

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
สำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง

Electromagnetic Interference Filter Design For Switch Mode Power Supply



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55589
วัน,เดือน,ปี..... 20 พ.ค. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการบิดเบือนหรือการอื่นใดที่ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b.....
i.....

การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
สำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง
Electromagnetic Interference Filter Design For Switch Mode Power Supply

โดย



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
สำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง

Electromagnetic Interference Filter Design For Switch Mode Power Supply
(EMI Filter For SMPS)

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|----------------|------------|------|----------|
| 1. นายพีรพงศ์ | ก้านเหลือง | รหัส | 44015118 |
| 2. นายดำรง | สกุลหิรัญ | รหัส | 44015142 |
| 3. นายตะวัน | พรคนาวิน | รหัส | 44015144 |
| 4. นายบูรินทร์ | ลัดพลี | รหัส | 44015155 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ร.อ. ดร. วีระเชษฐ จันทร์เงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
สำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง

นายพีรพงศ์	ก้านเหลือง
นายดำรง	สกุลหิรัญ
นายตะวัน	พรคนาวิน
นายบูรินทร์	ลัดพลี
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2546

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของโครงการนี้ คือ ศึกษาผลของการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) และออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ผ่านทางสายตัวนำ และศึกษาค่าองค์ประกอบแ่งของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ระลอกคลื่น (Ripple) ของกระแสไฟฟ้าอินพุตของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงมีค่าลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย และทำการปรับปรุงแก้ไขให้เป็นไปตามมาตรฐาน CISPR 22 ว่าด้วยขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ

Electromagnetic Interference Filter Design for Switch Mode Power Supply

Peerapong	Kanloun
Damrong	Sakulhirirak
Tawan	Puknawin
Burin	Ludplee
Dr.Werachet	Khan-ngern Advisor
2003	

ABSTRACT

The purpose of this project is to study electromagnetic interference (EMI) and design filter in supply system. The inductor and capacitor with self-resonance frequency (SRF) study for mitigating the input ripple current from switched mode power supply is applied. The achieved of conducted EMI of circuit and improves EMI emission refer to CISPR 22 standard deals with radio disturbance limits is investigated.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ร.อ. ดร. วีระเชษฐ จันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษามาโดยตลอด รวมถึงได้มอบโอกาสในการเรียนรู้ รวมถึงโอกาสในด้านการทำงาน อีกด้วย

ขอขอบคุณ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติงาน รวมทั้งเครื่องมือ อุปกรณ์ เพื่อทำการวิจัยอย่างครบครัน

ขอขอบคุณ นายวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ นายชุตินันท์ อยู่ยาไสม นายปฏิวัติ บุญมา นายประชา คำภักดี นายจรัส แก้วชัย นส.ธัญญดุมภ์ รอดเจริญ นส.ปทุมทิพย์ สังข์พันธ์ (นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า) ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำข้อมูลรวมถึงแนะนำการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ร่วมแรงร่วมใจกันทำงาน รวมถึงเพื่อนๆที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงาน และที่สำคัญที่สุดคือ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้เราๆมาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 เป้าหมายของโครงการ	2
บทที่ 2	3
ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ	3
2.1 วัตถุประสงค์	3
2.2 ความรู้พื้นฐานด้าน EMC	3
2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	4
2.4 สัญญาณรบกวน	5
2.5 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ	7
2.6 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์	10
2.7 วงจรกรองความถี่	13
2.8 นิยาม มาตรฐาน เครื่องวัดและขั้นตอนในการวัดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ	18
2.9 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ	20
2.10 สรุป	21
บทที่ 3	22
การคำนวณและการออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวน	22
3.1 วัตถุประสงค์	22
3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเบื้องต้น	22
3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	25
3.4 ขั้นตอนการออกแบบ	26
3.5 การตรวจสอบการผ่านมาตรฐาน CISPR 22	27
3.6 สรุป	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4	การจำลองการทำงานของวงจร Filter ที่มีผลต่อ EMI	32
	4.1 บทนำ	32
	4.2 วัตถุประสงค์ของการจำลองการทำงานของวงจร	32
	4.3 ขอบเขตการจำลอง	32
	4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร	33
	4.5 วิธีการจำลองการทำงาน	34
	4.6 สรุป	36
บทที่ 5	รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
	5.1 บทนำ	37
	5.2 วัตถุประสงค์	37
	5.3 ขอบเขต	37
	5.4 ข้อมูลของอุปกรณ์	38
	5.5 วัฏกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง	39
	5.6 การคำนวณหาความต้านทานที่ใช้เป็น โหลดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง	39
	5.7 ศึกษา Self Resonance Frequency ของตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บ ประจุ	41
	5.8 สรุป	48
บทที่ 6	การทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำ	49
	6.1 บทนำ	49
	6.2 วัตถุประสงค์การทดลอง	49
	6.3 ขอบเขตการทดลอง	49
	6.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	50
	6.5 วิธีการทดลอง	50
	6.6 ผลการทดลอง	51
	6.7 สรุป	62
บทที่ 7	การประยุกต์ใช้ EMI Filter สำหรับ UPS Application	64
	7.1 วัตถุประสงค์	64
	7.2 การทำงานของเครื่อง ยูทีเอส	64
	7.3 วัตถุประสงค์การทดลอง	69
	7.4 ขอบเขตการทดลอง	69
	7.5 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

7.6	วิธีการทดลอง	69
7.7	ผลการทดลอง	70
7.8	สรุป	74
บทที่ 8	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
8.1	วัตถุประสงค์	76
8.2	สรุปผลการวิจัย	76
8.3	ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง		77
ภาคผนวก ก		78
ภาคผนวก ข		82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	17
3.1	28
3.2	28
3.3	29
3.4	29
5.1	38
5.2	39
5.3	39
5.4	41
5.5	42
5.6	43
5.7	44
5.8	45
5.9	46
5.10	47
6.1.1	51
6.1.2	51
6.2.1	52
6.2.2	52
6.3.1	53
6.4	55
6.5	55
6.6	64
7.1	65
7.2	65
7.3	65
7.4	72
7.5	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ(ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก	4
2.2 ความสัมพันธ์ของนิยามของ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.3 สัญญาณรบกวนที่สร้างโดยธรรมชาติและมนุษย์	6
2.4 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ	8
2.5 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ	8
2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดแตกต่าง	9
2.7 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม	10
2.8 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า	10
2.9 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	11
2.10 ค่าแอดมิตแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	11
2.11 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	11
2.12 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	12
2.13 แสดงลักษณะทั่วไปในการป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter	13
2.14 แสดงวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ	14
2.15 แสดงวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ	15
2.16 วงจรกรองความถี่แบบ LC	16
2.17 การต่อ LC Filter อนุกรม	16
2.18 แสดง π section filter	16
2.19 วงจรกรองความถี่แบบ T	17
2.20 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บน	20
3.1 สรุปลักษณะตอนในการออกแบบ	27
3.2 แสดงวงจร EMI Filter แบบ Double state	30
4.1 วงจรภายในของ LISN (EMCO 3810-2HP / Agilent 1967D) ที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1	33
4.2 วงจรของ Bridge Rectifier และ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (SMPS) ที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1	34
4.3 วงจร Filter แต่ละแบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรม PSpice ซึ่งต่ออินพุตเข้ากับ LISN และต่อเอาต์พุตกับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (SMPS) ที่เป็นจุดกำเนิด EMI Noise	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

5.1	ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ภายในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง	37
5.2	วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำ	41
5.3	ตัวเหนี่ยวนำที่ 1	42
5.4	ตัวเหนี่ยวนำที่ 2	43
5.5	ตัวเหนี่ยวนำที่ 3	44
5.6	วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุ	45
5.7	ค่าตัวเก็บประจุที่ 1 OKAYA RE 684 275 V , 0.68 μ F	45
5.8	ค่าตัวเก็บประจุที่ 2 OKAYA RE 105 275 V , 1.0 μ F	46
5.9	ค่าตัวเก็บประจุที่ 3 OKAYA RE 105 275 V , 2.2 μ F	47
6.1	วงจรการวัดสัญญาณอุปกรณ์ไทรสเตอร์	50
6.2	วงจรการทดลอง	50
6.3	วงจรการทดลองขณะต่อวงจรคงความถี่	51
6.4	สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E , (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E	51
6.5	สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E , (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E	52
6.6	สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E , (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E	52
6.7	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงขณะไม่ได้ต่อโหลด (ก) การจำลองระบบ (ข) จากผลการวัด	53
6.8	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง ขณะต่อโหลด	54
6.9	เปรียบเทียบสัญญาณบริเวณจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง ขณะไม่ได้ต่อโหลด และขณะต่อโหลด	54
6.10	ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu$ F, $C_y = 0.68 \mu$ F)	56
6.11	ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu$ F, $C_y = 0.68 \mu$ F)	58
6.12	ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu$ F , $C_y = 0.68 \mu$ F)	59
6.13	6.13 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu$ F , $C_y = 0.68 \mu$ F)	60
6.14	ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu$ F, $C_y = 0.68 \mu$ F)	61
6.15	ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu$ F, $C_y = 0.68 \mu$ F)	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

7.1	ภาวะปกติของเครื่องยูพีเอส	66
7.2	ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าลดลง ของเครื่องยูพีเอส	67
7.3	ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าสูงขึ้น ของเครื่องยูพีเอส	67
7.4	ภาวะลุดเงินของ ของเครื่องยูพีเอส	68
7.5	ภาวะกลับสู่ปกติ ของเครื่องยูพีเอส	68
7.6	ภาวะย้ายโหลดอัตโนมัติ ของเครื่องยูพีเอส	69
7.7	ภาวะซ่อมบำรุงรักษา ของเครื่องยูพีเอส	70
7.8	วงจรการวัดสัญญาณรบกวนที่ออกจาก UPS	71
7.9	วงจรการวัดสัญญาณรบกวนจาก UPS เมื่อต่อ EMI Filter	71
7.10	วงจรรายในและองค์ประกอบต่างๆของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	71
7.11	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังระบบสำรอง ขณะต่อโหลด	72
7.12	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$	73
7.13	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$, $L_{DM1} = 200 \text{ }\mu\text{H}$	73
7.14	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$, L_{DM1} และ $L_{DM2} = 200 \text{ }\mu\text{H}$	73
7.15	ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$	74
7.16	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 0.7 \text{ mH}$	74
7.17	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 40 \text{ }\mu\text{H}$	75
7.18	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 0.7 \text{ mH}$	75
7.19	ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ดีที่สุดกับสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนที่เลือกไว้	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า โดยเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกสวิตชิง หรือ อุปกรณ์พวกให้กำเนิดสัญญาณความถี่ต่างๆ จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ซึ่งเกิดได้ทั้งจากสายตัวนำ และเกิดจากการแผ่สัญญาณรบกวนไปทางอากาศ ซึ่งทางโครงการได้หยิบยกประเด็นพิจารณาเฉพาะเพียงสัญญาณรบกวนที่มากับสายตัวนำ[1]

ซึ่งสัญญาณรบกวนที่มากับสายตัวนำนั้นก่อให้เกิดปัญหากับระบบและวงจรต่างๆ เป็นผลมาจากฮาร์โมนิกส์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ดังนั้นถ้าเราทำการลดทอนสัญญาณความถี่สูงที่ไม่ต้องการออกได้ก็จะส่งผลให้ระบบของเรามีเสถียรภาพมากขึ้น แต่สิ่งที่เราต้องคำนึงจากการลดทอนสัญญาณนั้นจะมี 2 ส่วนคือ

1. สัญญาณรบกวนที่มาจากทางด้าน Source หรือแหล่งจ่ายที่มาจากกร ไฟฟ้า
2. สัญญาณรบกวนที่มาจากโหลด หรืออุปกรณ์ต่อรวม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ ที่มาจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งโหมดเพาเวอร์ซัพพลาย (Switch Mode Power Supply : SMPS) ซึ่งเป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่ผ่านมาทางสายตัวนำ ดังนั้นอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณที่ได้ทำการออกแบบมาจะต้องทำการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ตามที่มาตรฐาน CISPR 22 ได้กำหนดไว้

เพื่อศึกษาและออกแบบเกี่ยวกับ Electromagnetic Interference for switched mode power supply และทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณรบกวน (EMI Filter) ให้ดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งวัดจากผลของสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งโหมดเพาเวอร์ซัพพลาย (SMPS)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตของการศึกษาในปริญญาโทฉบับนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งโหมดเพาเวอร์ซัพพลายที่ผ่านทางสายตัวนำ ซึ่งพิจารณาที่ความถี่ 150 kHz – 30 MHz โดยทำการจ่ายโหลดที่ 80% ของพิกัดโหลด และจำลองระบบการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเปรียบเทียบกับการวัด แล้วนำผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน CISPR ตลอดจนการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ โดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ

1.4 เป้าหมายของโครงการ

เป้าหมายของโครงการนี้ คือ การวัดและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูงที่มากับสายตัวนำ เพื่อทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง โดยมีเป้าหมายดังนี้

1. เข้าใจการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ
2. วิเคราะห์ วงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ และทำการออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณ
3. ทำการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐาน CISPR 22
4. ต่ วงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ากับระบบ เพื่อทำการวัดค่าของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกทำการลดทอนลงไป



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ

2.1 วัตถุประสงค์

ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ เพื่อให้ทราบถึงความหมายของนิยาม และเข้าใจถึงหลักการวิเคราะห์และการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2 ความรู้พื้นฐานด้าน EMC

2.2.1 ความหมาย

Electromagnetic Compatibility (EMC) คือ ความสามารถของ องค์ประกอบดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ เช่น IC Transistor Sensor
- เครื่องมือ เช่น เครื่องมือวัด เครื่องใช้ไฟฟ้า
- ระบบ เช่น ระบบสถานีรับ-ส่งสัญญาณ

ที่ทำงานได้ตามต้องการ ภายใต้สิ่งแวดล้อมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic :EM) นั้นๆ โดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสิ่งใด

ซึ่ง 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)”

Electromagnetic Disturbance (EMD) หมายถึง สิ่งรบกวนที่เป็นสาเหตุให้เกิดการรบกวนขึ้นในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สัญญาณที่เข้ามาแทรกสัญญาณหลัก

Electromagnetic Interference (EMI) หมายถึง ผลของการรบกวนที่เกิดขึ้นในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การเกิดเสียงดังขึ้นในลำโพงเนื่องมาจากสัญญาณความถี่ของโทรศัพท์ไร้สาย โดยการเกิดเสียงคือ EMI ส่วนคลื่นความถี่ของโทรศัพท์ไร้สายคือ EMD

2.2.2 ชนิดของ Electromagnetic Interference (EMI)

EMI แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ EMI ที่เกิดโดยผลจากมนุษย์สร้างขึ้น และผลจากธรรมชาติ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมักเกิดจากสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้นเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากผลของธรรมชาติที่ทำให้เกิดคลื่นความถี่ได้นั้นมีไม่มาก เช่น การเกิดฟ้าผ่า และ การเกิดไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าปรากฏการณ์ที่ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง แต่ผลที่เกิดจากมนุษย์ เช่น ระบบจุดสตาร์ทรถยนต์ สวิตช์โหมดเพาเวอร์ซัพพลาย เครื่องจักรกลไฟฟ้า คอนเวอเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เรายาค้า เครื่องส่งวิทยุ การอาร์คหรือเกิดโคโรนาในสายส่ง และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

โดยที่ EMI ที่มนุษย์สร้างขึ้นจะแยกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

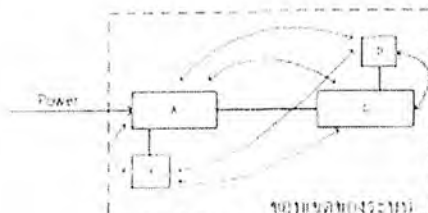
1. Inter-System เป็นระบบที่คำนึงถึง EMC จะเกี่ยวข้องกับวางแผน การควบคุม และเป็นที่มาของการกำหนดข้อตกลงร่วมกันหรือออกเป็นกฎหมายในการใช้ย่านความถี่ หรือการกำหนดที่ตั้งของสถานีวิทยุ และการกำหนดห้วงเวลาที่ใช้
2. Intra-System เป็นระบบที่คำนึงถึง EMC ภายในระบบนั้นๆ จะมีผลต่อการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน เช่น ออกแบบไอซี เป็นต้น

2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

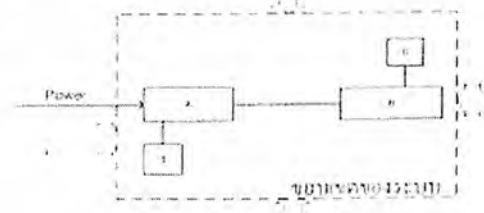
การรบกวนทางแม่เหล็ก (Electromagnetic Interference :EMI) เป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่อง ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นหัวข้อที่ว่าด้วยเรื่องการเกิดการรบกวนกัน (Interference) หรือความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรบกวน (Susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใด ๆ โดยนิยามของ EMC คือ “ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่สามารถทำงานอยู่ในสภาวะแวดล้อมนั้น” สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งมาจากตัวระบบเดียวกันเอง และจากระบบภายนอก ดังนั้น EMC จึงแบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (Intra-system EMC) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (Inter-system EMC) ซึ่งนิยามของทั้งสองประเภทเป็นดังนี้

1) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือ ความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ภายในระบบเดียวกัน และไม่สร้างรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบเดียวกันทนไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก)

2) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือ ความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างโดยระบบภายนอก และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่ระบบอื่นภายนอกไม่สามารถทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข)



(ก)



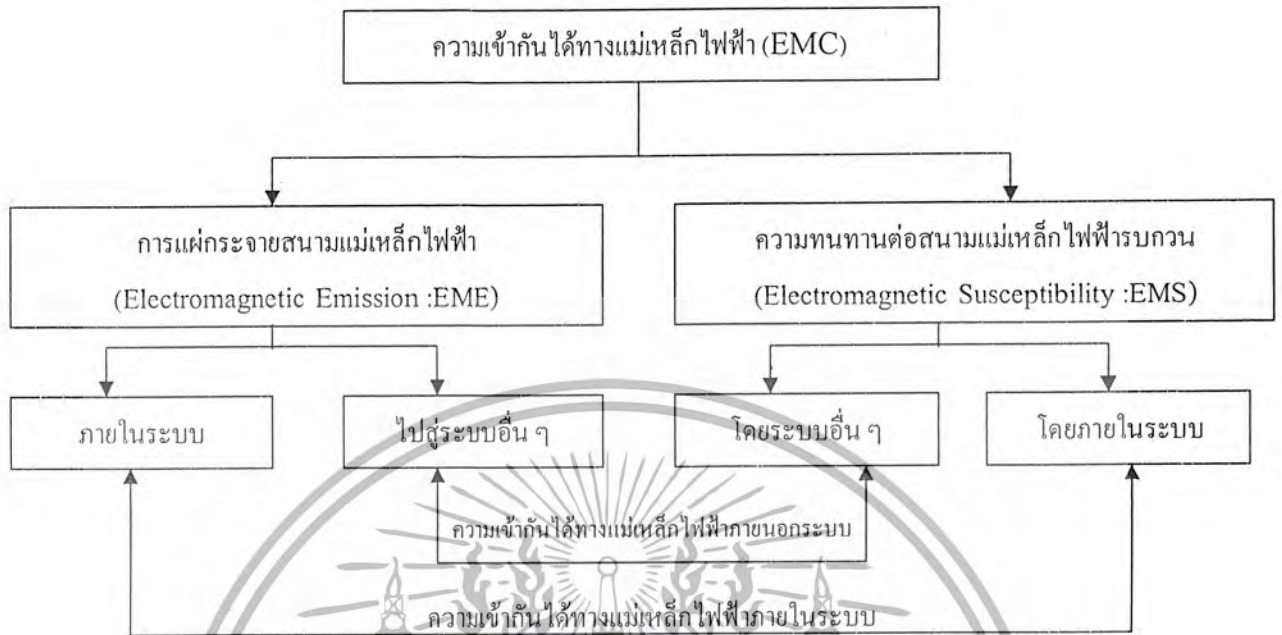
(ข)

รูปที่ 2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ

(ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

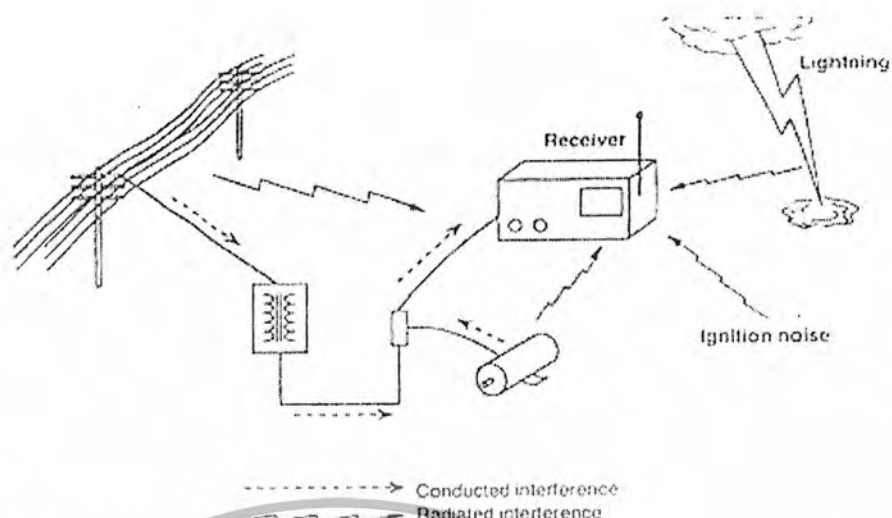
จะสามารถสรุปความสัมพันธ์ของนิยามต่าง ๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของนิยามของ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใด ๆ ทำงานอยู่ หรือปนเข้ามา กับสัญญาณที่พึงประสงค์ บ่อยครั้งสัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดการผลิตผล ถ้าระดับสัญญาณรบกวนมีหลายประเภท หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า และอื่น ๆ สัญญาณรบกวนนี้เกิดได้จากที่สร้างโดยธรรมชาติ และที่มนุษย์สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่งที่จะเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้นำมาวิเคราะห์โดยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศ (Radiated) และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางตัวนำ (Conducted)



รูปที่ 2.3 สัญญาณรบกวนที่สร้างโดยธรรมชาติและมนุษย์

2.4.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ ที่เกิดจากรธรรมชาติ และจากมนุษย์ซึ่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนมากมาจากการกระทำของมนุษย์ โดยจะเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่มนุษย์สร้างขึ้นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากรธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่จะเป็นการแพร่กระจายทางอากาศ ที่เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น

- สัญญาณรบกวนในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric noise) เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าระหว่างเกิดฝนตกฟ้าคะนอง หรือฟ้าผ่า
- สัญญาณรบกวนคอสมิก (Cosmic noise) จากดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ กลุ่มดาวขนาดใหญ่น หรือแกแลกซี โดยจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าแม่เหล็กแพร่กระจาย ออกมา ยังโลก
- ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge: ESD)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์นั้น จะมีทั้งการแพร่กระจายทางอากาศและทางตัวนำ โดยเป็นผลเนื่องมาจากการที่มนุษย์ได้สร้างสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ทำงานก็จะสร้างสัญญาณรบกวนออกมาสู่ระบบเดียวกันและระบบอื่น ๆ โดยรอบ ทั้งทางอากาศและสายตัวนำการรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่ออุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันและระบบภายนอกด้วย ตัวอย่าง การเกิดสัญญาณรบกวนหลักที่มนุษย์สร้างขึ้น คือ

- เครื่องเชื่อม
- เครื่องให้ความร้อนโดยใช้ความถี่ RF
- สายส่งกำลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง
- หลอดฟลูออเรสเซนต์
- การสั่นคาบของเครื่องยนต์

เตาอบไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบการสื่อสาร
- มอเตอร์ไฟฟ้า และอื่น ๆ

2.4.2 ทางเดินของสัญญาณรบกวน ทางเดินของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นตัวกลางที่สำคัญสำหรับการนำพาสัญญาณรบกวนออกไปสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งมีหลายทางเดินทั้งโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ตัวอย่างเช่น

- พื้นดิน
- กลุ่มเมฆ
- สิ่งก่อสร้าง และยานพาหนะ
- ตัวถังของอุปกรณ์
- การเดินสายสัญญาณบน PCB หรือสายตัวนำในวงจรหรือระบบ
- ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นต้น

2.4.3 แหล่งสิ่งที่ได้รับผลกระทบและผลของสัญญาณรบกวน

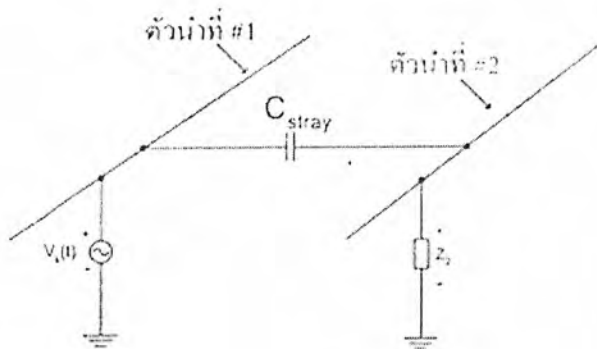
สำหรับสิ่งที่ได้รับผลกระทบ (Victim) คือ อุปกรณ์หรือระบบใดๆ ที่ไม่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบทำงานไม่เป็นดั่งเป้าหมายหรือไม่ทำงานเลย หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ตัวอย่างของสิ่งที่ได้รับผลกระทบ เช่น

- ตัวขยายสัญญาณ
- ตัวรับสัญญาณ
- คอมพิวเตอร์
- เครื่องวัดทางอุตสาหกรรม และเครื่องมือทางการแพทย์
- มนุษย์และสัตว์ เป็นต้น

2.5 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ

การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำคือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ การเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม (Common Mode) และโหมดแตกต่าง (Difference Mode) โดยจะอธิบายในหัวข้อถัดไป และการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานของการเกิดสัญญาณรบกวนไปสู่ตัวที่ได้รับผลกระทบ การส่งผ่าน (Coupling) และการกระจาย (Propagation) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือการส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive coupling) และ การส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำ (Inductive coupling)

- การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุ (Stray capacitance) ไปยังตัวนำอีกตัวหนึ่งที่อยู่ติดกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 และถ้ากระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุลงกราวด์จะเป็นการสร้างสัญญาณรบกวนชนิดโหมดร่วม



รูปที่ 2.4 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ

การส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำด้วยตัวเหนี่ยวนำเสมือน เป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวนโดยวิธีทางแม่เหล็ก โดยในสายตัวนำจะมีค่าการเหนี่ยวนำเสมือน (Mutual inductance: M) อยู่ เมื่อมีกระแสไหลผ่านก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้ก็ไปเหนี่ยวนำกับค่าการเหนี่ยวนำของอีกตัวนำหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 2.5



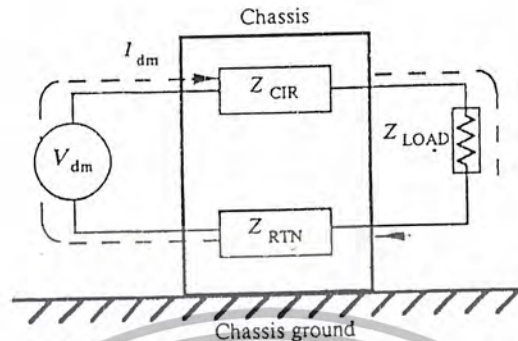
รูปที่ 2.5 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ

2.5.1 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำในโหมดแตกต่าง (Difference-mode)

สัญญาณรบกวนในโหมดแตกต่างเกิดสัญญาณที่ได้จากการทำงาน ของวงจร อิเล็กทรอนิกส์ เช่น สัญญาณนาฬิกา หรือ รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันในวงจรใด ๆ โดยสัญญาณในโหมดแตกต่างนี้ทางเดินของกระแสหรือแรงดันจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร (Z_{CIR}) เพื่อไปยังโหลด และจะไหลผ่านกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับดังแสดงใน รูปที่ 2.6 ซึ่งก็คือทางเดินหลักของสัญญาณในวงจรนั้น เช่นนั้นทางเดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรก็คือทางเดินเดียวกัน ดังนั้นเราสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำในโหมดแตกต่างจะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง 2 ตัวนำในการส่งสัญญาณ คือ ตัวนำสัญญาณไปยังโหมด (Signal line) และตัวนำสัญญาณกลับ (Return line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรในย่านความถี่สูง ย่านความถี่สูงนี้ คุณสมบัติของอุปกรณ์หรือตัวนำในวงจรอาจเปลี่ยนไป เช่น ทางเดินสัญญาณจะเกิดค่าการเหนี่ยวนำแฝงเกิดขึ้นได้ ซึ่งการป้องกันก็จะทำได้โดย การลดรูปของวงจรลง



รูปที่ 2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดแตกต่าง

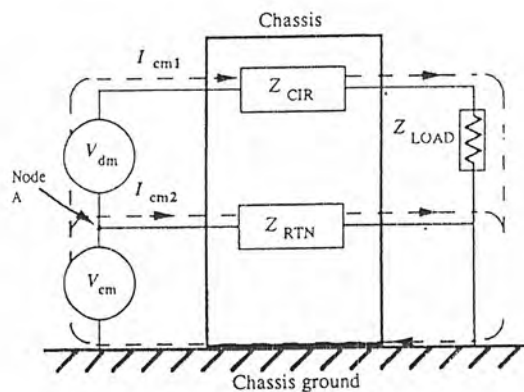
2.5.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำโหมดร่วม (Common Mode)

สำหรับการในโหมดร่วมนั้น จะพิจารณาการไหลของสัญญาณระหว่างกลุ่มของตัวนำกับกราวด์หรือกลุ่มตัวนำอื่น เป็นตัวอ้างอิง สำหรับการเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วมนั้นเราจะมีตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วมคือ ตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) โดยตัวเก็บประจุแฝงนี้จะเป็นเส้นทางเดินสัญญาณ ไปยังกราวด์ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงในโหมดร่วมของทั้งสายสัญญาณ (Line) และสายป้อนกลับ (Neutral) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นถ้าปราศจากตัวเก็บประจุแฝงนี้แล้วก็จะไม่เกิดสัญญาณรบกวนในกรณีโหมดร่วม จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายสัญญาณ ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับ ($V_{noiseRTN}$) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเส้นทางกรไหลของสัญญาณรบกวนในแต่ละสายมีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน เพราะว่าการไหลของสัญญาณในสายสัญญาณจะผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรแล้วผ่านไปยังอิมพีแดนซ์ของโหลด ในขณะที่การไหลของสัญญาณในสายป้อนกลับจะผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับเพียงอันเดียว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณการเกิดการรบกวนในโหมดร่วมไม่เท่ากัน โดยจะแสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) และเมื่อกระแสโหมดร่วมไม่เท่ากันก็จะทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลขึ้น และกระแสโหมดร่วมในกรณีก็จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณรบกวนในโหมดแตกต่างได้ (Differential noise)

$$V_{noiseCIR} = I_{CM1} \times (Z_{CIR} + Z_{Load} + X_{Cp}) \quad (2.1)$$

$$V_{noiseRTN} = I_{CM2} \times (Z_{RTN} + X_{Cp}) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม

2.6 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่ส่วนประกอบของตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง พฤติกรรมของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่สามารถรักษาคุณสมบัติของมันไว้ได้ เมื่อมีการทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดองค์ประกอบแฝงขึ้นในตัวอุปกรณ์นั้น ๆ ได้

2.6.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดมีค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance :Lp) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง(Parasitic Capacitance :Cp) เกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 ทั้งนี้เนื่องจากขาและขั้วของตัวต้านทานไฟฟ้า ถ้าขาของตัวต้านทานไฟฟ้ายาวมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก

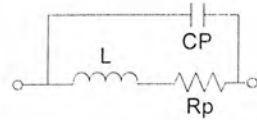


รูปที่ 2.8 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า

2.6.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ในทางปฏิบัติในการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะปรากฏพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝง(Parasitic Capacitance :Cp) เกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance :Rp)เกิดขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้นคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นการแสดงในรูปของแอดมิตแตนซ์ (Y) ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.9 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 ค่าแอดมิแตนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.6.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า เช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้า ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance :Rp) และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic Inductance :Lp) เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าแฝงและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะเปลี่ยนไป โดยจะแสดงให้เห็นรูปแบบของค่าแอดมิแตนซ์ ที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.12

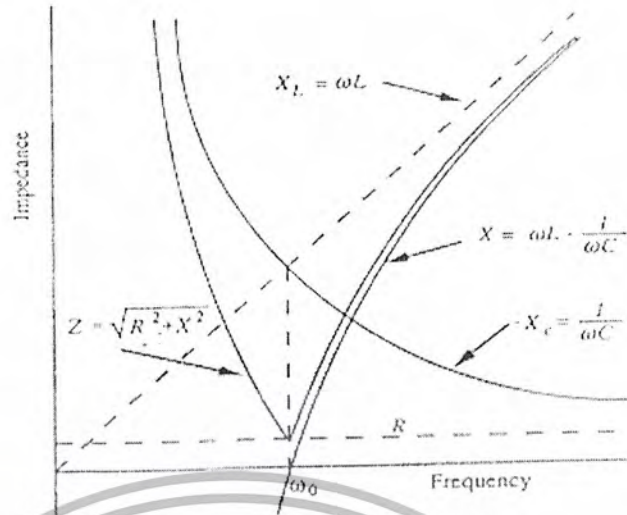


(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.11 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.6.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)

หรือค่า Q เป็นตัวประกอบคุณภาพ ใช้กับวงจรหรืออุปกรณ์ ที่เป็นสัญญาณ sine โดยมี ความสัมพันธ์ดังสมการ [10]

$$Q = \frac{2\pi \text{ Peak Stored energy}}{\text{Energy dissipated per cycle}} \tag{2.3}$$

$$Q = 2\pi \frac{\text{ค่าพลังงานที่เก็บสะสมสูงสุด}}{\text{พลังงานที่หายไป 1 cycle}} \tag{2.4}$$

โดย ค่า Q ยิ่งมีค่ามากยิ่งดี

2.6.5 ประสิทธิภาพของวงจรกรอง (Insertion loss)

ในการกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่ที่ทำการทดสอบ จะต้องทำการพิจารณาถึง ประสิทธิภาพ ของวงจรกรอง โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.5 ซึ่งจะพิจารณาจาก อัตราส่วนของพิคตแรงดันขาออก ของ แหล่งจ่ายแรงดันที่ไม่มีวงจรกรองต่ออยู่ (V_1) กับพิคตแรงดันขาออก ของแหล่งจ่ายแรงดันที่มีวงจรกรอง ต่ออยู่ (V_2)

$$IL = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \tag{2.5}$$

เมื่อ IL : Insertion loss (dB)

V_1 : พิคตแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายแรงดันที่ไม่มีวงจรกรองต่ออยู่ (V)

V_2 : พิคตแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายแรงดันที่มีวงจรกรองต่ออยู่ (V)

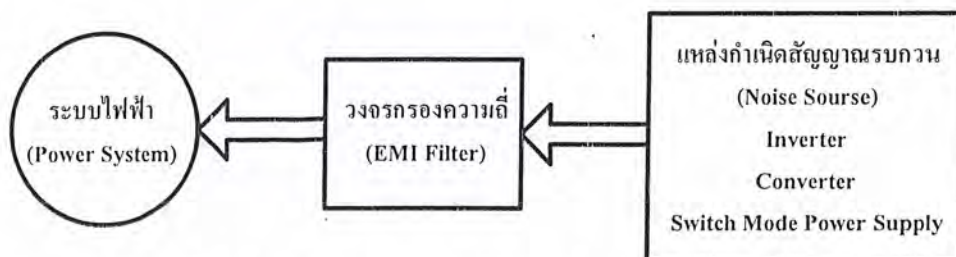
2.7 วงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งผลจากการรบกวนทางคลื่นสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงเข้าไปรบกวนในระบบ โดยวงจรจะกรองคลื่นความถี่สูงไม่ให้ผ่านไปแต่จะยอมให้คลื่นความถี่ต่ำสามารถผ่านไปได้ ถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ สัญญาณรบกวนความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 150kHz – 30MHz และถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางอากาศสัญญาณรบกวนความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 30MHz – 1GHz ซึ่งเราจะใช้วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่ส่งผ่านทางสายตัวนำ

เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงเข้าไปรบกวนในระบบจึงต้องใช่วงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อกรองความถี่สูงไม่ให้เข้าไปรบกวนในระบบและให้ยอมคลื่นความถี่ต่ำที่เราต้องการผ่านไปได้ โดยค่าความถี่ที่วงจรกรองความถี่ต่ำสามารถกรองได้เรียกว่า Cut-Off Frequency วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กจะมีความแตกต่างจากวงจรกรองความถี่ต่ำอื่นๆ คือ ในวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำจะมีค่าของ Cut-Off Frequency ตั้งแต่ 50Hz ขึ้นไป แต่วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก จะทำงานในย่านความถี่ที่สูงคือมีค่าของ Cut-Off Frequency ที่ความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz – 30 MHz ซึ่งสูงกว่าวงจรกรองความถี่ผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกส์

กล่าวได้ว่าวงจรกรองความถี่ทั้งสองแบบทำงานในย่านความถี่ที่ต่างกัน โดยวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกจะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานหรือเรียกว่าเป็นลำดับของฮาร์โมนิก และยอมให้คลื่นความถี่พื้นฐานผ่านไปได้ เช่น ถ้าคลื่นความถี่ พื้นฐานมีค่าเท่ากับ 50 Hz วงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกส์ก็จะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นลำดับของฮาร์โมนิกส์ ต่างๆ เช่น ลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 จะมีความถี่เท่ากับ 3 เท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานมีค่าคือ 150 Hz ลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่ 5 จะมีความถี่เท่ากับ 5 เท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานมีค่าคือ 250 Hz ซึ่งต่างจากวงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะกรองคลื่นความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz ขึ้นไป

วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดอุปกรณไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็ก เช่น Switch Mode Power Supply, Converter, Inverter ไม่ให้ไปรบกวนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะทั่วไปในการป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 วงจรกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

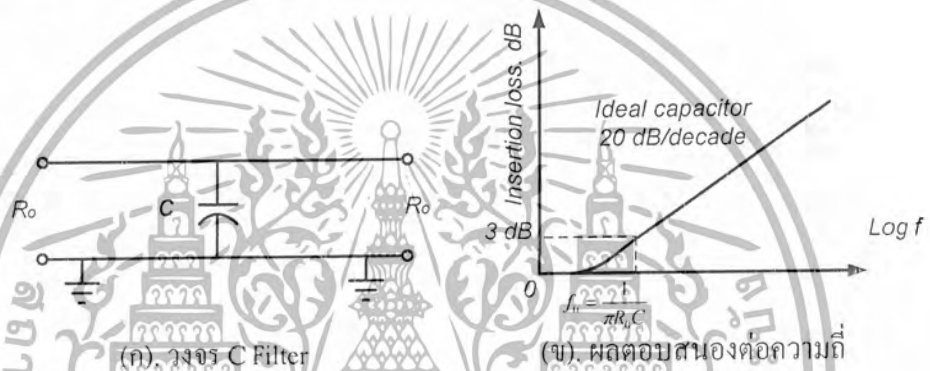
เป็นวงจรกรองที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านที่ง่ายที่สุดซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ระหว่างตัวนำซึ่งมีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่และมีสายตัวนำลงดินที่แสดงคังรูปที่ 2.14 การทำงานของวงจร โดยสัญญาณความถี่สูงจะต่อผ่านตัวเก็บประจุซึ่ง Insertion loss ของวงจรกรองนี้จะกำหนดโดย

$$f_0 = \frac{1}{\pi R_0 C} \tag{2.6}$$

เมื่อ f_0 : ความถี่ cut off (Hz)

R_0 : ความต้านทาน (Ω)

C : ตัวเก็บประจุ (ตัวต้านทานของวงจรกรอง : F)



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

ในทางปฏิบัติแล้วตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยทั้งค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่ ผลนี้เกิดจากแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของตัวนำ (ขาของตัวเก็บประจุ) ผลเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด จากสาเหตุเหล่านี้เองทำให้เกิดผลของการลดทอนที่ความถี่ลดทอน วงจรกรองจะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุเมื่อก่อนถึงความถี่ลดทอนและเมื่อผ่านความถี่ลดทอนไปแล้ว ตัวเก็บประจุนี้จะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวเก็บประจุแบบกระดาษพอลิออลูมิเนียม (Metalized Paper Capacitor) มีขนาดเล็กแต่จะมีประสิทธิภาพต่ำในย่านความถี่วิทยุ สาเหตุจากมีความต้านทานจุดต่อสูงและผลของความเหนี่ยวนำจากตัวนำของแผ่นฟิล์มโลหะ โดยส่วนมากจะใช้ที่ย่านความถี่ 20 MHz

ตัวเก็บประจุไมก้าและเซรามิกเป็นตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็ก และจะใช้ย่านความถี่ประมาณ 200 MHz

Feedthrough Capacitor เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้งานในย่านความถี่สูงสามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลของความถี่ลดทอนที่ความถี่สูงถึง 1 GHz. Feedthrough เป็นตัวเก็บประจุแบบ 3 ขั้ว และออกแบบเพื่อลดผลของตัวเหนี่ยวนำเนื่องจากความยาวของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrolytic Capacitor มักจะใช้สำหรับ DC Filter ใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและมีองค์ประกอบการสูญเสียมาก

2.7.2 วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor filter)

วงจรกรองกรงแบบนี้จะต่ออนุกรมกับตัวนำที่ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.15 จะได้ Insertion Loss ดังนี้

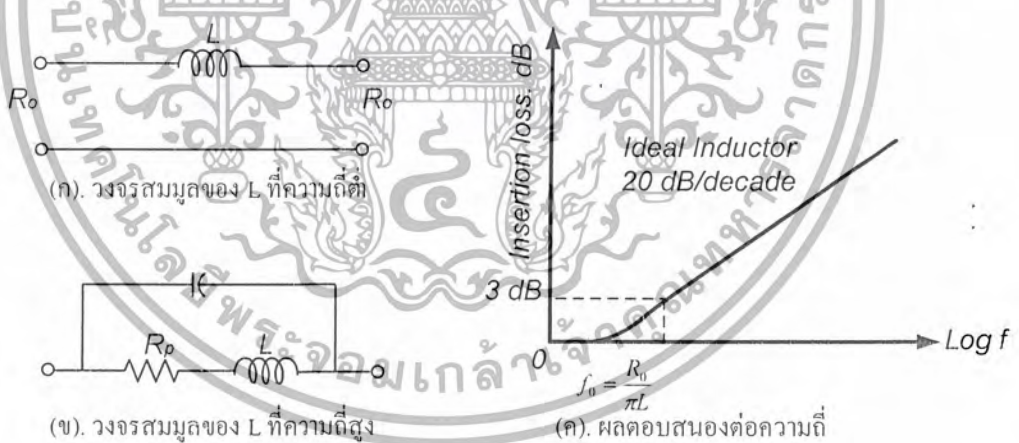
$$f_0 = \frac{R_0}{\pi L} \tag{2.7}$$

เมื่อ f_0 : ค่าความถี่ cut off (Hz)

L : ค่าความเหนี่ยวนำ (H)

R_0 : ค่าความต้านทานจุดต่อ (Ω)

ในทางปฏิบัติแล้วตัวเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความต้านทาน ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดภายใน แสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.15 วงจรกรองตัวเหนี่ยวนำจะมีทั้งแบบแกนอากาศ แกนเหล็กและแกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งแกนเฟอร์ไรท์จะมีค่า μ_0 สูงทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทั้ง อิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องมีค่าต่ำและค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง



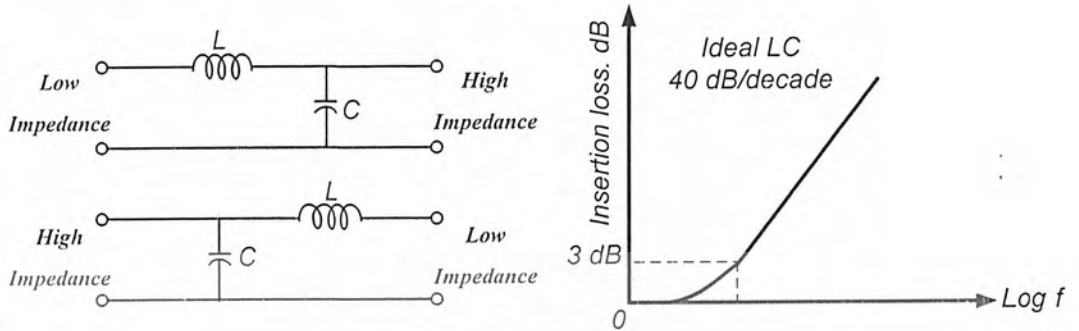
รูปที่ 2.15 วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

2.7.3 วงจรกรองความถี่แบบ LC (LC filter)

ค่าประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบ LC แสดงดังรูปที่ 2.16 เมื่ออิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าและโหลดไม่เท่ากัน ค่า Insertion loss จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงก็ต่อเมื่อค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ต้องมีค่าสูงกว่าภาระทางไฟฟ้าหรือแหล่งจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน กำหนดให้เป็น R_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

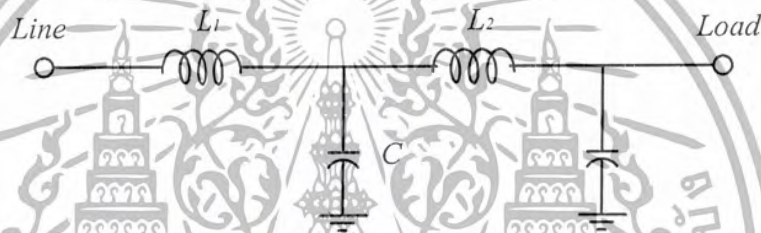
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K^2 & JKR_0 \\ \frac{JK}{R_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$



(ก). วงจร LC Filter

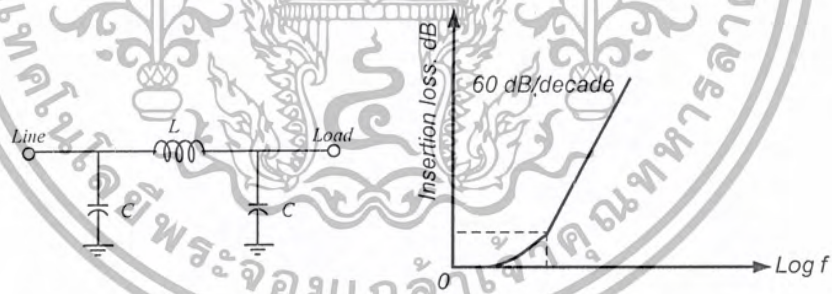
(ข). ผลตอบสนองต่อความถี่

รูปที่ 2.16 วงจรกรองความถี่แบบ LC



รูปที่ 2.17 การต่อ LC Filter อนุกรม

2.7.4 วงจรกรองความถี่แบบ π (Pi filter)



(ก). วงจร LC Filter

(ข). ผลตอบสนองต่อความถี่

รูป 2.18 แสดง π section filter

จากคุณลักษณะดังรูป วงจรความถี่แบบ π จะมีค่า Insertion loss สูงกว่าแบบอื่น ๆ ซึ่งค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ π จะมีความชันของกราฟ = 60 dB/decade วงจรกรองความถี่แบบ π จะมีประสิทธิภาพต่ำสำหรับสัญญาณรบกวนที่เป็นแบบ Transient วงจรกรองแบบ π จะสามารถเพิ่มค่าความถี่ของการกรองโดยการ Shielding ด้วยกัณฑ์โลหะ

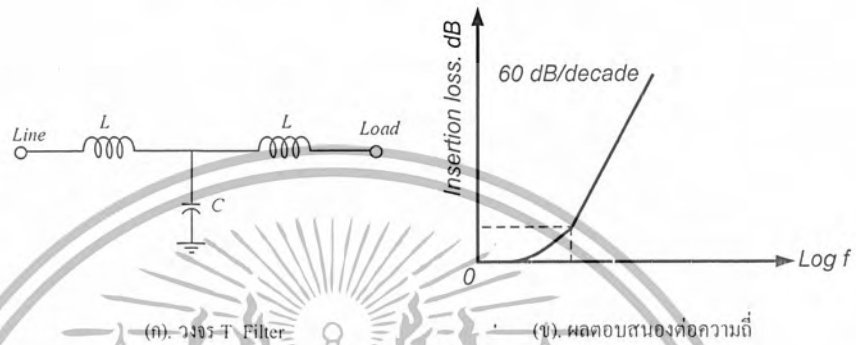
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(2 - K^2)}{2} + j0 & \frac{JKR_0(4 - K^2)}{4} \\ \frac{JK}{R_0} & \frac{2 - K^2}{2} + j0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 วงจรกรองความถี่แบบ T (T filter)

วงจรกรองที่ให้ความถี่ต่ำผ่าน ที่แสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแบบ Transient

$$\begin{bmatrix} \frac{V_1}{I_1} \\ \frac{V_2}{I_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K^2}{2} + j0 & JKR_0 \\ \frac{JK(4 - K^2)}{4R_0} & 1 - \frac{K^2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_2}{I_2} \\ \frac{V_1}{I_1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.19 วงจรกรองความถี่แบบ T
ตารางที่ 2.1 รูปชนิดของวงจรกรองพื้นฐานและเงื่อนไขการทำงาน

ชนิดของ วงจร	รูปวงจร	สมการ	ค่า Impedance(Z) ที่เหมาะสม	
			Input	Output
L		$f_0 = \frac{R_0}{\pi L}$	Z_{LOW}	Z_{LOW}
C		$f_0 = \frac{1}{\pi R_0 C}$	Z_{HIGH}	Z_{HIGH}
LC		$\begin{bmatrix} \frac{V_1}{I_1} \\ \frac{V_2}{I_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K^2}{2} + j0 & JKR_0 \\ \frac{JK}{R_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_2}{I_2} \\ \frac{V_1}{I_1} \end{bmatrix}$	Z_{LOW}	Z_{HIGH}
π		$\begin{bmatrix} \frac{V_1}{I_1} \\ \frac{V_2}{I_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(2 - K^2)}{2} + j0 & \frac{JKR_0(4 - K^2)}{4} \\ \frac{JK}{R_0} & \frac{2 - K^2}{2} + j0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_2}{I_2} \\ \frac{V_1}{I_1} \end{bmatrix}$	Z_{HIGH}	Z_{HIGH}
T		$\begin{bmatrix} \frac{V_1}{I_1} \\ \frac{V_2}{I_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K^2}{2} + j0 & JKR_0 \\ \frac{JK(4 - K^2)}{4R_0} & 1 - \frac{K^2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_2}{I_2} \\ \frac{V_1}{I_1} \end{bmatrix}$	Z_{LOW}	Z_{LOW}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 นิยาม มาตรฐาน เครื่องวัดและขั้นตอนในการวัดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายนำ [2]

2.8.1 นิยามของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้สองรูปแบบกล่าวคือ

- สัญญาณรบกวนโหมดรวม (Common-Mode Interference: CM)
- สัญญาณรบกวนโหมดต่าง (Differential-Mode Interference: DM)

อย่างไรก็ตามในบทความของ Dr.Dan Y. Chen และ คณะ ได้นำเสนอสัญญาณรบกวนใหม่ (new noise-coupling mode) ซึ่งโหมดการทำงานจะเหมือนกับสัญญาณรบกวนโหมดรวม แต่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้สามารถกำจัดได้ด้วยตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณรบกวนโหมดต่าง (โดยส่วนใหญ่จะนิยมเรียกตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนใหม่ผลต่างว่า “C_x”) และด้วยเหตุนี้เองเพื่อให้เกิดความแตกต่างขึ้นจึงได้ชื่อสัญญาณรบกวนตัวใหม่นี้ว่า “Non-intrinsic Differential Mode noise” (NIDM) แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 2000 Dr.Dan Y. Chen และ คณะ ได้เรียก NIDM ใหม่ว่า “Mixed-Mode noise” และในส่วนของสัญญาณรบกวนใหม่โหมดผลต่างแบบทฤษฎีเก่าซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับกราวด์(Ground) เลยจะให้อธิบายว่า “Intrinsic Differential Mode noise”(IDM) จะขึ้นอยู่กับ การกระเพื่อม (Pulsating) หรือองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าอินพุตหรือขึ้นอยู่กับระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้า(Ripple current)

ส่วนกรณีของ NIDM จะปรากฏเมื่อระบบมีกราวด์ต่อรวมอยู่ในวงจรเสมอและส่วนที่คล้ายสัญญาณรบกวนโหมดรวมอย่างมากได้แก่การที่ทั้งคู่ต่างก็ขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitances) ที่แฝงอยู่ในวงจรอย่างไรก็ตามเนื่องจากนิยามการแบ่งโหมด การรบกวนตามรูปแบบดังกล่าวยังไม่นิยามแพร่หลาย

สำหรับนิยามของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม คือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำเทียบกับสายกราวด์ ในขณะที่นิยามของสัญญาณรบกวนโหมดต่าง คือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายนำ

ดังนั้นในกรณีวงจรไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวตรอน (N) และสายกราวด์ หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม (common mode voltage) และค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode voltage) ดังต่อไปนี้

$$V_c = \frac{(V_{LG} + V_{NG})}{2} \quad (2.11)$$

$$V_d = \frac{(V_{LG} - V_{NG})}{2} \quad (2.12)$$

โดยที่ V_{LG} : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์ (V)

V_{NG} : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวตรอนกับกราวด์ (V)

V_{LN} : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับนิวตรอน (V)

ซึ่งการเดินทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดต่างและโหมดร่วมที่อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเดินทางของกระแสไฟฟ้าในโหมดผลร่วมจะเดินทางผ่านตัวเก็บประจุแฝงของวงจร ในขณะที่กระแสในโหมดผลต่างจะไม่เดินทางผ่านตัวเก็บประจุแฝงดังกล่าว

2.8.2 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่าต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power core) ผ่านตัวรับ และจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว มิได้เป็นการรับประกันว่าผ่านการทดสอบนั้นจะไม่เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพียงแค่เป็นการยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้าดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.8.2.1 CISPR

CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (จริงๆแล้วย่อมาจากคำเต็มซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศสคือ Comite International Special des Perturbations Radio electrique) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1933 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของวงจรรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ นอกจากนี้ CISPR ไม่ได้เป็นกฎข้อบังคับหรือมาตรฐานบังคับใช้แต่อย่างใด แต่มาตรฐานดังกล่าวจะถูกดัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในประเทศ จึงกลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย โดยมาตรฐาน CISPR publication 22 เป็นการออกมาเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากกรณีของเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งก็หมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) ซึ่งได้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1985 และหลังจากนั้นหลาย ๆ ประเทศทางยุโรปหรืออาจจะกล่าวได้ว่าทั่วโลกได้นำมาตรฐานดังกล่าวออกบังคับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติของตน (national standard) เช่น ประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันอินพุตของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์ เป็นต้น

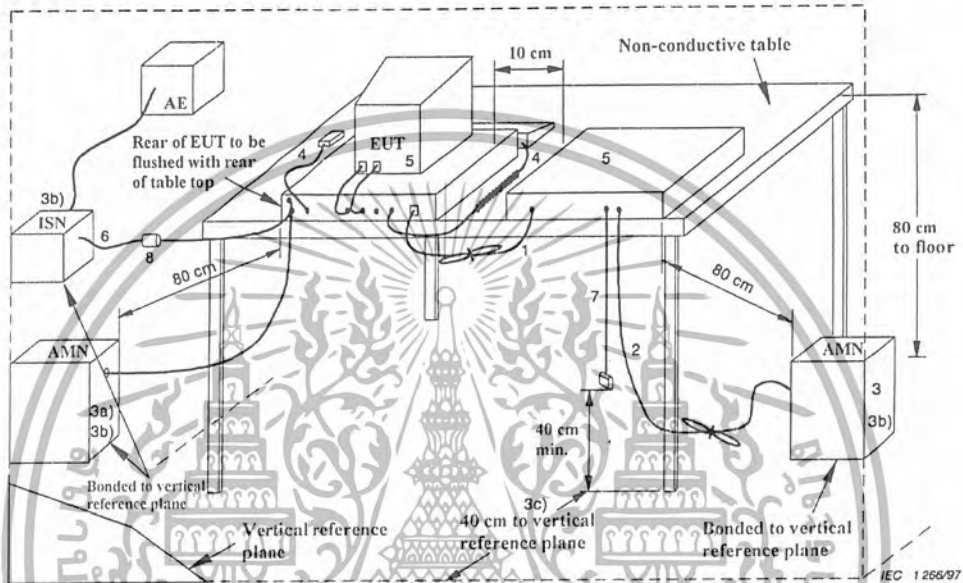
2.8.2.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยซึ่งได้มีการเริ่มต้นนำมาตรฐานนานาชาติมาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 โดยมีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นภาษาไทยแล้วได้แก่ มอก. 1955-2542 (บริษัทส่งสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน : ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และ มอก. 1956 – 2542 (บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ : ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) แต่ไม่ได้มีการบังคับใช้แต่อย่างใดเป็นเพียงแต่การแนะนำเบื้องต้น (voluntary) เท่านั้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกเหนือจากมาตรฐานที่ได้กล่าว มาตรฐานที่หลีกเลี่ยงที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็น การเปลี่ยนแปลงอะปกรณอกของมาตรฐานให้เป็นภาษาไทยเท่านั้นแต่เนื้อหาภายในจะเหมือนต้นฉบับ

2.9 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

รูปที่ 2.20 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทาง ตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้ [7,8]



AMN : Artificial mains network
 AE : Associated equipment
 EUT : Equipment under test
 ISN : Impedance stabilization network

รูปที่ 2.20 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เหนือแนวระดับของแผ่นกราวด์และไม่สามารถทำให้สั้นได้ จะต้องมัดทาบปลายสายให้มีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟจากแหล่งจ่ายจะต้องมัดทาบกันให้สายสั้นที่สุด
3. อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดต้องต่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ AMN/LISN และ ISN ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ที่อยู่ในแนวระดับ
 - a) แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องต่อมาจาก AMN/LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีหลายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์
 - b) AMN/LISN และ ISN ที่ใช้เป็นที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด 80 เซนติเมตร และอย่างน้อย 80 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่นโลหะอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c) สายไฟหลักและสายสัญญาณควรวางให้ห่างกันมากที่สุดเท่าที่ทำได้และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร

4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น สายคีย์บอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆ ให้วางในเหมือนการใช้งานทั่วไป

5. สิ่งที่อยู่รอบๆ ภายนอกจะต้องอยู่ห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นข้างเคียงและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางอยู่บนตัวควบคุมได้

6. มีสายสัญญาณเข้าออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อกับกับอิมพีแดนซ์ก็ได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ current probe ควรวางห่างจาก ISN ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร

2.10 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งมีความหมายของนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทงสายตัวนำ รวมถึงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบพื้นฐาน ซึ่งจากข้อมูลที่ได้กล่าวในบทนี้ จะทำให้สามารถนำไปเชื่อมโยงกับการออกแบบในบทต่อไป และนำไปพิจารณาในการจำลองระบบอีกทั้งอธิบายถึง มาตรฐานที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวน

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงทฤษฎีและหลักการในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเบื้องต้น รวมถึงใช้หลักการที่ได้กล่าวมาข้างต้นในการออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐาน CISPR 22

3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเบื้องต้น

วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวิธีหนึ่งเรียกว่าการออกแบบโดยผ่านทางเรขาคณิตของแกน (Design via core geometry ; K_g) ในวิธีนี้ผู้ออกแบบเป็นผู้เลือกค่าของกำลังสูญเสียในลวดทองแดง หรือ P_{cu} และใช้ค่า P_{cu} ในการคำนวณพารามิเตอร์ K_g ที่บอกขนาดของแกน แกนที่เลือกจะต้องมีค่า K_g ที่ใหญ่กว่าค่าที่คำนวณ เมื่อเป็นเช่นนี้จะมีเนื้อที่พอที่จะพันลวดรอบแกน โดยที่ขนาดของเส้นลวดใหญ่พอที่จะทำให้การสูญเสียในลวดทองแดงเป็นไปตามที่กำหนด [5]

พารามิเตอร์ K_g ขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของแกน ดังนี้

$$K_g = \frac{WS^2}{T} \quad (3.1)$$

โดยที่ W : พื้นที่ของหน้าค้ำของแกน (mm^2)

S : คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (mm^2)

T : คือ ความยาวเฉลี่ยของลวดหนึ่งรอบ (mm)

กำลังสูญเสียในลวดทองแดงมีค่าเท่ากับ

$$P_{cu} = I_{RMS}^2 R \quad (3.2)$$

โดยที่ I_{RMS} : ค่า RMS ของกระแสผ่าน L (A)

R : คือ ความต้านทานของลวดทองแดง (Ω)

เรากำหนด R ได้ดังนี้

$$R = \frac{\rho l}{A_w} \quad (3.3)$$

โดยที่ ρ : ความต้านทานจำเพาะของทองแดง มีค่าเท่ากับ $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

l : ความยาวของลวด ซึ่งเท่ากับจำนวนรอบ N คูณด้วยความยาวเฉลี่ยต่อรอบ t (mm)

A_w : พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง มีค่าเท่ากับ (kW/N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K : ตัวประกอบการใช้หน้าตัดของแกน นั่นคืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เป็นทองแดงกับพื้นที่ของหน้าตัด

พื้นที่หน้าตัดประกอบด้วยพื้นที่ที่เป็นทองแดงและพื้นที่หน้าตัดที่ไม่ใช่ทองแดง ซึ่งได้แก่ พื้นที่ของฉนวนหุ้มทองแดง ช่องว่างระหว่างลวดและพื้นที่หน้าตัดของ coil former k จึงมีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.6 ขึ้นอยู่กับฝีมือการพันขดลวดว่าจะหลวมหรือแน่นสักเพียงใด

แทนค่า I และ A_w ลงในสมการ (3.3) และ (3.2) จะได้

$$P_{cu} = \frac{I_{RMS}^2 \rho N^2 t}{kW} \tag{3.4}$$

จำนวนรอบ N มีความสัมพันธ์กับค่าออกของกระแส I_p กับค่าสูงสุดของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B_m ดังนี้

$$N = \frac{LI_p}{B_m S} \tag{3.5}$$

โดยที่ L : ค่าความเหนี่ยวนำ (H)
แทนค่า N ลงในสมการที่ (3.4) จะได้

$$P_{cu} = \frac{4\rho l(0.5LI_p^2)(0.5LI_{RMS}^2)}{B_m^2 S^2 kW} \tag{3.6}$$

จากสมการที่ (3.6) เราคำนวณพารามิเตอร์ K_g ได้ดังนี้ :

$$K_g = \frac{WS^2}{t} = \frac{40(0.5LI_p^2)(0.5LI_{RMS}^2)}{kB_m^2 P_{cu}} \tag{3.7}$$

ในการออกแบบ L เราสมมติว่าเรารู้ค่า L ที่ต้องการ รูปร่างของกระแส (นั่นคือ I_p และ I_{RMS}) รู้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกน (นั่นคือ B_m) เมื่อเลือกค่า k และ P_{cu} เราก็คำนวณพารามิเตอร์ K_g ได้ โดยทั่วไปเราเลือก P_{cu} ประมาณ 1 ถึง 2 % ของกำลังด้านออกของวงจรแปลงผัน

เมื่อทราบค่าที่คำนวณได้ของ K_g เราก็สามารถเลือกแกนที่มีค่า K_g สูงกว่าค่าที่กำหนดได้เล็กน้อย เมื่อเลือกแกนแล้วก็เท่ากับเรารู้ค่าของ W, S และ t เราจึงสามารถคำนวณจำนวนรอบได้ตามสมการที่ (3.5) และคำนวณพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงได้ตามสมการที่ (3.8)

$$A_w = \frac{kW}{N} \tag{3.8}$$

จากค่า A_w ที่คำนวณได้ เราสามารถเลือกลวดทองแดงที่มีค่า A_w ใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้เล็กน้อย

จากนั้นก็ทำการคำนวณค่าของช่องว่างอากาศ (air gap) ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ช่องว่างอากาศ} \quad I_g = \frac{N^2 \mu_0 S}{L} \quad (3.9)$$

โดยที่ μ_0 : ความซึมซาบได้ (permeability) ของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

ค่า I_g ที่คำนวณได้เป็นทฤษฎีอย่างไรก็ดี ฟลักซ์ที่ขอบของช่องอากาศจะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลเสมือนว่าพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเหนี่ยวนำจริงจึงมีค่าใหญ่กว่าที่คำนวณในทางปฏิบัติเราจะต้องปรับแต่งค่าของช่องอากาศเพื่อให้ได้ค่าของ L ตามที่ต้องการ

เราได้กล่าวถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านทางเรขาคณิตของแกน (design via core geometry : K_g) ในกรณีนี้จะเพิ่มเติมแนวทางการออกแบบที่อาศัยผลคูณของพื้นที่ หรือ area product A_p [6]

ผลคูณพื้นที่มีนิยามดังนี้

$$A_p = W \cdot S \quad (3.10)$$

ให้ A_w เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง J เป็นความหนาแน่นกระแส I_p และ I_{RMS} เป็นค่ายอดและค่า RMS ของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ k คือตัวประกอบการใช้หน้าตัดของแกน ดูสมการที่ (3.11) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.6-0.3

ค่าของตัวเหนี่ยวนำถูกจำกัดโดยฟลักซ์เชื่อมโยงสูงสุดตามสมการดังนี้

$$\lambda_m = NB_m S = LI_p \quad (3.11)$$

พื้นที่ของหน้าตัดที่เป็นส่วนใช้งาน หรือเป็นลวดทองแดงมีค่าเท่ากับ

$$kW = Na_w = \frac{NI_{RMS}}{J} \quad (3.12)$$

เราคำนวณผลคูณพื้นที่ได้ดังนี้

$$A_p = W \cdot S = \frac{LI_p I_{RMS}}{Jk B_m} \quad (3.13)$$

จากข้อกำหนดการออกแบบ เรารู้ปริมาณทางด้านขวามือของสมการที่ (3.13) ทุกปริมาณ จึงสามารถคำนวณปริมาณ A_p ได้เราจะเลือกแกนจากข้อมูลของผู้ผลิตให้มีค่า A_p มากกว่าแต่ใกล้เคียงกับที่คำนวณ เมื่อเลือกแกนแล้วก็รู้ค่า S จึงสามารถคำนวณจำนวนรอบ N ได้ตามสมการที่ (3.11) เมื่อรู้ค่า N ก็สามารรถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง A_w ได้ตามสมการที่ (3.12) จากข้อมูลของผู้ผลิตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดทองแดง เราเลือกลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัด A_w มากกว่าแต่ใกล้เคียงกับที่คำนวณ จากนั้นให้คำนวณความยาวของลวดทองแดง จากการประมาณค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบโดยอาศัยข้อมูลของพื้นที่ลวดหรือของแกน เมื่อรู้ความยาวก็สามารถคำนวณความต้านทาน R_{cu} ได้ และคำนวณความสูญเสียในลวดทองแดง ซึ่งเท่ากับ $P_{cu} = I_{RMS}^2 R_{cu}$ ถ้า P_{cu} มีค่ามากเกินไปก็ให้ย้อนกลับไปเลือกค่าความหนาแน่นของกระแส J ใหม่แล้วทำการคำนวณใหม่อีกครั้งหนึ่ง ถ้า P_{cu} เหมาะสมแล้วเราก็จะประมาณค่าความยาวของอากาศ โดยใช้สูตร $l_g = N^2 \mu_0 S / L$ อย่างไรก็ดี เนื่องจากฟลักซ์ที่ริมขอบจะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าค่าที่คำนวณ เราจะต้องใช้วิธีปรับความยาวของช่องอากาศโดยวิธีลองผิดลองถูก

เราได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 3 วิธีคือ

1. การคำนวณ S จากค่าพลังงานสะสมในช่องอากาศ W_{Lm}
2. การคำนวณค่า $A_p = W \cdot S$ จากการเลือกค่าความหนาแน่นของกระแส J
3. การคำนวณค่า $K_g = WS^2/t$ (ดูหัวข้อการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเบื้องต้น)

จากการเลือกค่ากำลังสูญเสียในทองแดงใน P_{cu} ทั้ง 3 วิธีสมควรให้ผลการออกแบบที่สอดคล้องกัน หนึ่งนอกจากจะประมาณค่า P_{cu} เราควรประมาณค่าการสูญเสียในแกนแม่เหล็กด้วย เพื่อให้ได้ค่ารวมของการสูญเสีย

3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI FILTER)

การออกแบบ EMI FILTER ทั้ง 3 ชนิด คือ LC Filter, T Filter, π -Filter สิ่งที่สำคัญในการกำหนดค่าองค์ประกอบของฟิลเตอร์ คือ ค่า L, C ของฟิลเตอร์ หรือการออกแบบนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขแวลลุ่มต่าง ๆ ของระบบที่จะพิจารณานั้นคือ

- 3.3.1 แรงดันต่ำสุด (Minimal Line Voltage)
- 3.3.2 กระแสสูงสุด (Maximum RMS Line Current)
- 3.3.3 ชนิดของโหลด
- 3.3.4 ความถี่ไลน์ (Power Line Frequency)
- 3.3.5 ค่าความสูญเสียที่ต้องการ (Loss Required) ที่ต้องการลดทอน (ได้จากการทดลอง)

ตัวอย่างเช่น ระบบที่ใช้เป็นซิงเกิลเฟส (Single phase) 50 Hz แรงดัน RMS 220 V ค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ 2A โดยสามารถเพิ่มค่าขึ้นได้อีก 10% กำหนดโหลดชนิดของฟิลเตอร์เช่น Off-Line Required Power Factor Correction หรือการโหลดความต้านทาน ฯลฯ

3.4 ขั้นตอนการออกแบบ

3.4.1 เลือกชนิดของฟิลเตอร์ ที่ต้องการใช้ พิจารณาจากโหลดค่าสูญเสียที่ต้องการและการเลือกแบบใน Common mode หรือ Differential mode

3.4.2 กำหนดค่าดีไซน์อิมพีแดนซ์จาก อัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันต่ำสุดกับค่ากระแสโหลดสูงสุดใช้ได้กับทั้ง Common mode หรือ Differential mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 กำหนดค่าความถี่คัทออฟของฟิลเตอร์ ทั้ง Common mode และ Differential mode โดยสามารถหาได้ 2 วิธี คือ การหาค่าโดยการใส่ Chain Matrix และการคำนวณค่าโดยคิดจากค่าความสูญเสียในฟิลเตอร์ (F_o The easy way) ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธี เช่น เมตริกซ์ (Chain Matrix) อย่างคร่าว ๆ เนื่องจากในโครงการนี้ได้พิจารณาค่าความถี่คัทออฟ (Cut – Off Frequency) จากวิธี F_o The easy way

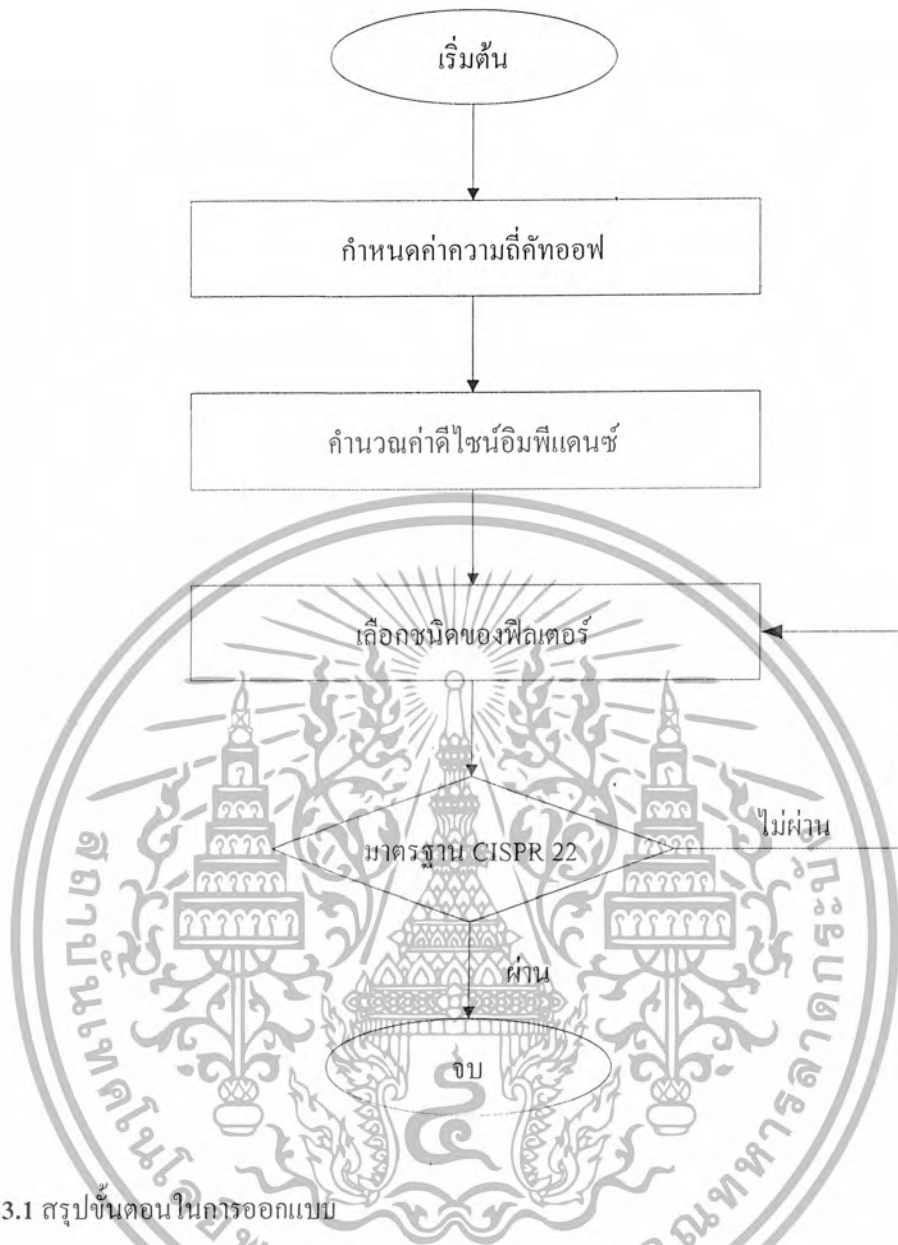
หากจากวิธี เช่น เมตริกซ์ ซึ่งจะมี เมตริกซ์ ในรูปแบบต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบ ซึ่งประกอบด้วย เมตริกซ์ R_s คือค่าความต้านทานของแหล่งจ่าย , LISN (Line Impedance Stabilization Network) คือ การจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเป็น 50 Ω เพื่อใช้ในการทดสอบฟิลเตอร์, เมตริกซ์ของฟิลเตอร์ เช่น L, π, T รวมไปถึงวงจรอื่นๆ ที่ต่อร่วมกัน เช่น RCSHU เป็นต้นโดยการนำเมตริกซ์ของฟิลเตอร์ของแต่ละส่วนมาคูณเรียงกันไปจาก แหล่งจ่ายถึงส่วนสุดท้ายที่ติดกับโหลดโดยคิดถึงทุกเมตริกซ์ หมายถึงถ้าเป็น Multiple L ก็ต้องคูณเมตริกซ์ L สองครั้ง ตัวอย่างของเมตริกซ์ ดังเช่น LC เมตริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K^2 & JKR_D \\ JK & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

โดยค่า $K = \frac{F_c}{F_o}$
 F_c : ค่าความถี่ที่พิจารณา (Hz)
 F_o : ค่าความถี่คัทออฟ (Hz)

ด้วยวิธีการหาค่าเมตริกซ์นั้น จะหาค่าความถี่คัทออฟโดยการเปลี่ยนค่า K ไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าความสูญเสียที่ต้องการ โดยจะใช้ร่วมกับ ซอฟต์แวร์โปรแกรม การหาค่าความถี่คัทออฟจาก F_o The easy way

ฟิลเตอร์เกือบจะทั้งหมดสามารถออกแบบได้โดยไม่ปราศจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถ้าเป็นการออกแบบ แบบธรรมดาได้ กล่าวคือไม่มี ส่วนของวงจร RCSHU หรือ Cauer



รูปที่ 3.1 สรุปขั้นตอนในการออกแบบ

3.5 การตรวจสอบการผ่านมาตรฐาน CISPR 22

หลังจากที่สามารถคำนวณหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ แบบทั่วไปได้แล้วนั้น จะต้องทำการปรับเลือกค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสม ที่ทำให้วงจรต้นแบบสามารถผ่านมาตรฐาน CISPR 22 ซึ่งถ้าไม่ผ่านมาตรฐานจะต้องเริ่มทำหัวข้อ 3.4.1 อีกครั้ง

ส่วนวิธีการคำนวณเริ่มต้นจากการกำหนดค่าความสูญเสียที่ต้องการให้เกิดในฟิลเตอร์และความถี่ที่น่าสนใจ เช่น 46 dB ที่ความถี่ 20 kHz ที่ความถี่ 400 Hz ค่าดีไซน์อิมพีแดนซ์ เท่ากับ $10\ \Omega$ ถ้าเลือกใช้ L ฟิลเตอร์ ที่ให้ค่า 12 dB / octave ของการลดทอน (6 dB / octave สำหรับแต่ละส่วนประกอบ)

ตารางที่ 3.1 ค่าความถี่คัทออฟจาก F_o The easy way

ความถี่ (kHz)	dB
20	46
10	34
5	22
2.5	10
1.25	-2

โดยเราทำการหาค่าความถี่ด้วย 2 และลบค่า dB ออกที่ 12 dB สำหรับค่าการลดทอนจนได้ค่า dB เป็นประมาณ -3 dB (เนื่องจากค่าความถี่คัทออฟจะเกิดที่ -3 dB) โดยในการพิจารณาความถี่ต้องระวังเพราะเนื่องจากถ้าเป็นการออกแบบใน Differential Mode ความถี่คัทออฟที่ได้ต้องมีค่าเหนือกว่าฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ลำดับที่ 9 ของความถี่ไลน์ เนื่องจากค่าฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่เหนือกว่าขึ้นไปไม่มีค่ามากนัก เมื่อเราพิจารณาจากตัวอย่างด้านบนและค่าในตาราง จะเห็นได้ว่าถ้าเป็นใน Differential Mode แล้วค่าความถี่คัทออฟที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า 10 เท่าของความถี่ไลน์เพราะฉะนั้นจึงเปลี่ยนเป็นสเตจของฟิลเตอร์เป็น 2 สเตจ (Multiples) โดยเปลี่ยนค่าการลดทอนของฟิลเตอร์ จาก 12 dB เป็น 24 dB ตามรูปของวงจร L ฟิลเตอร์

ตารางที่ 3.2 ค่าความถี่คัทออฟที่ได้ใหม่

ความถี่ (kHz)	dB
20	46
10	22
5	-2

จะเห็นว่าค่าความถี่คัทออฟที่ได้ใหม่นั้นมีค่าเท่ากับ 5 kHz ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากนั้นนำค่ามาคำนวณตามสมการ

$$L = \frac{R_D}{2\pi F_o} \quad (3.15)$$

$$C = \frac{1}{2\pi F_o R_D} \quad (3.16)$$

ซึ่งค่า L และ ค่า C ที่ได้มานั้นสามารถนำไปใช้ได้เลยสำหรับในกรณี Differential Mode แต่สำหรับใน Common Mode จะมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นโดยจะอธิบายประกอบตัวอย่างเพื่อความเข้าใจโดยจะพิจารณาที่ ค่าความสูญเสียรวมที่ต้องการเท่ากับ 46 dB ที่ความถี่ 50 kHz ความถี่ไลน์ 400Hz R_D เท่ากับ 10 Ω

$$L = \frac{10}{2\pi \cdot 3.125} = 509.3 \text{ mH} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าความถี่คัทออฟในคอมมอน โหมด

ความถี่ (kHz)	dB
50	46
25	34
12.5	22
6.25	10
3.125	-2

ค่าคาปาซิเตอร์ที่ต่อถึงกราวด์ (Capacitor to Ground) เราสามารถกำหนดค่าขึ้นได้โดยที่ค่าคาปาซิเตอร์นั้นต้องมีค่าไม่เกิน $0.02 \mu\text{F}$ สำหรับ 400 Hz และ $0.1 \mu\text{F}$ สำหรับ 60 Hz (จาก Military Standard 461) เลือกใช้ค่า $2 \times 0.02 \mu\text{F}$ หรือ $0.04 \mu\text{F}$ ค่าคาปาซิเตอร์ที่คิดจาก สมการที่ 3.16 ได้ค่า $5.09 \mu\text{F}$ จากนั้น หาค่า $5.09 \mu\text{F}$ คูณด้วย $0.04 \mu\text{F}$ จะได้ค่า $127.32 \mu\text{F}$ นำค่าที่ได้ไปคูณกับค่า L ที่คำนวณได้จะได้ค่า L เท่ากับ 64.8 mH แต่เนื่องจากค่า L ที่ได้นั้นยังมีค่าสูงอยู่มากเพราะฉะนั้นเราสามารถทำเป็น 2 สเตทได้โดยใช้วิธีเดียวกับที่ได้อธิบายมาข้างต้นแล้ว

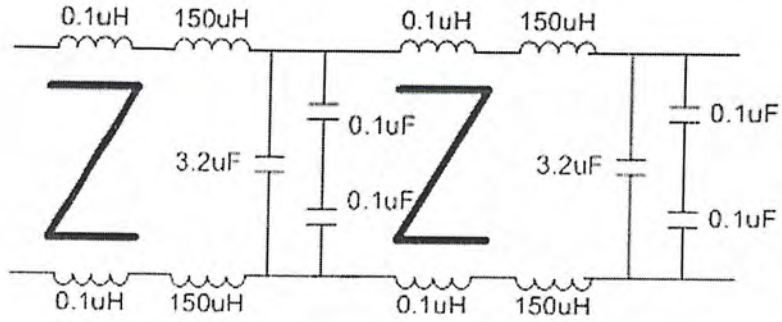
ตารางที่ 3.4 ค่าความถี่คัทออฟที่ได้มาใหม่

ความถี่ (kHz)	dB
50	46
25	22
12.5	-2

$$L = \frac{10}{2\pi 12500} = 127.3 \mu\text{H} \quad (3.18)$$

$$C = \frac{1}{2\pi 12500 \times 10} = 1.273 \mu\text{F} \quad (3.19)$$

ใช้ค่าคาปาซิเตอร์ รวม $0.02 \mu\text{F}$ ($0.01 \mu\text{F}$ 4 ตัว) หาค่า $1.273 \mu\text{F}$ คูณด้วย $0.02 \mu\text{F}$ จะได้ $63.56 \mu\text{F}$ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าอินดักเตอร์ 8.1 mH แสดงวงจรดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงวงจร EMI Filter แบบ Double state

จากตัวอย่างเมื่อเราใช้เทคนิคนี้ในการเปลี่ยนแปลงค่าอินดักเตอร์แต่ความถี่คัทออฟที่ได้นั้นยังคงมีค่าใกล้เคียงค่าเดิมที่ได้จากตาราง

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.0081 \times 0.02 \times 10^{-6}}} = 12504.4 \text{ Hz} \quad (3.20)$$

ข้อควรระวังก็คือเทคนิคการเปลี่ยนค่าอินดักเตอร์นั้นใช้ได้กับในกรณีของ Common Mode เท่านั้นไม่ใช้กับกรณีของ Common Mode เพราะสาเหตุจากเรื่องของการ match impedance ซึ่งจะต้องคำนึงถึงใน Differential Mode

จากวิธีการหาค่า F_0 the easy way สามารถนำไปใช้กับทั้ง π และ T ฟิลเตอร์ โดยการเปลี่ยนค่าจาก 12 dB เป็น 18 dB (π และ T มีส่วนประกอบ 3 ส่วน) ซึ่งถ้าเป็น T ฟิลเตอร์ 2 สเตจ จะได้ค่าเป็น 30 dB/octave เราสามารถสรุปเป็นการหา F_0 ได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{F}{2^x} \quad (3.21)$$

F_0 : ค่าความถี่คัทออฟ (Hz)

F : ค่าความถี่ที่พิจารณา (Hz)

$$x : \frac{dB}{L}$$

dB : ค่าความสูญเสียที่ต้องการให้เกิดที่ความถี่ที่พิจารณา

L : ค่า per octave ของฟิลเตอร์ เท่ากับ 12 N ถ้าเป็น π หรือ T จะเป็น $(2N+1)6$

ลักษณะฟิลเตอร์ L, π , T ตามที่เราต้องการออกแบบ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการคำนวณและการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ วงจรกรองความถี่ลดทอน สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น รวมถึงอธิบายขั้นตอนในการออกแบบ ซึ่งผลที่ได้คือวงจรลดทอนสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ เช่น LC , T , π ที่สามารถนำไปสู่การทดลองต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การจำลองการทำงานของวงจร Filter ที่มีผลต่อ EMI

4.1 บทนำ

ในการศึกษาหรือการทำวิจัยนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจำลองการทำงานของวงจรที่จะใช้ก่อนทำการทดลองจริงเสมอ เพื่อที่จะได้ทราบแนวโน้มหรือผลการทำงานเบื้องต้นว่าเป็นไปตามหลักการ ตามทฤษฎีหรือการออกแบบหรือไม่ และใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง เพื่อยืนยันความสอดคล้องกันระหว่างทฤษฎี การจำลองและผลการทดลอง

การจำลองนั้นสามารถทำได้โดยง่าย สะดวก และรวดเร็ว ทั้งประหยัดค่าใช้จ่าย โดยทำให้ทราบแนวโน้มของผลการทดลองโดยไม่ต้องทำการทดลองจริงก่อน และในที่นี้จะใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลอง ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก

ในบทนี้จะนำเสนอผลของการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยกรณีศึกษาต่างๆรวมทั้งสิ้น 3 กรณี โดยที่กรณีแรกเป็นวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC กรณีที่สองเป็นวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ π และกรณีสุดท้ายเป็นวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T โดยในการจำลองการทำงานของวงจรจะทำการวัดสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz และคำนึงถึงผลของค่าองค์ประกอบแผงต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ด้วย

4.2 วัตถุประสงค์ของการจำลองการทำงานของวงจร

1. เพื่อจะได้ทราบแนวโน้มและผลการทำงานเบื้องต้นของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบต่างๆ เมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนคือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง (SMPS)
2. เป็นแนวทางนำไปสู่การจัดสร้างและทดลองการทำงานของวงจรต้นแบบ
3. ใช้สำหรับเปรียบเทียบผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตามสายตัวนำระหว่างผลจากการจำลองการทำงานของวงจรกับผลจากการทดลองวงจรต้นแบบจริง เพื่อยืนยันความสอดคล้องกันระหว่างทฤษฎี การจำลองและผลการทดลอง

4.3 ขอบเขตการจำลอง

1. ศึกษาทฤษฎีวงจร Filter แบบต่างๆที่มีผลต่อ EMI
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1
3. จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำ ที่มีผลมาจากการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (SMPS) โดยมีเงื่อนไขการจำลองการทำงานของวงจรดังนี้
 - 3.1 ในโปรแกรม PSpice วัดสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (SMPS) ขณะทำการจ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โดยที่วงจรในการจำลองการทำงานนั้น จะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเอชซี ขนาด 100 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และในการจำลองหาค่า EMI นั้นจะเพิ่มวงจรรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) วงจรบริดจ์เรกติไฟล์เออร์ และวงจรแหล่งจ่ายกำลังแบบ สวิตซิ่ง

- วิเคราะห์ผลการจำลองและเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างวงจรรองความถี่สลดทอน สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ละแบบ

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร

- รูปวงจร LISN Model 3810/2 LISN 50Ω , $50/250 \mu\text{H}$, $9 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

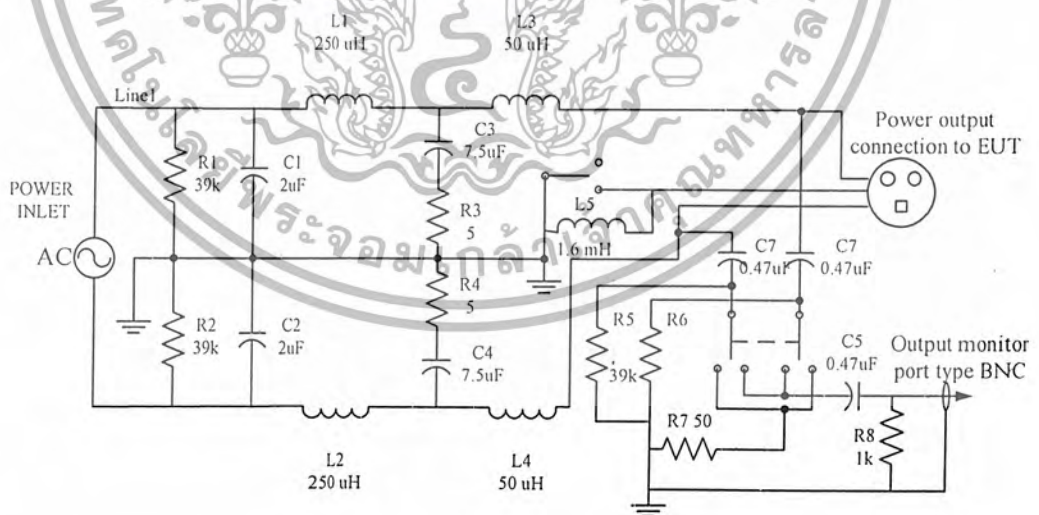
รูปวงจรบริดจ์เรกติไฟล์เออร์ Diode เบอร์ MUR 460

ดังแสดงในรูปที่ 4.2

รูปวงจรแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (SMPS) 230 V , 3 A , 350 W

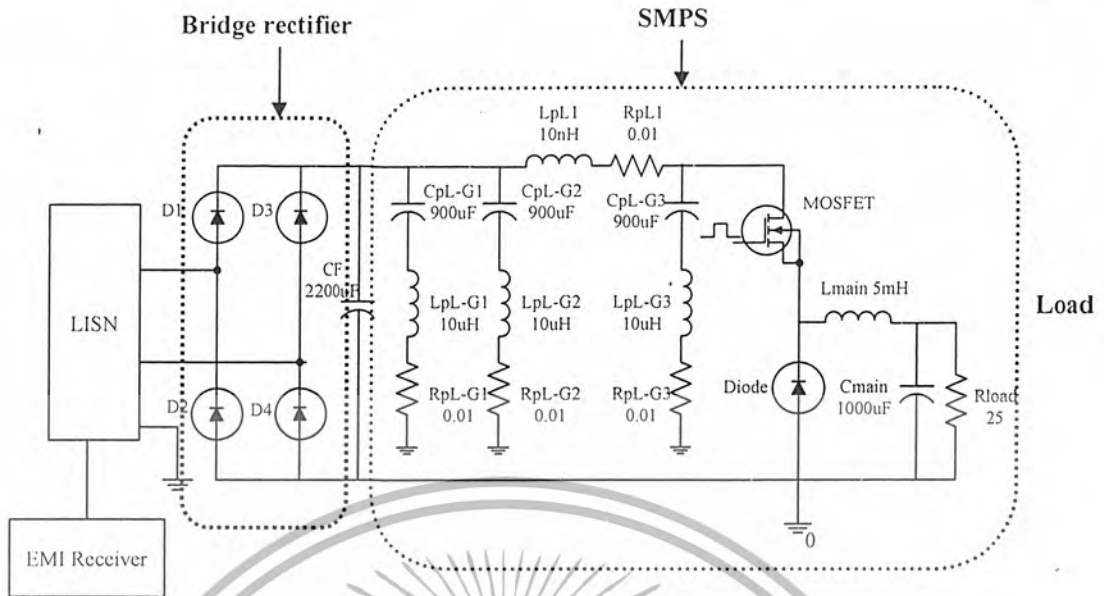
ดังแสดงในรูปที่ 4.2

- เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้ง โปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1
- รายละเอียดของวงจร Filter แบบต่างๆ พร้อมค่าขององค์ประกอบที่พิจารณาภายในวงจร
- แผ่น CD-R และ แผ่นดิสก์ สำหรับบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4.1 วงจรภายในของ LISN (EMCO 3810-2HP / Agilent 1967D) ที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1

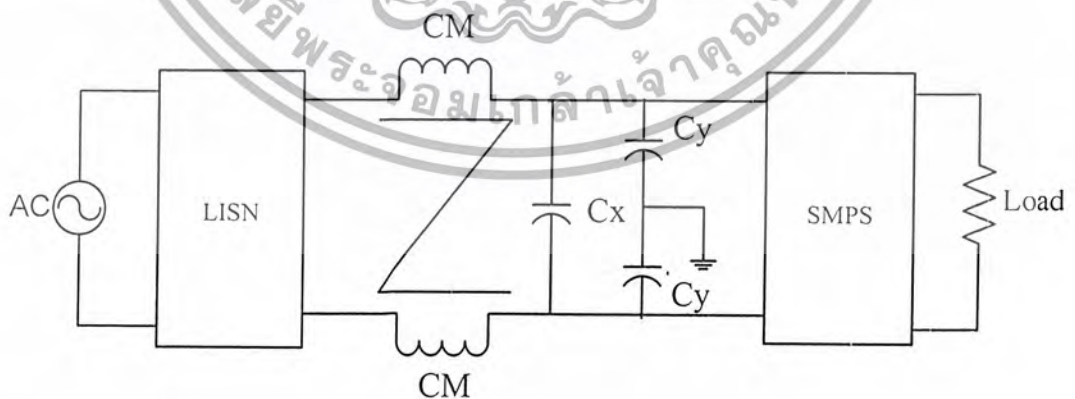
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรของ Bridge Rectifier และ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (SMPS) ที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice เวอร์ชัน 9.1

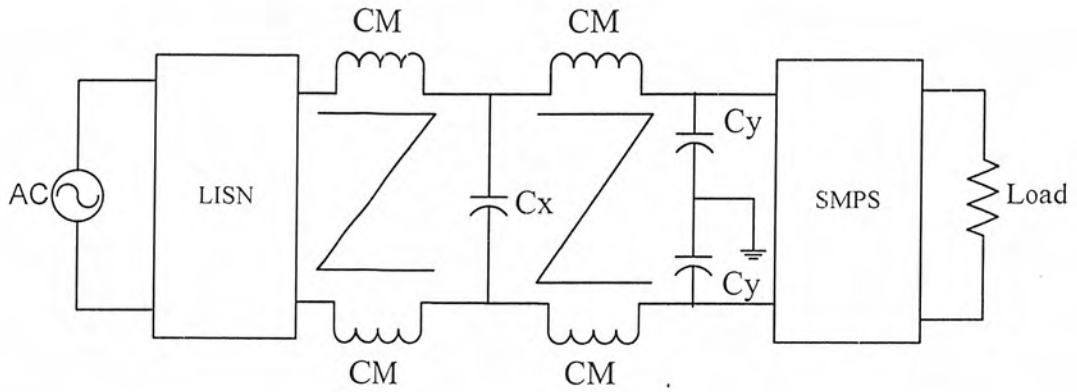
4.5 วิธีการจำลองการทำงาน

1. พิจารณาวงจร Filter แต่ละแบบดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่ วงจร Filter แต่ละแบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรม PSpice ซึ่งต่ออินพุตเข้ากับ LISN และต่อเอาต์พุตกับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (SMPS) ที่เป็นจุดกำเนิด EMI Noise พิจารณาค่าของ Common mode inductor (CM), Cx และ Cy ของแต่ละวงจรและทำการปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ เหล่านี้เพื่อวิเคราะห์ผลของการลดทอน EMI Noise หลังจากที่ได้ปรับเปลี่ยนค่าเหล่านั้นแล้ว

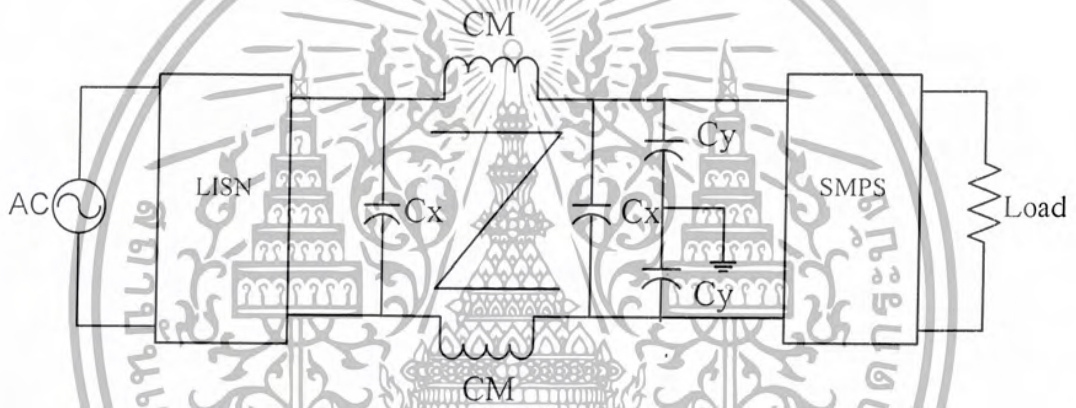


(ก) วงจร Filter แบบ LC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจร Filter แบบ T



(ค) วงจร Filter แบบ π

รูปที่ 4.3 วงจร Filter แต่ละแบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรม PSpice ซึ่งต่ออินพุตเข้ากับ LISN และต่อเอาต์พุตกับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (SMPS) ที่เป็นจุดกำเนิด EMI Noise

2. หลังจากจำลองวงจรการทำงานลงในโปรแกรม PSpice แล้ว ขั้นตอนต่อไปทำการ Set up ค่า AC Sweep Noise ดังนี้

Start Frequency = 10 kHz

End Frequency = 30 MHz

Total point = 10k

Tstop = 30 ms

Step = 0.02 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการ Simulate โดยการ Run Program และผลที่ได้จากการจำลองต้องทำให้อยู่ในฟังก์ชันของ FFT ที่มีอยู่ในโปรแกรม PSpice
 4. บันทึกผลของการจำลองลงในแผ่นดิสก์หรือลงในคอมพิวเตอร์
 5. วิเคราะห์ผลของการจำลองที่ได้
- ผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSpice และปรับเปลี่ยนค่า CM , Cx และ Cy ของวงจร Filter ในแต่ละแบบ จะแสดงในบทที่ 6 ต่อไป

4.6 สรุป

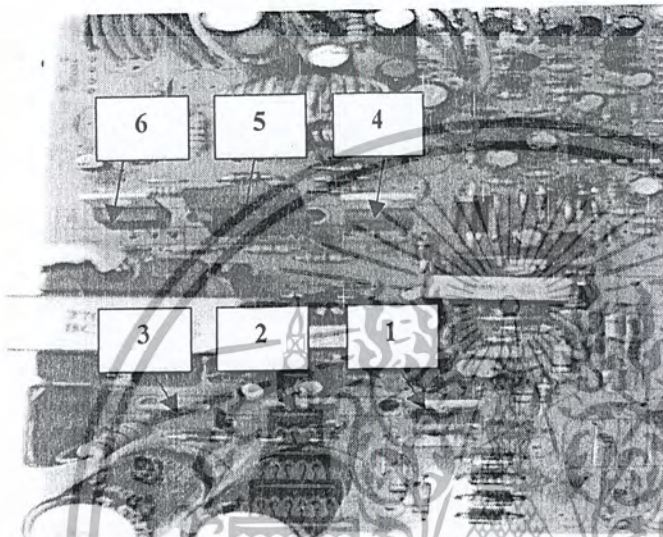
การออกแบบวงจร EMI Filter จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจำลองการทำงานของวงจรที่จะใช้ก่อนทำการทดลองจริงเสมอ เพื่อที่จะได้ทราบแนวโน้มหรือผลการทำงานเบื้องต้น ว่าเป็นไปตามหลักการตามทฤษฎีหรือการออกแบบหรือไม่ และใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง เพื่อยืนยันความสอดคล้องกันระหว่างทฤษฎี การจำลองและผลการทดลอง หลังจากที่ได้ผลของการจำลองแล้วจึงนำมาวิเคราะห์เพื่อจะได้ทราบว่าวงจรชนิดใดและองค์ประกอบมีค่าเท่าไรบ้าง ที่จะนำไปสู่การทำชุดทดลองต้นแบบเพื่อนำไปทดลองจริงต่อไป

บทที่ 5

รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีทั้งตำแหน่งอุปกรณ์ พิกัดของอุปกรณ์ รวมถึงการคำนวณหาค่าของโหลด



ตำแหน่ง	หมายเลข อุปกรณ์
1	2N60B
2	E13007-2
3	E13007-2
4	S20C40C
5	F12C20C
6	S20C40C

รูปที่ 5.1 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ภายในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ สวิตซ์

5.2 วัตถุประสงค์

1. หาพิกัดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์
2. หาพิกัดค่าความต้านทานโหลด

5.3 ขอบเขต

1. การวัด VA ด้าน Input
2. การวัด VA ด้าน Output
3. พิกัดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ 350 W

Input AC

$$V = 230 \quad V$$

$$I = 3 \quad A$$

$$f = 50 \quad \text{Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 Output DC

เอาต์พุต	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	พิกัดโหลด (W)	50%ของ พิกัด โหลด (W)
1	+ 5	22	110	110	55
2	+12	14	168	168	84
3	+3.3	16	52.8	52.8	26.4

5.4 ข้อมูลของอุปกรณ์ [9]

ตำแหน่งที่ 1 รหัส : 2N60B

ชนิด : Transistor (NPN)

 $V_{CB} : 300 \text{ V}$ $V_{CE} : 300 \text{ V}$ $V_{EB} : 5 \text{ V}$

ตำแหน่งที่ 2 และ 3 รหัส : E13007-2

ชนิด : Transistor (NPN)

 $V_{CB} : 300 \text{ V}$ $V_{CE} : 300 \text{ V}$ $V_{EB} : 12 \text{ V}$

ตำแหน่งที่ 4 รหัส : S20C40C Full Wave Rectifier

ชนิด : Ultra fast recovery

ตำแหน่งที่ 5 รหัส : F12C20C Schottky Barrier Rectifier

ชนิด : Dual rectifier 30A

ตำแหน่งที่ 6 รหัส : S20C40C

ชนิด : Transistor (PNP) Germanium

 $V_{CB} : 3.5 \text{ V}$ $V_{CE} : 3.5 \text{ V}$ $V_{EB} : 0.5 \text{ V}$

5.5 วัดกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์

การวัดกระแสไฟฟ้าที่ Input และ Output โดยการใส่โหลดที่ Half-Load และ 80% Full-Load ซึ่งจะทำให้การวัดกระแสอินพุตโดยใช้ Clip Amp Metter ผลของกระแสที่ได้จะเป็นกระแสสลับ ส่วนกระแสทางด้านเอาต์พุตจะทำการวัดแรงดันตกคร่อมโหลดหาค่าความต้านทานของ โหลด ก็จะได้กระแสเอาต์พุต โดยผลของกระแสที่ได้จะเป็นกระแสตรง

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณเมื่อจ่ายโหลดที่ 50% ของพิกัด

$V_{DC(OUT)}$ (V)	$I_{AC(IN)}$ (A)	$V_{DC(LOAD)}$ (V)	$R_{(LOAD)}$ (Ω)	$I_{DC(OUT)}$ (A)
+3.3	0.4	3.3	0.4	8.25
+5	0.7	4.8	0.5	9.6
+12	0.8	10.9	1.8	6

ผลรวมกระแสอินพุต Half-Load

$$I_{AC(IN)} = 0.4 + 0.7 + 0.8 = 1.9 \text{ A}$$

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณเมื่อจ่ายโหลดที่ 80% ของพิกัด

$V_{DC(OUT)}$ (V)	$I_{AC(IN)}$ (A)	$V_{DC(LOAD)}$ (V)	$R_{(LOAD)}$ (Ω)	$I_{DC(OUT)}$ (A)
+3.3	0.51	2.8	0.4	7
+5	0.8	4.8	0.5	9.6
+12	1	10.57	1.3	8.1

ผลรวมกระแสอินพุต 80% Full-Load: $I_{AC(IN)} = 0.51 + 0.8 + 1 = 2.31 \text{ A}$

5.6 การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้เป็นโหลดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ ข้อมูลของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์

พิกัดแรงดัน AC INPUT 115/230 V

พิกัดกระแส INPUT 6/3 A

Frequency 60/50 Hz

DC Output +5 V / 22A , +3.3 V / 16 A , +12 V / 14 A

5.4.1 ที่ย่าน +5 V / 22 A

Full Load ที่ 80 %

$$VI = 5 \times 17.6 = 88 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{5}{17.6} = 0.28 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 3 Ω 10 W ต่อขนานกัน 9 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 0.33 Ω

Half Load ที่ 50 %

$$VI = 5 \times 15 = 75 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{5}{15} = 0.33 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 3 Ω 10 W ต่อขนานกัน 6 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 0.5 Ω

5.4.2 ที่ย่าน +12 V / 14 A

Full Load ที่ 80 %

$$VI = 12 \times 11.2 = 134.4 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{12}{11.2} = 1.07 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 10 Ω 15 W ต่อขนานกัน 9 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 1.11 Ω

Half Load ที่ 50 %

$$VI = 12 \times 7 = 84 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{12}{7} = 1.71 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 10 Ω 15 W ต่อขนานกัน 6 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 1.67 Ω

5.4.3 ที่ย่าน +3.3 V / 16 A

Full Load ที่ 80 %

$$VI = 3.3 \times 12.8 = 42.24 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{3.3}{12.8} = 0.25 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 1 Ω 10 W ต่อขนานกัน 4 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 0.25 Ω

Half Load ที่ 50 %

$$VI = 3.3 \times 8 = 26.4 \text{ VA}$$

$$\text{ค่า } R = \frac{3.3}{8} = 0.41 \text{ } \Omega$$

เลือกใช้ R ขนาด 1 Ω 10 W ต่อขนานกัน 3 ตัว ได้ค่าความต้านทาน = 0.33 Ω

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการคำนวณหาโหลดของสวิตช์

เอาต์พุตของ สวิตช์	พิคคของ โหลด	ค่าความต้านทาน (Ω)	กำลังงาน (W)	จำนวนตัว ต้านทาน	ค่าความต้านทาน ขณะต่อวงจร ขนาน(Ω)
+5V/22A	80%ของโหลด	3	10	9	0.33
	50%ของโหลด	3	10	6	0.5
+12V/14A	80%ของโหลด	10	15	9	1.11
	50%ของโหลด	10	15	6	1.67
+5V/16A	80%ของโหลด	1	10	4	0.25
	50%ของโหลด	1	10	3	0.33

5.7 ศึกษา Self Resonance Frequency ของตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ

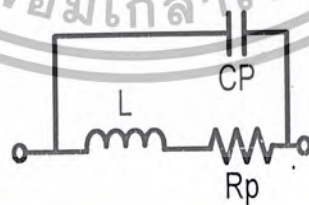
การศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจเลือกตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ สำหรับใช้ในการต่อวงจรความถี่

5.7.1 จุดประสงค์

ศึกษา Self Resonance frequency ของตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C) โดยใช้เครื่อง Impedance Analyzer

5.7.2 ขอบเขต

1. ศึกษา Self Resonance frequency ในย่านความถี่ที่ L และ C ต้องทนได้พิคค 2-5 MHz
2. พิกคความถี่ในการทดลอง 100Hz--5MHz
3. Step ในการเปลี่ยนความถี่ครั้งละ 0.5 MHz
4. นำตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ที่ได้ตรงตามพิคค นำมาประกอบเป็นชุด π Filter



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L1



รูปที่ 5.3 ตัวเหนี่ยวนำที่ 1

ตารางที่ 5.5 Self Resonance Frequency ของ L1

f (MHz)	Ls (μ H)
0.0001	792.351
0.5	744.268
1.0	973.096
1.5	657.609
2.0	-539.216
2.5	-382.536
3.0	-257.542
3.5	-184.840
4.0	-139.437
4.5	-109.061
5.0	-87.645

ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (L1) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 792.351 μ H และ Self Resonance Frequency ของ L1 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 1.5-2.0 MHz

L2



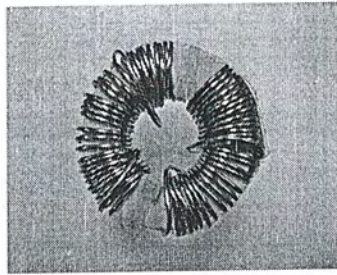
รูปที่ 5.4 ตัวเหนี่ยวนำที่ 2

ตารางที่ 5.6 Self Resonance Frequency ของ L2

f (MHz)	Ls (H)
0.0001	2.531 m
0.0005	1.037 m
1.0	1.282 m
1.5	1.926 m
2.0	1,471 m
2.5	-810.427 μ
3.0	-468.084 μ
3.5	-308.365 μ
4.0	-219.608 μ
4.5	-164.378 μ
5.0	-127.310 μ

ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2 (L2) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 2.531 mH และ Self Resonance Frequency ของ L2 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 2.0-2.5 MHz

L3

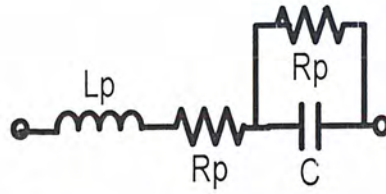


รูปที่ 5.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ 3

ตารางที่ 5.7 Self Resonance Frequency ของ L3

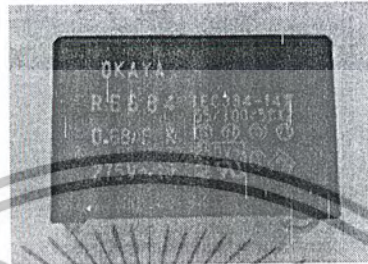
f (MHz)	Ls (H)
0.0001	5.42679 m
0.0005	2.82437 m
1.0	-970.778 μ
1.5	-628.591 μ
2.0	-428.226 μ
2.5	-377.176 μ
3.0	-296.711 μ
3.5	-236.692 μ
4.0	-191.311 μ
4.5	-156.118 μ
5.0	-128.058 μ

ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 3 (L3) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5.42679 mH และ Self Resonance Frequency ของ L2 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.0005-1.0 MHz



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

C1

รูปที่ 5.7 ค่าตัวเก็บประจุที่ 1 OKAYA RE 684 275 V , 0.68 μ F

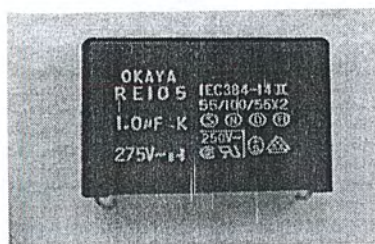
ตารางที่ 5.8 Self Resonance Frequency ของ C1

f (MHz)	Cp (F)
0.0001	666.864 n
0.5	1.13945 μ
1.0	-1.07522 μ
1.5	-255.535 n
2.0	-124.456 n
2.5	-75.2842 n
3.0	-50.7401 n
3.5	-36.6610 n
4.0	-27.8126 n
4.5	-21.8575 n
5.0	-17.6389 n

ตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C1) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 666.864 nF และ Self Resonance Frequency ของ C1 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.5 – 1.0 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C2



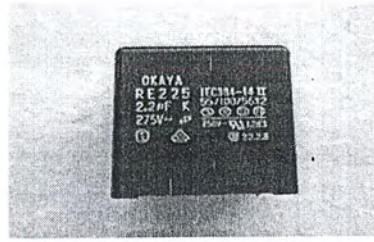
รูปที่ 5. 8 ค่าตัวเก็บประจุที่ 2 OKAYA RE 105 275 V , 1.0 µF

ตารางที่ 5.9 Self Resonance Frequency ของ C2

f (MHz)	Cp(F)
0.0001	963.448 n
0.5	3.047 µ
1.0	- 586.296 n
1.5	- 198.392 n
2.0	- 103.512 n
2.5	- 64.1331 n
3.0	- 43.7634 n
3.5	- 31.9218 n
4.0	- 24.2843 n
4.5	- 19.1221 n
5.0	- 1534507 n

ตัวเก็บประจุตัวที่ 2 (C2) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 963.448 nF และ Self Resonance Frequency ของ C2 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.5-1.0 MHz

C3

รูปที่ 5.9 ค่าตัวเก็บประจุที่ 3 OKAYA RE 105 275 V , 2.2 μ F

ตารางที่ 5.10 Self Resonance Frequency ของ C3

f (MHz)	Cp(F)
0.0001	- 2.17246 μ
0.5	- 703.158 μ
1.0	- 762.594 n
1.5	- 290.941 n
2.0	- 156.419 n
2.5	- 98.5374 n
3.0	- 67.5565 n
3.5	- 49.2572 n
4.0	- 37.6285 n
4.5	- 30.1768 n
5.0	- 24.9601 n

ตัวเก็บประจุตัวที่ 3 (C3) ที่ความถี่ 100 Hz มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 2.17246 μ F และ Self Resonance Frequency ของ C3 จะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.0001-0.5 MHz

5.8 สรุป

จากการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้น ทำให้ทราบถึงพิกัดของกระแส และค่าความต้านทานโหลดที่ใช้กับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง ในพิกัดย่านต่างๆของสวิตชิง และศึกษาค่า Self Resonance Frequency ของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เพื่อนำมาพิจารณาในการทดสอบ วงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะนำมาใช้ ลดทอนสัญญาณรบกวนของ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำ

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำเป็นการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในโหมดร่วม ซึ่งทฤษฎีได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.2 ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 หรือ มอก.1956-2542 โดยการทดลองจะทำการวัดสัญญาณรบกวนในย่าน 150 kHz ถึง 30 MHz ซึ่งจะศึกษาถึงพฤติกรรมในการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ และผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนจากวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) เมื่อทำการเปลี่ยนองค์ประกอบภายในวงจรกรองความถี่คือ ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ สำหรับข้อกำหนดในการติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวงอุปกรณ์บนโต๊ะ ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.8

6.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อเก็บข้อมูลของสัญญาณในภาวะทำงานของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ ขณะต่อ โหลด 80% ของพิกัด
2. เพื่อเก็บข้อมูลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่มาตามสายตัวนำ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์
3. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หับัญหาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา
4. ออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม

6.3 ขอบเขตการทดลอง

1. ทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำ ที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ โดยมีเงื่อนไขการทดลอง ดังนี้
 - 1.1 วัดสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ประเภทไทรสเตอร์ของสวิตซ์
 - 1.2 วัดสัญญาณรบกวนจาก แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ ขณะไม่ทำการต่อ โหลด และ ขณะทำการต่อ โหลด โดยให้ แรงดันคงที่ที่ 220 V และ ความถี่คงที่ที่ 50 Hz โดยเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22
 - 1.3 วัดสัญญาณรบกวนที่ผ่านวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22
2. เปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวน

6.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. EMC Analyzer 9 kHz -1.5GHz
2. LISN Model 3810/2 LISN 50 Ω ,50/250 μ H , 9 kHz -30MHz
3. The Agilent Technologies Infinium Oscilloscope Model-54835A/45A 1.5GHz
4. Switching Mode Power Supply 230 V , 3 A , 350 W
5. Impedance Analyzer
6. EMI Filter
7. Load Resistor at 80% full-load 264.64 W

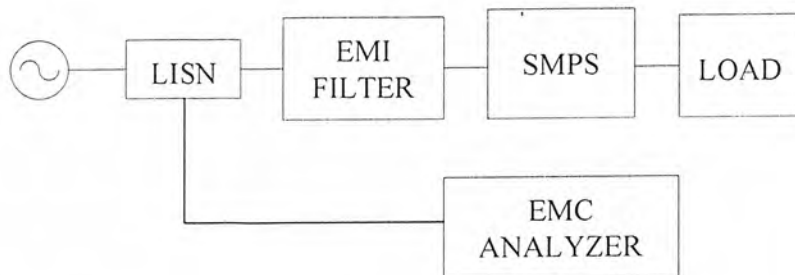
6.5 วิธีการทดลอง

1. ต่อแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงตามวงจรรูปที่ 6.1



3. วัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง ขณะต่อโหลด และ ขณะไม่ต่อโหลด
4. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 วงจรการทดลองขณะต่อวงจรรองความถี่

5. ทดลองเปลี่ยน EMI Filter ชนิดต่างๆ โดยโหลดคงที่

6.6 ผลการทดลอง

6.6.1 ผลการวัดสัญญาณภาวะทำงานของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์

1. สัญญาณในสภาวะทำงานของทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N60B ชนิด NPN



(a) สัญญาณที่ขา B-E (2V/div, 5µs/div)

(b) สัญญาณที่ขา C-E (2V/div, 5µs/div)

รูปที่ 6.4 สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E, (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E

ตารางที่ 6.1.1 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา B-E

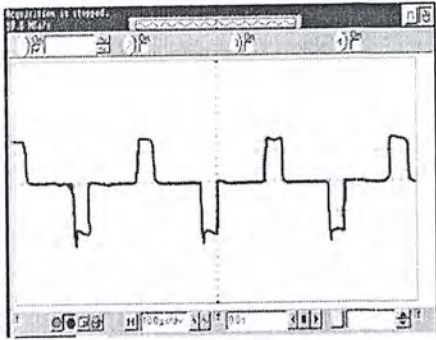
Measure	Mean	Min	Max
V _{p-p}	50.73 mV	50.73 mV	50.73 V
V _{MAX}	48.40 mV	48.40 mV	48.40 mV
Frequency	303.82kHz	303.82kHz	303.82kHz

ตารางที่ 6.1.2 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา C-E

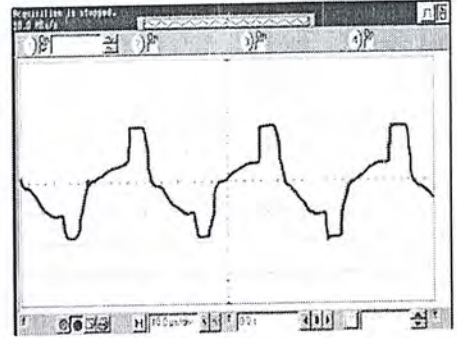
Measure	Mean	Min	Max
V _{p-p}	50.73 mV	50.73 mV	50.73 V
V _{MAX}	48.40 mV	48.40 mV	48.40 mV
Frequency	303.82kHz	303.82kHz	303.82kHz

2. สัญญาณในสภาวะทำงานของทรานซิสเตอร์หมายเลข E13007-2 ชนิด NPN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) สัญญาณที่ขา B-E (2V/div, 5µs/div)



(b) สัญญาณที่ขา C-E (2V/div, 5µs/div)

รูปที่ 6.5 สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E , (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E

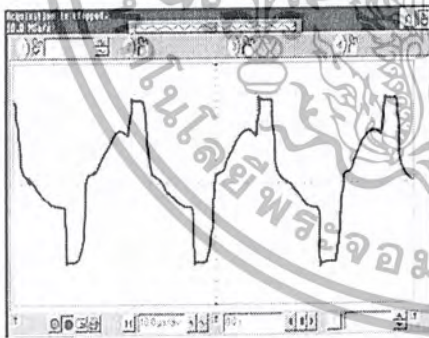
ตารางที่ 6.2.1 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา B-E

Measure	Mean	Min	Max
V _{P-P}	36.51 mV	36.51 mV	36.51 mV
V _{MAX}	9.94 mV	9.94 mV	9.94 mV
Frequency	31.67kHz	31.67kHz	31.67kHz

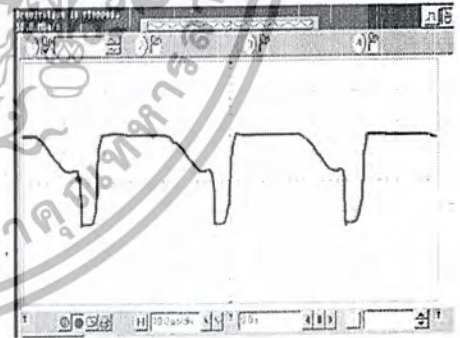
ตารางที่ 6.2.2 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา C-E

Measure	Mean	Min	Max
V _{P-P}	3.6483 V	3.624 V	3.698 V
V _{MAX}	3.365 V	3.342 V	3.367 V
Frequency	31.65kHz	31.24kHz	32.08kHz

3. สัญญาณในสภาวะทำงานของทรานซิสเตอร์หมายเลข S20C40C ชนิด PNP แบบ Germanium



(a) สัญญาณที่ขา B-E (2V/div, 5µs/div)



(b) สัญญาณที่ขา C-E (2V/div, 5µs/div)

รูปที่ 6.6 สัญญาณของทรานซิสเตอร์ (a) วัดสัญญาณที่ขา B-E , (b) วัดสัญญาณที่ขา C-E

ตารางที่ 6.3.1 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา B-E

Measure	Mean	Min	Max
V _{P-P}	311.64mV	305.9mV	318.3mV
V _{MAX}	15.72 mV	14.2 mV	18.3 mV
Frequency	31.54 kHz	31.21kHz	31.70kHz

ตารางที่ 6.3.2 ค่าแรงดันและความถี่ที่ขา C-E

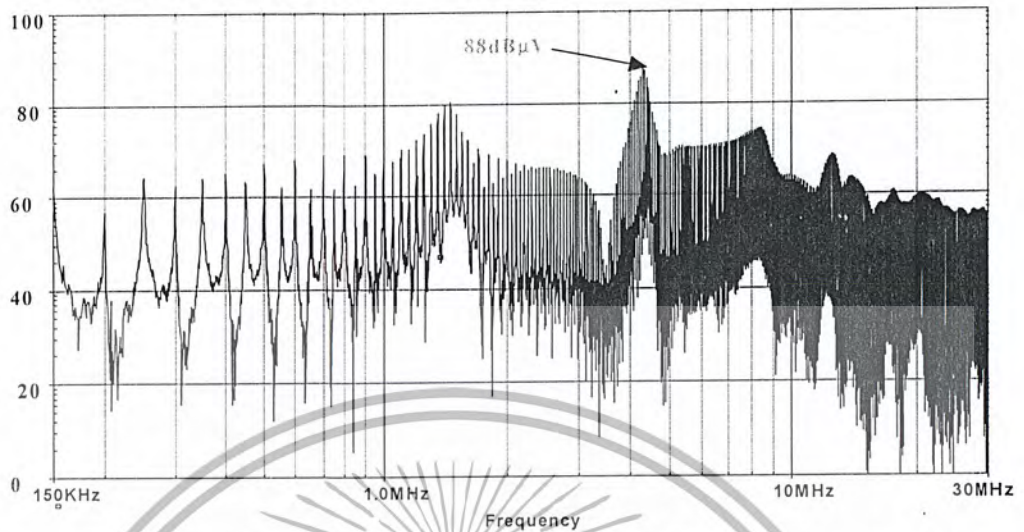
Measure	Mean	Min	Max
V _{P-P}	567.08mV	559.1mV	576.9m V
V _{MAX}	261.86mV	253.8mV	266.8mV
Frequency	31.72 µHz	31.44 µHz	32.05 µHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6.2 ผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง

1. ขณะไม่ได้ทำการต่อโหลด แรงดันคงที่ที่ 220 V และ ความถี่ที่ 50 Hz

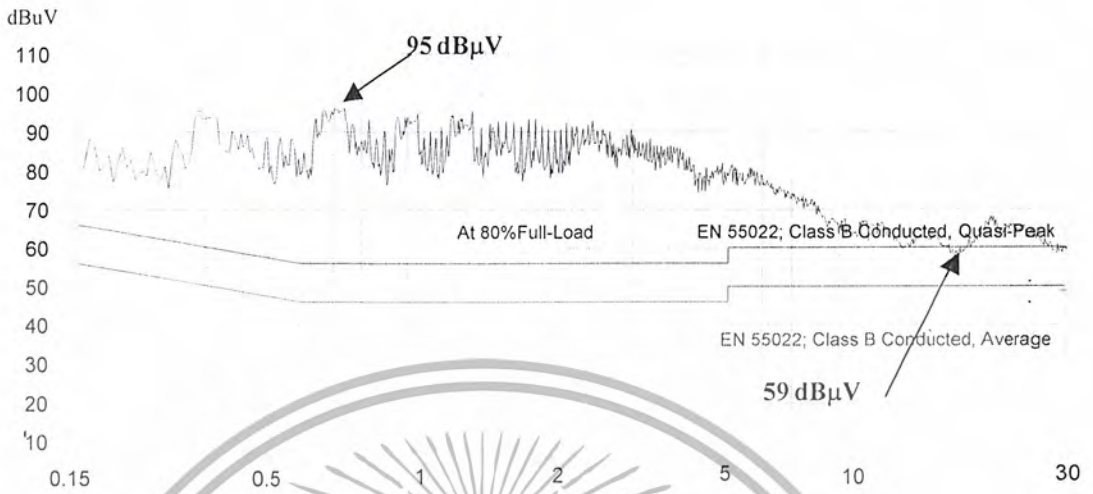


(ก) ผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงขณะไม่ได้ต่อโหลด



(ข) ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงขณะไม่ได้ต่อโหลด รูปที่ 6.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงขณะไม่ได้ต่อโหลด (ก) การจำลองระบบ (ข) จากผลการวัด

2. ขณะทำการต่อโหลดที่ 80%ของพิกัด



รูปที่ 6.8 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง ขณะต่อโหลด

3. เปรียบเทียบสัญญาณ ในขณะไม่ได้ต่อโหลด และ ขณะต่อโหลด



รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง ขณะไม่ได้ต่อโหลด และ ขณะต่อโหลด

กำหนดให้ Δ คือ ผลต่างของการลดทอนสัญญาณระหว่าง ทำการต่อโหลดและไม่ได้ทำการต่อโหลด ซึ่งสามารถหา Δ ได้จาก

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 \quad \text{dB}$$

โดยที่ Δ : ผลของการลดทอนสัญญาณจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะทำการต่อโหลด

Δ_2 : ผลของการลดทอนสัญญาณจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิทซ์ซึ่ง

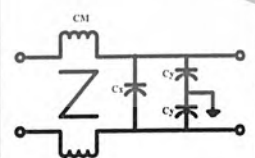
ขณะไม่ได้ต่อโหลด

ตารางที่ 6.4 ผลของการลดทอนสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆ

ย่านความถี่ (MHz)	Δ_1 (dB μ V)	Δ_2 (dB μ V)	Δ (dB μ V)
0.15	82	60	22
0.5	79	70	9
1	80	76	4
2	82	81	1
5	80	70	10
10	62	50	12
30	59	49	10

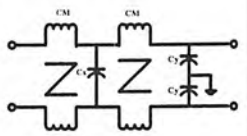
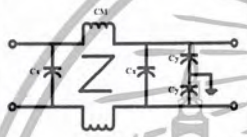
6.6.3 ผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านการกรองจากวงจรกรอง


ตารางที่ 6.5 ผลของการลดทอนสัญญาณ ขณะต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวน

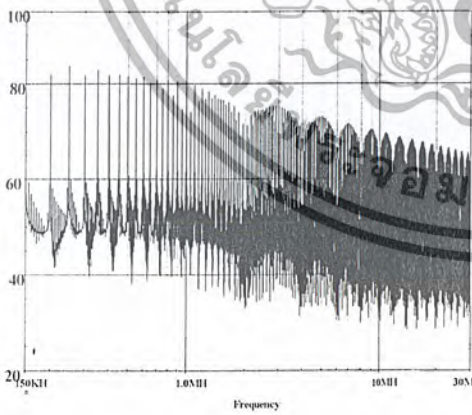
ชนิดของวงจรกรอง	วงจรภายใน EMI Filter	C_x (μ F)	C_y (μ F)	CM	รูปผลจากการจำลอง	รูปผลของสัญญาณ
LC Filter		2.2	0.68	$L_1 = 800 \mu$ H	รูปที่ 6.10 (a)	รูปที่ 6.10 (b)
				$L_2 = 2.5$ mH	รูปที่ 6.10 (c)	รูปที่ 6.10 (d)
				$L_3 = 5$ mH	รูปที่ 6.10 (e)	รูปที่ 6.10 (f)
		1	0.68	$L_1 = 800 \mu$ H	รูปที่ 6.11 (a)	รูปที่ 6.11 (b)
				$L_2 = 2.5$ mH	รูปที่ 6.11 (c)	รูปที่ 6.11 (d)
				$L_3 = 5$ mH	รูปที่ 6.11 (e)	รูปที่ 6.11 (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

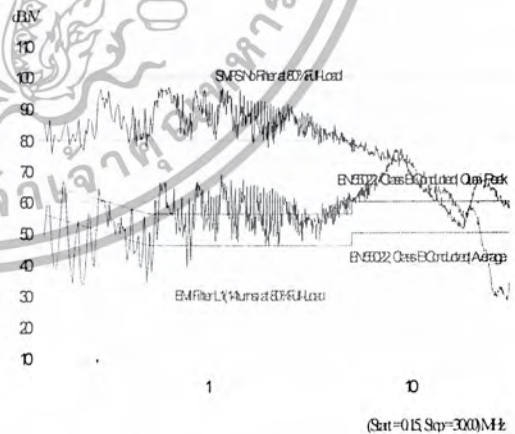
ตารางที่ 6.5(ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณ ขณะต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวน

T Filter		2.2	0.68	$L_1 = 800 \mu\text{H}$	รูปที่ 6.12 (a)	รูปที่ 6.12 (i.)
				$L_2 = 2.5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.12 (c)	รูปที่ 6.12 (d)
				$L_3 = 5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.12 (e)	รูปที่ 6.12 (f)
		1	0.68	$L_1 = 800 \mu\text{H}$	รูปที่ 6.13 (a)	รูปที่ 6.13 (b)
				$L_2 = 2.5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.13 (c)	รูปที่ 6.13 (d)
				$L_3 = 5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.13 (e)	รูปที่ 6.13 (f)
π Filter		2.2	0.68	$L_1 = 800 \mu\text{H}$	รูปที่ 6.14 (a)	รูปที่ 6.14 (b)
				$L_2 = 2.5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.14 (c)	รูปที่ 6.14 (d)
				$L_3 = 5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.14 (e)	รูปที่ 6.14 (f)
		1	0.68	$L_1 = 800 \mu\text{H}$	รูปที่ 6.15 (a)	รูปที่ 6.15 (b)
				$L_2 = 2.5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.15 (c)	รูปที่ 6.15 (d)
				$L_3 = 5 \text{ mH}$	รูปที่ 6.15 (e)	รูปที่ 6.15 (f)

โดยที่  คือ สัญญาณรบกวนขณะต่อโหลดที่ 80% ของพิกัด
 คือ สัญญาณรบกวนขณะต่อโหลดที่ 80% ของพิกัด และ ต่อวงจรกรองสัญญาณ



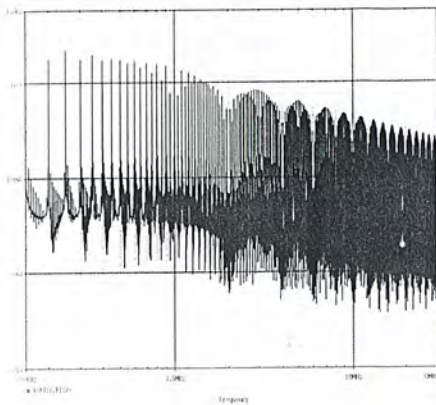
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ LC



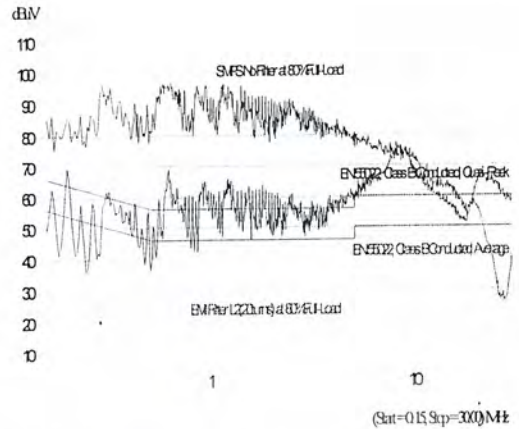
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

รูปที่ 6.10 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)

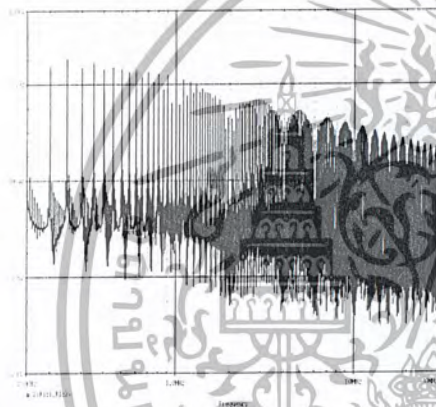
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

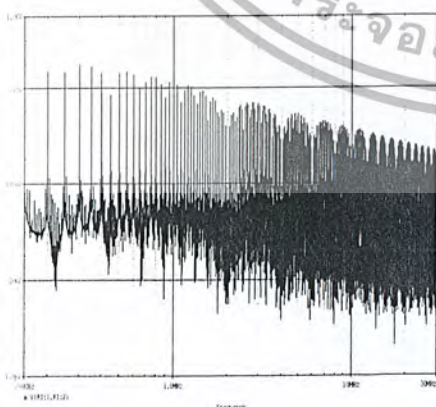


(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ

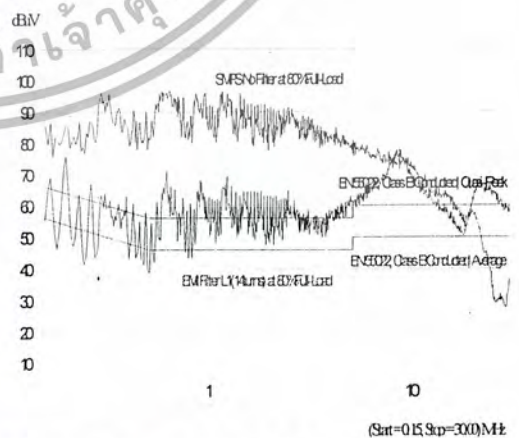


(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

รูปที่ 6.10 (ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu F$, $C_y = 0.68 \mu F$)



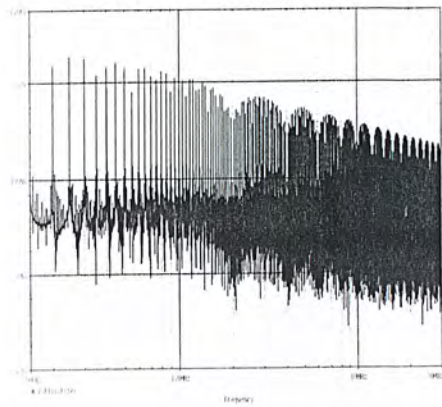
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



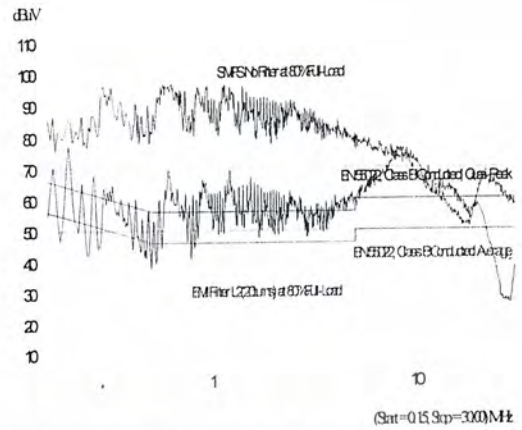
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

รูปที่ 6.11 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu F$, $C_y = 0.68 \mu F$)

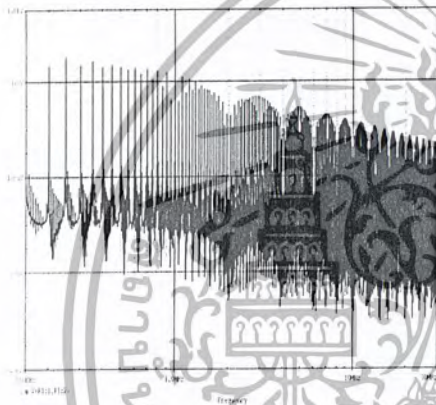
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



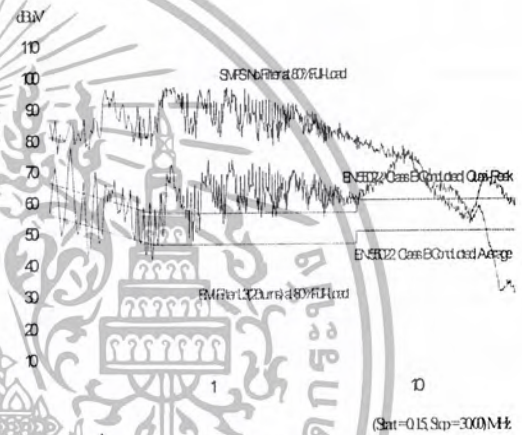
(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

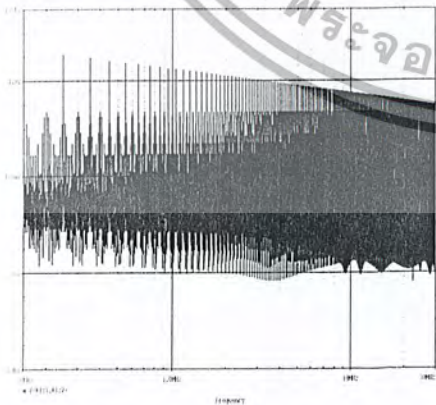


(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ

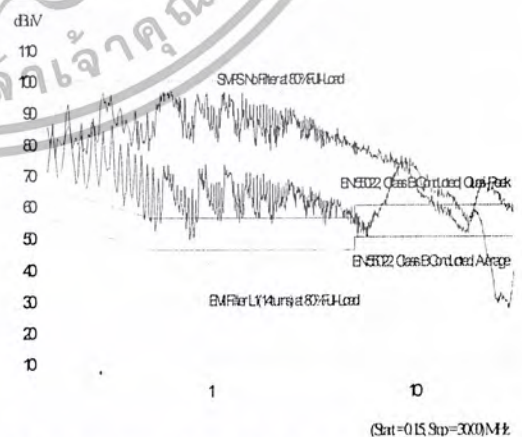


(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด LC

รูปที่ 6.11(ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด LC (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu F$, $C_y = 0.68 \mu F$)



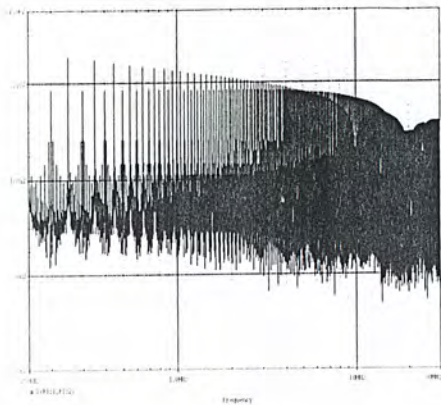
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



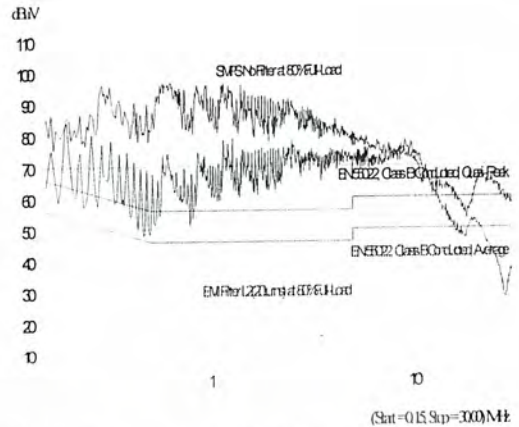
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

รูปที่ 6.12 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu F$, $C_y = 0.68 \mu F$)

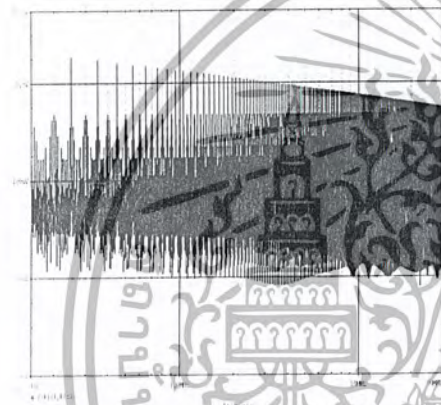
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



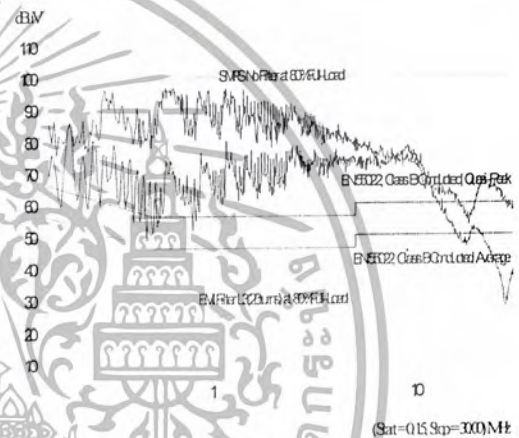
(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

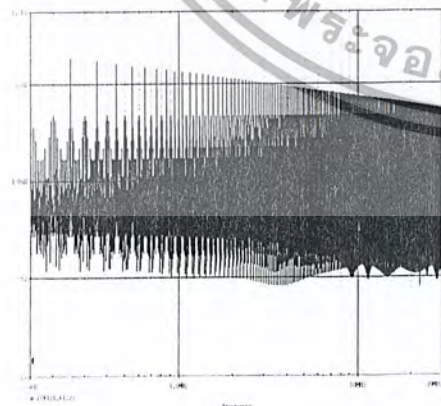


(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ

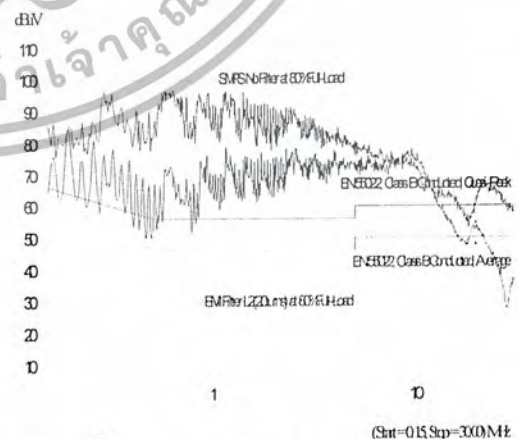


(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

รูปที่ 6.12(ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)



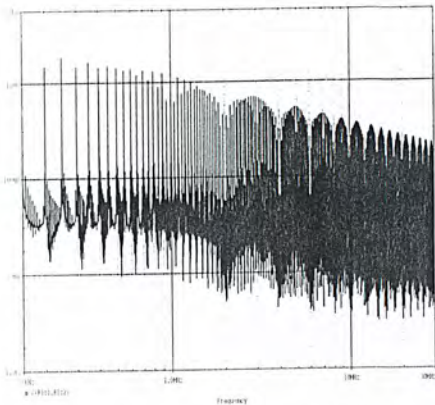
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



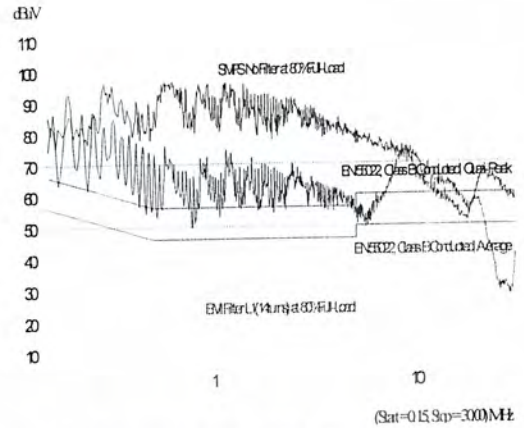
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

รูปที่ 6.13 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)

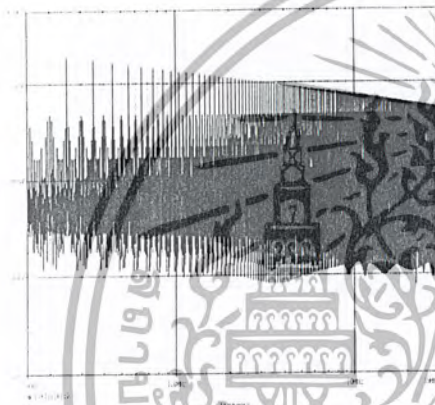
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



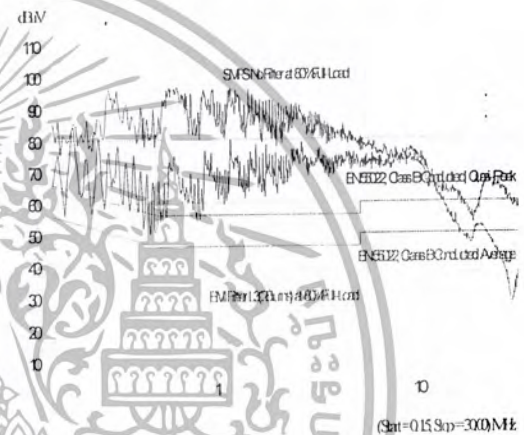
(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

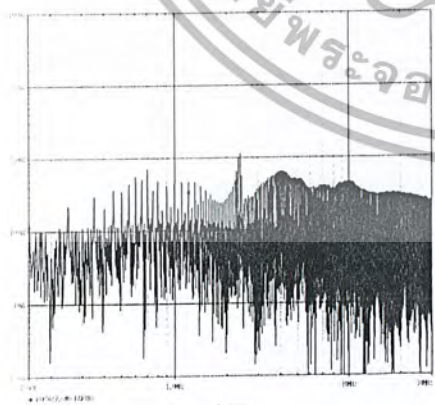


(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ

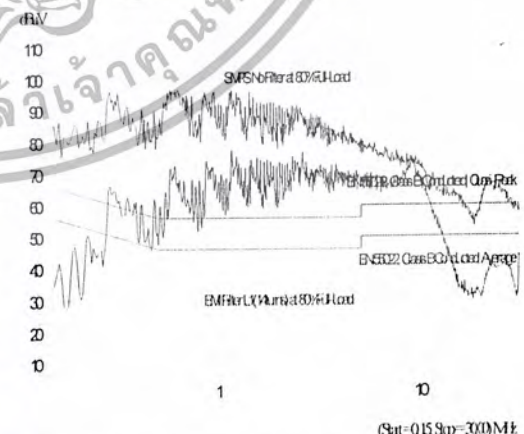


(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด T

รูปที่ 6.13 (ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด T (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)



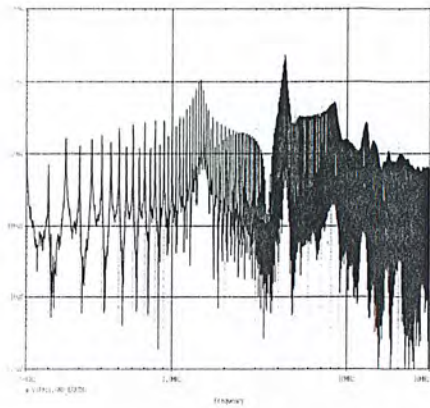
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



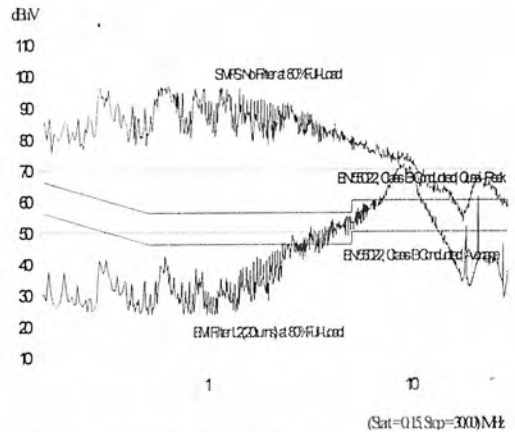
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π

รูปที่ 6.14 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)

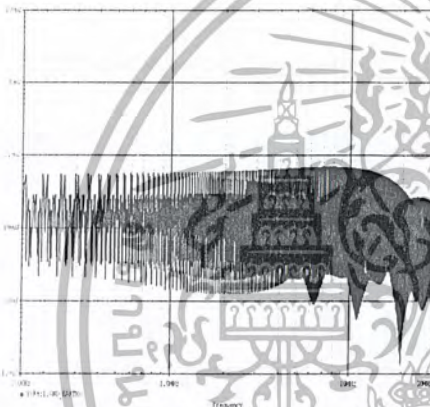
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π

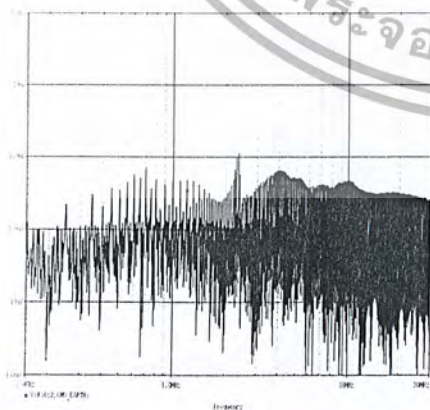


(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ

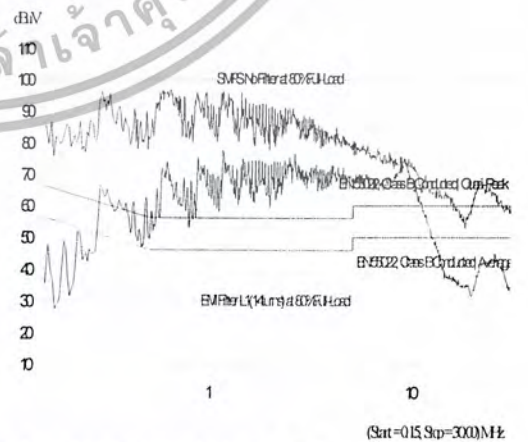


(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π

รูปที่ 6.14(ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 2.2 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)



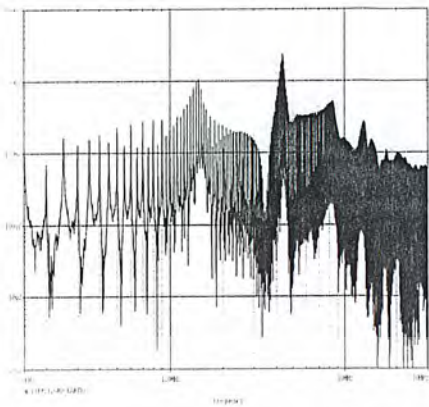
(a) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



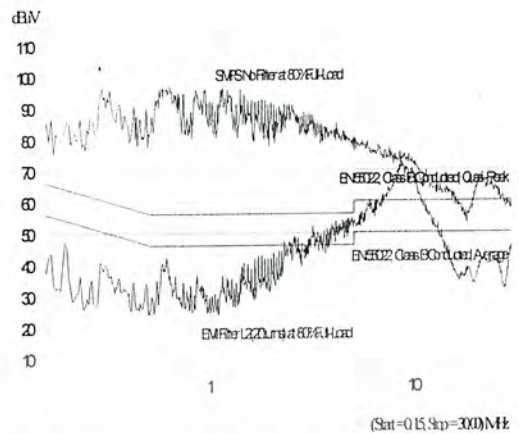
(b) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π

รูปที่ 6.15 ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง : $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)

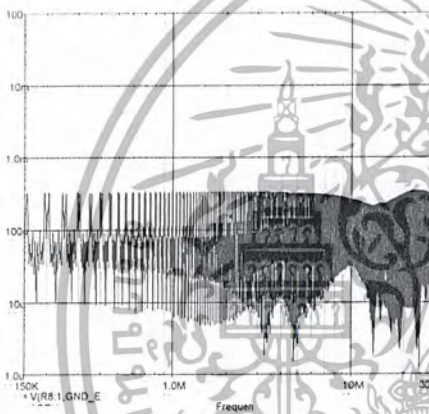
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(d) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π



(e) ผลการลดทอนจากการจำลองระบบ



(f) ผลการลดทอนจาก EMI Filter ชนิด π

รูปที่ 6.15(ต่อ) ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน (a),(c),(e) จากการจำลองระบบ (b),(d),(f) จาก EMI Filter ชนิด π (เงื่อนไขในการทดลอง: $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$)

6.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลของการวัดสัญญาณในภาวะทำงานของอุปกรณ์ประเภทไทรสเตอร์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง และ ผลของการกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่ผ่านทางสายตัวนำ โดยเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 ซึ่งเส้นมาตรฐานนี้มี 2 เส้น 1. ค่ายอดเสมือน (Quasi-Peak) 2. ค่าเฉลี่ย (Average) และ จากผลการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นประเด็นๆ ดังนี้

6.7.1 แสดงสัญญาณในภาวะทำงานของ ขา B-E และ C-E จากรูปที่ 6.4 , 6.5 และ 6.6 แสดงสัญญาณในภาวะทำงานของ ขา B-E และ C-E รวมทั้งค่าแรงดันระหว่างขั้ว โดยมีแรงดันเฉลี่ย แรงดัน Peak to Peak และ ความถี่ของรูปสัญญาณที่เกิดขึ้น

6.7.2 ผลของการจำลองระบบของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโปรแกรม PSpice โดยทำการจำลองระบบของวงจรกรองความถี่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆคือ วงจรกรองความถี่ชนิด LC (LC Filter) วงจรกรองความถี่ชนิด T (T Filter) วงจรกรองความถี่ชนิด π (π Filter) ซึ่งผลของการจำลองระบบจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัด นั่นคือให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุดดังรูป 6.15(e) ในเงื่อนไขของอุปกรณ์คือ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$

6.7.3 ผลของการวัดสัญญาณรบกวนที่ผ่านทางสายตัวนำเมื่อทำการต่อวงจรกรองสัญญาณ

รบกวน

โดยแบ่งเป็น วงจร LC Filter, T Filter, π Filter ซึ่งจะแบ่งการกรองออกเป็น ช่วงโหมดผลต่าง (Differential

Mode) และ โหมดแตกต่าง (Common Mode) โดยในช่วง Differential mode องค์ประกอบที่สำคัญในการกรองสัญญาณรบกวน คือ C_x และ ในช่วง Common mode องค์ประกอบที่สำคัญคือ C_y ซึ่งค่า self resonance frequency จะส่งผลกระทบต่อกรกรองสัญญาณที่ความถี่สูงๆ ซึ่งผลของการลดทอนสัญญาณรบกวน ณ ความถี่ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ผลของการลดทอนสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆ

ย่านความถี่ (MHz)	Δ_1 (dB μ V)	Δ_2 (dB μ V)	Δ (dB μ V)
0.15	85	40	45
0.5	81	26	55
1	85	25	60
2	82	32	50
5	78	38	40
10	71	46	25
30	59	51	8

6.7.4 จากผลของการจำลองระบบ และ ผลจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ทราบว่าวงจรที่สามารถลดทอนผลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐานคือ วงจร π Filter ที่ค่า $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_y = 0.68 \mu\text{F}$ ซึ่งค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนจากการวัดจะมีค่าสูงกว่าผลของการลดทอนสัญญาณจากการจำลองระบบเนื่องจากผลขององค์ประกอบที่อยู่ภายในแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงเพราะในแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงมีอุปกรณ์อื่น ๆ มากกว่าแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงที่ใช้ในการจำลองระบบ

บทที่ 7

การประยุกต์ใช้ EMI Filter สำหรับ UPS Application

7.1 วัตถุประสงค์

ในบทนี้เป็นการนำวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) ที่ออกแบบมาประยุกต์ใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (Uninterruptible Power Supply :UPS) เนื่องจากในปัจจุบัน UPS เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันแพร่หลายในการสำรองระบบไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ แต่ในการทดสอบในบทนี้จะพิจารณาถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจาก UPS ส่งเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า และทำการปรับปรุง EMI Filter โดยเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22

โดยมีการแบ่งเงื่อนไขในการทดสอบ ออกเป็น

1. พิจารณาผลของตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานในโหมดผลต่าง (Differential Mode : L_{DM})
2. พิจารณาผลของตัวเก็บประจุที่ทำงานใน โหมดผลร่วม (Common Mode : C_y)
3. พิจารณาผลของตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานในโหมดผลร่วม (Common Mode : L_{CM})

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขการทดสอบโดยพิจารณาผลของ DM

เงื่อนไขการทดสอบ	DM	C_x	C_y
พิจารณาผลของ DM	ไม่ได้ต่อ L_{DM} $L_{DM1} = 200 \mu H$ $L_{DM2} = 200 \mu H$	$2.2 \mu F$	$4.7 nF$

ตารางที่ 7.2 เงื่อนไขการทดสอบโดยพิจารณาผลของ C_y

เงื่อนไขการทดสอบ	CM	C_x	C_y
พิจารณาผลของ C_y	$7 mH$	$2.2 \mu F$	$4.7 \mu F$ $1 \mu F$

ตารางที่ 7.3 เงื่อนไขการทดสอบโดยพิจารณาผลของ CM

เงื่อนไขการทดสอบ	DM	CM	C_x	C_y
พิจารณาผลของ CM	$40 \mu H$	$7 mH$ $5 mH$	$2.2 \mu F$	$1 \mu F$

7.2 การทำงานของเครื่องยูทีเอส

โดยทั่วไปแล้ว เครื่องยูทีเอส โดยใช้พลังงานสำรองจากแบตเตอรี่นี้ จะแบ่งภาวะในการทำงานได้ 7 ภาวะ ดังนี้[4]

- ภาวะปกติ (Normal mode)
- ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าลดลง (Under voltage mode)
- ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าสูงขึ้น (Over voltage mode)
- ภาวะฉุกเฉิน (Emergency mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

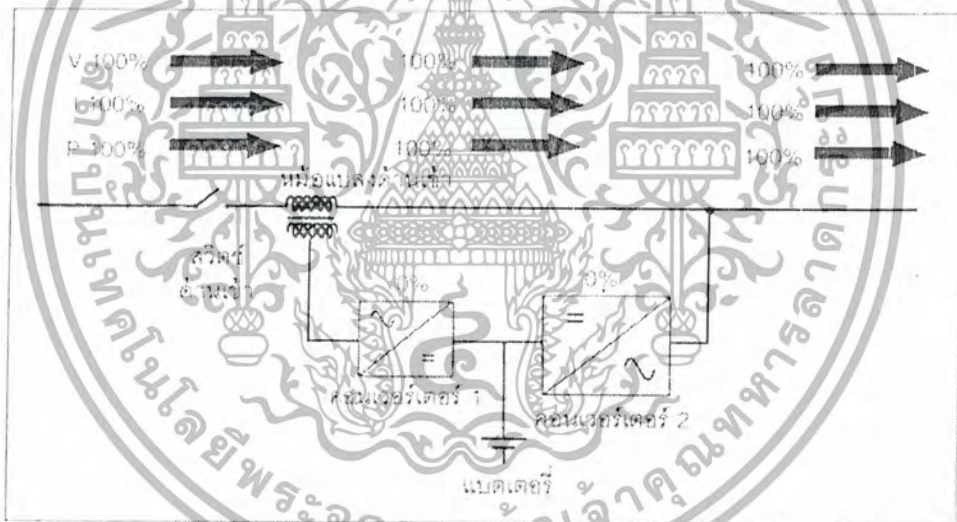
- ภาวะกลับตู้ปกติ (Battery recharge mode)
- ภาวะบายโหลดอัตโนมัติ (Automatic bypass mode)
- ภาวะซ่อมบำรุง (Maintenance mode)

7.2.1 ภาวะปกติ

ภาวะปกติของเครื่องยูพีเอสเป็นภาวะที่ไม่มีมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าและแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่โหลด ซึ่งเบตเตอรี่จะถูกอัดไฟจนเต็ม พร้อมทั้งกำลังไฟฟ้าที่จะถูกจ่ายไปยังโหลดอย่างเต็มพิกัด ตามรูปที่ 7.1

ในภาวะปกตินี้ หม้อแปลงด้านเข้าจะรองรับกระแสไฟฟ้าหลักด้านเข้า ซึ่งเท่ากับกระแสไฟฟ้าของโหลด (สมมุติว่า โหลดเป็นรีซิสเตอร์) และแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าด้านเข้าจ่ายเข้าคอนเวอร์เตอร์ 1 จะเป็นศูนย์ซึ่งไม่มีกำลังไฟฟ้าที่เข้าและออกจากคอนเวอร์เตอร์ 1 (ถือว่าเบตเตอรี่ถูกอัดไว้จนเต็มแล้ว) ขณะเดียวกันคอนเวอร์เตอร์ 2 จะปรับแรงดันไฟฟ้าด้านออก ให้เท่ากับไฟฟ้าหลักด้านเข้าตลอดเวลา

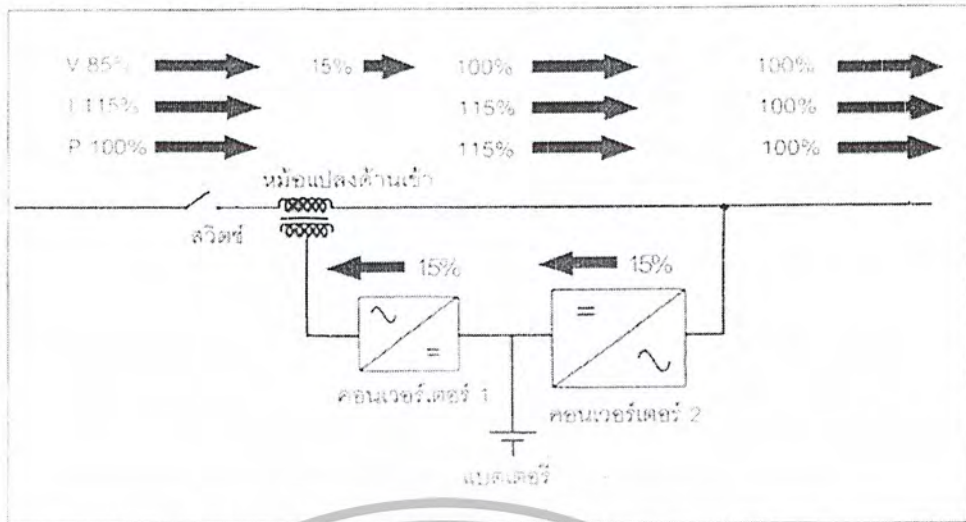
สรุปแล้วในภาวะปกตินี้ แทบจะกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดจะจ่ายตรงไปยังโหลด โดยไม่มีการสูญเสียเลยแต่ในความเป็นจริง อาจจะมีควมสูญเสียอยู่เล็กน้อย



รูปที่ 7.1 ภาวะปกติ ของเครื่องยูพีเอส

7.2.2 ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าลดลง

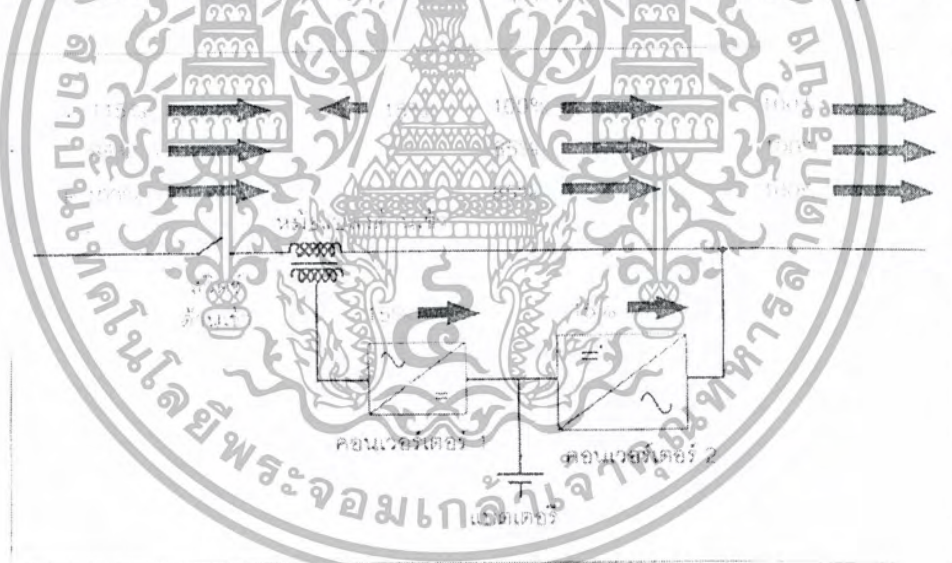
เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าหลักด้านเข้าลดต่ำลงจากปกติ 15% เหลือเป็น 85% ซึ่งแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะต้องถูกปรับให้มีความเที่ยงตรงให้ถูกต้อง $\pm 1\%$ ตามที่กำหนด ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ 1 จะปรับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มให้กับแรงดันไฟฟ้าหลักด้านเข้า โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าด้านเข้าอีก 15% เป็น 100% ตามรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าลดลง ของเครื่องยูทีเอส

7.2.3 ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าสูง

เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าหลักด้านเข้าสูงมากกว่าปกติ 15% เป็น 115% ซึ่งในภาวะนี้ กำลังไฟฟ้า 15% จะผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ 1 และผ่านคอนเวอร์เตอร์ 2 ไปยังโหลด ตามรูปที่ 7.3

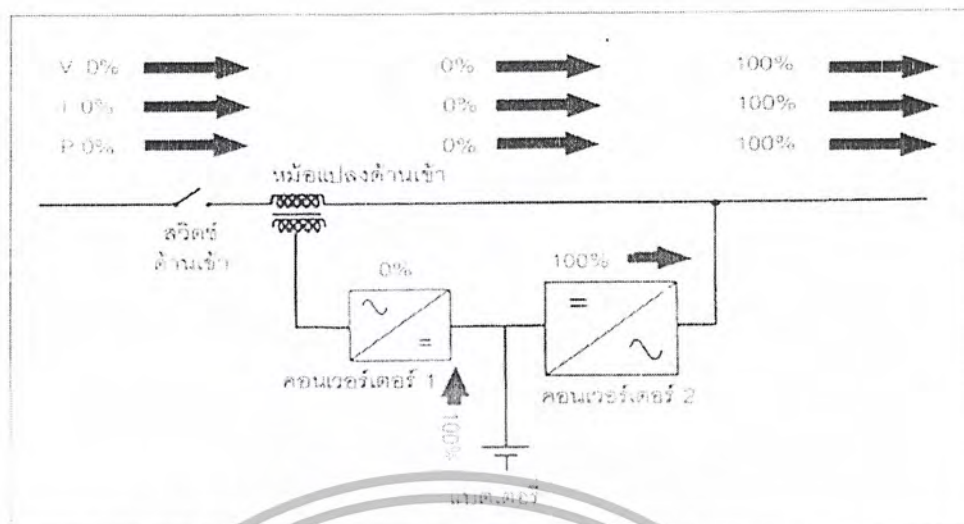


รูปที่ 7.3 ภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าสูงขึ้น ของเครื่องยูทีเอส

7.2.4 ภาวะฉุกเฉิน

ภาวะฉุกเฉินของเครื่องยูทีเอสเป็นภาวะที่ระบบไฟฟ้าขัดข้อง ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ 2 จะรับพลังงานจากแบตเตอรี่ แปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายไปยังโหลดได้อย่างต่อเนื่อง และได้นานตามขนาดของแบตเตอรี่ ตามรูปที่ 7.4

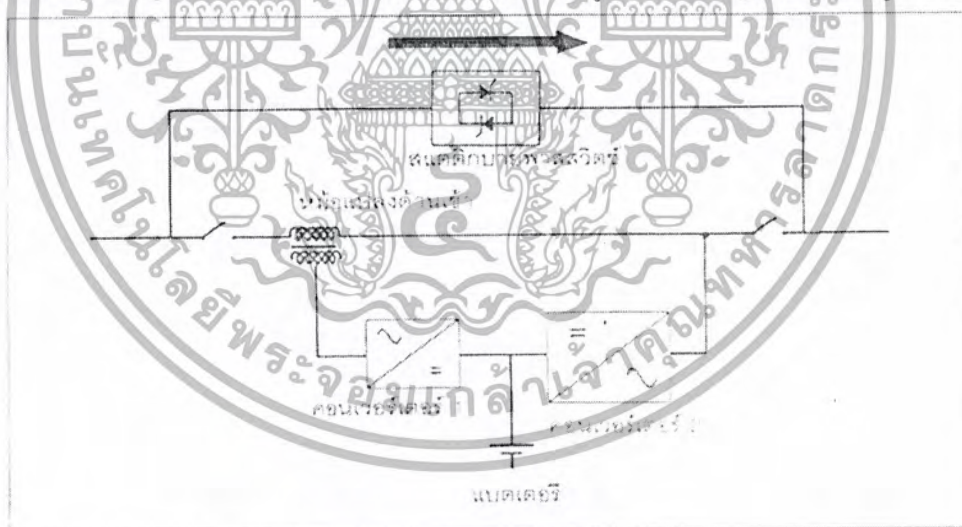
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 ภาวะถูกเดิน ของเครื่องยูทีเอส

7.2.5 ภาวะกลับสู่ปกติ

เป็นภาวะที่เครื่องยูทีเอสอยู่ในภาวะถูกเดินและเมื่อไฟฟ้ากลับสู่ปกติ ยูทีเอสก็ยังคงจ่ายไฟให้กับโหลดได้อย่างต่อเนื่องตามปกติ ในช่วงแรกนั้น กำลังไฟหลักด้านเข้าจะถูกใช้เพิ่มอีก 10% เป็น 110% และจ่ายไปยังโหลดตามปกติ 100% ซึ่งกำลังไฟที่ถูกใช้เพิ่ม 10% ดังกล่าว จะจ่ายย้อนกลับผ่านคอนเวอร์เตอร์ 2 เพื่อทำการอัดไฟให้แบตเตอรี่จนเต็ม ตามรูปที่ 7.5 การทำงานจึงกลับสู่ภาวะปกติ

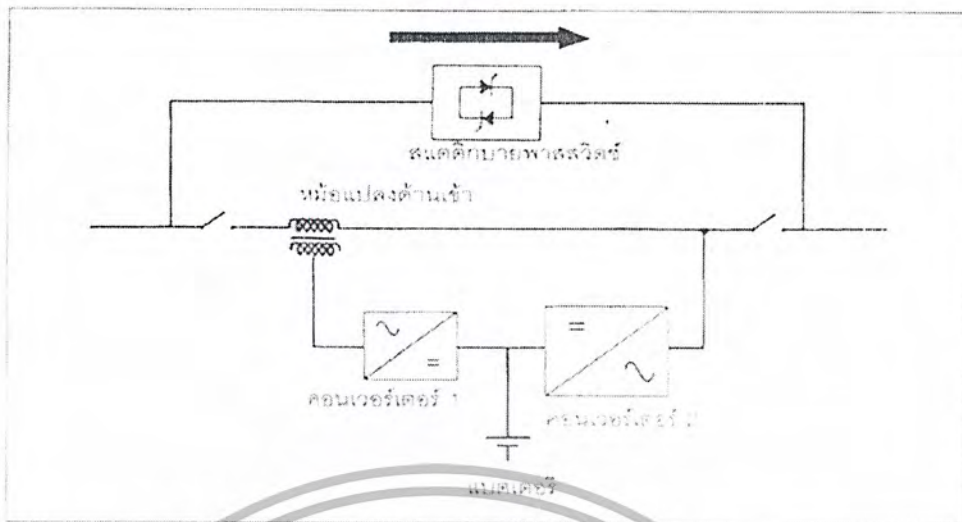


รูปที่ 7.5 ภาวะกลับสู่ปกติ ของเครื่องยูทีเอส

7.2.6 ภาวะย้ายโหลดอัตโนมัติ

ภาวะย้ายโหลดอัตโนมัติของเครื่องยูทีเอสเป็นภาวะที่เครื่องยูทีเอสขาดข้อง ชุดสแต็คกิงบายพาสสวิตช์ จะย้ายโหลดจากปกติของเครื่องยูทีเอสไปต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงโดยอัตโนมัติไม่ขาดตอน ตามรูปที่ 7.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

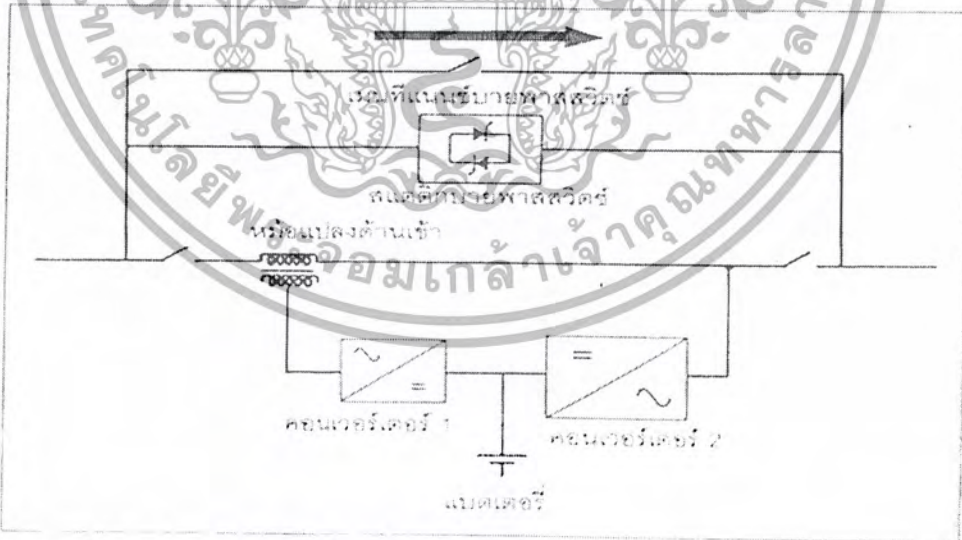


รูปที่ 7.6 ภาวะย้ายโหลดอัตโนมัติ ของเครื่องยูพีเอส

แต่ในภาวะนี้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าของชุดบายพาสจะต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และเมื่อเครื่องยูพีเอสเป็นปกติชุดสแตติกบายพาสตัวซึกก็สามารถย้ายโหลดกลับโดยไม่ขาดตอนเช่นกัน

7.2.7 ภาวะซ่อมบำรุงรักษา

ภาวะซ่อมบำรุงรักษาของเครื่องยูพีเอสเป็นภาวะที่การทดสอบหรือปลดเครื่องยูพีเอสทั้งหมดออกจากระบบ โดยย้ายโหลดผ่านชุดแมนที่เนนซ์บายพาสตัวซึก ตามรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ภาวะซ่อมบำรุงรักษา ของเครื่องยูพีเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อเก็บข้อมูลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่มาตามสายตัวนำที่เกิดจาก UPS
2. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ปัญหาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา
3. ออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม

7.4 ขอบเขตการทดลอง

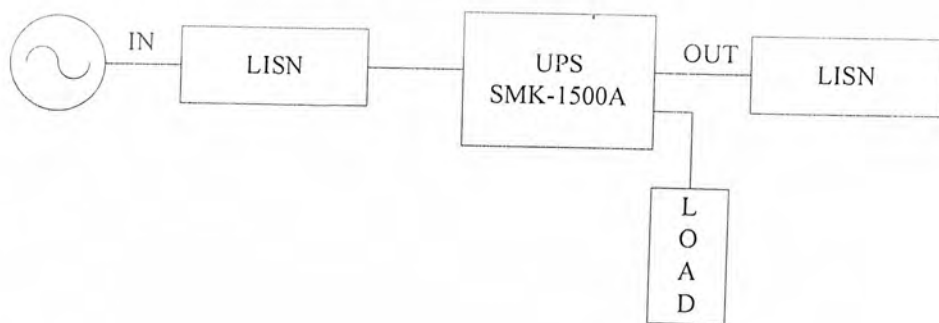
1. ทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางสายตัวนำที่เกิดจาก UPS โดยมีเงื่อนไขการทดลอง ดังนี้
 - 1.1 วัดสัญญาณรบกวนจาก UPS ขณะทำการต่อโหลดที่พิกัดของ UPS โดยให้แรงดันคงที่ที่ 220 V และ ความถี่ที่ 50 Hz
 - 1.2 วัดสัญญาณรบกวนที่ผ่านวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22
2. เปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวน

7.5 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. EMC Analyzer 9 kHz -1.5GHz
2. LISN Model 3810/2 LISN 50 Ω 50/250 μ H , 9 kHz -30MHz
3. UPS Powernatic Model : SMK1500A 900 W
4. Impedance Analyzer
5. EMI Filter
6. Load Resistor at rated 900 W

7.6 วิธีการทดลอง

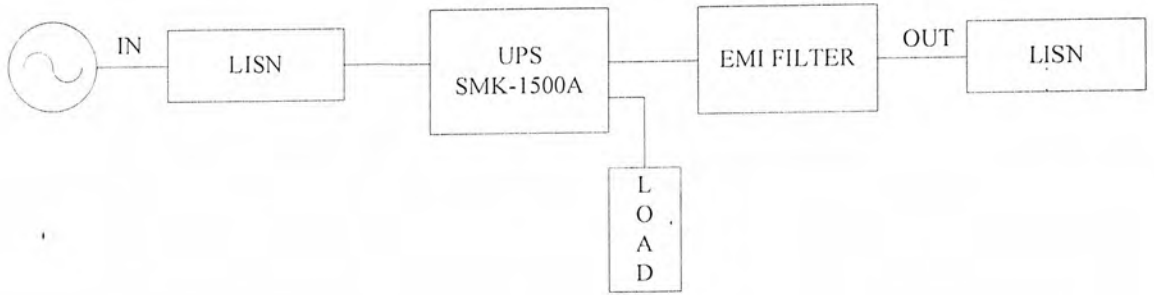
1. ต่อดังรูปที่ 7.8 ทำการวัดสัญญาณขณะไม่ทำการต่อ EMI Filter



รูปที่ 7.8 วงจรการวัดสัญญาณรบกวนที่ออกจาก UPS

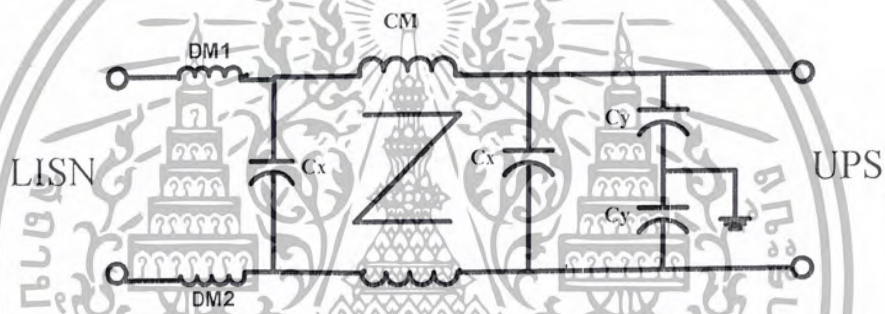
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างรูปที่ 7.9 ทำการวัดสัญญาณขณะต่อ EMI Filter



รูปที่ 7.9 วงจรการวัดสัญญาณรบกวนจาก UPS เมื่อต่อ EMI Filter

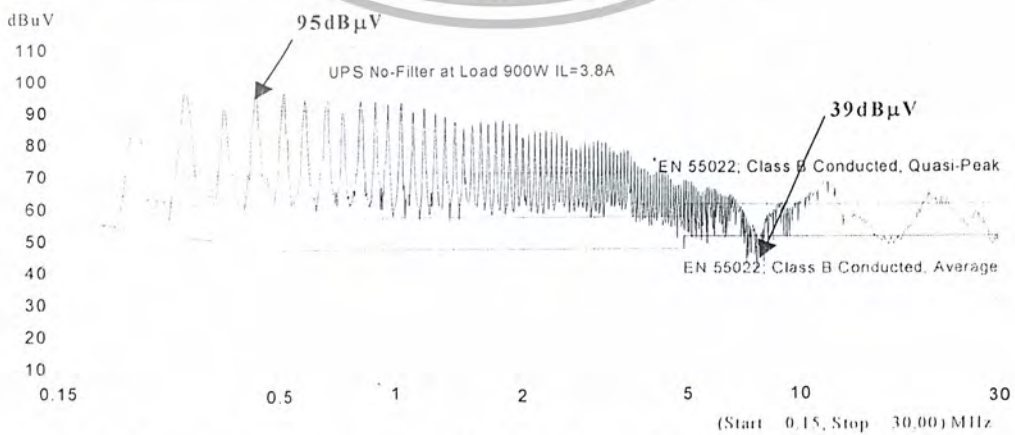
3. ทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายใน EMI Filter จากวงจรรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 วงจรภายในและองค์ประกอบต่างๆของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

7.7 ผลการทดลอง

7.7.1 ผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากระบบกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (ยูพีเอส) ขณะต่อโหลด 900 W แรงดันคงที่ที่ 220 V และ ความถี่ที่ 50 Hz



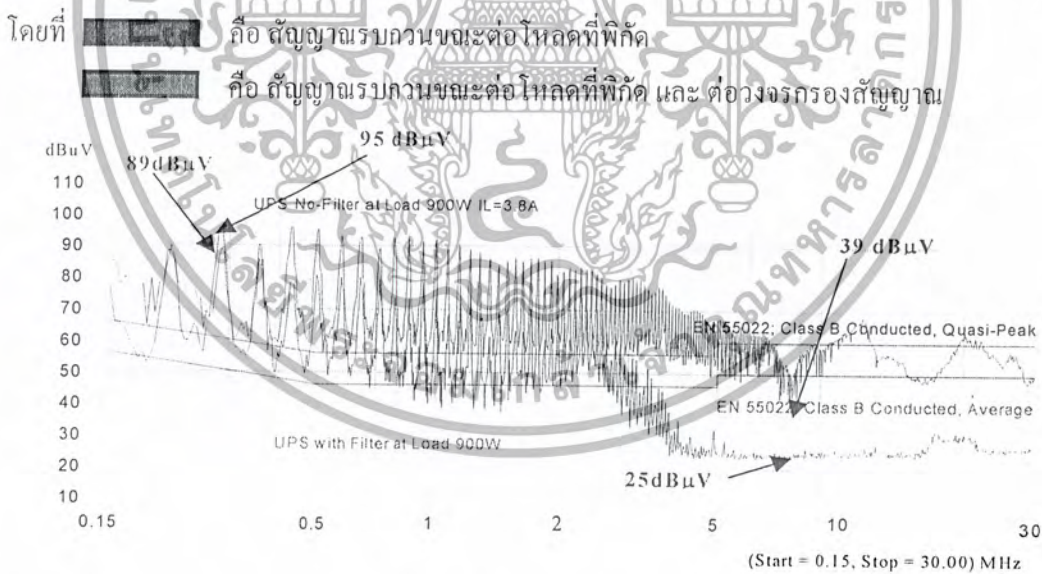
รูปที่ 7.11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังระบบสำรอง ขณะต่อโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7.2 ผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากระบบกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (ยูทีเอส) ขณะต่อ โหลด 900 W แรงดันคงที่ที่ 220 V และ ความถี่คงที่ที่ 50 Hz โดยทำการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวน แบบต่างๆ

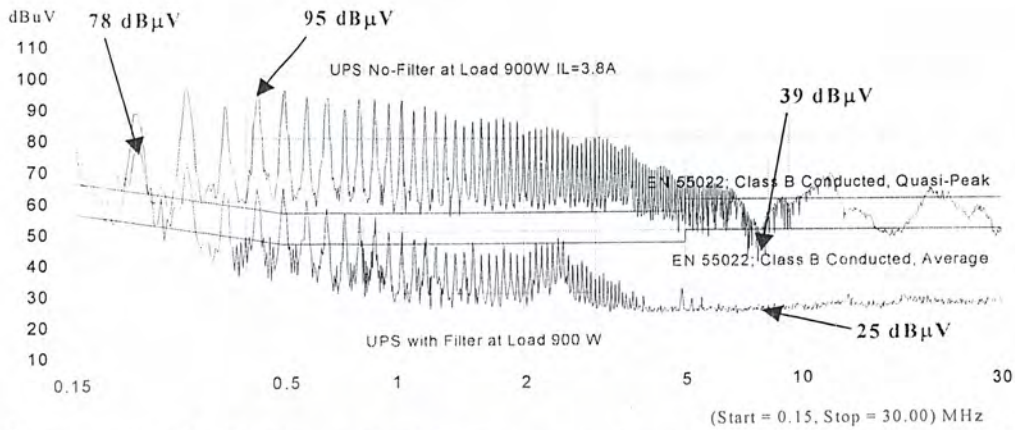
ตารางที่ 7.1 ผลของการลดทอนสัญญาณ ขณะต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวน

ชนิดของวงจรกรอง	วงจรภายใน EMI Filter	C_x	C_y	CM	DM	รูปผลของสัญญาณ
EMI Filter		$2.2 \mu F$	$4.7 nF$	$7 mH$	-	รูปที่ 7.12
					$L_{DM1} = 200 \mu H$	รูปที่ 7.13
					$L_{DM1} = 200 \mu H$ $L_{DM2} = 200 \mu H$	รูปที่ 7.14
					-	รูปที่ 7.15
					$L_{DM1} = 40 \mu H$	รูปที่ 7.16
					$L_{DM1} = 40 \mu H$ $L_{DM1} = 0.7 mH$	รูปที่ 7.17 รูปที่ 7.18

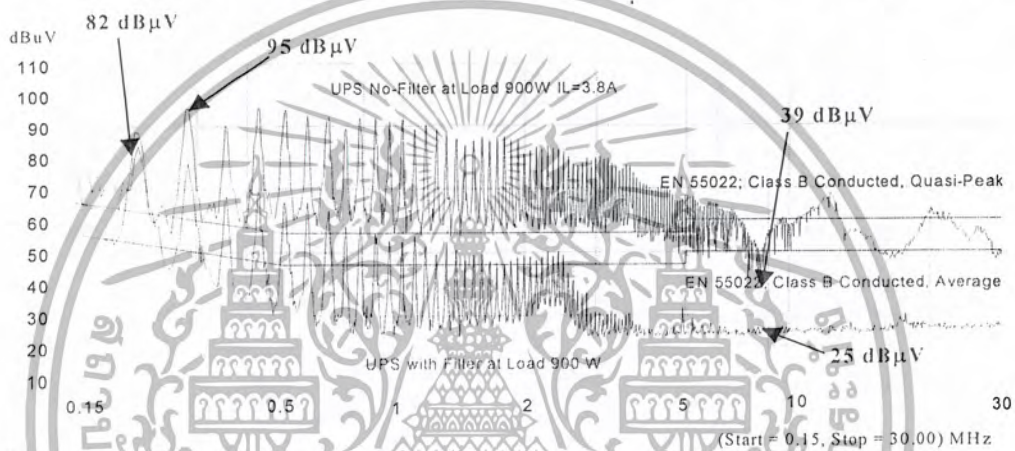


รูปที่ 7.12 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 mH$, $C_x = 2.2 \mu F$, $C_y = 4.7 nF$

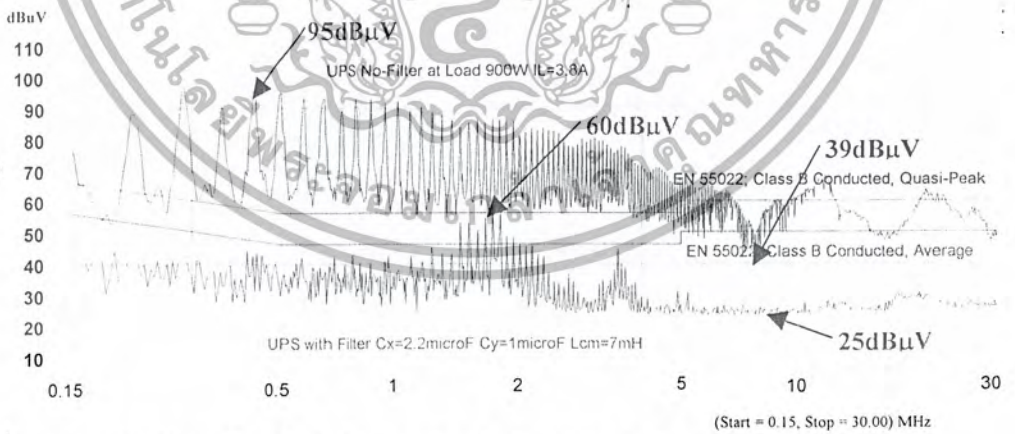
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$, $L_{DM1} = 200 \text{ }\mu\text{H}$

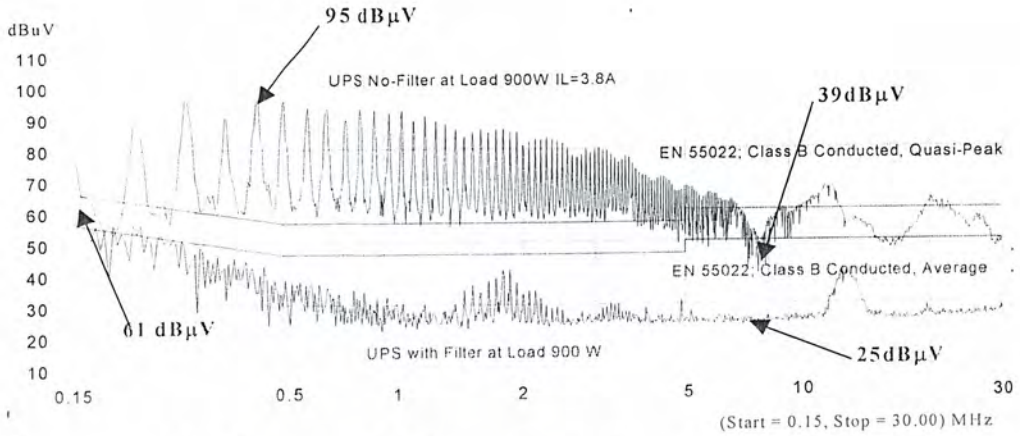


รูปที่ 7.14 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$, L_{DM1} และ $L_{DM2} = 200 \text{ }\mu\text{H}$

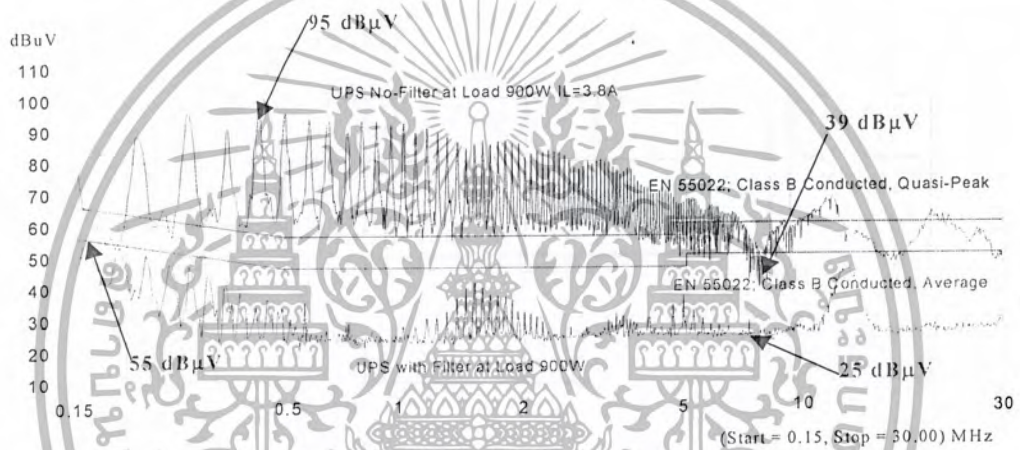


รูปที่ 7.15 ผลการเปรียบเทียบ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$

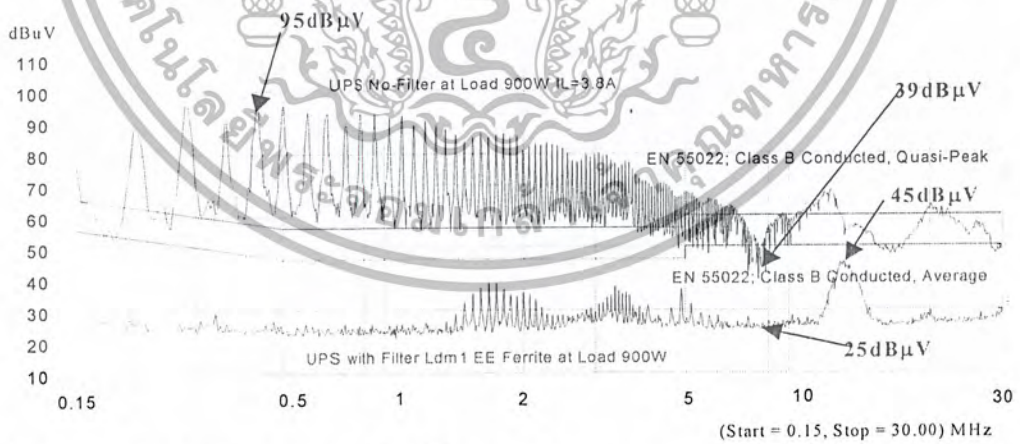
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.16 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 0.7 \text{ mH}$



รูปที่ 7.17 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 40 \text{ }\mu\text{H}$



รูปที่ 7.18 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM1} = 0.7 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.8 สรุป

จากผลการวัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง(UPS) เมื่อทำการจ่าย โหลดที่พิกัด 900 W พบว่าสัญญาณรบกวนมีค่าสูงสุดในช่วงความถี่ตั้งแต่ 200 kHz – 1 MHz คือ 95 dB μ V โดยจะทำการสรุปออกเป็นประเด็นที่ผ่านและไม่ผ่านเส้นมาตรฐาน CISPR 22

7.8.1 จากรูปที่ 7.12 ถึง 7.19 พบว่าผลจากการกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนผ่านสายตัวนำของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อเนื่องมีผลดังนี้

- รูปที่ 7.12 ใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 4.7 \text{ nF}$ พบว่าผลของสัญญาณรบกวนไม่ผ่านเส้นมาตรฐานตั้งแต่ช่วงความถี่ 150 kHz – 3MHz ทั้งนี้เป็นผลมาจากช่วง Differential Mode ซึ่ง L_{CM} ไม่สามารถกรองให้ต่ำกว่ามาตรฐานได้

- รูปที่ 7.13 ทำการต่อ $L_{DMI} = 200 \text{ }\mu\text{H}$ (แกน Iron Power Core) เพิ่มเพื่อช่วยในการกรองสัญญาณใน Differential Mode ซึ่งทำการต่อ L_{DM} เข้ากับ Line พบว่าให้ผลการกรองสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 150 kHz – 3MHz ได้ดีขึ้นแต่ยังไม่ผ่านเส้นมาตรฐาน

- รูปที่ 7.14 เป็นการเพิ่ม L_{DM1} และ $L_{DM2} = 200 \text{ }\mu\text{H}$ (แกน Iron Power Core) เข้าไปในวงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยทำการต่อเข้าทั้ง Line และ Neutral พบว่าผลของการกรองสัญญาณรบกวนสูงขึ้นกว่ารูปที่ 7.13 เนื่องจาก L_{DM2} ไม่สามารถลดผลของสัญญาณได้และยังทำให้สัญญาณสูงขึ้นเนื่องจากผลของ self resonance frequency จาก L_{DM2}

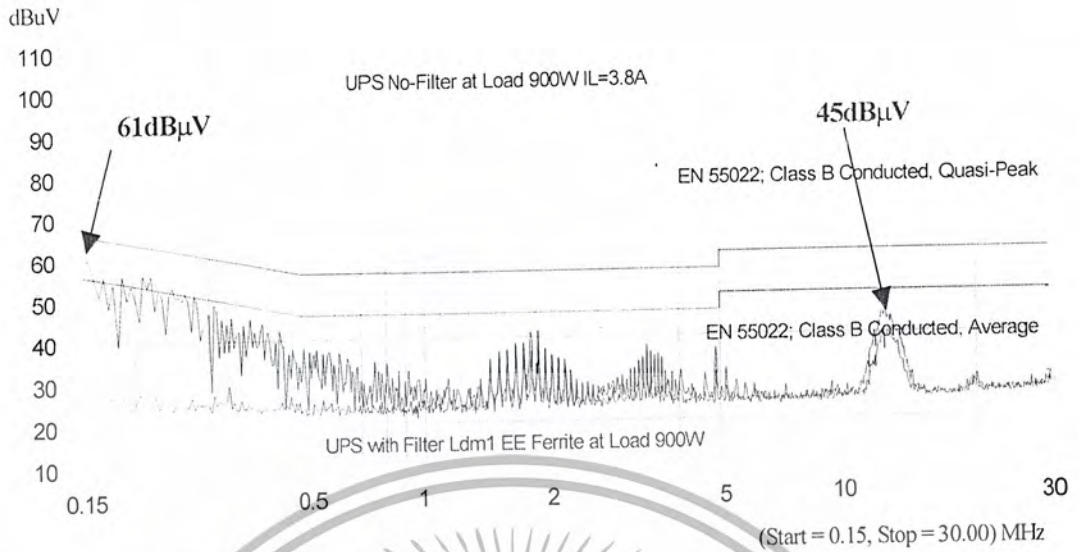
- รูปที่ 7.15 ใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$ พบว่าผลของการกรองสัญญาณรบกวนผ่านเส้นมาตรฐานในช่วง 150 kHz – 1MHz และ ในช่วง 2 MHz – 30 MHz แต่ในช่วงความถี่ประมาณ 1.8 MHz ผลการกรองไม่ผ่านเส้นมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- รูปที่ 7.16 ผลของการกรองสัญญาณรบกวนนั้นผ่านเส้นมาตรฐานได้ตลอดช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz โดยใช้ $L_{CM} = 7 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DMI} = 0.7 \text{ mH}$ (แกน Ferrite แบบ EE Core โดยใช้ลวดตัน)

- รูปที่ 7.17 จะใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DMI} = 40 \text{ }\mu\text{H}$ (แกน Iron Power Core) พบว่า ผลของการกรองสัญญาณรบกวนนั้นผ่านเส้นมาตรฐานได้ตลอดช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz

- รูปที่ 7.18 เป็นการศึกษาผลของ L_{DM} ที่เป็นแกน Ferrite แบบ EE Core ซึ่งใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DM} = 0.7 \text{ mH}$ ให้ผลการกรองสัญญาณรบกวนดีที่สุด โดยสามารถลดได้ถึง 67 dB μ V ที่ความถี่ประมาณ 300 KHz

7.8.2 เลือกใช้ $L_{CM} = 5 \text{ mH}$, $C_x = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_y = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $L_{DMI} = 40 \text{ }\mu\text{H}$ ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง เนื่องจาก $L_{CM} = 5 \text{ mH}$ และ $L_{DMI} = 40 \text{ }\mu\text{H}$ มีขนาดเล็กกว่า และ L_{DMI} เป็นแกน Iron Power Core ใช้ลวดตันจึงทนกระแสได้สูง อีกทั้งแกนจะไม่อึดตัวเนื่องจากผลของกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรอง



โดยที่ คือ ผลของการลดทอนสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ที่เลือกใช้
 คือ ผลของการลดทอนสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ที่ดีที่สุด

รูปที่ 7.19 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ดีที่สุดกับสัญญาณจากวงจรกรองสัญญาณความถี่รบกวนที่เลือกใช้ไว้

ตารางที่ 7.4 ผลของการลดทอนสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆ

ย่านความถี่ (MHz)	Δ_1 (dB μ V)	Δ_2 (dB μ V)	Δ (dB μ V)
0.15	61	29	32
0.5	29	22	7
1	31	25	6
2	25	25	1
5	24	26	-2
10	26	26	0
30	28	29	-1

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 วัตถุประสงค์

ในบทนี้อธิบายถึงบทสรุปของการวิจัย การนำไปใช้งานและเงื่อนไข ของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) ที่ได้ออกแบบ รวมถึงข้อเสนอนี้เกี่ยวกับความสำคัญของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

8.2 สรุปผลการวิจัย

จากเนื้อหาในปริญญาณิพนธ์นี้ สามารถใช้เป็นแนวทางการศึกษาเพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถลดทอนผลจากสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งที่ผ่านทางสายตัวนำ ที่ย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ทำการป้อน โทลคให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง ที่ 80% ของพิกัด โดยผลของการลดทอนจะอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 ภายใต้เงื่อนไขให้ผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ต่ำกว่าเส้นก่ายอดเสมือน (Quasi-Peak)

ซึ่งผลจากการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการทำงานของวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ใน 2 ภาวะ การทำงาน คือ การทำงานในโหมดร่วม (Common - Mode EMI) และ การทำงานในโหมดผลต่าง (Differential - Mode EMI) โดยที่โหมดผลต่างจะขึ้นอยู่กับค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าในวงจร ขณะที่โหมดร่วมจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบแฝง (parasitic components) ภายในวงจร

8.3 ข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบัน แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer : PC) ซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในหน่วยงานขนาดเล็กไปจนถึงหน่วยงานที่มีขนาดใหญ่ รวมถึงการใช้งานส่วนบุคคล (End User) และมีแนวโน้มในอนาคตอันใกล้ว่า ความต้องการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง เพียงเครื่องเดียวอาจไม่ส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่าไรนัก แต่เมื่อพิจารณาระบบใหญ่ที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งจำนวนมาก ย่อมส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงเสนอแนวทางการกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง ที่อาจถูกนำมาใช้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้ควบคู่กันไป

1. กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่งโดยตรง
2. กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบ

หรือ อาจนำข้อมูล และผลจากการวิจัยประกอบการออกแบบวงจรกรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จาก บริษัทที่ทดสอบ (Equipment Under Test) อื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Mohan, T.M. Underland and W.P. Pobbons. “ Power Electronics Converters, Application and Design ”. Second edition, John Wiley & Sons: Singapore, Inc. 1995.
- [2] วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์, “ วิทยานิพนธ์ เรื่อง การปรับปรุงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำร่วมในวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรเรียงกระแสไฟตรงแบบหนึ่งขั้น-หนึ่งสวิตช์ ”, 2547
- [3] ชุตติพนธ์ อุ่ยโยสม, “ วิทยานิพนธ์ เรื่อง ผลของวงจรสนับสนุนเบอร์ที่มีต่อมอสเฟสกำลังในด้าน EMI ”, 2546
- [4] ถาวร อมตคติดี, “ ระบบกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (ยูทีเอส) และ เครื่องควบคุมคุณภาพไฟฟ้า ”, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น ; 2545
- [5] โคทม อาริยา, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 ” กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น ; 2544.
- [6] โคทม อาริยา, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ” กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น ; 2544.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2543. มอก.1956-2542 บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ชีตจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ. กรุงเทพฯ: ไทยเจริญการพิมพ์.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2541. มอก. 1441 - 2540 อุปกรณ์และวิธีวัดสัญญาณรบกวนวิทยุและภูมิคุ้มกัน. เล่ม 1: อุปกรณ์วัดสัญญาณรบกวนวิทยุและภูมิคุ้มกัน. กรุงเทพฯ : ไทยเจริญการพิมพ์.
- [9] Philips ECG, “ ECG Semiconductor Master Replacement Guild ”, 1995
- [10] รศ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน, “เอกสารประกอบการอบรมและสัมมนาความเข้าใจทางแม่เหล็กไฟฟ้า”. 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

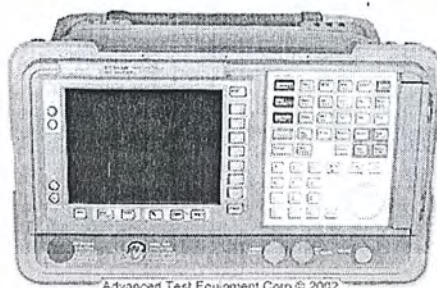


ภาคผนวก ก
(ข้อมูลเครื่องมือวัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. EMI Analyzer

HP / Agilent E7401A



Specifications:

Rear Panel Connector

Earphone: 1/8" monaural jack

Interface: GPIB

High Sweep In/Out: BNC, high TTL = sweep

Aux Video Out: 50W BNC, 0-1 V

Aux IF Output: 50W BNC, -10 to 60 dBm, 21.4MHz

Ext. Trigger Input: BNC TTL levels, positive edge trigger

Ext. Ref. In: 50W BNC, 10 MHz, -2 to +10 dBm

10 MHz Ref. Output: 50W BNC, 10 MHz, 0 dBm

Aux Interface: 9 pin "D" subminiature

Monitor Out: 50W BNC, NTSC, 15.75 kHz, 60 Hz

Weight: 12.6 kg (27.7 lbs.)

Please contact us for additional information or available options.

Portable EMC Analyzer, 9 kHz to 1.5 GHz

Frequency Specifications:

Frequency Range:

* 50 ohms: 9 kHz to 1.5 GHz

Sweep Time:

* Span > 0 Hz: 1 ms to 4000 s

* Span = 0 Hz: 10 μ s to 4000 s

* Option AYX: 50 ns to 4000 s

Resolution Bandwidth: 10 Hz to 3 MHz (-3 dB) in 1-3-10 sequence

Video Bandwidth Range: 30 Hz to 3 MHz in 1-3-10 sequence

Amplitude Specifications:

Amplitude Measurement Range: Displayed average noise level (DANL) to maximum safe input level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum Safe Input Level:

* Average Continuous Power: +30 dBm (1 W)

* Peak Pulse Power: +30 dBm (1 W)

* DC: 100 Vdc

Displayed Average Noise Level (dBm): (Input terminated, 0 dB attenuation, sample-detector)

* 1 kHz RBW; 30 Hz VBW

* 10 Hz RBW; 1 Hz VBW

* 1 Hz RBW; 1 Hz VBW (Option 1D5)

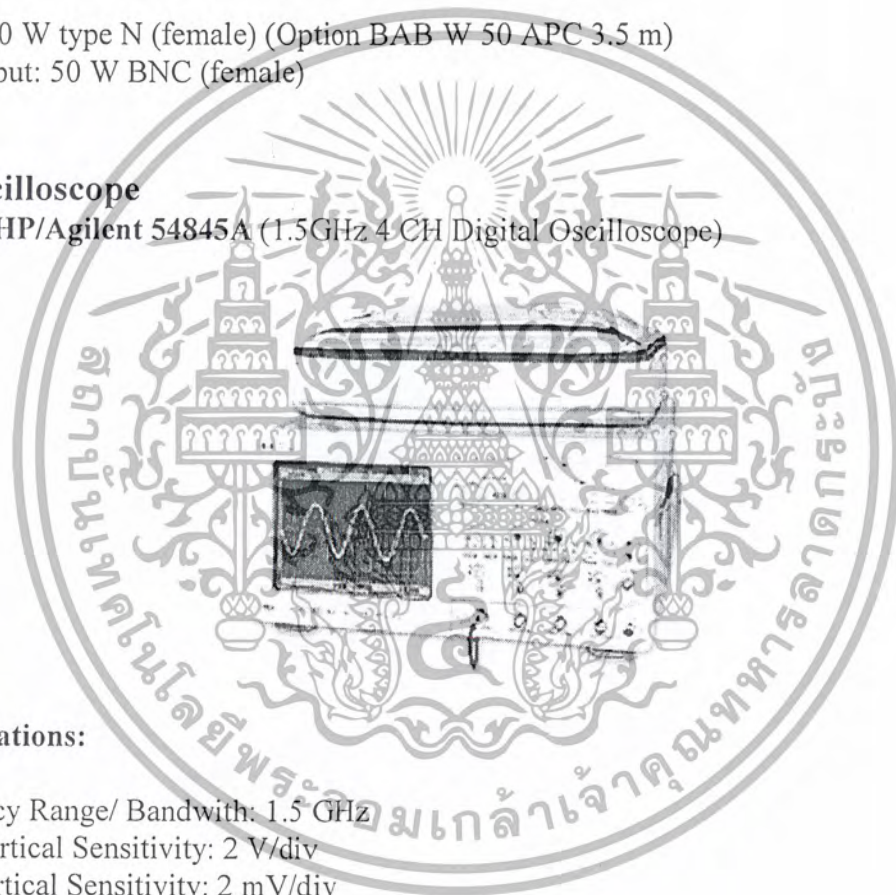
Input / Output**Front Panel Connectors**

Input: 50 W type N (female) (Option BAB W 50 APC 3.5 m)

RF Output: 50 W BNC (female)

2. Oscilloscope

HP/Agilent 54845A (1.5GHz 4 CH Digital Oscilloscope)

**Specifications:**

Frequency Range/ Bandwith: 1.5 GHz

Max. Vertical Sensitivity: 2 V/div

Min. Vertical Sensitivity: 2 mV/div

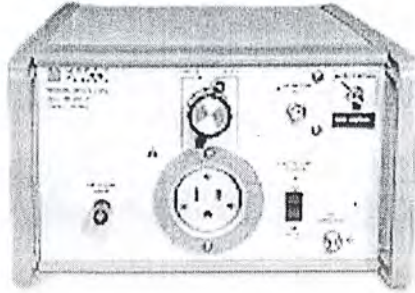
Number of Channels: 4

Record Length: 65,536 pts.

Sample Rate: 8 GSa/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. LISN (Line Impedance Stabilization Networks) EMCO 3810-2HP / Agilent 11967D



Specifications:

LISN / PLISN

Multi-line low pass filter networks used for conducted emissions measurement. They are placed between the power mains and the EUT (Equipment Under Test) to stabilize line impedance, provide a 50 ohm RF connection, and eliminate unwanted RF signals from the line supply. Designed to be used with a signal analyzer for making FCC 15, VDE 0871 & 0875, and EN55022 conformance measurements.

An Artificial Hand circuit which conforms to EN55014 is included. The circuit is useful for testing hand-held equipment which does not have a connection to protective earth ground.

Features:

Frequency Range: 9 kHz to 30 MHz

Continuous Current Rating: 10A

Earth Line Choke

Artificial Hand Network

Applications

Test Type: FCC-15, VDE 0871, VDE 0876, EN55022

Electrical Specifications:

Lines Plus Ground: 2

Frequency Range: 9 kHz - 30 MHz

Power Source Frequency: 60 Hz (50 Hz optional)

Maximum Current: 10 A

Maximum Voltage:

125 VAC Line to Ground

(250 VAC Line to Ground optional)

Network Inductance Impedance: 50 μ H / 250 μ H; 50 ohm

Power In Connector: IEC power inlet with customer specified plug

Power Out Connector: NEMA®

Home - EMI / EMC / RFI Test Systems

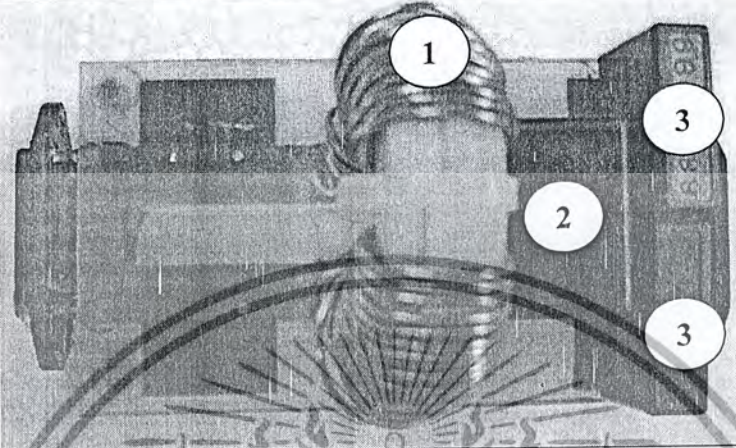
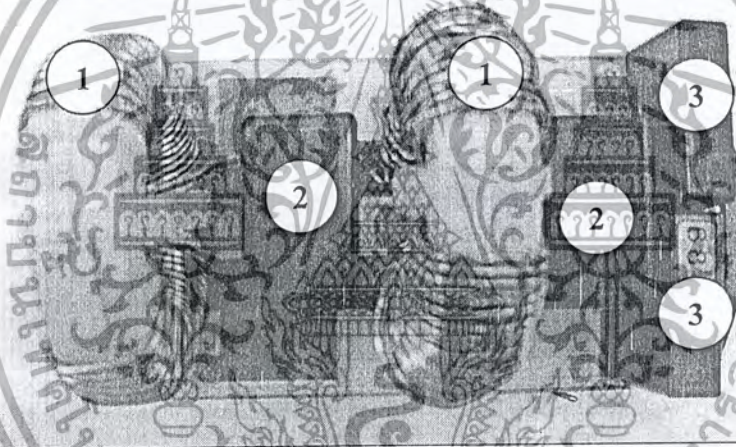
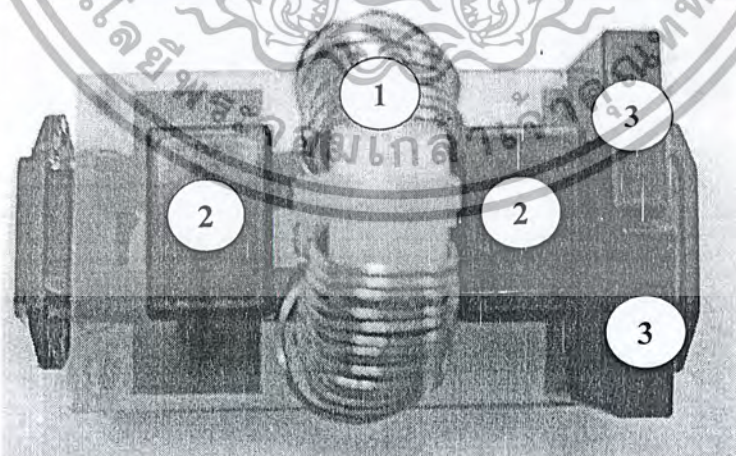
HP / Agilent 11947A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปวงจรองความถี่ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ชนิด	รูปวงจร	รายละเอียด
LC		<p>1. ตัวเหนี่ยวนำ (L_{CM}) ใช้ค่า $800 \mu H$, $2.5 mH$ และ $5 mH$</p> <p>2. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตผลต่าง (C_x) ใช้ค่า $2.2 \mu F$ และ $1 \mu F$</p> <p>3. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตร่วม (C_y) ใช้ค่า $0.68 \mu F$</p>
T		<p>1. ตัวเหนี่ยวนำ (L_{CM}) ใช้ค่า $800 \mu H$, $2.5 mH$ และ $5 mH$</p> <p>2. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตผลต่าง (C_x) ใช้ค่า $2.2 \mu F$ และ $1 \mu F$</p> <p>3. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตร่วม (C_y) ใช้ค่า $0.68 \mu F$</p>
π		<p>1. ตัวเหนี่ยวนำ (L_{CM}) ใช้ค่า $800 \mu H$, $2.5 mH$ และ $5 mH$</p> <p>2. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตผลต่าง (C_x) ใช้ค่า $2.2 \mu F$ และ $1 \mu F$</p> <p>3. ตัวเก็บประจุทำงานใน โหมตร่วม (C_y) ใช้ค่า $0.68 \mu F$</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้