

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ

Demonstration Kit for Conducted EMI Emission

นาย ชัชชาย นวมโคกสูง
นาย ชานนท์ หอมแก่นจันทร์
นาย สาธิต สุวรรณเศรษฐ์
นาย อิศรา มามาตร

วันที่
๒๕/๐๖/๒๕๕๙

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 62477

วัน,เดือน,ปี 18 ส.ค. 2549

b..... 11625๕๕
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ

Demonstration Kit for Conducted EMI Emission



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ

ผู้จัดทำ

1. นาย ชัชชาย นวมโคกสูง
2. นาย ชานนท์ หอมแก่นจันทร์
3. นาย สาธิต สุวรรณเศรษฐ์
4. นาย อิศรา มามาตร

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEMONSTRATION KIT FOR CONDUCTED EMI EMISSION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำ

ชัชชาย นวมโคกสูง

ชานนท์ หอมแก่นจันทร์

สาธิต สุวรรณเศรษฐ์

อิศรา มามาตร

รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชื่นเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้าง โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (line impedance stabilization network: LISN) และ ชุดแยกสัญญาณรบกวน (noise separator) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และศึกษาถึงผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มาตามสายตัวนำ (conducted electromagnetic interference: EMI) โดยทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้าง Noise Separator ไว้สองแบบด้วยกันและยังได้กล่าวถึงวิธีการพิสูจน์ว่า Noise Separator ทั้งสองแบบที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถที่จะแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode interference: DM) และ โหมดผลร่วม (common mode interference: CM) ออกจากสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (total noise) ได้จริงวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือใช้ LISN ที่สร้างขึ้นมามาดูรวมในชุดทดลอง EMI Toolkit เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำโดยจะทำหน้าที่ coupling สัญญาณส่งผ่านไปยังชุดแยกสัญญาณรบกวน และใช้ชุดแยกสัญญาณรบกวน แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง และโหมดผลร่วม ออกจากกัน การที่เราสามารถแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โหมดผลต่าง และโหมดผลรวมออกมาได้นั้นจะส่งผลดีไปถึงการศึกษและออกแบบวงจรกรอง EMI ให้เหมาะสมต่อไป

DEMONSTRATION KIT FOR CONDUCTED EMI EMISSION

Chachchai Nuamkhoksung

Chanon Homkanjun

Satit Suwanset

Isara Mamart

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

ABSTRACT

This thesis presents how to design and establish the line impedance stabilization network (LISN) and noise separator for separating the conducted EMI emission. In this research, there are two types of noise separators for investigating the conducted EMI, generated by EMI toolkit.

Main objectives of research are not only to stabilize the impedance ($50\ \Omega$) for both line to ground and neutral to ground connected to equipment under test (EUT) but to separate the conducted noise also. noise separator separates the total noise, detected by the conventional LISN and the spectrum analyzer, into two components: differential mode and common mode interference. Finally, the noise separator can be applied to effectively design the EMI filter step-by-step.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ที่คอยหยิบยื่นโอกาสในการเรียนรู้ และประสบการณ์การใช้ชีวิตในสังคม อันมีค่า อาจารย์ผู้คอยให้คำปรึกษาตลอด ถึงแม้งานด้านการบริหารสถาบัน จะทำให้อาจารย์มีเวลาน้อยลง แต่อาจารย์ก็เปิดโอกาสให้ปรึกษาได้เสมอ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒองค์รักษ์ อาจารย์ที่สละเวลาส่วนตัวอันมีค่ามาให้คำแนะนำและให้ความกระจ่างในการทำโครงการ แนะนำการทำงานอย่างมีระเบียบแบบแผนและผลักดันให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ประชา คำภักดี, พี่ปฏิวัติ บุญมา, พี่ธนคณิต ดำรงค์กิตติกุล, พี่ดำรงศ สกุลศิริรักษ์ และรุ่นพี่ปริญญาโทห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ทุกคนที่คอยชี้แนวทางเมื่อโครงการเกิดปัญหา ช่วยชี้หนทางการวางระเบียบในการทำโครงการ คอยให้คำปรึกษาและสอนถึงวิธีใช้เครื่องมือ ในห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งไมตรีจิตที่ดีต่อคณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่น 15 วิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรต่อเนื่อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจให้คำปรึกษา เมื่อมีปัญหาหลายใจ เพื่อนที่คอยช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ผู้ที่คอยให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและทุก ๆ ด้านที่เห็นว่ามีผลสำคัญต่อตัวลูก ผู้ที่คอยให้กำลังใจกำลังกาย ในการเรียนด้วยดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัย ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่าน

ด้วยใจจริง

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมภาค	III
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 เป้าหมายของโครงการ	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	3
1.5.1 ตารางการดำเนินงาน	3
1.5.2 แผนผังการทำงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ความรู้พื้นฐานด้าน EMC	5
2.2.1 Electromagnetic Compatibility (EMC)	5
2.2.2 Electromagnetic Disturbance (EMD)	5
2.2.3 Electromagnetic Interference (EMI)	5
2.2.4 ชนิดของ Electromagnetic Interference (EMI)	5
2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.3.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ	6
2.3.2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก	6
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.4.1 สัญญาณรบกวน	7
2.4.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ	9
2.5 สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	12
2.5.1 ส่วนประกอบแอ็กทีฟ (active components)	12
2.5.2 ส่วนประกอบพาสซีฟ (passive components)	15
2.5.3 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6	มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	19
2.6.1	FCC REGULATIONS	19
2.6.2	CISPR	20
2.6.3	มาตรฐานทางการทหาร	20
2.6.4	VDE	20
2.6.5	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	20
2.7	การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในดัดนำตามมาตรฐาน CISPR	22
2.7.1	AMN/LISN	22
2.7.2	แผ่นกราวด์	24
2.7.3	เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัด	25
2.7.4	การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางดัดนำ	25
บทที่ 3	LISN	27
3.1	ที่มาของ LISN	27
3.2	ชนิดของ LISN	29
3.2.1	V – Network	29
3.2.2	Delta – Network	32
3.3	การจำลองระบบ (Simulation)	34
3.3.1	วัตถุประสงค์ของการจำลองระบบ	35
3.3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบ	35
3.3.3	เงื่อนไขการจำลองวงจร	35
3.4	การออกแบบดัดนำและผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้า	36
3.4.1	การวัดค่าความเหนี่ยวนำของ $L_1, L_2 = 250 \mu\text{H}$	38
3.4.2	การวัดค่าความเหนี่ยวนำของ $L_3, L_4 = 50 \mu\text{H}$	41
3.5	การวัดค่าความเก็บประจุ	43
3.5.1	การวัดค่าความเก็บประจุของ $C_1, C_2 = 3 \mu\text{F}$	43
3.5.2	การวัดค่าความเก็บประจุของ $C_3, C_4 = 8 \mu\text{F}$	44
3.5.3	การวัดค่าความเก็บประจุของ $C_5, C_6, C_7 = 0.47 \mu\text{F}$	45
3.6	การวัดค่าความต้านทาน	46
3.6.1	การวัดค่าความต้านทานของ $R_1, R_2, R_5, R_6 = 39 \text{ k}\Omega$	46
3.6.2	การวัดค่าความต้านทานของ $R_3, R_4 = 5\Omega$	47
3.6.3	การวัดค่าความต้านทานของ $R_7 = 50 \Omega$	48
3.6.4	การวัดค่าความต้านทานของ $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$	49
3.7	รูปแบบภายในและลักษณะการวางอุปกรณ์ของ LISN ที่นำเสนอ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ LISN ที่นำเสนอ	53
3.8.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมดต่างๆ	53
3.8.2 การทดสอบวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ภายในที่ขนาดกระแสไหลดต่างๆ	63
3.8.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	65
บทที่ 4 วงจรแยกสัญญาณรบกวน	75
4.1 บทนำ	75
4.2 การออกแบบและสร้างวงจรแยกสัญญาณรบกวน	75
4.2.1 ข้อมูลวงจรแยกสัญญาณรบกวน	75
4.2.2 คุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์	79
4.2.3 การทดสอบเก็บค่าความเหนี่ยวนำ WB 1010 และ WB 2010	80
4.2.4 การสร้างชิ้นงาน	85
4.2.5 การทดสอบเก็บค่าอิมพีแดนซ์	86
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	91
4.3.1 ประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนของ Noise Separator T1010	92
4.3.2 ประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนของ Noise Separator T2010	175
4.4 การพิสูจน์ความถูกต้องของประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	222
4.4.1 ผลการการแปลงค่า log scale ของ Noise Separator T1010	223
4.4.2 ผลการการแปลงค่า log scale ของ Noise Separator T2010	224
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์	233
5.1 บทวิจารณ์ LISN	233
5.2 บทสรุป LISN ที่นำเสนอ	233
5.3 บทวิจารณ์ วงจรแยกสัญญาณรบกวน	234
5.4 บทสรุป วงจรแยกสัญญาณรบกวน	234
5.5 ข้อเสนอแนะ	235
เอกสารอ้างอิง	235
ภาคผนวก ก	236
ภาคผนวก ข	241
ภาคผนวก ค	258

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้าที่
1.1	แผนผังการทำงานการทำงาน.....	4
2.1	ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.2	ความสัมพันธ์ของนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.3	สัญญาณรบกวนที่สร้างโดยธรรมชาติและมนุษย์.....	8
2.4	การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ.....	10
2.5	การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	10
2.6	ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง.....	11
2.7	ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม.....	11
2.8	ตัวอย่างการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	12
2.9	ตัวอย่างองค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	13
2.10	ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส.....	14
2.11	ตัวอย่างผลขององค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะสวิตช์เริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส.....	15
2.12	ตัวอย่างส่วนประกอบแฝงในหม้อแปลงความถี่สูงและฟาราเดย์ซิลต์.....	16
2.13	ตัวอย่างผลของส่วนประกอบแฝงในอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้าและสายตัวนำที่ความถี่สูง.....	16
2.14	องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า.....	18
2.15	องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	18
2.16	องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุ.....	19
2.17	ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของข้อกำหนดและมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ.....	21
2.18	เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR.....	23
2.19	วงจรถ AMN/LISN ตามมาตรฐาน CISPR.....	23
2.20	การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN.....	24
2.21	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ.....	26
3.1	สัญญาณรบกวนจากภายนอกวงจร.....	27
3.2	สัญญาณรบกวนจากวงจรระบบภายนอก.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3	การทำงานของ LISN.....	29
3.4	โครงข่ายของ $50 \Omega / 50 \mu\text{H} + 5 \Omega$	30
3.5	โครงข่ายของ $50 \Omega / 50 \mu\text{H}$	31
3.6	โครงข่ายของ Delta – Network 150Ω	32
3.7	วงจรสมมูล LISN ที่นำเสนอ	34
3.8	วงจรรายในของ LISN เมื่อป้อนใส่โปรแกรม PSpice.....	35
3.9	ผลของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์.....	36
3.10	วงจรรายปรีนแวงสวิทช์เลือกโหมด line to ground (L-G) และโหมด neutral to ground (N-G).....	36
3.11	การติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนสายปรีน.....	37
3.12	ท่อ PVC ที่ใช้ทำแกนตัวเหนี่ยวนำ $L_1, L_2 = 250 \mu\text{H}$ และ $L_3, L_4 = 50 \mu\text{H}$ ทนอุณหภูมิความร้อนได้สูงสุด 60°C	37
3.13	$L_1, L_2 = 250 \mu\text{H}$	38
3.14	กราฟค่าความเหนี่ยวนำ $L_1, L_2 = 250 \mu\text{H}$	38
3.15	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$ เมื่อเราทราบค่าตัวเหนี่ยวนำจากวงจร เราคำนวณรอบได้โดย.....	38
3.16	ลักษณะการพันขดลวดของ $L_1, L_2 = 250 \mu\text{H}$	40
3.17	$L_3, L_4 = 50 \mu\text{H}$	41
3.18	กราฟค่าความเหนี่ยวนำ $L_3, L_4 = 50 \mu\text{H}$	41
3.19	ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	41
3.20	ลักษณะการพันขดลวดของ $L_3, L_4 = 50 \mu\text{H}$	42
3.21	ตัวเก็บประจุ $C_1, C_2 = 3 \mu\text{F}$	43
3.22	กราฟค่าความเก็บประจุ $C_1, C_2 = 3 \mu\text{F}$	43
3.23	ค่าความเก็บประจุที่ความถี่ $50 \text{ kHz} - 500 \text{ kHz}$	43
3.24	ตัวเก็บประจุ $C_3, C_4 = 8 \mu\text{F}$	44
3.25	กราฟค่าความเก็บประจุ $C_3, C_4 = 8 \mu\text{F}$	44
3.26	ค่าความเก็บประจุที่ความถี่ $100 \text{ kHz} - 120 \text{ kHz}$	44
3.27	ตัวเก็บประจุ $C_5, C_6, C_7 = 0.47 \mu\text{F}$	45
3.28	กราฟค่าความเก็บประจุ $C_5, C_6, C_7 = 0.47 \mu\text{F}$	45
3.29	ค่าความเก็บประจุที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	45
3.30	ตัวต้านทาน $R_1, R_2, R_5, R_6 = 39 \text{ k}\Omega$	46
3.31	กราฟค่าความต้านทาน $R_1, R_2, R_5, R_6 = 39 \text{ k}\Omega$	46
3.32	ค่าความต้านทานที่ความถี่ $150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$	47
3.33	ตัวต้านทาน $R_3, R_4 = 50 \Omega$	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.34	กราฟค่าความต้านทาน $R_3, R_5 = 5\Omega$	47
3.35	ค่าความต้านทานที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	48
3.36	$R_7 = 50 \Omega$	48
3.37	กราฟค่าความต้านทาน $R_7 = 50 \Omega$	48
3.38	ค่าความต้านทานที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	49
3.39	ตัวต้านทาน $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$	49
3.40	กราฟค่าความต้านทาน $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$	49
3.41	ค่าความต้านทานที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	50
3.42	ภาพถ่ายด้านข้างสำหรับการต่อและการวางอุปกรณ์ภายใน LISN ที่นำเสนอ...	50
3.43	ภาพถ่ายสำหรับการต่อและการวางอุปกรณ์ภายใน LISN ที่นำเสนอ.....	51
3.44	ภาพถ่ายด้านบนสำหรับการต่อและการวางอุปกรณ์ภายใน LISN ที่นำเสนอ.....	51
3.45	LISN ที่นำเสนอ.....	52
3.46	การต่อทดสอบ LISN ที่นำเสนอ กับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ.....	52
3.47	การต่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) โมด line to ground (L-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่ โมด line (L).....	53
3.48	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ ไปที่โมด line (L) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	53
3.49	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ไปที่ โมด line (L) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	54
3.50	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด line to ground (L-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โมด line (L) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	54
3.51	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ที่ โมด line (L) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	55
3.52	การต่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) โมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่ โมด Line (L).....	55
3.53	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โมด line (L) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	56
3.54	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด neutral to ground (N-G) โดยบิตสวิตช์ ไปที่โมด line (L) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	56
3.55	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โมด line (L) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	57
3.56	อิมพีแดนซ์ (impedance) ในโมด neutral to ground (N-G) โดยบิตสวิตช์ไป ที่โมด line (L) ที่ความถี่ 150 Hz – 30 MHz.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.57	การต่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) โหมด line to ground (L-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด Neutral (N).....	58
3.58	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ ไปที่โหมด Neutral (N) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	58
3.59	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ไปที่ โหมด Neutral (N) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	59
3.60	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด line to ground (L-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด Neutral (N) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	59
3.61	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด line to ground (L-G) โดยบิตสวิตช์ไปที่ โหมด Neutral (N) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	60
3.62	การต่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) โหมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด Neutral (N).....	60
3.63	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	61
3.64	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด neutral to ground (N-G) โดยบิตสวิตช์ ไปที่โหมด neutral (N) ที่ความถี่ 9 kHz – 150 kHz.....	61
3.65	กราฟอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด neutral to ground (N-G) โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	62
3.66	ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ในโหมด neutral to ground (N-G) โดยบิตสวิตช์ ไปที่โหมด neutral (N) ที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz.....	62
3.67	การต่อ LISN ที่นำเสนอ เพื่อทำการทดสอบ.....	64
3.68	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิตสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1.....	65
3.69	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิตสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1.....	65
3.70	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิตสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 2.....	66
3.71	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิตสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 2.....	66
3.72	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิต สวิตช์ไปที่โหมด line (L) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ ครั้งที่ 2.....	67
3.73	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวน Noise floor โดยบิตสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ ครั้งที่ 2.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.74	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1.....	68
3.75	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1.....	68
3.76	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 2.....	69
3.77	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 2.....	69
3.78	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ ครั้งที่ 2.....	70
3.79	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ ครั้งที่ 2.....	70
3.80	กราฟสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ของ commercial LISN.....	71
3.81	กราฟสัญญาณรบกวน Noise floor โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ commercial LISN.....	71
3.82	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดไปที่โหมด line (L) ของ commercial LISN.....	72
3.83	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ของ commercial LISN.....	72
3.84	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ commercial LISN	73
3.85	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า Noise floor โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ ครั้งที่ 1 กับ commercial LISN.....	73
3.86	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (noise) โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด line (L) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ กับ commercial LISN.....	74
3.87	กราฟการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวน Noise โดยบิดสวิตช์ไปที่โหมด neutral (N) ระหว่าง LISN ที่นำเสนอ กับ commercial LISN.....	74
4.1	การติดตั้งทดสอบ การวัด EMI ที่มาจากสายตัวนำ.....	75
4.2	DM rejecter และ CM rejecter.....	76
4.3	วงจรมุมลภายในของ Noise Separator T1010.....	77
4.4	วงจรมุมลภายในของ Noise Separator T2010.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5	ลายวงจรและการจัดวางอุปกรณ์ของ Noise Separator T1010.....	78
4.6	ลายวงจรและการจัดวางอุปกรณ์ของ Noise Separator T2010.....	79
4.7	อุปกรณ์ WB 1010 และ WB 2010 (Wideband RF Transformer).....	79
4.8	กราฟความเหนี่ยวนำ WB 1010 วัดขา 1 กับ 3.....	80
4.9	ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 1010 วัดขา 1 กับ 3.....	80
4.10	กราฟความเหนี่ยวนำWB 1010 วัดขา 4 กับ 6.....	81
4.11	ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 1010 วัดขา 4 กับ 6.....	81
4.12	กราฟความเหนี่ยวนำ WB 2010 วัดขา 1 กับ 3.....	82
4.13	ตารางค่าค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 วัดขา 1 กับ 3.....	82
4.14	กราฟความเหนี่ยวนำ WB 2010 No.1 วัดขา 4 – 5.....	83
4.15	ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 No.1 วัดขา 4 – 5.....	83
4.16	กราฟค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 วัดขา 5 กับ 6.....	84
4.17	ตารางค่าความเหนี่ยวนำ WB 2010 วัดขา 5 กับ 6.....	84
4.18	การต่อวัตต์อิมพีแดนซ์ของ Noise Separator	85
4.19	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ Noise Separator T1010 ด้าน line to ground.....	86
4.20	ตารางค่าอิมพีแดนซ์ Noise Separator T1010 ด้าน line to ground	86
4.21	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ Noise Separator T1010 ด้าน neutral to ground.....	87
4.22	ตารางค่าอิมพีแดนซ์ Noise Separator T1010 ด้าน neutral to ground ...	87
4.23	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของ Noise Separator T2010 ด้าน line to ground	88
4.24	ตารางค่าอิมพีแดนซ์ของ Noise Separator T2010 ด้าน line to ground	88
4.25	กราฟค่าอิมพีแดนซ์ T2010 ด้าน neutral to ground	89
4.26	ตารางค่าอิมพีแดนซ์ T2010 ด้าน neutral to ground	89
4.27	Noise Separator T1010.....	90
4.28	Noise Separator T2010.....	90
4.29	การต่อวงจรการทำงานของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ.....	91
4.30	วงจรสมมูลการต่อวงจร.....	91
4.31	สัญญาณรบกวนในโมดต่างๆโดยใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ...	93
4.32	สัญญาณรบกวนในโมดต่างๆเมื่อช่วงเวลาพื้นตัวย้อนกลับของไดโอด แตกต่างกันโดยใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	94
4.33	สัญญาณรบกวนในโมดต่างๆเมื่อต่อ Heatsink ลงกราวด์ใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	96
4.34	สัญญาณรบกวนในโมดต่างๆ เมื่อ Self Resonant Frequency ของ ตัวเหนี่ยวนำต่างกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.35	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ โดยการต่อและไม่ต่อ RC filterและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	100
4.36	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อเพิ่มความถี่ในการสวิตซ์ของ Gate drive และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	102
4.37	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนโหลดจาก R เป็น โหลด R-Lและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	104
4.38	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อมีการสวิตซ์มอสเฟต โดยการต่อและไม่ต่อ วงจรสับเบอร์ที่มอสเฟตและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	106
4.39	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	108
4.40	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	110
4.41	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	112
4.42	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	114
4.43	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{M1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	116
4.44	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	118
4.45	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และ C_{M1} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	120
4.46	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	122
4.47	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} และ C_{M1} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	124
4.48	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	126
4.49	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} และ C_{M1} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	128
4.50	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	130
4.51	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} และ C_{M1} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.52	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{M1} และ C_{M2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	134
4.53	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	136
4.54	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} และ C_{M1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	138
4.55	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} , C_{M1} และ C_{M2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	140
4.56	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และ C_{y1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	142
4.57	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{y1} และ C_{y2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	144
4.58	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} และ C_{y1} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	146
4.59	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} , C_{y1} และ C_{y2} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	148
4.60	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อชุดวงจร EMI Filter และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	150
4.61	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยใส่ L_{GND} และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	152
4.62	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ เมื่อตัวเหนี่ยวนำของวงจร Boost converter อยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (D_{CM} mode) และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	154
4.63	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยใช้ Ferrite shield และใช้ Noise Separator T1010 แยกสัญญาณ.....	156
4.64	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ โดยใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	158
4.65	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อช่วงเวลาพีดตัวย้อนกลับของไดโอดแตกต่างกัน โดยใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	160
4.66	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อต่อ Heatsink ลงกราวด์ โดยใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	162
4.67	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อ Self resonant frequency : SRF ของตัวเหนี่ยวนำต่างกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	164
4.68	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ โดยการต่อและไม่ต่อ RC filter และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.69	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อเพิ่มความถี่ในการสวิตชิงของ Gate drive และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	168
4.70	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนโหลดจาก R เป็นโหลด R-L และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	170
4.71	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ เมื่อมีการสวิตชิงมอสเฟต โดยการต่อและไม่ต่อ วงจรสับเบอร์ที่มอสเฟตและใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	172
4.72	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และใช้ Noise T2010 แยกสัญญาณ.....	174
4.73	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	176
4.74	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	178
4.75	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y2} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	180
4.76	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{M1} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	182
4.77	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	184
4.78	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และ C_{M1} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	186
4.79	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	188
4.80	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} และ C_{M1} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	190
4.81	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x2} , C_{M1} และ C_{M2} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	192
4.82	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} และ C_{M1} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	194
4.83	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกันและใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	196
4.84	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} และ C_{M1} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	198
4.85	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{M1} และ C_{M2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.86	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	202
4.87	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} และ C_{M1} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	204
4.88	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{y1} , C_{y2} , C_{M1} และ C_{M2} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	206
4.89	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} และ C_{y1} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	208
4.90	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{y1} และ C_{y2} ร่วมกัน และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ	210
4.91	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} และ C_{y1} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	212
4.92	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อ C_{x1} , C_{x2} , C_{y1} และ C_{y2} โดยใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	214
4.93	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยต่อชุดวงจร EMI Filter ใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	216
4.94	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยใส่ L_{GND} และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	218
4.95	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ เมื่อตัวเหนี่ยวนำของวงจร converter อยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (D_{CM} mode) และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	220
4.96	สัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ที่มากับสายตัวนำ โดยใช้ Ferrite shield และใช้ Noise Separator T2010 แยกสัญญาณ.....	222
4.97	กราฟเปรียบเทียบ $\frac{(2V_{DM} + 2V_{CM})}{2}$ กับ V_{Total} ของ Noise Separator T1010....	224
4.98	กราฟเปรียบเทียบ $V_{DM} + V_{DM}$ กับ V_{Total} ของ Noise Separator T2010.....	225

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1.1 ตารางการดำเนินงาน.....	3
2.1 สรุปผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ.....	17
2.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
3.1 แสดงองค์ประกอบค่าของโครงข่าย $50 \Omega/50 \mu H + 5\Omega$	29
3.2 แสดงองค์ประกอบค่าของโครงข่าย $50 \Omega/50 \mu H$	30
3.3 แสดงองค์ประกอบค่าของโครงข่าย $50 \Omega/5 \mu H + 1\Omega$	31
3.4 แสดงองค์ประกอบค่าของโครงข่าย 150Ω	32
3.5 แสดงองค์ประกอบค่าของโครงข่าย 150Ω ของ Delta – Network.....	33
4.1 เปรียบเทียบ $\frac{(2V_{DM} + 2V_{CM})}{2}$ กับ V_{Total} ของ Noise Separator T1010.....	223
4.2 เปรียบเทียบ $V_{DM} + V_{CM}$ กับ V_{Total} ของ Noise Separator T2010	224
4.3 หัวข้อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณของ Noise Separator T1010.....	225
4.4 หัวข้อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณของ Noise Separator T2010.....	229

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและปัญหา

ปัจจุบันได้มีการนำวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำให้วงจรต่างๆต้องทำงานในระยะเวลาใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นผลก็คือ วงจรเหล่านั้นอาจสร้างสัญญาณรบกวนกันและกันโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังนำวงจรจำนวนมากมารวมกันตั้งนั้นเพื่อให้งจรจำนวนมาก มารวมกันภายใต้พื้นที่เล็กลงอย่างเช่นวงจรอินทิเกรทจะมีส่วนในการเพิ่มปัญหาเรื่อง สัญญาณรบกวนตั้งนั้นเพื่อให้งจรสามารถทำงานได้ดีในสภาวะแวดล้อมจริง ผู้ออกแบบวงจรจำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนด้วย โดยวงจรนั้นต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนแก่วงจรอื่นจนเกินขอบเขต อีกทั้งจะต้องสามารถทนการรบกวนจากวงจรอื่นได้ตามกำหนด

เนื่องด้วยโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ Line Impedance Stabilization Network (LISN) มีหน้าที่ป้องกันผลการรบกวนระหว่างไฟฟ้าแหล่งจ่าย (Grid หรือไฟจากการไฟฟ้า) กับเครื่องมือที่จะทำการวัด (equipment under test: EUT) และต้องรักษา matching impedance ที่ 50Ω โดย LISN นี้จะเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านไปยัง spectrum analyzer ในรูปของสัญญาณรบกวนโมดผลรวม (total noise Interference) คือ มีทั้งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโมดผลต่าง (differential Mode Interference: DM) และโมดผลรวม (common Mode Interference: CM) รวมกันซึ่งจะทำให้ยากต่อการวิเคราะห์และเมื่อทำการกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่พิจารณา เราสามารถที่จะลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าใน โมดผลต่าง หรือ โมดผลรวมได้เล็กน้อยเพียงใด จึงเป็นที่มาของโครงการศึกษาและสร้างชุดแยกสัญญาณในโมดผลต่างและโมดผลรวมออกจากกัน

ซึ่งจากการค้นคว้าในเรื่องของ noise separator นั้นทำให้เราทราบว่า จะต้องมีการใช้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางด้าน Line to Ground (L-G) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้าน neutral to ground (N-G) ซึ่งส่งผ่านมาจาก LISN ป้อนให้กับด้านเข้า (input) ของ noise separator พร้อมกัน

แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์ในการทดสอบ คือห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ามี LISN เพียงตัวเดียว ซึ่งไม่สามารถให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโมดผลต่าง และ โมดผลรวม ออกมาพร้อมกัน ด้วยเหตุนี้โครงการนี้จึงได้สร้าง LISN ขึ้นมาอีก 1 ตัวในที่นี้จะเรียกว่า LISN ที่นำเสนอ เพื่อใช้งานร่วมกับ commercial LISN ตัวเดิมที่มีอยู่ โดยในการออกแบบสร้าง LISN ที่นำเสนอ ในโครงการนี้ได้ยึดถือเอาวงจรสมมูล รวมไปถึงค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่เป็นมาตรฐาน international special committee on radio interference (CISPR 16) แต่เนื่องด้วยอุปกรณ์บางตัวไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป ในโครงการนี้จึงได้ใช้ค่าของอุปกรณ์ที่ใกล้เคียงและบางตัวก็ออกแบบและสร้างขึ้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อให้เกิดความเข้าใจในด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference: EMI) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.2.2 เพื่อแยกสัญญาณโมดผลต่าง (DM) และ โมดผลร่วม (CM) ออกจากสัญญาณรบกวนโมดผลรวม (total noise)

1.2.3 ใช้ Noise separator ต่อร่วมในวงจร เพื่อแยกและวิเคราะห์ การลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโมดผลต่าง(DM) และโมดผลร่วม(CM) ร่วมกับชุดทดลอง EMI toolkit

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (noise separator)

1.3.2 สร้างชุดศึกษาการแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จำนวน 2 แบบ

1.3.3 ศึกษาและสร้างชุดศึกษา LISN ที่นำเสนอ

1.4 เป้าหมายของโครงการ

เป้าหมายของโครงการนี้ คือ การวัดและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มากับสายตัวนำ เพื่อทำการออกแบบวงจรและสร้างชุดแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ทำการกำหนดเป้าหมายไว้ดังนี้

1.4.1 เข้าใจการเกิดสัญญาณรบกวน

1.4.2 วิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรแยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.3 แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโมดผลต่าง (DM) และ โมดผลร่วม (CM) ออกจากสัญญาณรบกวนโมดผลรวม (total noise) ได้

1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.5.1 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

ภาคการศึกษาที่ 1				
ขั้นตอนการดำเนินงาน	2548			
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและโครงการในอดีตที่เกี่ยวข้อง	การวางแผน			
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลของ Noise Separator และ LISN		การปฏิบัติงานจริง		
3. ออกแบบและสร้าง Simplified LISN		การปฏิบัติงานจริง		
4. ทดสอบและเก็บค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของ Simplified LISN			การปฏิบัติงานจริง	
5. เก็บค่าผลการทดสอบดูประสิทธิภาพการทำงานของ Simplified LISN				การปฏิบัติงานจริง
ภาคการศึกษาที่ 2				
ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2548		พ.ศ. 2549	
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
6. ออกแบบและสร้าง Noise Separator ต้นแบบ	การวางแผน			
7. ทำการวัดเก็บผลการทดสอบ Noise Separator ต้นแบบ		การปฏิบัติงานจริง		
8. ออกแบบสร้างชิ้นงาน Noise Separator		การปฏิบัติงานจริง		
9. ทดสอบชิ้นงาน Noise Separator และเก็บผลการทดลอง			การปฏิบัติงานจริง	
10. เรียบเรียงและจัดทำปริญญานิพนธ์			การปฏิบัติงานจริง	



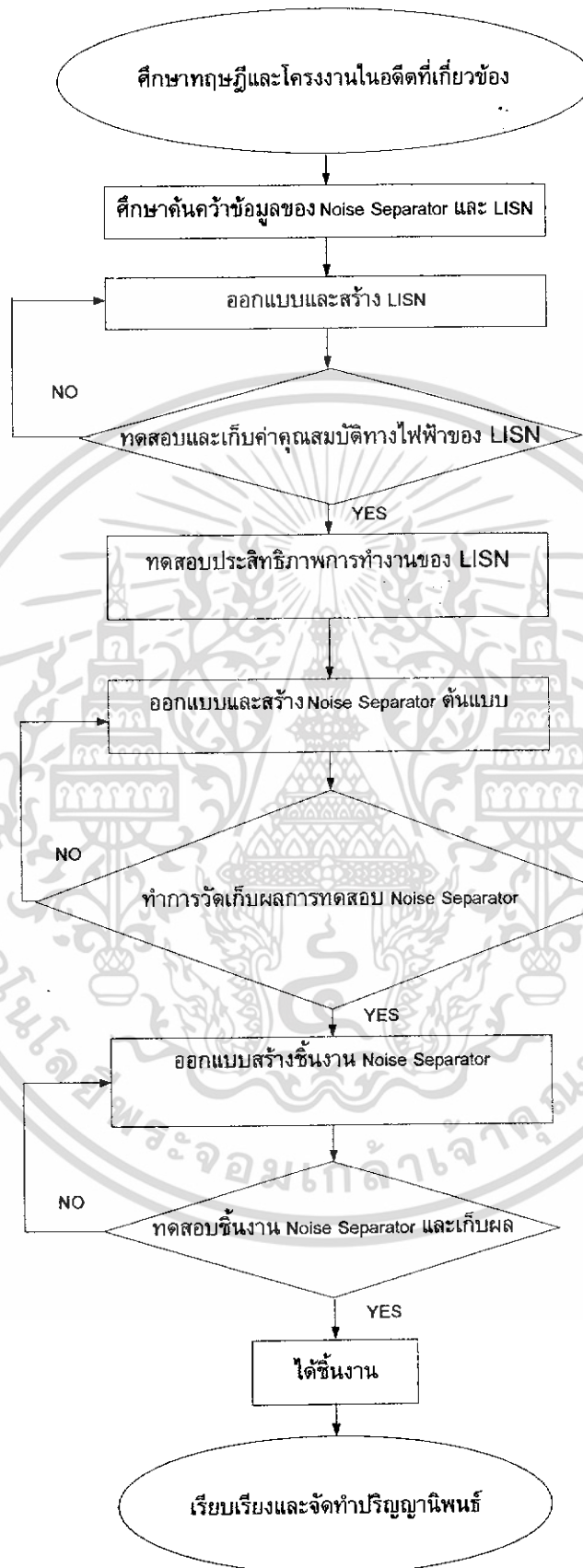
การวางแผน



การปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2 แผนผังการทำงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) และอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนทั้งที่มาตามสายตัวนำ และแพร่กระจายผ่านทางอากาศ ซึ่งจะทำให้การอธิบายสาเหตุและที่มาของปัญหาของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น และกล่าวถึงมาตรฐานในการวัดสัญญาณรบกวนโดยสังเขป โดยอ้างอิงมาตรฐาน international special committee on radio interference (CISPR) เป็นหลัก

2.2 ความรู้พื้นฐานด้าน EMC

2.2.1 EMC คือ ความสามารถของ อุปกรณ์ เช่น ไอซีทรานซิสเตอร์, เซ็นเซอร์, เครื่องมือ เช่น เครื่องมือวัด เครื่องใช้ไฟฟ้าและระบบ เช่น ระบบสถานีรับ-ส่งสัญญาณ ที่ทำงานได้ตามต้องการ ภายใต้สิ่งแวดล้อมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic: EM) นั้นๆ โดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสิ่งใดซึ่ง EMC จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (electromagnetic interference source) เป็นแหล่งที่กำเนิดคลื่นความถี่เข้ามารบกวนระบบ เช่น จากมอเตอร์ เป็นต้น
2. ส่วนที่ได้รับผลกระทบของ EMI ในบางครั้งอาจเรียกว่า “แหล่งรับ (receptor)” หรือในบางครั้งก็เรียกว่า “victim” ซึ่งมักเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อสัญญาณรบกวน เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
3. การเชื่อมต่อระหว่างสองส่วนแรก (coupling) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำต่างๆ เช่น สายสัญญาณ สายเมน ซึ่งการเชื่อมต่อแบบนี้เราจะเรียกว่า “(conduction)” กับอีกเส้นทางหนึ่ง คือ การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายผ่านไปในอากาศโดยเสมือนว่ามีอากาศเป็นตัวนำ หรือที่เรียกว่า “Radiation”

2.2.2 Electromagnetic Disturbance (EMD) หมายถึง สิ่งรบกวนที่เป็นสาเหตุให้เกิดการรบกวนขึ้นในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สัญญาณที่เข้ามาแทรกสัญญาณหลัก

2.2.3 EMI หมายถึง ผลของการรบกวนที่เกิดขึ้นในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การเกิดเสียงดังขึ้นในลำโพงเนื่องจากสัญญาณความถี่ของโทรศัพท์ไร้สาย โดยการเกิดเสียงคือ EMI ส่วนคลื่นความถี่ของโทรศัพท์ไร้สายคือ EMD

2.2.4 ชนิดของ EMI แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ EMI ที่เกิดโดยผลจากมนุษย์สร้างขึ้น และผลจากธรรมชาติ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมักเกิดจากสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้นเป็นส่วนใหญ่ เพราะเนื่องจากผลของธรรมชาติที่ทำให้เกิดคลื่นความถี่ได้นั้นมีไม่มาก เช่น การเกิดฟ้าผ่า และการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าปรากฏการณ์ที่ว่าไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง แต่ผลที่เกิดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

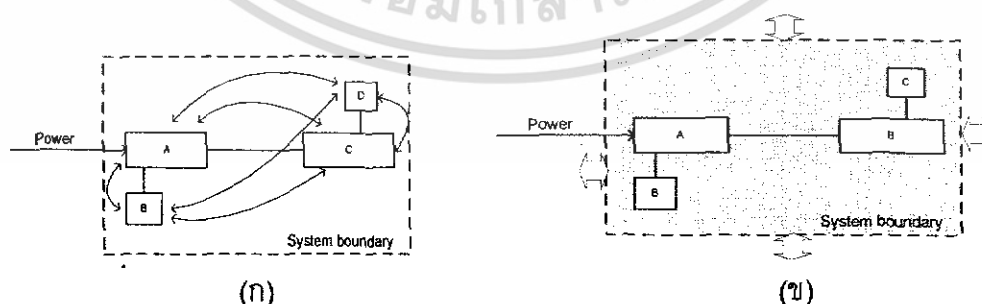
มนุษย์ เช่น ระบบจุดสตาร์ทรถยนต์ แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง เครื่องจักรกลไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เรดาร์ เครื่องส่งวิทยุ การอาร์คหรือเกิดโคโรนาในสายส่ง และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวข้อที่ว่าด้วยเรื่องการเกิดการรบกวนกัน (interference) หรือความทนทานต่อการถูกรบกวน (immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรบกวน (susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือ “ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบที่สามารถทำงานอยู่ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และต้องไม่เป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่สภาพแวดล้อม” ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งมาจากตัวระบบเดียวกันเองและจากระบบภายนอก ดังนั้นความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (intra-system EMC) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (inter-system EMC) ซึ่งนิยามของทั้งสองประเภทเป็นดังนี้

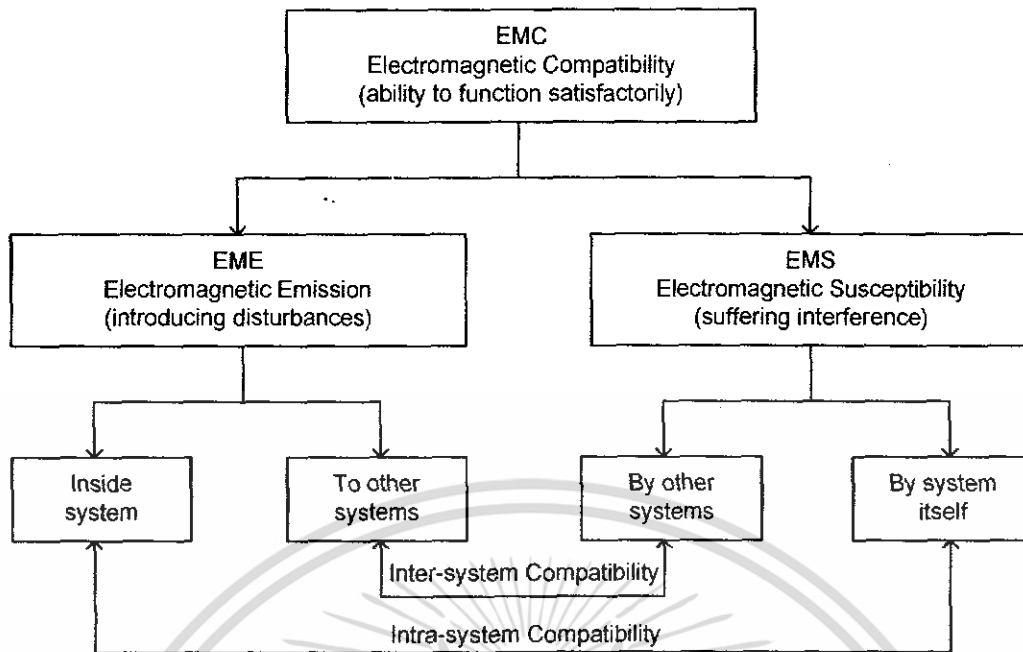
2.3.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือ ความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันและไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบเดียวกันทนไม่ได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 (ก)

2.3.2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือ ความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างโดยระบบภายนอก และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่ระบบอื่นภายนอกไม่สามารถทำงานได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ (ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



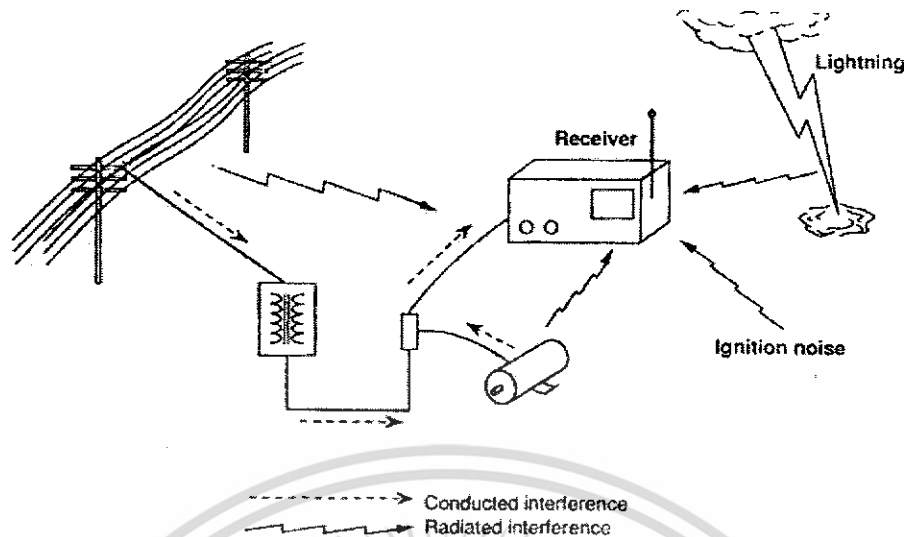
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ของนิยามต่าง ๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงดังรูปที่ 2.2

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4.1 สัญญาณรบกวน (noise) คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใดๆ ทำงานอยู่หรือปนเข้ามา กับสัญญาณที่พึงประสงค์ ซึ่งบ่อยครั้งสัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดการผิดพลาด ถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไปกว่าอุปกรณ์หรือระบบจะรับได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนมีหลายประเภทไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า และอื่นๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้เกิดได้จากที่สร้างโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” หมายถึงสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์หรือเครื่องมือใดๆ ก็ตาม ที่สร้างออกมารบกวนอุปกรณ์ข้างเคียงหรือรบกวนตัวมันเองในขณะที่ทำงาน เป็นผลให้เกิดความผิดปกติในการทำงานหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ การรบกวนนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (electromagnetic interference source) ส่วนที่ได้รับผลการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (receptor) และการเชื่อมต่อระหว่างสองส่วนแรก (coupling) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้สองลักษณะคือ โดยผ่านทางสายตัวนำ เช่น สายกำลัง หรือสายสัญญาณหรือที่เรียกว่า conduction และการเชื่อมต่อโดยผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจะแผ่กระจายผ่านตัวกลางทางอากาศเรียกว่า radiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สัญญาณรบกวนที่สร้างโดยธรรมชาติและมนุษย์

2.4.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่จะเป็นการแพร่กระจายทางอากาศ ที่เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น

- สัญญาณรบกวนในชั้นบรรยากาศ (atmospheric noise) เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าระหว่างเกิดฝนตกฟ้าคะนอง หรือฟ้าผ่า
- สัญญาณรบกวนคอสมิก (cosmic noise) จากดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ กลุ่มดวงดาวขนาดใหญ่ หรือแกแลกซี โดยจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจาย ออกมายังโลก
- ไฟฟ้าสถิต (electrostatic discharge: ESD)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์นั้น จะมีทั้งการแพร่กระจายทางอากาศและทางตัวนำ โดยเป็นผลเนื่องมาจากการที่มนุษย์ได้สร้างสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ทำงานก็จะสร้างสัญญาณรบกวนออกมาสู่ระบบเดียวกันและระบบอื่น ๆ โดยรอบทั้งทางอากาศและสายตัวนำ การรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่ออุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันเอง และระบบภายนอกด้วย ตัวอย่าง การเกิดสัญญาณรบกวนหลักที่มนุษย์สร้างขึ้น คือ

- เครื่องเชื่อม
- เครื่องให้ความร้อนโดยใช้ความถี่ radio frequency: RF
- สายส่งกำลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง
- หลอดฟลูออเรสเซนต์
- การสั่นดาบของเครื่องยนต์
- เตาอบไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบการสื่อสาร
- มอเตอร์ไฟฟ้า และอื่น ๆ

2.4.1.2 ทางเดินของสัญญาณรบกวน ทางเดินของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นตัวกลางที่สำคัญสำหรับการนำพาสัญญาณรบกวนออกไปสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งมีหลายทางเดินทั้งโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ตัวอย่างเช่น

- พื้นดิน
- กลุ่มเมฆ
- สิ่งก่อสร้าง และยานพาหนะ
- ตัวถังของอุปกรณ์และส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น
- การเดินสายสัญญาณบน PCB หรือสายตัวนำในวงจรหรือระบบ

2.4.1.3 สิ่งที่ได้รับผลกระทบและผลของสัญญาณรบกวน สำหรับสิ่งที่ได้รับผลกระทบ (victim) คือ อุปกรณ์หรือระบบใดๆ ที่ไม่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบทำงานไม่เป็นดังเป้าหมายหรือไม่ทำงานเลย หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ตัวอย่างของสิ่งที่ได้รับผลกระทบเช่น

- ด้วยสายสัญญาณ
- ตัวรับสัญญาณ
- คอมพิวเตอร์
- เครื่องวัดทางอุตสาหกรรม และเครื่องมือทางการแพทย์
- มนุษย์และสัตว์ เป็นต้น

2.4.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted interference) จะเกิดกับอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ต่ำถึงปานกลางการรบกวนเกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ในย่านตั้งแต่ 150kHz ถึง 30MHz ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ คือ สัญญาณไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม และ โหมดแตกต่าง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป และการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานของการเกิดสัญญาณรบกวนไปสู่ตัวที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งการส่งผ่าน (coupling) และการกระจาย (propagation) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุ (capacitive coupling) และการส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำ (inductive coupling)

- การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวน โดยกระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุแหว่ง (stray capacitor) ไปยังตัวนำอีกตัวหนึ่งที่อยู่ติดกันซึ่งแสดง ดังรูปที่ 2.4 และถ้ากระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุลงกราวด์จะเป็นการสร้างสัญญาณรบกวนชนิดโหมดผลรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวนโดยวิธีทางแม่เหล็ก โดยในสายตัวนำจะมีค่าการเหนี่ยวนำเสมือน (mutual inductance: M) อยู่ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลผ่านก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นและสนามแม่เหล็กนี้ก็ไปเหนี่ยวนำกับค่าการเหนี่ยวนำของอีกตัวนำหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5

2.4.2.1 โมดผลต่าง คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าเฉพาะใน line และ neutral เท่านั้น ให้ถือว่า วงจรนี้ไม่มีส่วนใดต่อลงกราวนด์ ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะเป็นดังรูปที่ 2.6

$$V_{DM} = \frac{V_{LG} - V_{NG}}{2} \quad (2-1)$$

โดยที่

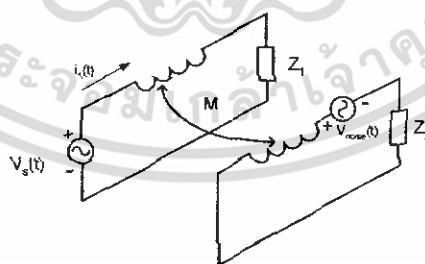
V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย line กับ ground

V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย neutral กับ ground

V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย line กับ neutral

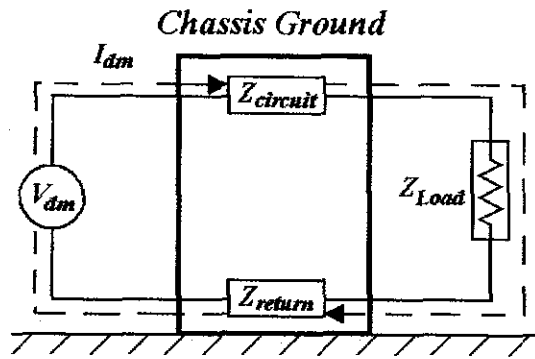


รูปที่ 2.4 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.5 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง

2.4.2.2 โหมดผลร่วม คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า กับกราวด์ของระบบทั้งในส่วนของ line และ neutral โดยจะถือว่าทั้ง line และ neutral ของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไหลลงกราวด์ของระบบดังรูปที่ 2.7 โดยผ่านทางตัวเก็บประจุแฝง (parasitic capacitor) ที่อยู่ระหว่างตัวนำกับกราวด์ของวงจร

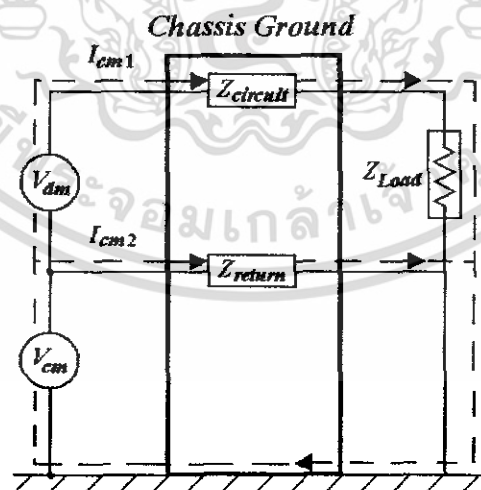
$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \tag{2.2}$$

โดยที่

V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย line กับ ground

V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย neutral กับ ground

V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย line กับ neutral



รูปที่ 2.7 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม

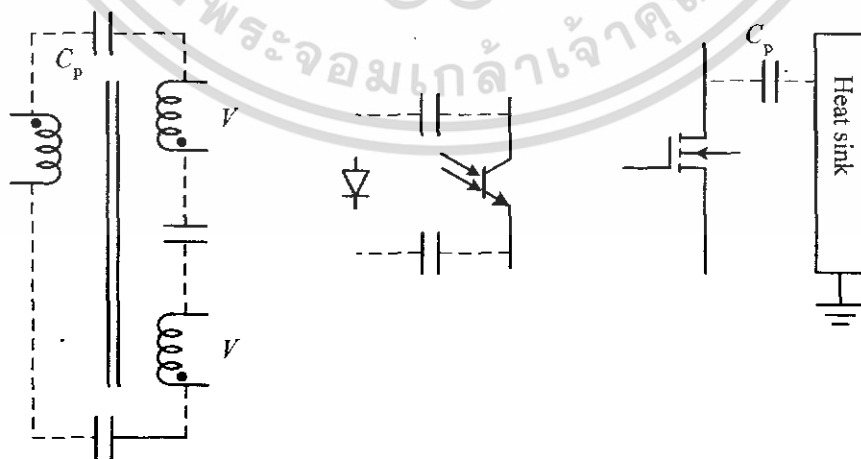
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

วงจรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มักจะมีการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูงและก่อให้เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา (dv/dt) ซึ่งมักจะเกิดในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส (turn off) และผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลา (di/dt) ซึ่งมักจะเกิดในช่วงเริ่มนำกระแส (turn on) อันนำไปสู่การเกิดสัญญาณรบกวน ที่ไม่พึงประสงค์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังและสิ่งแวดล้อมที่อยู่ข้างเคียง เช่นการเกิดสัญญาณรบกวนไปทางสายตัวนำต่อเชื่อมกับสายเมนหรือสายประธาน หรืออาจจะแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปทางอากาศ ตัวอย่างวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีใช้ทั่วไป เช่น บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ อินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกำลังสวิตช์ เป็นต้น

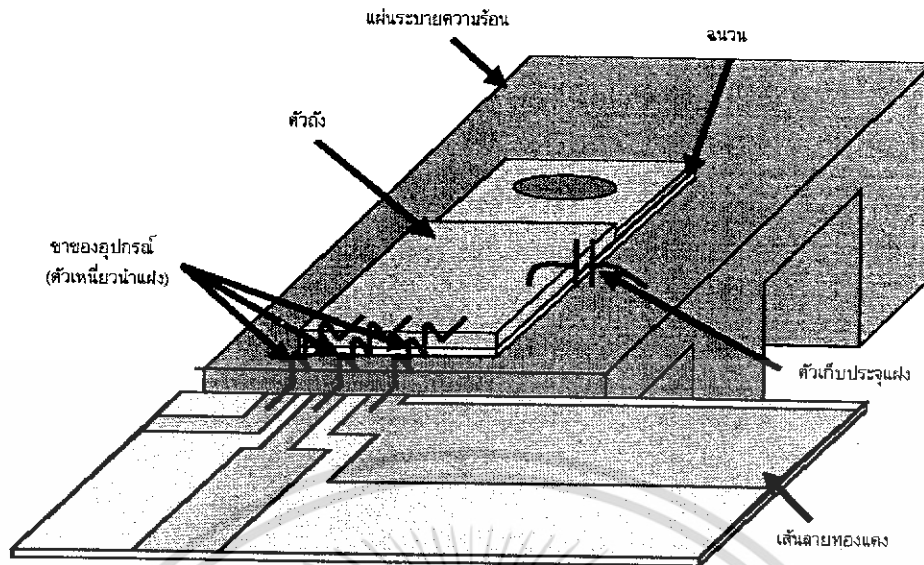
รูปที่ 2.8 แสดงถึงเส้นทางเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนภายในอุปกรณ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ค่าตัวเก็บประจุแฝง (parasitic capacitance) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง หรือ จะเป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเชื่อมต่อแยกสัญญาณด้วยแสง (opto coupler) หรืออาจเป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวสวิตช์ซึ่งกับตัวแผ่ระบายความร้อน เป็นต้น เมื่อพิจารณาจัดกลุ่มอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เป็นต้นเหตุให้เกิดการรบกวน จะแบ่งตามหน้าที่การทำงานได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกที่พักกับกลุ่มพาสซีฟได้ ดังนี้

2.5.1 ส่วนประกอบแอ็กทีฟ (active components) สวิตช์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยทั่วไปจะเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะส่วนประกอบแฝง (parasitic) ที่อยู่ในตัวอุปกรณ์นั่นเอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำแฝง (L_p) ซึ่งเกิดจากความยาวขาของตัวอุปกรณ์ หรือ ตัวเก็บประจุแฝง (C_p) ซึ่งเกิดจากการระบายความร้อนด้วยแผ่ระบายความร้อน (heat sink) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างองค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1]

ตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กจะทำให้เกิดริงกิง (ringing) ความถี่สูงที่รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์ ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังในสมการที่ (2-3)

$$v_p = L_p \frac{di}{dt} \quad (2-3)$$

$$i_{C_{PARA}} = C_{PARA} \frac{dv}{dt} \quad (2-4)$$

ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันเกิน (voltage stress) ที่ตัวสวิตช์ และยังเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าในรูปของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (differential mode noise current) อีกด้วย โดยที่สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างดังกล่าวจะเชื่อมต่อ (coupling) ไปยังความต้านทานของตัวโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยผ่านทางตัวเก็บประจุภายในสวิตช์นั่นเอง (miller capacitance)

ในขณะที่รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างตัวอุปกรณ์กับกราวด์จะทำให้เกิดผลของตัวเก็บประจุแฝง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าในรูปของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (common mode noise current)

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเนื่องจากสมการทั่วไปของตัวเก็บประจุแฝงจะเท่ากับในสมการที่ 2-5

$$C_{PARA} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2-5)$$

โดยที่ ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (absolute permittivity)

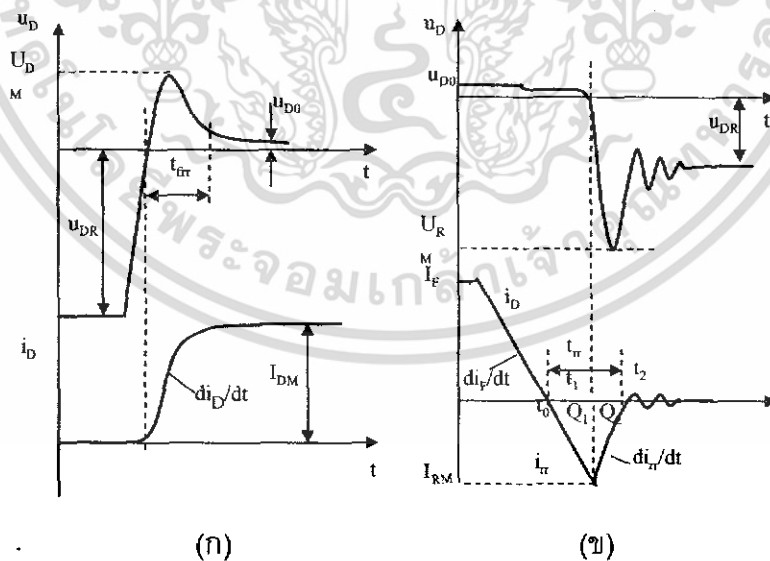
A คือค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ

d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-5) จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์จะเปรียบเหมือนกับการทำให้ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่ามาก ซึ่งก็จะเป็นผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุแฝงมีค่าลดลง ซึ่งนั่นก็หมายถึงเป็นการตัดเส้นทางเชื่อมต่อ (coupling path) ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้างดงมีค่าลดลงนั่นเอง แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำได้เพราะเหตุผลทางด้านความปลอดภัย (safety issues) และเหตุผลทางความแข็งแรงของโครงสร้าง (mechanical consideration)

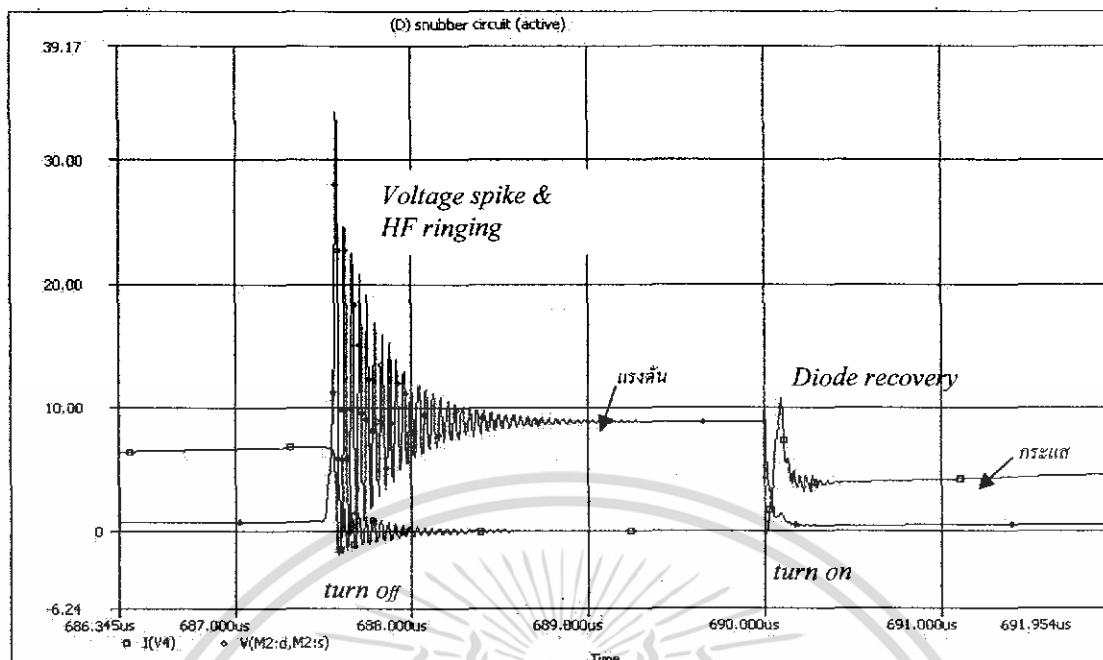
นอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้วยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์สวิตซ์อื่น ๆ อีก เช่น ช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด (diode reverse-recovery time) เป็นต้น

ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสในรูปที่ 2.10 มีผลทำให้เกิดริงกิงของแรงดันทางด้านลบ และยืนยันผลด้วยผลการจำลองระบบในรูปที่ 2.11 แรงดันเกิดการริงกิงในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส จึงทำให้เกิดผลสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงๆ ซึ่งอาจรบกวนระบบสื่อสารได้



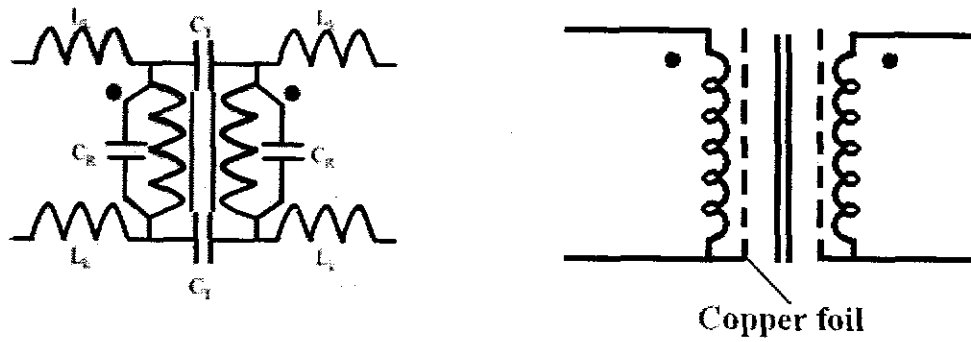
รูปที่ 2.10 ผลของช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด (ก) ขณะเริ่มนำกระแส (ข) ขณะเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

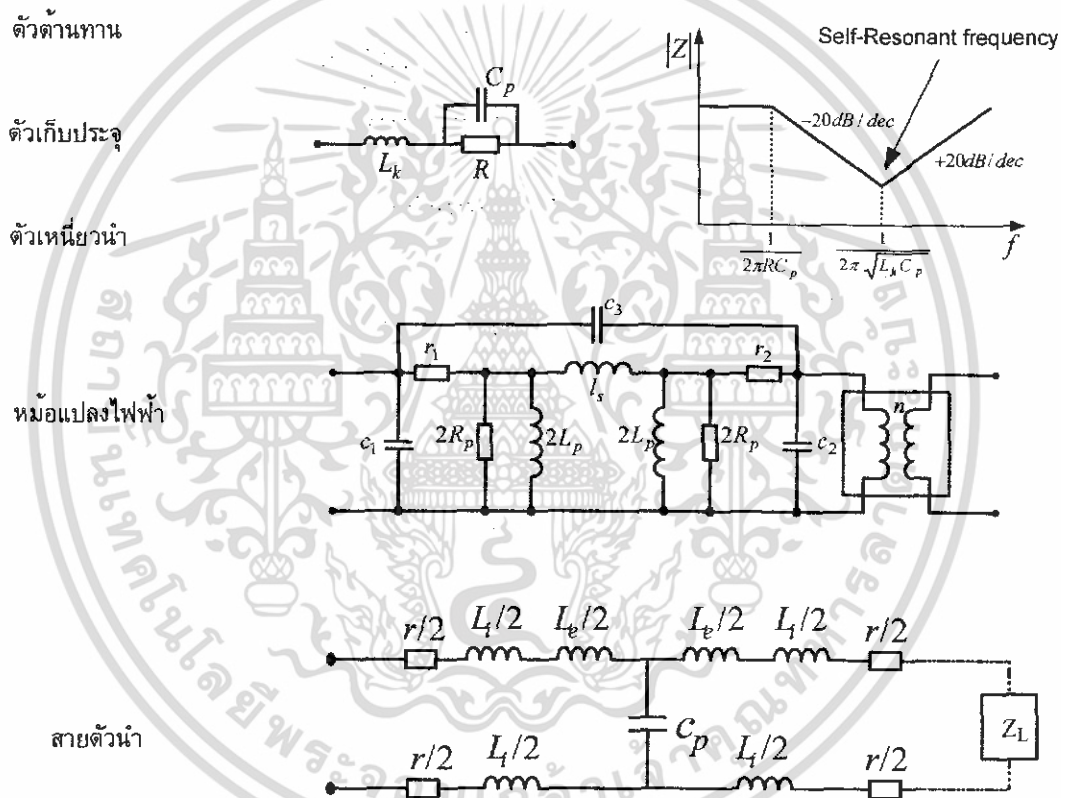


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างผลขององค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะสวิตช์เริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแส

2.5.2 ส่วนประกอบพาสซีฟ (passive components) หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (high frequency isolation transformer) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (common Mode: CM) ที่สำคัญของส่วนประกอบพาสซีฟสำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (switching power supply) โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ระหว่างขดลวด (cross-coupling capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงดังกล่าวเป็นทางผ่านที่สำคัญของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม ในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นค่าส่วนประกอบแฝงในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เช่น ตัวเหนี่ยวนำรั่ว (L_K) ตัวเก็บประจุแฝงของขดลวด (C_R) และตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด (C_T) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวดดังกล่าว สามารถทำให้มีค่าลดลงได้ด้วยการเพิ่มระยะห่างระหว่างขดลวด กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการเพิ่มฟลักซ์รั่ว (leakage flux) นั้นเอง หรืออาจจะทำได้โดยใช้ฟาราเดย์ชิลด์รอบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ตัวฟาราเดย์ชิลด์จะเป็นการแยกกันระหว่างขดลวดด้วยการใช้แผ่นอลูมิเนียมหรือทองแดง (aluminum or copper foil) ต่อลงกราวด์ และคั่นกลางอยู่ระหว่างขดลวดดังกล่าว



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างส่วนประกอบแผงในหม้อแปลงความถี่สูงและฟาราเดย์ชนิด



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างผลของส่วนประกอบแผงในอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้าและสายตัวนำที่ความถี่สูง

นอกจากนั้นยังมีองค์ประกอบต่างๆ ที่แฝงอยู่ใน ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าองค์ประกอบแผงดังกล่าว จะเป็นตัวจำกัดย่านความถี่ใช้งานสูงสุดสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว (self resonant frequency: SRF) โดยที่สำหรับตัวเก็บประจุจะถูกจำกัดความถี่ใช้งานสูงสุดด้วยค่าความเหนี่ยวนำแฝง เกิดจากความยาวขาของตัวเก็บประจุเองในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำจะถูกจำกัดโดยค่าตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขด และในส่วนของตัวต้านทานจะถูกจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุแฝงซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระบวนการในการผลิตตัวต้านทานดังกล่าว เป็นต้น

หัวข้อที่ควรศึกษาและทำความเข้าใจคือผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ จุดที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ จุดความถี่ SRF ดังที่ได้สรุปในตารางที่ 2.1

ในตารางที่ 2.1 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ ย่านความถี่ที่สูงกว่า SRF จะเป็นย่านที่มีผลต่อสัญญาณรบกวนความถี่สูง เนื่องจากการสูญเสียคุณลักษณะของตัวอุปกรณ์ จึงทำให้มีการเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนได้ง่ายขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ตัวอุปกรณ์ที่มีค่า SRF ให้สูงที่สุดเพื่อคงคุณลักษณะตัวอุปกรณ์ไว้ในย่านการใช้งาน

ตารางที่ 2.1 สรุปผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์พาสซีฟ

	ย่านความถี่ต่ำ	ย่านความถี่สูง	ผลตอบสนองเชิงความถี่
ตัวเหนี่ยวนำ			<p>ผลของค่าตัวเก็บประจุแฝง</p> <p>SRF</p> <p>$X_L = \omega L$</p>
ตัวเก็บประจุ			<p>ผลของค่าความเหนี่ยวนำแฝง</p> <p>SRF</p> <p>$X_c = \frac{1}{\omega C}$</p>

2.5.3 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ที่ส่วนประกอบของตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง พฤติกรรมของอุปกรณ์เหล่านี้จะสูญเสียคุณลักษณะของตัวเองเมื่อมีการทำงานที่ความถี่สูง องค์ประกอบแฝงในตัวอุปกรณ์นั้นๆ จะปรากฏให้เห็นเด่นชัด

- ตัวต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดมีค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 ทั้งนี้เนื่องจากขาและขั้วของตัวต้านทานไฟฟ้า ถ้าขาของตัวต้านทานไฟฟ้ายาวมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก

- ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ในทางปฏิบัติในการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะปรากฏพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้ก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้นคุณสมบัติต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงในรูปของแอดมิตแตนซ์ (Y) ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

- ตัวเก็บประจุไฟฟ้า เช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้า ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าแฝงและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะเปลี่ยนไป โดยจะแสดงให้เห็นรูปแบบของค่าแอดมิตแตนซ์



(ก) ในทางอุดมคติ

(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.14 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า

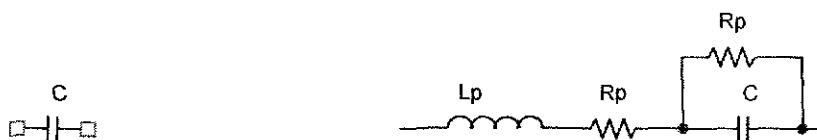


(ก) ในทางอุดมคติ

(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.15 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในทางอุดมคติ

(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.16 องค์ประกอบแผงของตัวเก็บประจุ

2.6 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัด และมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่าต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านตัวรับ และจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว มิได้เป็นการรับประกันว่าสินค้าที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เพียงแค่นั้นเป็นการยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้านั้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.6.1 FCC REGULATIONS — FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission ซึ่งเป็นของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (wire and radio communications) ซึ่งก่อตั้งในปี ค.ศ. 1927 และสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันกล่าวคือ 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) ก็ตามโดย FCC ได้นิยามพลังงานที่ความถี่วิทยุว่าคือพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่วิทยุ (9 kHz – 300 GHz) โดยมีจุดประสงค์ในการออกมาตรฐานเพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้มีใบอนุญาตในการติดตั้ง (radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อการใช้สื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (radio communications) โดยอุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (จริงๆแล้วย่อมาจากคำเต็มซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศสคือ Comite International Special des Perturbations Radioelectrique) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1933 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ นอกจากนั้นตัว CISPR ไม่ได้เป็นกฎข้อบังคับหรือมาตรฐานบังคับใช้แต่อย่างใด ต่มาตรฐานดังกล่าวจะถูกดัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในประเทศ จึงกลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย 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 (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

2.6.3 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)

2.6.4 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) ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์สารสนเทศ (Information Technology Equipments) เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานของประเทศเยอรมันดังกล่าวจะมีภาพรวมคล้ายกับมาตรฐานของยุโรป EN 55014 และ EN 55022 ตามลำดับยกเว้นเพียงแต่ย่านความถี่ที่พิจารณาจะมีความแตกต่างกัน

2.6.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยเพิ่งได้มีการเริ่มต้นนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 โดยได้มีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้วได้แก่ มอก. 1955-2542 (บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ส่องสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน: ใช้ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

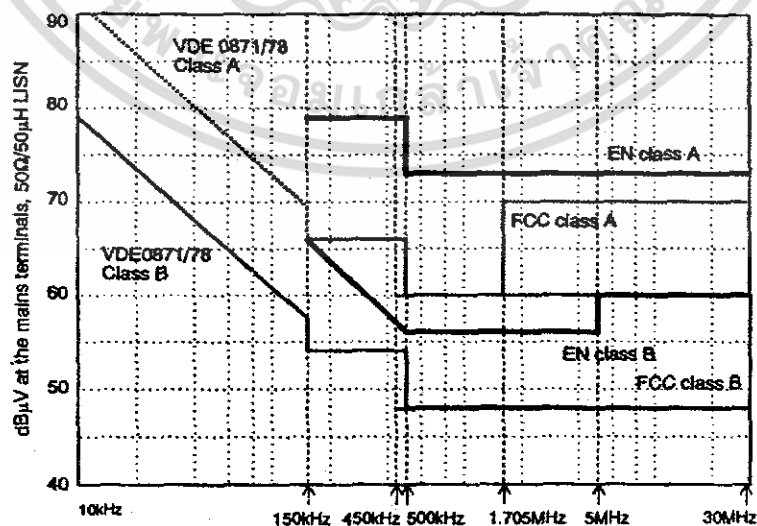
และ มอก. 1956-2542 (บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ชีตจำกัดสัญญานรบกวนวิทยุ) ซึ่งอยู่
ในระหว่างดำเนินการให้มีการบังคับใช้

อนึ่งมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและ
ได้นำมาตรฐานด้าน EMC ของ IEC เช่นเทคนิคการทดสอบ ด้านสิ่งแวลดล้อม มาใช้โดยออกเป็น
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ)

ตามลำดับโดยที่ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.17 ตารางสรุปมาตรฐานนานาชาติ ภูมิภาค
และเส้นขีดจำกัดตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

International Regulations Summary			
CISPR	(Emissions)		
	FCC	EN's	Description
11	Part 18	EN 55011	Industrial, Scientific and Medical
12	(SAE)		Automotives
13	Part 15	EN 55013	Boradcast 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



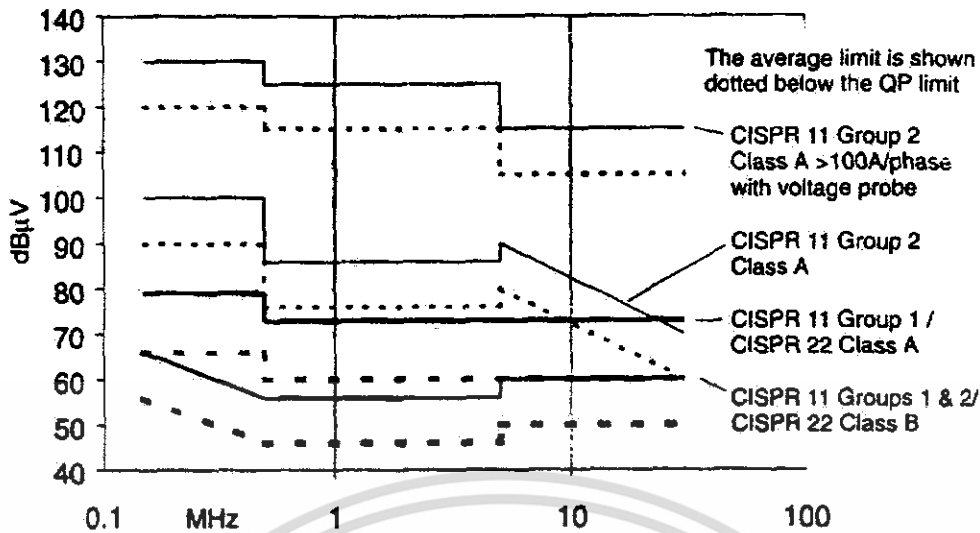
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของข้อกำหนดและมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกต่องั้น จะต้องมียุทธวิธีที่จำเป็นต้องใช้หลายอย่างและเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำในโหมดผลรวม ซึ่งได้แปลและเรียบเรียงมาจากมาตรฐาน CISPR 11 และ CISPR 22 (COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES: CISPR) โดยมีเงื่อนไขของอุปกรณ์ดังนี้

2.7.1 AMN/LISN เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้ง่าย โดยการต่อไว้ที่ทางด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (equipment Under Test: EUT) ซึ่งสาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟเพราะที่ด้านออกของแหล่งจ่ายไฟ เป็นเส้นทางหลักของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์จะไปรบกวนวงจรอื่นทางสายตัวนำ และเพราะว่าสายที่ต่อจากแหล่งจ่ายจะทำตัวคล้ายกับเป็นสายอากาศแผ่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลองจาก EN 55022 (CISPR 22) ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 3 เมื่อปี 1997 ได้นำเสนอการทดลองการรบกวนทางตัวนำที่พอร์ตโทรคมนาคม (Telecommunication ports) แต่ที่กล่าวไว้ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อีกมาก ในรูปที่ 2.18 คือ ระดับเส้นเปรียบเทียบหรือกลุ่มเส้นจำกัด (limit) ที่ความถี่ต่างๆ ของ CISPR เกือบทุกมาตรฐาน โดยที่ Class A (เส้นทึบ) ใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในเชิงการค้า และอุตสาหกรรม และ Class B (เส้นประ) ใช้สำหรับอุปกรณ์สำนักงาน ที่พักอาศัย ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการค้า และอุตสาหกรรม

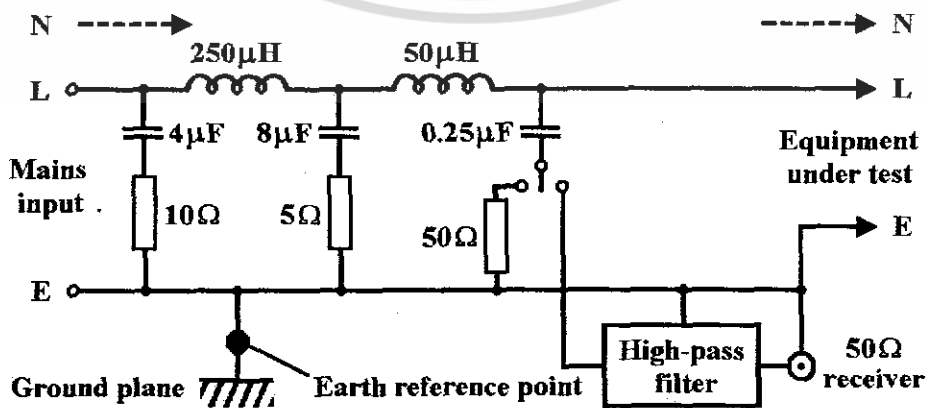
เส้นจำกัดเหล่านี้ได้สมมุติความต้านทานที่ความถี่วิทยุเพื่อเตรียมสำหรับการทดลองซึ่งโดยทั่วไปความต้านทานหลักสามารถปรับค่าได้กว้างแค่ไหนขึ้นอยู่กับสิ่งที่แวดล้อมที่จะทำการวัด เมื่อทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานและถ้า EUT มีความต้านทานต่ออยู่กับแหล่งจ่ายโดยไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าไรแต่อาจจะมีค่าค่อนข้างสูง ในการทดลองให้ทำการวัดค่าหลายๆ ครั้ง จากหลายๆ ห้องทดลองที่มีค่าเท่ากันความต้านทานหลักที่ต่อเข้าไปจะต้องมีความเสถียรภาพ นั้นเป็นที่มาของ artificial main network หรือ AMN ตามมาตรฐาน CISPR หรือ line impedance stabilization network หรือ LISN ตามมาตรฐานอเมริกา และรวมไปถึงโครงข่ายชนิดอื่นๆ ด้วย



รูปที่ 2.18 เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

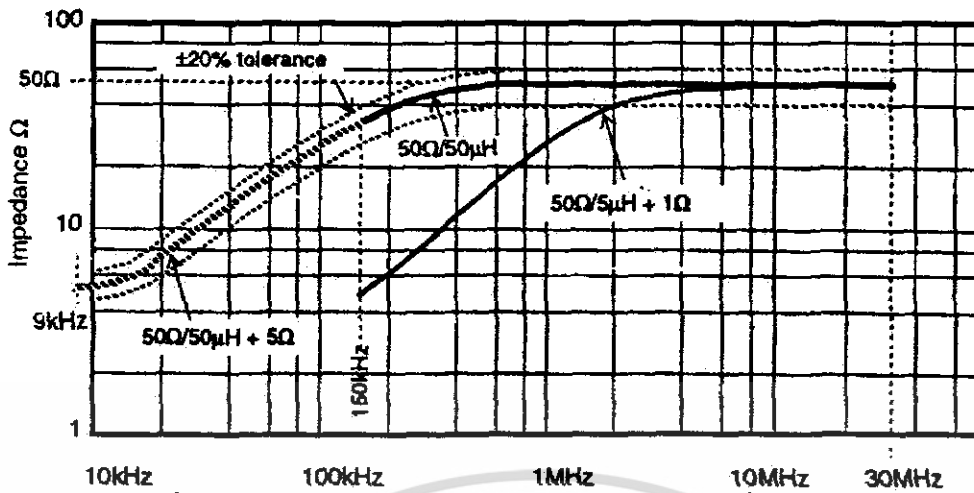
ข้อบังคับเกี่ยวกับ AMN/LISN จะอยู่ใน CISPR 16-1 ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป แต่ที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบคือ $50 \Omega / 50 \mu H \pm 5 \Omega$ AMN/LISN จากข้อบังคับ หมายถึง ความต้านทานระหว่างสายแต่ละเส้นกับจุดดิน (earth) จะมีค่าเป็น 50Ω ขนานกับ $50 \mu H$ ที่ความถี่ 150 kHz ถึง 30 MHz แต่ถ้าต้องการทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz จะใช้ ตัวต้านทาน 5Ω ต่ออนุกรมกับ $50 \mu H$ แทน รูปที่ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN

CISPR 16-1 ได้กำหนดโครงข่าย $50 \Omega / 50 \mu H \pm 5 \Omega$ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อความถี่ดังรูปที่ 2.20 สามารถใช้ได้กับกระแสสูงสุด 500 A อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถใช้เป็นวงจรอ้างอิงให้กับทุกมาตรฐานของ CISPR ได้ เพราะค่อนข้างจะเป็นเชิงพาณิชย์จึงใช้ได้ในช่วงที่ไม่กว้างมาก สิ่งสำคัญในการใช้ AMN/LISN คือ ต้องต่อจุดเปรียบเทียบเข้ากับแผ่นกราวนด์ (ground plane) ซึ่งพบได้ตามมาตรฐานในการวัดทั่วไปจะเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ $12 \mu F$ ต่ออยู่ระหว่างแต่ละสายกับกราวนด์ ถ้าเป็นเหตุการณ์จริงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230 V ความถี่ 50 Hz และมีค่าความจุไฟฟ้านี้ต่ออยู่ด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดกระแสประมาณ 0.9 A ไหลผ่านตัวเก็บประจุลงดิน กระแสนี้จะเป็นอันตรายอย่างมาก หากไม่มีการป้องกันโดยการต่อสายลงดิน ดังนั้นจะต้องมีระบบสายดินที่เชื่อถือได้ เมื่อต้องการใช้ AMN/LISN การทดสอบโดยทั่วไปจึงต้องมีข้อบังคับในเรื่องนี้เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ อุปกรณ์ที่ใช้จึงต้องมีฉลากเกี่ยวกับวิธีใช้อย่างปลอดภัยจากผู้ประกอบการเพื่อป้องกันกระแสรั่วที่มีค่าสูง และต้องต่อสายดินทุกครั้ง ถ้าไม่ได้ทำการแยกระบบ (isolate) ของ AMN/LISN ออกจากแหล่งจ่ายไฟและจุดเปรียบเทียบหลัก

ผลกระทบที่สองของกระแสรั่วจากแหล่งจ่ายไฟของ AMN/LISN ไม่สามารถจะป้องกันโดยใช้ earth leakage หรือ Residual Current circuit Breaker (RCB) ได้ ดังนั้นถ้าต้องการความปลอดภัยที่แน่นอน ควรใช้หม้อแปลงแยกระบบที่จะวัดออกจากแหล่งจ่ายไฟและวิธีนี้จะไม่ส่งผลต่อความถี่วิทยุที่ต้องการจะวัดด้วย ถึงแม้ว่าจะถูกจำกัดกระแสโดยแหล่งจ่ายซึ่งอาจเป็นปัญหาในของวงจรแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายไฟตรงแบบใหม่ซึ่งเป็นที่นิยม อาจทำให้หม้อแปลงอิ่มตัวด้วยกระแสที่สูงมากในทุกครั้งคาบ วิธีนี้จะทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไป และทำให้การวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนผิดจากความเป็นจริง ทำให้ต้องใช้พิกัดโวลต์แอมป์ที่สูงในการทดลอง

2.7.2 แผ่นกราวนด์ เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด หรือ EUT ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทำเป็นกราวนด์อ้างอิง 0.4 เมตรโดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือวาระยะห่างจากแผ่นกราวนด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้วัดถึงวัสดุที่ใช้ทำกล่อง ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือวาระยะห่างจากแผ่นกราวนด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวนด์ภายในวงจร

แผ่นกราวนด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบได้โตะที่จะใช้ในการทดลอง และต้องทำการยึดแผ่นกราวนด์ให้มั่นคงด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวนด์ก็ได้ และแผ่นกราวนด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดไม่น้อยกว่า 0.5 เมตร มีขนาดไม่ต่ำกว่า 2 เมตรคูณ 2 เมตร

จุดกราวนด์อ้างอิงของ AMN/LISN และ impedance stabilization network (ISN) จะต้องต่อกับแผ่นกราวนด์ด้วยตัวนำโดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.7.3 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

2.7.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ รูปที่ 2.21 เป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวงจรถูกปรับโน้ต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้

1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เทื่อนแนวระดับของแผ่นกราวนด์และไม่สามารถทำให้สั้นได้ จะต้องมัดทาบปลายสายให้มีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟจากแหล่งจ่ายจะต้องมัดทาบกันให้สายสั้นที่สุด
3. อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดต้องต่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ AMN/LISN และ LISN ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวนด์ที่อยู่ในแนวระดับ

ก) แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องต่อมาจาก AMN/LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีปลายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์

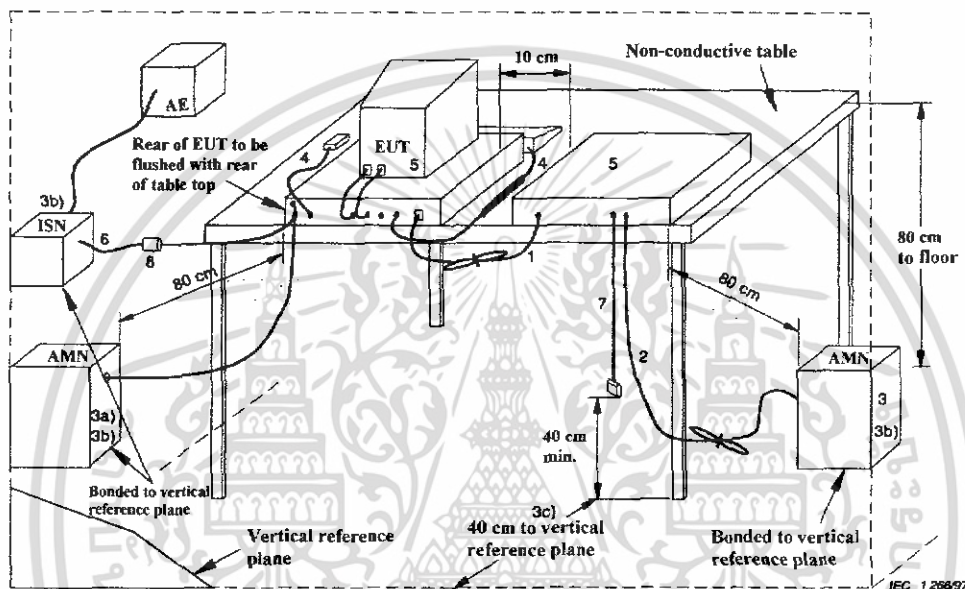
ข) AMN/LISN และ ISN ที่ใช้เป็นที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด 80 เซนติเมตร และอย่างน้อย 80 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่นโลหะอื่นๆ

ค) สายไฟหลักและสายสัญญาณควรวางให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่ทำได้และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวนด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร

4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น สายเคเบิลบอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆให้วางในเหมือนการใช้งานทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สิ่งที่อยู่รอบๆ ภายนอกจะต้องอยู่ห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นข้างเคียงและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางอยู่บนตัวควบคุมได้
6. มีสายสัญญาณเข้า/ออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ current probe ควรวางห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร



AMN : Artificial mains network AE : Associated equipment

EUT : Equipment under test ISN : Impedance stabilization network

รูปที่ 2.21 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้