



การศึกษาการประยุกต์ใช้ Flexible Multilayer Foils ในการลดขนาดวงจรกรอง  
แม่เหล็กไฟฟ้า

A STUDY OF AN INTEGRATED EMI FILTER WITH  
FLEXIBLE MULTIAYER FOILS

นางสาวกฤษมา จิมมาลี

นายภูอัษัร อีแต

นายจิรวัดน์ นาคงาม

นางสาวณัฐกฤตา นานาง

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาการประยุกต์ใช้ Flexible Multilayer Foils ในการลดขนาดวงจรกรอง  
แม่เหล็กไฟฟ้า

A STUDY OF AN INTEGRATED EMI FILTER WITH  
FLEXIBLE MULTIAYER FOILS



โครงการนิพนธ์กรรมศาสตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

หัวข้อโครงการนิพนธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

เรื่อง การศึกษาการประยุกต์ใช้ Flexible Multilayer Foils ในการลดขนาดวงจรรองรับแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

นางสาวกฤษมา จิมมาลี

นายภูษัฒร์ อีเต

นายจิรวัดน์ นากงาม

นางสาวณัฐกฤตา นาแซง

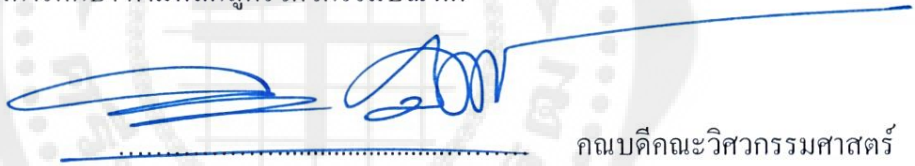
ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒอนุมัติให้นับโครงการนิพนธ์ไฟฟ้า  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการนิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ เทพสาธร)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์)

**การศึกษาการประยุกต์ใช้ Flexible Multilayer Foils ในการลดขนาดวงจรกรองแม่เหล็กไฟฟ้า****ปีการศึกษา 2557****โดย**

นางสาวกฤษมา นิมมาลี

นายภูอัษัร อีแต

นายจิรวัดน์ นาคงาม

นางสาวณัฐกฤตา นาแซง

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์

**บทคัดย่อ**

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils (FML Foils) โดยนำประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิม โดยจะทดลองวัดประสิทธิภาพการลดทอนและเปรียบเทียบผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโมดผลร่วมโมดผลต่าง โคน์เทียบกับกราวด์ และนิวทรัลเทียบกับกราวด์ โดยสรุป ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระหว่างเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils (FML Foils) และเทคนิคตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมจะมีประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ :** แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง/ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า/ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

**A Study of an Integrated EMI Filter With Flexible Multilayer Foils.****Academic Year 2014****By****Project Advisor****Ms. Kusuma Chimmalee****Asst. Prof. Dr. Vuttipon Tarateeraseth****Mr. Kuazhar E-tae****Mr. Jirawat Nakngam****Ms. Nutkridta Nasaeng****Abstract**

The purpose of this project was to study the design Electro-Magnetic Interference circuit with Integrated CM Choke and  $C_y$  using By Flexible Multilayer Foils (FML foils). The integrated EMI filter is compared to the conventional EMI filter. The conducted EMI in terms of common-mode emission, differential-mode emission, line-to-ground voltage, and neutral-to-ground voltage are measured and compared. Finally, the experimental results show a good agreement between proposed technique and the conventional one.

**Keyword** : Switched-mode Power Supply, SMPS/ Electromagnetic Interference, EMI/  
Electromagnetic Compatibility, EMC.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมศาสตร์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้ ที่กรุณาให้ความรู้ในด้านวิชาการคอยให้คำปรึกษาแนะแนวทางอีกทั้งให้ข้อเสนอแนะที่ฉะฉานเกิดเป็นผลสำเร็จ รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านต่างๆตลอดจนให้กำลังใจในการทำโครงการเล่มนี้

คณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทำให้มีความรู้ความสามารถในการนำความรู้ที่ได้ศึกษาเล่าเรียนมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการเล่มนี้ให้เกิดขึ้นจริงและเสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้าและภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ช่วยให้คำแนะนำและชี้แนะในการแก้ปัญหาต่างๆที่พบเจอขณะทำโครงการเล่มนี้ทำให้โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างรวดเร็ว

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ในการทำโครงการจนแล้วเสร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียนมา โดยตลอดจนกระทั่งผู้จัดทำมีโอกาสทำโครงการเล่มนี้ได้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบ คุณความดี ที่พึงมีจากการทำปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้แต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ทุกๆท่าน ตลอดจนผู้มีพระคุณที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุน ทางคณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำโครงการ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรมศาสตร์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 บทนำ	3
2.2 องค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.3 รูปแบบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.4 วิธีการแก้ไขและลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.5 วงจรกรองความถี่แบบทั่วไป	10
2.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.7 วิธีการผสมผสานตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils (FML foils)	23
2.8 โครงสร้างการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุ โดยใช้ Flexible Multilayer foils	25
2.9 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบ</b>	32
3.1 บทนำ	32
3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils (Integrated CM Choke and Cy using Flexible Multilayer foils)	34
3.3 การออกแบบวงจรกรองตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิม (Conventional Common-Mode Choke)	39
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	46
4.1 การทดลองการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองของแต่ละรูปแบบ	47
4.2 การทดลอง	48
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบต่างๆ	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	99
5.1 สรุปผลการทดลอง	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	100
<b>ภาคผนวก</b>	101
<b>ประวัติผู้จัดทำโครงการ</b>	105



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมของวงจร โดยอ้างอิงกับโหลด	5
2.3 ทิศทางการไหลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม	6
2.4 ทิศทางการไหลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง	7
2.5 วงจรไฟฟ้าขณะที่ใช้และไม่ใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน	9
2.6 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ	12
2.7 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ	14
2.8 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบ LC	16
2.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	18
2.10 ทิศทางกระแสโหมดผลร่วมและ โหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า	20
2.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม	20
2.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง	21
2.13 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลร่วมและกระแสโหมดผลต่าง	21
2.14 คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	22
2.15 ตัวเก็บประจุ $C_y$ ที่ใช้จริง	23
2.16 การรวมอุปกรณ์พาสซีฟ โดย FML Foils (Flexible Multilayer Foils)	24
2.17 โครงสร้างการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils	25
2.18 วงจรสมมูลของโครงสร้างการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils	25
2.19 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN	28
2.20 วงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR	28
2.21 อิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR	29
2.22 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ)	30

### สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ชั้นของ FML Foils	35
3.2 รูปของ FML Foils ที่ถูกออกแบบ	35
3.3 การต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils	37
3.4 ต้นแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils	37
3.5 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils	38
3.6 วงจรสมมูลเส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils	38
3.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ	39
3.8 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ	40
3.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ	40
3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าเท่ากับ 10nF	41
3.11 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าเท่ากับ 10nF	41
3.12 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าโมดผลร่วมเท่ากับ 10nF	42

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยมีตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.12mH	42
3.14 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.12mH	43
3.15 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.12mH	43
3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.12mH และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10nF	44
3.17 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.1mH และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10nF	44
3.18 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12mH และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10nF	45
4.1 แผนผังการทดลอง	47
4.2 แสดงการต่อวงจรแบบไม่ใส่วงจรกรอง	48
4.3 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรแบบไม่ใส่วงจรกรอง	48
4.4 แสดงวงจรกรองรูปแบบที่ 1	49
4.5 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรองรูปแบบที่ 1	49
4.6 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรองรูปแบบที่ 1	50
4.7 แสดงวงจรกรองรูปแบบ 2A	50
4.8 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรองรูปแบบ 2A	51
4.9 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรองรูปแบบ 2A	51
4.10 แสดงวงจรกรองรูปแบบ 2B	51
4.11 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรองรูปแบบ 2B	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรโดยใช้วงจรถอกรูปแบบ 2B	52
4.13 แสดงวงจรถอกรูปแบบ 2C	52
4.14 แสดงการต่อวงจรแบบใช้วงจรถอกรูปแบบ 2C	53
4.15 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรโดยใช้วงจรถอกรูปแบบ 2C	53
4.16 แสดงวงจรถอกรูปแบบ 2D	53
4.17 แสดงการต่อวงจรแบบใช้วงจรถอกรูปแบบ 2D	54
4.18 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรโดยใช้วงจรถอกรูปแบบ 2D	54
4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง ( $V_{DM}$ )	55
4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบ 2C, วงจรถอกรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง ( $V_{DM}$ )	56
4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบ 2C, วงจรถอกรูปแบบ 2A และแบบไม่มีตัวจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	57
4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบ 2D, วงจรถอกรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	58
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบ 2A, วงจรถอกรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	59
4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1, วงจรถอกรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	60
4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1, วงจรถอกรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	61
4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1, วงจรถอกรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	62
4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1, วงจรถอกรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรถอกรที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	63
4.28 กราฟแสดง การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรถอกรูปแบบที่ 1, วงจรถอกรูปแบบ 2A และวงจรถอกรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โมคผลต่าง( $V_{DM}$ )	64



สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )	77
4.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	78
4.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน ไฟฟ้า โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	79
4.44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2B, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	80
4.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	81
4.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	82
4.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	83
4.48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	84
4.49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมคไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	85

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบที่ 1, วงจรรองรูปแบบ 2A และวงจรรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	86
4.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบที่ 1, วงจรรองรูปแบบ 2A ,วงจรรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	87
4.52 กราฟการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	88
4.53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2C, วงจรรองรูปแบบ 2D และไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )	89
4.54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2A, วงจรรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน ไฟฟ้า โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	90
4.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2B, วงจรรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	91
4.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2A, วงจรรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	92
4.57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบที่ 1, วงจรรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	93
4.58 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบที่ 1, วงจรรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	94

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โคนนิวทรัล เทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	95
4.60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โคนนิวทรัล เทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	96
4.61 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โคนนิวทรัล เทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	97
4.62 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โคนนิวทรัล เทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )	98



## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
EMI	การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-
EMC	การเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-
SMPS	Switched Mode Power Supply	-
LISN	Line Impedance Stabilization Network	-
L	ไลน์	-
N	นิวทรัล	-
G	สายดิน	-
$L_{CM}$	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม	H
$L_{DM}$	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง	H
$C_{CM}, C_y$	ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม	F
$C_{DM}, C_x$	ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง	F
$V_{L-N}$	แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์-นิวทรัล	V
$V_{L-G}$	แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์-สายดิน	V
$V_{N-G}$	แรงดันไฟฟ้าระหว่างนิวทรัล-สายดิน	V
Z	ความต้านทานอิมพีแดนซ์	$\Omega$
$V_{CM}$	แรงดันสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม	V
$V_{DM}$	แรงดันสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง	V
$I_{CM}$	กระแสสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม	A
$I_{DM}$	กระแสสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง	A
CM	สัญญาณรบกวน โหมดผลร่วม	-
DM	สัญญาณรบกวน โหมดผลต่าง	-

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้กันอย่างกว้างขวางในชีวิตประจำวัน เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่อยู่ในเครื่องใช้ภายในบ้านและอาคาร อุปกรณ์สื่อสารที่อยู่ในสถานที่ต่างๆ เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในสมัยนี้ทำงานที่ความถี่สูงๆ การทำงานที่ความถี่สูงๆนี้อาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 150kHz-30MHz โดยสัญญาณเหล่านี้จะไปรบกวนระบบหรืออุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียง โดยผ่านสายตัวนำหรืออากาศ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เราจำเป็นต้องมีตัวกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำมาลดทอนสัญญาณรบกวนเหล่านี้ แต่ในปัจจุบันวงจรกรองสัญญาณรบกวนยังมีขนาดใหญ่ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย จึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการต่อขดให้วงจรกรองมีขนาดเล็กลงแต่ยังคงประสิทธิภาพไว้ได้ตามเดิม ในที่นี้จะศึกษาวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยใช้เทคนิครวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุให้มีการทำงานร่วมกันแบบ Flexible multilayer foil.

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อลดขนาดวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กลง แต่ยังคงประสิทธิภาพไว้คงเดิม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดย Conventional EMI Filters-Common Mode Choke กับ Integrated EMI Filter CM Choke and Cy using Flexible multilayer Foils โดยใช้ Flexible multilayer foils

### 1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม

1.3.1 วิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ เพื่อแก้ไขสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในแหล่งจ่ายกำลังสวิตช์ซึ่งมีขนาด 350W ในช่วงความถี่ 150kHz-30MHz โดยการออกแบบในมีขนาดอุปกรณ์เล็กลง แต่ยังคงประสิทธิภาพเดิมไว้

1.3.2 เปรียบเทียบผลการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าหลังจากใช้วงจรกรองโดยเปรียบเทียบการใช้ Conventional EMI Filters-Common Mode Choke กับ Integrated EMI Filter CM Choke and Cy using Flexible multilayer Foils โดยใช้ Flexible multilayer foils.

### 1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 เข้าใจพฤติกรรมการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ ในช่วงความถี่ 150kHz-30MHz

1.4.2 เข้าใจหลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.3 สามารถออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และนำมาใช้ได้จริง

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการศึกษาที่มาของโรงงาน จะกล่าวถึงการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ องค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า และ วงจรกรองความถี่ในรูปแบบต่างๆ โดยจะเน้นการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำในแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งขนาดไม่เกิน 350W ช่วงความถี่คลื่นวิทยุ (150 kHz – 30 MHz)

### 2.1 บทนำ

การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณแพร่กระจายในอากาศหรือ เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นตามสายตัวนำ มักจะเกิดความเสียหายและไม่มีเสถียรภาพต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เราจะสามารถลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ได้โดยมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนและทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ นี้จะสามารถทำงานได้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่าความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility : EMC)

### 2.2 องค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

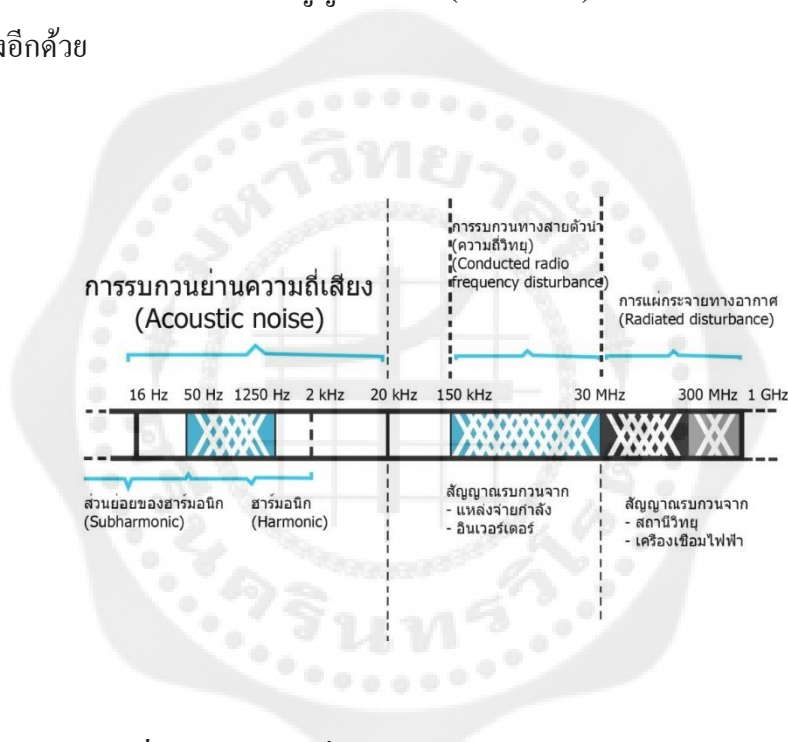
ส่วนที่ 1 คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า วงจรจุดระเบิด ผลจากการเกิดฟ้าผ่า เป็นต้น

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่ได้รับจากผลการรบกวน (Receptor หรือ victim) เช่น วงจรตรวจจับสัญญาณ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ส่วนที่ 2 นี้มักจะมีแนวโน้มต่อการรับสัญญาณ

ส่วนที่ 3 คือ ส่วนคู่ควบ (Coupling) เป็นสัญญาณรบกวนระหว่างส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 การแผ่กระจายไปทางอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ หรือการส่งสัญญาณผ่านไปทางสายตัวนำ

ทั้ง 3 ส่วนนี้มีรูปแบบและความสัมพันธ์กันแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตามทฤษฎีที่ว่า กำเนิดสัญญาณมักสร้างสัญญาณไปรบกวนส่วนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วส่วนที่กำเนิดสัญญาณสามารถรับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นส่วนกำเนิดสัญญาณอาจเป็นทั้งส่วนกำเนิดสัญญาณและส่วนที่ได้รับสัญญาณรบกวนได้ในเวลาเดียวกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 0 Hz ถึงประมาณ 2 kHz จะเป็นความถี่ต่ำหรือเรียกว่า “ฮาร์มอนิก” (Harmonics) ส่งผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ (sine wave) และยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย



รูปที่ 2.1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: พรเทพ พิมพ์คำวงศ์, พรหมมาศ ปิ่นนิกร และพันธวิช โรจนศุภมิตร (2555)

ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการรบกวนทางความถี่วิทยุ (Radio Frequency disturbance) จัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz ที่แบ่งเป็นสองแบบ คือ

1. ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz เป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่จะทำให้การวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (Volt : V) หรือกระแสไฟฟ้า (Ampere : A)

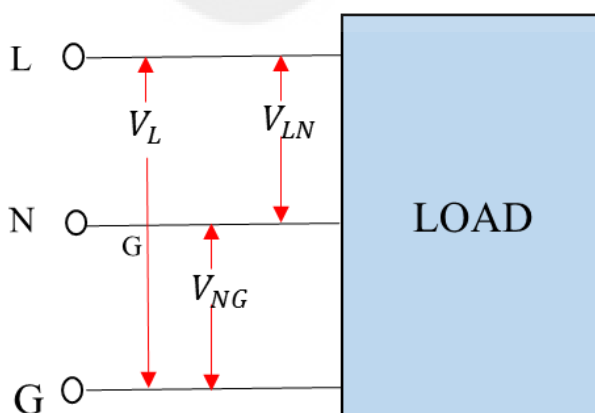
2. ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz เป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ที่จะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปแบบความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m) หรือระนาบคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (plane wave :  $W/m^2$ ) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น ( $r/\lambda$ )

### 2.3 รูปแบบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังได้แบ่งสัญญาณรบกวนออกเป็น 2 แบบคือสัญญาณรบกวนกระแส และสัญญาณรบกวนแรงดัน ที่จะสามารถแบ่งได้สองโหมด คือ

1. สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (Common-Mode Interference: CM) คือ การเปลี่ยนแปลงการสวิทช์ของสัญญาณแม่เหล็ก เช่น สถานะการเปิดและปิดของสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ทำให้เกิดการรั่วไหลผ่านค่าประจุแฝงของอุปกรณ์สวิทช์ซึ่ง ลงสู่กราวด์ หรือเป็นประจุแฝงที่ตำแหน่งอื่นๆของวงจร ดังนั้นการเชื่อมโยงของสัญญาณนี้จะเป็นการเชื่อมโยงผ่านตัวประจุเกิดการเก็บและการคายประจุ รูปที่ 2.3

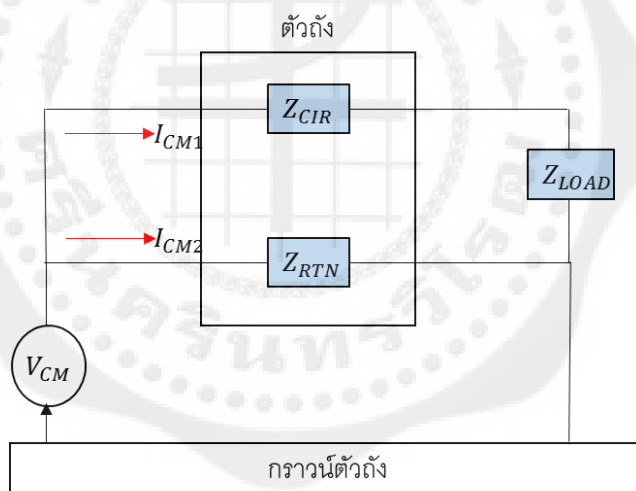
2. สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential-Mode Interference: DM) คือ สัญญาณรบกวนจะเกิดขึ้นที่ตัวนำของสายส่งระหว่างตัวนำส่งและตัวนำรับทางเดินของการเกิดสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะเป็นวงจรแบบปิดหรือลูป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กและเชื่อมโยงไปสู่วงจรใกล้เคียงการเชื่อมโยงนี้จะเป็นการเชื่อมโยงแบบการเหนี่ยวนำ รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมของวงจร โดยอ้างอิงกับโหลด

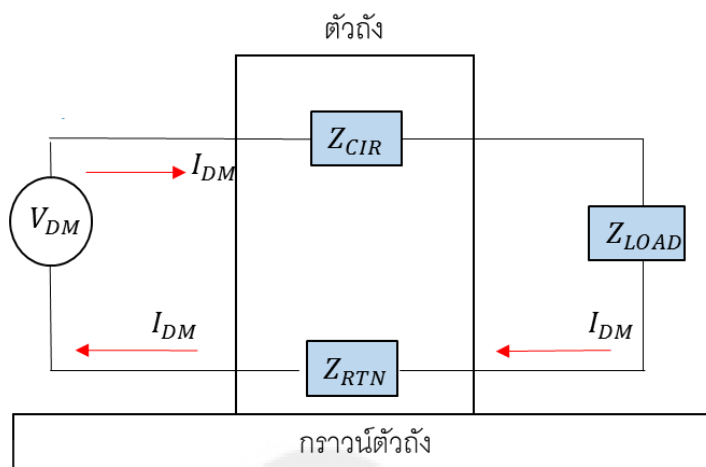
เมื่อ	L: Line	คือ สายไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า
	N: Neutral	คือ สายไฟฟ้าที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้า (ศูนย์โวลต์)
	G: Ground	คือ สายดิน
	V: Voltage	คือ แรงดันไฟฟ้า
	$V_{LG}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไฟฟ้ากับสายดิน
	$V_{NG}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไฟฟ้าศูนย์โวลต์กับสายดิน
	$V_{LN}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้าศูนย์โวลต์

จากรูปที่ 2.2 สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L-G ได้จาก  $V_{LG}$  หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม N-G ได้จาก  $V_{NG}$  และหาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L-N ได้จาก  $V_{LN}$



รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโมดผลรวม

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าทางเดินของกระแสรบกวนโมดรวม  $I_{CM}$  และ  $I_{CM2}$  จะมีเฟสตรงข้ามกัน ถ้ากระแสรบกวนโมดรวมทั้งสองนี้มีค่าประมาณที่เท่ากัน จะเกิดการหักล้างกันที่กราวด์ เพราะฉะนั้นตัวแปรสำคัญที่ทำให้กระแสทั้งสองหักล้างกัน คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของลูปกระแสรบกวนโมดรวมระหว่างสายตัวนำส่งและสายตัวนำกลับจะต้องมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่าง

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นทางเดินของกระแสรบกวนโหมดผลต่าง ( $I_{DM}$ ) ที่ไหลอยู่ในลูประหว่างแหล่งจ่ายหลักและโหลด การลดสัญญาณประเภทนี้ อาจลดได้ด้วยการลดพื้นที่ของหรือจำนวนลูปที่เกิดขึ้น

เมื่อ	I: Current	คือ กระแสไฟฟ้า
	V: Voltage	คือ แรงดันไฟฟ้า
	Z: impedance	คือ ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์
	CIR: Circuit	คือ ทิศทางกระแสไฟฟ้าตาม
	RTN: Return	คือ ทิศทางกระแสไฟฟ้าทวน
	$I_{DM}$	คือ กระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง
	$V_{DM}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง
	$Z_{LOAD}$	คือ ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ของโหลด
	$Z_{CIR}$	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ของทิศทางกระแสไฟฟ้าตาม มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm: $\Omega$ )
	$Z_{RTN}$	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ของทิศทางกระแสไฟฟ้าทวน



## 2.4 วิธีการแก้ไขและลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.4.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จะหาได้จากสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ลดลง ขณะเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และในการหาค่าอัตราการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (insertion loss:  $IL_{dB}$ ) จะหาได้จาก

สมการ

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| \frac{P_{L,WO}}{P_{L,W}} \right| = 10 \log \left| \frac{V_{L,WO}^2 / Z_L}{V_{L,W}^2 / Z_L} \right| \quad (2.1)$$

หรือ

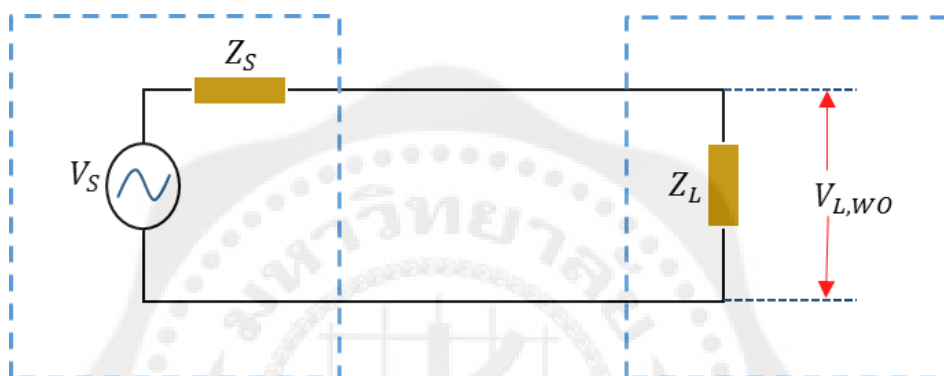
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{V_{L,WO}}{V_{L,W}} \right| + 10 \log \left| \frac{Z_L}{Z_L} \right| \quad (2.2)$$

หรือ

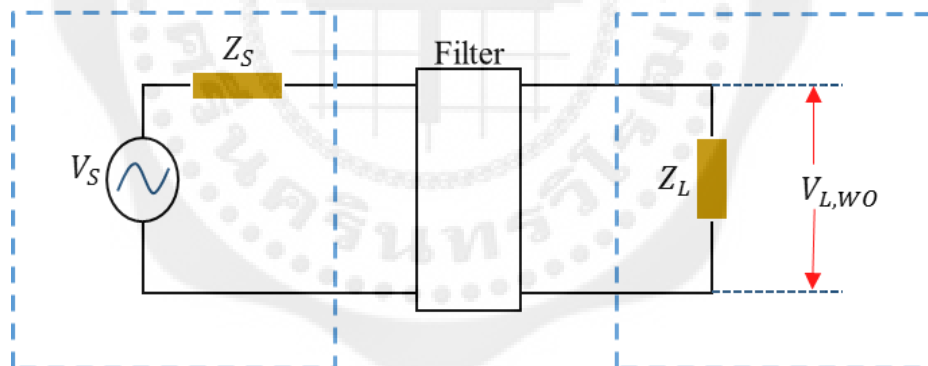
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{I_{L,WO}}{I_{L,W}} \right| + 10 \log \left| \frac{Z_L}{Z_L} \right| \quad (2.3)$$

เมื่อ	$V_{L,WO}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$V_{L,W}$	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$P_{L,WO}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$P_{L,W}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$I_{L,WO}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$I_{L,W}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
	$Z_L$	คือ อิมพีแดนซ์โหลด

ในการพิจารณา ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลด  $Z_L$  เป็นจำนวนจริงที่เท่ากัน ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนและไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน และระดับกำลังไฟฟ้าไม่แตกต่างกันในหน่วยของ dB นั้น จะทำให้อัตราการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ และจากรูปที่ 2.5 จะแสดงวงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนและขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



(ก) วงจรไฟฟ้าในขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



(ข) วงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

รูปที่ 2.5 วงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ใส่และไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

## 2.5 วงจรกรองความถี่แบบทั่วไป

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (passive filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอ็กทีฟ (active filter) และในการกรองสัญญาณรบกวนส่วนมากจะใช้วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ เพราะมีตัวอุปกรณ์น้อยทำให้มีการสูญเสียน้อยและง่ายต่อการใช้งานเพราะไม่จำเป็นต้องหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่ม ในทางปฏิบัติจะอธิบายได้ดังนี้ วงจรกรองความถี่ในรูปของการตอบสนองทางความถี่ โดยพิจารณาระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด สำหรับวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ที่จะนำเสนอจะมี 3 วงจร ดังนี้

### 2.5.1 วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ (inductor filter) หรือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ วงจรที่ยอมให้สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณรบกวนความถี่สูงไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และในรูปที่ 2.6(ก) จะแสดงทรานเฟอร์ฟังก์ชัน  $H(j\omega)$  ของแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าของวงจรกรองความถี่ ดังสมการที่ (2.4) และในการพิจารณานั้นจะพิจารณาเฉพาะขนาดของ  $|H(j\omega)|$

เมื่อ

$$\begin{aligned} H(p) &= \frac{V_{out}}{V_{in}} \\ &= \frac{R_L}{R_L + pL} \\ &= \frac{1}{1 + pL/R_L} \end{aligned} \quad (2.4)$$

จะได้

$$H_{LP}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega L/R_L} \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.6 จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน และผลการตอบสนองทางความถี่ในทางอุดมคติและทางปฏิบัติจะแสดงดังในรูปที่ 2.6 (ข) และที่จุด  $\omega_c$  คือค่าจุดเปลี่ยนความถี่ (cut-off frequency) ของวงจรกรองความถี่ นั้น และในจุดนี้เมื่อพิจารณาที่จุด A โดยที่ A คือ ขนาดของ  $|H(j\omega)|$  จะพบว่า ที่จุด  $\omega_c$  ขนาดของ  $|H(j\omega)|$  จะมีค่าลดลง  $1/\sqrt{2}$  แล้วจะพบว่า

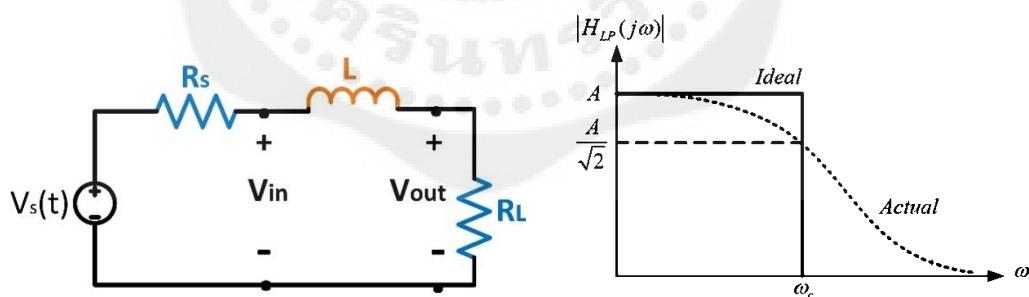
ที่จุดเปลี่ยนความถี่ จะมีค่าลดลง 3 - dB หรือ ขนาดกำลังไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.5) เมื่อ  $\omega \rightarrow 0$  จะทำให้  $A$  มีค่าเท่ากับ 1 และถ้า  $\omega \rightarrow \infty$  จะทำให้  $A$  มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่จึงมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = \frac{R_L}{L} \quad (2.6)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.5 แล้วจะได้

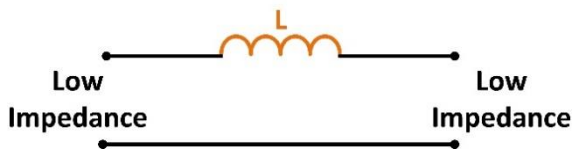
$$H(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega} \quad (2.7)$$

จะได้ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{2}$  ดังในรูปที่ 2.6 (ข)

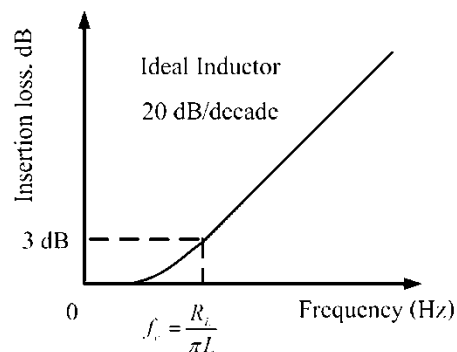


(ก) วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ  
วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ



(ค) การต่ออิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่าย สำหรับวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ



(ง) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณของ วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

**รูปที่ 2.6** คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 2.6 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.2) จะได้ ดังในสมการที่ (2.8)

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_s + Z_L} \right| \tag{2.8}$$

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่าถ้าค่าอินดักติฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 2.6 (ค) ในทางปฏิบัติ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านน่าจะใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง เพราะเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนสูงขึ้น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามความถี่ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดคงที่ จะทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนจะสูงขึ้น และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 20 dB/decade ดังในรูปที่ 2.6 (ง)

### 2.5.2 วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ (capacitor filter) หรือวงจรกรองความถี่สูงผ่าน คือวงจรที่ไม่ยอมให้สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน แต่จะให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และในรูปที่ 2.7 (ก) จะแสดงการต่อวงจรเพื่อหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน  $H(j\omega)$  ของแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าของวงจรกรองความถี่ ดังสมการที่ (2.9) และในการพิจารณานั้นจะพิจารณาเฉพาะขนาดของ  $|H(j\omega)|$  และ  $H_{HP}(j\omega)$  จะหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$H_{HP}(p) = \frac{R_L}{R_L + 1/j\omega C} \quad (2.9)$$

$$H_{HP}(j\omega) = \frac{j\omega R_L C}{1 + j\omega R_L C} \quad (2.10)$$

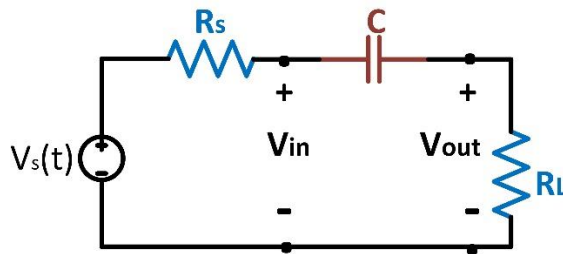
จากรูปที่ 2.7 จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน และผลการตอบสนองทางความถี่ในทางอุดมคติและทางปฏิบัติจะแสดงดังในรูปที่ 2.7 (ข) และที่จุด  $\omega_c$  คือค่าจุดเปลี่ยนความถี่ของวงจรกรองความถี่นั้น และ เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.10) เมื่อ  $\omega \rightarrow 0$  จะทำให้ มีค่าเท่ากับ 0 และถ้า  $\omega \rightarrow \infty$  จะทำให้  $|H_{HP}(j\omega)|$  มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1 ดังนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่จึงมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = \frac{1}{R_L C} \quad (2.11)$$

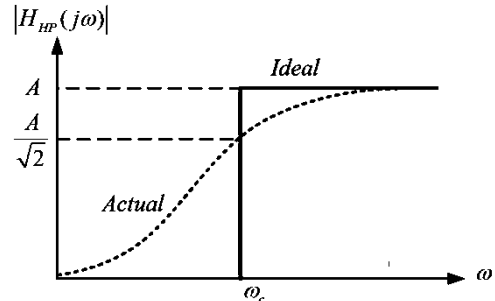
เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.10) แล้วจะได้

$$H_{HP}(j\omega) = \frac{j1}{1 + j1} \quad (2.12)$$

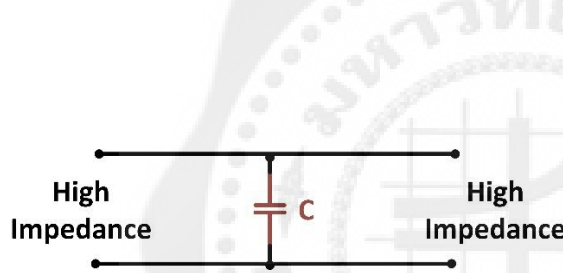
จะได้ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{2}$  ดังในรูปที่ 2.7 (ข) และที่จุด  $\omega_c$  จะมีค่าลดลง 3- dB หรือขนาดกำลังไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่งของแต่ละความถี่



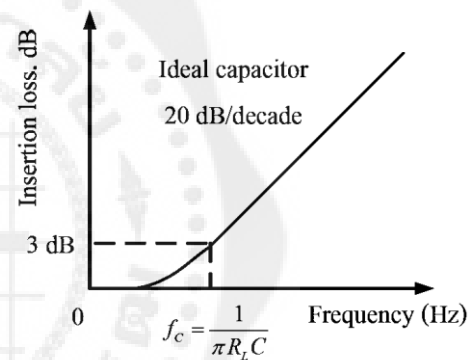
(ก) วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ



(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ



(ค) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่ตัวเก็บประจุ



(ง) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่ตัวเก็บประจุ

**รูปที่ 2.7** คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุนั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 2.7 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.2) จะได้ ดังในสมการที่ (2.13)

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_p}{Z_c} \right| \quad (2.13)$$

เมื่อ  $Z_p$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{Z_L \times Z_s}{Z_L + Z_s}$

จากสมการที่ (2.13) จะเห็นว่า ถ้าค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (capacitive reactance) มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูงขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 2.7 (ค)

ในทางปฏิบัติ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนสูงขึ้น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุลดลงตามความถี่ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดคงที่ จะทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนจะสูงขึ้น และวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 20 dB/decade ดังในรูปที่ 2.7 (ง)

### 2.5.3 วงจรกรองความถี่แบบ LC

วงจรกรองความถี่แบบ LC (LC filter) คือวงจรกรองความถี่ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุและสามารถต่อวงจรกรองความถี่แบบ LC ได้ดังในรูปที่ 2.8 (ก) โดยที่วงจรกรองความถี่แบบ LC จะเหมาะสำหรับความต้องการที่จะเพิ่มอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนให้มีความมากขึ้น และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าแตกต่างกัน และค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ LC สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 2.8 (ข) และจากรูปที่ 2.8 (ก) จะแสดงการต่อวงจรเพื่อหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน  $H(j\omega)$  ของแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าของวงจรกรองความถี่แบบ LC นั้นจะได้ดังสมการที่ (2.15) และ เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.15) เมื่อ  $\omega \rightarrow 0$

$$H(p) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ จะทำให้ } H_{HP}(j\omega) \text{ มีค่าเท่ากับ } 1 \text{ และถ้า } \omega \rightarrow \alpha \text{ จะทำให้ } |H(j\omega)| \text{ มีค่าเท่ากับ } 0$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าการตอบสนองต่อความถี่แล้วจะพบว่าวงจรกรองความถี่แบบ LC จะมีการตอบสนองต่อความถี่เหมือนกับวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

$$H(p) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.14)$$



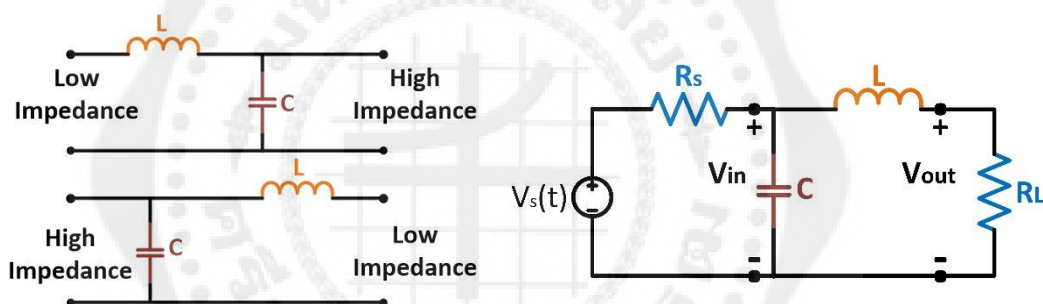
$$= \frac{RL \square 1 / j\omega C}{RL \square 1 / j\omega C + j\omega L}$$

$$= \frac{1}{LCj\omega^2 + j\omega L / R_L + 1}$$

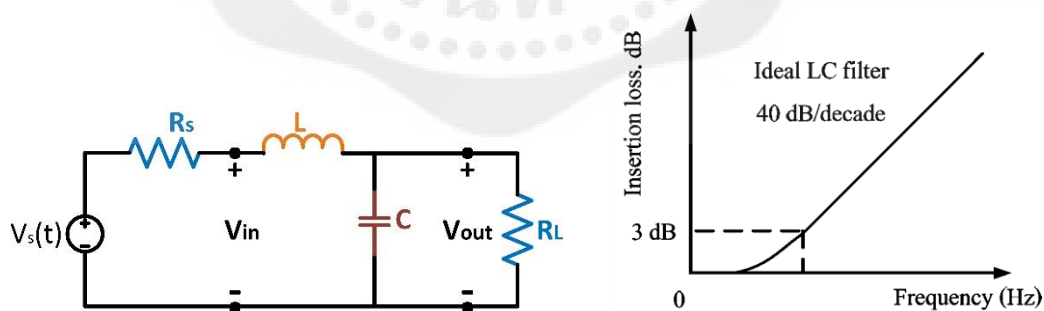
$$H(j\omega) = \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + \frac{j\omega L}{R_L}} \tag{2.15}$$

เมื่อพิจารณาที่จุดเปลี่ยนความถี่  $\omega_c$  จะได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2.16}$$



(ก) วงจรกรองความถี่แบบ LC ทั้ง 2 แบบ



(ข) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ LC

รูปที่ 2.8 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบ LC

ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูหนาว และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ LC นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 2.8 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.2) จะได้ ดังในสมการที่ (2.17) โดยจะกำหนดให้  $Z_s = Z_L = R_0$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{(1-d)^2 F^2}{2d} + F^4 \right| \quad (2.17)$$

เมื่อ  $d = L / (CR_0^2)$  คือ ค่า damping ratio

$$F = \frac{f}{f_0}$$

ในการพิจารณาค่า damping ratio ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

$$f_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi R_0 C} = \frac{\sqrt{2} R_0}{2\pi L} \quad \text{เมื่อ } d=1$$

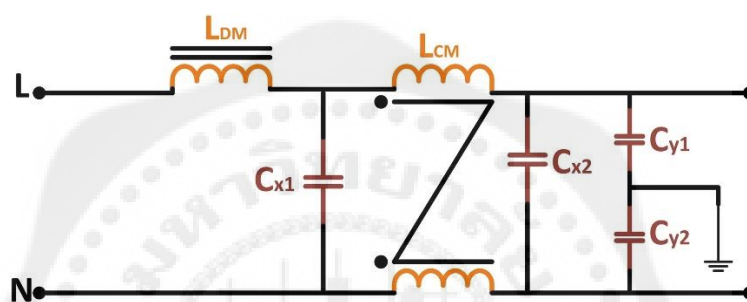
$$f_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \sqrt{LC}} \quad \text{เมื่อ } d \neq 1$$

จากรูปที่ 2.8 (ค) จะแสดงค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ LC โดยที่วงจรจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 40 dB/decade

## 2.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) คือ วงจรกรองที่ใช้สำหรับลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ หรืออุปกรณ์กำลังไฟฟ้า ในย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz และวงจรกรองสัญญาณรบกวน

แม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะการทำงานดังในรูปที่ 2.9 สำหรับโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีโครงสร้าง คือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-passfilter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีว (passive components) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างจะไม่เหมือนกัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะทิศทางการไหลของกระแสสัญญาณรบกวนของทั้งสองโหมดไม่เหมือนกันนั่นเอง



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า  
ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

รูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวน โหมดผลร่วมและโหมดผลต่างจะสามารถอธิบายโหมดการทำงาน ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.10 จะแสดงทิศทาง กระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

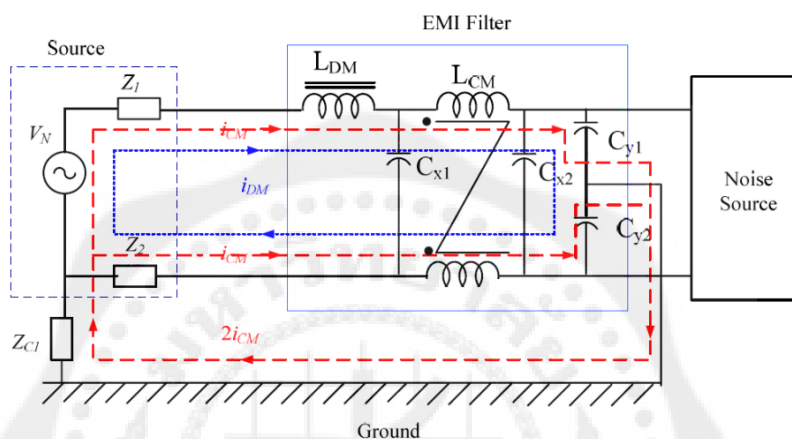
เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม (common mode current:  $i_{CM}$ ) ซึ่งกระแสไฟฟ้า โหมดผลร่วมจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนผ่าน ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (common mode inductance:  $L_{CM}$ ) และตัวเก็บประจุ  $C_y$  ของวงจรกรอง สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และผ่านตัวเก็บประจุแฝงลงกราวด์ดังในรูปที่ 2.11 และจากรูป เมื่อกระแสโหมดผลร่วมไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม ทั้งสายตัวนำและสายนิวทรัล จะมองเห็น ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม 1 ตัว ที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม จะมีผลในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง เพราะกระแสที่ไหลผ่าน ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ  $i = \frac{V}{Z}$  เมื่อ  $Z = XL = 2\pi fL$  และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้

ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  มีค่ามากขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านลดลง เพราะฉะนั้นจึงสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงได้ ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะเห็นว่ากระแสโมดผลรวมจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_y$  ทั้ง 2 ตัว ลงกราวน์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณากระแสโมดผลรวมจะมีองค์ประกอบ 2 ตัว ที่จะช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโมดผลรวม คือ ตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมและตัวเก็บประจุ  $C_y$

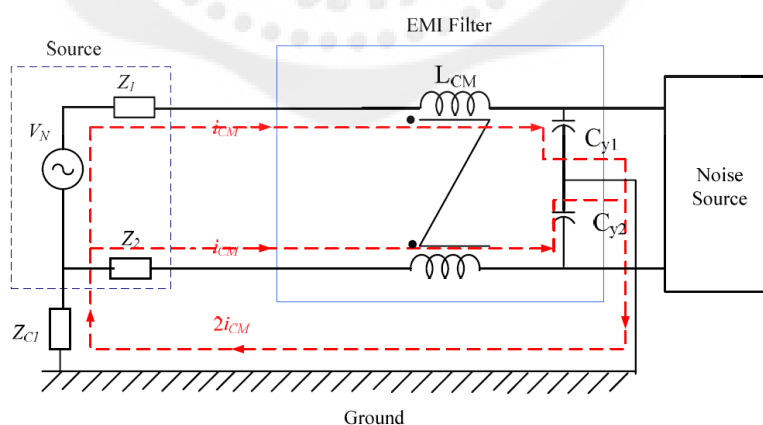
เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโมดผลต่าง (differential mode current:  $i_{DM}$ ) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโมดผลต่าง จะเป็นกระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายตัวนำของวงจรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านตัวเหนี่ยวนำโมดผลต่าง (differential mode:  $L_{DM}$ ) และตัวเก็บประจุ  $C_x$  แล้วไหลกลับครอบวงจรผ่านสายนิวทรัล โดยจะไม่ไหลผ่านกราวน์ดังในรูปที่ 2.12 และจากรูปจะเห็นว่ากระแสโมดผลต่างที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวม จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมเกิดการหักล้างกันทำให้ไม่มีผลของตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวม อย่างไรก็ตามที่ตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมนั้นก็ยังคงมีผลของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance:  $L_{leakage}$ ) ของตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวม อยู่ดังในรูปที่ 2.13 ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_x$  ทั้ง 2 ตัว และตัวเก็บประจุ  $C_y$  ทั้ง 2 ตัว ที่ต่ออนุกรมอยู่ จะมีผลเมื่อ พิจารณากระแสโมดผลต่างเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ  $i = \frac{V}{Z}$  เมื่อ  $\pi fC Z = XC = 1/2\pi fC$  ที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  มีค่ามากทำให้กระแสที่ไหลผ่านน้อยทำให้สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่ำได้ และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  มีค่าลดลงทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงได้

ตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมมีหน้าที่หลัก คือการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโมดผลรวมคือจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าโมดผลรวมไหลผ่าน อย่างไรก็ตามค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล  $L_{leakage}$  สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโมดผลต่างได้เช่นกัน เพราะตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวม เกิดจากการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันบนแกนเดียวกัน โดยถ้าการพันดังกล่าวพันแบบชิดติดกันก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าน้อย เป็นผลทำให้การกรองสัญญาณรบกวนโมดผลต่างได้น้อยเช่นกัน ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำร่วมจึงนิยมพันขดลวดแบบไม่ชิดติดกันเพื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลและลดผลของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด

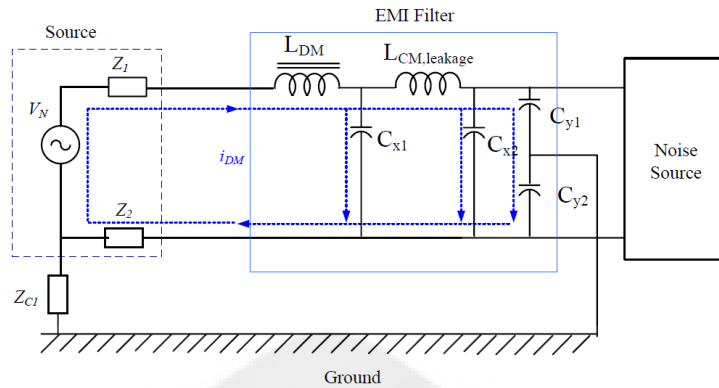
ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีแต่เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ จึงมีปัญหา เรื่องขนาด น้ำหนักและราคาที่ใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 ทิศทางกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มา:นายปฏิวัติ บุญมา (2550)



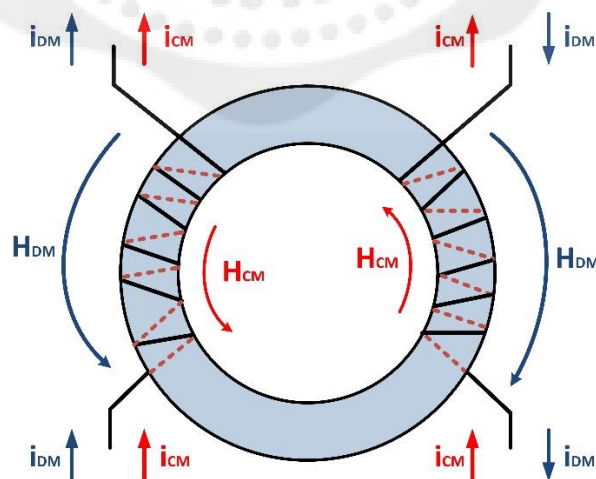
รูปที่ 2.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม ที่มา: นายปฏิวัติ บุญมา (2550)



รูปที่ 2.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง  
ที่มา: นายปฏิวัติ บุญมา (2550)

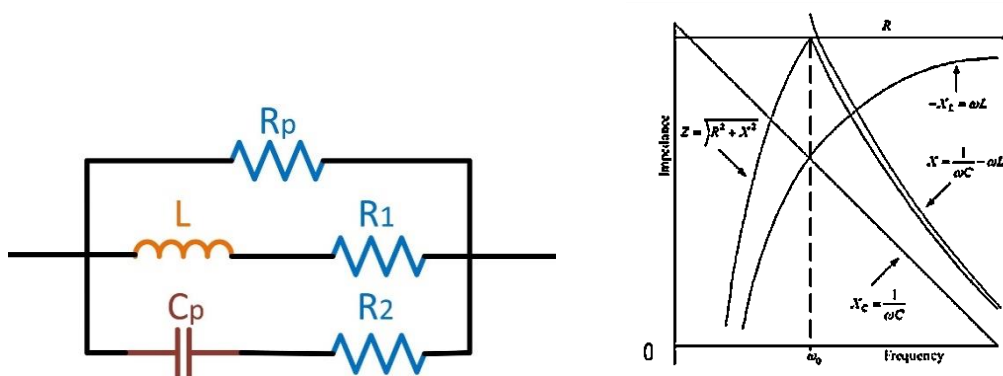
ในการอธิบายส่วนประกอบต่างๆ และคุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ตัวเก็บประจุ  $C_x$  และตัวเก็บประจุ  $C_y$  สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.6.1 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม



รูปที่ 2.13 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลรวมและกระแสโหมดผลต่าง

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (common mode choke) จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง และในทางปฏิบัติ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมจะมีค่าเหนี่ยวนำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง โดยการพันขดลวดตัวนำสองขด และจะต้องมีช่องว่างระหว่างขดลวดตัวนำ ก็เพื่อความปลอดภัยเพราะจะเป็นการแยกกันระหว่างสายตัวนำกับสายกราวด์ ดังในรูปที่ 2.13 จากรูปจะแสดงทิศทางของกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง รวมทั้งทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก จะเห็นว่าเมื่อโหมดผลร่วม  $H_{CM}$  จะมีทิศทางเสริมกัน แต่เมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กโหมดผลต่าง  $H_{DM}$  จะหักล้างกันดังรูปที่ 2.13 ในทางปฏิบัติ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ย่านความถี่สูงจะปรากฏพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นตัวนำประกบกันอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานของลวดที่นำมาพันเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเช่นกัน โดยแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติจะแสดงดังรูปที่ 2.14 (ก) และเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้นทำให้คุณสมบัติต่างๆของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไป โดยอิมพีแดนซ์ในทางอุดมคติจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความถี่ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 (ข) เมื่อ  $\omega_0$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและ  $C$  คือค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์นั้น จะมีผลของค่าตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะเป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

(ข) ผลของความถี่ที่มีต่ออิมพีแดนซ์

### รูปที่ 2.14 คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

#### 2.6.2 ตัวเก็บประจุ $C_y$

ตัวเก็บประจุ (Y Capacitor:  $C_y$ ) ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากเซรามิก (ceramic) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและค่าเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่สูง ในรูปที่ 2.15 จะแสดงตัวเก็บประจุ  $C_y$  ที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.15 ตัวเก็บประจุ  $C_y$  ที่ใช้จริง

ที่มา: นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554)

#### 2.6.3 ตัวเก็บประจุ $C_x$

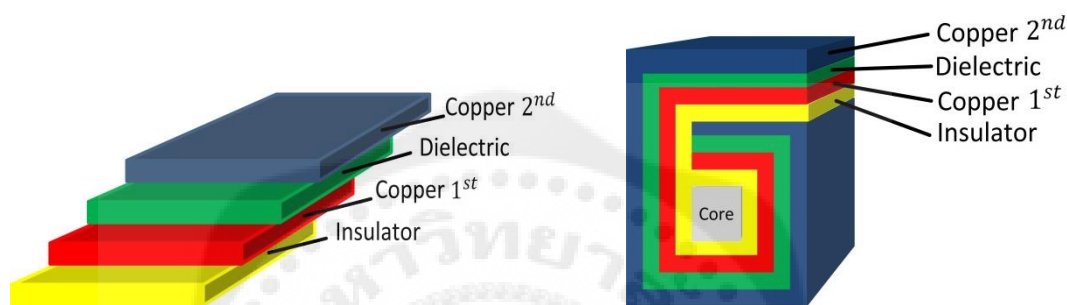
ตัวเก็บประจุ  $C_x$  ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากโพลีสตีรีน (polystyrene) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและค่าเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่จะมีค่าน้อยมากๆ

### 2.7 วิธีการผสมผสานตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer foils (FML foils)

การผสมผสานตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุ โดย FML Foils (Flexible multilayer) แนวคิดของการผสมผสาน FML foils (Flexible multilayer) แสดงในรูปที่ 2.16(ก) FML Foils



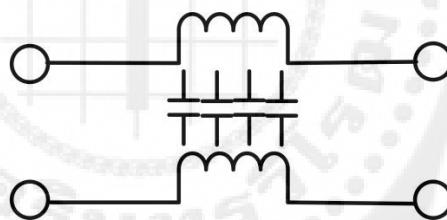
(Flexible multilayer) มี 4 ชั้นประกอบด้วยชั้นฉนวนไฟฟ้า, ชั้นทองแดง 2 ชั้น และชั้นฉนวนกันความร้อนเนื่องจาก FML Foils (Flexible multilayer) มีการปรับตัวเข้ากับสถานการณ์และง่ายต่อการโค้งงอ การผสมผสานอุปกรณ์พาสซีฟโดย FML Foils (Flexible multilayer) จะได้รับ การพันกระดาศฟอยล์รอบแกนแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)



(ก) องค์ประกอบชั้นของ FML Foils

(ข) การพันรอบแกนเหล็ก

(Flexible Multilayer Foils)



(ค) การรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.16 การรวมอุปกรณ์พาสซีฟ โดย FML Foils (Flexible Multilayer Foils)

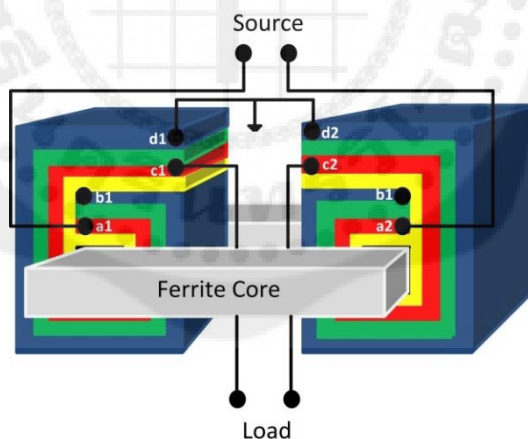
ถ้ากระแสไหลผ่านไปที่ชั้นทองแดง สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบชั้นทองแดงและสนามแม่เหล็กที่ซึมผ่านแกนเหล็กมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ ถ้าแรงดันที่ถูกลำไปใช้ระหว่างสองชั้นของชั้นทองแดงของ FML Foils (Flexible Multilayer Foils) ชั้นฉนวนไฟฟ้าจะสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในระหว่างชั้นทองแดงเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ ถ้าใช้โครงสร้างดังกล่าวเมื่อมี

กระแสไหลผ่าน ชั้นทองแดงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกันจึงเกิดคุณสมบัติทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุพร้อมกัน

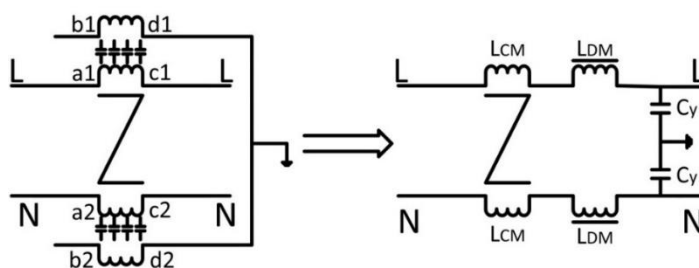
ดังนั้นการรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดย FML Foils (Flexible Multilayer Foils) จะแสดงดังรูปที่ 2.16 (ค)

## 2.8 โครงสร้างการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils (FML foils)

มีการจ่ายแรงดันให้ชั้นทองแดงชั้นแรกที่จุด a1-a2 ต่อโหลดที่ชั้นทองแดงชั้นแรกที่จุด c1-c2 และต่อจุดกราวด์เข้าที่ชั้นทองแดงชั้นที่สองที่จุด d1-d2 โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อคล้ายกันทั้งสองฝั่ง โดยที่ตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างเกิดจากชั้นทองแดง a1-c1, a2-c2 และตัวเก็บประจุโหมคผลร่วมเกิดจากชั้นทองแดง c1 กับ ชั้นทองแดง d1 และชั้นทองแดง c2 กับ d2 ทั้งสองฝั่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ โครงสร้างวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 โครงสร้างการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils



**รูปที่ 2.18** วงจรสมมูลของโครงสร้างการต่อวงจรทองสัญญาณบนกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer Foils สามารถออกแบบวงจรทองสัญญาณบนกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ Flexible Multilayer foils โดยการเลือกค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการได้ โดยหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ดังสมการต่อไปนี้

สมการตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วม

$$L_{CM} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot n^2 \cdot A_e}{l_e} \quad (2.19)$$

โดย  $\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ  
 $\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนเหล็ก  
 $n$  คือ จำนวนรอบ  
 $A_e$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก  
 $l_e$  คือ ความยาวของแกนเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำโมดผลต่างเกิดจากสนามแม่เหล็กรั่วไหล ดังนั้นเราสามารถหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กรั่วไหล จากสมการดังต่อไปนี้

สมการตัวเก็บประจุโมดผลร่วม

โดย

$$C_{CM} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l \cdot w}{d_\epsilon} \quad (2.20)$$

เมื่อ	$C_{CM}$	คือ ค่าความจุโมดผลรวม
	$\epsilon_0$	คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ
	$\epsilon_r$	คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของฉนวนไฟฟ้า
	$l$	คือ ความยาวของตัวนำ
	$w$	คือ ความกว้างของตัวนำ
	$d_\epsilon$	คือ ระยะห่างของชั้นฉนวนไฟฟ้า

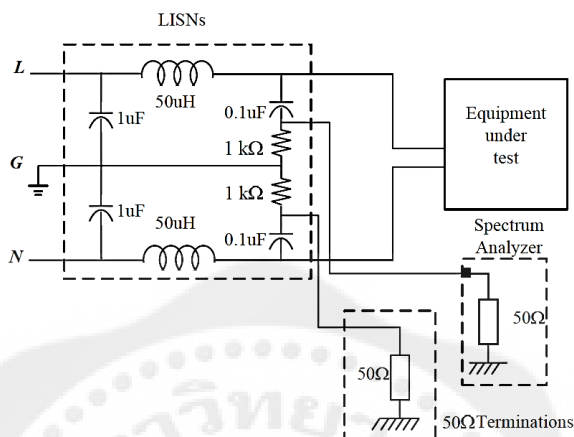
## 2.9 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

### 2.9.1 วิธีการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการวัดและการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ พร้อมกับการใช้งานของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) ดังในรูปที่ 2.19 จะแสดงการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN พร้อมกับการใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer) และหน้าที่หลักของ LISN มีอยู่ 3 ด้าน คือ 1.) กำหนดค่าอิมพีแดนซ์มาตรฐาน  $50 \Omega$  ที่ความถี่สูงสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ EUT (equipment under test) 2.) ส่งผ่านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำไปยังผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ 3.) กำจัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า อื่นๆ ที่ไม่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังในรูปที่ 2.19 และจากรูปจะแสดงวิธีการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ spectrum analyzer และแสดงการต่อตัวความต้านทาน  $50 \Omega$  termination เพื่อที่จะรักษาอิมพีแดนซ์ระหว่างสายนิวตรอนกับกราวด์ให้คงที่ที่  $50 \Omega$

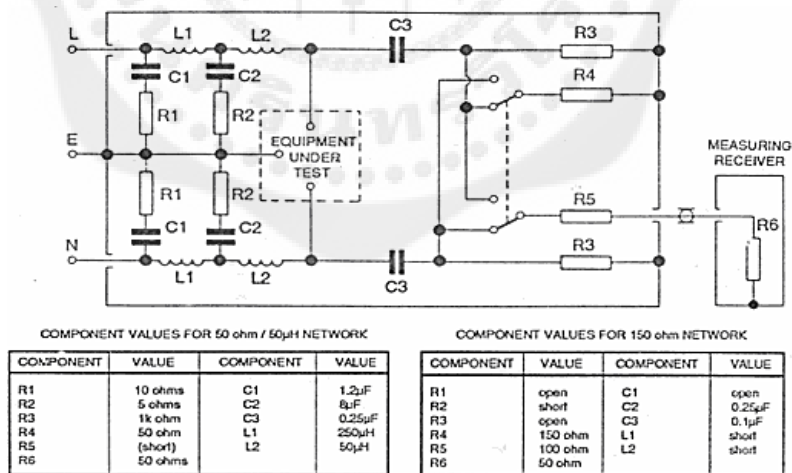
จากรูปที่ 2.20 จะแสดงวงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR กำหนดและแสดงค่าส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในวงจรของ LISN โดยจะใช้งานในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz และจากรูปความต้านทาน  $R_6$  ที่ต่ออยู่จะเป็นของเครื่องวัดสเปกตรัม หรือ measuring receiver พร้อมกับแสดงจุดต่อไปยังผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ และจากรูปที่ 2.21 จะแสดงกราฟ

ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN และในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz จะมีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $50 \Omega$  และมีค่าผิดพลาด  $\pm 20 \%$



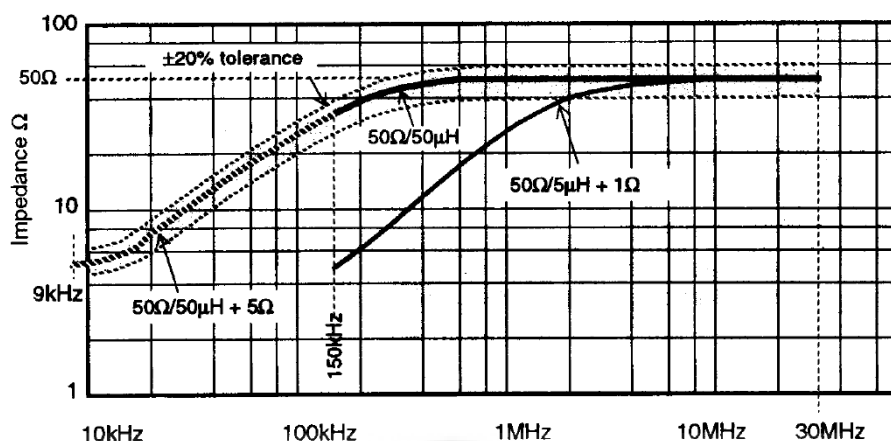
รูปที่ 2.19 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN

ที่มา: [https://cdn.fsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627\\_81489](https://cdn.fsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627_81489)



รูปที่ 2.20 วงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR

ที่มา: [https://cdn.fsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627\\_81489](https://cdn.fsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627_81489)



รูปที่ 2.21 อิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR

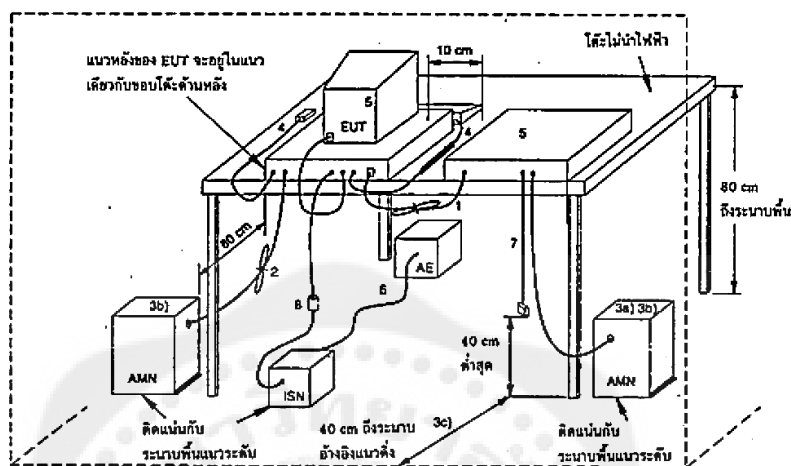
ที่มา: [https://cdn.fbssbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627\\_81489](https://cdn.fbssbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627_81489)

การจัดวางอุปกรณ์ (ตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ข้อ 8.4) ในการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้นจำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้เป็นไปตาม มาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ข้อ 8.4 ที่ว่าด้วยเรื่องการจัดวางอุปกรณ์

สำหรับระนาบพื้น สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนนั้นตามมาตรฐานมอก. 1956-2542 ได้กำหนดไว้ดังนี้คือวางอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) ซึ่งประสงค์ให้ใช้งานบนโต๊ะ 0.4 เมตร ห่างจากระนาบอ้างอิงโลหะในแนวตั้งที่มีขนาดอย่างน้อย 2 เมตร × 2 เมตร และต้องรักษาระยะอย่างน้อย 0.8 เมตร จากพื้นผิวโลหะอื่นๆ หรือระนาบพื้นอื่นที่ไม่ได้เป็นส่วนของEUTอุปกรณ์ทดสอบตั้งพื้นต้องวางบนระนาบพื้นโลหะในแนวระดับ จุดสัมผัสต้องสอดคล้องกับการใช้งานตามปกติ แต่ต้องไม่สัมผัสทางโลหะกับระนาบพื้น อาจแทนพื้นโลหะด้วยระนาบพื้นอ้างอิง ระนาบพื้นอ้างอิงต้องยื่นพื้นเส้นขอบของ EUT อย่างน้อย 0.5 เมตร และต้องมีขนาดอย่างน้อย 2 เมตร × 2 เมตร และจุดอ้างอิงของ LISN ต้องต่อเข้ากับระนาบพื้นอ้างอิงด้วยตัวนำที่สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

โครงสร้างทดสอบ (ตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542) อุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับการทำงานทั้งที่วางบนโต๊ะหรือวางบนพื้น โดยถ้าอุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับติดตั้งต้องทดสอบในลักษณะเหมือนแบบวางบนโต๊ะ และการหันเหทิศทางของอุปกรณ์ต้องสอดคล้อง

กับการใช้งานตามปกติ โดยการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบจะเป็นไปตามขั้นตอนดังต่อไปนี้  
 ดังแสดงในรูป(2.22)



รูปที่ 2.22 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ)

ที่มา: [https://cdn.fbsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627\\_81489](https://cdn.fbsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627_81489)

เมื่อ AE คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง  
 EUT คือ อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ  
 ISN (LISN) คือ โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้นโลหะแนวระดับในระยะต่ำกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถทำให้สั้นลงเพื่อให้มีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินต้องม้วนทบให้เป็นมัด ด้านความยาวจะมีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร

2. สายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานที่ยาวเกินต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่กลางสายหรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวเหมาะสม

3. ให้ต่อ EUT เข้ากับ AMN เครื่องหนึ่ง AMN และ LISN ทุกเครื่องอาจเลือกติดตั้งกับระนาบอ้างอิงแนวตั้ง หรือผนังโลหะ

(ก) หน่วยอื่นทั้งหมดของระบบได้รับกำลังไฟฟ้าจาก AMN เครื่องที่ 2 อาจใช้เต้ารับชุดสำหรับสายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานหลายเส้น

(ข) AMN และ LISN ห่างจาก EUT 80 เซนติเมตร และห่างจากหน่วยอื่นและระนาบโลหะอื่นอย่างน้อย 80 เซนติเมตร

(ค) ต้องจัดตำแหน่งสายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานและสายเคเบิลสัญญาณตลอดความยาวของสายเท่าที่จะทำได้ ที่ระยะ 40 เซนติเมตร ห่างจากระนาบอ้างอิงแนวตั้ง

4. สายเคเบิลของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยมือ เช่น แผงแป้นอักขระ เมาส์ ฯลฯ ต้องวางในลักษณะใช้งานปกติ

5. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากเครื่องอื่นๆ และจากตัวควบคุมยกเว้นจอภาพซึ่งถ้ายอมรับได้ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการติดตั้งก็ให้วางบนตัวควบคุมโดยตรง

6. สายเคเบิลสัญญาณเข้า/ออกซึ่งมีไว้สำหรับการต่อภายนอก

7. ปลายของสายเคเบิลสัญญาณเข้า/ออกซึ่งไม่ได้ต่อเข้ากับ AE อาจสิ้นสุดวงจรลงถ้าต้องการ โดยใช้อิมพีแดนซ์สิ้นสุดวงจรที่ถูกต้อง

8. ถ้าใช้โพรบกระแส ต้องวางอยู่ที่ระยะ 0.1 เมตรจาก LISN



### บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบ

### 3.1 บทนำ

การรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยใช้แผ่นทองแดงและแกนเหล็ก UP นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อให้จะได้ชิ้นงานที่ดีและมีคุณภาพในการใช้งานเมื่อเทียบกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมดั้งเดิม ดังนั้นจึงนำทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้มาใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 3.1.1 การเลือกขนาดของแผ่นทองแดงและขดลวดทองแดง

การออกแบบขนาดของแผ่นทองแดงและการเลือกขดลวดทองแดงนั้นในที่นี้จำเป็นต้องอ้างอิงจากขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในพาวเวอร์ซัพพลายโดยมีกำลังไฟฟ้า 350 W, ความถี่ 50 Hz, แรงดันไฟฟ้า 230 V และกระแสไฟฟ้า 4 A

ในที่นี้จะเผื่อพิคัดกระแสไฟฟ้าที่ 50 % จะได้  $4 \times 1.5 = 6 \text{ A}$  ซึ่งจะเลือกใช้ขดลวดทองแดงมาตรฐาน S.W.G เบอร์ 16 ซึ่งมีพิคัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6.945 A และมีพื้นที่หน้าตัด 2.01 ตารางมิลลิเมตร

ในการออกแบบแผ่นทองแดงที่สามารถทนพิคัดกระแสได้เท่ากับ 6 A นั้นจะต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของขดลวด เพื่อให้ได้พิคัดกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน เราสามารถออกแบบพื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดงโดยใช้สมการ

$$\begin{aligned}\text{พื้นที่หน้าตัดแผ่นทองแดง} &= \text{ความหนาของแผ่นทองแดง} \times \text{ความกว้างของแผ่นทองแดง} \\ &= 0.106\text{mm} \times 19\text{mm} \\ &= 2.01\text{mm}^2\end{aligned}$$

## 3.1.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r AN^2}{l} \quad (3.1)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (*henry* :  $H$ )  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (*turn* : รอบ)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก ( $m^2$ )  
 $l$  คือ เส้นทางการเดินแม่เหล็ก ( $m$ )  
 $\mu_0$  คือ ความซึมซาบได้ที่สุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} H/m$   
 $\mu_r$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

## 3.1.3 การหาจำนวนรอบในการพันขดลวด

$$N = \sqrt{\frac{Ll}{\mu_0 \mu_r A}} \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (*henry* :  $H$ )  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (*turn* : รอบ)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก ( $m^2$ )  
 $l$  คือ เส้นทางการเดินแม่เหล็ก ( $m$ )  
 $\mu_0$  คือ ความซึมซาบได้ที่สุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} H/m$   
 $\mu_r$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

### 3.1.4 การหาค่าความจุไฟฟ้า

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l w}{d} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Farad :  $F$ )

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} F/m$

$\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์

$l$  คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $m$ )

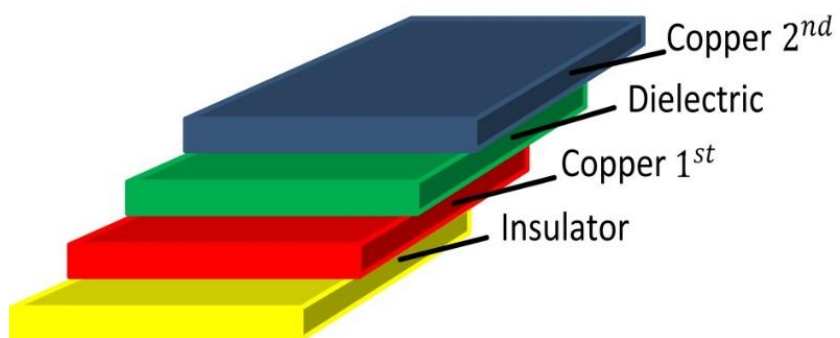
$w$  คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $m$ )

$d$  คือ ความหนาของฉนวนไฟฟ้า ( $m$ )

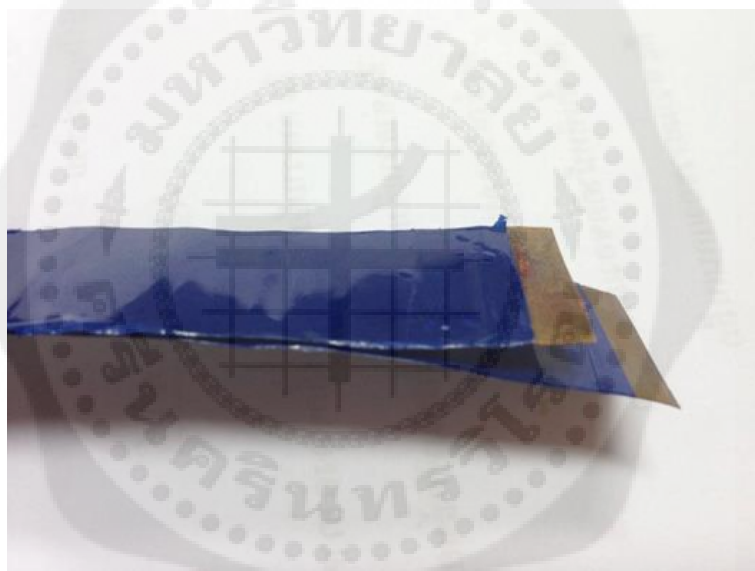
ในโครงการนี้ได้ใช้แกนเฟอร์ไรต์ EI-55 ตัดแกนกลางออกให้เป็นรูปตัว U และได้ทำการแบ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 2 แบบ โดยใช้แผ่นทองแดงและขดลวดทองแดงที่มีชื่อเรียกววงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 แบบดังนี้เพื่อง่ายต่อการศึกษาและการเปรียบเทียบการทดลอง

### 3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils (Integrated CM Choke and Cy using FML Foils )

วงจกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้แนวคิดการผสมผสาน FML foils (Flexible multilayer) ที่มีจำนวน 4 ชั้น ประกอบด้วยชั้นฉนวนกันความร้อน ตัวนำไฟฟ้าที่เป็นแผ่นทองแดง 2 ชั้น และชั้นฉนวนไฟฟ้า โดยรูปชั้นของ FML Foil จะแสดงดังรูปที่ 3.1 รูปของ FML Foil ที่ถูกออกแบบ จะแสดงดังรูปที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบมีดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชั้นของ FML Foils

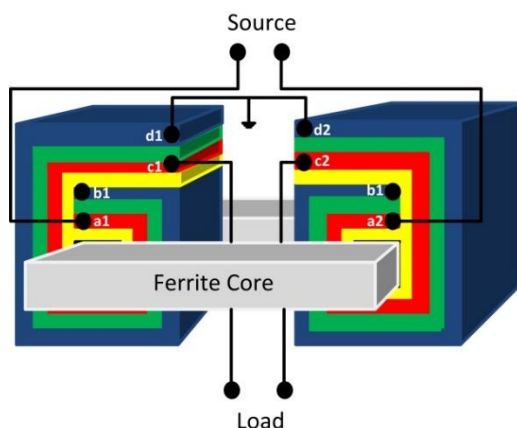


รูปที่ 3.2 รูปของ FML Foils ที่ถูกออกแบบ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	หน่วย
แกนเฟรไรต์	UU-55
ชนิดของฉนวน	Polypropylene
ความหนาของแผ่นทองแดง	0.11 mm
ความกว้างของแผ่นทองแดง	19 mm
ความยาวของแผ่นทองแดง	1 m
ความหนาของฉนวนไฟฟ้า	0.05 mm
ความหนาของฉนวนกันความร้อน	0.1 mm
จำนวนรอบ	13 รอบ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils ลักษณะการพันจะพันฟลอย์ที่ถูกออกแบบจากด้านนอกของแกนเข้ามาด้านในของแกนทั้งสองด้าน จำนวน 13 รอบ โดยพันทั้งสองด้าน และรูปแบบการต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils จะแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยกำหนดให้  $a_1$  และ  $a_2$  แทนชั้นแผ่นตัวนำชั้นแรกที่อยู่ด้านในสุด  $b_1$  และ  $b_2$  แทนชั้นแผ่นตัวนำชั้นที่สองที่อยู่ด้านในสุด  $c_1$  และ  $c_2$  แทนชั้นแผ่นตัวนำชั้นแรกที่อยู่ด้านนอกสุด  $d_1$  และ  $d_2$  แทนชั้นแผ่นตัวนำชั้นที่สองที่อยู่ด้านนอกสุด

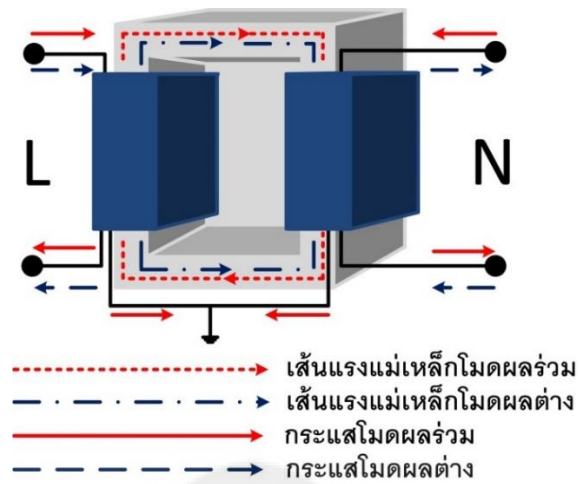


**รูปที่ 3.3** การต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุ โดยใช้ FML Foils

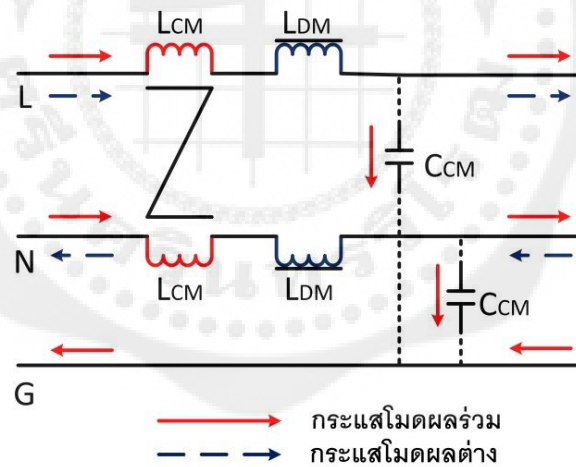
โดยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foil ที่ได้ออกแบบมีค่าความเหนี่ยวนำในโหมดผลรวมที่ได้เท่ากับ 0.12 mH และค่าความจุไฟฟ้าในโหมดผลรวมที่ได้เท่ากับ 10 nF โดยรูปต้นแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils แสดงดังรูปที่ 3.4 วงจรต่อเส้นทางเส้นแรงแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.5 และมีวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.6



**รูปที่ 3.4** ต้นแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุ โดยใช้ FML Foils



รูปที่ 3.5 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils

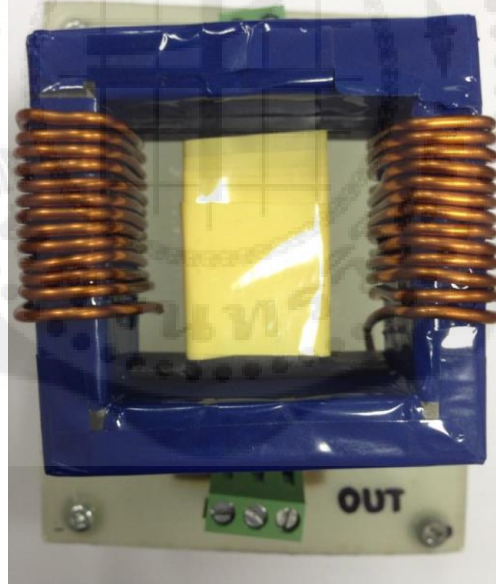


รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลเส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML Foils

### 3.3 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิม (Conventional EMI Filters - Common Mode Choke)

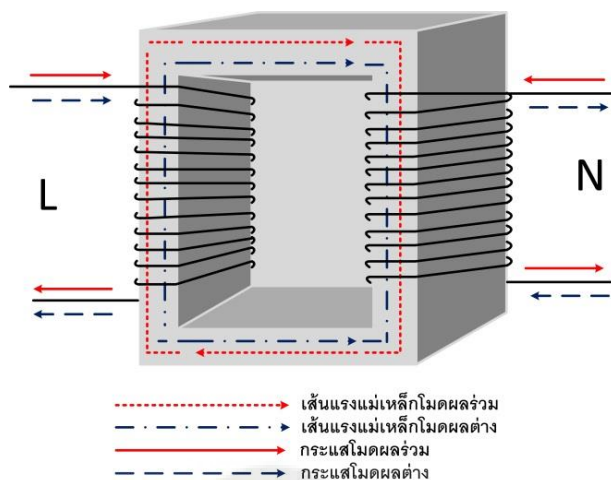
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบดั้งเดิมจะมีการพันขดลวดทองแดงเบอร์ 16 ตามมาตรฐาน S.W.G 2 ชุดบนแกนเฟอร์ไรต์ BU-55 ในที่นี้ได้มีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิมออกเป็น 4 รูปแบบเพื่อง่ายต่อการศึกษาดังนี้คือ

3.3.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ (Conventional CM Choke with  $N=13$ turns)

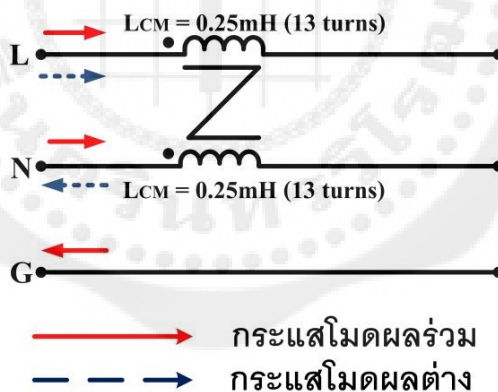


รูปที่ 3.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ



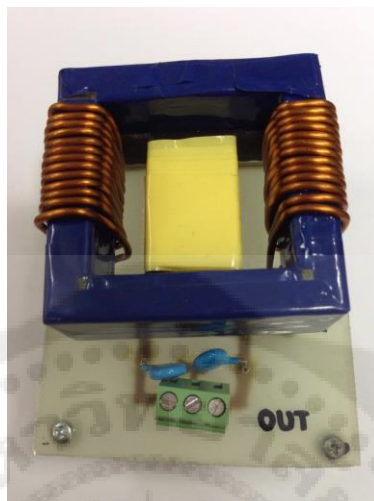


รูปที่ 3.8 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ

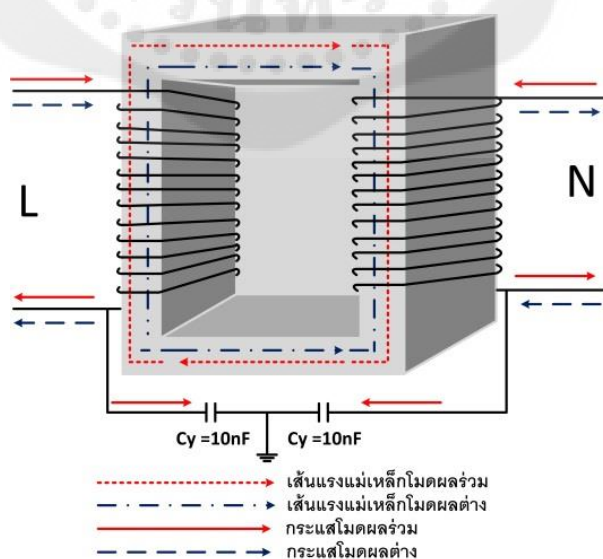


รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ

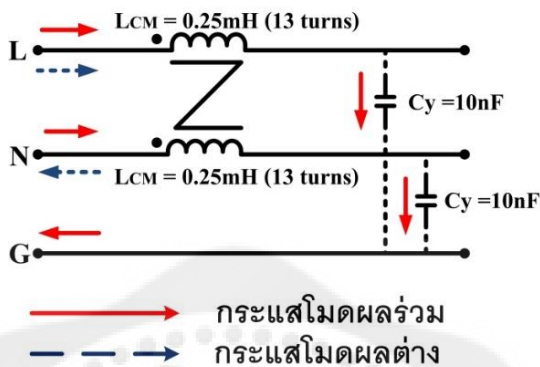
3.3.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโมดผลร่วมเท่ากับ 10 nF (Conventional CM Choke with  $N = 13$  turns and  $C_y = 10$  nF)



รูปที่ 3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าเท่ากับ 10 nF



**รูปที่ 3.11** เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าเท่ากับ 10 nF

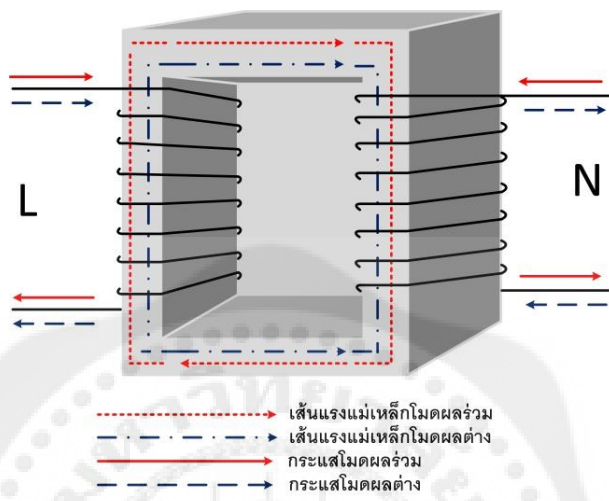


**รูปที่ 3.12** วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าโมดผลร่วมเท่ากับ 10 nF

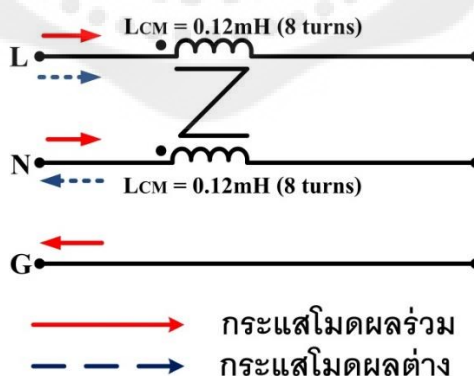
3.3.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ 0.12 mH (Conventional CM Choke with  $L=0.12\text{mH}$ )



รูปที่ 3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลรวมเท่ากับ  $0.12\text{ mH}$



รูปที่ 3.14 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลรวมเท่ากับ  $0.12\text{ mH}$

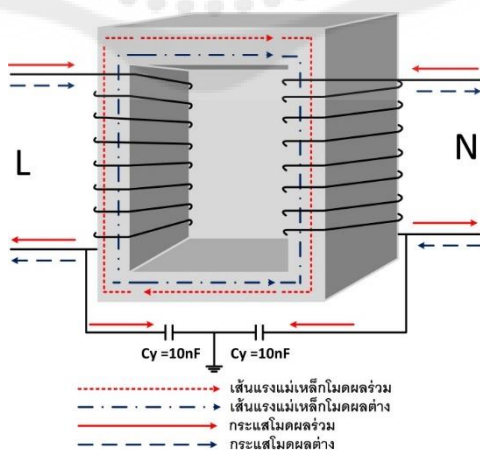


รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลรวมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลรวมเท่ากับ  $0.12\text{ mH}$

3.3.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ  $0.12 \text{ mH}$  และมีตัวเก็บประจุในโมดผลร่วมเท่ากับ  $10 \text{ nF}$  (Conventional CM Choke with  $L=0.12\text{mH}$  and  $Cy=10\text{nF}$ )

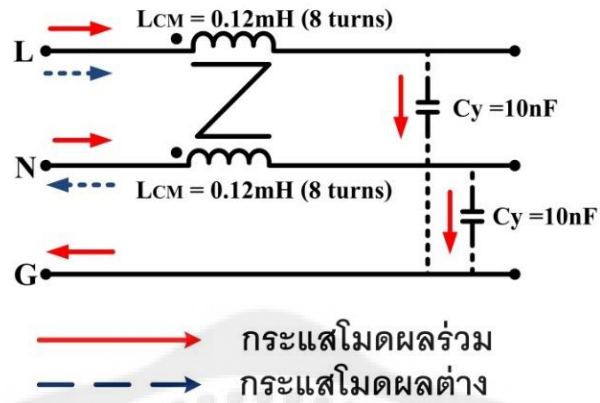


รูปที่ 3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ  $0.12 \text{ mH}$  และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ  $10 \text{ nF}$



รูปที่ 3.17 เส้นทางกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำโมดผลร่วมเท่ากับ  $0.12\text{ mH}$  และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ  $10\text{ nF}$



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $0.12\text{ mH}$  และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ  $10\text{ nF}$

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ซึ่งจะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ โดยจะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวน 4 แบบ คือ แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ ) แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ ) แรงดันไฟฟ้าที่ไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ ) และแรงดันไฟฟ้านิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ ) แล้วนำค่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้มาเปรียบเทียบผลการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ใส่วงจรกรอง โดยผลการลดทอนดังกล่าวจะเป็นค่าอ้างอิงกับค่าสัญญาณรบกวนขณะใส่วงจรกรองในรูปแบบต่างๆในโหมดเดียวกัน

โดยจะสรุปผลการเปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่าง ๆ จากกราฟ คือ

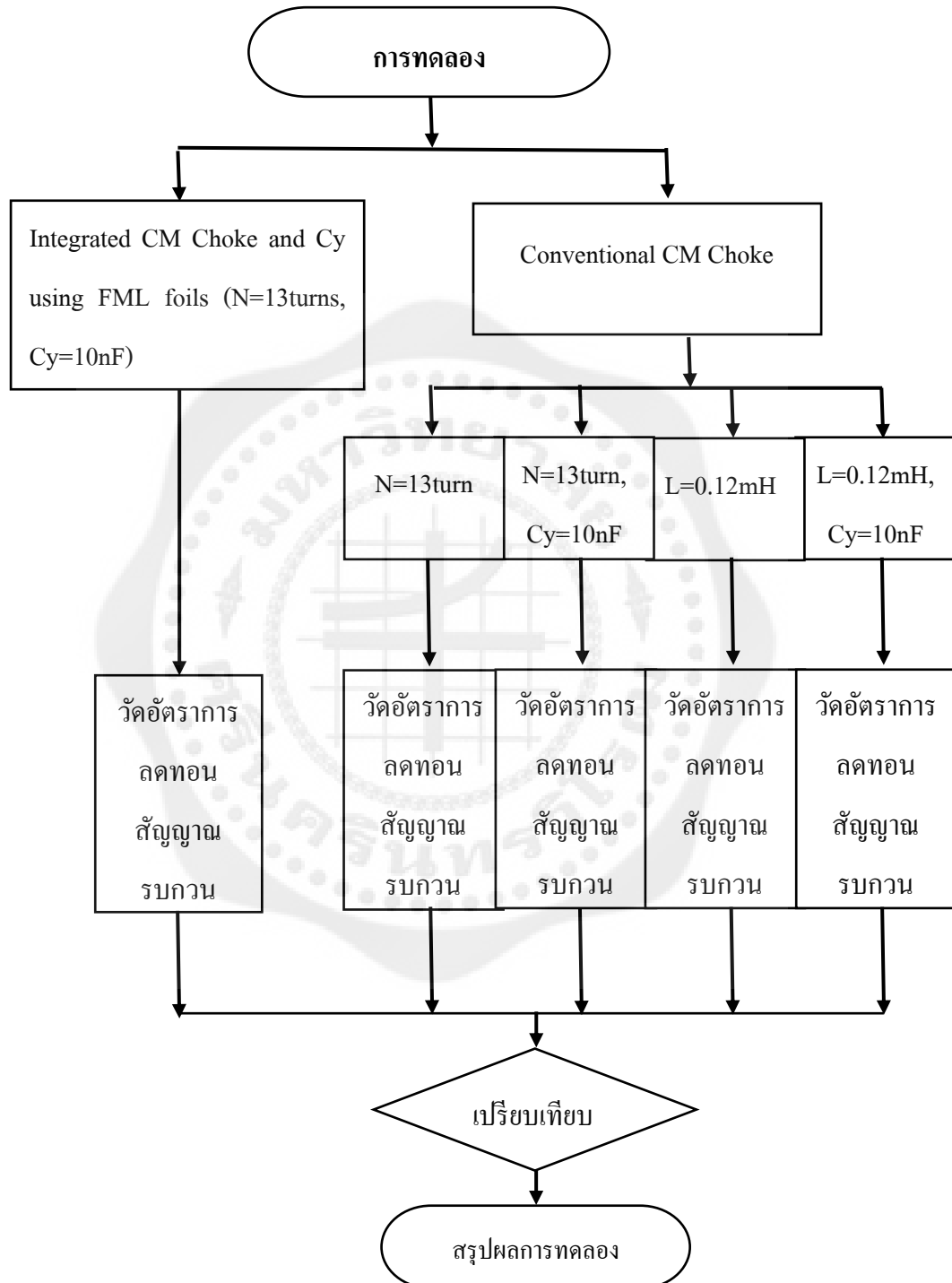
1. การเปรียบเทียบระหว่างค่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ ), ในโหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ ), ที่นิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ ) และที่ไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ ) ที่ไม่ได้ใส่ตัวกรองกับตัวกรองแบบรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils (Integrated CM Choke and Cy using FML Foils)

2. การเปรียบเทียบระหว่างค่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ ), ในโหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ ), ที่นิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ ) และที่ไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ ) ที่ไม่ได้ใส่ตัวกรองกับตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิม (Conventional Common - Mode Choke) โดยแบ่งออกเป็น 4 แบบ

- 2.1 แบบค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12 mH และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 nF
- 2.2 แบบค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12 mH
- 2.3 แบบจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 nF
- 2.4 แบบจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ

3. การเปรียบเทียบระหว่างค่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ ), ในโหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ ), ที่นิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ ) และที่ไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ ) ที่ไม่ได้ใส่ตัวกรอง, ตัวกรองแบบรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils (Integrated CM Choke and Cy using FML Foils) และตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบดั้งเดิม (Conventional Common - Mode Choke)

#### 4.1 การทดลองการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองของแต่ละรูปแบบ



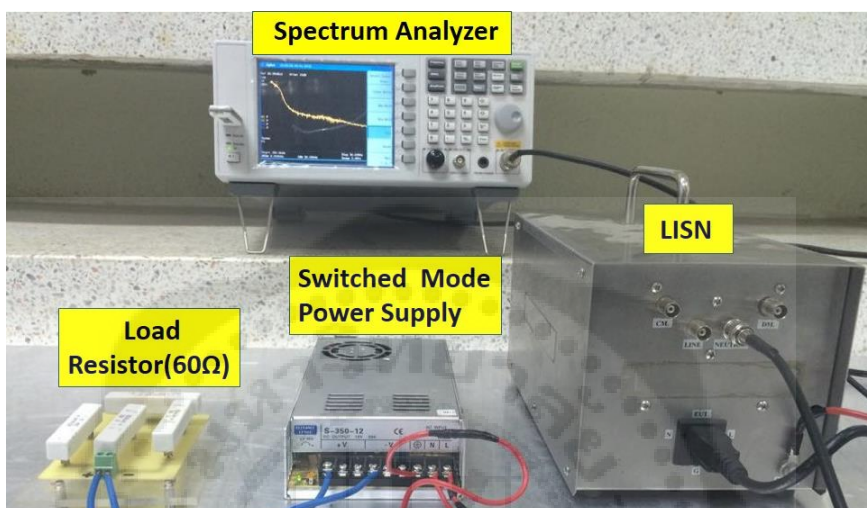
รูปที่ 4.1 แผนผังการทดลอง



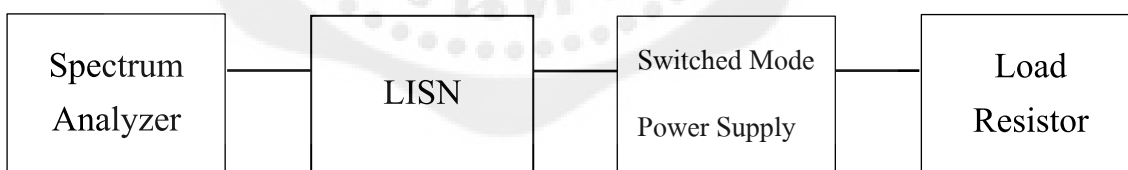
## 4.2 การทดลอง

ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองของ EMI filter จากทฤษฎีบทที่ 3 จะได้ผลการทดลองดังนี้

### 4.2.1 การทดลองโดยไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อวงจรแบบไม่ใส่วงจรกรอง



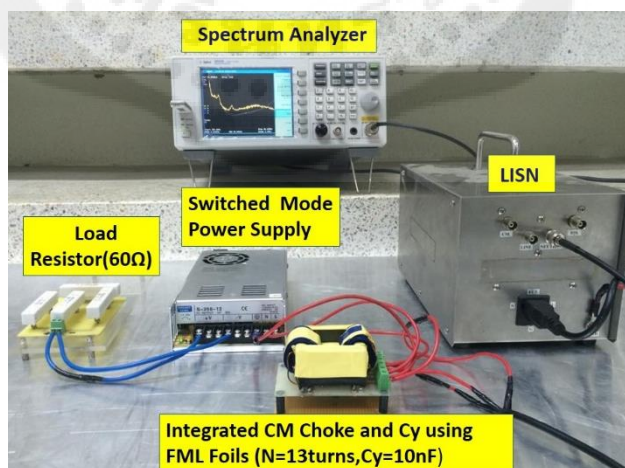
รูปที่ 4.3 แสดง Block Diagram ของการต่อวงจรแบบไม่ใส่วงจรกรอง

#### 4.2.2 การทดลองโดยใช้วงจรกรงรูปแบบที่ 1

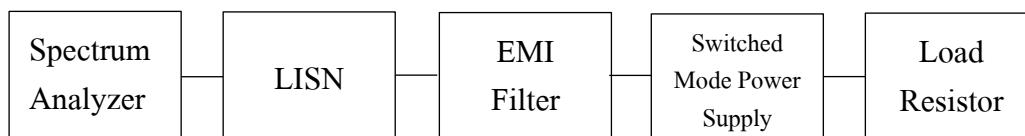
วงจรกรงรูปแบบที่ 1 คือ แบบการรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils มีจำนวนการพันฟล้อยู่เท่ากับ 13 รอบ ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12 mH และค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 10 nF (Integrated CM Choke and Cy using FML Foils (N=13turns, $L_{CM}=0.12$  mH , $C_y=10$ nF))



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรกรงรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.5 แสดงการต่อวงจรแบบใช้วงจรกรงรูปแบบที่ 1

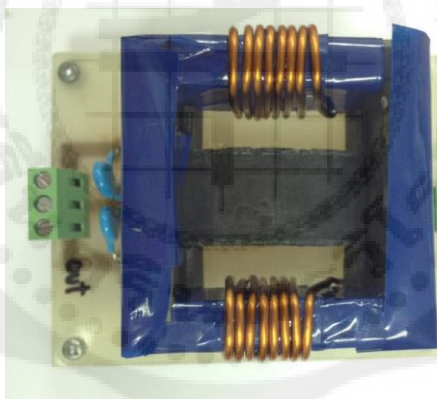


รูปที่ 4.6 แสดง Block diagram ของการต่อวงจรโดยใช้วงจรกรองแบบที่ 1

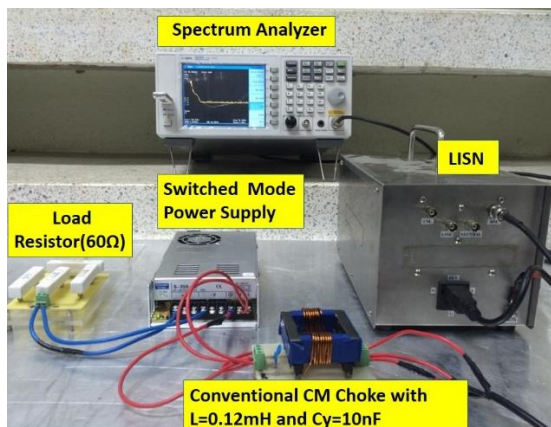
#### 4.2.3 การทดลองโดยใช้วงจรกรองแบบที่ 2

วงจรกรองแบบที่ 2 คือ วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมแบบดั้งเดิม (Conventional EMI Filters – Common Mode Choke) แบ่งออกเป็น 4 แบบ

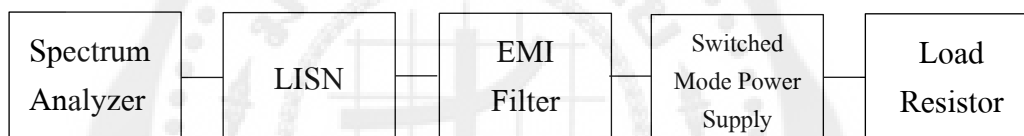
4.2.3.1 วงจรกรองแบบ 2A คือ แบบมีค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12 mH และมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 nF



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรกรองแบบ 2A

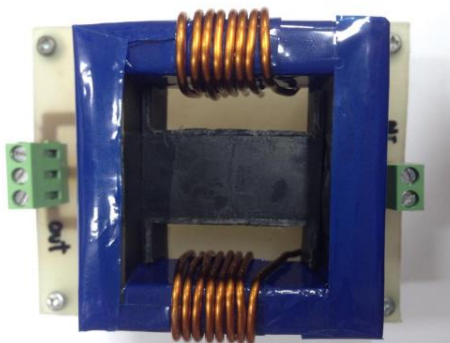


รูปที่ 4.8 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรองรูปแบบ 2A

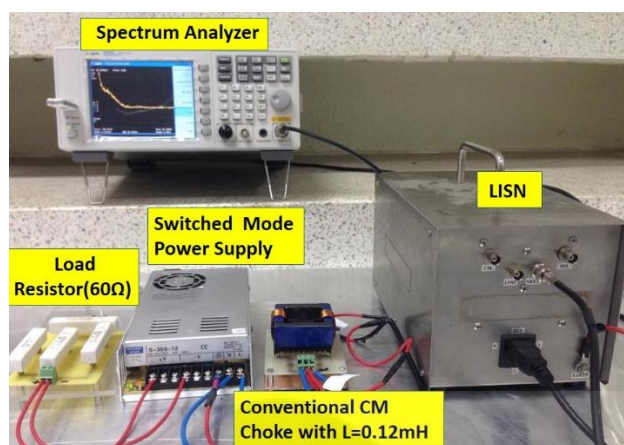


รูปที่ 4.9 แสดง Block diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรองรูปแบบ 2A

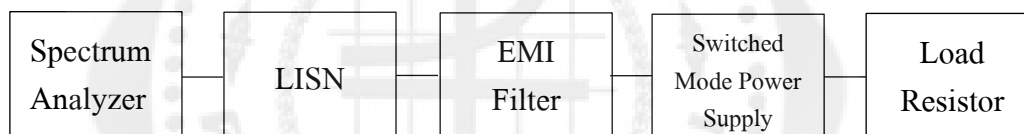
4.3.2.2 วงจรกรองรูปแบบ 2B คือแบบค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.12 mH



รูปที่ 4.10 แสดงวงจรกรงรูปแบบ 2B



รูปที่ 4.11 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรงรูปแบบ 2B

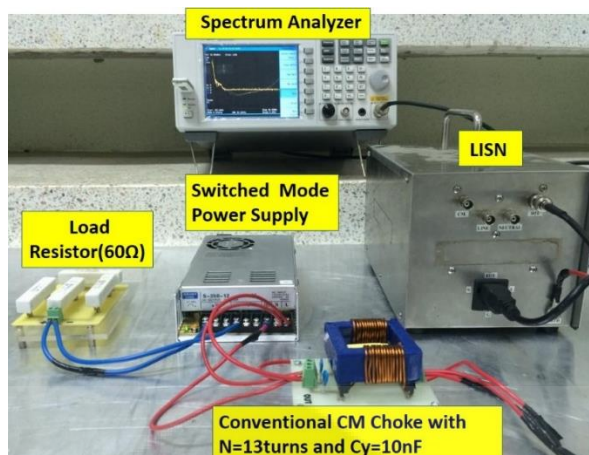


รูปที่ 4.12 แสดง Block diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรงรูปแบบ 2B

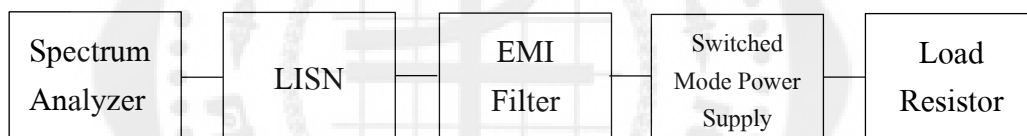
4.3.2.3 วงจรกรงรูปแบบ 2C คือ แบบมีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบและมีตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 nF



รูปที่ 4.13 แสดงวงจรกรงรูปแบบ 2C



รูปที่ 4.14 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรงรูปแบบ 2C

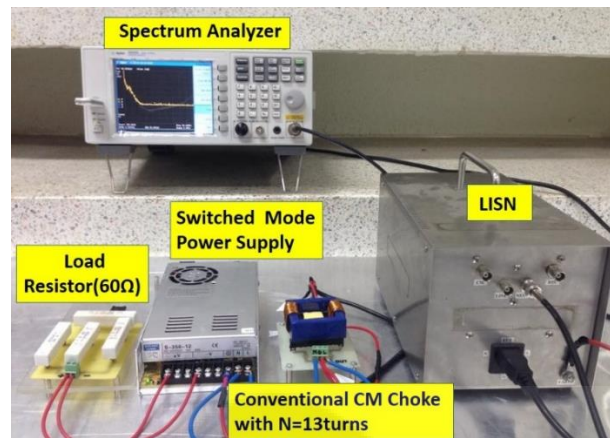


รูปที่ 4.15 แสดง Block diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรงวงจกรงรูปแบบ 2C

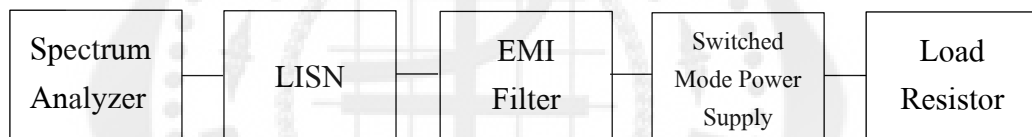
4.3.2.4 วงจรกรงรูปแบบ 2D คือ แบบมีจำนวนรอบการพันขดลวดเท่ากับ 13 รอบ



รูปที่ 4.16 แสดงวงจรกรงรูปแบบ 2D



รูปที่ 4.17 แสดงการต่อวงจรแบบใส่วงจรกรงรูปแบบ 2D

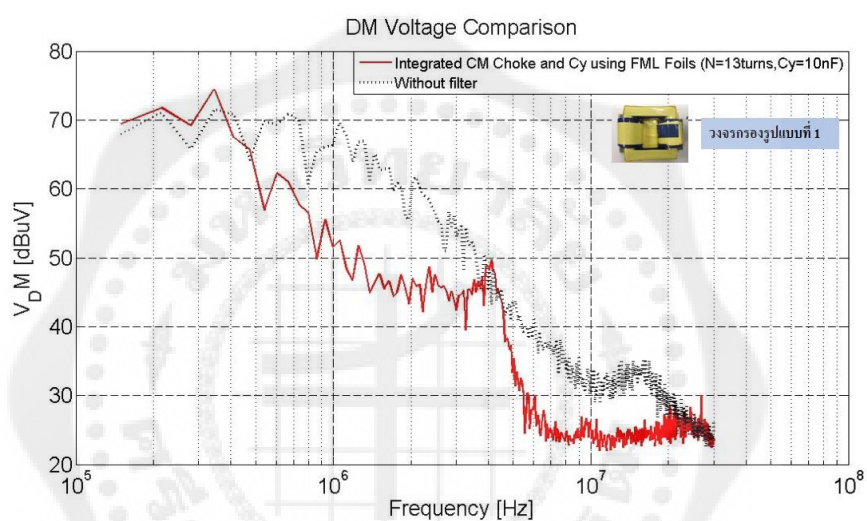


รูปที่ 4.18 แสดง Block diagram ของการต่อวงจรโดยใส่วงจรกรงรูปแบบ 2D

### 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ มีดังนี้

#### 4.3.1 การวัดค่าสัญญาณรบกวนใน โมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

4.3.1.1 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดผลต่าง( $V_{DM}$ )

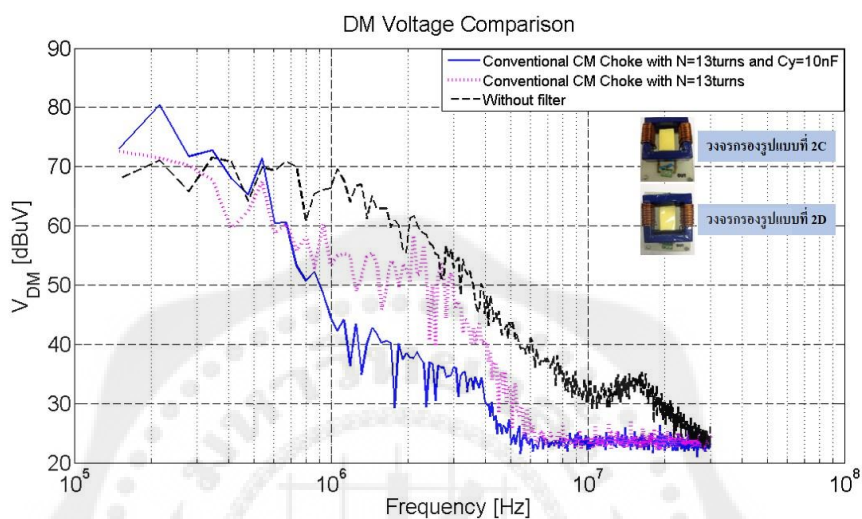


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการผลเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดผลต่าง( $V_{DM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



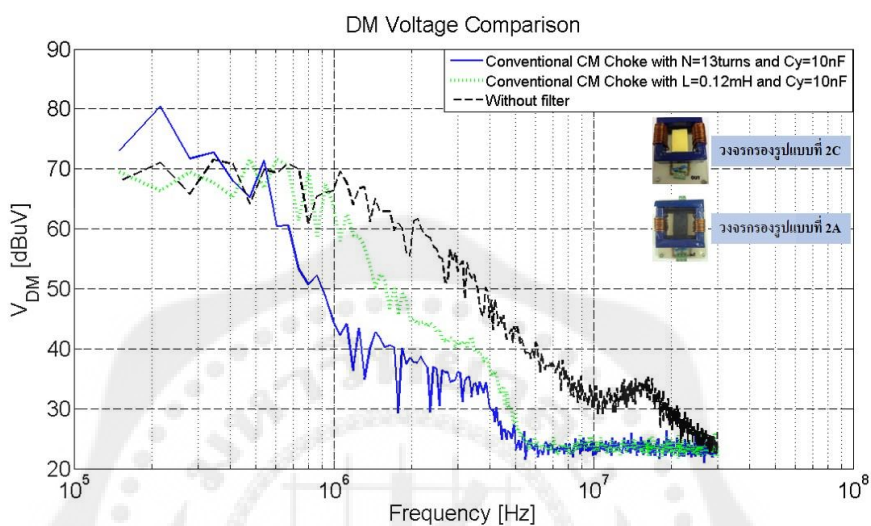
4.3.1.2 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

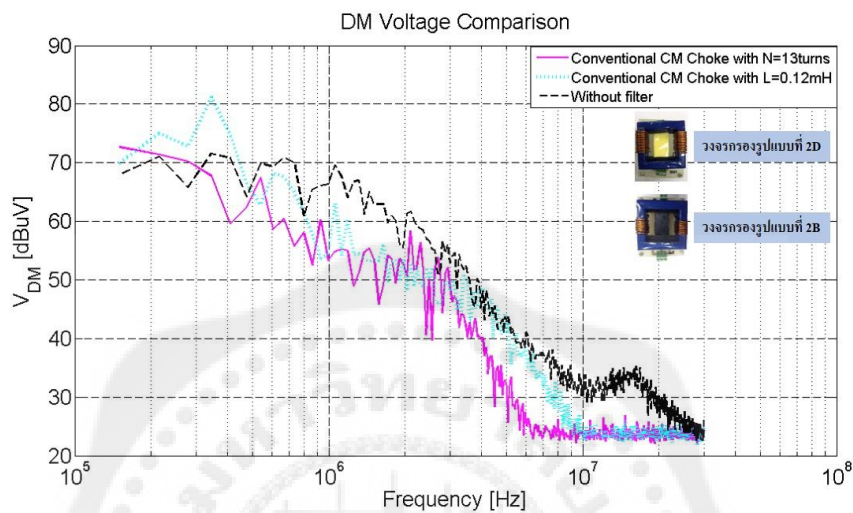
#### 4.3.1.3 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีตัวกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีตัวกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า วงจรกรองรูปแบบ 2C จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีตัวกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

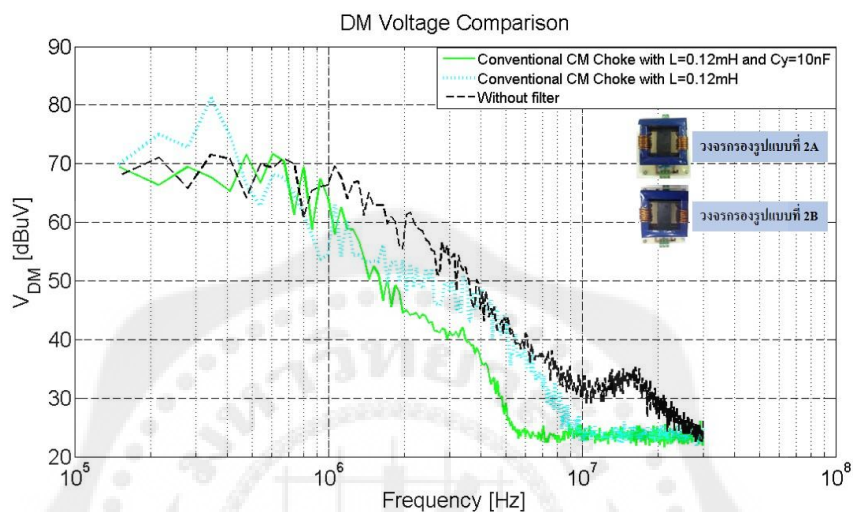
#### 4.3.1.4 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2D ,วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2D กับวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง( $V_{DM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า วงจรกรองรูปแบบ 2D จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

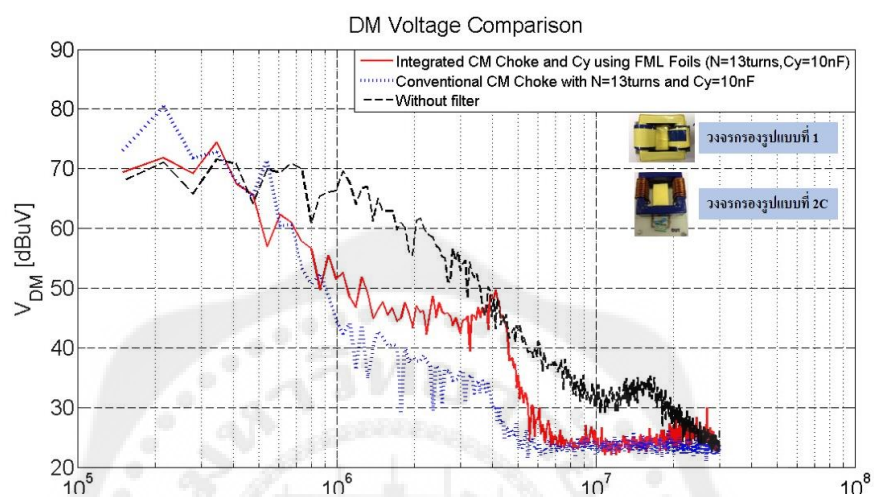
#### 4.3.1.5 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A กับวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า วงจรกรองรูปแบบ 2A จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

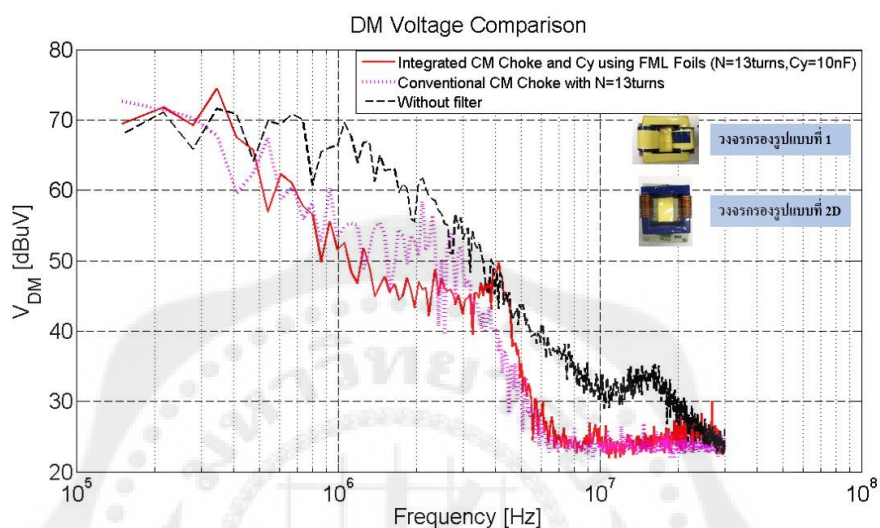
4.3.1.6 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2C ที่ความถี่ต่ำๆ แต่ที่ความถี่สูงๆ วงจรกรองรูปแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

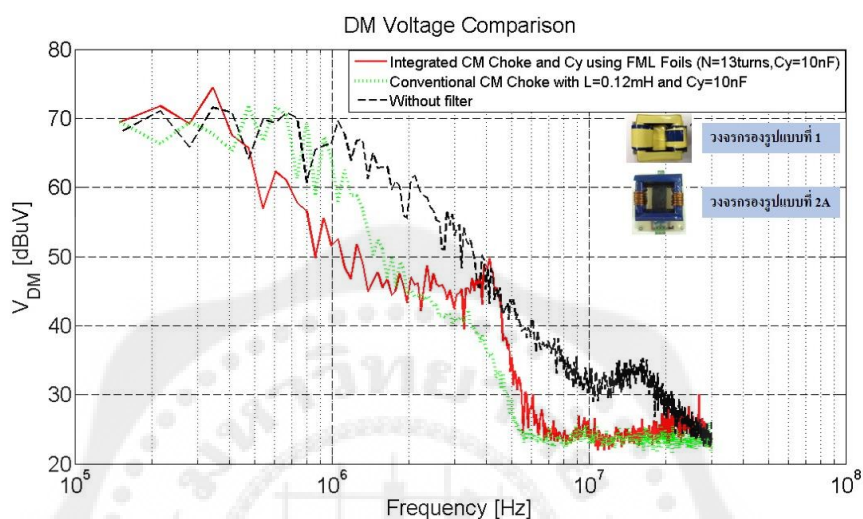
4.3.1.7 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่า วงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D ที่ความถี่ต่ำๆ แต่ที่ความถี่สูงๆ วงจรกรองรูปแบบ 2D จะลดทอนได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

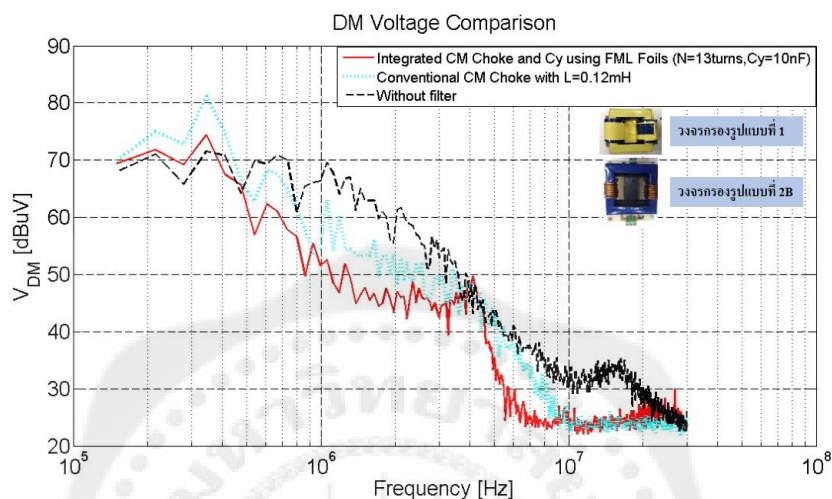
4.3.1.8 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ วงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A ที่ความถี่ต่ำ แต่ที่ความถี่สูง วงจรกรองรูปแบบ 2A จะลดทอนได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง( $V_{DM}$ )

4.3.1.9 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

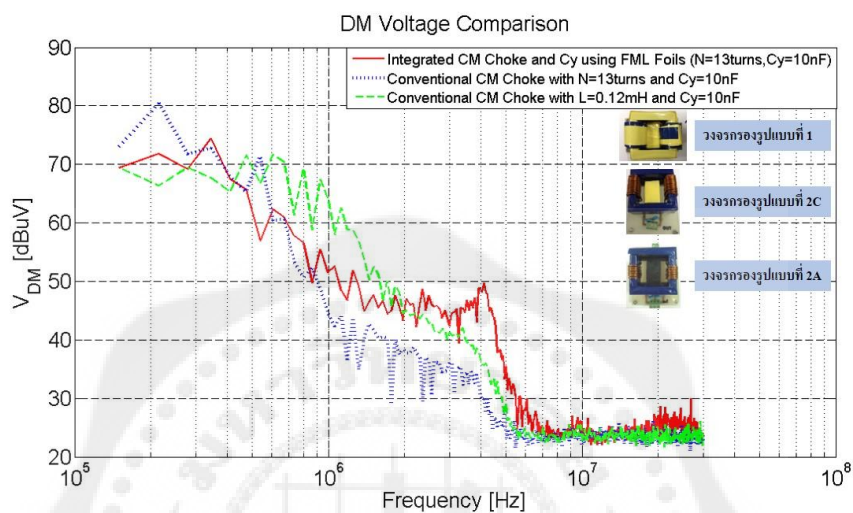


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวกรองแบบรวมตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุโดยใช้ FML foils (Integrated CM Choke and Cy using FML Foils) จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีตัวกรองที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



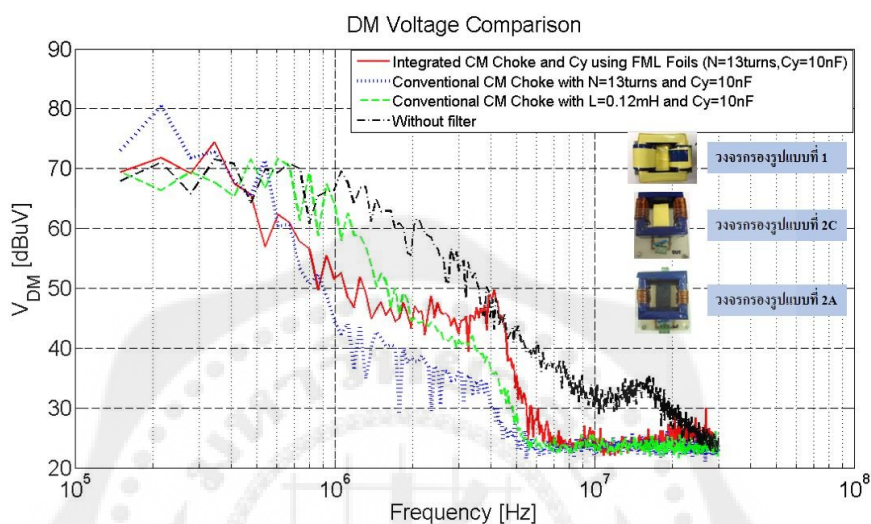
4.3.1.10 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )



รูปที่ 4.28 กราฟแสดง การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับวงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และ วงจรกรองรูปแบบ 2A ที่แรงดันโหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

4.3.1.11 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

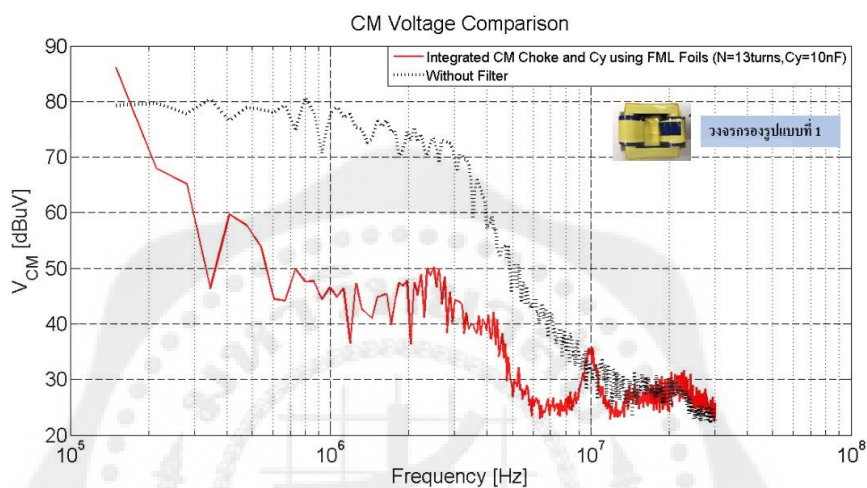


รูปที่ 4.29 กราฟแสดง การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบอื่นๆ ที่แรงดัน โหมดผลต่าง ( $V_{DM}$ )

### 4.3.2 การวัดค่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม( $V_{CM}$ )

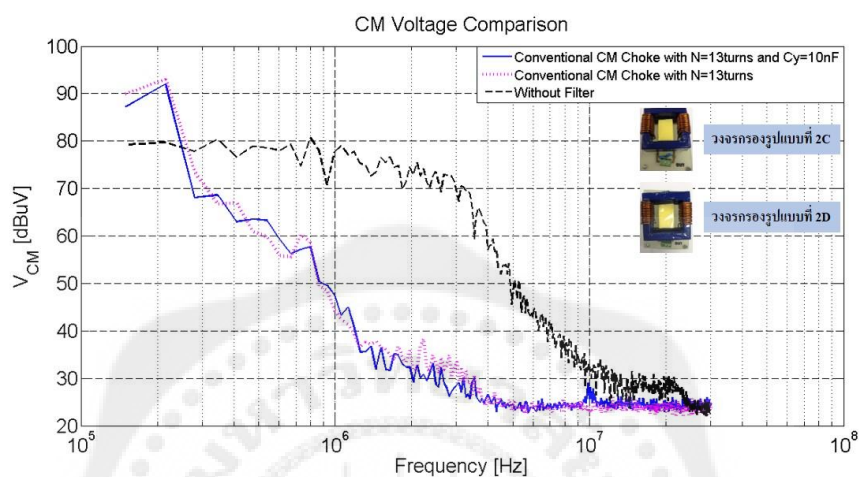
#### 4.3.2.1 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลรวม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลรวม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลรวม( $V_{CM}$ )

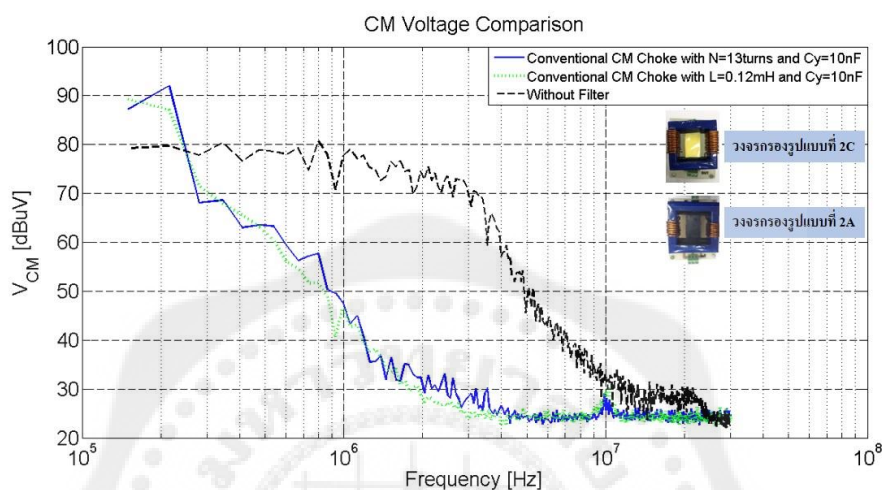
#### 4.3.2.2 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C กับวงจรกรองรูปแบบ 2D และไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C กับวงจรกรองรูปแบบ 2D และไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม ระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C กับวงจรกรองรูปแบบ 2D จะใกล้เคียงกันมากแต่จะดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

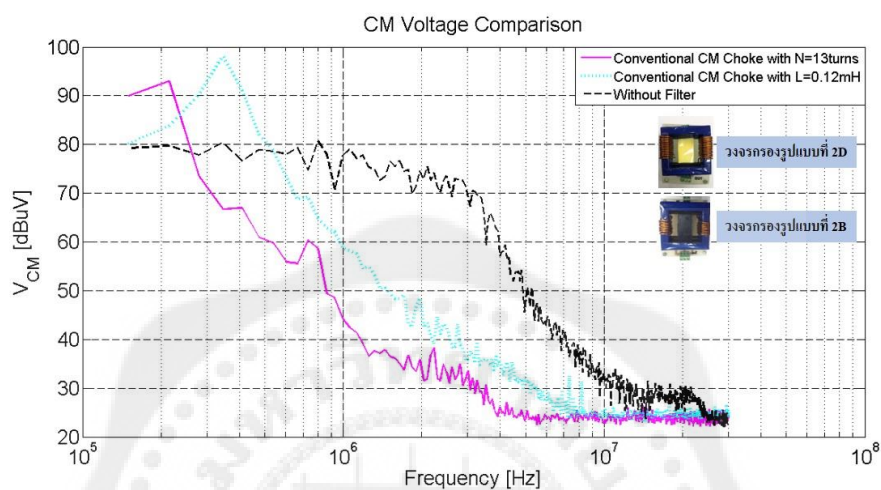
4.3.2.3 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2A, วงจรรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรรองรูปแบบ 2A, วงจรรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรรองรูปแบบ 2A จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าวงจรรองรูปแบบ 2C ในช่วงความถี่ต่ำ แต่ที่ความถี่สูงวงจรรองรูปแบบ 2C จะลดทอนได้ดีกว่า และทั้งสองแบบจะลดทอนได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

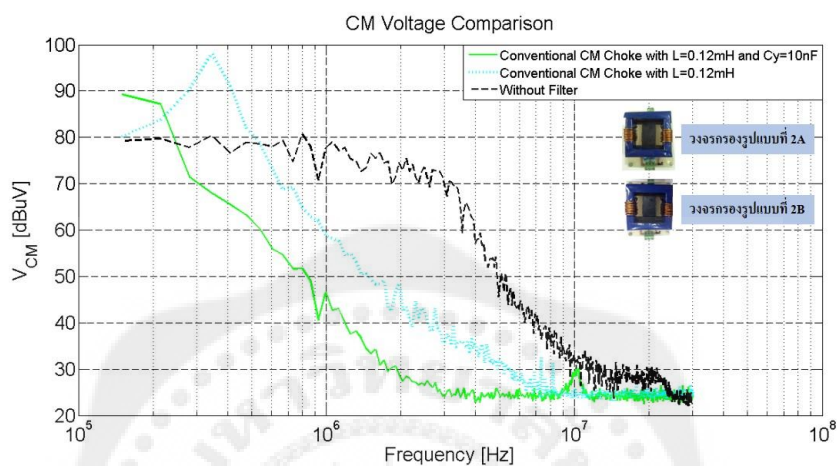
4.3.2.4 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2B, วงจรกรองแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2B, วงจรกรองแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบ 2D จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองแบบ 2B และทั้งสองแบบจะลดทอนดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

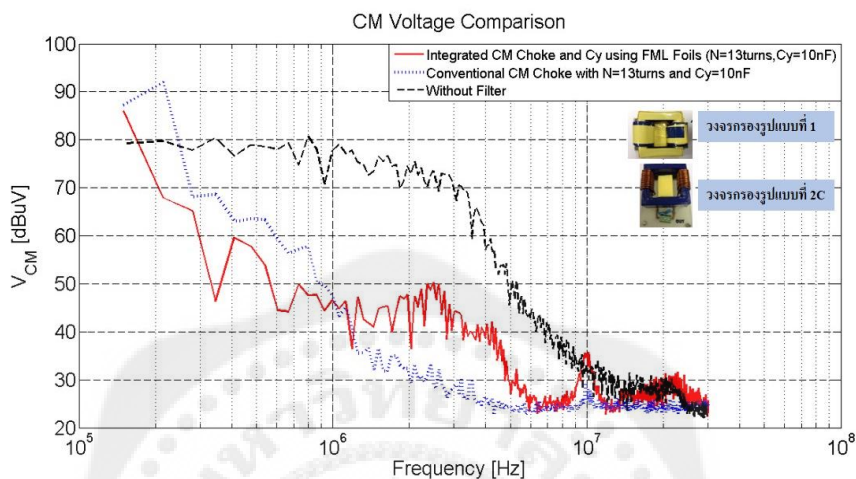
4.3.2.5 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โคมผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โคมผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองรูปแบบ 2B และทั้งสองแบบจะลดทอนดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โคมผลร่วม( $V_{CM}$ )

4.3.2.6 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

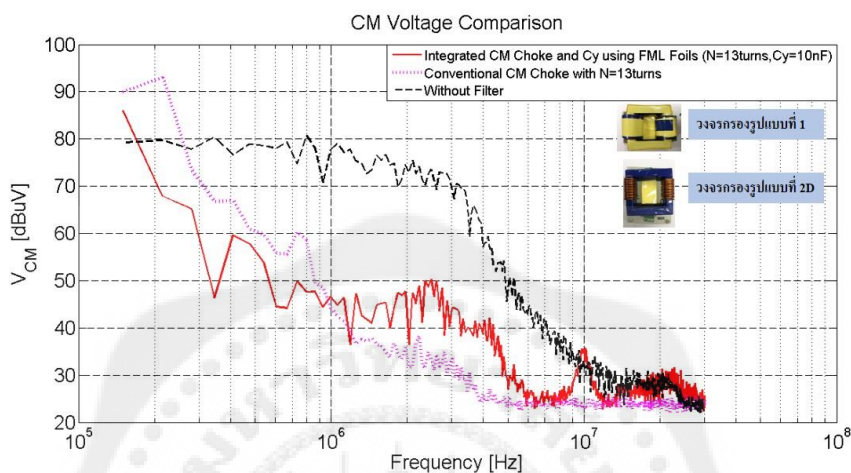


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำ วงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C แต่ที่ความถี่สูงวงจรกรองรูปแบบ 2C จะลดทอนได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 ทั้งสองแบบจะลดทอนได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



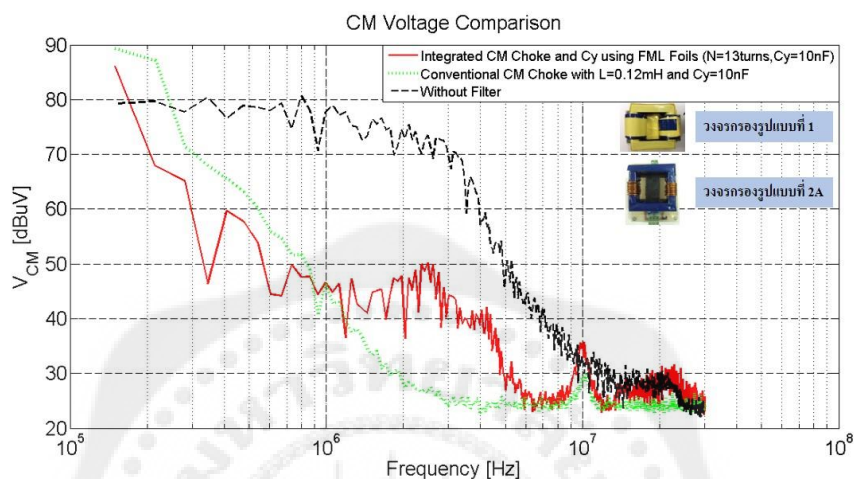
4.3.2.7 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D แต่ที่ความถี่สูงวงจรกรองรูปแบบ 2D จะลดทอนได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 แต่ทั้งสองแบบจะลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

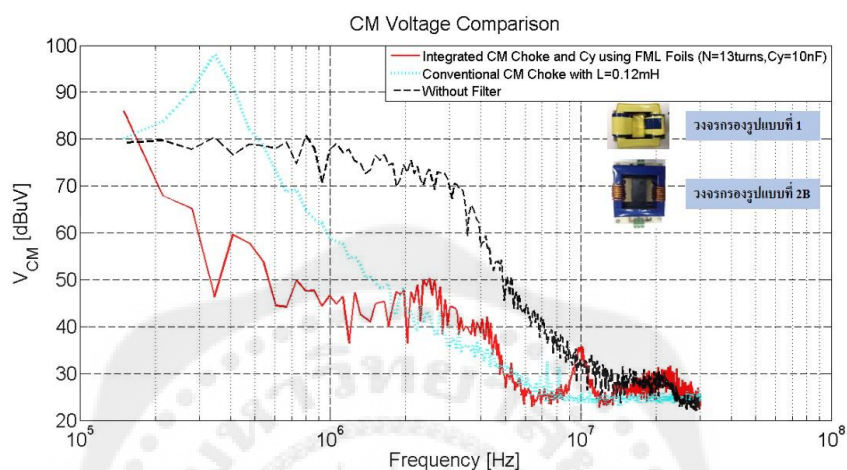
4.3.2.8 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A แต่ที่ความถี่กลางวงจรกรองรูปแบบ 2A จะลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 แต่ที่ความถี่สูงการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบจะใกล้เคียงกันที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

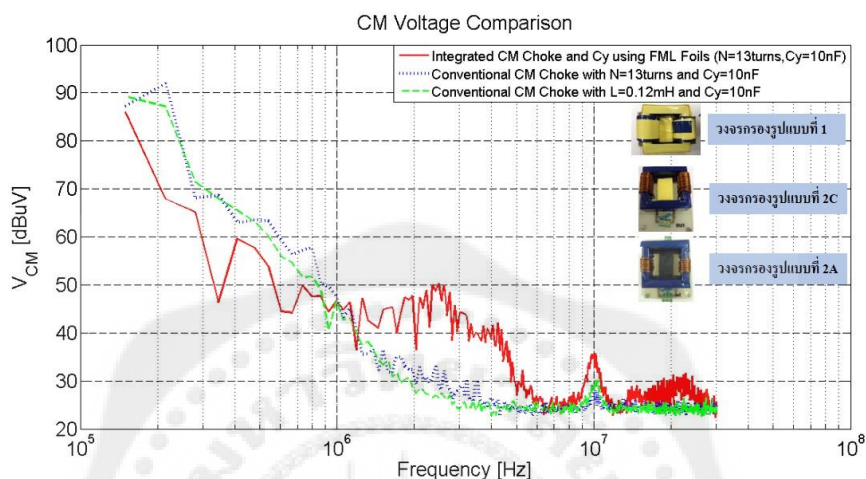
4.3.2.9 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่ามากถ้าเทียบวงจรกรองรูปแบบ 2B แต่ที่ความถี่สูงๆ การลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบจะใกล้เคียงกัน และทั้งสองแบบจะมีการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

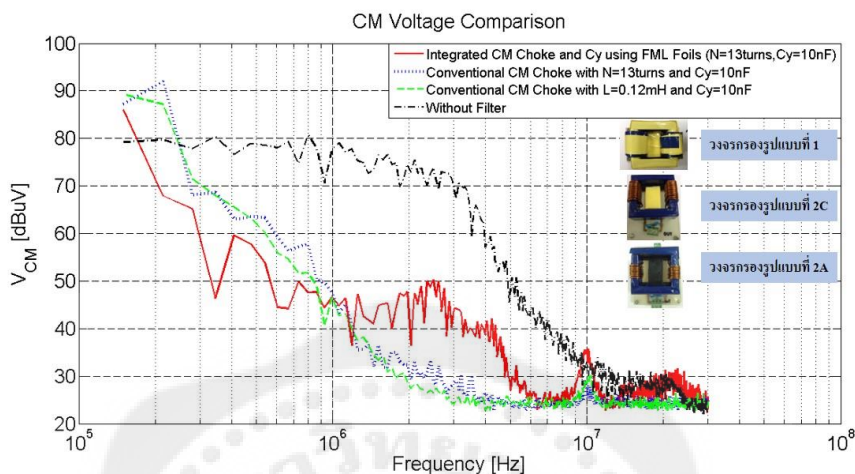
4.3.2.10 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับวงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ )



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดัน โหมดผลร่วม ( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าทั้งวงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C แต่ที่ความถี่สูงนั้นวงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 ที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

4.3.2.11 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

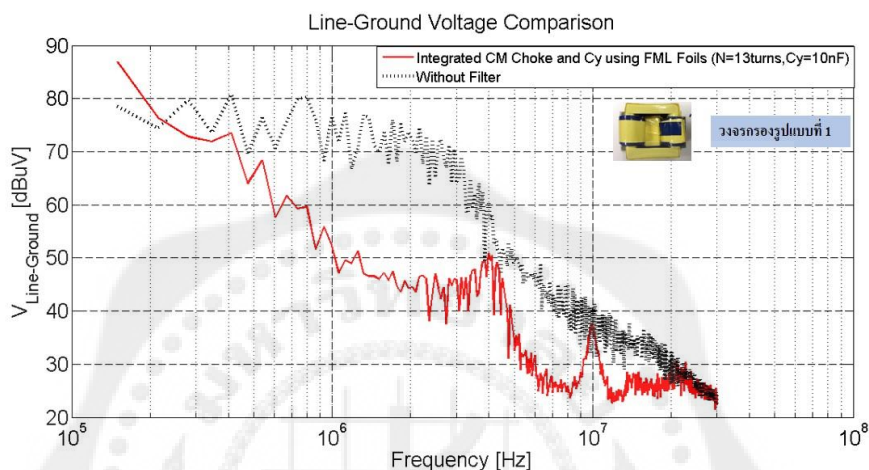


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าความถี่ต่ำวงจรกรองแบบที่ 1 จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า วงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่ แต่ที่ความถี่สูงนั้นวงจรกรองแบบ 2A และวงจรกรองแบบ 2C จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบที่ 1 ทั้งสามแบบจะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดผลร่วม( $V_{CM}$ )

### 4.3.3 การวัดค่าสัญญาณรบกวนในโหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

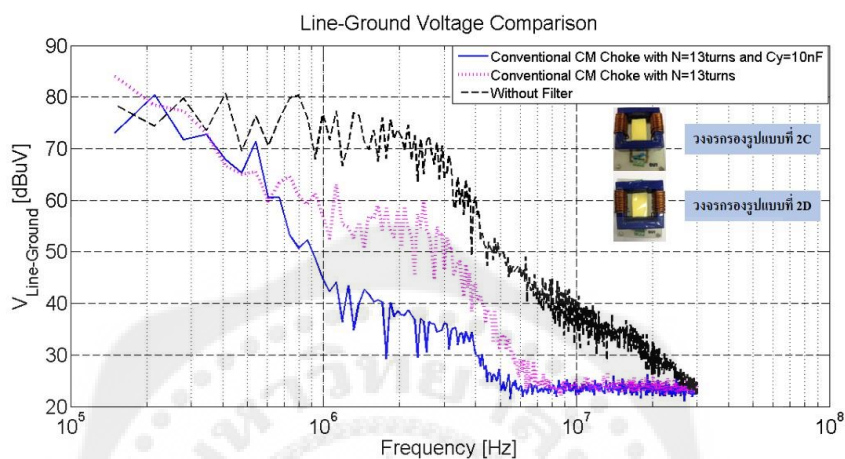
#### 4.3.3.1 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

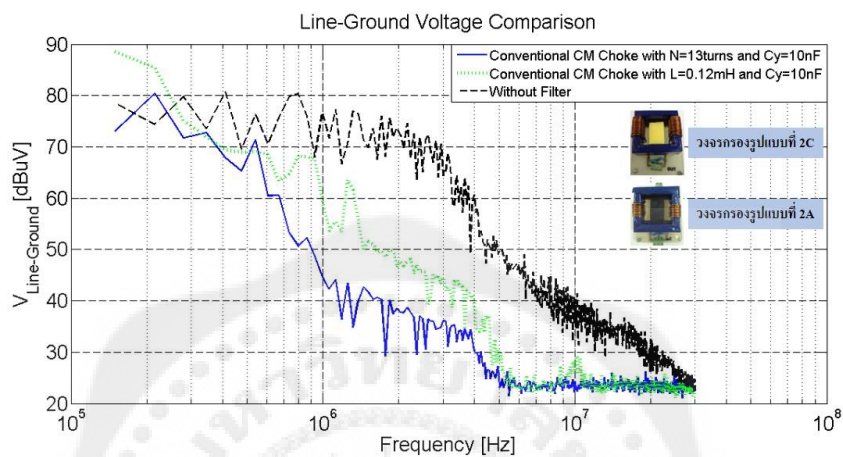
4.3.3.2 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

4.3.3.3 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันไฟฟ้าโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

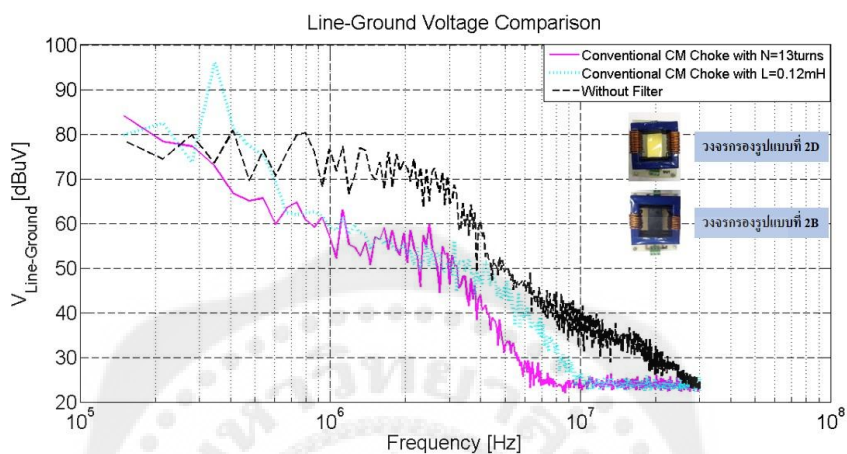


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดไลน์ เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )



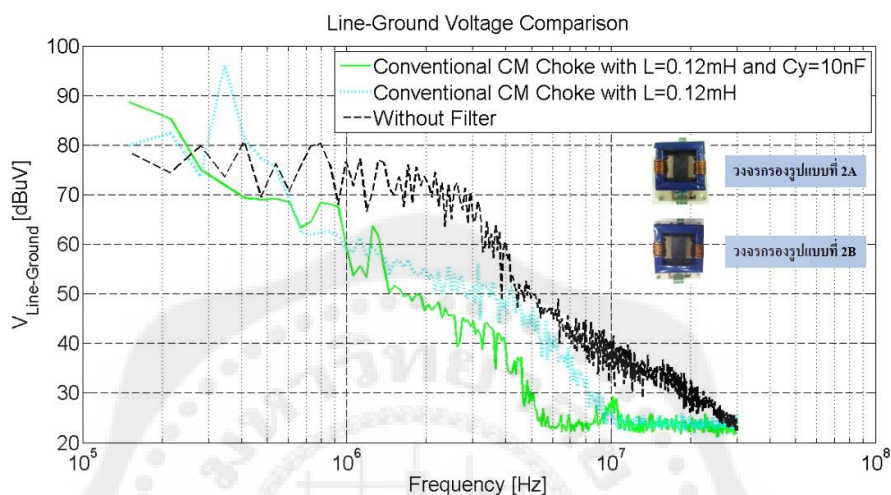
4.3.3.4 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2B, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2B, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

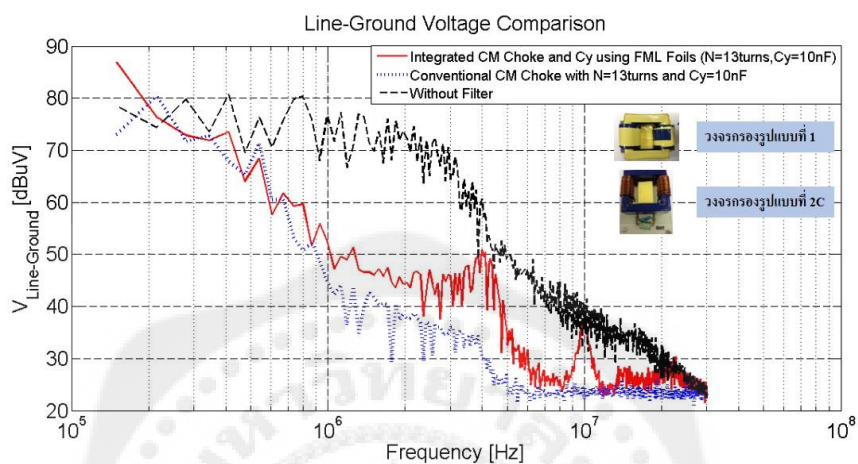
4.3.3.5 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบ 2A สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

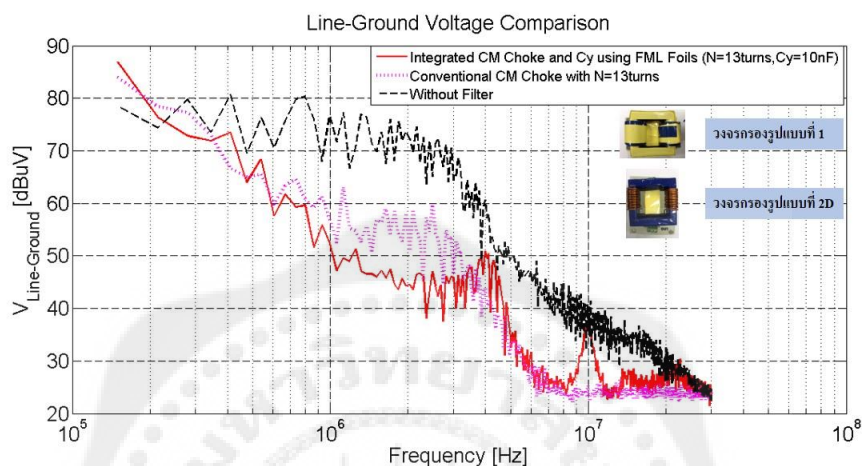
4.3.3.6 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

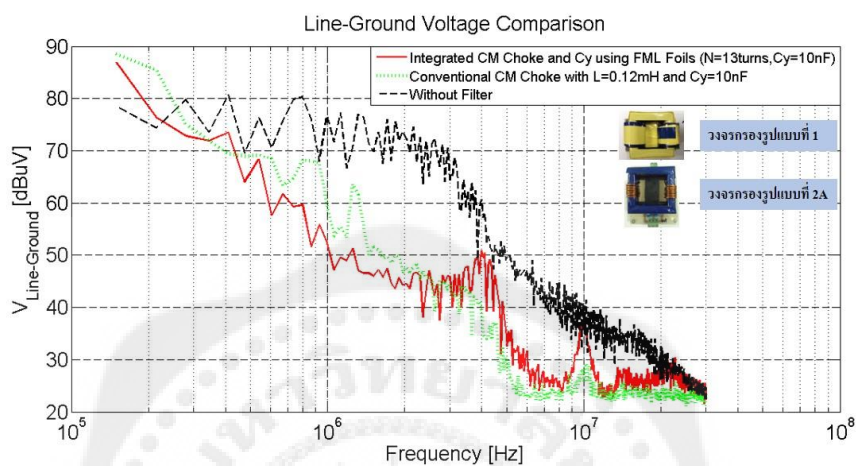
4.3.3.7 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D แต่ที่ความถี่สูงวงจรกรองรูปแบบ 2D สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 ที่แรงดันโมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

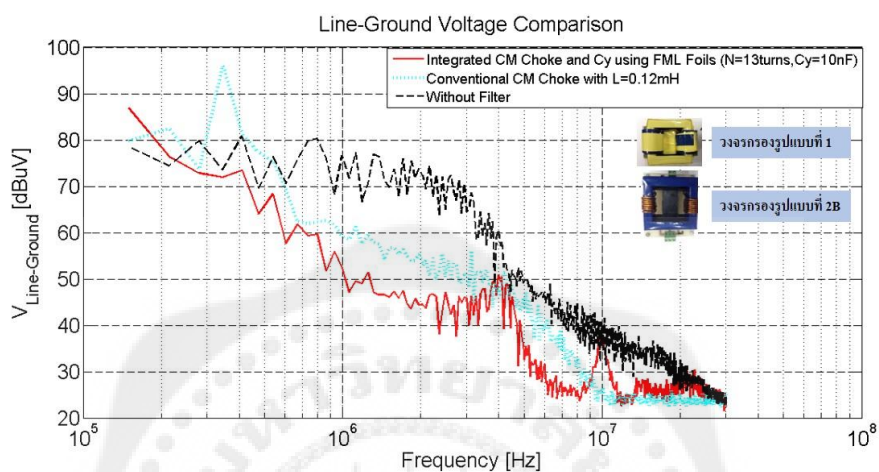
4.3.3.8 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A แต่ที่ความถี่สูงวงจรกรองรูปแบบ 2A จะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบวงจรกรองรูปแบบที่ 1 ที่แรงดัน โหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

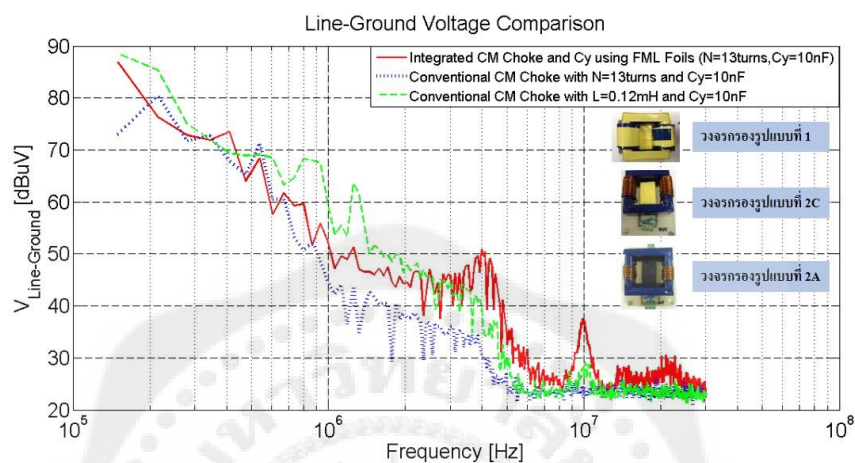
4.3.3.9 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดไลน์ เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์( $V_{LG}$ )

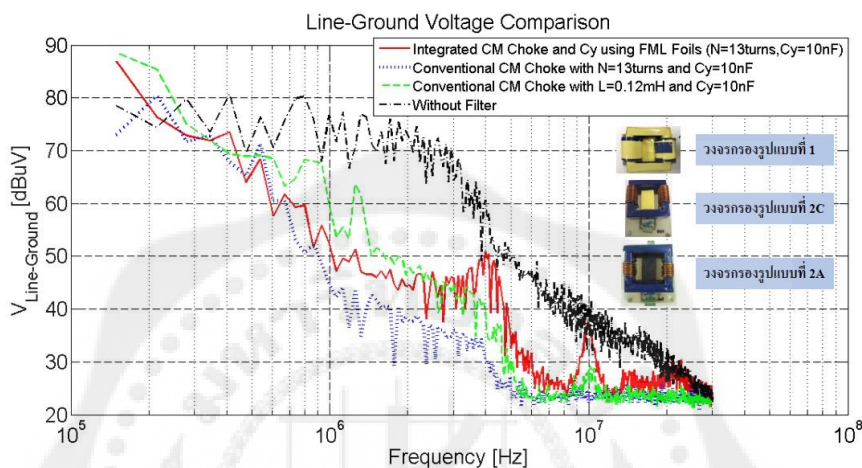
4.3.3.10 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และวงจรกรองรูปแบบ 2A ที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

4.3.3.11 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



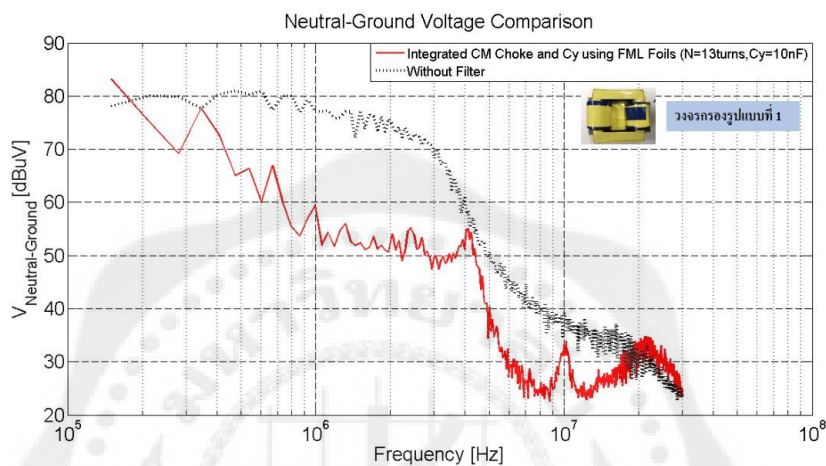
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบอื่นๆ ในโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ ) แต่ที่ความถี่ต่ำการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสามแบบสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดที่แรงดันโหมดไลน์เทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



#### 4.3.4 การวัดค่าสัญญาณรบกวนในโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

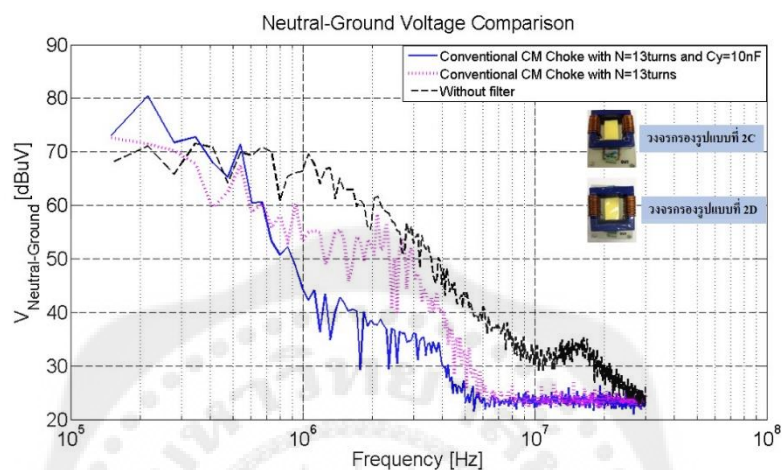
4.3.4.1 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.52 กราฟการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

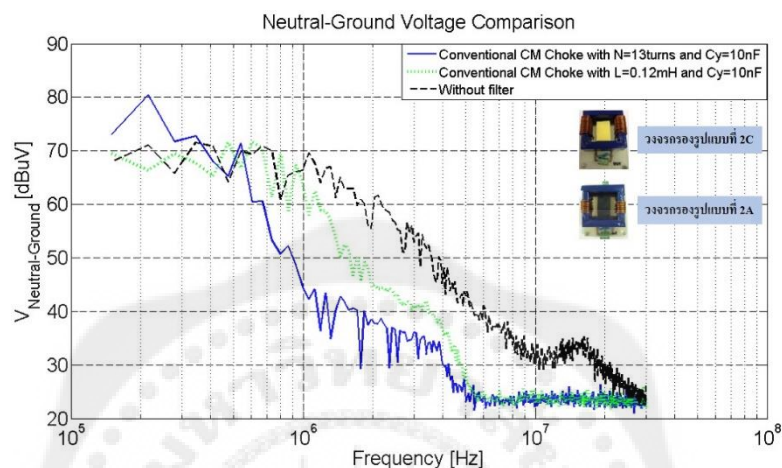
4.3.4.2 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2C, วงจรกรองรูปแบบ 2D และไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{LG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

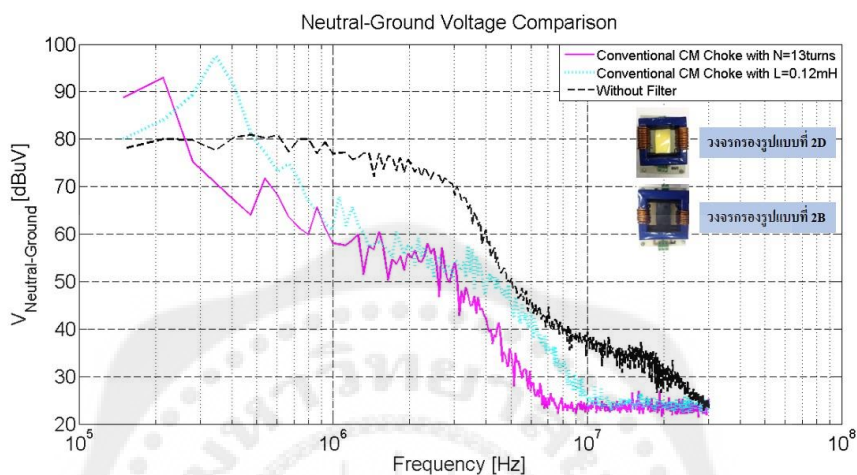
4.3.4.3 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A, วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบ 2A , วงจรกรองแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันไฟฟ้าโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองแบบ 2C สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

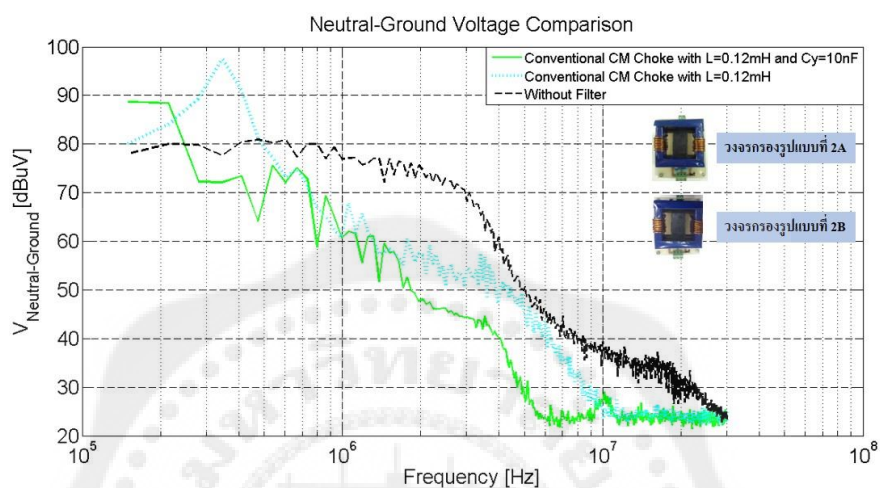
4.3.4.4 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2B, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2B, วงจรกรองรูปแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2D จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

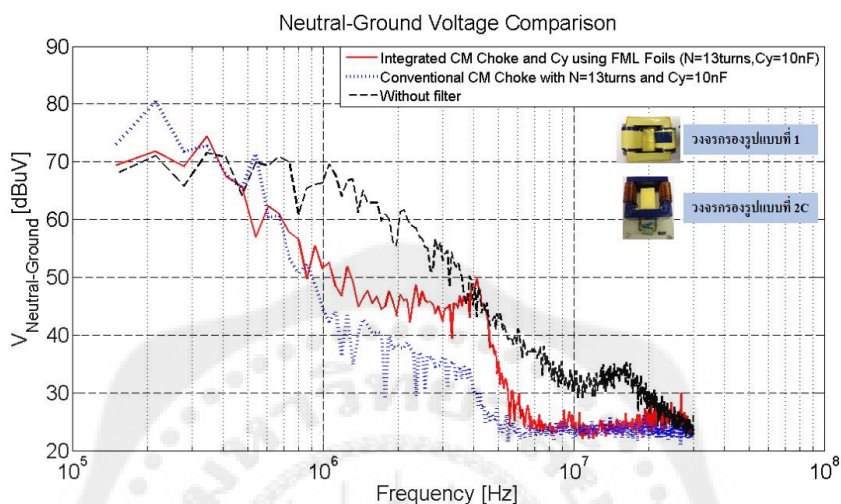
4.3.4.5 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

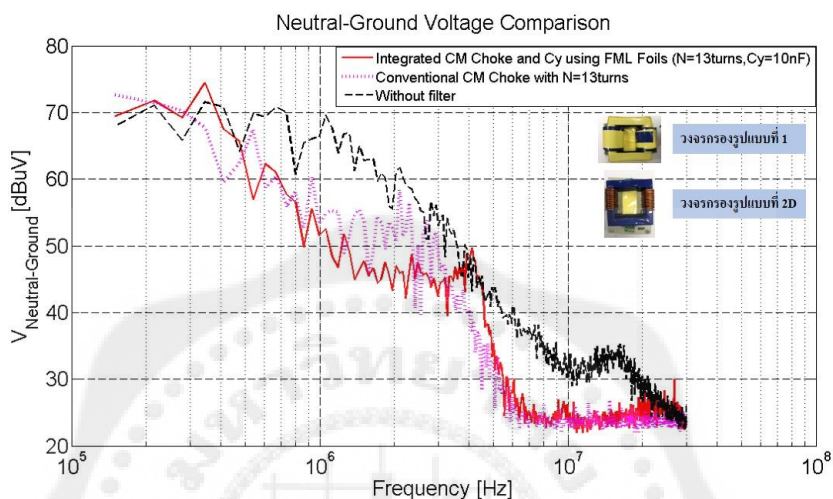
4.3.4.6 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับวงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

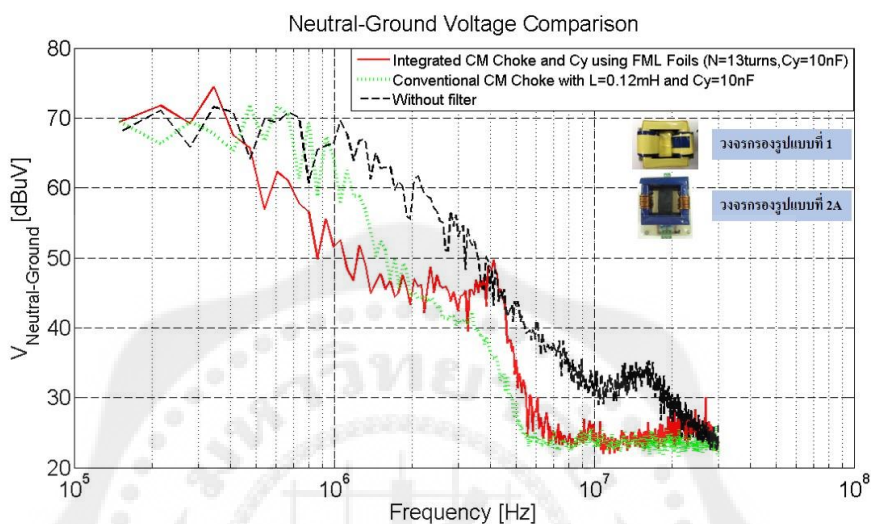
4.3.4.7 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.58 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองแบบที่ 1, วงจรกรองแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำวงจรกรองแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองแบบ 2D และแบบไม่มีวงจรกรอง แต่ในช่วงความถี่สูงวงจรกรองแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้เคียงกับวงจรกรองแบบ 2D ที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

4.3.4.8 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

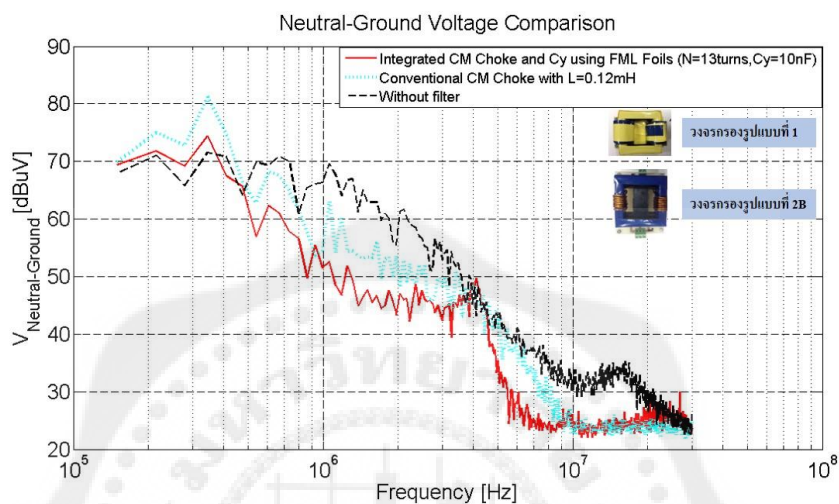


รูปที่ 4.59 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำวงจรกรองรูปแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A และแบบไม่มีวงจรกรอง แต่ที่ความถี่สูงวงจรกรองรูปแบบ 2A สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



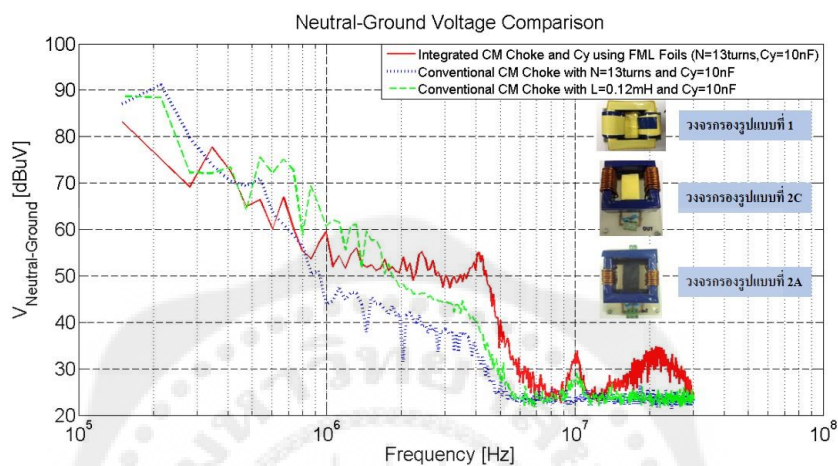
4.3.4.9 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1 กับวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 จะสามารถลดทอนสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบ 2B และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

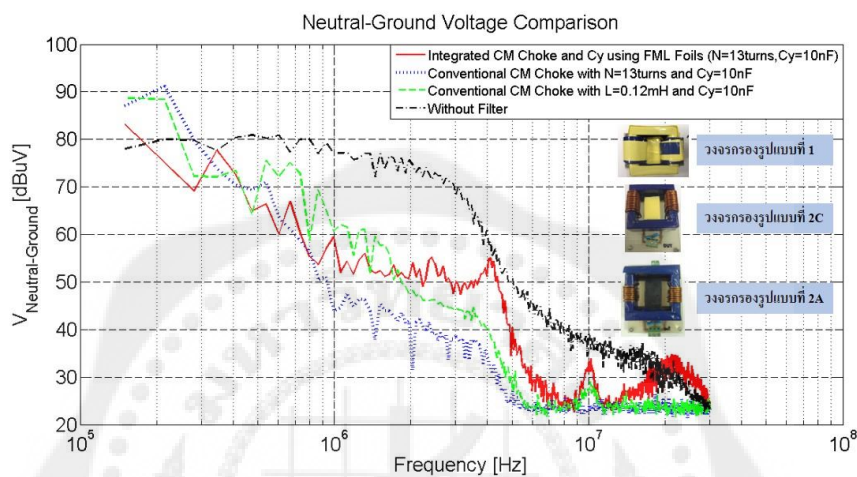
4.3.4.10 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2A จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบที่ 1 และวงจรกรองรูปแบบ 2C ที่แรงดันโมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

4.3.4.11 การเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A, วงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดันโหมดที่แรงดันโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )



รูปที่ 4.62 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการลดทอนระหว่างวงจรกรองรูปแบบที่ 1, วงจรกรองรูปแบบ 2A และวงจรกรองรูปแบบ 2C และแบบไม่มีวงจรกรองที่แรงดัน โหมดที่แรงดัน โหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าวงจรกรองรูปแบบ 2C จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรกรองรูปแบบอื่นๆ ที่แรงดันโหมดนิวทรัลเทียบกับกราวด์ ( $V_{NG}$ )

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดจากแหล่งจ่ายสวิตช์ซึ่งสามารถลดทอนได้โดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยวิธี Flexible Multilayer foils เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ใส่วงจรกรองซึ่งเป็นค่าสัญญาณอ้างอิงจะเห็นได้ว่ามีผลการลดทอนที่ดีกว่า แต่เมื่อนำวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยวิธี Flexible Multilayer foils มาเปรียบเทียบกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิมทั้ง 4 แบบ จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน และเป็นค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า(EMC) โดยวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรวมตัวเหนี่ยวนำร่วมและตัวเก็บประจุโดยวิธี Flexible Multilayer foils จะมีขนาดเล็กกว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำโมดผลร่วมแบบดั้งเดิม

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นเพียงการลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำเท่านั้นไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ทั้งหมด ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาการออกแบบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดวงจรกรองสัญญาณรบกวนให้มีขนาดเล็กลงเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงไปด้วย หรืออาจนำไปประยุกต์ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้งาน

## เอกสารอ้างอิง

พรเทพ พิมพ์คำวงศ์, พรหมมาศ ปิ่นนิกร และพันธวิช โรจนศุภมิตร (2555). การศึกษาเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.ปริญญาานิพนธ์.มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

นายสุรศักดิ์ ชูนาวา และนางสาวเสาวลักษณ์ หอมเกษร(2554). การศึกษาเทคนิคการรวมแกนตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า. ปริญญาานิพนธ์.มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์ (2552).อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.พิมพ์ครั้งที่ 9.กรุงเทพฯ:วี.เจ.พรินติ้ง

นายปฎิวัติ บุญมา (2550).การวิเคราะห์เทคนิคการออกแบบสำหรับวงจรกรองความถี่ในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง. วิทยานิพนธ์.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

X. Wu, D. Xu, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Okuma, and K. Mino. (2008) .**Integrated EMI filter design with flexible PCB structure**. Island, Greece: IEEE PESC

Xiaofeng Wu, Dehong Xu, Zhiwei Wen, Yasuhiro Okuma, and Kazuaki Mino. (2011). **Design, Modeling, and Improvement of Integrated EMI Filter With Flexible Multilayer Foils**. Piscataway, New Jersey, USA :IEEE Trans.

[https://cdn.fbsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627\\_814891141921781\\_115158](https://cdn.fbsbx.com/hphotos-xat1/v/t59.2708-21/11274627_814891141921781_115158)

0414\_n.docx/%E0%B8%AD%E0%B8%B8%E0%B8%9B%E0%B8%81%E0%B8%A%E0%B8%93%E0%B9%8C%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94.docx?oh=0194571d3723f459a7d32779fb611663&oe=55591BD8&dl=1[Online: 20 NOV 2014]



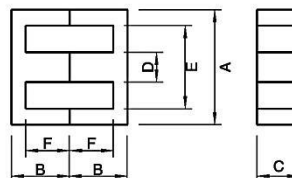
ภาคผนวก

ตารางข้อมูลแกนเฟรไรต์ EE-55A

## EE & EF CORES

**Meisongbei**

Material: M3K, M2, M3



Type	Dimension(mm)						Effective Parameter				AL(nH/N <sup>2</sup> )			Weight (g)
	A	B	C	D	E min	F	C1 (mm <sup>-1</sup> )	Le (mm)	Ae (mm <sup>2</sup> )	Ve (mm <sup>3</sup> )	M3K (±25%)	M2 (±25%)	M3 (±25%)	
EE25A	25.4±0.5	10.0±0.3	6.4±0.3	6.0±0.3	18.5	7.0±0.3	1.16	50	43	2193	2300	2100	1900	10.7
EE25B	25.4±0.5	10.0±0.3	6.8±0.2	6.0±0.3	18.5	7.0±0.3	1.117	50.7	42.4	2149	2300	2100	1900	14
EF25	25.0±0.6	12.5±0.4	7.0±0.4	6.8±0.3	18.6	9.1±.3	1.22	57.8	47.2	2700	2300	2100	1900	13
EEI25	25.4±0.5	16.3±0.4	6.3±0.3	6.3±0.3	18.6	13.3±0.4	1.9	76.7	40.4	3097	1600	1400	1300	15.5
EE26.5	26.5±0.7	10.8±0.3	11.0±0.3	7.2±0.3	19	6.8±0.3	1.36	77.6	57.1	4430	4000	3900	3600	22
EE28	28.5±0.6	10.0±0.3	10.4±0.3	7.2±0.3	19	6.8±0.3	0.57	48.1	99.8	4801	4200	4000	4000	23.5
EEI28	28.0±0.7	17.1±0.3	10.4±0.3	7.1±0.3	18.9	12.8±0.4	0.9	74.4	87.5	6508.4	3100	2600	2400	35
EE30/7	30.1±0.7	15.0±0.4	7.3±0.5	7.2±0.5	19.5	9.9±0.25	1.12	66.9	59.7	4000			2100	21
EE30/11	30.0±0.5	15.0±0.4	10.7±0.3	7.2±0.5	19.5	9.9±0.25	0.86	57.8	110	6358			2800	32
EE40	40.0±0.7	17.3±0.3	11.6±0.3	11.6±0.3	26.8	10.3±0.3	0.53	77.28	145.74	11262.77			4000	56
EE42	42.0±0.7	21.2±0.4	15.0±0.4	12.3±0.4	29.5	9.9±0.25	0.6	97.8	180	17600	5300	4800	4200	88
EE55A	55.0±0.8	27.5±0.3	17.0±0.7	17.0±0.6	38	18.8±0.3	0.428	80	186	14880	4300	4000	3700	178
EE55B	55.0±2.0	27.8±0.6	20.9±0.5	17.0±0.5	37.5	18.7±0.7	0.35	123	354	43542	8000	6700	6500	210
EE65A	65.2±1.3	32.5±.3	19.6±0.3	19.6±0.3	44.2	22.5±0.3	0.373	146.8	393.1	57728.4			5800	280
EE65B	65.2±1.3	32.5±0.3	19.6±0.3	27.0±0.3	44.2	22.5±0.3	0.274	147	535	78700			7800	380
EE70	70.5±1.0	35.5±0.5	24.5±0.6	16.7±0.5	48	24.6±0.6	0.344	159	461	73200			6500	370
EE70B	70.7±1.5	32.0±0.4	30.5±0.6	21.5±0.5	48	22.0±0.6	0.226	150	665	99800			9000	500
EE80	80.0±0.8	37.95±0.4	20.4±0.4	20.0±0.4	60	28.0±0.3	0.446	183.5	399	73150			6100	368
EE85	85.0±1.2	43.5±0.5	26.0±0.6	26.4±0.6	56	30.5±0.5	0.49	196.3	433	79150			7500	700
EE100	100.0±2.0	60.0±0.6	28.0±1.0	28.0±1.0	71.5	46.5±1.2	0.349	271	775	209768			7800	1028
EE110	110±2.0	55.0±0.6	36.0±1.0	36.0±1.0	75	37.0±1.2	0.212	274.5	1296	355750			13300	1796.5
EE130	130.0±3.0	63.0±1.0	20.0±1.0	40.0±2.0	89	43.0±0.8	0.352	284	1600	454000			12000	2190
EE140	140.0±3.0	53.0±1.0	35.0±1.0	35.0±1.0	100	35.0±0.6	0.216	259.3	1200.2	311212			7000	1550
EE160	160.0±3.0	83.0±1.0	20.0±1.5	40.0±2.0	120	64.0±1.0	0.498	398	1600	637000			9000	2500
EE185	185.0±3.0	77.0±1.5	27.5±1.0	53.0±1.0	128	50.0±1.5	0.24	370	1488	551000			12000	5700
EE240	240.0±3.0	117.0±1.0	40.0±1.5	56.0±3.0	176	86.5±1.0	0.235	556.4	2359	1312421			12500	5900

ตารางข้อมูลเบอร์ขดลวดทองแดงมาตรฐาน S.W.G

ภาคผนวก ก. ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน

เบอร์ขดลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter)	พื้นที่หน้าตัด (Area)	ทนกระแสได้ (A)
	mm	mm <sup>2</sup>	
0000	10.2	81.71	270.11
000	9.5	70.88	233.62
00	8.8	60.82	199.77
0	8.2	52.81	177.22
1	7.6	45.36	151.94
2	7.0	38.48	128.60
3	6.4	32.17	107.21
4	5.9	27.34	90.86
5	5.4	22.90	75.87
6	4.9	18.86	62.23
7	4.5	15.90	52.29
8	4.1	13.20	43.22
9	3.7	10.75	35.01
10	3.3	8.55	27.66
11	2.9	6.61	22.72
12	2.6	5.31	18.26
13	2.3	4.15	14.29
14	2.0	3.14	10.80
15	1.9	2.54	8.751
16	1.8	2.01	6.915
17	1.4	1.54	5.294
18	1.2	1.15	3.890
19	1.0	0.79	2.701
20	0.91	0.65	2.188
21	0.81	0.51	1.729
22	0.72	0.41	1.324
23	0.61	0.2922	0.972

ข้อมูลจาก [http://www.htg2.net/index.php?topic=62908.0;prev\\_next=next](http://www.htg2.net/index.php?topic=62908.0;prev_next=next)



## ตารางค่าคงตัวไดอิเล็กทริก(Dielectri Constant) ของ Polypropylene(PP)

Material	Constant	Material	Constant
ABS resin pellet	1.5-2.5	hexane	1.9
acetone	19.5	hydrogen cyanide	95.4
acetyl bromide	16.5	hydrogen peroxide	84.2
acrylic resin	2.7-4.5	isobutylamine	4.5
air	1.0	lime, shell	1.2
alcohol, industrial	16-31	marble	8.0-8.5
alcohol, isopropyl	18.3	melamine resin	4.7-10.2
ammonia	15-25	methane liquid	1.7
aniline	5.5-7.8	methanol	33.6
aqueous solutions	50-80	mica, white	4.5-9.6
ash (fly)	1.7	milk, powdered	3.5-4
bakelite	3.6	nitrobenzene	36
barley powder	3.0-4.0	neoprene	6-9
benzene	2.3	nylon	4.5
benzyl acetate	5	oil, for transformer	2.2-2.4
butane	1.4	oil, paraffin	2.2-4.8
cable sealing compound	2.5	oil, peanut	3.0
calcium carbonate	9.1	oil, petroleum	2.1
carbon tetrachloride	2.2	oil, soybean	2.9-3.5
celluloid	3.0	oil, turpentine	2.2
cellulose	3.2-7.5	paint	5-8
cement	1.5-2.1	paraffin	1.9-2.5
cement powder	5-10	paper	1.6-2.6
cereal	3-5	paper, hard	4.5
charcoal	1.2-1.8	paper, oil saturated	4.0
chlorine, liquid	2.0	perspex	3.2-3.5
coke	1.1-2.2	petroleum	2.0-2.2
corn	5-10	phenol	9.9-15
ebonite	2.7-2.9	phenol resin	4.9
epoxy resin	2.5-6	polyacetal (Delrin TM)	3.6
ethanol	24	polyamide (nylon)	2.5
ethyl bromide	4.9	polycarbonate	2.9
ethylene glycol	38.7	polyester resin	2.8-8.1
flour	2.5-3.0	polyethylene	2.3
FreonTM R22,R502 liq.	6.1	polypropylene	2.0-2.3
gasoline	2.2	polystyrene	3.0
glass	3.1-10	polyvinyl chloride resin	2.8-3.1
glass, raw material	2.0-2.5	porcelain	4.4-7
glycerine	47	press board	2-5

ข้อมูลจาก [http://engineeronadisk.com/V2/book\\_implementation/engineeronadisk-398.gif](http://engineeronadisk.com/V2/book_implementation/engineeronadisk-398.gif)

## ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาวกุสุมา จิมมาลี

วัน เดือน ปี เกิด 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536

สถานที่เกิด จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่ปัจจุบัน 108 หมู่ 9 ต.สะแกโพรง

อ.เมือง จ.บุรีรัมย์

โทรศัพท์ 082-4978790

E-mail abc\_hi55@hotmail.com



## ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2551 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม

จ.บุรีรัมย์

พ.ศ.2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม

จ.บุรีรัมย์

พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

## ประวัติย่อประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายภูอัยฮัร อีเต  
 วัน เดือน ปี เกิด 11 สิงหาคม พ.ศ. 2535  
 สถานที่เกิด จังหวัดปัตตานี  
 สถานที่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 4/1 หมู่ 5 ต.ปะโค  
 อ.มายอ จ.ปัตตานี  
 โทรศัพท์ 085-6714115  
 E-mail kuazhar08567@gmail.com



## ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2551 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสมบูรณศาสน์อิสลาม  
 จ.ปัตตานี  
 พ.ศ.2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนธรรมวิทยามูลนิธิ  
 จ.ยะลา  
 พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

## ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายจิรวัดน์ นาคงาม  
 วัน เดือน ปี เกิด 6 ตุลาคม พ.ศ. 2535  
 สถานที่เกิด จังหวัดสมุทรปราการ  
 สถานที่ปัจจุบัน 72/2 ซ.12(เกษมสมุทร2/1)  
 ถ.สายลวด ต.ปากน้ำ  
 อ.เมืองฯ จ.สมุทรปราการ  
 โทรศัพท์ 094-4828147  
 E-mail jirawatnakngam@gmail.com



## ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2551 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสมุทรปราการ  
 จ.สมุทรปราการ  
 พ.ศ.2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสมุทรปราการ  
 จ.สมุทรปราการ  
 พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

## ประวัติย่อประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาวณัฐกฤตา นาแซง

วัน เดือน ปี เกิด 29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535

สถานที่เกิด จังหวัดอุดรธานี

สถานที่ปัจจุบัน 310/1 หมู่4 ถ.อุดร-สกล

ต.หนองขอนกว้าง

อ.เมือง จ.อุดรธานี

โทรศัพท์ 083-2828884

E-mail Nutkritta.ns@gmail.com



## ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2551 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีราชินูทิศ  
จ.อุดรธานี

พ.ศ.2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีราชินูทิศ  
จ.อุดรธานี

พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์