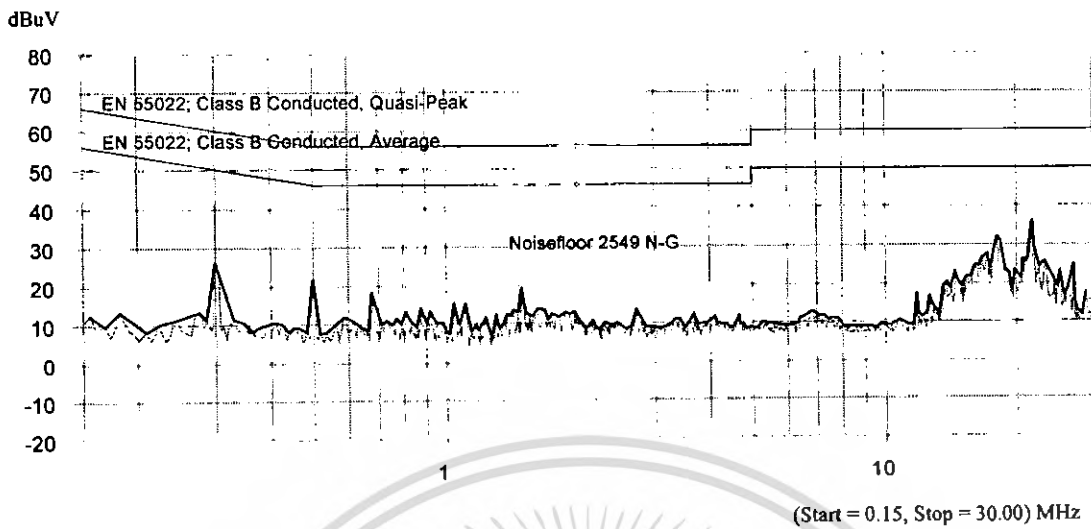
3. เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.68 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (L – G)
ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO

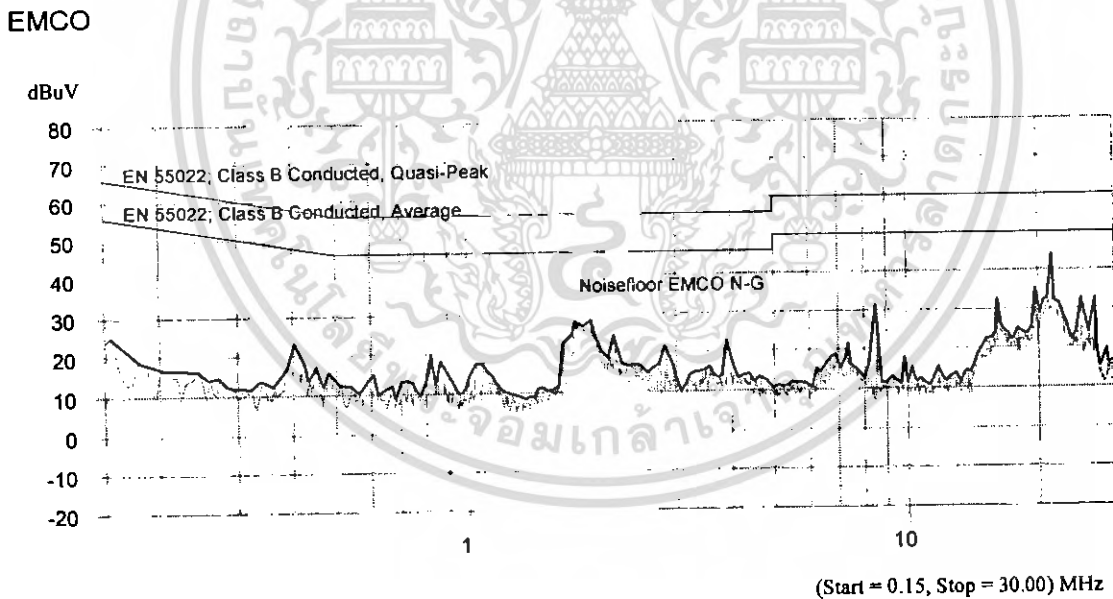
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN



รูปที่ 3.69 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN

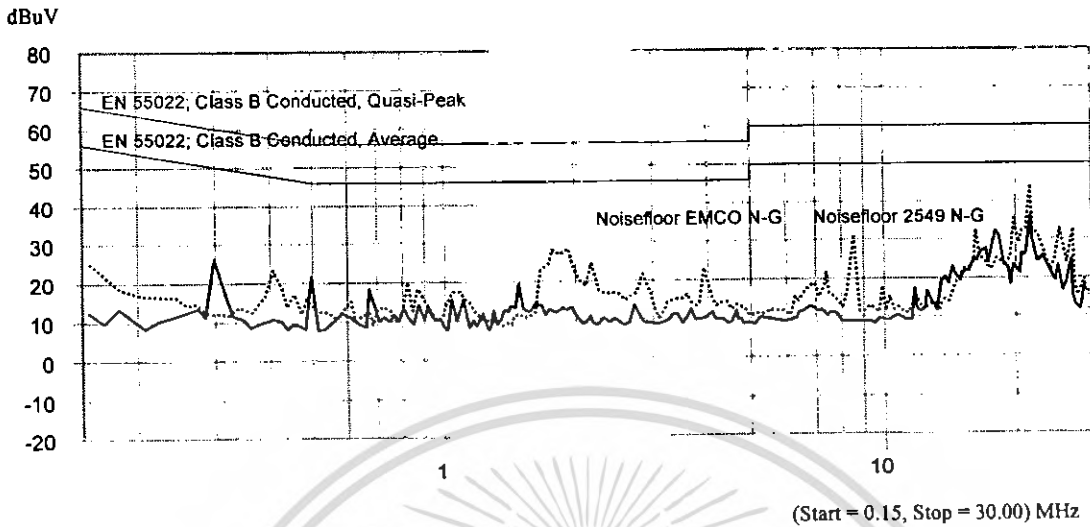
5. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ LISN Model 3810/2



รูปที่ 3.70 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO

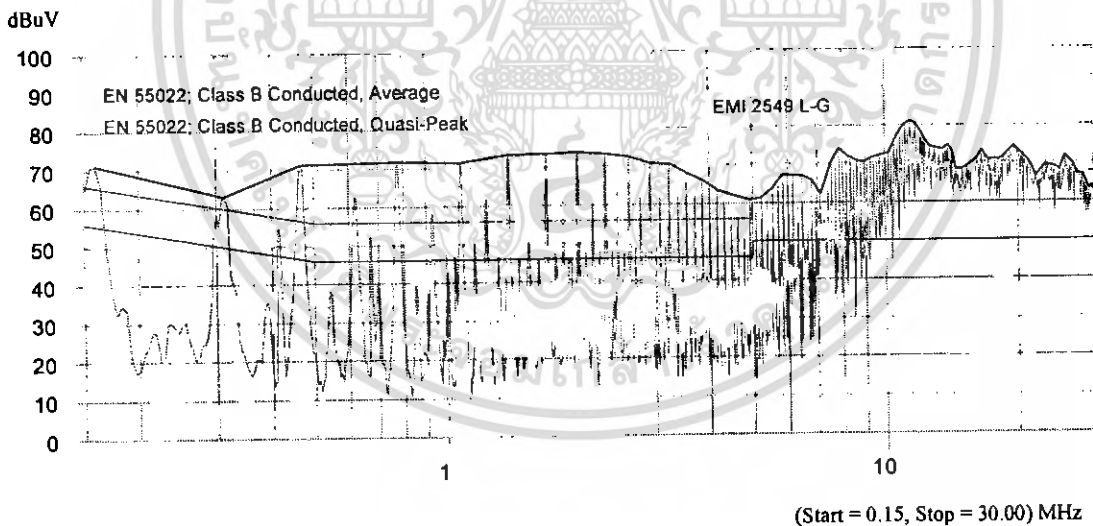
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.71 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor (N – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO

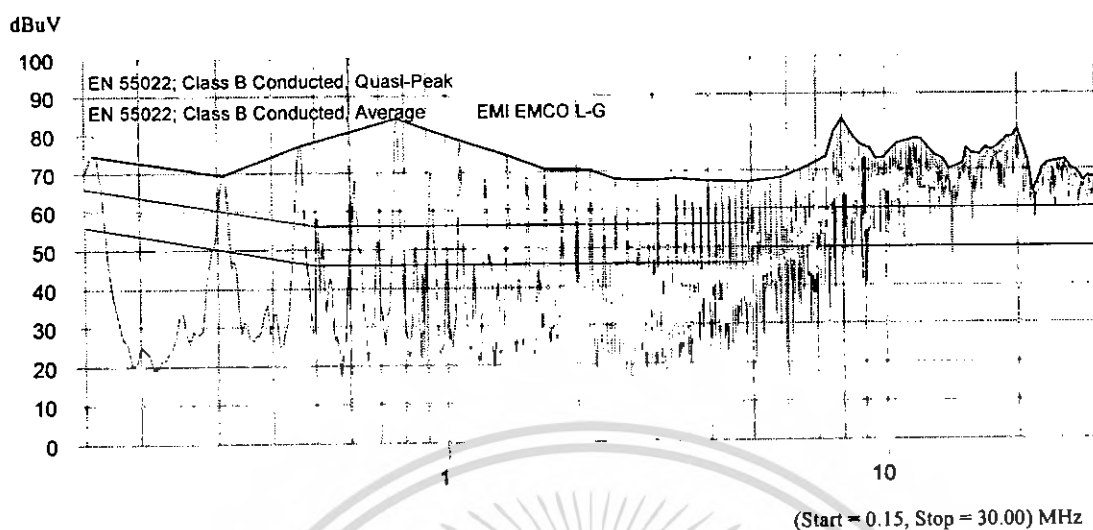
7. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ Simplified LISN



รูปที่ 3.72 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ Simplified LISN

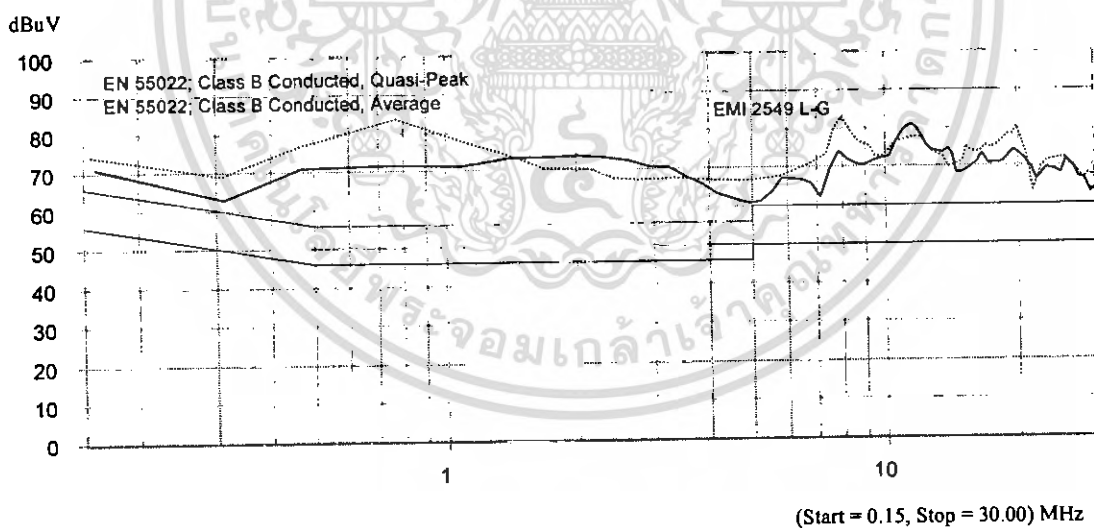
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.73 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G)
ของ LISN Model 3810/2 EMCO

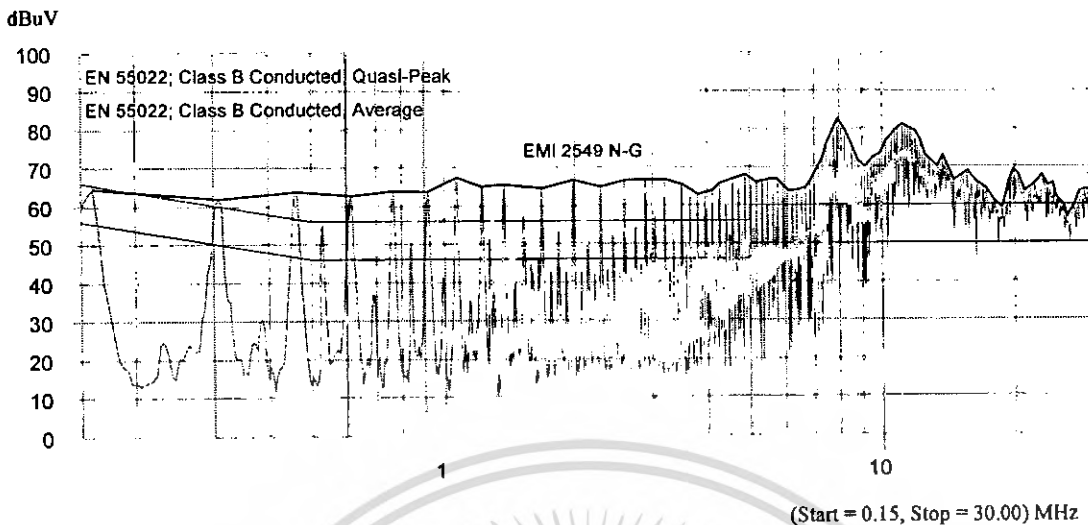
9. เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.74 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (L – G)
ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO

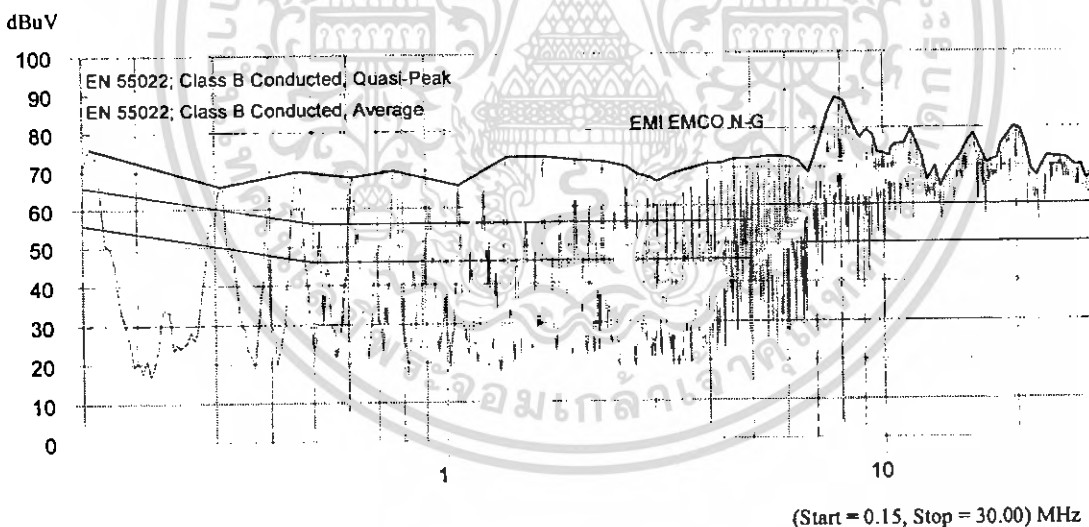
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ Simplified LISN



รูปที่ 3.75 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ Simplified LISN

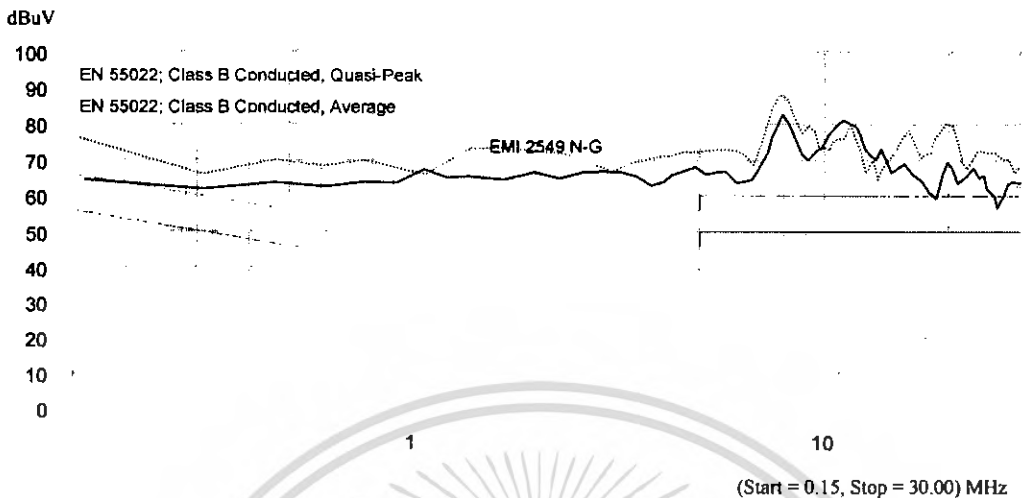
11. สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.76 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N – G) ของ LISN Model 3810/2 EMCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N - G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO



รูปที่ 3.77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise (N - G) ของ Simplified LISN กับ LISN Model 3810/2 EMCO

3.9 สรุป

จากการศึกษาหลักการและทฤษฎีของการออกแบบวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบองค์ประกอบภายใน วิธีการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ๆ เมื่อทำการออกแบบสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยคุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงในการสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ คือวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องออกแบบไม่ให้สร้างสัญญาณรบกวนแก่วงจรอื่น อีกทั้งตัวโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ยังต้องสามารถทนต่อสัญญาณที่มารบกวนได้ และต้องมีการรักษา Matching impedance ที่ 50Ω เพื่อสร้างประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานสูงสุดและให้เป็นไปตามมาตรฐาน CISPR 16

การออกแบบโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์อุปกรณ์ที่เลือกใช้สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป เช่น ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน และอุปกรณ์ที่ต้องทำการออกแบบสร้างขึ้นมาจากตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่า $250\mu\text{H}$ และ $50\mu\text{H}$ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นหัวใจสำคัญของการสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยจะใช้ทอพีวีซีเป็นแกนกลางเสมือนกับว่าตัวเหนี่ยวนำเป็นแกนอากาศ เพื่อให้ค่าผลตอบสนองความถี่มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่นำมาสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ทุกตัวจะต้องมีการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อดูค่าการตอบสนองความถี่ภายในอุปกรณ์ และเมื่อทำการสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์เสร็จแล้ว จำต้องนำไปทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ในโหมดต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์สามารถรักษาอิมพีแดนซ์ 50Ω โดยที่มีความผิดพลาดที่

ไม่เกิน 20% ในทุกย่านความถี่ใช้งานที่ 150 kHz – 30 MHz ได้จริง อีกทั้งจะต้องนำมาทดสอบในเรื่องคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือการวัดอุณหภูมิการใช้งาน และเมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยป้อนกระแสโหลด 8 A ให้กับโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์นั้นเมื่อทำการวัดอุปกรณ์ภายในแต่ละตัวจะเห็นว่ามียุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก

เมื่อได้ผลดังนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดต่างๆ ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ซึ่งจากการทดสอบโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ออกแบบนั้น จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเทียบกับโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่มีอยู่ในห้องวิจัย (LISN Model 3810/2 EMCO) มีความใกล้เคียงกันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งในการทดสอบจะยึดถือค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise separator

4.1 บทนำ

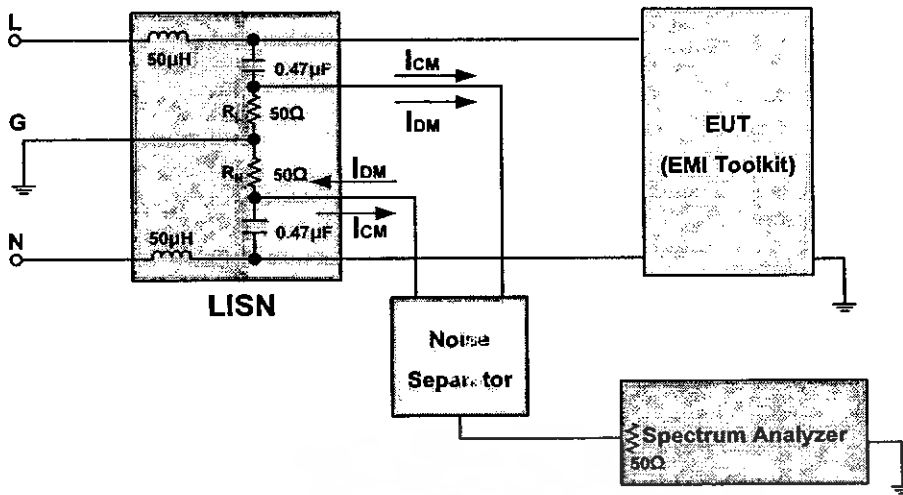
เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางสายตัวนำ นั้นยากต่อการวิเคราะห์ว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดใดส่งผลกระทบมากกว่ากัน ดังนั้นจึงมีความต้องการในการวิเคราะห์หาค่าประกอบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางสายตัวนำ เพื่อศึกษาการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz โดยการนำอุปกรณ์ที่สามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมออกจากกันได้ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator) เพื่อให้รู้ถึงขนาดขององค์ประกอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ว่าองค์ประกอบใดเด่นชัดกว่ากันและเกิดขึ้นที่ความถี่ใด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา

4.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมออกจากกันได้ โดยอาศัยหลักการของการบวก ลบกันของสัญญาณทางเวกเตอร์ และใช้หม้อแปลงที่มีการกำหนดขั้ว ทำให้ได้แรงดันด้านออกเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างหรือสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมตามต้องการ

หลักการทำงานพื้นฐานของวงจรชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้ หม้อแปลงส่งถ่ายพลังงานภายในวงจร และใช้สวิตช์ช่วยในการเปลี่ยนขั้วของหม้อแปลง (Dot polarity) โดยจะได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านนอก ออกมาเป็น 2 เท่า คือจะได้ $2V_{DM}$ และ $2V_{CM}$

ในการออกแบบชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้หลักการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบอาจจะทำการคัดเอาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างหรือสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมออกก็ได้ จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าทิศทางของกระแสในโหมด Line to Ground จะได้ (CM+DM) และทิศทางของกระแสในโหมด Neutral to Ground จะได้ (CM-DM) สามารถแสดงสมการแรงดันได้ดังนี้

ทิศทางของกระแสในโหมด Line to Ground

$$\vec{V}_{L-G} = 50(\vec{I}_{CM} + \vec{I}_{DM})$$

ดังนั้น

$$\vec{V}_{L-G} = \vec{V}_{CM} + \vec{V}_{DM} \quad (4.1)$$

ทิศทางของกระแสในโหมด Neutral to Ground

$$\vec{V}_{N-G} = 50(\vec{I}_{CM} - \vec{I}_{DM})$$

ดังนั้น

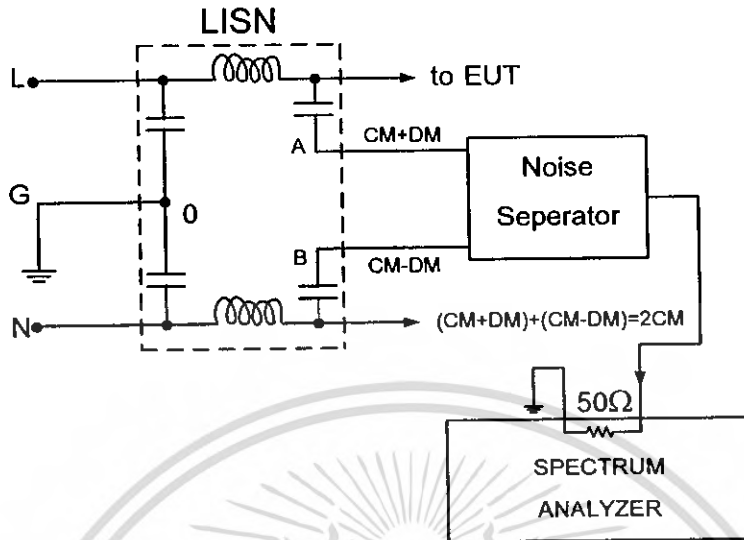
$$\vec{V}_{N-G} = \vec{V}_{CM} - \vec{V}_{DM} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.1) และ (4.2) เมื่อนำสัญญาณทั้งสองนี้มาบวก ลบกันทางเวกเตอร์ในชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้แรงดันต้านออก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากับกราวด์ของระบบทั้งในส่วนของ Line และ Neutral โดยที่ทั้ง Line และ Neutral ของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไหลลงกราวด์ดังนั้นจะเป็นการนำเอาสมการที่ (4.1) รวมกันทางเวกเตอร์กับสมการที่ (4.2) จะได้แรงดันต้านออกอยู่ในรูปของ $2V_{CM}$ ตามสมการที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

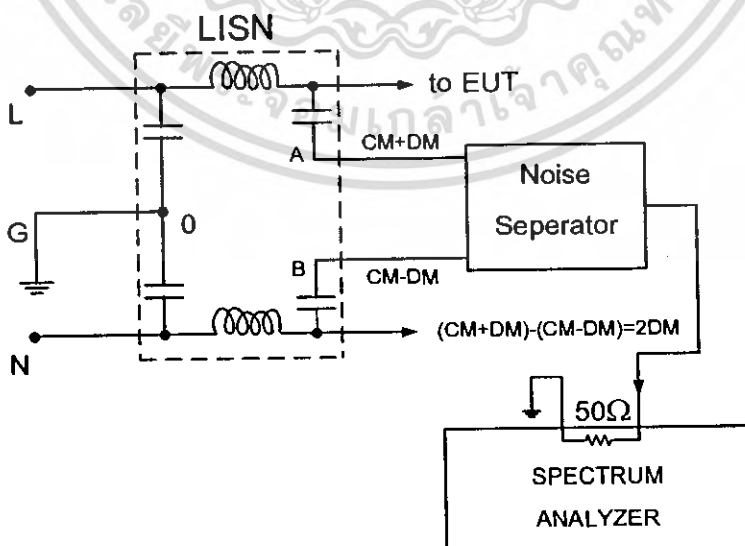
$$|\vec{V}_{L-G} + \vec{V}_{N-G}| = |\vec{V}_{CM} + \vec{V}_{DM}| + |\vec{V}_{CM} - \vec{V}_{DM}| = 2V_{CM} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.2 หลักการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า: DM Rejecter

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าเฉพาะใน Line และ Neutral เท่านั้น โดยถือว่าวงจรนี้ไม่มีส่วนใดต่อลงกราวด์ ดังนั้นจะเป็นการนำเอาสมการที่ (4.1) หักล้างกันทางเวกเตอร์กับสมการที่ (4.2) จะได้แรงดันด้านออกอยู่ในรูปของ $2V_{DM}$ ตามสมการที่ 4.4

$$|\vec{V}_{L-G} - \vec{V}_{N-G}| = |\vec{V}_{CM} + \vec{V}_{DM}| - |\vec{V}_{CM} - \vec{V}_{DM}| = 2V_{DM} \quad (4.4)$$



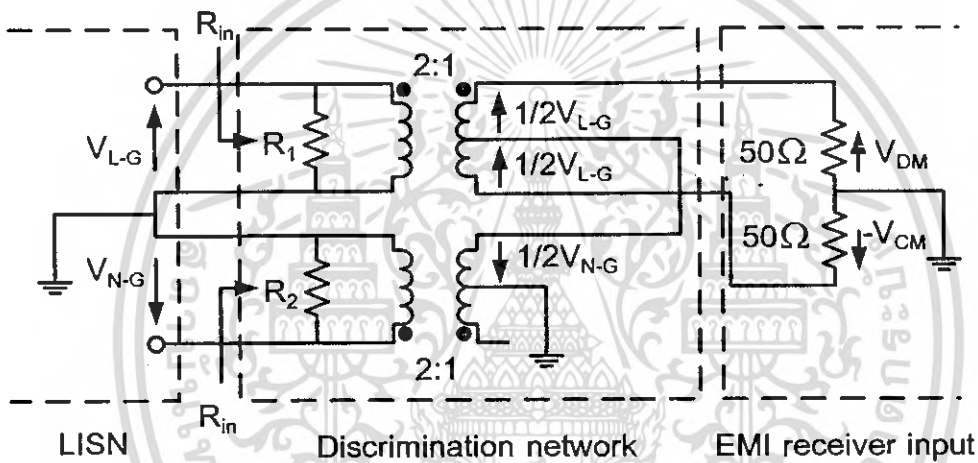
รูปที่ 4.3 หลักการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า: CM Rejecter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

4.3.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การออกแบบและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงการนี้จะเป็นชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเอาต์พุต 1 เท่า ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติพิเศษ เพราะชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่แล้วจะได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านออก ออกมาเป็น 2 เท่า คือจะได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเป็น V_{CM} และ V_{DM} โดยชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้หลักการของหม้อแปลงแบบแทป (Center tap transformer) 2:1 ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของ Wideband RF transformer เป็นการช่วยลดทอนสัญญาณทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านออกที่ได้ออกมานั้นมีค่าเป็น 1 เท่า สำหรับวงจรสมมูลภายในชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.4 สามารถเขียนสมการเพื่อหาแรงดันด้านออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจากสมการที่ 4.5 จะเป็นการแสดงสมการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างออก (DM Rejecter) และสมการที่ 4.6 จะเป็นการแสดงสมการการคัดออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมออก (CM Rejecter) ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านออกที่ได้ออกมาจะมีค่าออกมาเป็น 1 เท่า

$$\frac{1}{2}|\vec{V}_{L-G} + \vec{V}_{N-G}| = \frac{1}{2}|\vec{V}_{CM} + \vec{V}_{DM}| + \frac{1}{2}|\vec{V}_{CM} - \vec{V}_{DM}| = V_{CM} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2}|\vec{V}_{L-G} - \vec{V}_{N-G}| = \frac{1}{2}|\vec{V}_{CM} + \vec{V}_{DM}| - \frac{1}{2}|\vec{V}_{CM} - \vec{V}_{DM}| = V_{DM} \quad (4.6)$$

เงื่อนไขของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

1. ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็น 50Ω เสมอ และต้องเป็นอิสระจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ

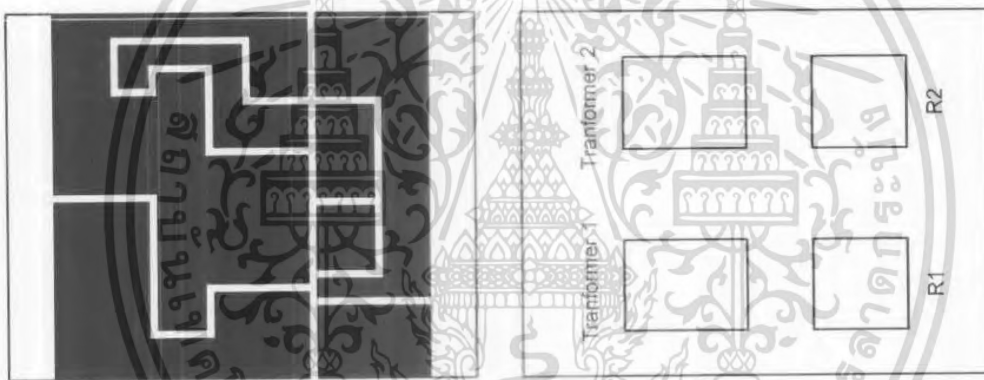
2. ทางด้านออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง มีค่าเป็น $|\bar{V}_1 + \bar{V}_2|$ และทางด้านออกของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมมีค่าเป็น $|\bar{V}_1 - \bar{V}_2|$

เมื่อ V_1 คือแรงดันของสัญญาณ Line - Ground จาก LISN

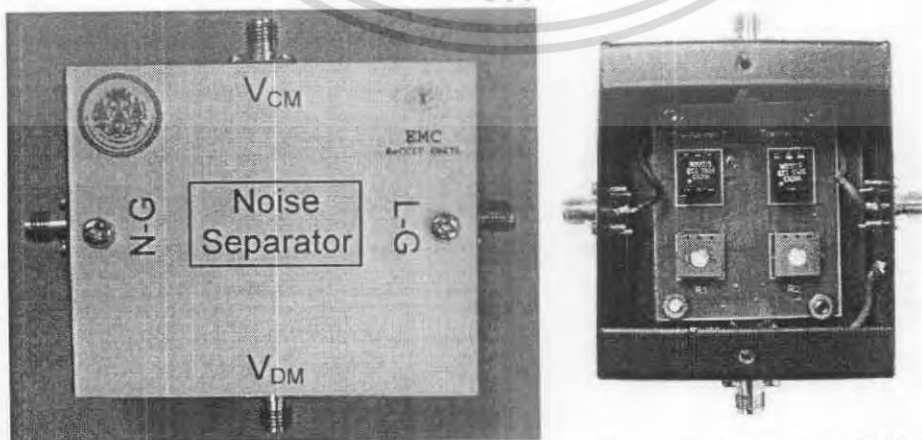
V_2 คือแรงดันของสัญญาณ Neutral - Ground จาก LISN

3. การ Leakage ระหว่างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมทางด้านออกควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (เป็นศูนย์ในทางจินตภาพ)

เมื่อได้รูปวงจรสมมูลแล้วจึงออกแบบเขียนลายวงจร และการจัดวางอุปกรณ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.5 การออกแบบลายวงจรและการจัดวางอุปกรณ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

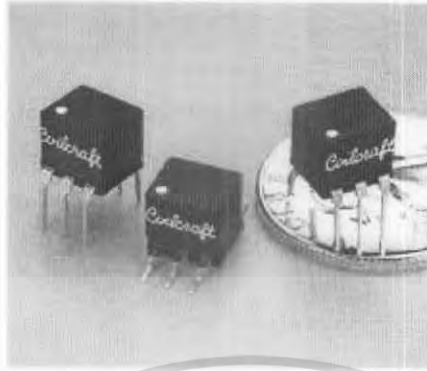


รูปที่ 4.6 ลักษณะภายนอกและภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

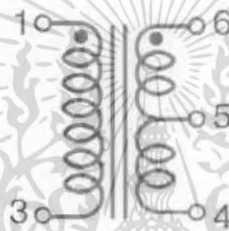
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ส่วนประกอบสำคัญของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

1. หม้อแปลงคุณภาพสูง (Wideband RF transformer)

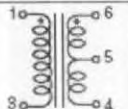


รูปที่ 4.7 หม้อแปลงคุณภาพสูง (Wideband RF transformer) WB 2010 – PCL

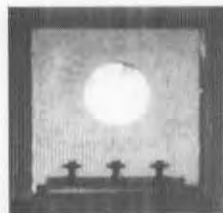


รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลภายในหม้อแปลงคุณภาพสูง WB 2010 – PCL

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

Schematic	Part Number	Impedance Ratio	$I_{DC,MAX}$	Freq.	Pins 1 – 3		Pins 4 – 6	
	Through-hole	Pri : Sec	(mA)	(MHz)	L_{min2} (μH)	DCR_{max} (Ω)	L_{min2} (μH)	DCR_{max} (Ω)
	WB 2010 - PCL	1 : 1	250	0.005 100	780	0.320	780	0.320

2. ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100 Ω



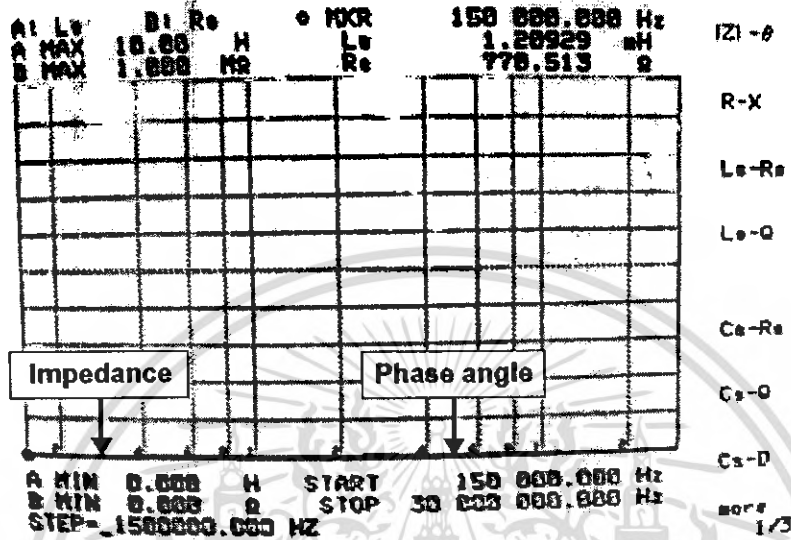
รูปที่ 4.9 ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูง

การทดสอบเก็บค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูง (Wideband RF transformer) WB 2010 – PCL เพื่อพิจารณาถึงจุด Self resonance frequency

1. การทดสอบ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 1 กับขา 3 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz



รูปที่ 4.10 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 1 กับขา 3

N	FREQUENCY (Hz)	La (H)	Re (Ω)
10	150 000.000	1.20924	768.672
11	195 498.198	1.14454	981.984
12	254 796.970	896.557	1.22317
13	332 082.323	751.973	1.49721
14	432 089.972	630.127	1.81944
15	564 090.464	519.793	2.20969
16	735 191.128	415.965	2.68234
17	958 190.272	316.254	3.23413
18	1 248 829.011	219.911	3.84561
19	1 627 626.519	130.516	4.44858
20	2 121 320.344	51.9352	4.98634
21	2 764 762.032	-10.9677	5.19790
22	3 603 373.302	-52.5355	5.06478
23	4 696 353.250	-71.8223	4.45699
24	6 120 857.320	-60.8573	3.53434
25	7 977 443.045	-54.9335	2.53569
26	10 397 172.647	-38.9585	1.72085
27	13 558 856.785	-25.7826	1.12017
28	17 661 120.560	-16.3198	710.260
29	23 018 114.970	-10.0240	446.589
30	30 000 000.000	-6.84518	280.285

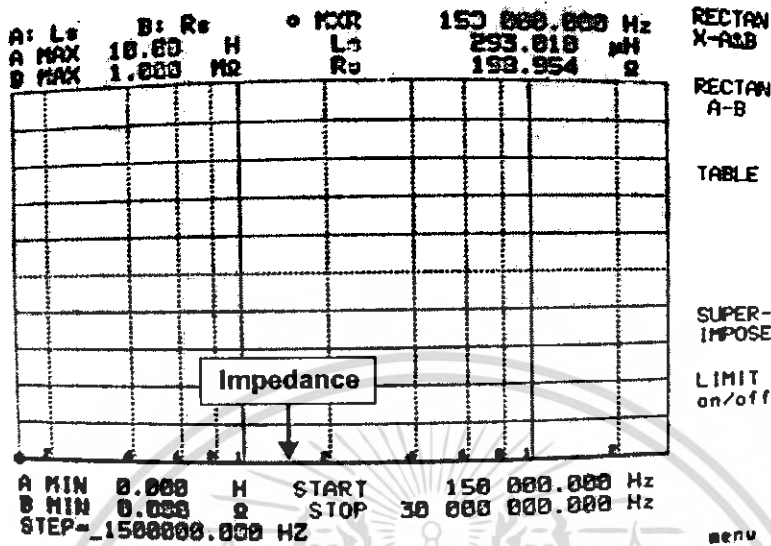
รูปที่ 4.11 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 1 กับขา 3

จากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ WB 2010 – PCL วัดขา 1 กับขา 3 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz มีค่า Self resonance frequency อยู่ที่ความถี่ 2.764 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 5 ที่ความถี่ 150 kHz – 30

MHz



รูปที่ 4.12 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 5

N	FREQUENCY (Hz)	Ls (H)	Rs (Ω)
1	150 000.000	291.678	203.756
1	195 498.198	255.100	252.007
1	254 796.970	218.862	312.047
1	332 082.323	185.070	380.541
1	432 809.972	154.997	459.290
1	564 090.464	128.199	553.572
1	735 191.128	103.363	669.319
1	958 190.272	79.1773	805.741
1	1 248 829.011	55.7560	960.499
1	1 627 626.519	33.3633	1.11621 K
1	2 121 320.344	13.3127	1.24466 K
1	2 764 762.032	-2.70310	1.30847 K
1	3 603 373.302	-13.2046	1.27305 K
1	4 696 353.250	-18.0892	1.11004 K
1	6 120 657.320	-17.2500	885.356
1	7 977 443.845	-13.7379	633.085
1	10 397 172.647	-9.72430	428.275
1	13 550 856.785	-6.40477	279.029
1	17 661 120.560	-4.03122	177.779
2	23 018 114.970	-2.46240	112.278
2	30 000 000.000	-1.47212	70.4332

MEASURE N= 20 **START** 150 000.000 Hz
SWEEP N= 1 → 21 **STOP** 30 000 000.000 Hz
STEP= 1500000.000 HZ

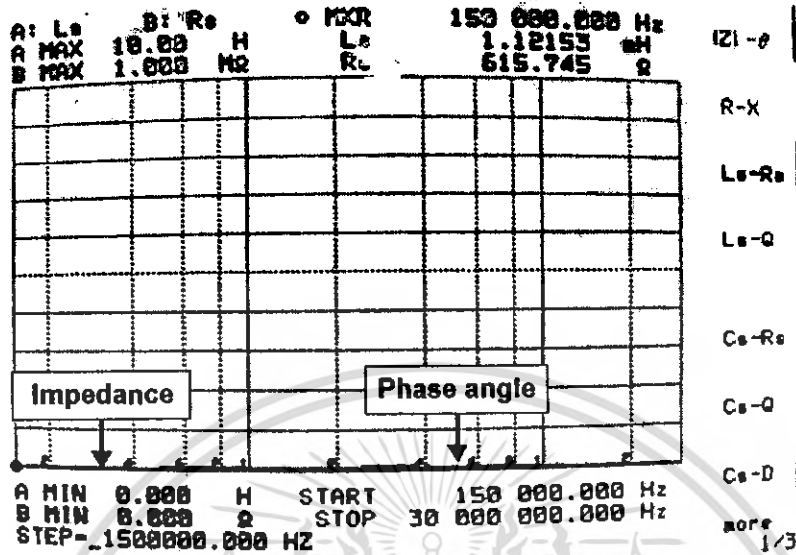
รูปที่ 4.13 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 5

จากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ WB 2010 – PCL วัดขา 4 และขา 5 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz มีค่า Self resonance frequency อยู่ที่ความถี่ 2.764 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 6 ที่ความถี่ 150 kHz – 30

MHz



รูปที่ 4.14 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 6

N	FREQUENCY (Hz)	Ls (H)	Rs (Ω)
1	150 000.000	1.120420	793.759
195	498.198	1.120431	1.00516
332	802.323	874.846	1.24277
432	809.972	733.166	1.50360
564	890.464	613.188	1.00513
735	191.128	508.554	2.16847
958	190.272	411.052	2.62130
1	240 029.011	317.175	3.16765
1	627 626.519	225.027	3.78799
1	121 320.344	136.575	4.41558
1	764 762.032	56.7565	4.94047
3	603 373.302	-7.36531	5.21767
4	696 353.250	-50.1934	5.10653
6	120 857.320	-70.9518	4.51479
7	977 443.045	-68.0332	3.59509
10	397 172.647	-55.2702	2.58267
13	550 856.705	-39.3366	1.75377
17	661 120.560	-26.0761	1.14422
23	010 114.970	-16.5102	726.536
30	000 000.000	-10.1415	454.102
		-6.11741	202.355

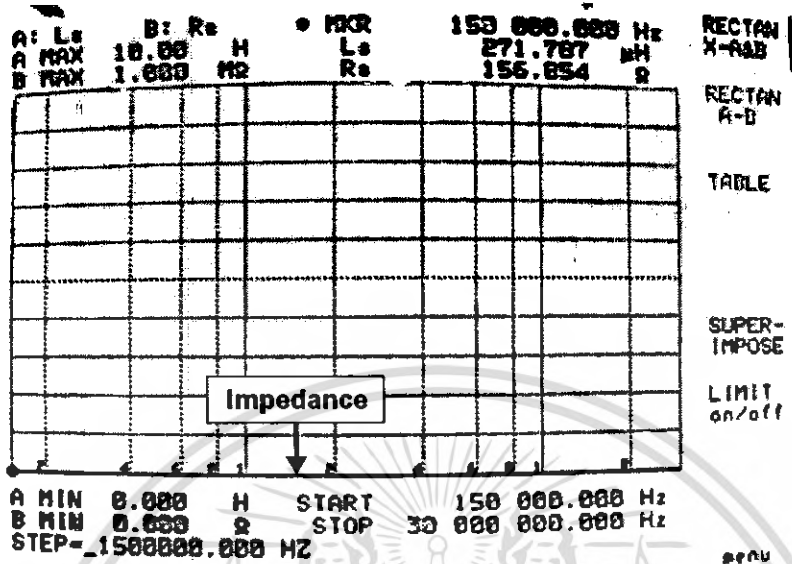
MEASURE N= 21 START 150 000.000 Hz
 SHEEP N= 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP= 1500000.000 Hz

|Z| - ϕ
 R-X
 Ls-Rs
 Ls-Q
 Cs-Rs
 Cs-Q
 Cs-D
 more 1/3

รูปที่ 4.15 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 4 และขา 6

จากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ WB 2010 – PCL วัดขา 4 และขา 5 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz มีค่า Self resonance frequency อยู่ที่ความถี่ 2.764 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.15

4. การทดสอบ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz



รูปที่ 4.16 กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6

N	FREQUENCY (Hz)	Lo (H)	Ri (Ω)
10	150 000.000	274.023	155.644
11	195 499.199	250.017	247.111
12	254 796.978	222.123	308.074
13	332 082.323	188.368	370.246
14	432 809.972	157.868	459.942
15	564 090.464	130.326	557.340
16	735 191.128	104.557	675.509
17	958 190.272	79.4926	814.087
18	1 248 029.811	55.4957	969.026
19	1 627 626.519	32.8210	1 123.41
20	2 121 320.344	12.7228	1 249.55
21	2 764 762.832	-3.18285	1 304.86
22	3 603 373.582	-13.5223	1 267.58
23	4 696 353.250	-18.8267	1 109.79
24	6 120 857.320	-17.3338	876.627
25	7 977 443.845	-13.7267	626.608
26	10 397 172.647	-9.70412	422.637
27	13 550 856.785	-6.38672	274.345
28	17 661 120.568	-4.01902	173.799
29	23 018 114.978	-2.45410	108.828
30	30 000 000.000	-1.46690	67.3525

MEASURE N- START 150 000.000 Hz
 SHEEP N- 1 → 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP- 1500000.000 HZ

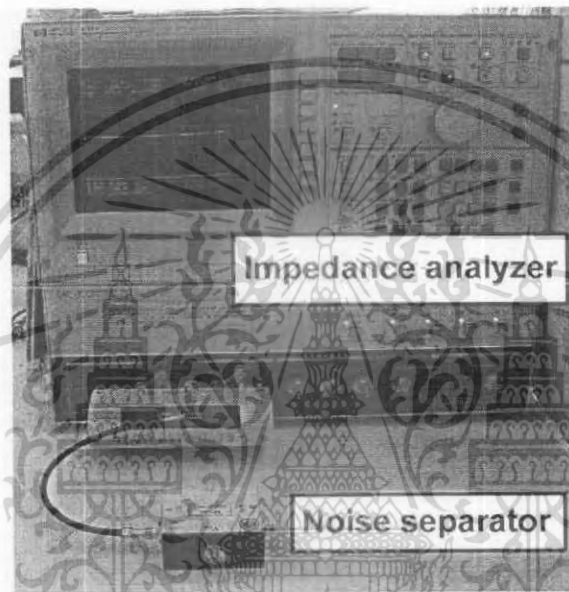
รูปที่ 4.17 ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6

จากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงคุณภาพสูงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ WB 2010 – PCL โดยวัดที่ขา 5 กับขา 6 ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz จะมีค่า Self resonance frequency อยู่ที่ความถี่ 2.764 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.17

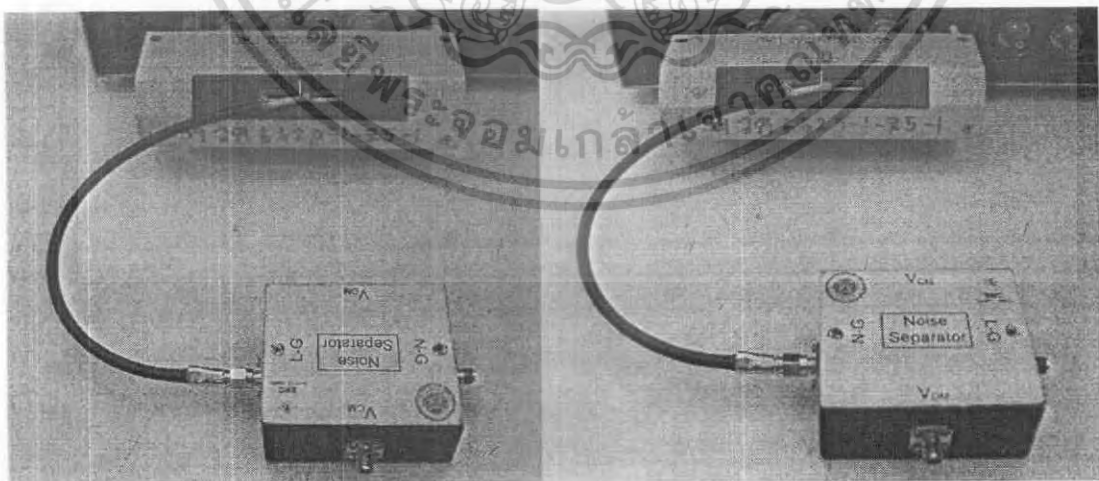
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ คือต้องมีอิมพีแดนซ์ภายในที่ 50Ω ตลอดช่วงความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$ ด้วยเพื่อประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานสูงสุด เมื่อสร้างเสร็จแล้วเราจึงต้องมีการทดสอบเพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการต่อวัดอิมพีแดนซ์จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือมีอิมพีแดนซ์ที่ 50Ω ทำให้เสมือนว่าต่ออยู่กับเครื่องวัดสัญญาณตามสายตัวนำ (Spectrum analyzer) อยู่ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.18 การต่อวัดอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

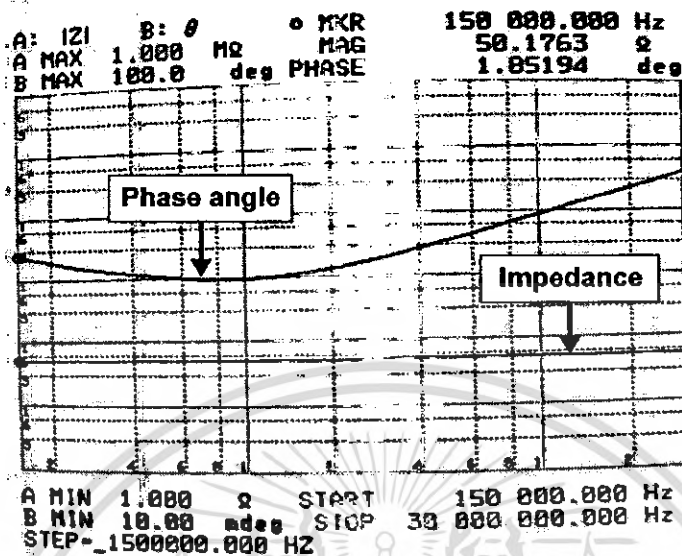


รูปที่ 4.19 การต่อวัดอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ด้าน Line to Ground (L - G) และ Neutral to Ground (N - G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz



รูปที่ 4.20 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G)

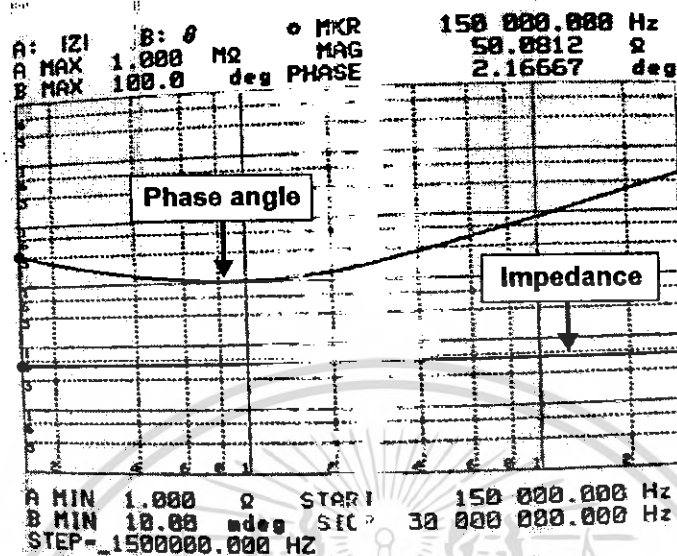
N	FREQUENCY [Hz]	MAG [Ω]	PHASE [deg]
10	150 000.000	50.1626	1.85158
11	195 498.198	50.2261	1.55270
12	254 796.970	50.3127	1.34066
13	332 082.323	50.3760	1.19913
14	432 009.972	50.4680	1.09095
15	564 090.464	50.5558	1.02005
16	735 191.128	50.6100	980.236
17	950 190.272	50.6709	976.166
18	1 248 829.811	50.7187	982.262
19	1 627 626.519	50.7742	1.12458
20	2 121 320.344	50.8156	1.24208
21	2 764 762.032	50.8575	1.47886
22	3 603 373.302	50.9236	1.78573
23	4 696 353.250	50.9821	2.19011
24	6 120 857.320	51.0500	2.71527
25	7 977 443.845	51.1293	3.42189
26	10 397 172.647	51.2788	4.32007
27	13 550 856.785	51.4563	5.51859
28	17 661 120.560	51.7409	7.02714
29	23 018 114.970	52.1727	8.94631
30	30 000 000.000	52.8530	11.3773

MEASURE N= 21 START 150 000.000 Hz
SWEEP N= 1 + 21 STOP 30 000 000.000 Hz
STEP= 1500000.000 HZ

รูปที่ 4.21 ตารางค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G)

จากผลการทดสอบสามารถสรุปวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Line to Ground (L – G) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าอยู่ที่ 50 Ω ถึง 52 Ω ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2. การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Neutral to Ground (N – G) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz



รูปที่ 4.22 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Neutral to Ground (N – G)

N	FREQUENCY [Hz]	MAG [Ω]	PHASE [deg]
10	150 000.000	50.1307	2.17521
11	195 498.199	50.1796	1.80610
12	254 796.970	50.2554	1.54090
13	332 082.323	50.3321	1.33501
14	432 009.972	50.4074	1.19703
15	564 090.464	50.4793	1.09585
16	735 191.120	50.5444	1.03565
17	950 190.272	50.6066	1.00473
18	1 240 029.811	50.6600	1.02343
19	1 627 626.519	50.7096	1.11961
20	2 121 320.344	50.7647	1.27574
21	2 764 762.032	50.8032	1.46471
22	3 603 373.302	50.8548	1.77148
23	4 696 353.250	50.9235	2.14051
24	6 120 057.320	50.9957	2.64873
25	7 977 443.045	51.0687	3.32754
26	10 397 172.647	51.1640	4.21285
27	13 550 056.785	51.3011	5.38118
28	17 661 120.560	51.4617	6.87967
29	23 018 114.970	51.7230	8.87598
30	30 000 000.000	51.1307	11.4994

MEASURE N= 20 START 150 000.000 Hz
 SHEEP N= 1 + 21 STOP 30 000 000.000 Hz
 STEP= 150000.000 HZ

รูปที่ 4.23 ตารางค่าอิมพีแดนซ์ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า WB 2010 – PCL ด้าน Neutral to Ground (N – G)

จากผลการทดสอบสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ ด้าน Neutral to Ground (N – G) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าอยู่ที่ 50 Ω ถึง 52 Ω ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

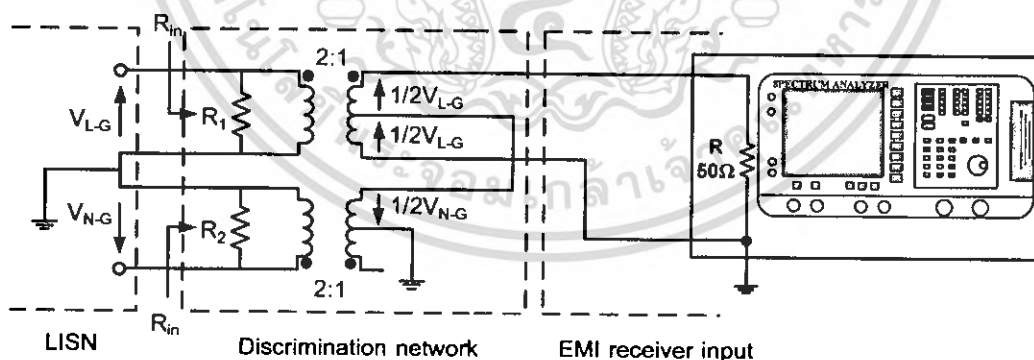
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

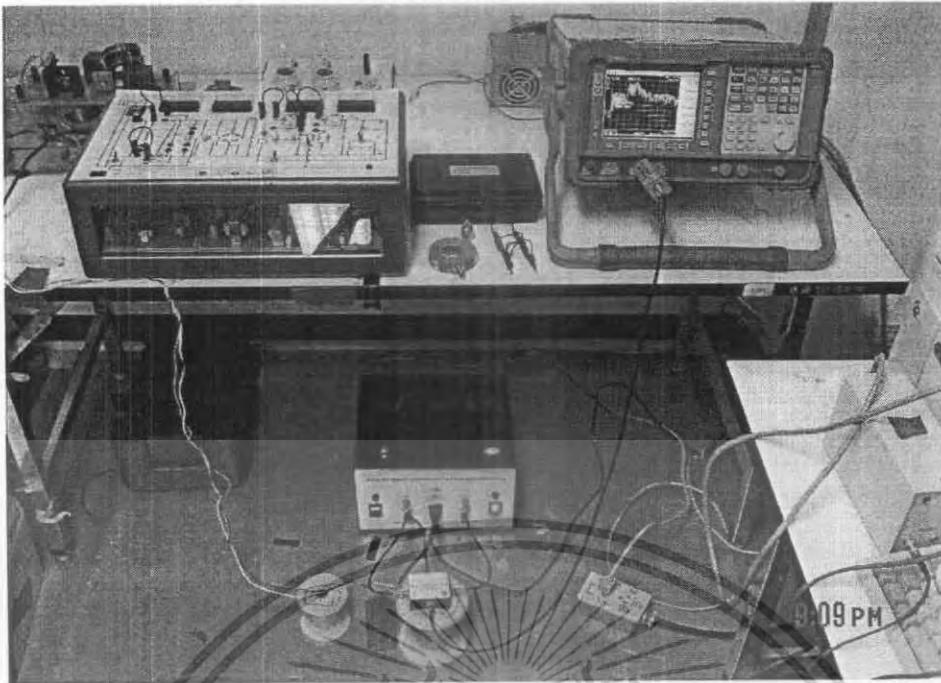
การทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทดลองจะทำการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ที่มาจากสายตัวนำจากชุดการทดลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Toolkit) โดยการทดลองจะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode: DM) และสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common mode: CM) โดยจะใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator)

ในการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากชุดฝึกการทดลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Toolkit) โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

1. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก EMI Toolkit
 - ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์ (With heat sink)
 - ความถี่การสวิตซ์ 150 kHz
 - ปรับ Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall time มีค่าน้อย
2. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์ (Without heat sink)
3. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz
4. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall time มีค่ามาก



รูปที่ 4.24 วงจรสมมูลการต่อชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

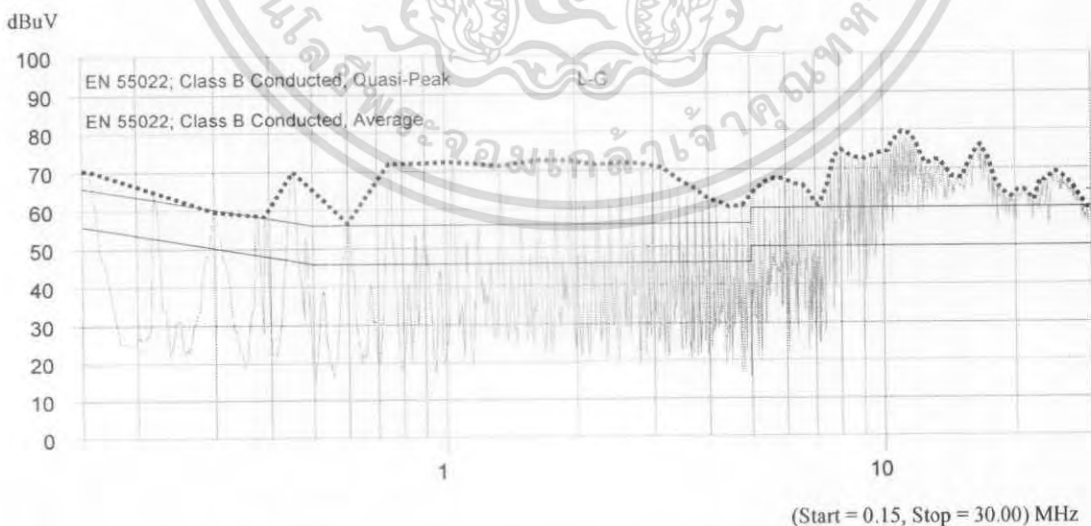


รูปที่ 4.25 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

4.5 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (ต่อแผนระบายความร้อนลงกราวด์) จาก EMI Toolkit

4.5.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

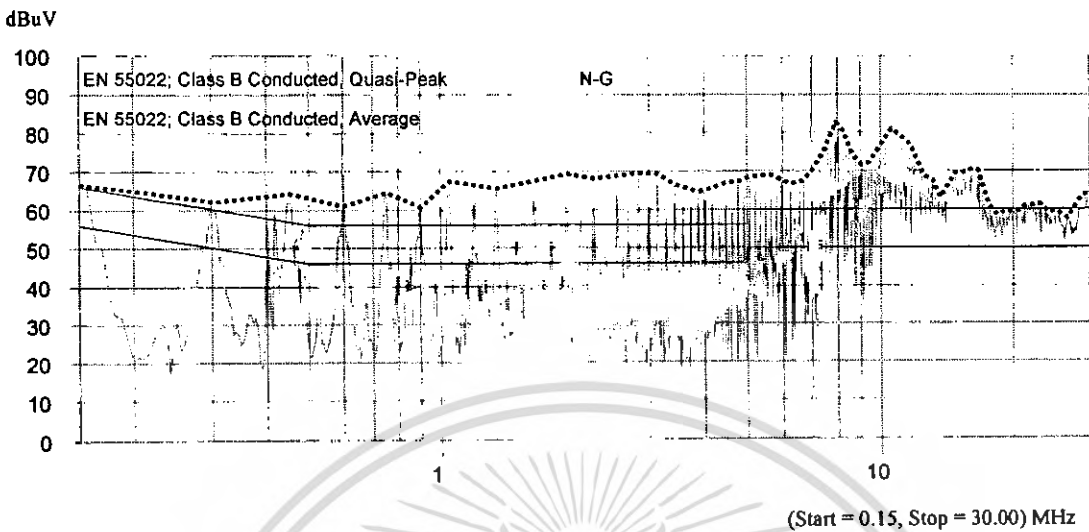
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L – G)



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L – G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

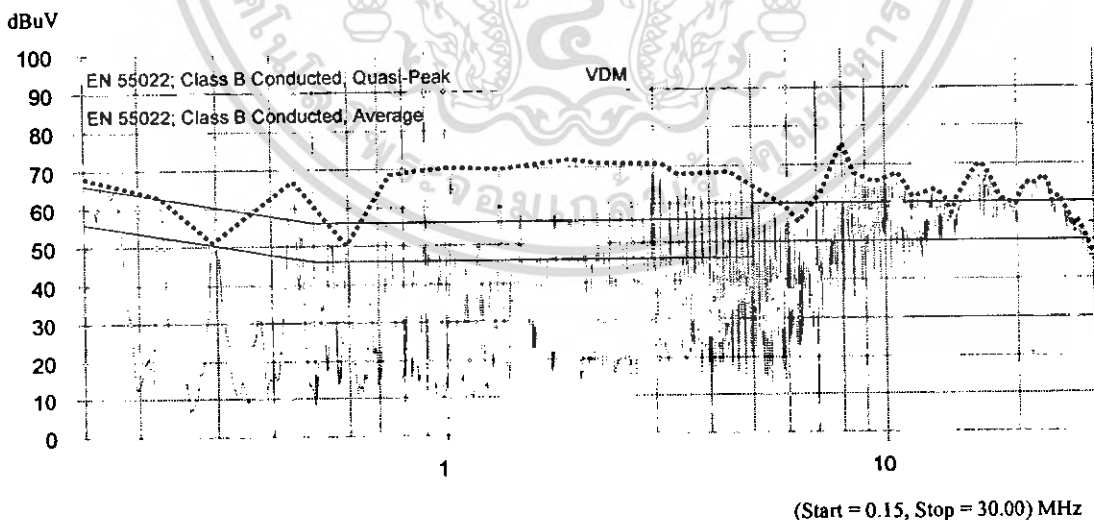
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

4.5.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

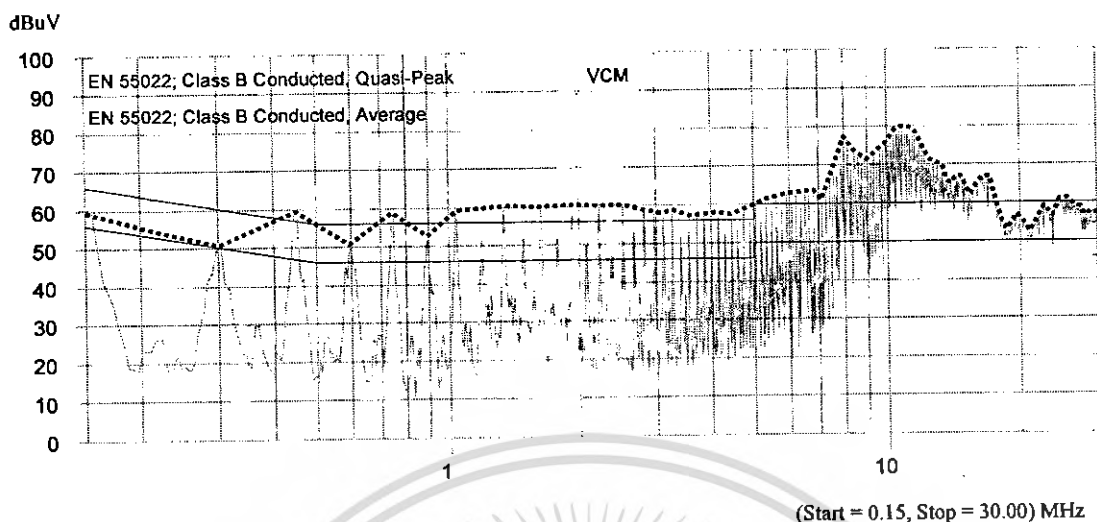
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

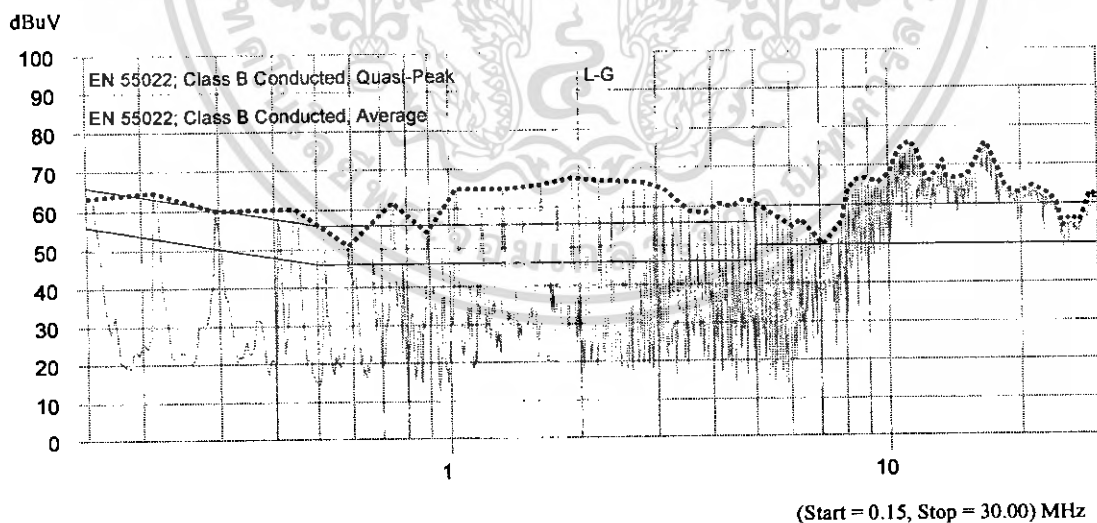


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

4.6 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์ (Without heat sink)

4.6.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

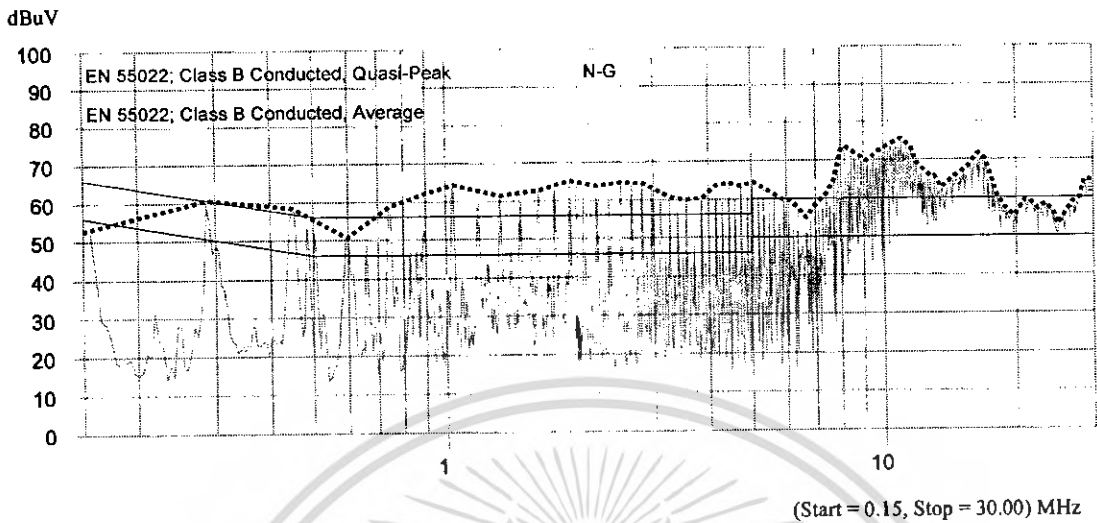
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L - G)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม

ด้าน Line to Ground (L - G)

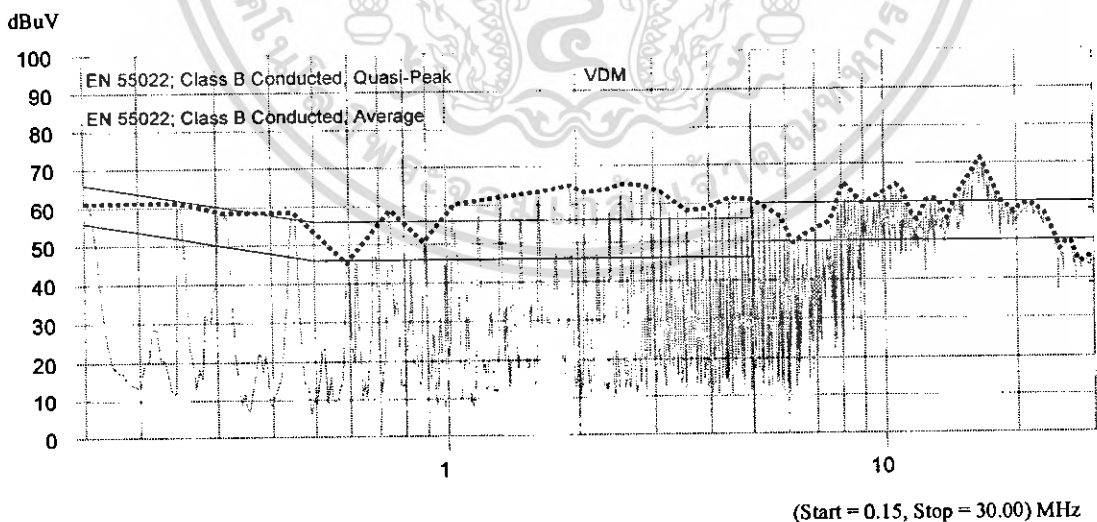
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

4.6.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

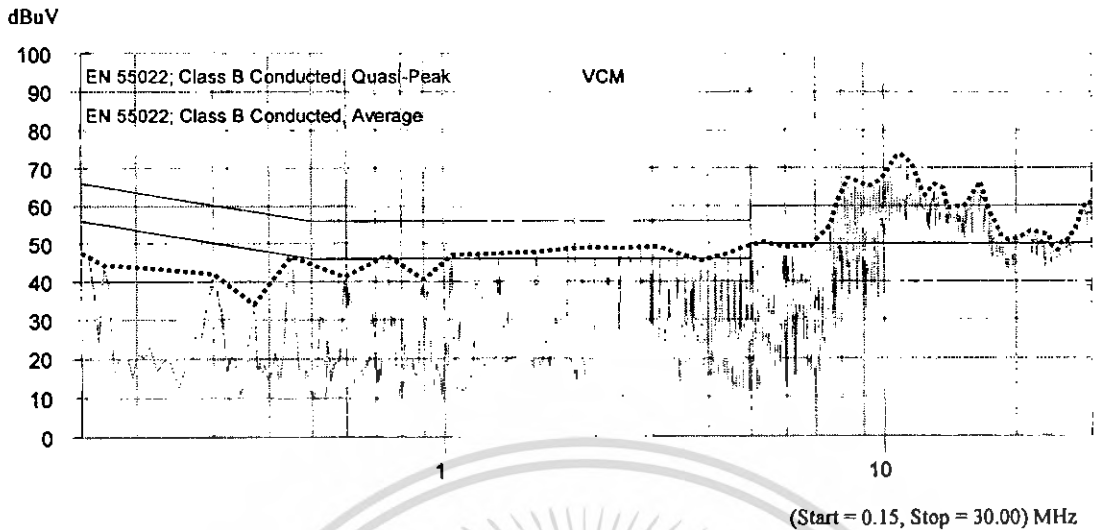
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

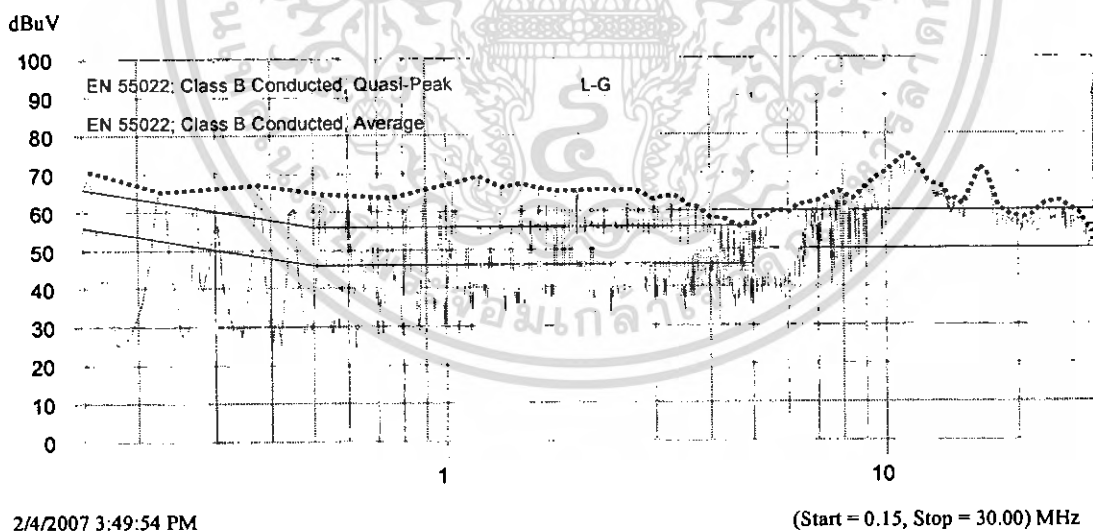


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

4.7 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz

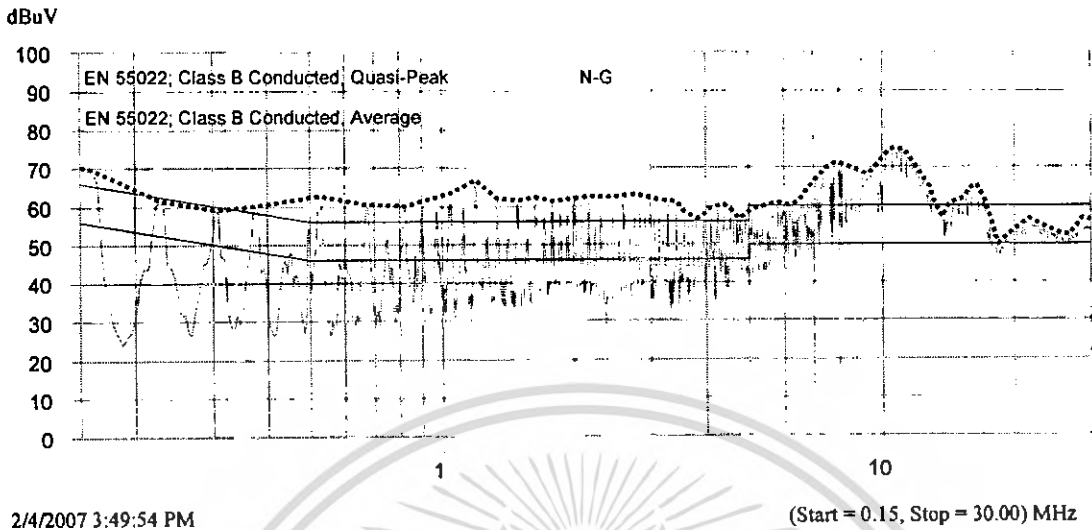
4.7.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L – G)



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L – G)

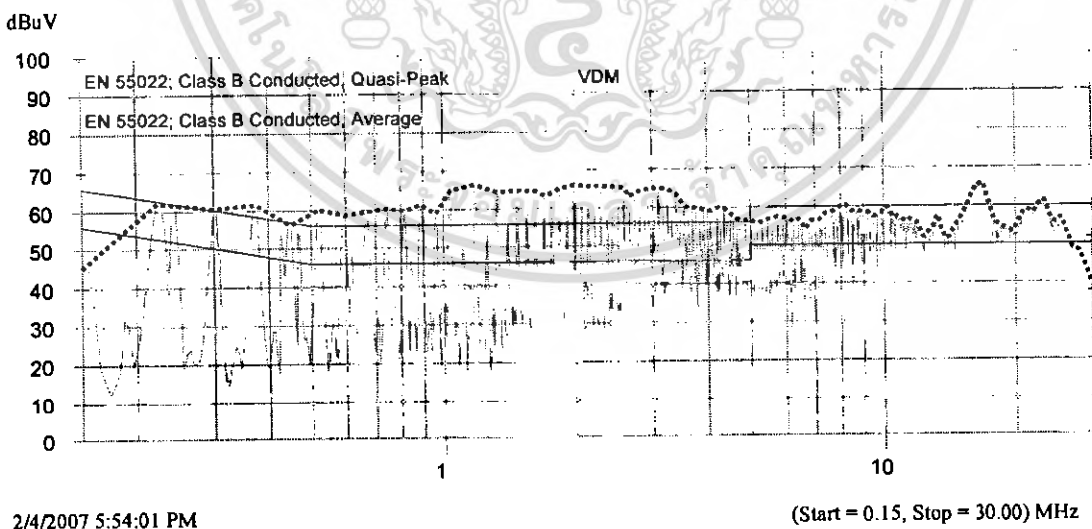
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ด้าน Neutral to Ground (N – G)

4.7.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

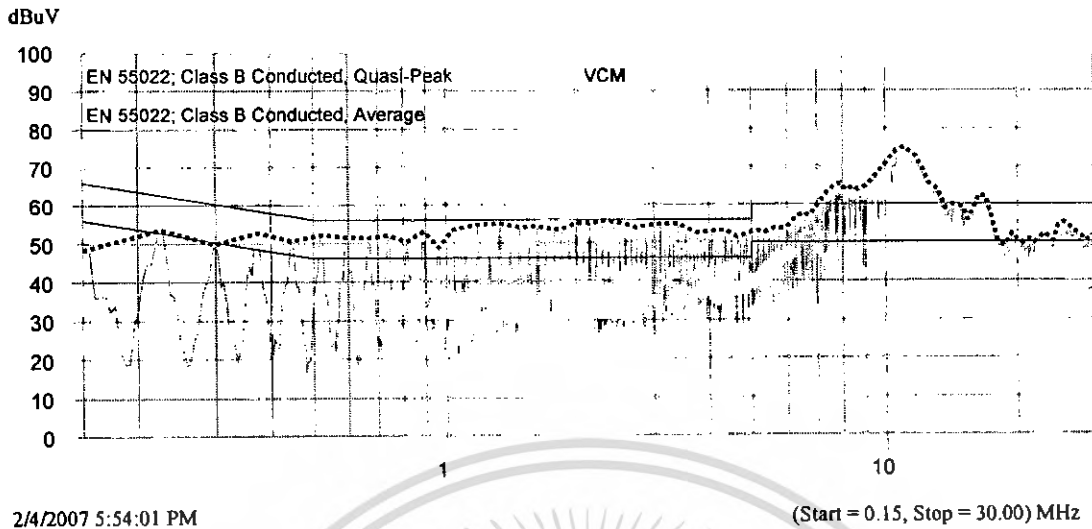
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

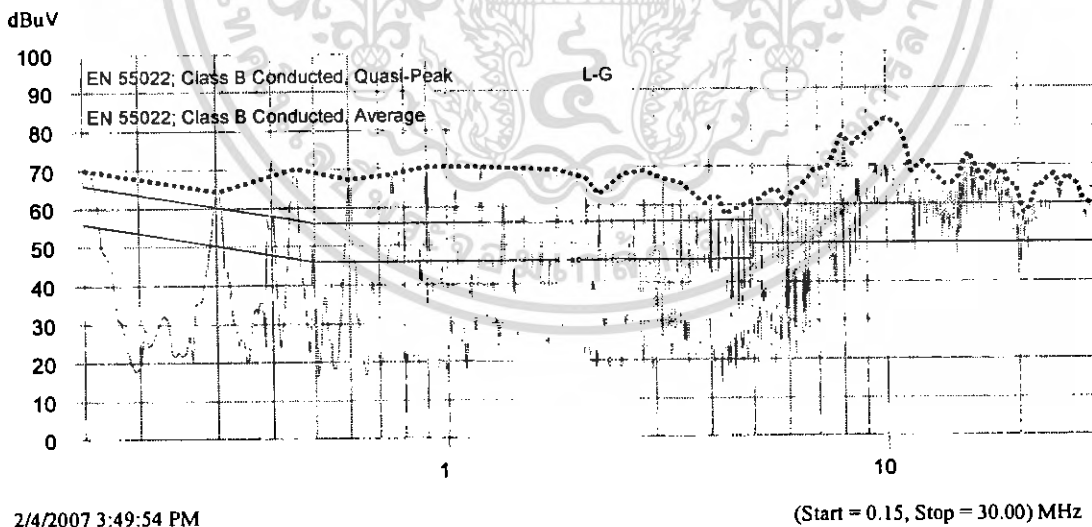


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

4.8 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall Time มีค่ามาก

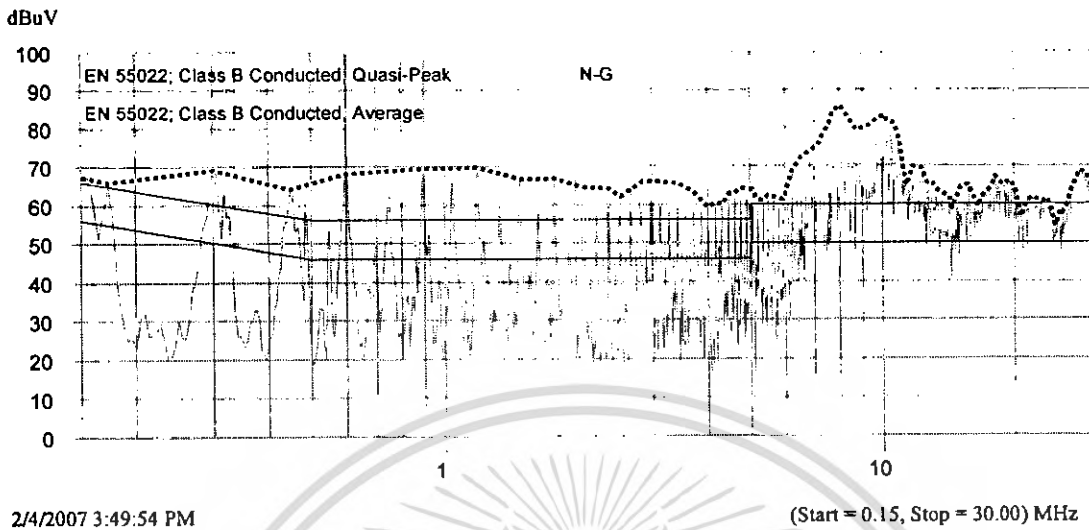
4.8.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L - G)



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ด้าน Line to Ground (L - G)

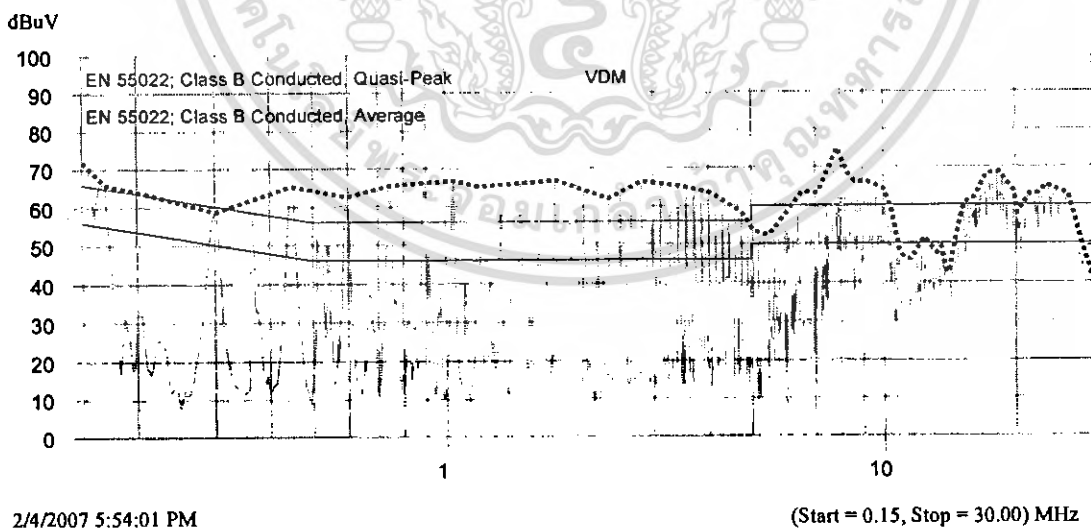
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

4.8.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

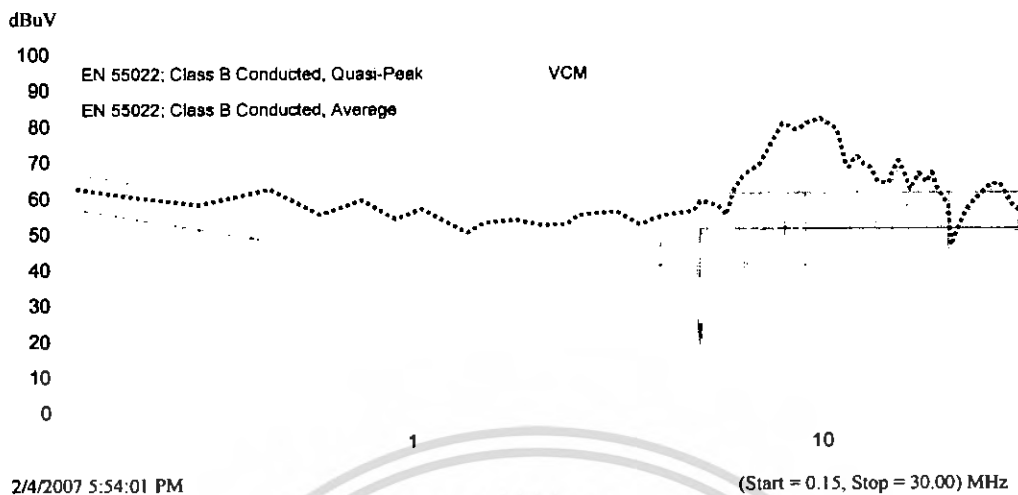
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

4.9 สรุป

จากการศึกษาและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งพอสรุปได้ คือชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะวิเคราะห์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างออกจากสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่นำมาพิจารณาได้ ในการออกแบบชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องคำนึงการรักษา Matching Impedance ที่ $50\ \Omega$ เพื่อให้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ โดยผลที่ได้จากชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องนำไปเปรียบเทียบกับ การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe เพื่อแสดงให้ว่าชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นสามารถแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้

บทที่ 5

RF Current probe

5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 จะเป็นการวิเคราะห์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator) ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นว่าชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถที่จะแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยในบทนี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนไฟฟ้า โดยใช้ RF current probe ซึ่งมีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมออกจากกันได้ เช่นเดียวกับชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการใช้ RF current probe นั้นจะเป็นตัวอ้างอิงกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทดสอบโดยใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจาก RF current probe จะมีมาตรฐานและวิธีการวัดที่ชัดเจน

5.2 หลักการทำงาน RF Current Probe [5]

หลักการทำงานของ RF current probe นั้นจะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่นำมาทดสอบ โดยจะอาศัยหลักการการนำสายตัวนำคล้องผ่านอุปกรณ์เครื่องมือวัด เมื่อทำการป้อนกระแสเข้าไปยังสายตัวนำ ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ ตัวนำ โดยจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กแผ่กระจายรอบๆ ตัวนำ ประมาณ 5 – 10 cm. ซึ่งการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในสายตัวนำในลักษณะการพันรอบหรือแบบการคล้องโดยตรงก็ได้ ซึ่ง RF current probe จะอาศัยหลักการของ Hall effect ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ล้อมรอบสายตัวนำ โดยที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจาก RF current probe จะออกมาในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณที่ได้นั้นสามารถที่จะเชื่อมต่อกับเครื่องวัดสัญญาณตามสายตัวนำ (Spectrum analyzer) ได้โดยตรง

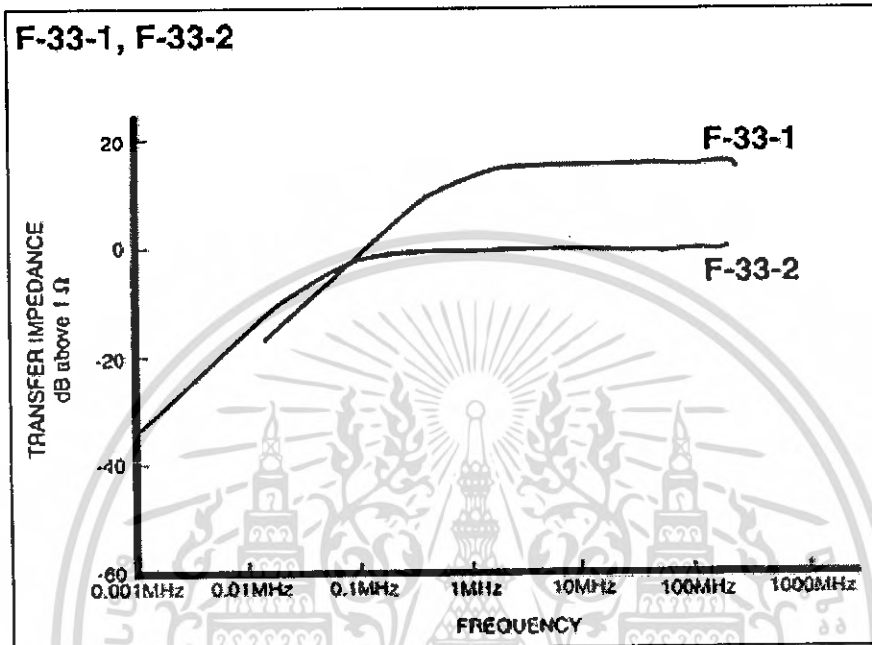


รูปที่ 5.1 RF current probe Model F33-1

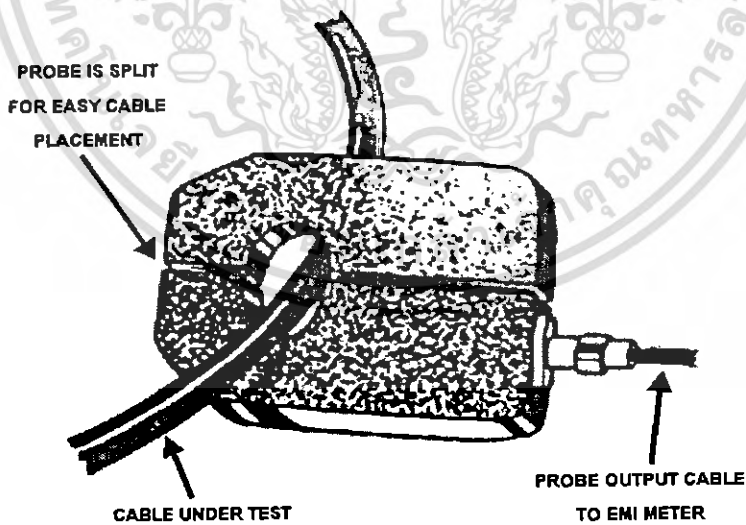
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของ RF current probe

Model	Drawing No.	A I.D.	B O.D.	C H _t	Z _t Ω	dB Ω	Connector	DC-60Hz	400Hz z	RF (CW)	Pulse	Freq.
33-1	1	32	71	19	5	14	BNC	100	100	10	50	10kHz - 250MHz

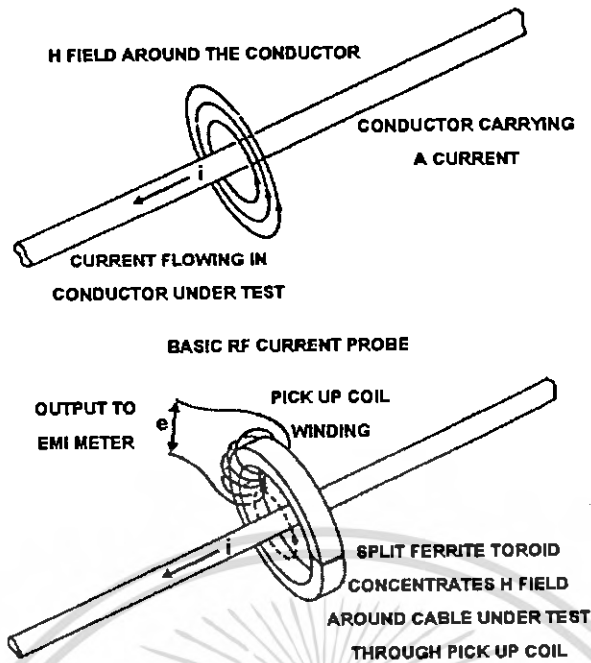


รูปที่ 5.2 กราฟคุณสมบัติของ RF current probe Model F33-1



รูปที่ 5.3 ลักษณะการวัดสายตัวของ RF current probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 หลักการพื้นฐานของ RF current probe

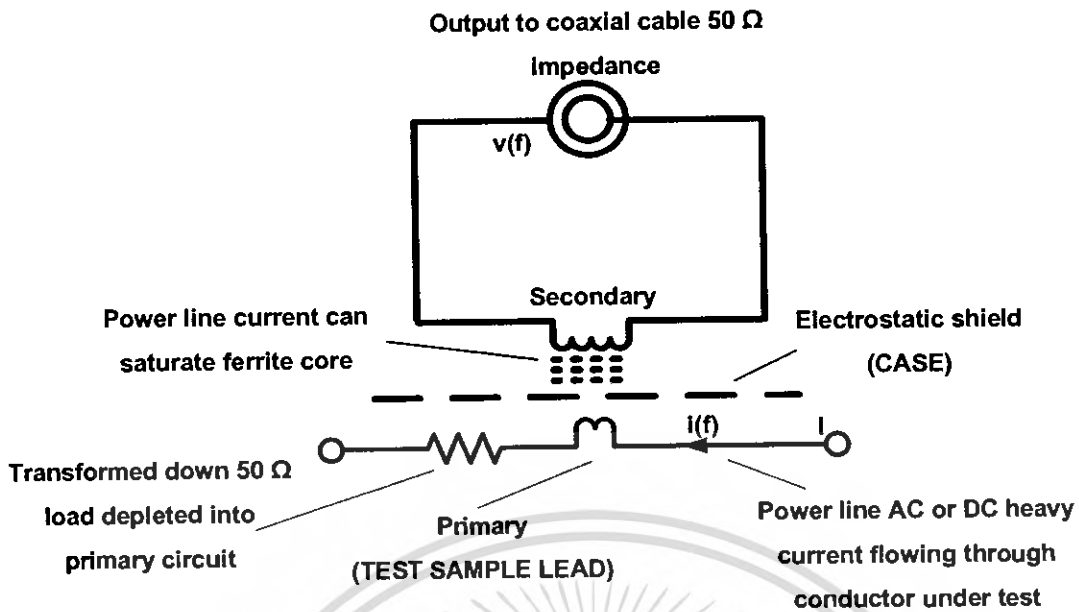
จากรูปที่ 5.4 แกนเหล็กทอรอยด์ (Toroidal ferrite core) จะมีขดลวดพันรอบแกนเหล็กทอรอยด์อยู่ ซึ่งจะเป็นตัวรับการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่นำมาทดสอบ การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะส่งผ่านไปยังเครื่องวัดสัญญาณตามสายตัวนำ (Spectrum analyzer) ซึ่งขดลวดที่พันรอบแกนจะไม่มีผลกระทบที่เกิดจากกระแสที่ไหลในสายตัวนำ เนื่องจากแกนเหล็กที่สร้างนั้นจะมีคุณสมบัติของการอิมิตัวในแกนเหล็ก เพราะว่าโครงสร้างแกนเหล็กที่ใช้ทำมาจากสารแม่เหล็ก (ferromagnetic) และ RF current probe ยังสามารถใช้งานที่ความถี่สูงและพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงได้

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแกนเหล็กทอรอยด์จะเกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจาก RF current probe ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงสมการได้คือ

$$V_{out} = k\mu ANfI_{cond.} \quad (5.1)$$

เมื่อ	V_{out}	=	แรงดันด้านออก
	k	=	ค่าคงที่
	μ	=	ค่าความซึมซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวด
	A	=	CSA of Core
	N	=	จำนวนรอบ
	f	=	ความถี่
	I_{cond}	=	กระแสไฟฟ้าในสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



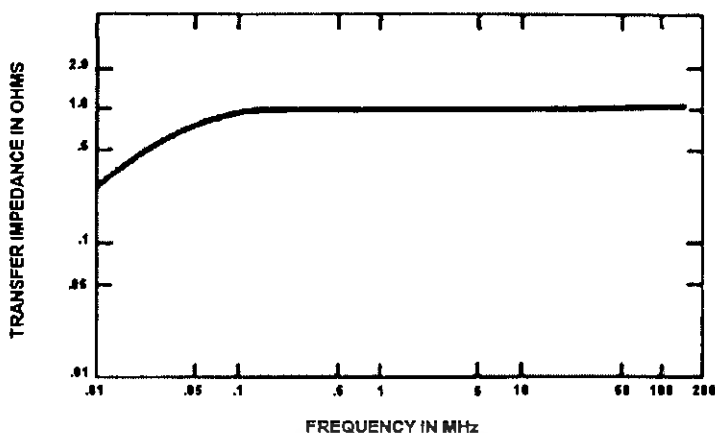
รูปที่ 5.5 RF current probe is transformer

RF current probe จะใช้หลักการของการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดออกมาจะอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า จากรูปที่ 5.5 นั้นจะเป็นส่วนของโครงสร้างหลักที่มีอยู่ใน RF current probe ซึ่งโครงสร้างที่สำคัญส่วนหนึ่งก็คือ Electrostatic shield จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดการสะสมพลังงานระหว่างขดลวดภายในกับสายตัวนำที่นำมาทดสอบ รูปแบบของสมการในรูปของการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ (Transfer impedance) สามารถแสดงได้ดังนี้

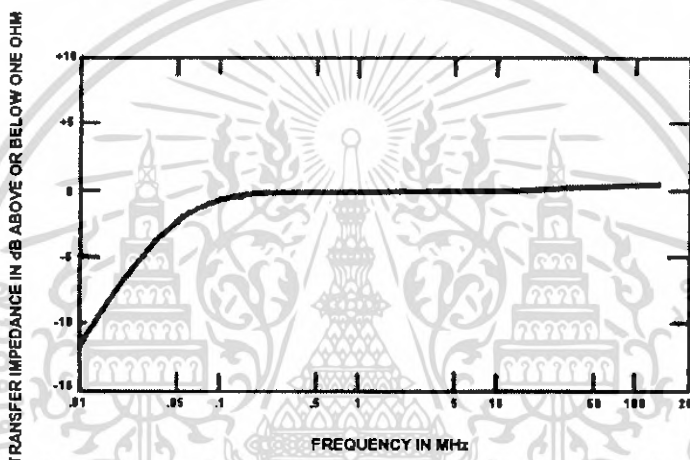
$$Z_t = \frac{V_{out}}{I_{cond}} \quad (5.2)$$

เมื่อ V_{out} = แรงดันขาออกภายใต้อิมพีแดนซ์ 50 Ω
 I_{cond} = กระแสไฟฟ้าในสายตัวนำ

จากสมการที่ 5.2 สามารถอธิบายได้คืออิมพีแดนซ์ 1 Ω จะให้ค่าแรงดันออกมา 1 Volt ต่อค่ากระแส 1 Ampere ค่าของการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์สามารถแสดงในแต่ละย่านความถี่ทั่วไปได้ในรูปที่ 5.6 (a) ซึ่งความถี่ที่ใช้ในสมการที่ 5.1 สามารถใช้ได้ในความถี่ที่น้อยกว่า 100 kHz ถ้าความถี่สูงการออกแบบ RF current probe จะต้องคำนึงถึงค่าองค์ประกอบแฝงภายในอุปกรณ์ (Self – resonance) และค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Ferrite loss) ด้วย



(a) Transfer function in ohms



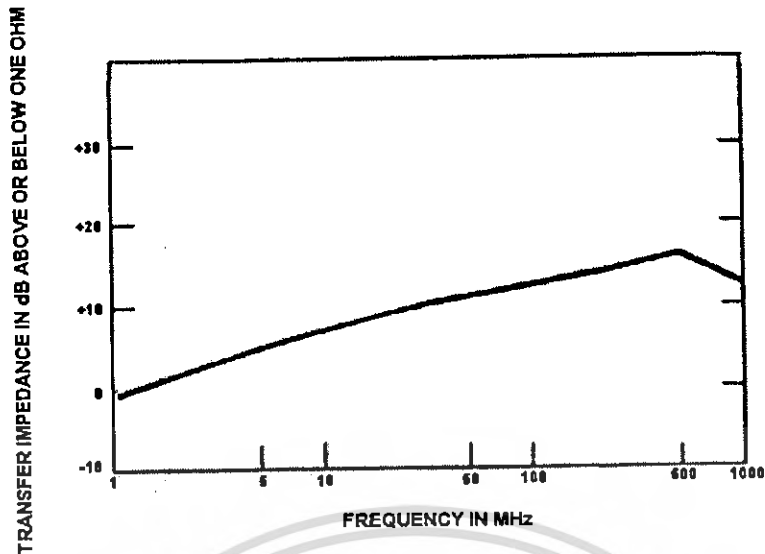
(b) Transfer function in dB ohms

รูปที่ 5.6 การ Transfer function ของ RF current probe

ในสมการที่ 5.2 สามารถที่จะแสดงในรูปแบบของเดซิเบล (decibel: dB) ได้ในรูปที่ 5.6 (b) และสามารถแสดงเป็นสมการได้คือ

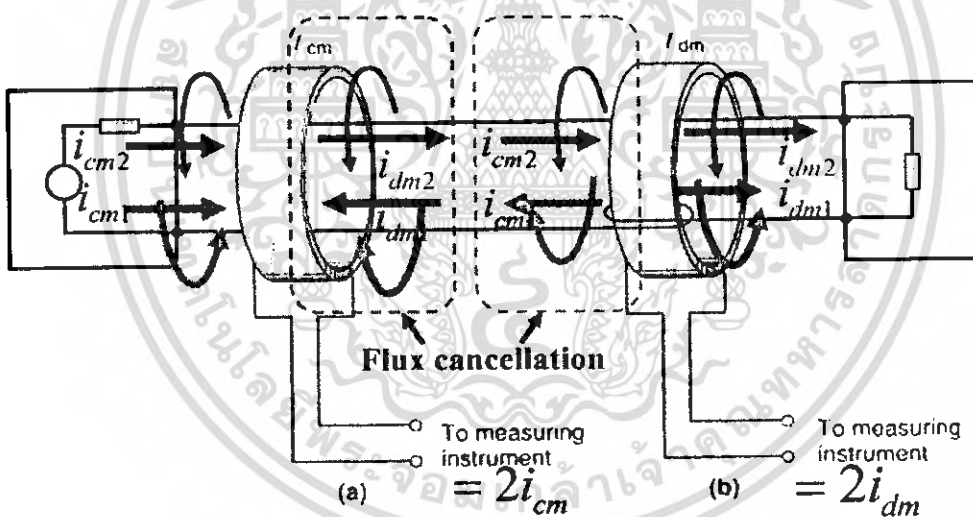
$$I_{cond} (dB\mu A) = V_{OUT} (dBV) - Z (dB\Omega) \tag{5.3}$$

ในรูปแบบสมการที่ 5.3 ค่าอิมพีแดนซ์จะตอบสนองที่ $Z = 0 - 15 \text{ dB}\Omega$ และที่ความถี่สูง (1 MHz – 1 GHz) โดยการ Transfer function ของ RF current probe ในย่านความถี่สูงนั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การ Transfer function ของ RF current probe ในย่านความถี่สูง

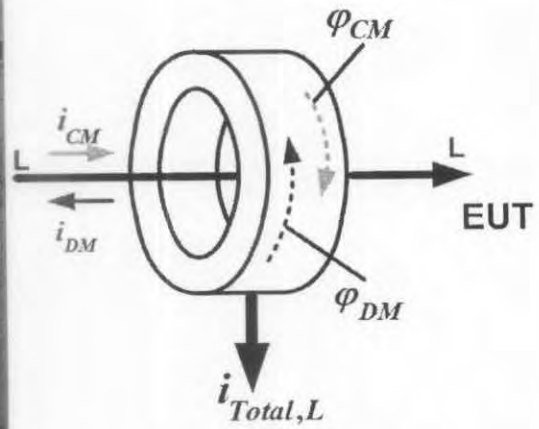
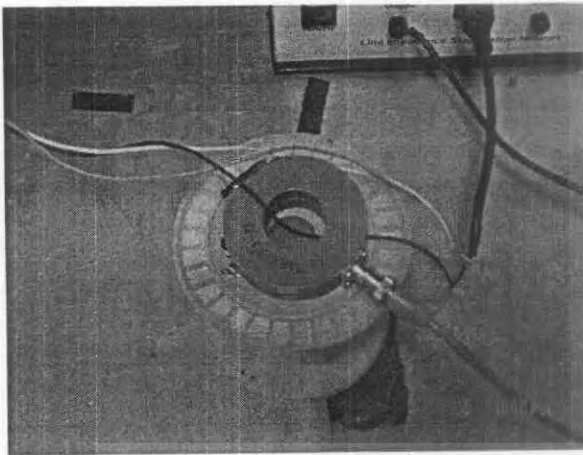
5.3 หลักการวัดการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ RF current probe



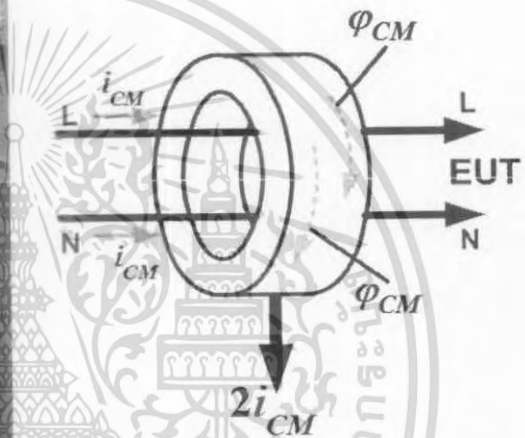
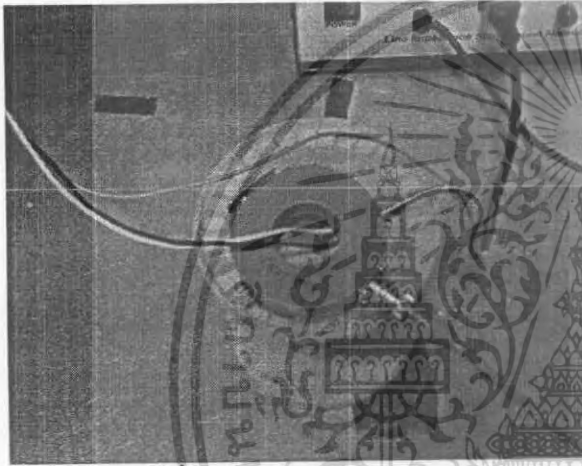
รูปที่ 5.8 หลักการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe

การใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำการคล้องสายตัวนำในสาย Line หรือ Neutral ถ้าคล้องสาย Line ใน RF current probe จะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ารวม (Total noise) ตามรูปที่ 5.9 ถ้าคล้องสาย Line และ Neutral ทั้งสองใน RF current probe จะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (CM noise) ตามรูปที่ 5.10 และถ้าต้องการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (DM noise) จะต้องทำการพันสาย Neutral รอบ RF current probe 1 รอบก่อนดังที่แสดงในรูปที่ 5.11

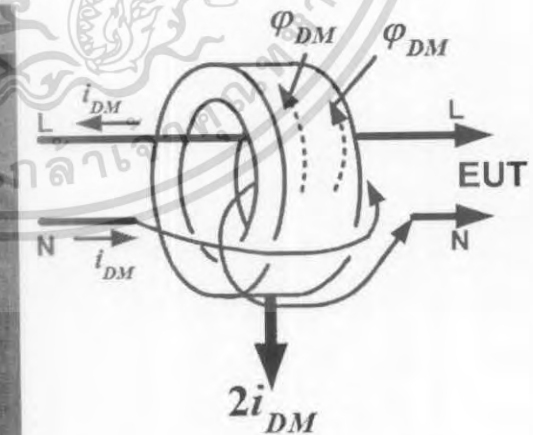
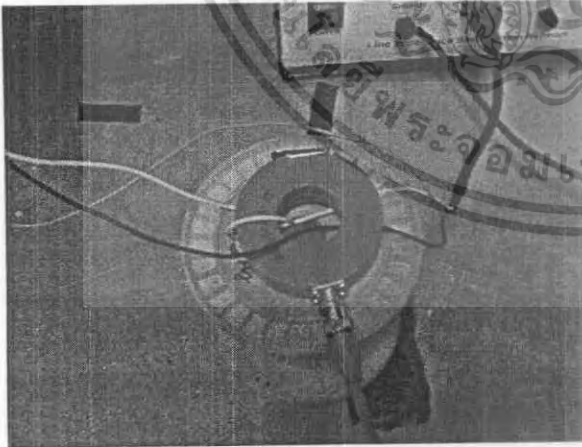
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม



รูปที่ 5.10 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม



รูปที่ 5.11 วิธีการใช้ RF current probe วัดสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง

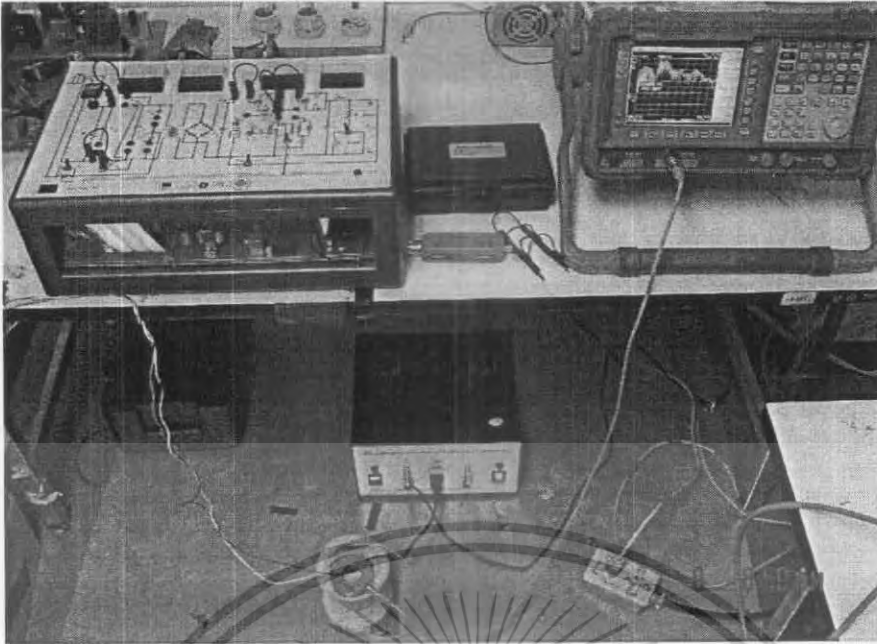
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ RF current probe

การทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีหลักการทดสอบเหมือนกับการใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงแต่จะเปลี่ยนมาใช้ RF current probe ในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งการทดลองจะทำการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ที่มาจากสายตัวนำจากชุดการทดลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Toolkit) โดยการทดลองจะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM) โดยจะใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator)

ในการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากชุดฝึกการทดลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Toolkit) โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

1. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก EMI Toolkit
 - ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ (With heat sink)
 - ความถี่การสวิตซ์ 150 kHz
 - ปรับ Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall time มีค่าน้อย
2. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ (Without heat sink)
3. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz
4. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall time มีค่ามาก

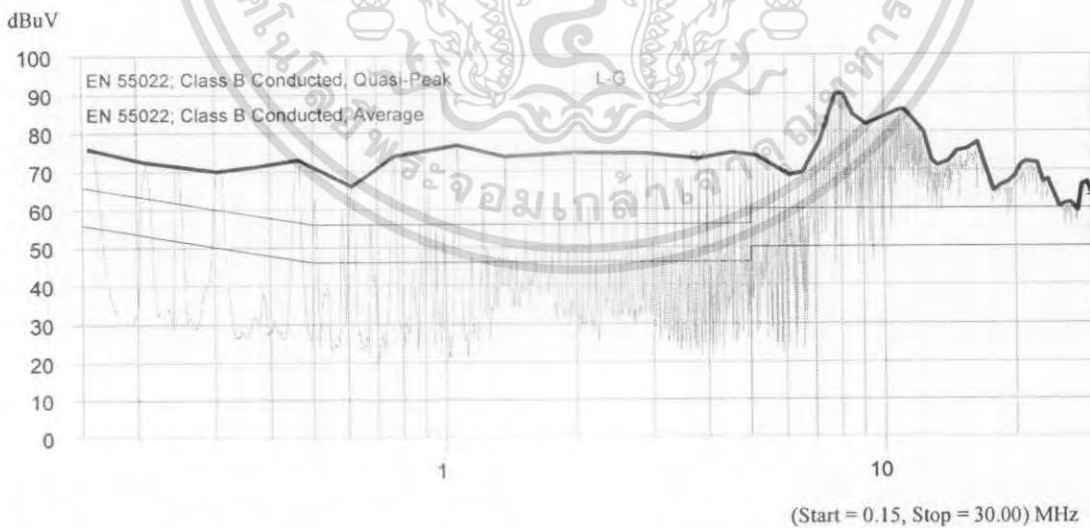


รูปที่ 5.12 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

5.5 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจาก (ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์) EMI Toolkit

5.5.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

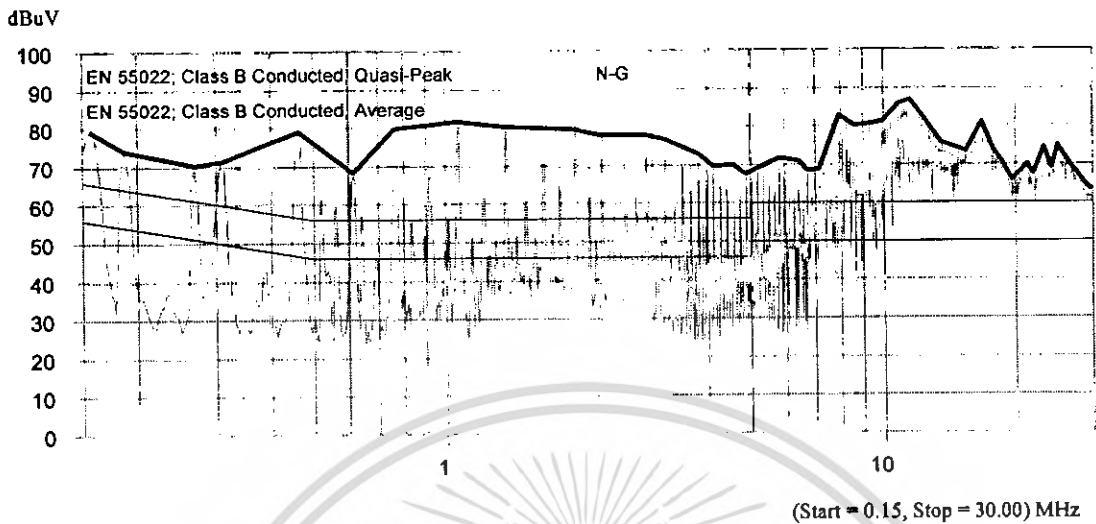
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L – G)



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L – G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

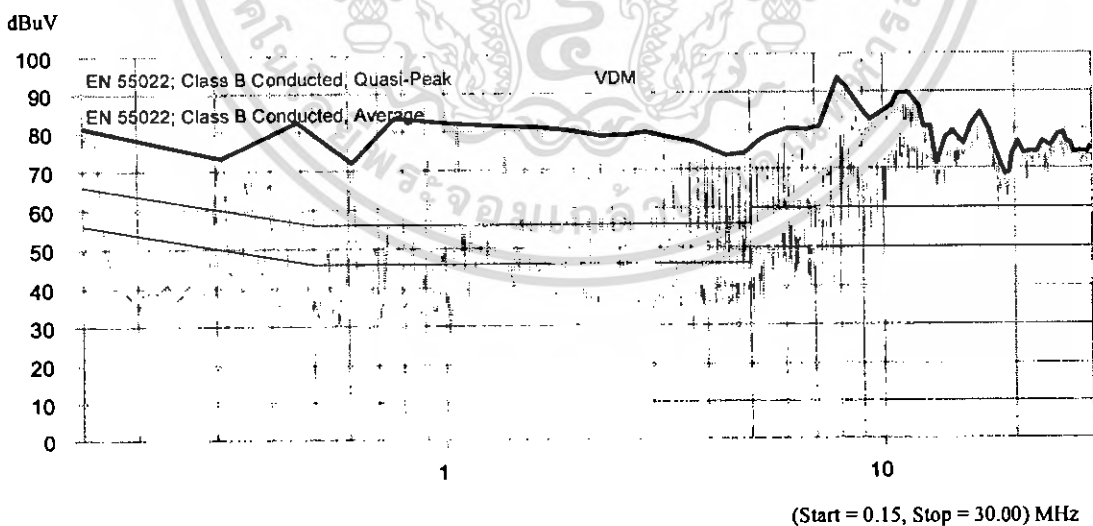
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

5.5.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

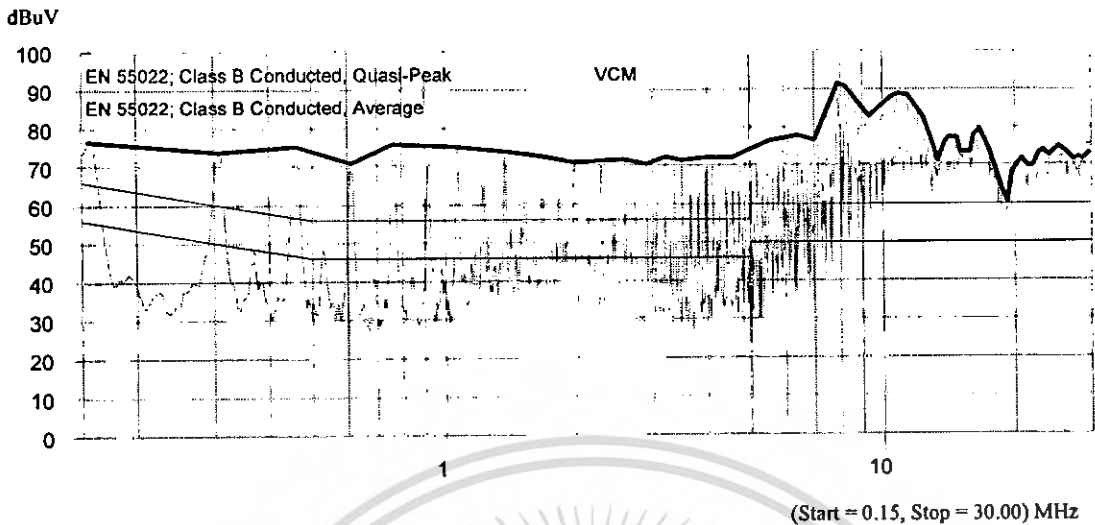
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

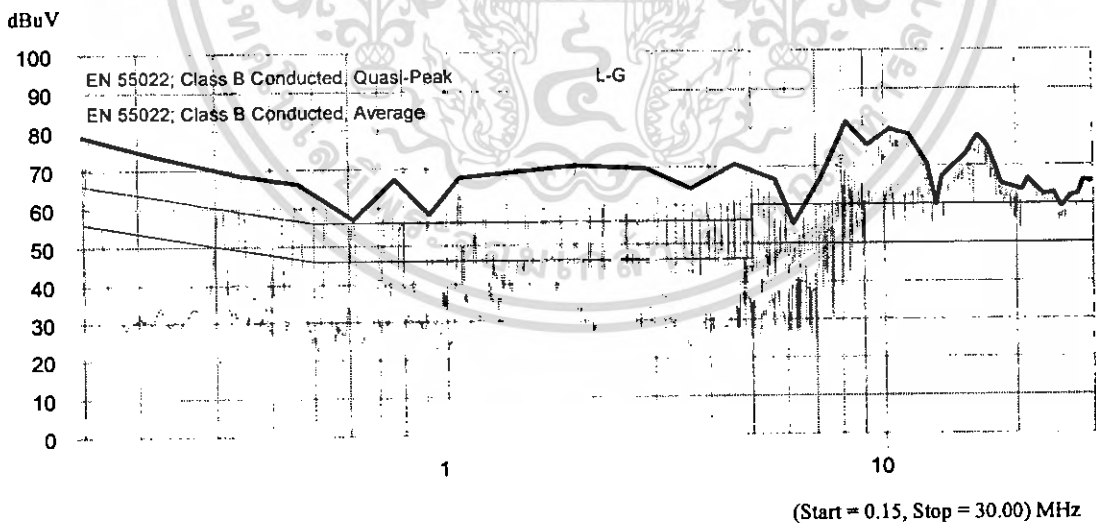


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

5.6 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ (Without heat sink)

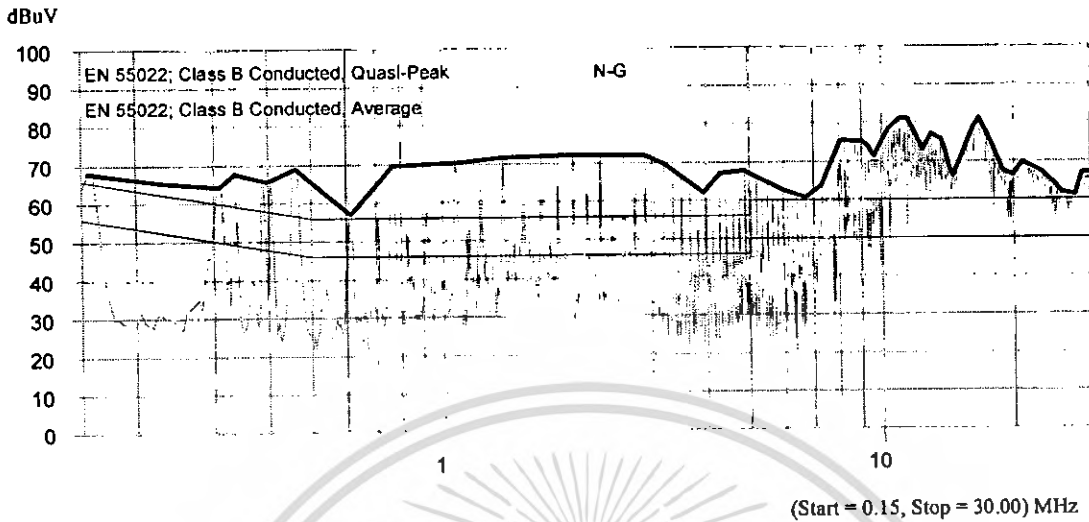
5.6.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L – G)



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L – G)

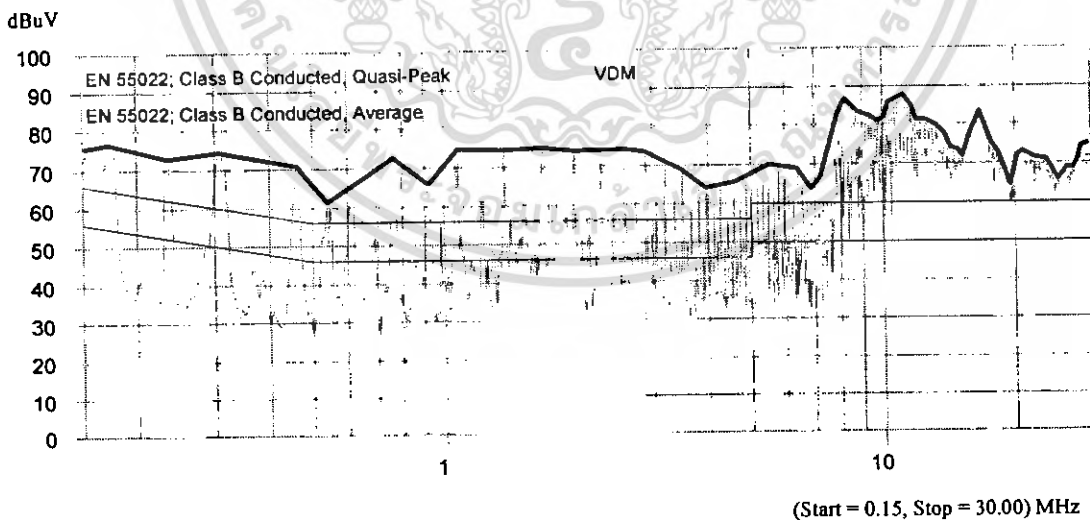
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

5.6.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

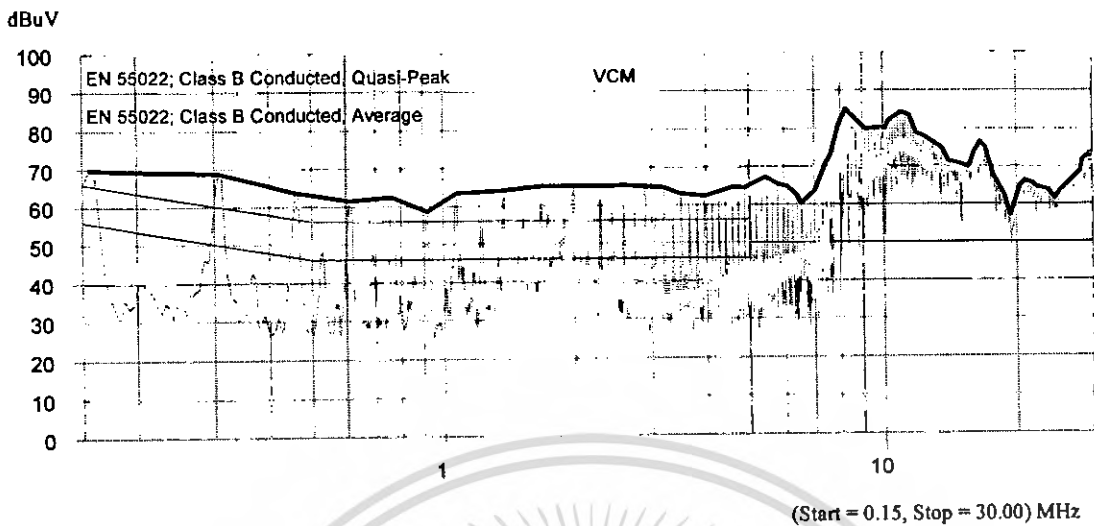
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

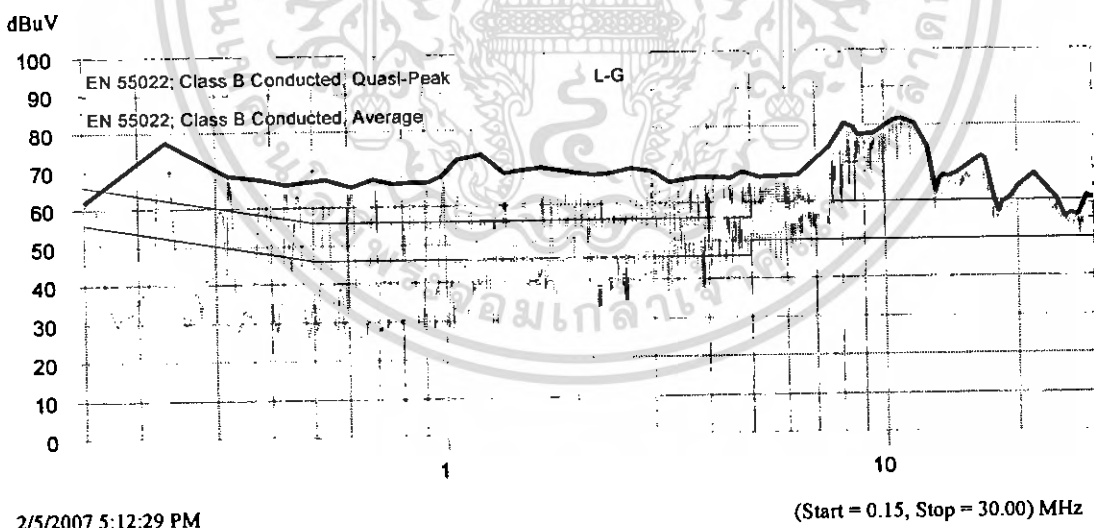


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

5.7 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่การสวิตซ์ 75 kHz

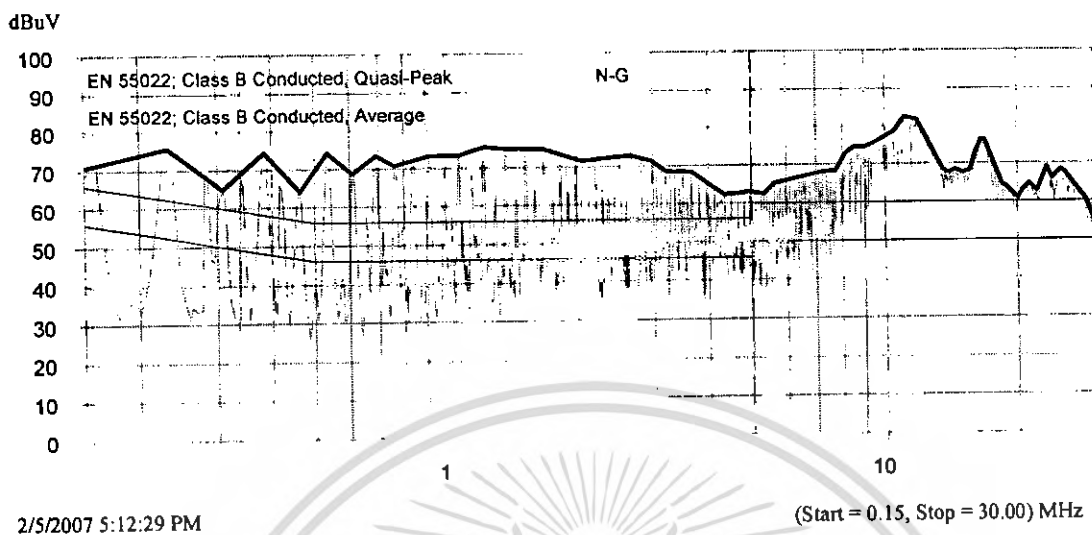
5.7.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L – G)



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L – G)

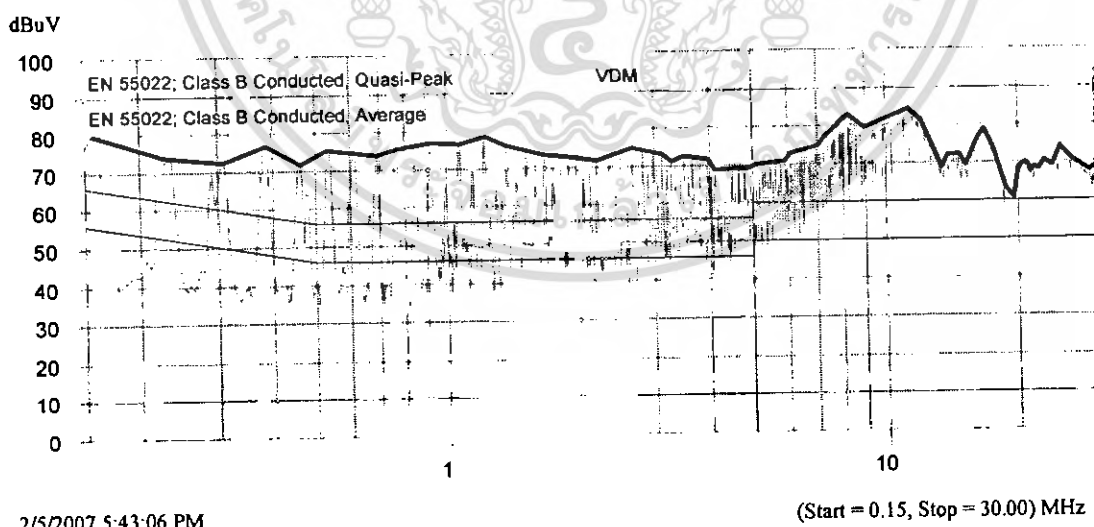
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ด้าน Neutral to Ground (N – G)

5.7.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

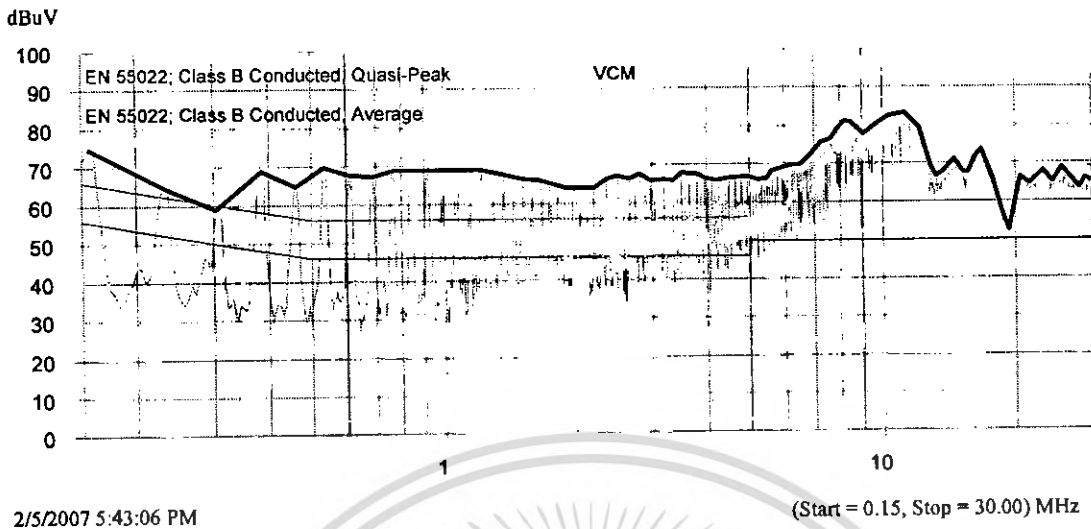
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

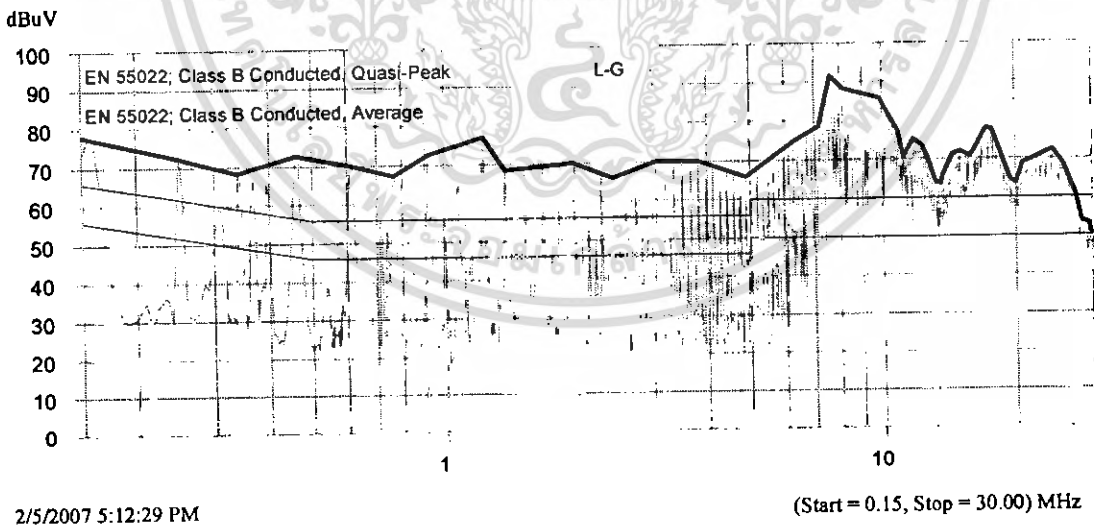


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

5.8 การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปลี่ยน Selector switch โดยกำหนดสัญญาณ Gate drive เป็นแบบ Rise/Fall Time มีค่ามาก

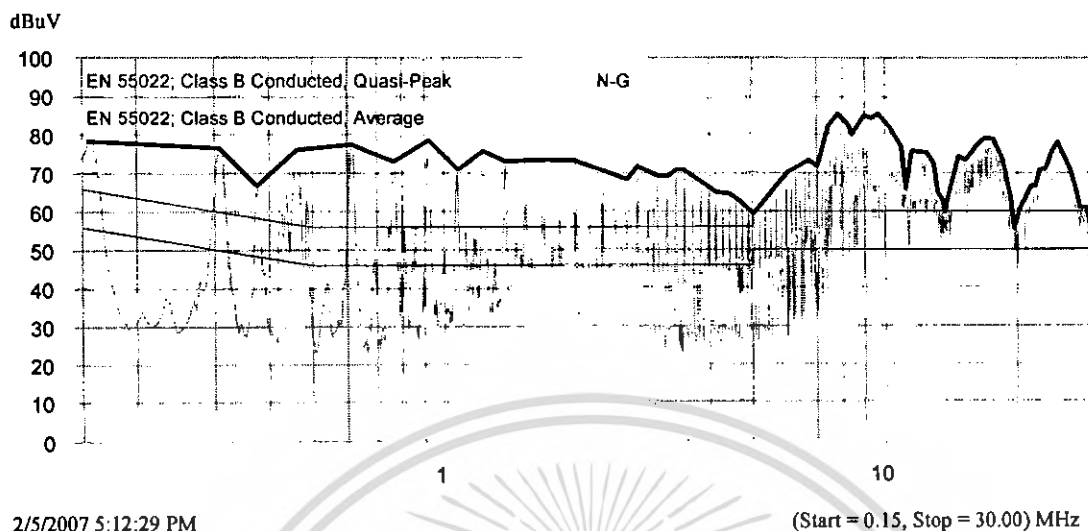
5.8.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise)

1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Line to Ground (L - G)



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Line to Ground (L - G)

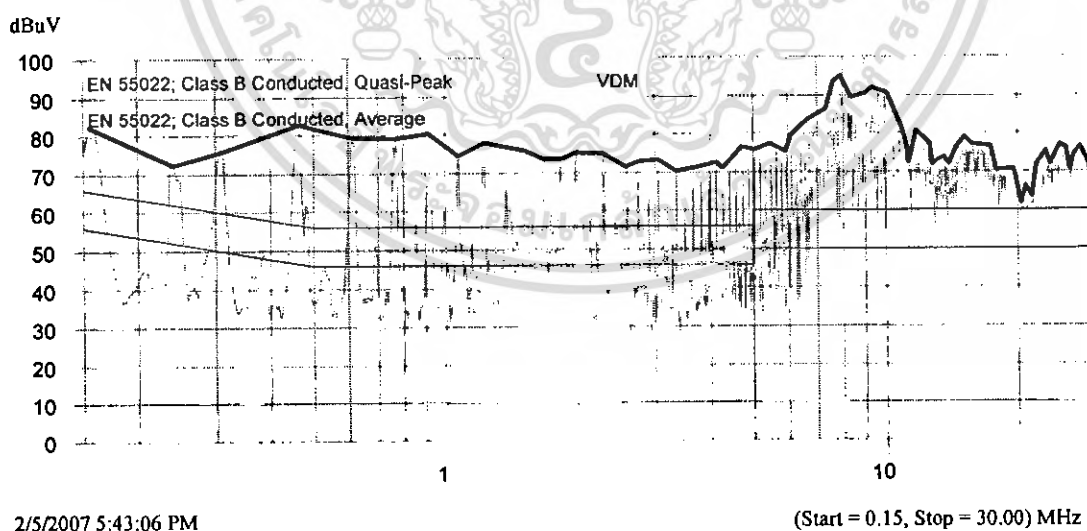
2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Total noise) ด้าน Neutral to Ground (N – G)



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ด้าน Neutral to Ground (N – G)

5.8.2 การวัดประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode Interference: DM) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (Common mode Interference: CM)

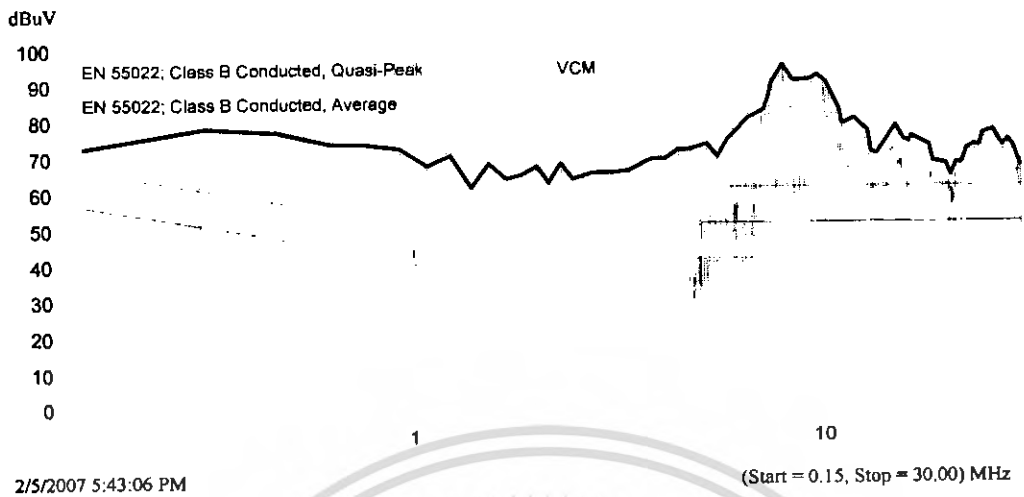
1. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

5.9 สรุป

จากการศึกษาการแยกสัญญาณรบกวนไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของ RF current probe ซึ่งพอสรุปได้ คือสามารถวิเคราะห์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ออกจากสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่นำมาพิจารณาได้ เพียงแค่นำสายตัวนำมากล่องผ่าน RF current probe ตามวิธีการวัดในแต่ละโหมดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น

จากการทดลองการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ RF current probe สามารถแยกสัญญาณรบกวนทั้งในโหมดผลรวมและโหมดผลต่างได้ และจะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบเช่นเดียวกับการใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่ง RF current probe จะมีประสิทธิภาพในการทดสอบที่ดี เนื่องจากมีมาตรฐานทางด้านการทดสอบ และมีวิธีการทดสอบที่แน่นอน ดังนั้นจึงนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก RF current probe เป็นสัญญาณอ้างอิง

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะยกตัวอย่างผลการทดลอง มา 2 กรณีคือ ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าค่าสูงสุดของ EMI Toolkit และผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากการไม่ต่อแผ่นระบายความร้อน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator) และ RF current probe มีค่าความแตกต่างกันอย่างไร และมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อผลการทดลอง โดยจะให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก RF current probe เป็นตัวอ้างอิงเพราะมีมาตรฐานทางด้านการทดสอบที่แน่นอน ส่วนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก อุปกรณ์แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จะเป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์หาความแตกต่างของอุปกรณ์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบ

6.2 การพิสูจน์ความถูกต้องของประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมออกจากกันนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกแยกออกมานั้นถูกต้องหรือไม่ จึงต้องมีการรวมสัญญาณที่ถูกแยกออกมาแล้วนั้น นำมาตรวจสอบว่าเมื่อรวมกลับไปแล้วจะได้เท่ากับสัญญาณก่อนถูกทำการแยกหรือไม่ แต่เนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดออกมาได้นั้นเป็นค่า Logarithm scale จึงต้องแปลงเป็นค่าเชิงเส้นก่อนถึงจะรวมกันทางคณิตศาสตร์ได้ จากสมการที่ 6.2 เป็นสมการที่ใช้สำหรับการแปลงค่า Logarithm scale เป็นค่า Linear scale

$$dB\mu V = 20 \log\left(\frac{X}{\mu V}\right) \quad (6.1)$$

$$\frac{dB\mu V}{20} = \log\left(\frac{X}{\mu V}\right)$$

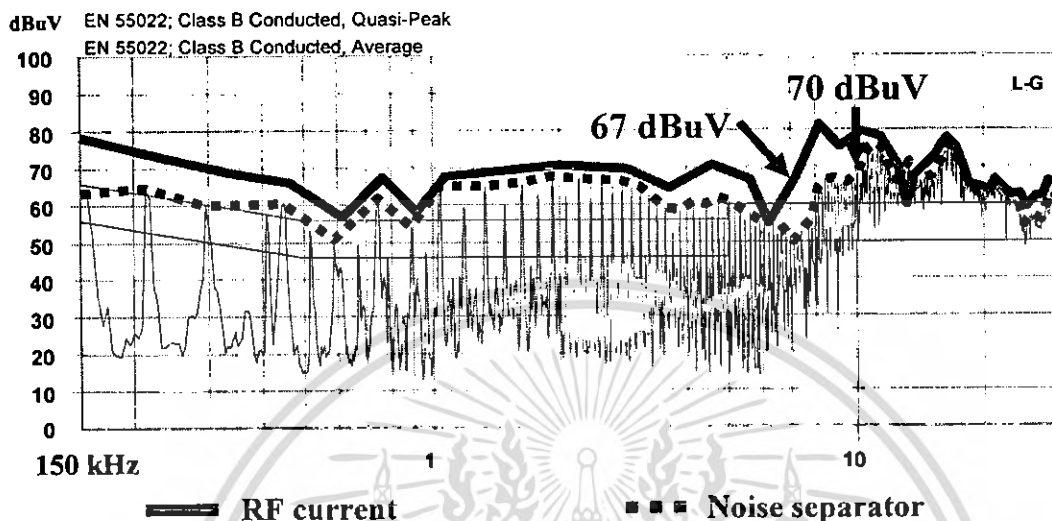
$$10^{\frac{dB\mu V}{20}} = \frac{X}{\mu V}$$

$$X = \mu V \times 10^{\frac{dB\mu V}{20}} \quad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวนด์ (Without heat sink)

1. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line – Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

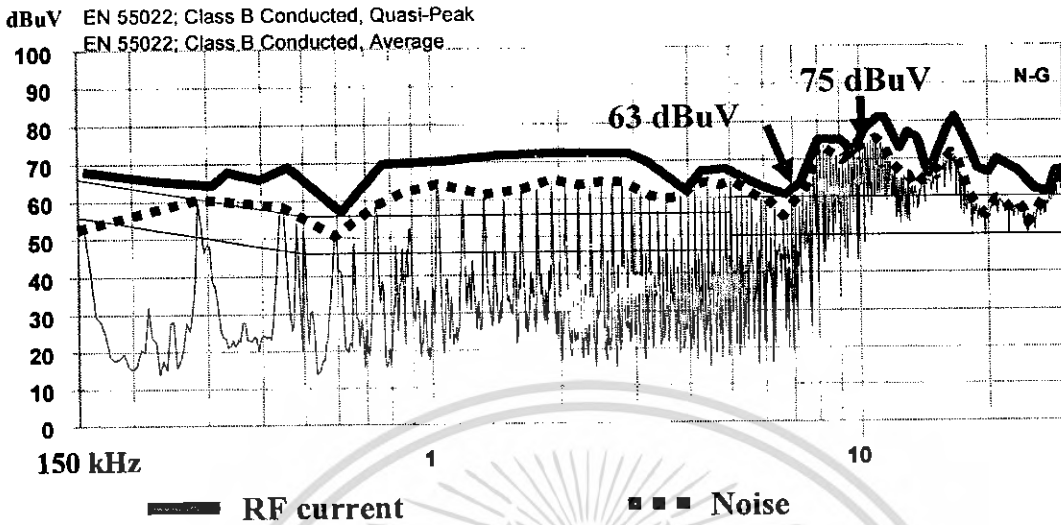


รูปที่ 6.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

ผลการวิเคราะห์

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน L – G เมื่อวัดจาก Simplified LISN จะมีค่าที่ต่ำกว่าการวัดจาก RF current probe ในช่วงความถี่ 150 kHz – 13 MHz โดยจะมีค่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วง 3 dBuV – 12 dBuV และในช่วงความถี่ 13 MHz – 30 MHz จะมีค่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่น้อยมากจนเกือบจะเท่ากัน และจะสังเกตเห็นว่าค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก RF current probe ในด้าน L – G นี้จะมีค่าที่ต่ำกว่าทางด้านของ N – G หรือค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากขั้วของ Simplified LISN มีค่าที่สูงขึ้น นั่นอาจเป็นผลมาจากช่วงเวลาที่ทำกราวด์ เนื่องจากในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เวลาต่างกัน ค่าที่ได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นการวัดจากขั้วของ Simplified LISN และจาก RF current probe

2. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral – Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

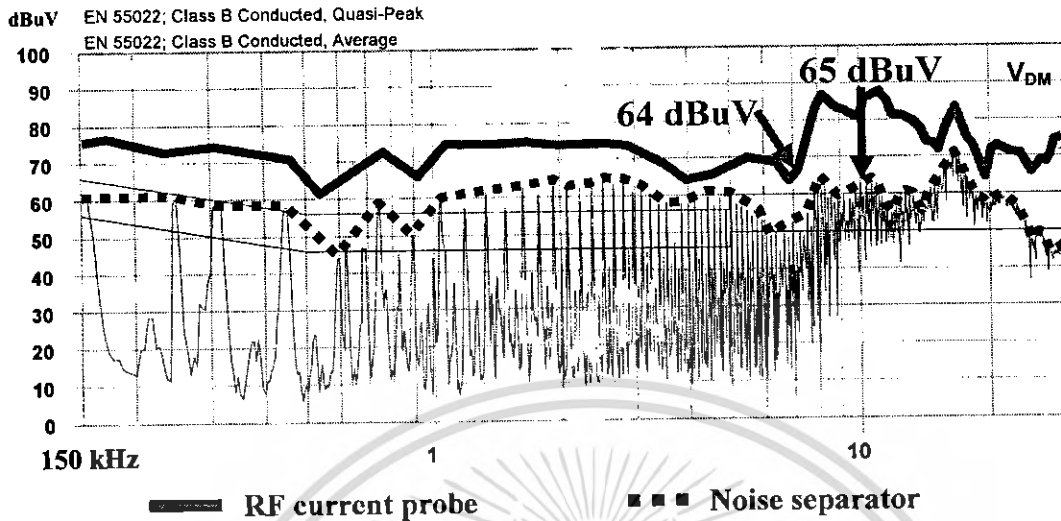


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

ผลการวิเคราะห์

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน N – G จากการวัดของ Simplified LISN และ RF current probe จะมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบในเงื่อนไขแรก แต่ค่าของระดับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าที่ต่ำกว่า โดยในช่วงความถี่ 150 kHz – 3 MHz จะมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง 5 dBuV – 10 dBuV และในช่วงความถี่ 3 MHz – 8 MHz จะมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง 1 dBuV – 3 dBuV ซึ่งน้อยมาก แต่ความถี่ที่สูงขึ้นไปจากนี้จะมีผลของความถี่สูงเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้กราฟที่ได้มีค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากชุดวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายๆที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}) ระหว่าง Noise separator และ RF current probe



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ระหว่าง Noise separator และ RF current probe

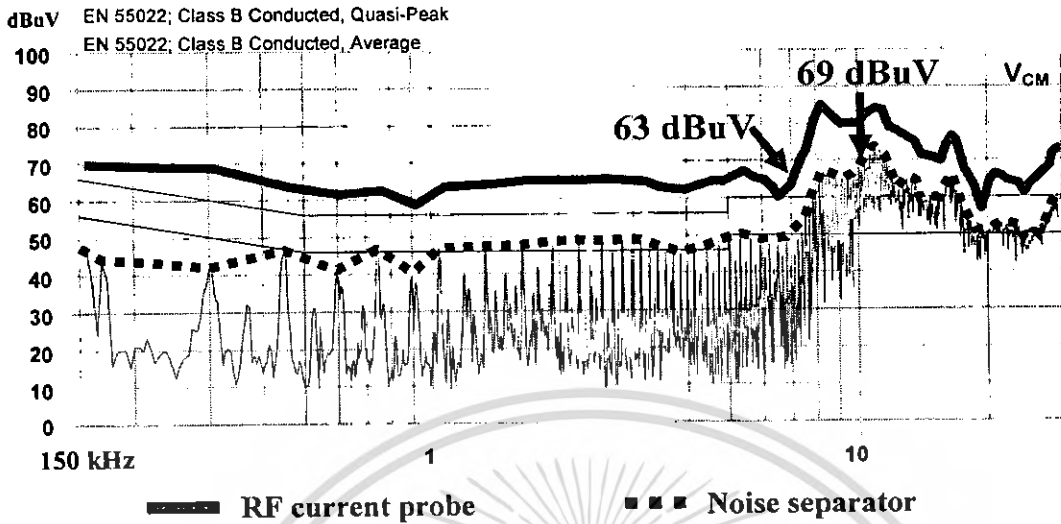
ผลการวิเคราะห์

ค่าที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่าง Noise separator และ RF current probe จะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่คล้ายกัน ในช่วงความถี่ 150 KHz – 2 MHz จะแตกต่างกันประมาณ 10 dBuV ส่วนในช่วงความถี่อื่นๆ จะมีค่าของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 5 dBuV – 20 dBuV จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่กว้าง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการตอบสนองความถี่ของตัว Noise separator อีกทั้งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน L – G และ N – G ที่ไม่สมมาตรเมื่อนำมารวมกันทางขนาดและมุมเฟสจะทำให้รูปแบบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างมีความผิดเพี้ยนได้ และเมื่อเราทราบถึงค่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละช่วงความถี่ก็จะทำให้เราทราบถึงค่าที่ควรชดเชยในแต่ละความถี่เมื่อได้ทำการต่อ Noise separator เข้าไปในวงจร

จากการสังเกตสามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าการต่อแผ่นระบายความร้อนและไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนจะมีผลกระทบกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างเช่นกัน โดยที่สัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างของเงื่อนไขไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ในช่วงประมาณ 700 kHz – 6 MHz จะเห็นได้ว่ามีค่าที่ต่ำกว่าการต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ ส่วนที่ความถี่ที่สูงมากกว่านี้จะมีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างที่ใกล้เคียงกัน เพราะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะไปเกิดที่โหมดผลรวมมากกว่า

4. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

ระหว่าง Noise separator และ RF current probe



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม
ระหว่าง Noise separator และ RF current probe

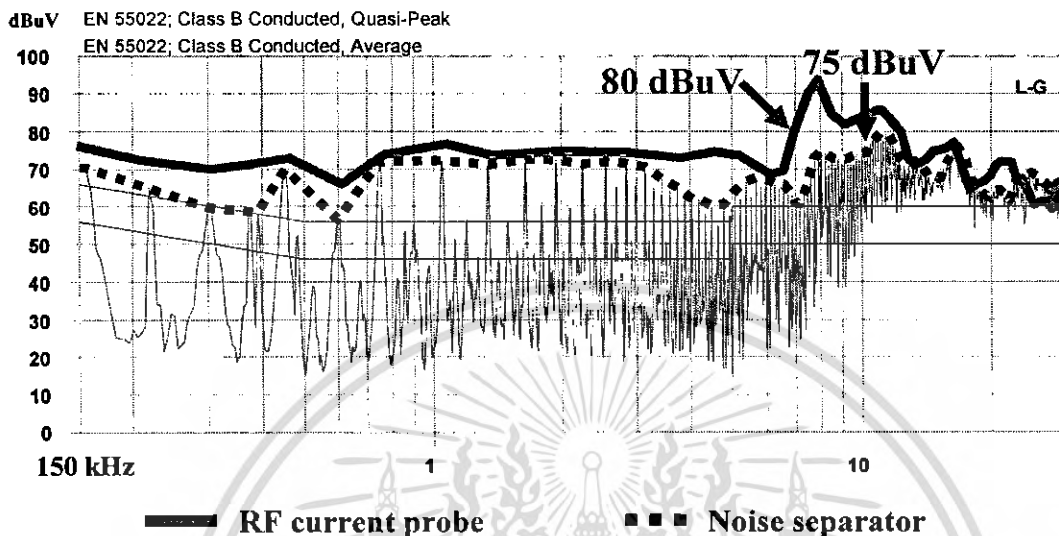
ผลการวิเคราะห์

ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากการวัดระหว่าง Noise separator และ RF current probe นี้จะมีลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าที่ต่ำกว่าในเงื่อนไขแรกโดยค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 10 dBuV – 22 dBuV ที่ช่วงความถี่ 400 kHz – 30 MHz แต่ที่ความถี่ตั้งแต่ 150 kHz – 400 kHz จะมีค่าความแตกต่างที่มากกว่าประมาณ 22 dBuV – 28 dBuV ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะผลของการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เวลาที่ไม่เท่ากัน เมื่อไม่ได้ทำการวัดที่เวลาเดียวกันค่าที่ได้จึงมีค่าที่แตกต่างกัน และผลของขนาดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวอุปกรณ์สวิตชิงใน EMI Toolkit

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมที่ได้จาก Noise separator ในเงื่อนไขนี้ จะเห็นได้ว่ามีค่าที่ลดลงไปประมาณ 10 dBuV นั้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบแฝงจากการต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์มีค่าที่ลดลงเมื่อไม่ได้ทำการต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ โดยสังเกตได้จากช่วงความถี่ประมาณ 7 MHz – 15 MHz ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมนี้จะมีค่าที่สูงกว่าค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง และมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในช่วงความถี่ 7 MHz – 15 MHz นี้เป็นผลมาจากสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมมากกว่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง เช่นเดียวกับการทดสอบในเงื่อนไขแรกเพียงแต่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเงื่อนไขที่ 2 นี้จะมีค่าที่ต่ำกว่า

6.4 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์ (With heat sink)

1. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line – Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

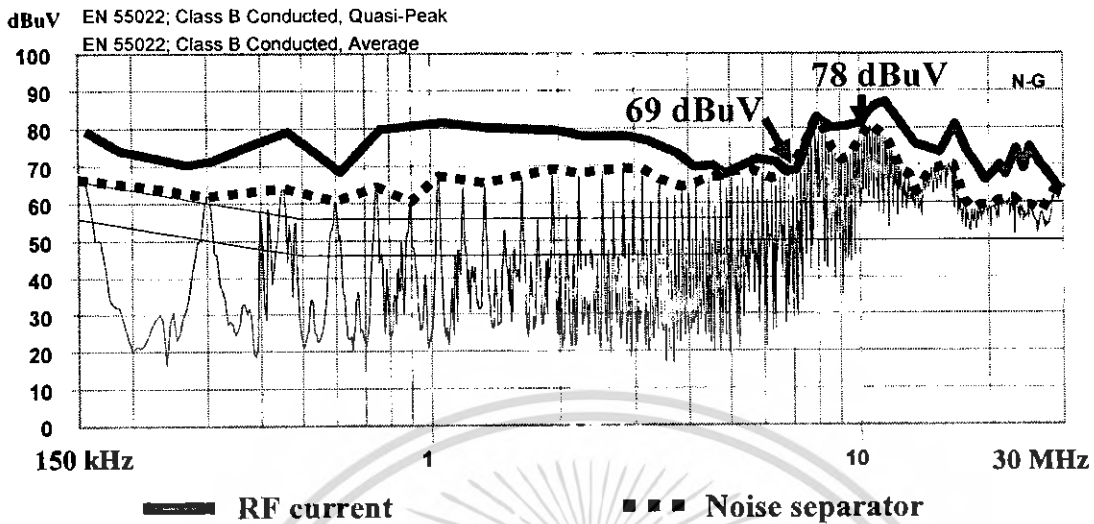


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Line to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

ผลการวิเคราะห์

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน L – G เมื่อวัดจาก Simplified LISN จะมีค่าที่ต่ำกว่าการวัดจาก RF current probe ในช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz จะมีค่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วง 3 dBuV – 15 dBuV ความแตกต่างนี้อาจมาจากชุดวัดสัญญาณของตัว Simplified LISN ที่ใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความผิดพลาดที่ความถี่สูงและตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่า Self resonance frequency ที่มีค่าต่ำเกิด ค่าองค์ประกอบแฝง ทำให้การวัดมีความไม่แน่นอน

2. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral – Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe



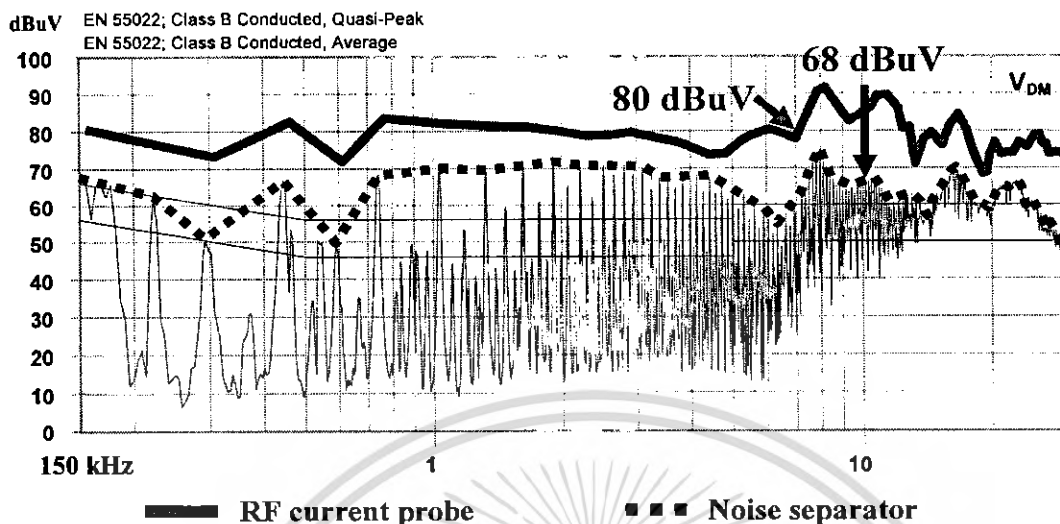
รูปที่ 6.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน Neutral to Ground ระหว่าง Simplified LISN และ RF current probe

ผลการวิเคราะห์

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน N – G เมื่อวัดจาก Simplified LISN ยังคงมีค่าที่ต่ำกว่าการวัดจาก RF current probe แต่ในช่วงความถี่ 150 kHz – 5 MHz จะมีค่าความแตกต่างของสัญญาณมากกว่าสัญญาณรบกวนด้าน L – G ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 3 dBuV – 20 dBuV และที่ในช่วงความถี่ 5 MHz – 30 MHz จะมีค่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนอยู่ในช่วง 3 dBuV – 13 dBuV ซึ่งค่าความแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากค่าองค์ประกอบแผงวงจรทางด้าน L – G และ N – G มีค่าที่ไม่สมมาตรกันเนื่องจากอุปกรณ์ภายใน เช่น ตัวเหนี่ยวนำที่ทำการออกแบบและสร้างเองทั้งทางด้าน L – G และ N – G มีค่าไม่เหมือนกัน จึงมีองค์ประกอบแผงที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจแปรเปลี่ยนไปตามระยะเวลาการใช้งานได้ ส่วนตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุก็ยังมีค่าความผิดพลาดที่ความถี่สูงเพราะมีค่า Self resonance frequency ที่มีค่าต่ำ ทำให้เกิดค่าองค์ประกอบแผงได้มากเป็นผลให้การวัดมีความไม่แน่นอนได้เช่นกัน

3. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM})

ระหว่าง Noise separator และ RF current probe



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ระหว่าง Noise separator และ RF current probe

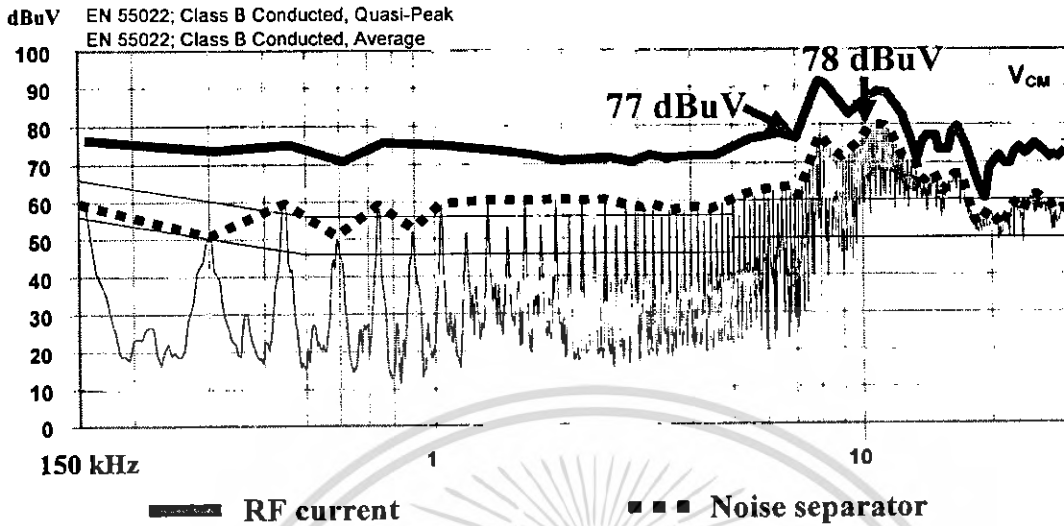
ผลการวิเคราะห์

ค่าที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่าง Noise separator และ Current Probe จะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่คล้ายกัน ในช่วงความถี่ 1 MHz – 4 MHz โดยจะมีค่าแตกต่างกันเพียง 10 dBuV เท่านั้น ส่วนในช่วงความถี่อื่นๆ จะมีค่าของสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 20 dBuV ที่เป็นแบบนี้เพราะตัวของ Noise separator ได้นำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของทางด้าน L – G และ N – G ที่ไม่สมมาตรมารวมกันทางขนาดและมุมเฟส โดยแสดงสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}) ที่มีการลดทอนสัญญาณรบกวนลงไปเนื่องจากผลของอุปกรณ์ที่นำมาสร้างดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งถ้าเราทราบถึงค่าความแตกต่างของสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ก็จะทำให้เราทราบถึงค่าที่ควรชดเชยเมื่อได้ทำการต่อ Noise separator เข้าไปในวงจร

สัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างในช่วงประมาณ 700 kHz – 6 MHz จะเห็นได้ว่ามีค่าที่สูงกว่าสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงนี้เป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างมากที่สุด

4. การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (V_{CM})

ระหว่าง Noise separator และ RF current probe



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมระหว่าง Noise separator และ RF current probe

ผลการวิเคราะห์

ค่าสัญญาณรบกวนรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากการวัดระหว่าง Noise separator และ RF current probe นี้จะมีลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าสัญญาณรบกวนจะอยู่ในช่วง 10 dBuV – 22 dBuV ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ แต่ที่ความถี่ประมาณ 14 MHz จะมีค่าที่เกือบจะเท่ากันอาจเป็นผลมาจากช่วงเวลาทำการวัดมีค่าต่างกัน เมื่อไม่ได้ทำการวัดที่เวลาเดียวกันค่าที่ได้จึงมีค่าที่แตกต่างกัน

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ที่ได้จาก Noise separator นี้จะเป็นตัวบอกระดับขององค์ประกอบแฝงที่เกิดขึ้นและส่งผลมาจากกราวด์ โดยสังเกตได้จากช่วงความถี่ประมาณ 7 MHz – 15 MHz ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างนี้จะมีค่าที่สูงกว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม และมีค่าที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 7 MHz – 15 MHz นี้เป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมมากกว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทวิจารณ์โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

ในการสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ขึ้นมาขึ้นอยู่กับกรณีบางตัวจำเป็นจะต้องสร้างขึ้นเองโดยในที่นี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป เช่น C และ R ส่วน L_1, L_2 และ L_3, L_4 ซึ่งมีค่า $250 \mu\text{H}$ และ $50 \mu\text{H}$ ตามลำดับ จะใช้ท่อนิวซีเป็นแกนกลางเสมือนกับว่าเป็นแกนอากาศทำให้ต้องมีการเก็บผลค่าการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ภายใน ซึ่งผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ภายในที่ใช้ ถือว่ายังมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ (Self resonance frequency: SRF) ที่ต่ำกว่าตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เราสามารถที่จะออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้เท่านั้น

เมื่อพิจารณาในด้านมาตรฐานทางคุณสมบัติโดยทั่วไปของ Standard LISN (LISN Model 3810/2 EMC0) จะเห็นว่าชุดโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ได้ทำการออกแบบมีคุณสมบัติที่ผ่านมาตรฐานในด้านของอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ที่ต้องรักษา Matching Impedance ที่ 50Ω ได้คงที่ตลอดย่านความถี่ที่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$

ส่วนความแตกต่างของโครงการในปี 2549 เทียบกับปี 2548 คือการเพิ่มขนาดของกระแสให้เป็นขนาด 16 A เป็นมาตรฐานในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนั้นจะพันตัวเหนี่ยวนำให้มีแก๊ปกอากาศเพื่อให้ค่าผลตอบสนองความถี่มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าตัวโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ของปี 2548 ดังนั้นขนาดของโครงสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ได้ออกแบบจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนวงจรการวัดจากที่ใช้สวิทช์เลือกการวัด Line เทียบ Ground และ Neutral เทียบ Ground ให้สามารถวัดได้ทั้งสองข้างในเวลาเดียวกัน

7.2 บทสรุปโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

จากการที่ได้ศึกษาได้ทำการศึกษาทฤษฎีการเกิดปัญหาทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยศึกษาถึงสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างและโหมดผลรวม รวมทั้งศึกษาถึงองค์ประกอบ วิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า และได้ทำการออกแบบสร้างโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ทำให้ได้ทราบถึงคุณสมบัติรวมไปถึงหน้าที่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยทั่วไปซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายของการไฟฟ้าไม่ให้มารบกวนหรือปะปนกับสัญญาณรบกวนจากระบบทดสอบ (EMI Toolkit) ได้ และป้องกันสัญญาณรบกวนจากระบบทดสอบ (EMI Toolkit) ไม่ให้ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้า เพื่อการวัดสัญญาณรบกวนจากการทดสอบเป็นสัญญาณรบกวนที่ได้จากระบบที่นำมาทดสอบจริง

2. ชุดโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ออกแบบ มีการรักษา Matching Impedance ที่ $50\ \Omega$ เพื่อสร้างประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานสูงสุด

7.3 บทวิจารณ์ชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise separator)

ในการออกแบบและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย คือจะต้องรักษา Matching Impedance ที่ $50\ \Omega$ ในทุกย่านความถี่ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยในโครงข่ายนี้ทางผู้วิจัยได้ศึกษาชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านนอกออกมาเป็น 1 เท้า คือจะได้ V_{DM} และ V_{CM} ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ถือได้ว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และจากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีต่างๆ จะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.4 บทสรุปชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise Separator)

จากการศึกษาและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. สามารถวิเคราะห์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างออกจากสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่นำมาพิจารณาได้
2. ในการทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองโหมดสามารถทำการทดสอบได้ง่าย โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดวัดเท่านั้น
3. มีการรักษา Matching Impedance ที่ $50\ \Omega$ เพื่อให้อุปกรณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.5 บทวิจารณ์ RF Current probe

ในการแยกสัญญาณรบกวนไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe ซึ่งมีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมออกจากกันได้ เช่นเดียวกับชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการการวัดสัญญาณในสายตัวนำที่นำมาทดสอบ โดยจะนำสายตัวนำคล้องผ่านอุปกรณ์เครื่องมือวัด เมื่อทำการป้อนกระแสเข้าไปยังตัวนำ ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ ตัวนำ ซึ่งสัญญาณที่ออกจาก RF current probe จะออกในมารูปแบบของแรงดันไฟฟ้า โดยสัญญาณที่ได้สามารถที่จะเชื่อมต่อกับเครื่องวัดสัญญาณความถี่ตัวนำ (Spectrum analyzer) ได้โดยตรง

7.6 บทสรุป RF Current probe

จากการศึกษาการแยกสัญญาณรบกวนไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของ RF current probe ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. สามารถวิเคราะห์การแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ออกจากสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่นำมาพิจารณาได้ เพียงแค่นำสายตัวนำมาคล้องผ่าน RF current probe เท่านั้น
2. การทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทดสอบที่พิกัดกระแสทดสอบสูงได้ แต่มีค่าการสูญเสียที่ต้องชดเชยสูงที่ความถี่ต่ำ
3. RF current probe มีประสิทธิภาพในการทดสอบที่ดี เนื่องจากมีมาตรฐานทางด้านการทดสอบ และมีวิธีการทดสอบที่แน่นอน
4. ในการทดสอบการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ RF current probe สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย และสะดวกต่อการทดสอบ

7.7 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าควรทำการทดสอบในเวลาเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน เพราะผลของสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งอื่นภายนอก อาจมีผลกระทบต่อ การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
2. การทดสอบและการวิเคราะห์ควรมีห้องทดสอบที่ได้มาตรฐาน ควรมีการป้องกัน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอากาศด้วย เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้ออกมานั้นเป็นผลของสัญญาณรบกวนที่ได้อย่างแท้จริง

7.8 สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ

1. สามารถที่จะทดสอบประสิทธิภาพทางด้านกำลังไฟฟ้า และทดสอบที่พิกัดของ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ได้
2. สามารถที่จะทำการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเพิ่มเงื่อนไขในการทดลองกรณีต่างๆ เพิ่มขึ้น
3. ในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากกัน ของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้นั้น จะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ และการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าให้เหมาะสมได้

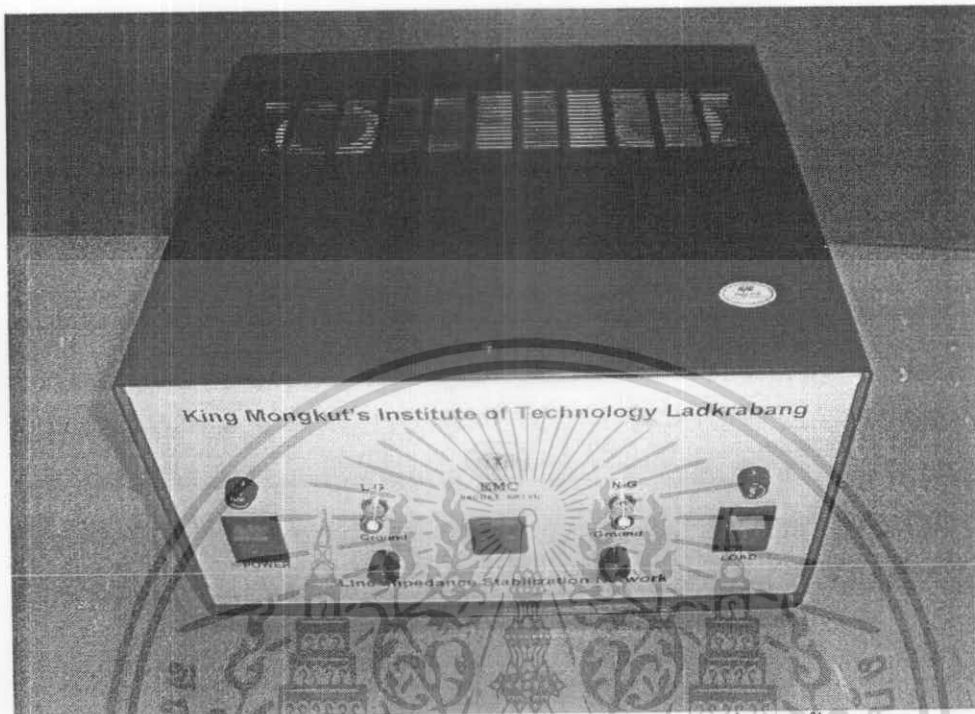
เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics), พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง. 2548.
- [2] ชัชชาย นวมโคกสูง และคณะ, “ชุดศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ,” *ปริญญาพันธวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [3] สรไกร โป๊ะเปี่ยมลาภ และคณะ. “การศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ,” *ปริญญาพันธวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [4] นายธีรศักดิ์ แก้วพะวงค์ และ นายอุเทน ขวัญวงษ์, “การออกแบบวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์,” *ปริญญาพันธวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [5] David Morgan, **A handbook for EMC testing and measurement.** Wiley - Interscience, Short Run Press Ltd, Exeter, 1994.
- [6] See Kye Yak, “Network for EMI,” *Electronic Letter*, Vol. 35 No. 17, pp. 1446 - 1447, 19th Aug 1999.
- [7] Clayton R. Paul and Keith B. Hardin, “Diagnosis and Reduction of Conducted Noise Emissions,” *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 30 No. 4, pp. 553-560, Nov 1988.
- [8] Shou Wang, Fred. C Lee and Willem Gerhardus Odendaal “Characterization Evaluation, and Design of Noise Separator for Conducted EMI Noise Diagnosis”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 974–982, July 2005.
- [9] C.R. PAUL and K.B. HARDIN, “Diagnosis and Reduction of Conducted Noise Emissions,” *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol.30 No.4, pp. 553 – 560, 1988.
- [10] Operational Manual (LISN) Model 3810/2, *EMC TEST SYSTEMS*, LP.-A ESCO COMPANY, 1999.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมท่อพีวีซีแข็งสำหรับใช้ร้อยสายไฟฟ้าและสายโทรศัพท์” มอก. 216 - 2524”, 2532.
Available: <http://www.thaipipe.com/products&services/upvcpipe.htm>
- [12] Wideband RF Transformers, <http://www.coilcraft.com>

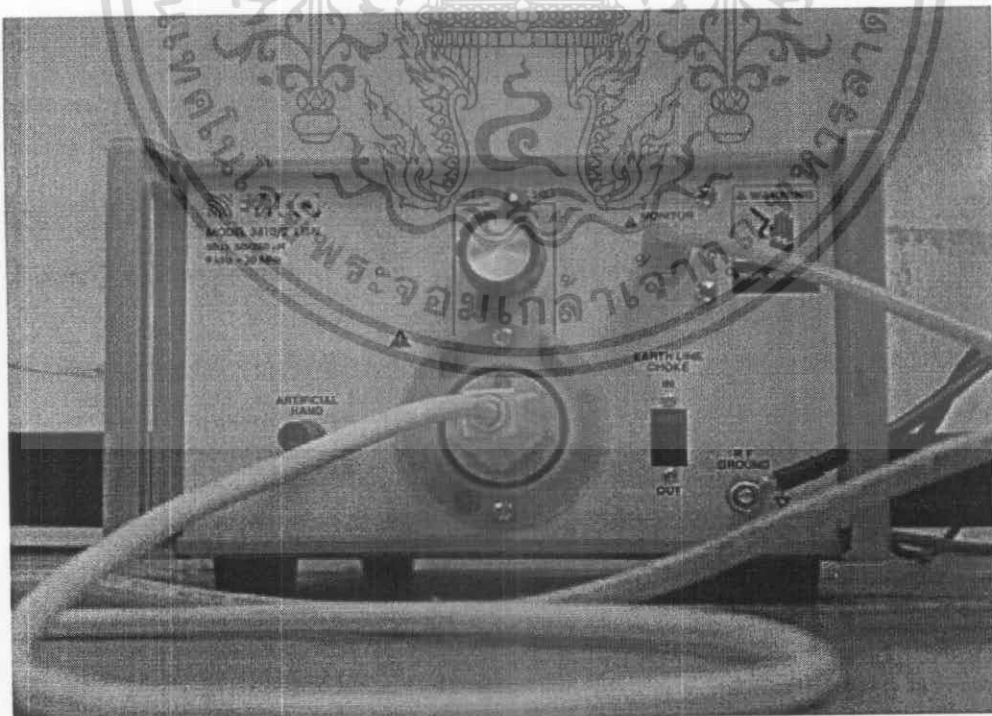


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
รูปภาพอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง



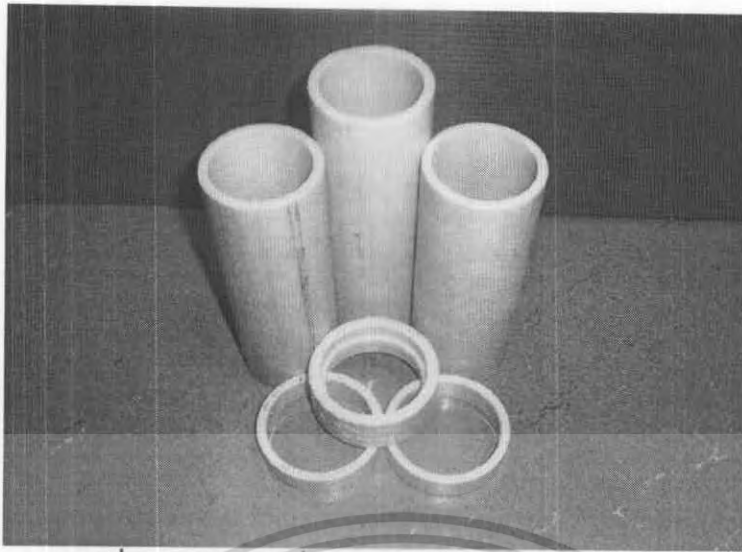
รูปที่ ก.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่สร้างขึ้น



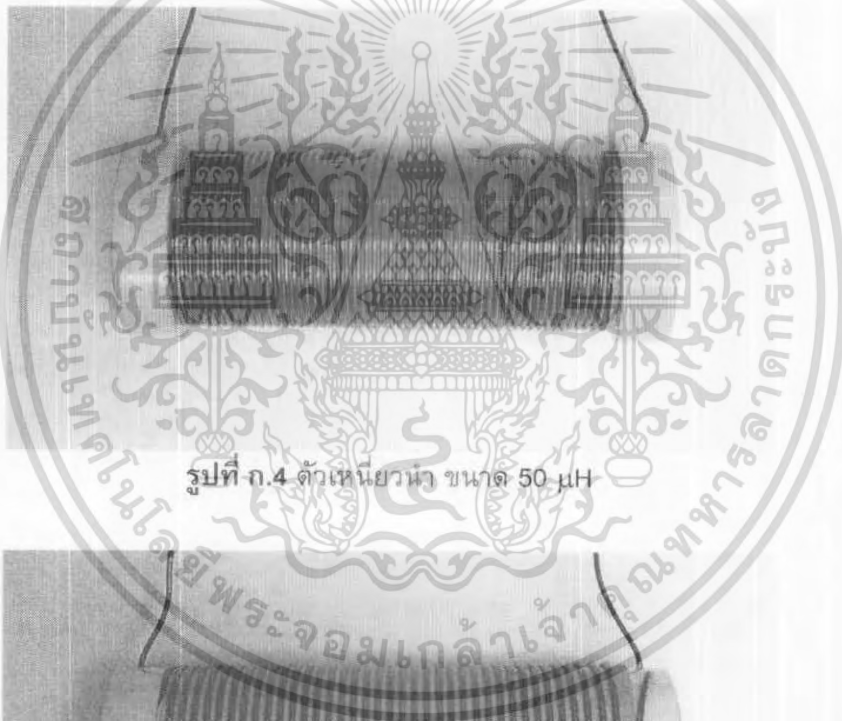
รูปที่ ก.2 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่มีในห้องวิจัย

LISN Model 3810/2 LISN 9kHz-30MHz

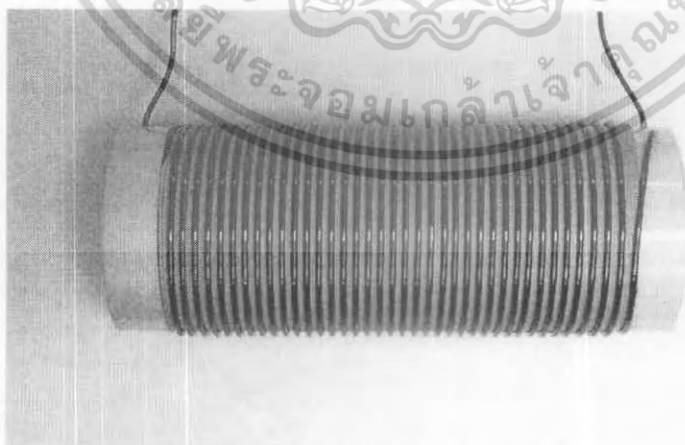
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ท่อ PVC ที่ใช้ในการทำแกนของตัวเหนี่ยวนำ

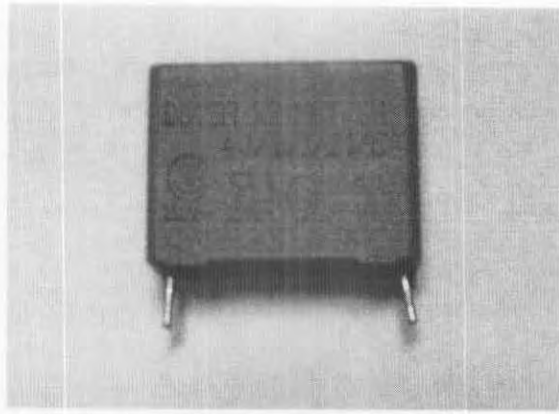


รูปที่ ก.4 ตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 50 μH



รูปที่ ก.5 ตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 250 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

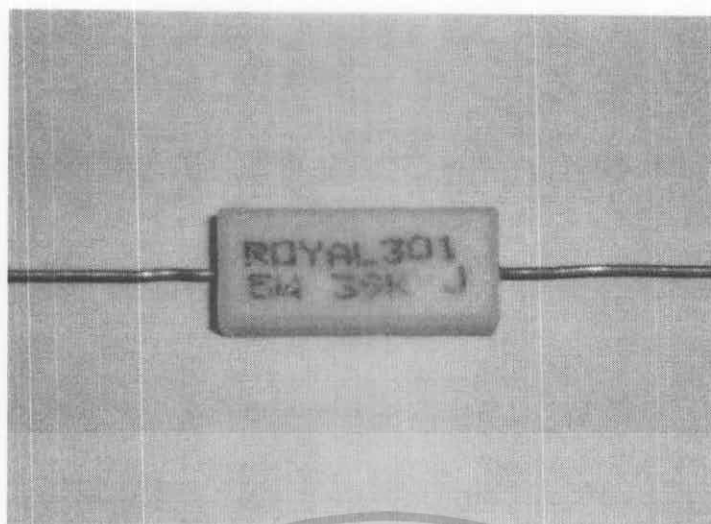


รูปที่ ก.6 ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polyester ขนาด 0.47 μF



รูปที่ ก.8 ตัวเก็บประจุชนิด Metallized polypropylene ขนาด 7.5 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



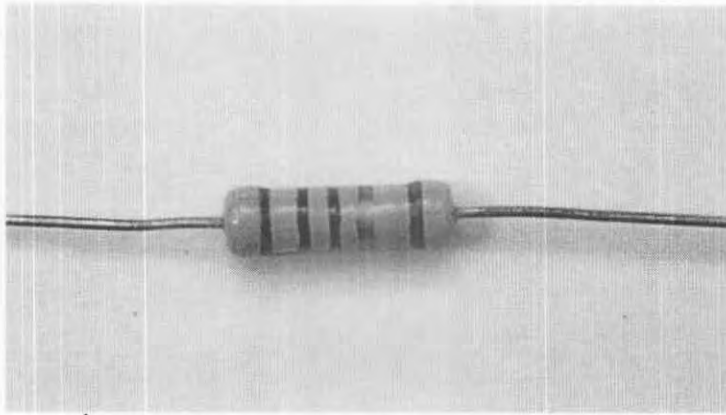
รูปที่ ก.9 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ ขนาด $39\text{ k}\Omega$ 2 W



รูปที่ ก.10 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม ขนาด $39\text{ k}\Omega$ 2 W

รูปที่ ก.11 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ ขนาด 5Ω 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.12 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม ขนาด 50 Ω 2 W

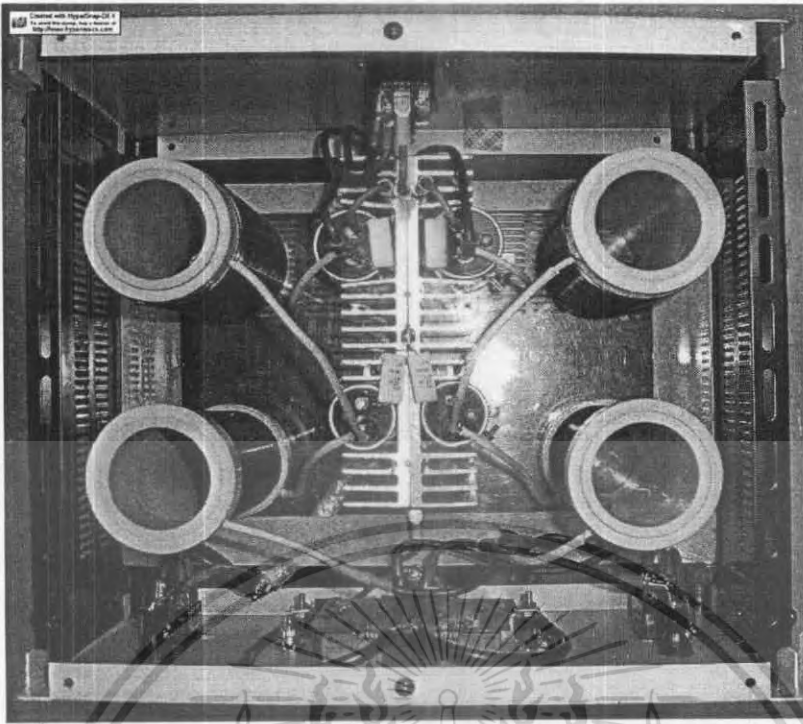


รูปที่ ก.13 ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม ขนาด 1 k Ω 2 W

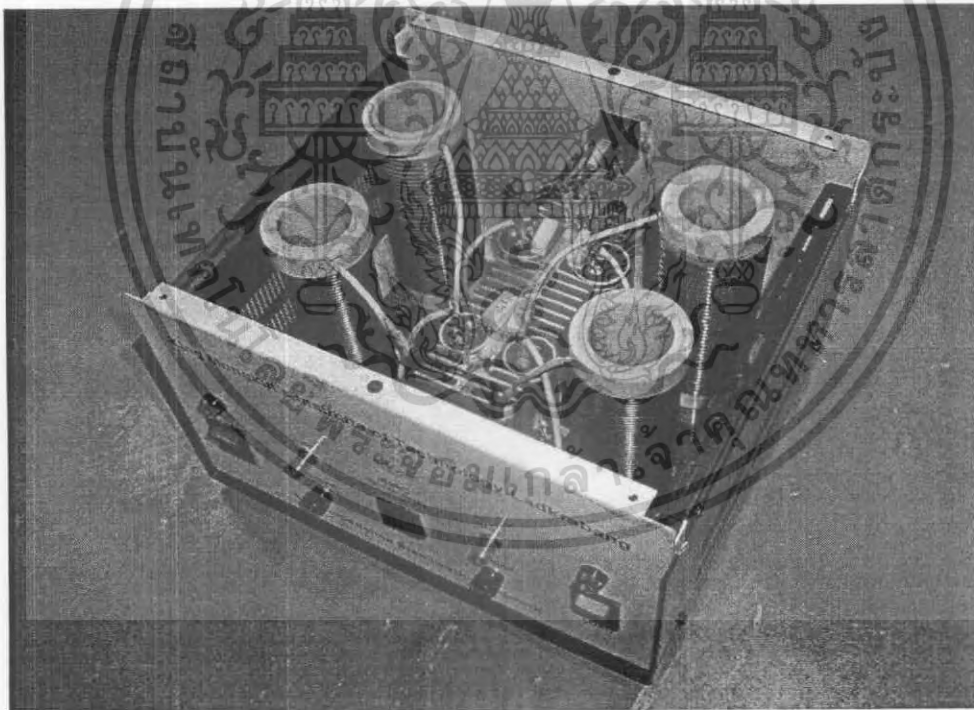


รูปที่ ก.14 ตัวถังของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

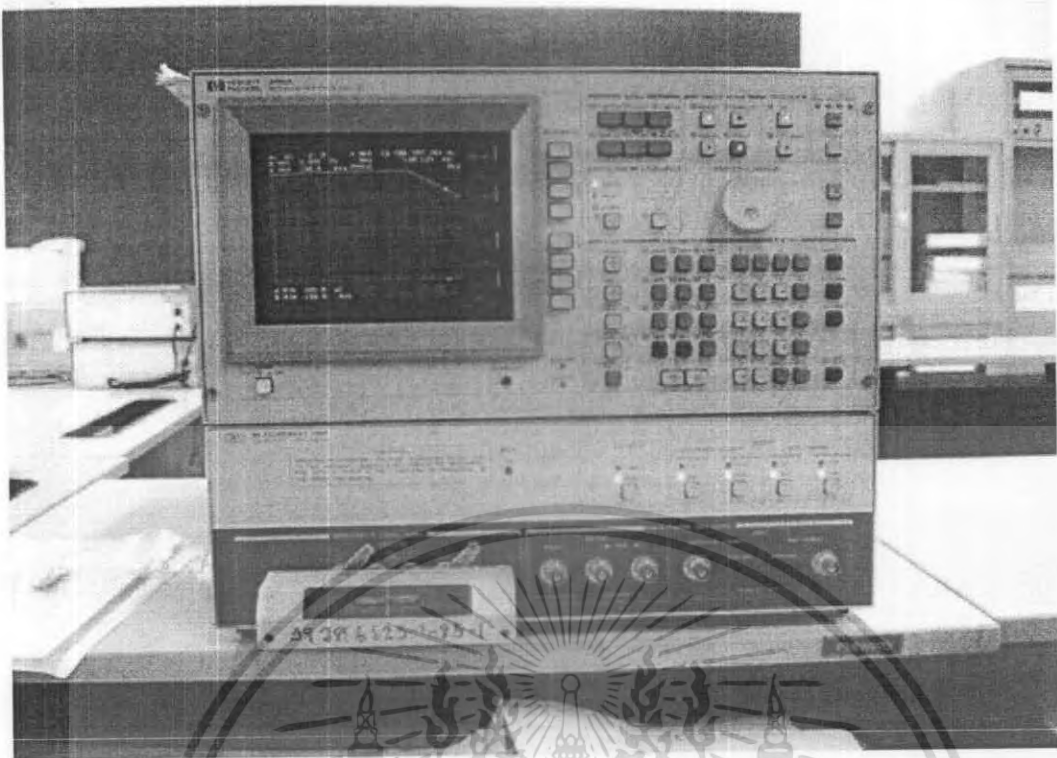


รูปที่ ก.15 การวางอุปกรณ์ภายในโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

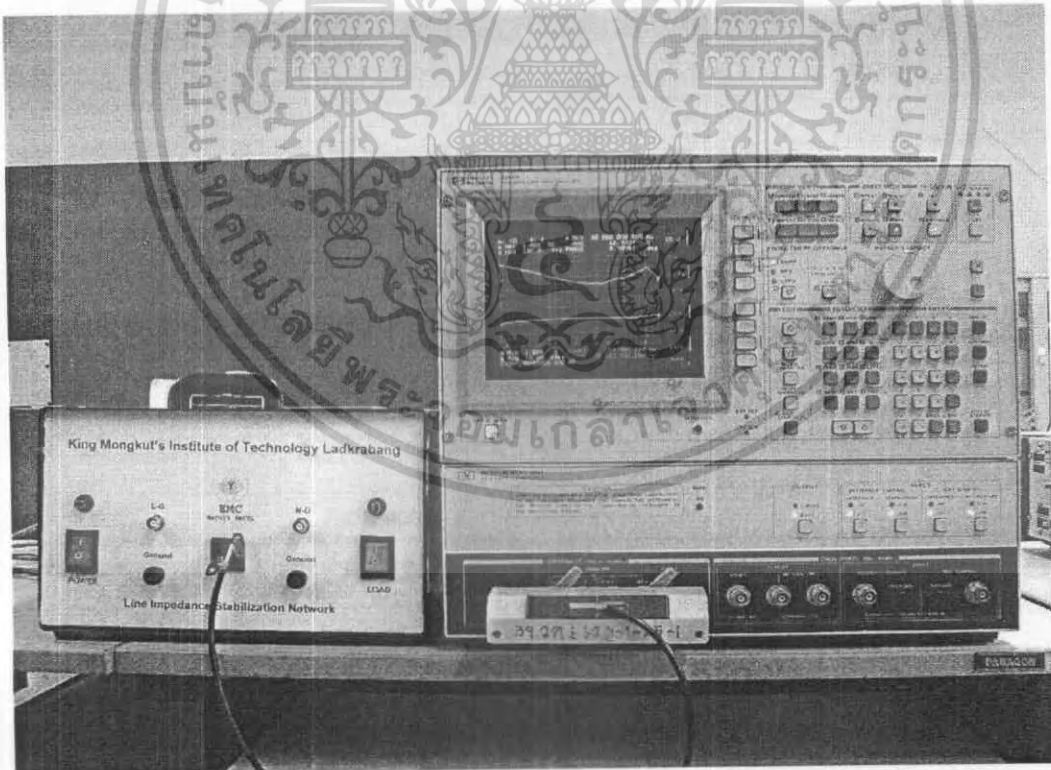


รูปที่ ก.16 การวางอุปกรณ์ภายในและการต่อวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.17 Impedance analyzer

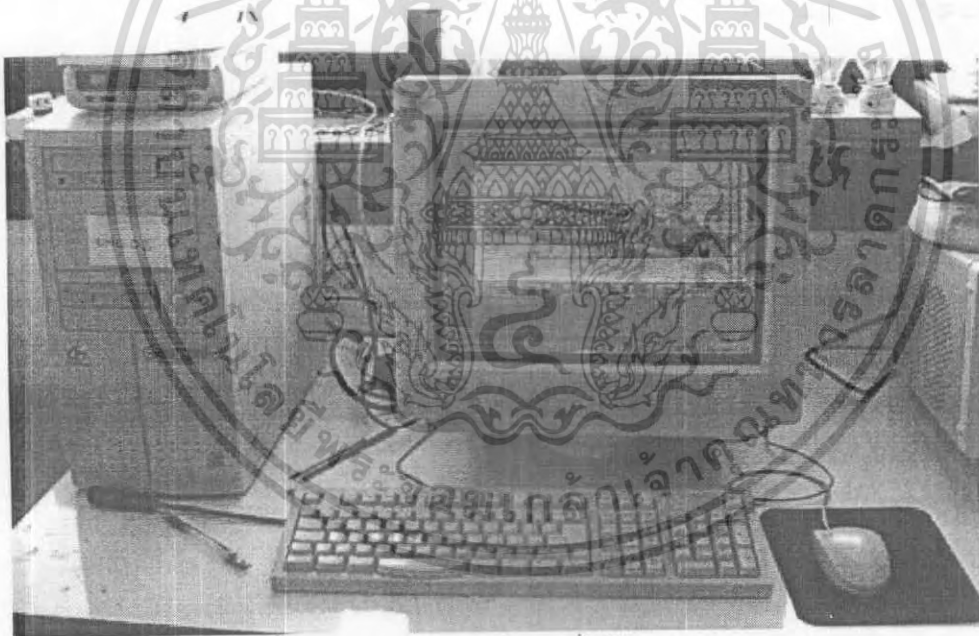


รูปที่ ก.18 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

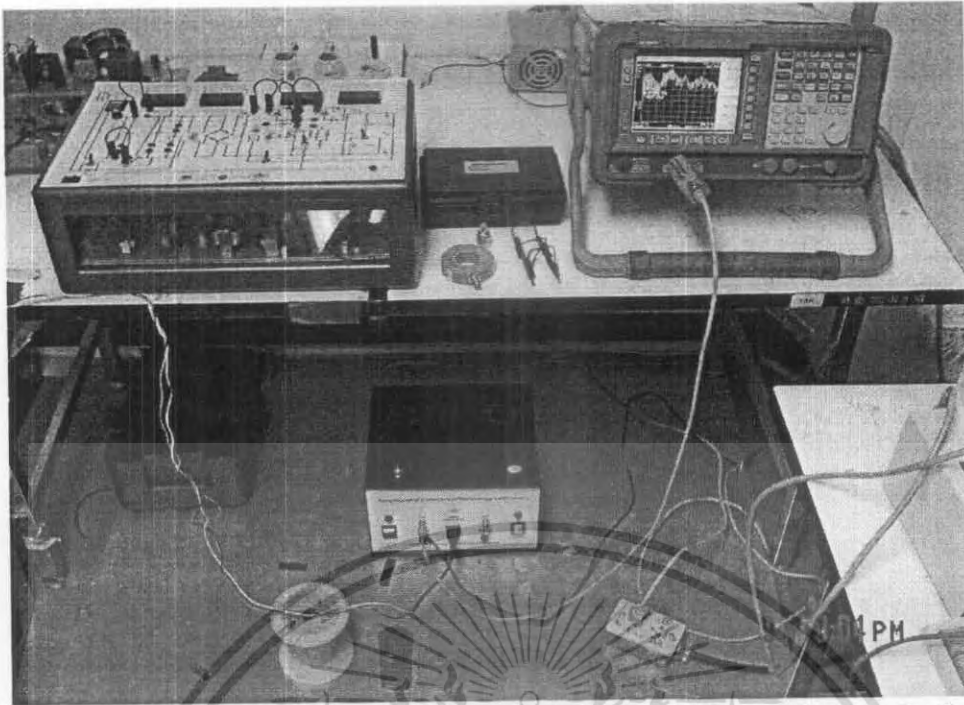


รูปที่ ก.19 Spectrum Analyzer 9 kHz-1.5 GHz



รูปที่ ก.20 คอมพิวเตอร์ และที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

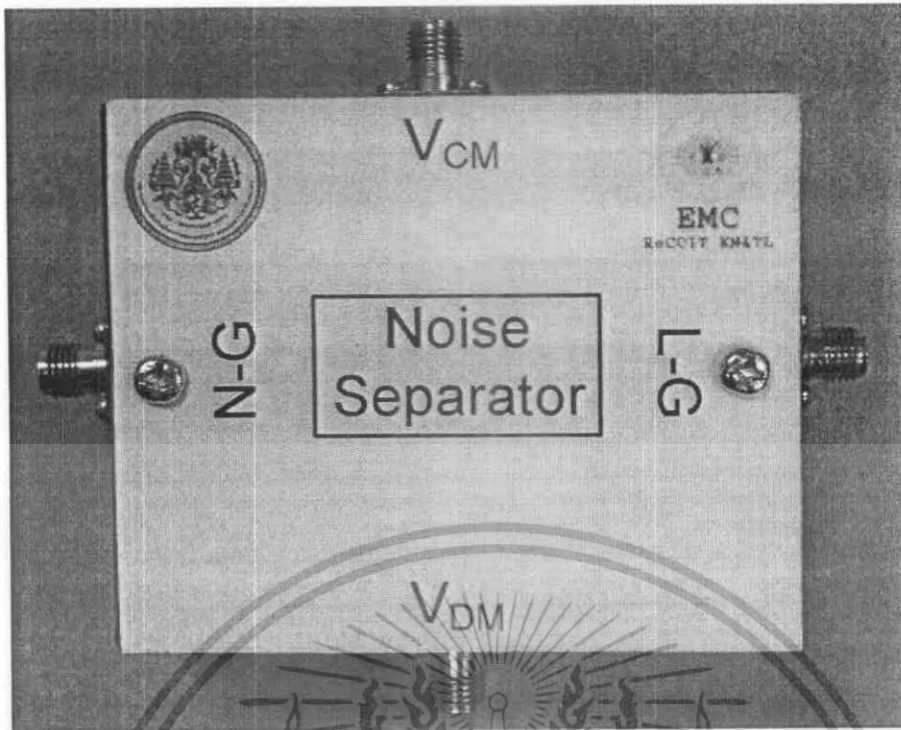


รูปที่ ก.21 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

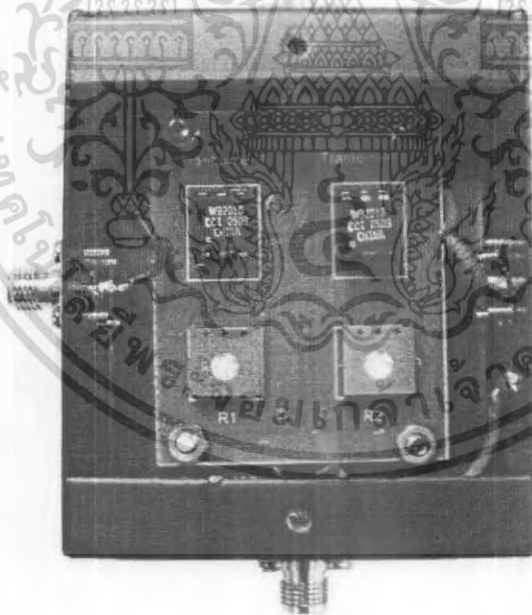


รูปที่ ก.22 RF current probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

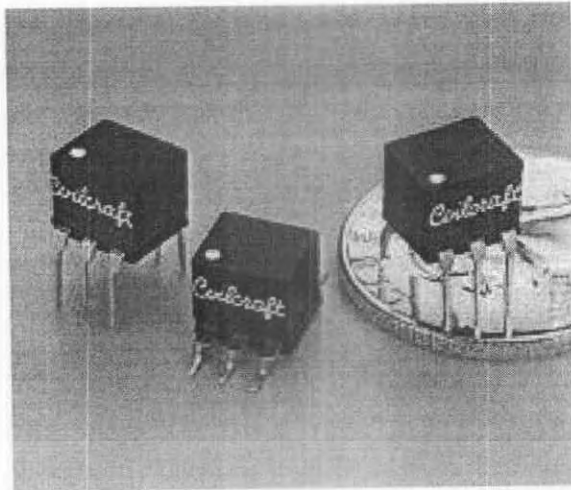


รูปที่ ก.23 ลักษณะภายนอกของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

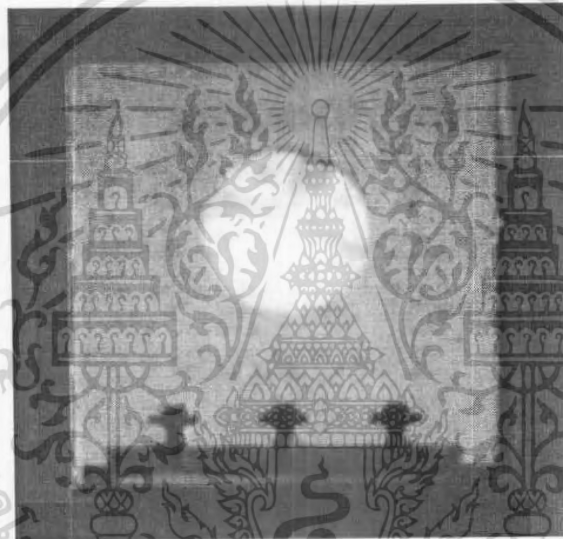


รูปที่ ก.24 ลักษณะภายในของชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.25 หม้อแปลงคุณภาพสูง (Wideband RF transformer) WB 2010 – PCL



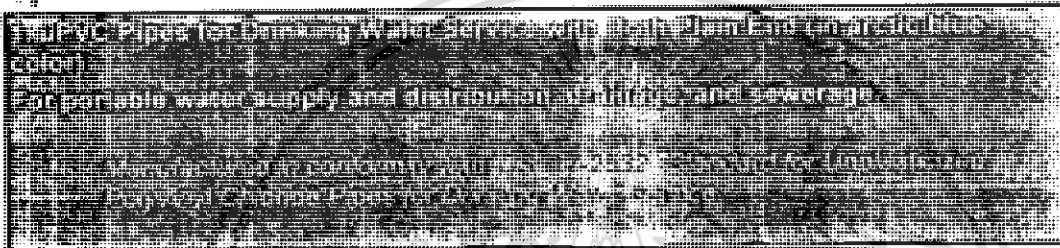
รูปที่ ก.26 ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
มาตรฐานท่อ PVC

Applications		Standard	Sizes	Color
Residential	Household water supply	TIS. 17-2532	1/2"-24"	Arctic blue
Industrial	Chemical products in factories	TIS. 999-2533	3/8"-24"	Dark grey
Industrial	Electrical wiring & telephone cable	TIS. 216-2524	3/8"-4"	Light yellow
Agricultural	Irrigation systems in farms, plantations, & low pressure applications	"Thai Pipe Standard"	1/4"-5"	Grey

Specifications



Unit: mm

Nominal Size	Outside Diameter	Thickness			Length	Weight per Length (Kg)		
		PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5		PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5
18 (½")	22±0.15	-	2.0±0.20	2.5±0.20	4000	-	0.72	0.88
20 (¾")	26±0.15	-	2.0±0.20	2.5±0.20		-	0.86	1.06
25 (1")	34±0.15	-	2.0±0.20	3.0±0.25		-	1.15	1.67
35 (1¼")	42±0.15	1.5±0.15	2.0±0.20	3.1±0.25		1.09	1.44	2.17
40 (1½")	48±0.15	1.5±0.15	2.3±0.20	3.5±0.25		1.25	1.89	2.80
55 (2")	60±0.15	1.8±0.20	2.9±0.25	4.3±0.30		1.88	2.98	4.30
65 (2½")	76±0.20	2.2±0.20	3.5±0.25	5.4±0.35		2.92	4.56	6.85
80 (3")	89±0.20	2.5±0.20	4.1±0.30	6.4±0.40		3.89	6.26	9.50
100 (4")	114±0.30	3.2±0.25	5.2±0.35	8.1±0.50		6.37	10.17	15.41
125 (5")	140±0.30	3.9±0.30	6.4±0.40	9.9±0.55		9.55	15.40	23.23
150 (6")	165±0.40	4.6±0.30	7.5±0.45	11.7±0.65		13.28	21.29	32.37
200 (8")	216±0.50	5.4±0.35	8.8±0.50	13.7±0.75		20.48	32.87	50.06
250 (10")	267±0.70	6.6±0.40	10.9±0.60	16.9±0.90		30.96	50.37	76.43
300 (12")	318±0.80	7.8±0.45	12.9±0.70	20.1±1.05		43.61	71.07	108.40
350 (14")	370±0.90	9.1±0.55	15.0±0.80	23.4±1.20		59.22	96.22	147.01
400 (16")	420±1.10	10.3±0.60	17.0±0.90	26.5±1.35		76.12	123.89	189.23
450 (18")	470±1.20	11.5±0.65	19.0±1.00	29.7±1.50		95.16	155.07	237.58
500 (20")	520±1.30	12.7±0.70	21.0±1.10	32.8±1.65		116.32	189.78	290.65
600 (24")	630±1.60	15.3±0.80	25.4±1.30	39.7±2.00		169.97	278.57	427.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note:

- Working pressures of PVC pipes class PVC 5, PVC 8.5 and PVC 13.5 are 5, 8.5 and 13.5 kgf/cm² at 27°C respectively.
- Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
- Weight per length in the table above are approximated values.

Unit: mm

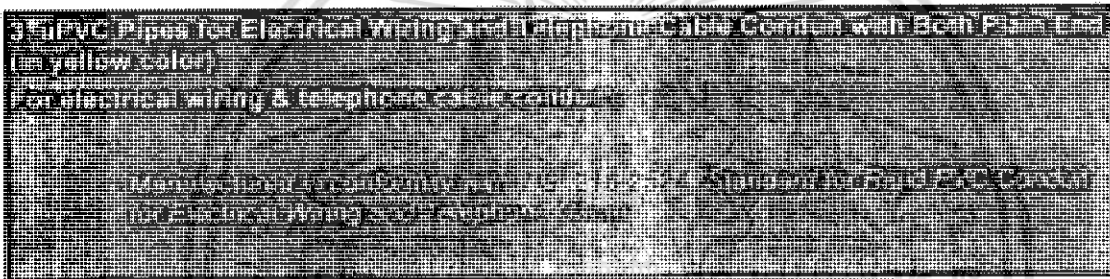
Nominal Size	Outside Diameter	Thickness				Length	Weight per Length (Kg)				
		PVC 0	PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5		PVC 0	PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5	
15 (3/8")	18±0.15	-	-	-	2.0±0.20	4000	-	-	-	0.58	
18 (1/2")	22±0.15	-	-	2.0±0.20	2.5±0.20		-	-	0.72	0.88	
20 (3/4")	26±0.15	-	-	2.0±0.20	2.5±0.20		-	-	0.86	1.06	
25 (1")	34±0.15	-	-	2.0±0.20	3.0±0.25		-	-	1.15	1.67	
35 (1 1/4")	42±0.15	-	1.5±0.15	2.0±0.20	3.1±0.25		-	1.09	1.44	2.17	
40 (1 1/2")	48±0.15	-	1.5±0.15	2.3±0.20	3.5±0.25		-	1.25	1.89	2.80	
55 (2")	60±0.15	-	1.8±0.20	2.9±0.25	4.3±0.30		-	1.88	2.98	4.30	
65 (2 1/2")	76±0.20	2.0±0.20	2.2±0.20	3.5±0.25	5.4±0.35		+30	2.66	2.92	4.56	6.85
80 (3")	89±0.20	2.0±0.20	2.5±0.20	4.1±0.30	6.4±0.40		-0	3.13	3.89	6.26	9.50
100 (4")	114±0.30	2.5±0.20	3.2±0.25	5.2±0.35	8.1±0.50			5.01	6.37	10.17	15.41
125 (5")	140±0.30	2.8±0.20	3.9±0.30	6.4±0.40	9.9±0.55			6.91	9.55	15.40	23.23
150 (6")	165±0.40	3.4±0.25	4.6±0.30	7.5±0.45	11.7±0.65			9.88	13.28	21.29	32.37
200 (8")	216±0.50	3.4±0.25	5.4±0.35	8.8±0.50	13.7±0.75			12.99	20.48	32.78	50.06
250 (10")	267±0.70	3.4±0.25	6.6±0.40	10.9±0.60	16.9±0.90			16.11	30.96	50.37	76.43
300 (12")	318±0.80	3.4±0.25	7.8±0.45	12.9±0.70	20.1±1.05			19.23	43.61	71.07	108.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

350 (14")	370±0 .90	3.9±0. 25	9.1±0. 55	15.0±0 .80	23.4±1 .20		25.67	59.22	96.22	147.0 1
400 (16")	420±1 .10	4.4±0. 30	10.3±0 .60	17.0±0 .90	26.5±1 .35		32.87	76.12	123.8 9	189.2 3
450 (18")	470±1 .20	5.0±0. 35	11.5±0 .65	19.0±1 .00	29.7±1 .50		-	95.16	155.0 7	237.5 8
500 (20")	520±1 .30	5.5±0. 35	12.7±0 .70	21.0±1 .10	32.8±1 .65		-	116.3 2	189.7 8	290.6 5
600 (24")	630±1 .60	6.5±0. 40	15.3±0 .80	25.4±1 .30	39.7±2 .00		-	169.9 7	278.5 7	427.3 2

Note:

- Working pressures of PVC pipes class PVC 5, PVC 8.5 and PVC 13.5 are 5, 8.5 and 13.5 kgf/cm² at 27°C respectively.
- Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
- Weight per length in the table above are approximated values.
- PVC pipe class PVC 0 is non-pressure pipe which is suitable for air ducting pipe. It is not recommended for the application with external pressure or loading on the pipe.



Unit: mm

Nominal Size	Outside Diameter	Thickness			Length	Weight per Length (Kg)		
		Class 1	Class 2	Class 3		Class 1	Class 2	Class 3
15 (3/8")	18±0.20	2.0±0.20	-	-	4000	0.59	-	-
18 (1/2")	22±0.20	2.0±0.20	-	-		0.74	-	-
20 (3/4")	26±0.25	2.0±0.20	-	-		0.89	-	-
25 (1")	34±0.30	3.0±0.30	-	-		1.72	-	-
35 (1 1/4")	42±0.35	3.5±0.40	-	-		2.49	-	-
40 (1 1/2")	48±0.40	4.0±0.40	-	-		3.25	-	-
55 (2")	60±0.50	4.5±0.40	-	-		4.61	-	-
65 (2 1/2")	76±0.50	4.5±0.40	-	-		5.94	-	-
80 (3")	89±0.50	5.9±0.40	-	-		9.06	-	-
100 (4")	114±0.50	7.0±0.40	-	-		13.84	-	-
80 (3")	89±0.50	5.9±0.40	4.5±0.30	2.5±0.25	+30	13.59	10.54	5.99
100 (4")	114±0.50	7.0±0.40	5.7±0.35	3.0±	+30	20.75	17.10	9.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

				0.30	6000			
								-10

Note:

1. Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
2. Weight per length in the table above are approximated values.
3. Pipe classification is made according to its resistance to compression.



Unit: mm

Nominal Size	Outside Diameter	Thickness	Length	Weight per Length (Kg)
10 (1/4")	14±0.10	1.1±0.10	4000 +30 -10	0.23
15 (3/8")	18±0.15	1.1±0.10		0.33
18 (1/2")	22±0.15	1.1±0.10		0.41
20 (3/4")	26±0.15	1.2±0.10		0.53
25 (1")	34±0.15	1.2±0.10		0.70
35 (1 1/4")	42±0.15	1.3±0.10		0.94
40 (1 1/2")	48±0.15	1.3±0.10		1.08
55 (2")	60±0.15	1.5±0.10		1.57
65 (2 1/2")	76±0.20	1.8±0.10		2.38
80 (3")	89±0.20	2.3±0.10		3.56
100 (4")	114±0.30	2.6±0.10		5.17
125 (5")	140±0.30	3.4±0.20		8.29

Note:

1. Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
2. Weight per length in the table above are approximated values.



Unit: mm

Nominal Size	Outside Diameter	Inside Diameter	Thickness	Length	Weight per Length (Kg)
100 (4")	120±0.30	103.8	8.1±0.50	+30	16.29
				4000	
				-10	

6"UPVC Pipes One End with US Socket

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Unit: mm

Nominal Size	Dimensions of uPVC Pipe One End TS Socket				
	d ₁	dr	l	1/T	Z (min.)
15 (3/8")	18.4±0.2	17.5±0.3	26	1/30	3,950
18 (1/2")	22.4±0.2	21.4±0.3	30	1/34	3,945
20 (3/4")	26.4±0.2	25.3±0.3	35	1/34	3,940
25 (1")	34.6±0.2	33.3±0.3	41	1/34	3,935
35 (1 1/4")	42.6±0.2	41.2±0.3	46	1/34	3,930
40 (1 1/2")	48.7±0.3	47.2±0.4	55	1/37	3,920
55 (2")	60.8±0.3	59.0±0.4	63	1/37	3,910
65 (2 1/2")	76.6±0.3	75.2±0.4	63	1/48	3,910
80 (3")	89.6±0.3	88.2±0.4	64	1/49	3,905
100 (4")	114.7±0.3	113.2±0.4	84	1/56	3,885
125 (5")	140.8±0.4	139.0±0.4	104	1/58	3,860
150 (6")	166±0.4	163.9±0.4	132	1/63	3,830
200 (8")	217.9±0.8	213.8±0.9	200	1/50	3,750
250 (10")	269.3±0.9	264.2±1.0	250	1/50	3,700
300 (12")	320.7±1.0	314.6±1.1	300	1/50	3,645
350 (14")	373.1±1.0	366.0±1.1	350	1/50	3,595
400 (16")	423.6±1.2	415.5±1.3	400	1/50	3,540
450 (18")	474.0±1.2	464.9±1.3	450	1/50	3,490
500 (20")	524.5±1.3	514.4±1.4	500	1/50	3,435
600 (24")	635.3±2.1	623.2±2.2	600	1/50	3,330

Note:

1. Tolerance "l" for size 18-150 mm is $\pm 5\%$ mm and for 200-600 mm is $\pm 10\%$ mm.
2. "Z" is the effective length made from both plain end pipe of 4,000 mm length.
3. "T" depends on the size and class of fabricated pipe.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. uPVC Screen Pipe

7.1 Slotted uPVC Screen Pipe

Unit: mm

Nominal Size	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	Slot Width		b	No. of Slot on the Same Circumference	No. of Set per Length (4.00 m)	Approx. Opening Area
55 (2")	80±10	120±10	80±10	215	220	2.4±0.2	45°	23.5	8	7	5.7%
65 (2½")	80±10	120±10	80±10	215	220	2.4±0.2	36°	23.9	10	7	5.6%
80 (3")	80±10	120±10	80±10	210	220	2.4±0.2	30°	23.3	12	7	5.8%
100 (4")	80±10	120±10	80±10	210	220	2.4±0.2	22.5°	22.4	16	7	6.0%
125 (5")	80±10	120±10	80±10	205	220	2.4±0.2	20°	24.4	18	7	5.5%
150 (6")	80±10	120±10	80±10	200	220	2.4±0.2	18°	25.9	20	7	5.2%
200 (8")	130±10	205±10	75±10	450	320	2.4±0.2	15°	28.3	24	-	4.4%
250 (10")	120±10	210±10	90±10	395	335	2.4±0.2	12.9°	30.0	28	-	3.8%
300 (12")	140±10	210±10	55±10	380	360	2.4±0.2	12.9°	33.3	30	-	7.0%

Note:

- Standard length of "Slotted uPVC Screen Pipe" is 4000 mm..
- " α " depends on the size and class of fabricated pipe.
- For slot width differed from above table, please contact our sales department.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เดซิเบล

การบอกค่าสัญญาณ (Signal level) ในระบบโทรศัพท์ แรกเริ่มจะใช้ค่าของโวลเดจรวมกับค่าอิมพีแดนซ์เป็นตัวแสดงค่าระดับสัญญาณที่จุดต่างๆ ในระบบ เช่นกล่าวว่าสัญญาณที่จุดต่างๆ ในระบบ เช่นกล่าวว่าสัญญาณมีค่า 100 mV บนความต้านทาน 75Ω ดังนี้เป็นต้น แต่เนื่องจากไม่สะดวกจึงได้เปลี่ยนมาใช้ค่ากำลังของสัญญาณเป็นตัวบอกระดับสัญญาณแทน ดังเช่นจะกล่าวว่าระดับสัญญาณมีค่า 0.133 mV แทนที่จะกล่าวว่าสัญญาณมีค่า 100 mV บนความต้านทาน 75Ω

ในการที่จะแสดงค่าเปรียบเทียบระดับสัญญาณที่จุดสองจุดในโครงข่ายวงจรโทรศัพท์ แรกเริ่มก็คงใช้ค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณที่จุดสองจุด (สมมุติว่าเป็น P_1 และ P_2) นั้นเป็นตัวแสดงค่าเปรียบเทียบ แต่อย่างไรก็ดีการใช้ค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณ ซึ่งมีหน่วยเป็นเท่านี้ขาดความสะดวก และไม่มีควมคล่องตัวเท่าที่ควร ดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ เบล (Alexander Graham Bell) จึงได้เสนอการใช้ค่าลอการิทึมของอัตราส่วนของกำลังสัญญาณนั้น ในการแสดงค่าอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณที่จุดสองจุดแทน และมีการกำหนดเรียกหน่วยสำหรับค่าลอการิทึมของอัตราส่วนของสัญญาณนั้นว่า เบล (Bel) กล่าวคือ ค่าอัตราส่วน $\frac{P_1}{P_2}$ ซึ่งมีหน่วยเป็นเท่าจะกลายเป็น $\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ เบลแทน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าหน่วยเบลนี้เป็นหน่วยใหญ่ ค่าตัวเลขที่ได้ออกมาจากการคิดเช่นนี้จึงดูมีค่าน้อย เพราะฉะนั้นจึงได้คิดที่จะนำเอาหน่วยที่เล็กกว่าเบลลงไปอีก 10 เท่ามาใช้โดยใส่คำนำหน้า (Prefix) ว่าเดซิ (deci) ซึ่งหมายถึง $\frac{1}{10}$ เข้าไป ดังเช่นที่ใช้กันอยู่ในระบบเมตริกหรือระบบสากลทั่วไป (1 Bel = 10 deciBel) ทำให้อัตราส่วนของกำลัง $\frac{P_1}{P_2}$ หรือที่นิยมเรียกว่าอัตราขยายสัญญาณ เมื่อคิดในหน่วยเดซิเบล จึงมีค่าเท่ากับ $10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ เดซิเบลแทน กล่าวคือ

$$\text{อัตราขยายสัญญาณ} = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ เดซิเบล} \quad (\text{ค.1})$$

ตัวย่อของเดซิเบลคือ ดีบี (dB) เวลาเขียนเป็นภาษาอังกฤษนั้นตัวย่อจะใช้ d ซึ่งหมายถึง deci และ B หมายถึง Bel ซึ่งย่อมาจาก Bell อันเป็นชื่อของผู้เสนอการใช้หน่วยนี้ ดังกล่าวแล้ว ดังนั้นประเภทของตัวอักษรที่ใช้ย่อจึงต่างกัน อย่างไรก็ตามเวลาเขียนเป็นคำเต็มจะเขียนด้วยตัวอักษรประเภทเดียวกันคือ decibel ซึ่งเป็นเรื่องที่ควรสังเกต จึงนำมากล่าวไว้ในที่นี้

เมื่อพิจารณาต่อไปว่าถ้า P_1 นั้นเกิดจากค่าโวลเตจ V_1 บนความต้านทาน R_1 และ P_2 เกิดจากค่าโวลเตจ V_2 บนค่าความต้านทาน R_2 กล่าวคือ $P_1 = \frac{V_1^2}{R_1}$ และ $P_2 = \frac{V_2^2}{R_2}$ โดยการแทนค่าเหล่านี้ในสมการ (ค.2) จะได้

$$\text{อัตราขยายสัญญาณ} = 20\log_{10}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \text{ เดซิเบล} \quad (\text{ค.2})$$

ซึ่งเมื่อ $R_1 = R_2$ แล้วจะทำให้สมการที่ (ค.2) ลดรูปลงเหลือดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$\text{อัตราขยายสัญญาณ} = 20\log_{10}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \text{ เดซิเบล} \quad (\text{ค.3})$$

ดังนั้นเราจึงพบการคิดอัตราขยายสัญญาณในรูปสมการ (ค.3) อยู่เสมอ ในเมื่อมีการกำหนดค่าขนาดของสัญญาณที่จะเปรียบเทียบกับมาไว้ในรูปของแรงดันไฟฟ้า และ I_1 และ I_2 ในกรณีที่ค่าความต้านทาน R_1 มีเท่ากับค่าความต้านทาน R_2 จะได้

$$\text{อัตราขยายสัญญาณ} = 20\log_{10}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \text{ เดซิเบล} \quad (\text{ค.4})$$

และในกรณีที่ $R_1 = R_2$ แล้วจะทำให้สมการที่ (ค.4) ลดรูปลงเหลือดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$\text{อัตราขยายสัญญาณ} = 20\log_{10}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \text{ เดซิเบล} \quad (\text{ค.5})$$

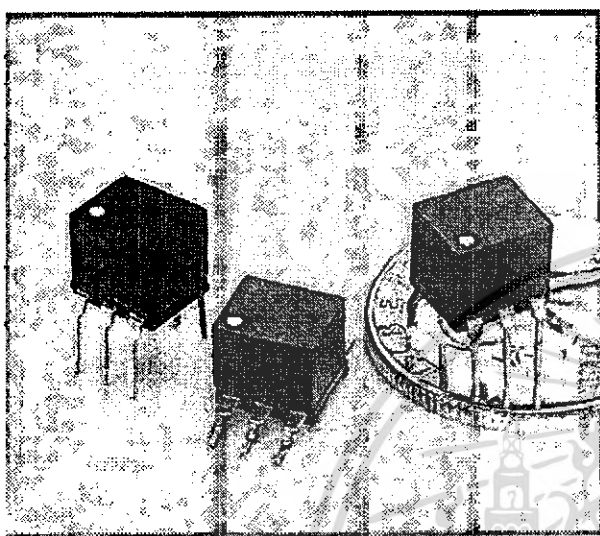
ข้อดีของการวัดค่าอัตราส่วนของระดับสัญญาณในหน่วย เดซิเบล คือทำให้สะดวกในการหาค่าอัตราขยาย หรืออัตราลดทอนสัญญาณของระบบที่ประกอบด้วยระบบย่อยๆ หลายระบบมาต่อเรียงกัน ทั้งนี้เพราะว่าค่าอัตราขยายหรืออัตราลดทอนสัญญาณของระบบใหญ่นั้นสามารถหาได้โดยง่าย ถ้าเราทราบค่าอัตราขยายหรืออัตราลดทอนสัญญาณของระบบย่อยๆ ทั้งหมดนั้น กล่าวเพียงแต่เราเอาค่าอัตราขยายหรืออัตราลดทอนสัญญาณของระบบย่อยๆ เหล่านั้นมารวมกันโดยวิธีการทางพีชคณิตธรรมดา เราก็จะได้ค่าอัตราขยายสัญญาณหรืออัตราลดทอนสัญญาณของระบบใหญ่ทันที ยกตัวอย่างเช่นถ้าระบบหนึ่งประกอบด้วยสัญญาณที่มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 30 เดซิเบล โดยที่ปลายทางด้านรับของสายส่งสัญญาณนั้นมีภาคขยายสัญญาณที่มีกำลังขยายเท่ากับ 10 เดซิเบล ต่ออยู่อีกภาคหนึ่งแล้วเราก็จะสามารถคำนวณได้ทันทีว่าระบบนี้มีกำลังขยายของระบบเท่ากับ 7 เดซิเบล ($30 - 33 + 10 = 7$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wideband RF Transformers



These wideband transformers feature 500 V isolation and a 1/4 Watt RF power rating. They are offered tapped or untapped and are packaged in a low-profile DIP-style plastic case. All parts are available in either a surface mount version or a through-hole version that's compatible with standard DIP sockets. (For a smaller package size and more values, see our TTWB Series.)

Applications include impedance matching, voltage or current transformation, DC isolation, balanced/unbalanced mixing, matching, power splitting, coupling and signal inversion.

Custom wideband transformers with special combinations of impedance ratio, insertion loss, frequency response and current handling are also available.

Schematic	Part number		Impedance ratio pri:sec	I _{OC} max (mA)	Frequency (MHz)	Pins 1-3		Pins 6-4	
	Through-hole	Surface mount ¹				L min ² (μH)	DCR max (Ohms)	L min ² (μH)	DCR max (Ohms)
	WB1010-PCL	WB1010-SML	1:1	250	0.005-100	780	0.320	780	0.320
	WB1010-1-PCL	WB1010-1-SML	1:1	250	0.04-175	95	0.200	95	0.200
	WB1015-PCL	WB1015-SML	1.5:1	250	0.1-150	80	0.145	51	0.130
	WB1040-PCL	WB1040-SML	4:1	250	0.2-300	95	0.160	25	0.115
	WB2010-PCL	WB2010-SML	1:1	250	0.005-100	780	0.320	780	0.320
	WB2010-1-PCL	WB2010-1-SML	1:1	250	0.04-175	95	0.200	95	0.200
	WB2040-PCL	WB2040-SML	4:1	250	0.2-300	95	0.160	25	0.115
	WB3010-PCL	WB3010-SML	1:1	250	0.005-100	780	0.320	780	0.320
	WB3010-1-PCL	WB3010-1-SML	1:1	250	0.04-175	95	0.200	95	0.200
	WB3015-PCL	WB3015-SML	1.5:1	250	0.1-150	80	0.145	51	0.130
	WB3040-PCL	WB3040-SML	4:1	250	0.2-300	95	0.160	25	0.115

1. When ordering, please specify a packaging code:

WB3040-SMLD

Packaging: D = 13" machine ready reel. EIA-481 embossed plastic tape (500 parts per full reel).

B = Less than full reel. In tape, but not machine ready. To have a leader and trailer added (\$25 charge), use code letter D instead.

- Inductance tested at 100 kHz, 0.1 Vrms, 0 Adc.
- 500 Vrms isolation, primary to secondary
- 1/4 Watt RF power rating
- Operating temperature range -40°C to +85°C.
- Electrical specifications at 25°C.

Coilcraft®

Specifications subject to change without notice.

Please check our website for latest information. Document 116-1 Revised 01/31/05

1102 Silver Lake Road Cary, Illinois 60013 Phone 847/639-6400 Fax 847/639-1469

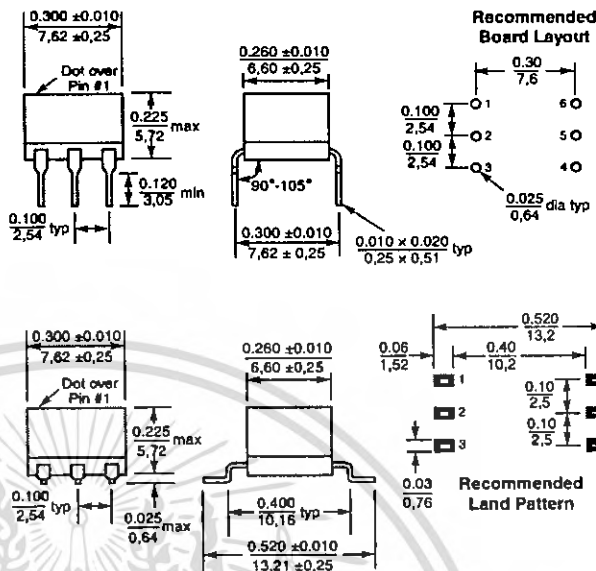
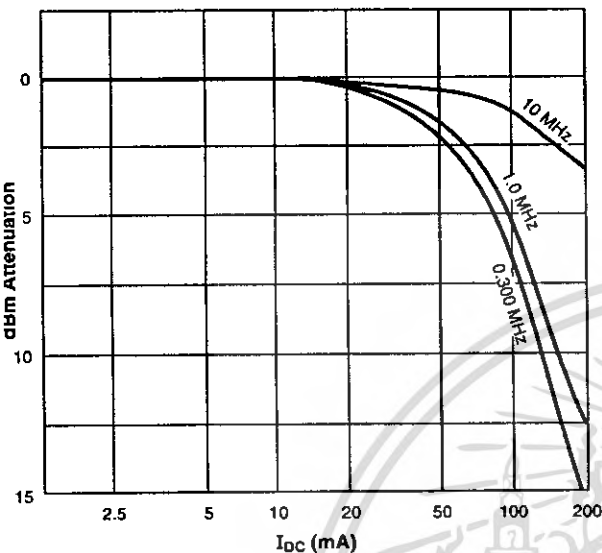
E-mail info@coilcraft.com Web <http://www.coilcraft.com>

© Coilcraft, Inc. 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wideband RF Transformers

Typical Attenuation vs Current

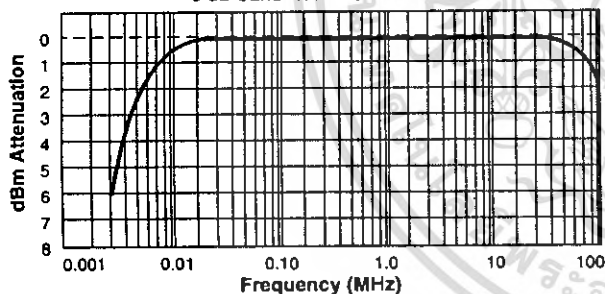


For WB10XX, pins 2 and 5 are removed during manufacture.
For WB20XX, pin 2 is removed during manufacture.

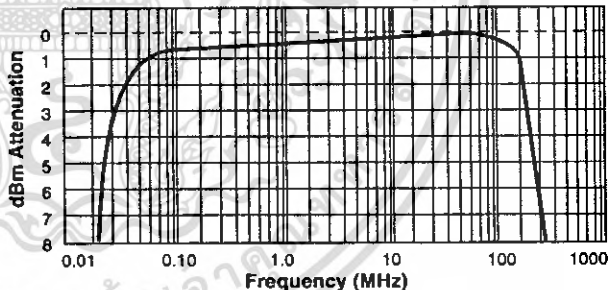
Terminations: Nickel/tin over copper
Tape and reel for surface mount parts: 500/13" reel 24 mm tape width
For packaging data see Tape and Reel Specifications section.

Typical Frequency Response

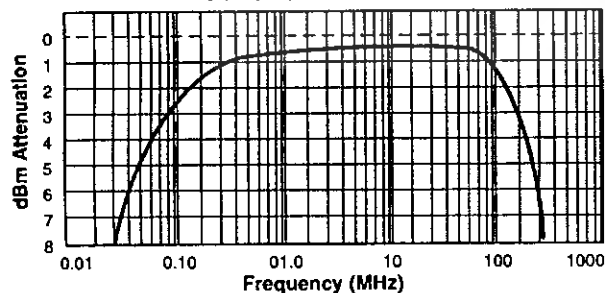
WB1010, WB2010, WB3010
3 dB bandwidth 0.005 – 100 MHz



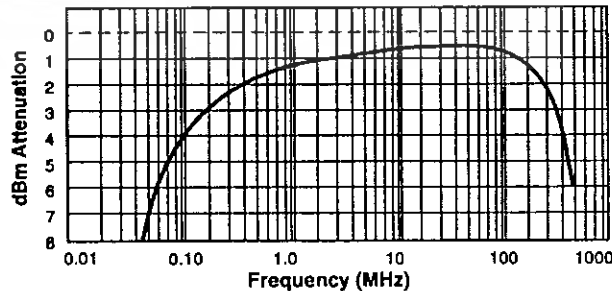
WB1010-1, WB2010-1, WB3010-1
3 dB bandwidth 0.04 – 175 MHz



WB1015, WB3015
3 dB bandwidth 0.1 – 150 MHz



WB1040, WB2040, WB3040
3 dB bandwidth 0.2 – 300 MHz



Specifications subject to change without notice.
Please check our website for latest information. Document 116-2 Revised 01/31/05

1102 Silver Lake Road Cary, Illinois 60013 Phone 847/639-6400 Fax 847/639-1469
E-mail info@coilcraft.com Web http://www.coilcraft.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้