การศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

A STUDY OF THREE PHASE EMI FILTER DESIGNS FOR THREE PHASE INDUCTION MOTOR DRIVES

นายวราเทพ ผดุงถิ่น

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส
สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส
A STUDY OF THREE PHASE EMI FILTER DESIGNS FOR THREE PHASE
INDUCTION MOTOR DRIVES

นายวราเทพ ผดุงถิ่น

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงงานวิศวกรรม

เรื่อง

การศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส

สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

ของ

นายวราเทพ ผดุงถิ่น

ได้รับอนุมัติจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

....ประธาน

(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บำรุง ท้าวศรีสกุล)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์)

การศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ปีการศึกษา 2559

โดย
นายวราเทพ ผดุงถิ่น

อาจารย์ที่ปรึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พบเห็นอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และเป็นสาเหตุหลักในการก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ไม่ต้องการให้มี แต่ในการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องมีเพื่อให้ผ่านมาตรฐาน โครงงานวิศวกรรมนี้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสในงานวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสก่อนหน้านี้มี 2 วิธี วิธีแรก คือ การคำนวณหาอัตราลดทอน และการคำนวณหาความถี่คัตออฟ สำหรับใช้ในการเลือกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และวิธีถัดมา คือ การคำนวณหาอัตราลดทอน และการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ สำหรับใช้ในการเลือกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ พบว่าวิธีแรกมีผลการกรองบางส่วนไม่ผ่านมาตรฐานในบางกรณี เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส และวิธีถัดมามีองค์ประกอบโหมดผลต่างที่ไม่จำเป็น โครงงานนี้เสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส ด้วยการลดหรือกำจัดองค์ประกอบโหมดผลต่างที่ไม่จำเป็นในวงจรกรอง และให้ผ่านมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และ CISPR 22 class B (Quasi-peak) สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส วิธีที่นำเสนอในโครงงานนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสที่ลดทอนสัญญาณรบกวนให้ผ่านมาตรฐาน ราคาลดลง และมีขนาดเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

คำสำคัญ: วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง อินเวอร์เตอร์สามเฟส

A STUDY OF THREE PHASE EMI FILTER DESIGNS FOR
THREE PHASE INDUCTION MOTOR DRIVES
Academic Year 2016

By
Mr. Warathep Padungtin

Advisor
Assoc. Prof. Vuttipon Tarateeraseth, Ph.D

Abstract

Currently power electronic devices are widely found in industries and are the cause of three-phase electromagnetic interference (EMI). EMI filters are not needed but usability of the power electronic devices has to meet a standard. This research project studies three-phase conducted EMI filter designs in electrical power engineering. There are two previous methods for three-phase conducted EMI filters design. The first method calculates attenuation and cut-off frequency for selecting capacitors and inductors. Next method calculates the attenuation and impedance for selecting the capacitors and the inductors. Experimental results revealed that the first method cannot attenuate the EMI to meet the standard in a certain case, e.g. three-phase motor drives, and the next method has an inessential differential-mode (DM) component. This research project proposes a three-phase conducted EMI filters design method by eliminating the inessential DM component and to meet the requirement of CISPR 22 class A (Average) and CISPR 22 class B (Quasi-Peak) for the three-phase motor drives. Proposed method in this research project can be applied to design the three-phase EMI filters that meet a standard and have low prices and compact sizes for real usability in industries.

Keywords: Electromagnetic interference filter, Common-mode and Differential-mode signals, three-phase inverter.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศวกรรมนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างจัดทำโครงงานนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ประวัติ บุญมา ผู้จัดหาอุปกรณ์และให้คำปรึกษาเรื่องการทดลอง ตลอดจนชี้แนะโครงงานให้ไปในแนวทางที่ถูกต้องและเหมาะสม

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ท่านได้ให้ความรู้ ความร่วมมือในการให้ข้อมูล ความช่วยเหลือ และข้อเสนอแนะต่างๆ ให้กับคณะผู้จัดทำโครงงาน ทางคณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงงานวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงงานวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

ผู้จัดทำโครงงาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
รายการสัญลักษณ์	พ
ประมวลคำย่อ	ภ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 องค์ประกอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.3 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.3.1 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ	6
2.4.1 สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (Common-Mode Interference: CM)	6
2.4.2 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential-Mode Interference: DM)	7
2.5 หลักการพื้นฐานของวงจรกรอง (EMI Filter)	9
2.5.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ส่วนประกอบต่างๆ และคุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.6.1 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง	13
2.6.2 ตัวเก็บประจุ C_y	14
2.6.3 ตัวเก็บประจุ C_x	14
2.7 เครื่องมือและการติดตั้งที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ	15
2.7.1 Line Impedance Stabilization Network	15
2.7.2 Spectrum Analyzer	15
2.7.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	15
2.7.4 Current Probe	15
2.8 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวน (Attenuation Formulation)	16
2.9 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.9.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)	17
2.9.2 CISPR	18
2.9.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)	18
2.9.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen	19
3.1.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation)	19
3.1.2 การคำนวณหาความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency)	20
3.1.3 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ	20
3.2 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai	21
3.2.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation)	21
3.2.2 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ (Impedance)	21

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.3 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (Chokes) 22

3.3 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอ 23

3.3.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation) 23

3.3.2 การคำนวณหาองค์ประกอบโหมดผลร่วม (Common-mode element) 23

3.3.3 การคำนวณหาองค์ประกอบโหมดผลต่าง (Differential-mode element) 23

3.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Chokes design) 25

3.4.1 การเลือกขนาดขดลวดทองแดง (Dimensions of copper coils) 25

3.4.2 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (Chokes) 25

3.4.3 การหาจำนวนรอบในการพันขดลวด (Winding numbers) 25

3.4.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียว (Single-phase chokes design) 26

3.4.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด (Three-phase chokes design) 27

3.4.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common-mode choke) 28

3.4.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke) 29

3.5 การเลือกตัวเก็บประจุ (Capacitors) 30

3.5.1 ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Y-Capacitor) 31

3.5.2 ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (X-Capacitor) 31

3.6 การใช้งานโพรบกระแส (Current probe) 31

3.6.1 การใช้งานโพรบกระแสวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม 32

3.6.2 การใช้งานโพรบกระแสวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง 32

3.7 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) 34

3.8 รูปแบบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า 34

3.8.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen 34

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.8.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai 46

3.8.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีที่นำเสนอ 55

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 63

4.1 การทดลองการวัดผลสัญญาณรบกวนของวงจรกรองใน แต่ละรูปแบบในโหมดต่างๆ 64

4.2 การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ากับ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที 64

4.2.1 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวน 64

4.3 รูปแบบการทดลองการวัดสัญญาณรบกวน (EMI Filter) ในกรณีต่างๆ 66

4.3.1 การทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน 66

4.3.2 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ สามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen 67

4.3.3 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ สามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai 68

4.3.4 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ สามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ 69

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ในแต่ละกรณีที่ ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที 70

4.4.1 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen เทียบกับ เส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) 70

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.2 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) 75
4.4.3 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) 80
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทุกกรณีกับ CISPR 22 class A (Average) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที 85
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ากับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ในแต่ละกรณีที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที 89
4.6.1 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) 89
4.6.2 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) 94
4.6.3 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) 99
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทุกกรณีกับ CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที 104
4.8 ตารางวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 109
4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง 113

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.10 การเปรียบเทียบราคา (Baht) ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง 114

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 116

5.1 สรุปผลการทดลอง 116

5.2 ข้อเสนอแนะ 116

เอกสารอ้างอิง 117

ภาคผนวก ก 118

ภาคผนวก ข 121

ประวัติย่อผู้ทำโครงงาน 129

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม กรณี L_C= 0.86 mH 28

3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม กรณี L_C= 0.32 mH 28

3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง กรณี L_D= 1.3 μH 29

3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง กรณี L_D= 16.52 μH 30

3.5 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen 46

3.6 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai 55

3.7 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ 62

4.1 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common-mode noise) และโหมดผลต่าง (Differential-mode noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) 109

4.2 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (total noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) 110

4.3 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common-mode noise) และโหมดผลต่าง (Differential-mode noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) 111

4.4 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (total noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) 112

4.5 สรุปผลราคาอุปกรณ์ของโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง 115

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2	การเกิดสัญญาณรบกวนในรูปของกระแสไฟฟ้า	8
2.3	วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.4	วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบจริง	10
2.5	ทิศทางกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.6	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม	11
2.7	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง	12
2.8	ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง	13
2.9	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่ใช้จริง	13
2.10	ตัวเก็บประจุ C_y ที่ใช้จริง	14
2.11	ตัวเก็บประจุ C_x ที่ใช้จริง	14
2.12	ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่เกิดจากบริภัณฑ์ทดสอบ	16
2.13	ตัวอย่างสัญลักษณ์ของมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	18
3.1	ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบสามเฟส	24
3.2	ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียว	26
3.3	วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียวในระบบสามเฟส	26
3.4	ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด	27
3.5	วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด	27
3.6	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่ใช้จริง กรณี L_C= 0.86 mH	28
3.7	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่ใช้จริง กรณี L_C= 0.32 mH	29
3.8	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ใช้จริง กรณี L_D= 1.3 μH	29
3.9	ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ใช้จริง กรณี L_D= 16.52 μH	30
3.10	ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic capacitor)	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม (Film capacitor)	31
3.12	โพรบวัดกระแสที่ใช้งานจริง (Current Probe)	32
3.13	แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลร่วม	32
3.14	แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง1	33
3.15	แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง2	33
3.16	แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง3	33
3.17	การวัดสัญญาณรบกวนแบบผลรวม (Total noise)	34
3.18	แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen	35
3.19	กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมที่เกิดขึ้น ขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)	36
3.20	กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างที่เกิดขึ้น ขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)	36
3.21	กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และความถี่มุมของโหมดผลร่วม	38
3.22	กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และความถี่มุมของโหมดผลต่าง	39
3.23	กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมที่เกิดขึ้น ขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)	41
3.24	กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างที่เกิดขึ้น ขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)	41
3.25	กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) และความถี่มุมของโหมดผลร่วม	43
3.26	กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) และความถี่มุมของโหมดผลต่าง	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen ที่ใช้จริงในการทดลอง	46
3.28	แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai	47
3.29	วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส	49
3.30	วงจรสมมูลแบบใส่กับไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมแบบเฟสเดียว	49
3.31	วงจรสมมูลแบบใส่กับไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างแบบเฟสเดียว	50
3.32	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai ที่ใช้จริงในการทดลอง	55
3.33	แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ	56
3.34	การวัดค่าเส้นความเหนี่ยวนำรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบสามเฟสที่ใช้จริง	58
3.35	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอที่ใช้จริงในการทดลอง	62
4.1	แผนผังการทดลอง	64
4.2	การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส	65
4.3	แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส	65
4.4	ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส	66
4.5	ภาพด้านบนของการทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส	66

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.6 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen 67

4.7 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen 67

4.8 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai 68

4.9 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai 68

4.10 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ 69

4.11 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ 69

4.12 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 70

4.13 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 71

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	71
4.15	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	72
4.16	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	72
4.17	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	73
4.18	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)	74
4.20	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	75
4.21	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	76
4.22	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	76
4.23	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	77
4.25	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	78
4.26	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	78
4.27	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	79
4.28	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	80
4.29	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.30	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	81
4.31	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	82
4.32	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	82
4.33	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	83
4.34	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	83
4.35	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.36	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	85
4.37	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	86
4.38	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	86
4.39	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	87
4.40	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	87
4.41	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	88
4.42	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.43 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter) 89

4.44 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับ เส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 90

4.45 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับ เส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 90

4.46 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับ เส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 91

4.47 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับ เส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 91

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.48 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 92

4.49 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 2 เทียบกับกราวด์ ($_{VL2-G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 92

4.50 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 3 เทียบกับกราวด์ ($_{VL3-G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 93

4.51 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter) 93

4.52 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter) 94

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	95
4.54 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	95
4.55 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	96
4.56 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	96
4.57 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	97

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.58	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	97
4.59	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดย ใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)	98
4.60	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	99
4.61	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	100
4.62	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	100
4.63	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	101

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.64	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	101
4.65	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	102
4.66	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	102
4.67	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)	103
4.68	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	104
4.69	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	105
4.70	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	105

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.71	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	106
4.72	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	106
4.73	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	107
4.74	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	107
4.75	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)	108
4.76	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ	113
4.77	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบราคาของการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ	114

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภาคผนวก ข 1 วงจรสมมูลแบบสามเฟสขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	122
ภาคผนวก ข 2 วงจรสมมูลขณะไม่ใส่กับใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม	122
ภาคผนวก ข 3 วงจรสมมูลขณะไม่ใส่กับใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง	125

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
V_{CM}	แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลร่วม	V
V_{DM}	แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง	V
V_{LG}	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไลน์เทียบกับกราวด์	V
V_{NG}	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายนิวทรัลเทียบกับกราวด์	V
I_{CM}	กระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม	A
I_{DM}	กระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง	A
A_{dB}	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวน	dBμV
$V_{o,wo}$	แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกขณะไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน	V
$V_{o,w}$	แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน	V
$A_{TT\text{-}CM}$	อัตราการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลร่วม	dBμV
$A_{TT\text{-}DM}$	อัตราการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง	dBμV
Limit	เส้นของแรงดันรบกวนที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน	dBμV
$f_{CM,con}$	ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลร่วม	Hz
$f_{DM,con}$	ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง	Hz
f_{CM}	ค่าความถี่โหมดผลร่วม	Hz
f_{DM}	ค่าความถี่โหมดผลต่าง	Hz
L_C	ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม	H
L_D	ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง	H
C_y	ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม	F
C_X	ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง	F
$Z_{L,CM}$	ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม	Ω
$Z_{L,DM}$	ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง	Ω
R_{load}	ค่าความต้านทานของ LISN	Ω
L_{lk}	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่วัดจากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม	H
L	ค่าความเหนี่ยวนำ	H
N	จำนวนรอบของขดลวด	turn
A	พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก	m^2

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
l	ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก	m
μ_0	ความซึมซาบของสุญญากาศ	H/m
μ_r	ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์	H/m

ประมวลคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
EMS	Electromagnetic Susceptibility
CM	Common-Mode Interference
DM	Differential-Mode Interference
LISN	Line Impedance Stabilization Network
FCC	Federal Communications Commission
CISPR	International Special Committee on Radio Interference
IEC	International Electrotechnical Commission
EUT	Equipment Under Test
VCCI	Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

เนื่องด้วยกาลเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์กำลังได้มีบทบาทเข้ามาในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา รวมถึงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่ง เป็นต้น ซึ่งมีการพัฒนา ปรับปรุงระบบและวงจรให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น แต่การใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์กำลังมักมีปัญหาเกิดขึ้น คือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) จึงควรที่จะต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เพื่อการพัฒนาใช้วงจรอิเล็กทรอนิคส์กำลังอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงตั้งแต่เริ่มต้นออกแบบวงจร เพราะเมื่อพบปัญหานี้ในภายหลังจะป้องกันและแก้ไขได้ยาก เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์กำลังทำงานได้ดีในสภาวะแวดล้อมจริงหรือทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้เป็นอย่างดีไม่แพร่สัญญาณรบกวนซึ่งกันและกันหรือที่เรียกว่า ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility : EMC) ที่จะแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์แต่ละชิ้นในการทำงานอย่างปกติภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำนับเป็นเครื่องต้นกำลังที่มีความสำคัญมากในงานอุตสาหกรรม ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเราควรคำนึงถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเป็นสำคัญ โดยผลกระทบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเราจึงต้องออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (http://www.radio-electronics.com/info/circuits/emc-emi/tutorial-basics-summary.php)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส จาก 2 งานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.2.3 เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟสใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส จากวิธีการออกแบบวงจรกรอง 3 วิธี

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส ใช้องค์ประกอบแบบพาสซีฟ (Passive)

1.3.2 วงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส ใช้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

1.3.3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส ใช้ย่านความถี่ 150 kHz - 30MHz ในการทำการทดลอง

1.3.4 ผลการทดลองใช้การเปรียบเทียบที่อ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และ CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส ในย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz

1.4.2 ทำให้ทราบวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบสามเฟส ให้ผ่านมาตรฐาน

1.4.3 สามารถออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ใช้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้

1.4.4 เปรียบเทียบขนาดอุปกรณ์ ค่าพารามิเตอร์ และความเหมาะสมในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเพื่อใช้ในเงื่อนไขต่างๆ

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการศึกษาที่มาของโครงงาน และจะกล่าวถึงการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ Common-Mode chokes และ Differential-Mode chokes ในรูปแบบต่าง ๆ โดยจะเน้นการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำในช่วงความถี่ (150 kHz – 30 MHz)

2.1 บทนำ

ปัญหาที่มักจะเกิดความเสียหายหรือทำให้เกิดความผิดพลาดกับการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สาเหตุเกิดจากสัญญาณรบกวนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณแพร่กระจายในอากาศหรือ เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นตามสายตัวนำ ซึ่งจะส่งผลกระทบกับระบบนำทางคลื่นวิทยุ ทำให้ความชัดเจนของสัญญาณลดลง และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility: EMC) ลดลงด้วย

EMC คือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility) หมายถึงความสามารถของอุปกรณ์ (device) เครื่องมือ (equipment) หรือระบบ (system) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสีย หรือผลกระทบใดๆต่ออุปกรณ์เครื่องมือ หรือ ระบบที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน

EMI คือ การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference) หมายถึงการที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบเกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

EMS คือ ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility) การที่อุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบไม่สามารถทำงานได้ปกติในสภาพแวดล้อม ที่มีการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือกล่าว คือ การขาดภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีวิทยุและโทรทัศน์ เป็นต้น (http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

2.2 องค์ประกอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

องค์ประกอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เครื่องส่งวิทยุ ผลจากการเกิดฟ้าผ่าวงจร คอมพิวเตอร์และระบบต่อพ่วง วงจรจุดระเบิด เป็นต้น

ส่วนที่ 2 : ส่วนรับผลการรบกวน (Receptor หรือ victim) เช่น วงจรตรวจจับสัญญาณ เครื่องรับวิทยุ คอมพิวเตอร์ สิ่งมีชีวิต เป็นต้น ในส่วนนี้ค่อนข้างจะมีความไวต่อการรับสัญญาณมาก

ส่วนที่ 3 : ส่วนคู่ควบ (Coupling) เป็นสัญญาณรบกวนที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนที่ 1 กับส่วนที่ 2 ซึ่งจะเชื่อมต่อกันโดยการแพร่กระจายไปโดยการแพร่กระจายทางอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ หรือการส่งสัญญาณผ่านไปทางสายตัวนำ

สำหรับรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับซึ่งผลกระทบสามารถสรุปได้ดังนี้

- รูปแบบที่ 1 : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบโดยตรง

- รูปแบบที่ 2 : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุมที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยที่สายเคเบิลดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ

- รูปแบบที่ 3 : สายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ

- รูปแบบที่ 4 : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่เชื่อมต่อถึงกันกับตัวรับผลกระทบ

- รูปแบบที่ 5 : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เกิดการเหนี่ยวนำไปยังสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไหร่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น

(http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

2.3 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

แบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการรบกวนทางความถี่วิทยุ (Radio Frequency disturbance) จัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz ที่แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

2.3.1.1 ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz

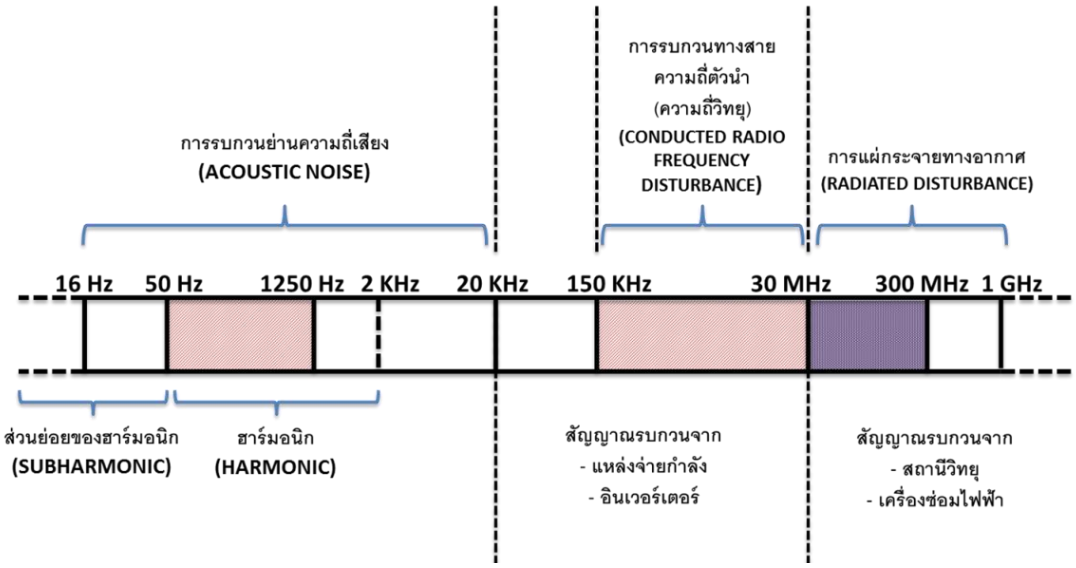
เป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่จะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (Volt : V) หรือกระแสไฟฟ้า (Ampere : A)

2.3.1.2 ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz

เป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ที่จะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m) หรือระนาบคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (plane wave : W/m2) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น (r/λ)

2.3.1.3 ย่านความถี่ 0 Hz ถึงประมาณ 2 kHz เป็นความถี่ต่ำ

หรือที่เรียกว่า “ฮาร์มอนิกส์” (Harmonics) ส่งผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) และยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย



รูปที่ 2.1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยเราจะศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) เครื่องมือ หรือระบบบางประเภท สามารถเป็นทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและส่วนรับผลกระทบ ซึ่งเส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังส่วนรับผลกระทบแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 การแพร่กระจาย (Radiation) หรือการควบคู่โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ แบบที่ 2 การควบคู่ผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

2.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ คือ สัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในวงจรแพร่ผ่านมาทางสายตัวนำไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง ในช่วงความถี่ 150 kHz – 30 MHz ซึ่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังได้แบ่งสัญญาณรบกวนออกเป็น 2 แบบ คือ สัญญาณรบกวนกระแสและสัญญาณรบกวนแรงดัน โดยการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำนั้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง (Differential-Mode Interference : DM) และการเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม (Common-Mode Interference : CM) ซึ่งจะเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำได้ก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมโยงพลังงานการเกิดสัญญาณรบกวนไปสู่ส่วนรับผลกระทบ โดยที่การเชื่อมโยงและการแพร่กระจายการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำจะมี 2 แบบ คือ การเชื่อมโยงด้วยตัวเก็บประจุ และการเชื่อมโยงด้วยการเหนี่ยวนำการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ (http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

2.4.1 สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (Common-Mode Interference : CM)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของจังหวะการสวิตช์ของสัญญาณแม่เหล็ก เช่น สถานะ การเปิด-ปิดของสัญญาณ PWM ทำให้เกิดการรั่วไหลผ่านค่าประจุแฝงของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ลงสู่กราวด์ หรือเป็นประจุแฝงที่ตำแหน่งอื่นๆของวงจร ดังนั้นการเชื่อมโยงของสัญญาณนี้จะเป็นการเชื่อมโยงผ่านตัวเก็บประจุเกิดการเก็บและการคายประจุขึ้น โดยสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมจะทำให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ (ไลน์กับนิวทรัล) เทียบกับสายกราวด์ ซึ่งจะมีกระแสไหลทางสายตัวนำและไหลกลับทางกราวด์ สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม เกิดจากการเชื่อมโยงผ่านตัวเก็บประจุแฝง โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝงไปยังตัวนำที่อยู่ติดกันอีกตัวหนึ่ง และถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุลงสู่กราวด์จะเกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมที่สายตัวนำ (ไลน์กับนิวทรัล) โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักจะเกิดจากหม้อแปลงความถี่สูงที่อยู่ในแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิ่ง ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common-mode voltage) หาได้จากสมการที่ 2.1

$$V_{CM}=\frac{V_{LG}+V_{NG}}{2} \tag{2.1}$$

โดย V_{CM} คือ แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลร่วม

V_{LG} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไลน์เทียบกับกราวด์

V_{NG} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายนิวทรัลเทียบกับกราวด์

2.4.2 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential-Mode Interference: DM)

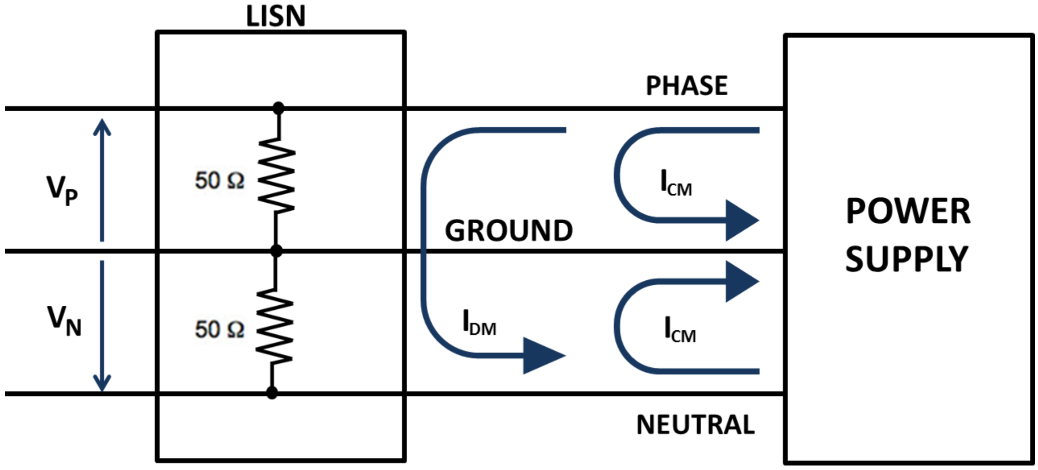
คือสัญญาณรบกวนจะเกิดขึ้นที่ตัวนำของสายส่งระหว่างตัวนำส่งและตัวนำรับทางเดินของการเกิดสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะเป็นวงจรแบบปิดหรือลูป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเชื่อมโยงไปสู่วงจรใกล้เคียง การเชื่อมโยงนี้จะเป็นการเชื่อมโยงแบบการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง หรือที่เรียกว่า สัญญาณรบกวนโหมดปกติ เป็นความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กระหว่างสายตัวนำซึ่งจะมีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรไปยังโหลดและผ่านกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนโดยไม่ผ่านทางกราวด์ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential-mode voltage) หาได้จากสมการที่ 2.2

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

โดย V_{DM} คือ แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง

V_{LG} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายไลน์เทียบกับกราวด์

V_{NG} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายนิวทรัลเทียบกับกราวด์



รูปที่ 2.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในรูปของกระแสไฟฟ้า

จากรูปแสดงถึงแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply) ที่เชื่อมต่อกับความต้านทานโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) หรือเรียกสั้นๆว่า “ลิซึ่น” ซึ่งตัวโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะทำหน้าที่รักษาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าคงที่เท่ากับ 50 Ω ในย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz โดยแหล่งจ่ายกำลัง เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าในรูปของสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมและสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง (http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

แรงดันของสัญญาณรบกวนรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างสายไลน์เทียบกับกราวด์

$$V_{LG}=(I_{CM}+I_{DM})\times 50 \tag{2.3}$$

แรงดันของสัญญาณรบกวนรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างสายนิวทรัลเทียบกับกราวด์

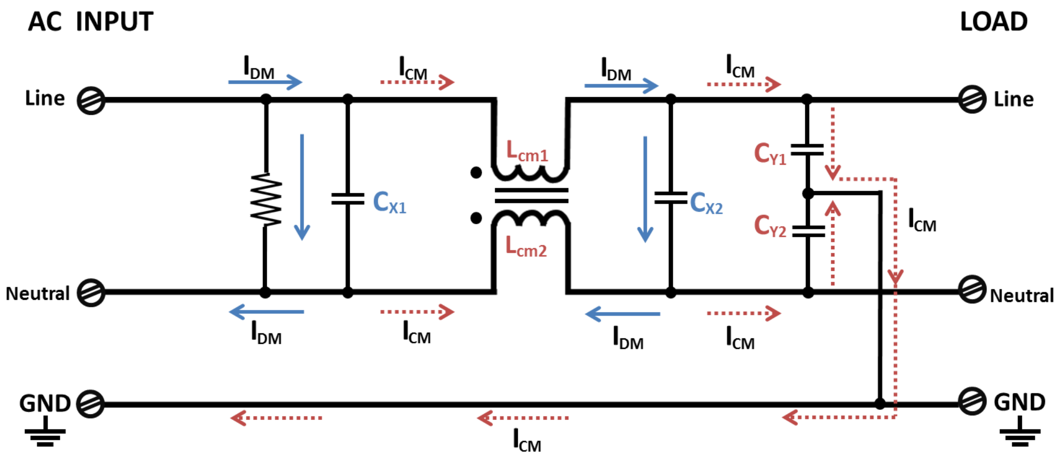
$$V_{NG}=(I_{CM}+I_{DM})\times 50 \tag{2.4}$$

2.5 หลักการพื้นฐานของวงจรกรอง (EMI Filter)

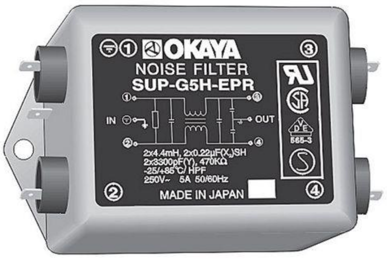
วงจรกรอง (Filter) คือ วงจรที่ใช้กรองสัญญาณที่ให้เฉพาะความถี่ที่ต้องการใช้ผ่านออกมาได้ ส่วนความถี่ที่ไม่ต้องการให้ผ่านจะถูกลดทอน (Attenuate) จนหมดไป วงจรกรองที่ใช้งานมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ วงจรกรองแบบพาสซีฟ (Passive) จะใช้อุปกรณ์ประเภทความต้านทานตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ และวงจรกรองแบบแอกทีฟ (Active) จะรวมถึงทรานซิสเตอร์ (Transistor) และออปแอมป์ (Op-Amp) (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

2.5.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) คือ วงจรกรองที่ใช้สำหรับลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆหรืออุปกรณ์กำลังไฟฟ้า ในย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะการทำงาน ดังรูปที่ 2.4 สำหรับโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีโครงสร้าง คือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างจะไม่เหมือนกัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะทิศทางการไหลของกระแสสัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดไม่เหมือนกัน

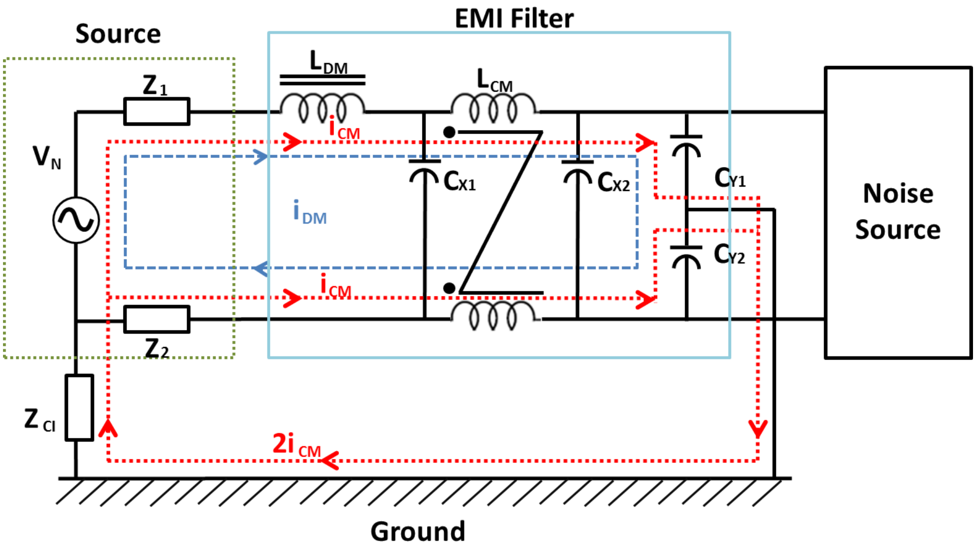


รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบจริง
ที่มา: www.directindustry.com

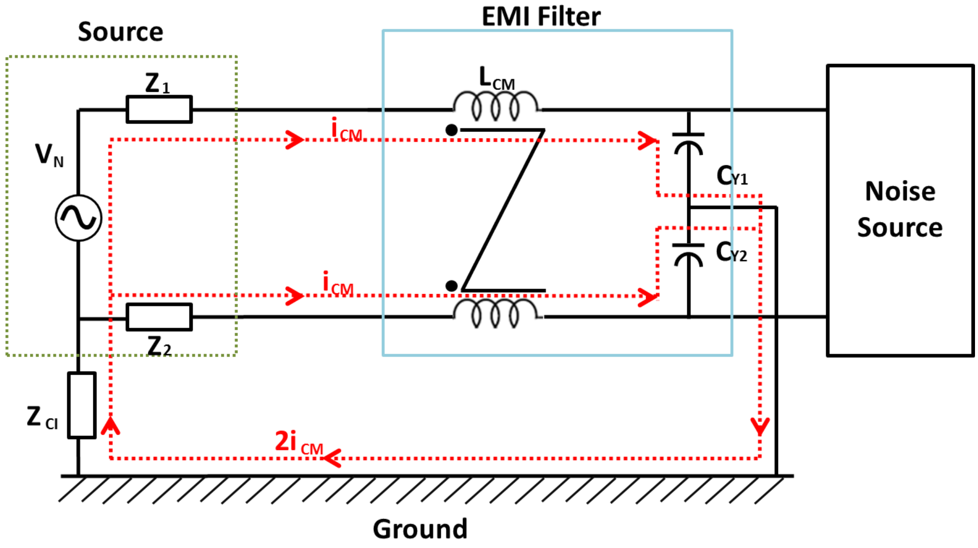
ในการอธิบายการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้ทฤษฎีการเกิดสัญญาณรบกวน รูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างๆ จะสามารถอธิบายโหมดการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนได้ดังรูปที่ 2.5 จะแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 ทิศทางกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

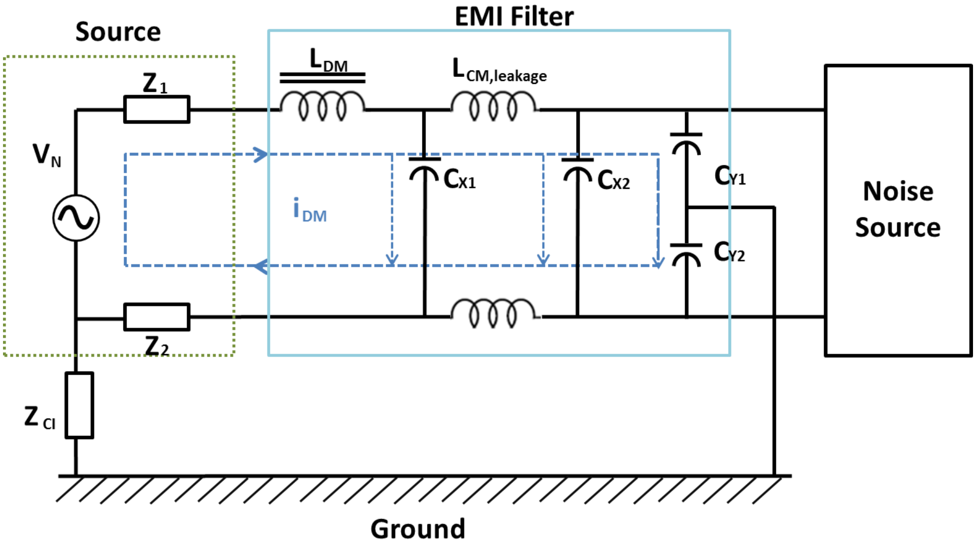
เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common mode current : i_{CM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common mode inductance: L_{CM}) และตัวเก็บประจุ C_Y ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และผ่านตัวเก็บประจุแฝงลงกราวน์ดังในรูปที่ 2.7 และจากรูปเมื่อกระแสโหมดผลร่วมไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนจะมองเห็นตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} 1 ตัว ที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะมีผลในการลดทอน

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง เพราะกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ I = V/Z เมื่อ Z = XL = 2πfL และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่ามากขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านลดลง เพราะฉะนั้นจึงสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงได้ ส่วนตัวเก็บประจุ C_y จะเห็นว่ากระแสโหมดผลร่วมจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_y ทั้ง 2 ตัว ลงกราวน์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วมจะมีองค์ประกอบ 2 ตัว ที่จะช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม คือ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} และตัวเก็บประจุ C_Y



รูปที่ 2.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม

เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode current : i_{DM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง จะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านสายตัวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential mode : L_{DM}) และตัวเก็บประจุ C_X แล้วไหลกลับครอบวงจรผ่านสายนิวตรอน โดยจะไม่ไหลผ่านกราวน์ดังในรูปที่ 2.8 และจากรูปจะเห็นว่ากระแสโหมดผลต่างที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} เกิดการหักล้างกันทำให้ไม่มีผลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} อย่างไรก็ตามที่ตัวเหนี่ยวนำโหมด L_{CM} นั้นก็ยังคงมีผลของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance: $L_{leakage}$) ของตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} อยู่ ดังในรูป 2.7 ส่วนตัวเก็บประจุ C_X ทั้ง 2 ตัว ที่ต่ออนุกรมอยู่ จะมีผลเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ i = V/Z เมื่อ Z = XC = 1/2πfC ที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่ามากทำให้กระแสที่ไหลผ่านน้อยทำให้สามารถลดลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในในย่านความถี่ต่ำได้ และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่าลดลงทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในในย่านความถี่สูงได้

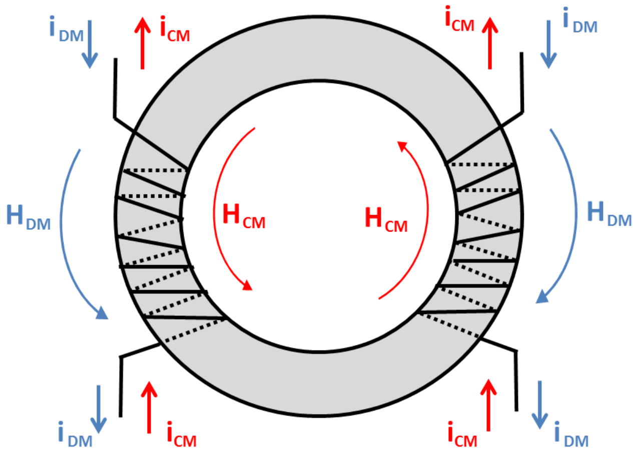


รูปที่ 2.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมมีหน้าที่หลักๆ คือการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม คือจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมไหลผ่าน อย่างไรก็ตามค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล $L_{leakage}$ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างได้เช่นกัน เพราะตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} เกิดจากการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันบนแกนเดียวกัน โดยถ้าการพันดังกล่าวพันแบบชิดติดกันก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าน้อย ก็จะเป็นผลทำให้การกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้น้อยเช่นกัน ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำร่วมจึงนิยมพันขดลวดแบบไม่ชิดติดกัน เพื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลและลดผลของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว จะมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี แต่เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ จึงมีปัญหาเรื่องขนาด น้ำหนักและราคาที่ใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (http:// doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/73026)

2.6 ส่วนประกอบต่างๆ และคุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.1 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง



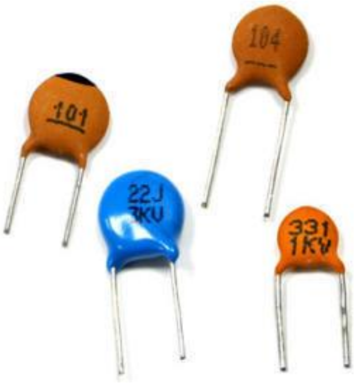
รูปที่ 2.8 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

รูปที่ 2.9 ตัวเหนี่ยวโหมดผลร่วมนำที่ใช้จริง
ที่มา: http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/73026

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (common mode choke) จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง และในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมจะมีค่าเหนี่ยวนำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ซึ่งโครงสร้างของแกนแม่เหล็กที่ใช้เป็นแบบแกนทอร์รอยด์ (Toroidal core) ชนิดเฟอร์ไรต์ เพราะแกนแม่เหล็กชนิดนี้จะมีค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์สูง มีขนาดเล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนแม่เหล็กต่ำ จึงเหมาะในการใช้พันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม และในการพันเส้นลวดตัวนำบนแกนทอร์รอยด์ สามารถทำได้ง่าย โดยการพันขดลวดตัวนำสองขดและจะต้องมีช่องว่างระหว่างขอลวดตัวนำ ก็เพื่อความปลอดภัยเพราะจะเป็นการแยกกันระหว่างสาย

ตัวนำกับสายกราวน์ ดังในรูปที่ 2.9 จากรูปจะแสดงทิศทางของกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง รวมทั้งทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก จะเห็นว่าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วมผลของเส้นแรงแม่เหล็กโหมดผลร่วม H_{CM} จะมีทิศทางเสริมกันแต่เมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กโหมดผลต่าง H_{DM} จะหักล้างกัน

2.6.2 ตัวเก็บประจุ C_y



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุ C_y ที่ใช้จริง
ที่มา: http://phchitchai.wbvschool.net/archives/1256

ตัวเก็บประจุ (Y Capacitor: C_y) ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากเซรามิก (ceramic) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและค่าเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่สูงและในรูปที่ 2.11 จะแสดงตัวเก็บประจุ C_y ที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ

2.6.3 ตัวเก็บประจุ C_x

รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุ C_x ที่ใช้จริง
ที่มา: https://www.alibaba.com/product-detail/

ตัวเก็บประจุ C_x ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากโพลีสทีรีน (Polystyrene) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่จะมีค่าน้อยมากๆ (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

2.7 เครื่องมือและการติดตั้งที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีเครื่องมือที่ใช้วัดอยู่หลักๆด้วยกัน 4 เครื่องมือ

2.7.1 Line Impedance Stabilization Network

เป็นเครื่องวัดสัญญาณอิมพีแดนซ์ สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางสายตัวนำโดยจะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนกับโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) LISN จะใช้ในการวัดสัญญาณที่บิดเบือนของอุปกรณ์ไฟฟ้า และยังทำหน้าที่คล้ายเสาอากาศที่วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางอากาศซึ่งจะเป็นไปตาม Electromagnetic Compatibility “ EMC” ที่ได้จำกัดวงหรือระดับสัญญาณการบิดเบือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในคลื่นความถี่ทดสอบ 9kHz ถึง 30MHz (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

2.7.2 Spectrum Analyzer

เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางสเปคตรัมของคลื่นไฟฟ้า ที่อาศัยหลักการของการวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analysis) เข้ามาใช้ กล่าวคือ สมมติสัญญาณที่เราต้องการวัดเกิดมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเราก็จำเป็นที่จะต้องกรองสัญญาณรบกวนออกไปแต่ถ้าเราไม่รู้ว่าสัญญาณรบกวนมีความถี่เท่าไหร่เราก็ไม่สามารถออกแบบวงจรกรอง (Filter) ได้ว่าให้คัตออฟความถี่ (Cut-off frequency) เท่าใด ดังนั้นเมื่อเรานำสัญญาณมาหาสเปกตรัมเราก็จะรู้ได้แล้วว่าสัญญาณเหล่านั้นมีความถี่เท่าไหร่บ้าง โดยเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมจะแสดงผลของสเปกตรัมในช่วงย่านแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรกรองเท่านั้นจะกำหนดโดยผู้ใช้

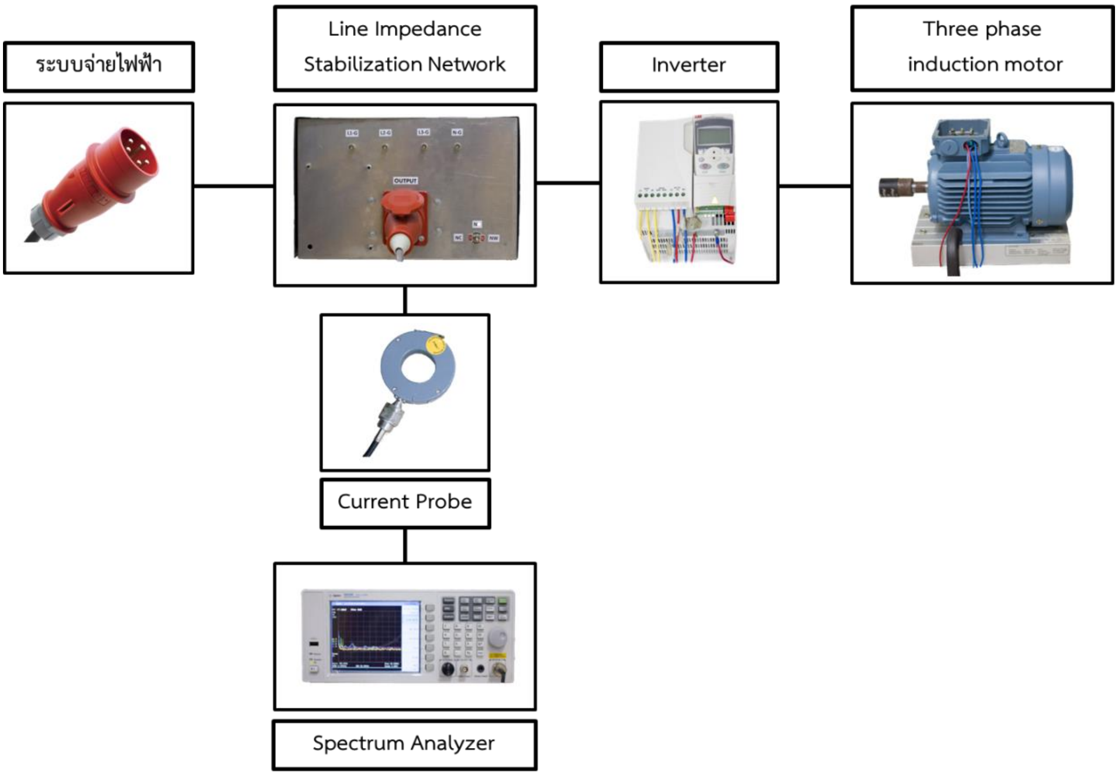
2.7.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

จะแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นซายน์ (Sine wave) แต่เอาท์พุตของInverterจะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปซายน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ Three-phase induction motor

2.7.4 Current Probe

โดยทั่วไปจะมี 2 ชนิด คือ AC Current Probe ซึ่งจะใช้โพรบชนิดพาสซีฟ และAC/DC Current Probe โดยทั่วไปจะเป็นชนิดแอฟทีฟ ซึ่งโพรบทั้ง 2 ชนิดนั้นจะใช้หลักการของหม้อแปลงทำการแปลงแรงดันมาจากการตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆลวดตัวนำนั้น การทำงานของหลักการนี้คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบลวดตัวนำนั้นซึ่งมีขนาดและ

ทิศทางตัดกับการไหลกระแสไฟฟ้าและเมื่อนำขดลวดไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กนั้น จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดนั้นๆ



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่เกิดจากบริภัณฑ์ทดสอบ

2.8 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวน (Attenuation Formulation)

ขั้นตอนการหาอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนนั้นจะใช้การหาค่าความสามารถของวงจรในการลดทอนสัญญาณรบกวนว่ามีประสิทธิภาพในการลดทอนได้มากน้อยเพียงใด จากสมการที่ 2.5 (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

$$A_{dB} = 20\log_{10}\left[\frac{V_{o,wo}}{V_{o,w}}\right] \tag{2.5}$$

โดย A_{dB} คือ อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวน (dB)

$V_{o,wo}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกขณะไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (V)

$V_{o,w}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (V)

2.9 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารก่อให้เกิดทั้งผลดีและผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นเพื่อช่วยให้ผู้ผลิตและผู้ใช้เครื่องมือสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นธรรม ไม่เกิดปัญหาด้านการใช้งาน มีความปลอดภัยหน่วยงานต่างๆจึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังนี้ (http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach)

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: https://www.techtalkthai.com/standards-and-markings-for-it-products/

2.9.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)

FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission เป็นองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (Wire and radio communications) ก่อตั้งในปี พ.ศ. ๒๔๗๐ สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (Radio-frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (Telephone network) สำหรับ Part 15 จะแบ่งมาตรฐานออกเป็นสี่ฉบับ และนิยามความหมายของอุปกรณ์ความถี่วิทยุว่าหมายถึงอุปกรณ์ใดๆก็ตามที่การทำงานก่อให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ(Radio-frequency energy)ได้ทั้งทางสาย (Conduction) หรือทางอากาศ (Radiation) FCC ได้นิยามพลังงานความถี่วิทยุ (Energy in the radio frequency range) ว่าเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ (9kHz ถึง 3000 GHz) โดยมีจุดประสงค์ ในการออกมาตรฐาน เพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (Transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้รับใบอนุญาตในการติดตั้ง (Radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อการติดต่อสื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (Radio communications) อุปกรณ์ดิจิตอล (Digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดนี้

2.9.2 CISPR

CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (ซึ่งมาจากคำเต็มในภาษาฝรั่งเศสคือ Comite International Special des Perturbations Radioelectrique) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. ๒๔๗๖ เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ หลายๆประเทศ ได้นำมาตรฐาน CISPR มาดัดแปลงใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานบังคับใช้ สำหรับแต่ละประเทศ ประเทศไทยได้นำมาตรฐานนี้ มาปรับใช้ เช่นมาตรฐานของบริภัณฑ์ส่องสว่าง ได้จากการนำมาตรฐาน CISPR 15 มาดัดแปลงใช้งานมาตรฐาน CISPR หลัก เช่น CISPR Publication 22 ถูกกำหนดขึ้นเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องกับบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (Digital electronics) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๒๘ หลังจากนั้นหลายๆประเทศได้นำมาตรฐานดังกล่าวมาปรับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติ (national standard) อาทิ ประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI (Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment) โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

2.9.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)

MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออก โดยหน่วยทางการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ มาตรฐานดังกล่าว จะมีรายละเอียดและเข้มข้นกว่า FCC เพราะมาตรฐาน ดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า” และย่านความถี่ที่พิจารณายังกว้างกว่าด้วย (30 Hz – 40 GHz)

2.9.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟ ฟ้าสำหรับประเทศไทยได้มีนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๔๑ โดยได้มีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้วได้แก่ มอก. ๑๙๕๕-๒๕๔๒ (บริภัณฑ์ส่องสว่างและบริภัณฑ์ที่คล้ายกัน: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และมอก. ๑๙๕๖-๒๕๔๒ (บริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) อนึ่งมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้าน ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของ IEC (International Electrotechnical Commission)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส ประกอบไปด้วย วิธีการคำนวณหลายๆรูปแบบ สำหรับโครงงานนี้ได้ศึกษาวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้ 3 วิธีที่แตกต่างกัน

3.1 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

สำหรับการออกแบบในวิธีนี้จะเป็นการหาองค์ประกอบ LC ในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง หลักการสำคัญของวิธีนี้คือการหาความถี่คัตออฟ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter Design) สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้ (Fu-Yuan Shih. 1996)

3.1.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation)

3.1.1.1 โหมดผลร่วม (Common-Mode)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6 \qquad (3.1)$$

เมื่อ $A_{TT\text{-}CM}$ คือ อัตราการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลร่วม

V_{CM} คือ แรงดันรบกวนขององค์ประกอบโหมดผลร่วม (dBμV)

Limit คือ เส้นของแรงดันรบกวนที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน (dBμV)

6 คือ ค่าเผื่อจากเส้นมาตรฐาน (dBμV)

3.1.1.2 โหมดผลต่าง (Differential-Model)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6 \qquad (3.2)$$

เมื่อ A_{TT-DM} คือ อัตราการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง

V_{DM} คือ แรงดันรบกวนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง (dBμV)

Limit คือ เส้นของแรงดันรบกวนที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน (dBμV)

6 คือ ค่าเผื่อจากเส้นมาตรฐาน (dBμV)

3.1.2 การคำนวณหาความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency)

3.1.2.1 โหมดผลร่วม (Common-Mode)

$$f_{CM,con} = \frac{f_{CM}}{10^{\frac{A_{TT-CM}}{40}}} \tag{3.3}$$

เมื่อ $f_{CM,con}$ คือ ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลร่วม (Hz)

f_{CM} คือ ค่าความถี่แรกที่เกินเส้นมาตรฐานในโหมดผลร่วม (Hz)

A_{TT-CM} คือ ความต้องการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลร่วม

3.1.2.2 โหมดผลต่าง (Differential-Mode)

$$f_{DM,con} = \frac{f_{DM}}{10^{\frac{A_{TT\text{-}DM}}{40}}} \tag{3.4}$$

เมื่อ $f_{DM,con}$ คือ ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง (Hz)

f_{DM} คือ ค่าความถี่แรกที่เกินเส้นมาตรฐานในโหมดผลต่าง (Hz)

A_{TT-DM} คือ ความต้องการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง

3.1.3 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (Chokes)

3.1.3.1 โหมดผลร่วม (Common-Mode)

$$L_C = \frac{1}{3C_y(2\pi f_{CM,con})^2} \tag{3.5}$$

เมื่อ L_C คือ ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (H)

C_y คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (F)

$f_{CM,con}$ คือ ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลร่วม (Hz)

3.1.3.2 โหมดผลต่าง (Differential-Mode)

$$L_D = \frac{1}{2C_x(2\pi f_{DM,con})^2} \tag{3.6}$$

เมื่อ L_D คือ ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (H)

C_X คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (F)

$f_{DM,con}$ คือ ค่าความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง (Hz)

3.2 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

สำหรับการออกแบบในวิธีนี้จะเป็นการหาองค์ประกอบ LC ในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง หลักการสำคัญของวิธีนี้คือการใช้ค่าของอิมพิแดนซ์ (Impedance) ที่ R_{LISN} ซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้ (Po-Shen Chen. 2010)

3.2.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation)

สามารถหาได้จากสมการ (3.1) และ (3.2)

3.2.2 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ (Impedance)

3.2.2.1 โหมดผลร่วม (Common-Mode)

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3} \tag{3.7}$$

เมื่อ $Z_{L,CM}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Ω)

$A_{TT\text{-}CM}$ คือ ความต้องการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลร่วม

C_y คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (F)

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

R_{load} คือ ค่าความต้านทานของ LISN (Ω)

3.2.2.2 โหมดผลต่าง (Differential-Mode)

$$Z_{L,DM} = \left| \frac{(A_{TT\text{-}DM} - 1)\left(\frac{1}{2\pi f C_x}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{2\pi f C_x}\right)(2R_{load})}{\frac{1}{2\pi f C_x} + 2R_{load}} \right| \tag{3.8}$$

เมื่อ $Z_{L,DM}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Ω)

$A_{TT\text{-}DM}$ คือ ความต้องการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง

C_x คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Ω)

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

R_{load} คือ ค่าความต้านทานของ LISN (Ω)

3.2.3 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (Chokes)

3.2.3.1 โหมดผลร่วม (Common-Mode)

$$L_C = \frac{Z_{L,CM}}{2\pi f} \tag{3.9}$$

เมื่อ L_C คือ ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (H)

$Z_{L,CM}$ คือ อิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Ω)

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

3.2.3.2 โหมดผลต่าง (Differential-Mode)

$$L_D = \frac{Z_{L,DM}}{2(2\pi f)} \tag{3.10}$$

เมื่อ L_D คือ ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (H)

$Z_{L,DM}$ คือ อิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Ω)

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

3.3 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอ

สำหรับการออกแบบในวิธีนี้จะเป็นการหาองค์ประกอบ LC ในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง หลักการจะใช้วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai ที่กล่าวมาข้างต้น ความแตกต่างคือจะไม่ใส่ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) แต่จะใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Leakage Inductance of L_C) แทนด้วย L_{lk} ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างแทนการใช้ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) และค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบ C_x การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้ (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

3.3.1 การคำนวณหาอัตราลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วมสามารถหาได้จากสมการ (3.1) และอัตราการลดทอนโหมดผลต่างสามารถหาได้จากสมการ (3.2)

3.3.2 การคำนวณหาองค์ประกอบโหมดผลร่วม (Common-mode element)

3.3.2.1 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ (Impedance) สามารถหาได้จากสมการ (3.7)

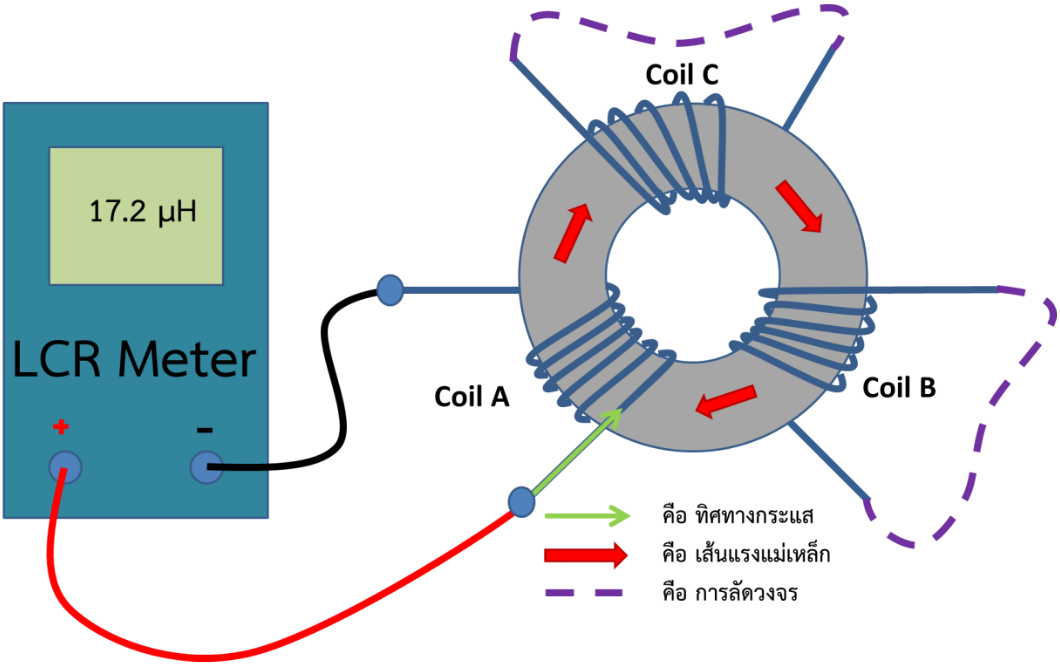
3.3.2.2 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการ (3.9)

3.3.3 การคำนวณหาองค์ประกอบโหมดผลต่าง (Differential-mode element)

3.3.3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบสามเฟส (Three phase Common-mode Choke Measurement)

สามารถวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลได้ โดยใช้ LCR Meter วัดที่ขดขวดใดขดลวดหนึ่งแล้วทำการลัดวงจร (Short circuit) ขดลวดที่เหลืออยู่ ค่าที่ได้จากการวัดคือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล

(Leakage Inductane : L_{lk}) โดยค่าที่ได้นี้จะนำมาใช้แทนค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke : L_D) สำหรับการวัดค่า L_{lk} จะแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบสามเฟส

3.3.3.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง

$$Z_{L,DM} = 2(2\pi f)L_{lk} \tag{3.11}$$

เมื่อ $Z_{L,DM}$ คือ อิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Ω)

L_{lk} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่วัดจากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (H)

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

3.3.3.3 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_x)

$$C_x = \frac{2(A_{TT-DM}-1)}{(2\pi f)(Z_{L,DM}+2(2R_{load})+\sqrt{(Z_{L,DM}+2(2R_{load}))^2+4(A_{TT-DM}-1)(2R_{load}Z_{L,DM}))}} \tag{3.12}$$

เมื่อ C_x คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Ω)

$Z_{L,DM}$ คือ อิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Ω)

$A_{TT\text{-}DM}$ คือ ความต้องการลดทอนขององค์ประกอบโหมดผลต่าง

f คือ ความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้นมาตรฐาน (Hz)

R_{load} คือ ค่าความต้านทานของ LISN (Ω)

3.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Chokes design)

3.4.1 การเลือกขนาดขดลวดทองแดง (Dimensions of copper coils)

ในการใช้งานขดลวดที่ใช้สำหรับการพัน ขดลวดเลือกจากขนาดของค่ากระแสที่ใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้ในระบบ ในการคำนวณหาขดลวดมีกระแสคือ 3.1 A โดยจะใช้พิกัดเผื่อไป 25% เพื่อความปลอดภัยจะได้ 3.1 x 1.25 = 3.875 A ≈ 3.9 A ซึ่งขนาดขดลวดที่เลือกใช้คือเบอร์ 16 ตามมาตรฐาน S.W.G

3.4.2 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (Chokes)

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A N^2}{l} \tag{3.13}$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (H)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (m^2)

l คือ ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก (m)

μ_0 คือ ความซึมซาบของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (H/m)

3.4.3 การหาจำนวนรอบในการพันขดลวด (Winding numbers)

$$N = \sqrt{\frac{Ll}{\mu_0 \mu_r A}} \tag{3.14}$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (H)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (m^2)

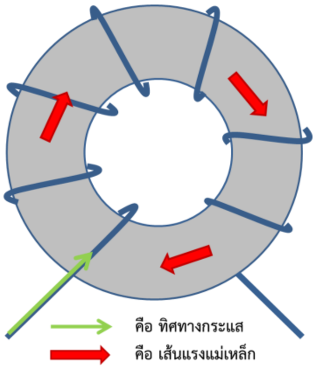
l คือ ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก (m)

μ_0 คือ ความซึมซาบของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

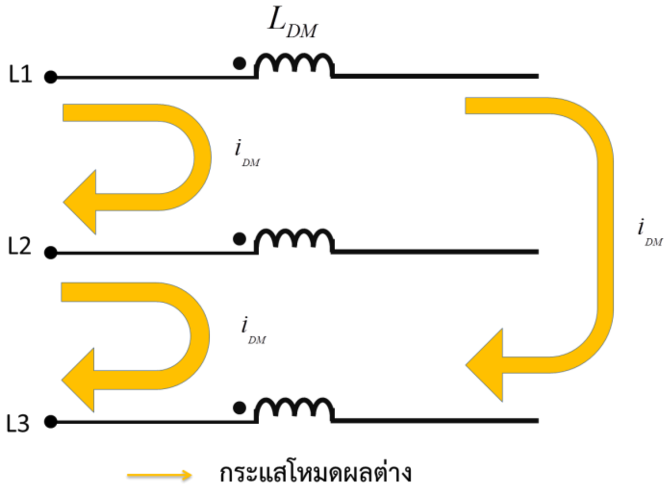
μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (H/m)

3.4.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียว (Single-phase chokes design)

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนี้จะมีการพันขดลวดอยู่จำนวน 1 ชุดบนแกนเหล็กผง (Powder core) โดยจะกำหนดจำนวนรอบจากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่คำนวณได้ และเชื่อมต่อจะถูกนำมาต่อแบบอนุกรมในแต่ละเฟส



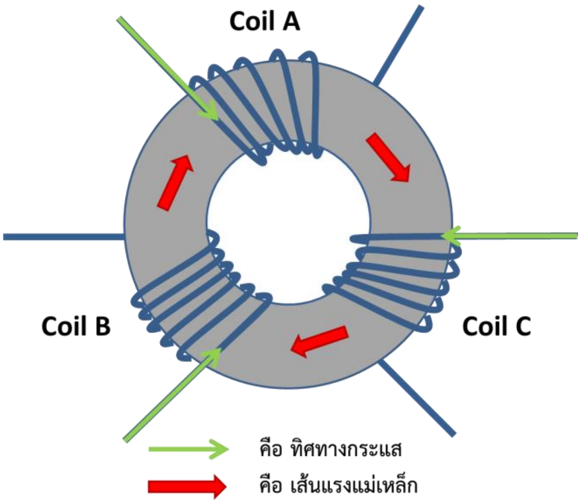
รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียว



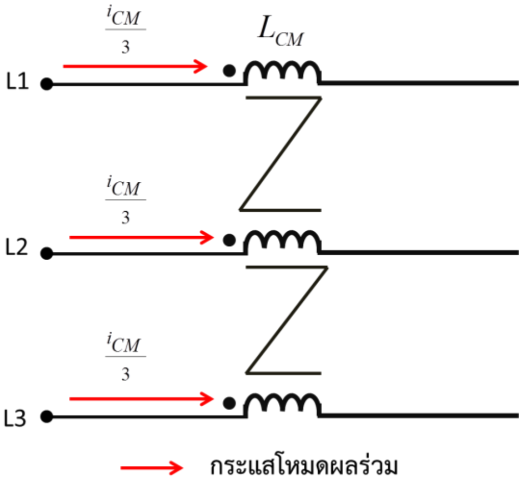
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบขดเดียวในระบบสามเฟส

3.4.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด (Three-phase chokes design)

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขดนั้นจะมีขดลวดพันอยู่จำนวน 3 ชุดบนแกนทอร์รอย ซึ่งมีการพันขดลวดในระยะห่างระหว่างรอบในการพันขดลวดที่เท่ากัน ทิศทางในการพันขดลวดต้องมีทิศทางไปในทางเดียวกันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแกนทอร์รอยเป็นทิศทางเดียวกัน และระยะห่างระหว่างขดลวดที่มีมุมเฟสห่างเท่ากัน โดยจำนวนรอบในการพันขดลวดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 3.4 ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำร่วมแบบสามขด

3.4.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common-mode choke)

โดยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้ออกแบบค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมเท่ากับ 0.32 mH และ 0.86 mH โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม กรณี L_C= 0.86 mH

จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนแกน	10 รอบ
ชนิดของแกน	แกนเฟอไรต์
เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก	6.9 ซ.ม.
เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน	4.2 ซ.ม.
ความหนาของแกน	1.9 ซ.ม.

รูปที่ 3.6 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่ใช้จริง กรณี L_C= 0.86 mH

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม กรณี L_C= 0.32 mH

จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนแกน	6 รอบ
ชนิดของแกน	แกนเฟอไรต์
เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก	6.9 ซ.ม.
เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน	4.2 ซ.ม.
ความหนาของแกน	1.9 ซ.ม.

รูปที่ 3.7 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่ใช้จริง กรณี L_C= 0.32 mH

3.4.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke)

โดยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้ออกแบบค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่างเท่ากับ 1.3 μH และ 16.52 μH โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง กรณี L_D= 1.3 μH

จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนแกน	4 รอบ
ชนิดของแกน	แกนเหล็กผง
เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก	2.2 ซ.ม.
เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน	1.4 ซ.ม.
ความหนาของแกน	0.7 ซ.ม.

รูปที่ 3.8 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ใช้จริง กรณี L_D= 1.3 μH

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง กรณี L_D= 16.52 µH

จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนแกน	14 รอบ
ชนิดของแกน	แกนเหล็กผง
เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก	2.3 ซ.ม.
เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน	1.3 ซ.ม.
ความหนาของแกน	1 ซ.ม.

รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ใช้จริง กรณี L_D= 16.52 µH

3.5 การเลือกตัวเก็บประจุ (Capacitors)

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่นวงจรกรองกระแส (Filter) วงจรผ่านสัญญาณ (By-pass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบค่าคงที่ แบบเปลี่ยนแปลงค่าได้และแบบเลือกค่าได้ ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์ หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad)

สำหรับในโครงงานนี้การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้ตัวเก็บประจุชนิดแบบค่าคงที่ ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลม ทรงกระบอก หรือทรงสี่เหลี่ยม แผ่นเพลทตัวนำมักใช้โลหะและมีไดอิเล็กตริกประเภท ไมก้า เซรามิค อิเล็กโตรไลติกคั่นกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก ชนิดเซรามิค ชนิดไมก้า เป็นต้น (http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-03.html)

3.5.1 ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Y-Capacitor)

รูปที่ 3.10 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic capacitor)

ในโหมดผลร่วมเลือกใช้ ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic capacitor) ค่าที่ใช้สำหรับโครงงานนี้ คือ 4700 pF

3.5.2 ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (X-Capacitor)

รูปที่ 3.11 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม (Film capacitor)

ในโหมดผลต่างเลือกใช้ ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม (Film capacitor) ค่าที่ใช้สำหรับโครงงานนี้ คือ 0.68 μF

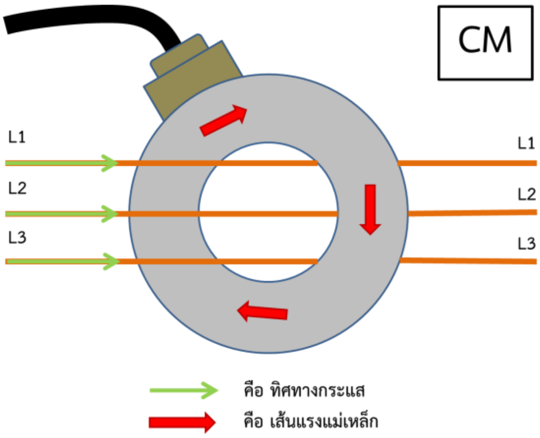
3.6 การใช้งานโพรบกระแส (Current probe)

โพรบกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับการวัดกระแสของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งโพรบวัดกระแสจะเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการแยกวัดเฉพาะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมหรือโหมดผลต่างได้ โดยหากต้องการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดขึ้นที่สายใดก็ให้คล้องโพรบวัดกระแสเข้ากับตัวนำนั้น และเนื่องจากภายในสายไลน์และสายนิวทรัลมีองค์ประกอบของทั้งกระแสในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างอยู่ (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

รูปที่ 3.12 โพรบวัดกระแสที่ใช้งานจริง (Current Probe)

3.6.1 การใช้งานโพรบกระแสวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

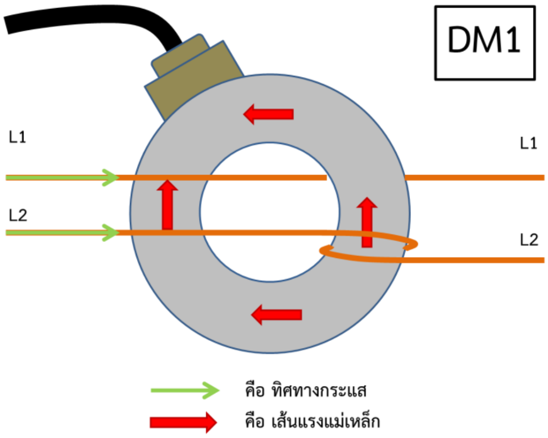
ในกรณีที่ต้องการวัดเฉพาะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมแบบสามเฟสคือใช้โพรบกระแส (Current probe) คล้องไปที่สายไลน์ 1 (L1) ไลน์ 2 (L2) และไลน์ 3 (L3) เข้าด้วยกัน สายตัวนำจะผ่านโพรบกระแสในทิศทางเดียวกันเพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะที่เสริมกัน ดังแสดงรูปที่ 3.13



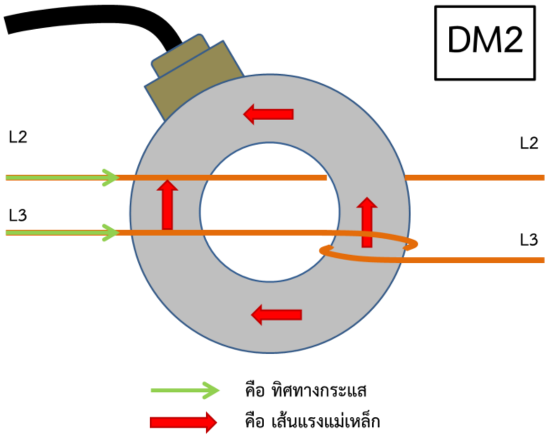
รูปที่ 3.13 แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลร่วม

3.6.2 การใช้งานโพรบกระแสวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

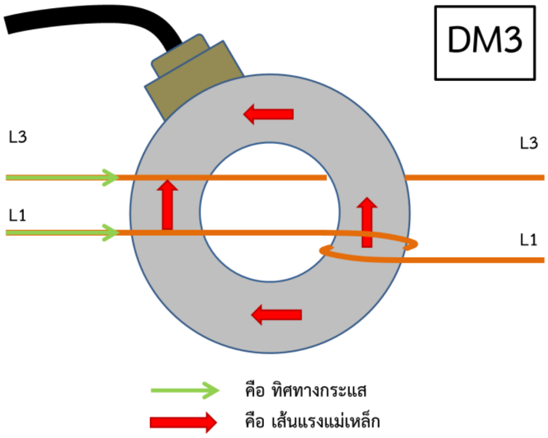
ในกรณีที่ต้องการวัดเฉพาะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างแบบสามเฟสคือใช้โพรบกระแส (Current probe) คล้องไปที่สายตัวนำเพียง 2 สายโดยที่อีก 1 สายม้วนกลับทิศทางเพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะที่หักล้างกัน โดยการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างแบบสามเฟสจะได้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง 3 ค่า คือ DM1 DM2 และ DM3 ดังแสดงรูปที่ 3.14 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.14 แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง1



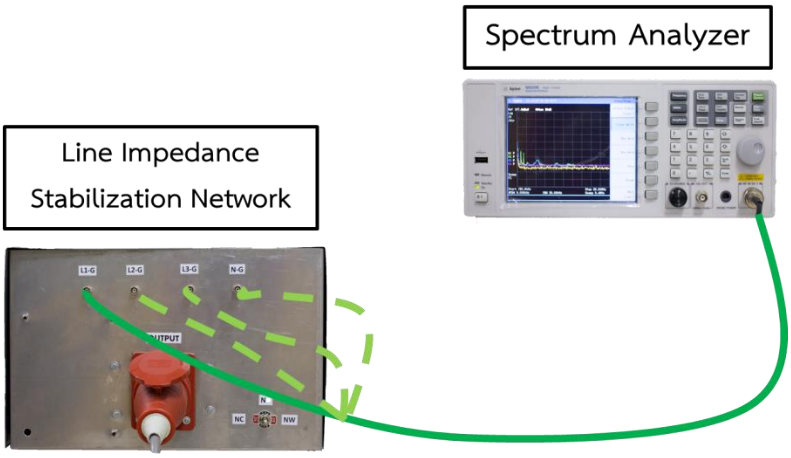
รูปที่ 3.15 แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง2



รูปที่ 3.16 แสดงวิธีการคล้องโพรบวัดกระแสโหมดผลต่าง3

3.7 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN)

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้ เป็นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบผลรวม (Total noise) หมายถึง ไม่แยกโหมดผลร่วม (Common-mode) และโหมดผลต่าง (Differential-mode) ออกจากกัน ลักษณะการเชื่อมต่อจะเริ่มต้นจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) ไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) จุดเชื่อมต่อจะแสดงดังรูปที่ 3.17 (ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2557)

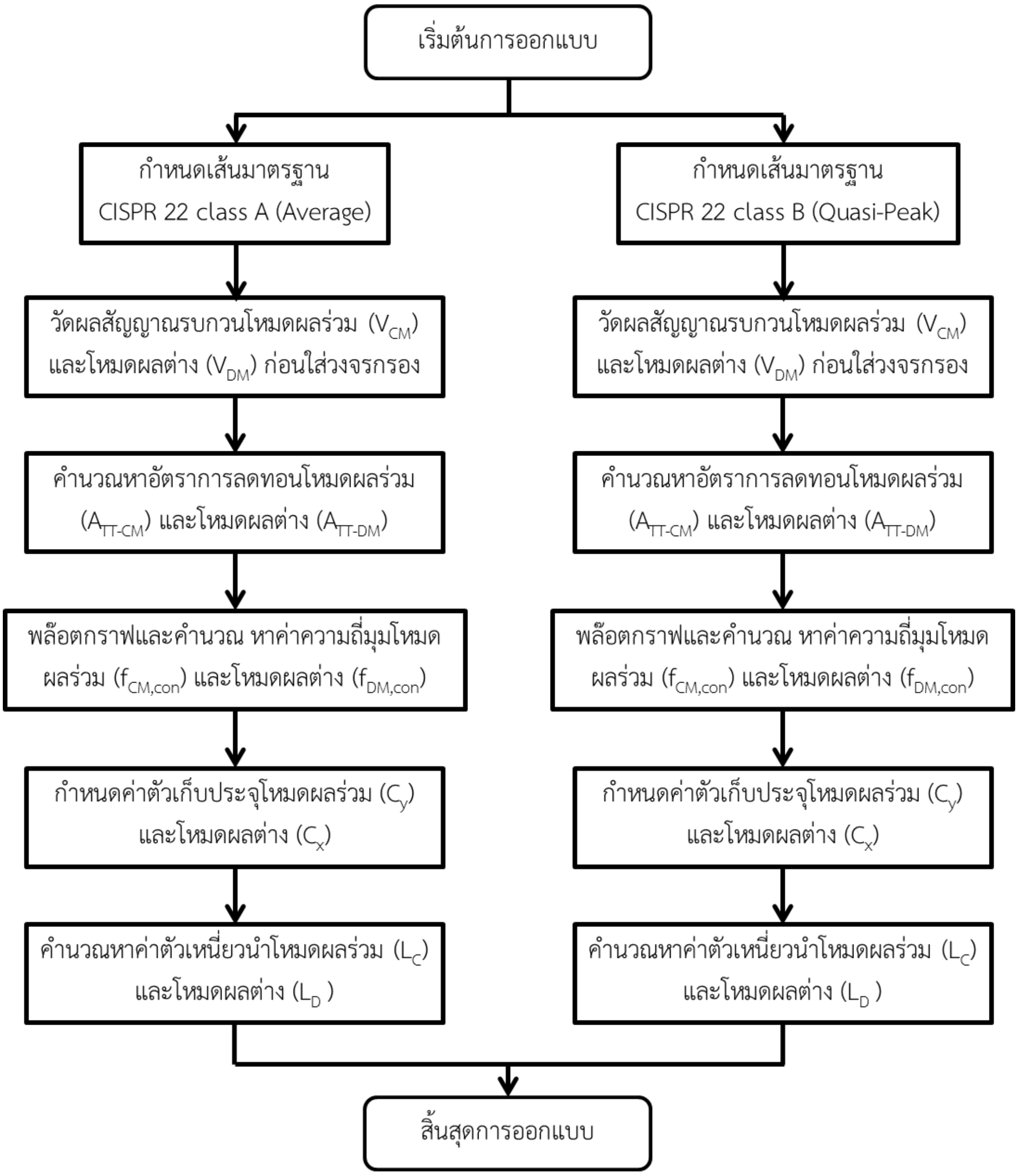


รูปที่ 3.17 การวัดสัญญาณรบกวนแบบผลรวม (Total noise)

3.8 รูปแบบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

3.8.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

ในการออกแบบวิธีดังกล่าวนำที่มาใช้ในการทดลองโดยมีขั้นตอนการคำนวณและออกแบบวงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส ดังรูปที่ 3.18

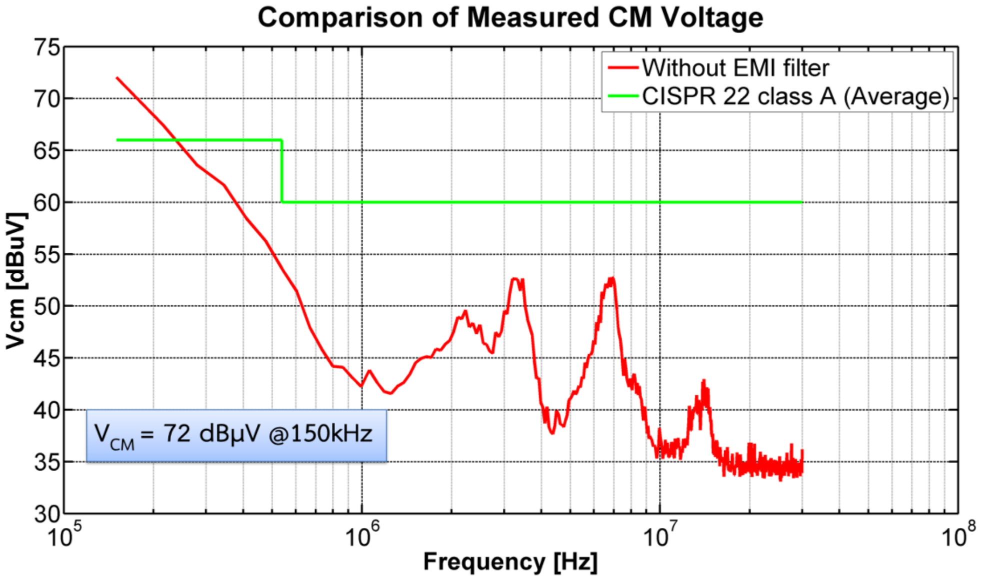


รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

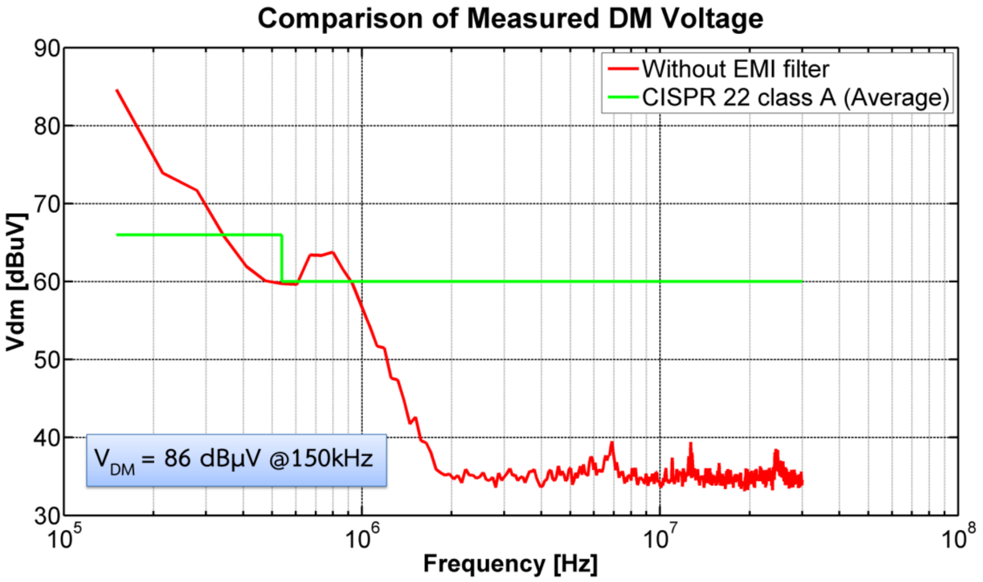
ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมที่เกิดขึ้นขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างที่เกิดขึ้นขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.19 ความถี่ดังกล่าว คือ 150 kHz

สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.19 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 66 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.20 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.20 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

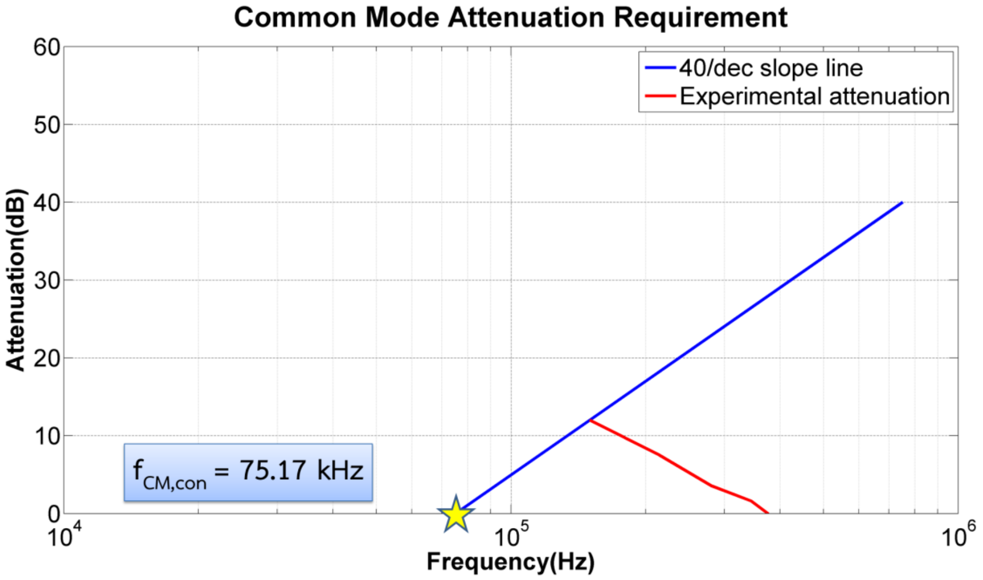
$$A_{TT-DM} = 86 - 66 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency)

ความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency of CM)

พล๊อตกราฟเส้นตรงความชัน 40 dB/decade ตัดกับเส้นกราฟอัตราการลดทอนโหมดผลร่วม คิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line คือ 150 kHz และจุดตัดของเส้นตรงกับแกนความถี่ คือ ความถี่คัตออฟโหมดผลร่วม แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และความถี่คัตออฟของโหมดผลร่วม

หรือ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.3)

$$f_{CM,con} = \frac{f_{CM}}{10^{\frac{A_{TT-CM}}{40}}}$$

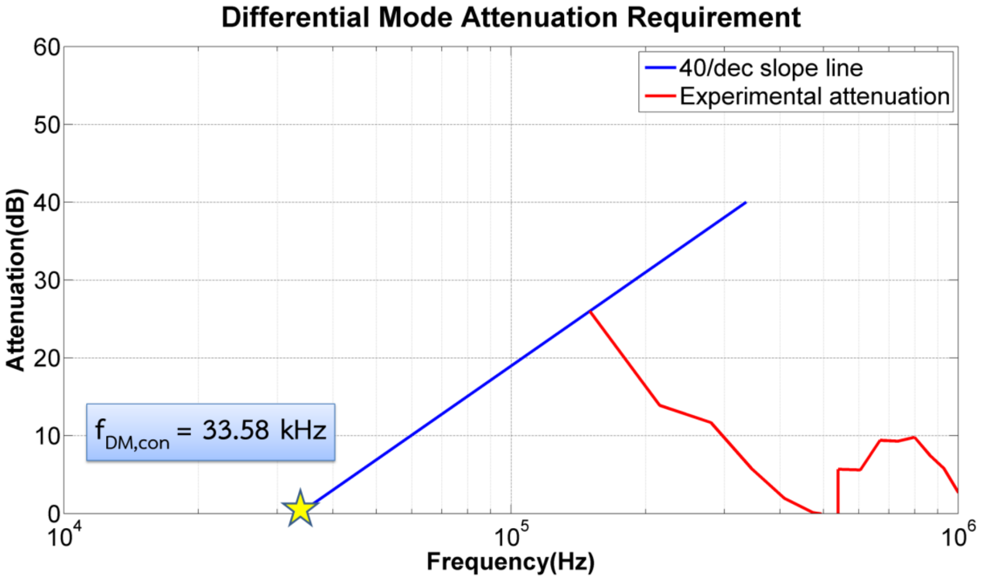
จากรูปที่ 3.21 แทนค่า $A_{TT\text{-}CM}$ = 12 dBμV และ f_{cm}= 150 kHz

$$f_{CM,con} = \frac{150\times10^{3}}{10^{\frac{12}{40}}}$$

$$f_{CM,con} = 75.17\ kHz$$

ความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง (Cut-off frequency of DM)

พล๊อตกราฟเส้นตรงความชัน 40 dB/decade ตัดกับเส้นกราฟอัตราการลดทอนโหมดผลต่าง ที่คิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line คือ 150 kHz และจุดตัดของเส้นตรงกับแกนความถี่ คือ ความถี่มุมโหมดผลต่าง แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และความถี่คัตออฟของโหมดผลต่าง

หรือ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.4)

$$f_{DM,con} = \frac{f_{DM}}{10^{\frac{A_{TT-DM}}{40}}}$$

จากรูปที่ 3.22 แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV และ f_{dm}= 150 kHz

$$f_{DM,con} = \frac{150 \times 10^3}{10^{\frac{26}{40}}}$$

$$f_{DM,con} = 33.58\ kHz$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าตัวเหนี่ยวนำ (Chokes)

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke)

เลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม C_y = 4700 pF ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

จากนั้นหาค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.5)

$$L_C = \frac{1}{3C_y(2\pi f_{CM,con})^2}$$

แทนค่า $f_{CM,con}$ = 75.17 kHz และ C_y = 4700 pF

$$L_C = \frac{1}{3(4700\times10^{-12})(2\pi\times75.17\times10^3)^2}$$

$$L_C = 0.32\ mH$$

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke)

เลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง C_x = 0.68 μF ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

จากนั้นหาค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่างได้จากสมการที่ (3.6)

$$L_D = \frac{1}{2C_x(2\pi f_{DM,con})^2}$$

แทนค่า $f_{DM,con}$ = 33.58 kHz และ C_x = 0.68 μF

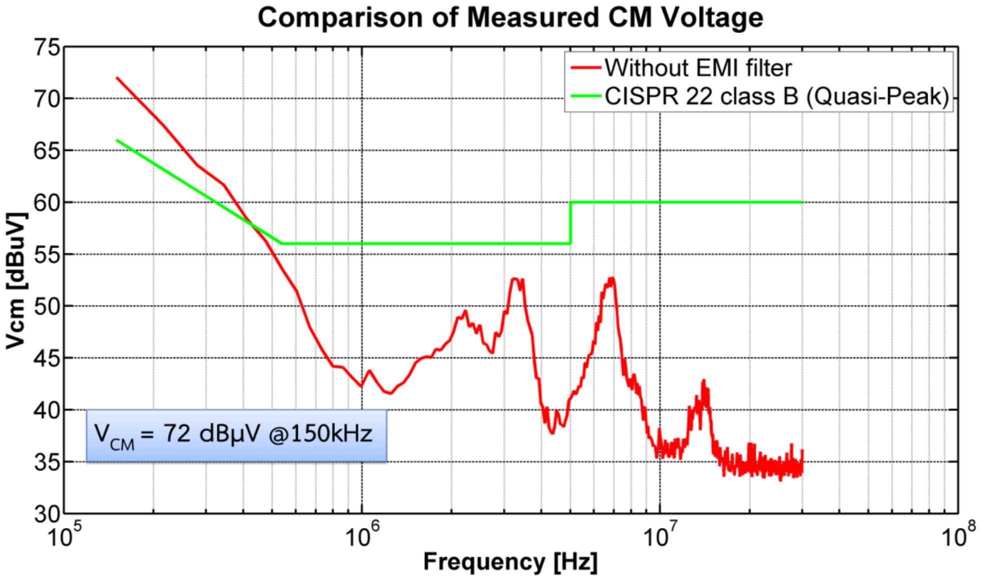
$$L_D = \frac{1}{2(0.68\times10^{-6})(2\pi\times33.58\times10^3)^2}$$

$$L_D = 16.52\ \mu H$$

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

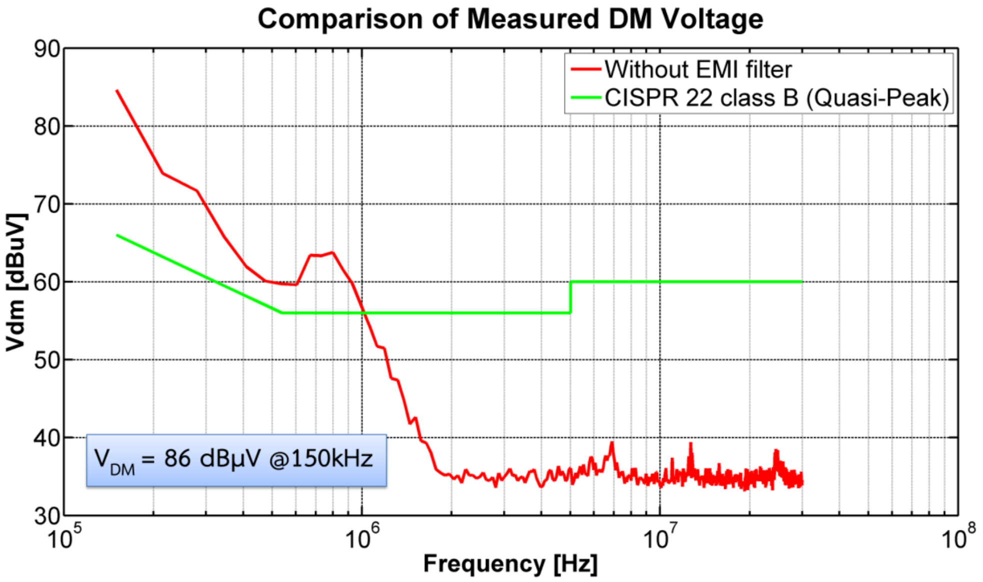
ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมที่เกิดขึ้นขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างที่เกิดขึ้นขณะไม่ใส่วงจรกรองเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.23 ความถี่ดังกล่าว คือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.19 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 60 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.24 ความถี่ดังกล่าว คือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.20 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

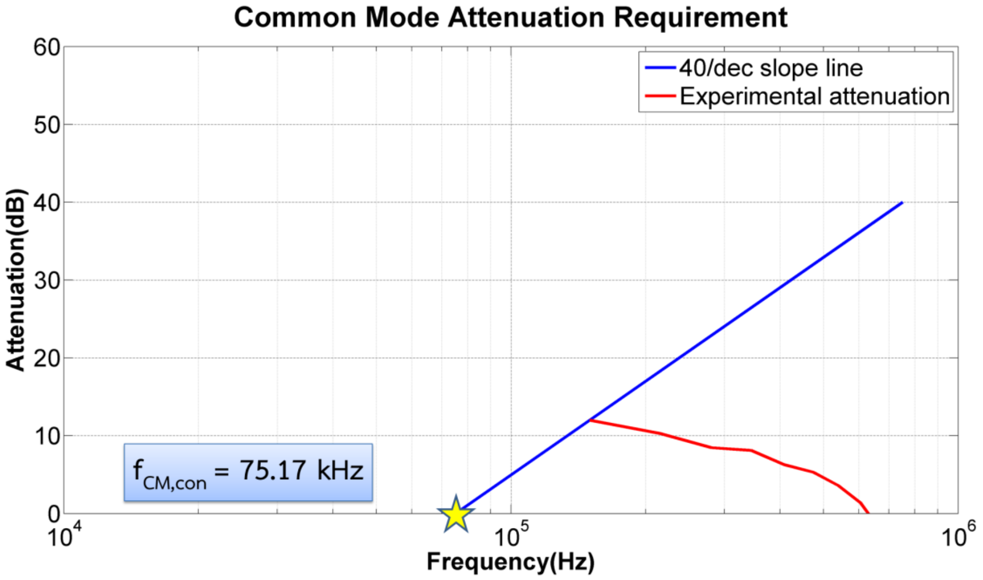
$$A_{TT-DM} = 86 - 60 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency)

ความถี่มุมโหมดผลร่วม (Cut-off frequency of CM)

พล๊อตกราฟเส้นตรงความชัน 40 dB/decade ตัดกับเส้นกราฟอัตราการลดทอนโหมดผลร่วม ที่คิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line คือ 150 kHz และจุดตัดของเส้นตรงกับแกนความถี่ คือ ความถี่คัตออฟโหมดผลร่วม แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) และความถี่มุมของโหมดผลร่วม

หรือ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.3)

$$f_{CM,con} = \frac{f_{CM}}{10^{\frac{A_{TT-CM}}{40}}}$$

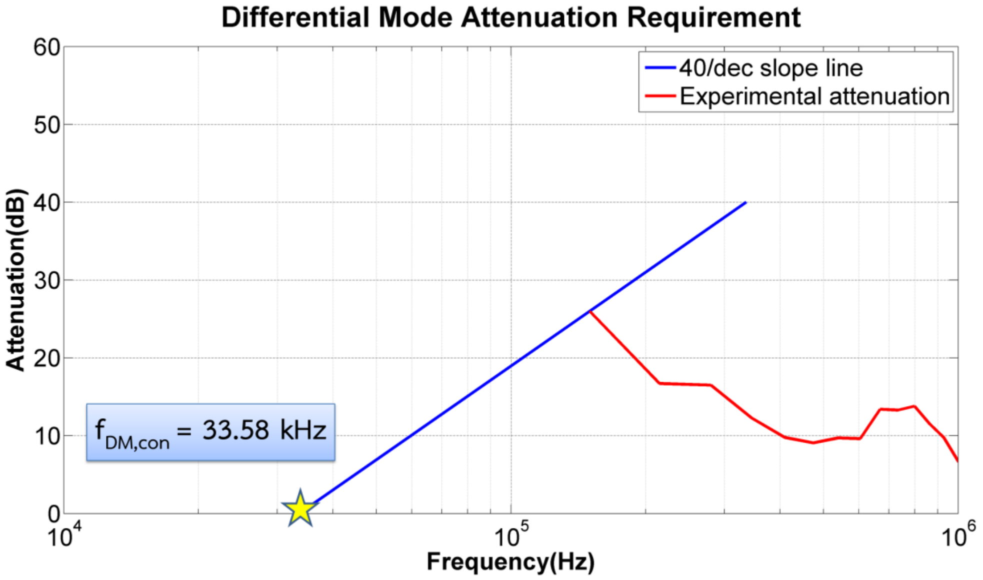
จากรูปที่ 3.21 แทนค่า A_{TT-CM} = 12 dBµV และ f_{cm}= 150 kHz

$$f_{CM,con} = \frac{150\times10^{3}}{10^{\frac{12}{40}}}$$

$$f_{CM,con} = 75.17\ kHz$$

ความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง (The cut-off frequency of DM)

พล๊อตกราฟเส้นตรงความชัน 40 dB/decade ตัดกับเส้นกราฟอัตราการลดทอนโหมดผลต่าง คิดที่ความถี่แรกที่เกินเส้น Limit line คือ 150 kHz และจุดตัดของเส้นตรงกับแกนความถี่ คือ ความถี่คัตออฟโหมดผลต่าง แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 กราฟแสดงอัตราการลดทอนกรณีเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) และความถี่มุมของโหมดผลต่าง

หรือสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.4)

$$f_{DM,con} = \frac{f_{DM}}{10^{\frac{A_{TT-DM}}{40}}}$$

จากรูปที่ 3.22 แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV และ f_{dm}= 150 kHz

$$f_{DM,con} = \frac{150 \times 10^3}{10^{\frac{26}{40}}}$$

$$f_{DM,con} = 33.58\ kHz$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าตัวเหนี่ยวนำ (Chokes)

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke)

เลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม C_y = 4700 pF ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

จากนั้นหาค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.5)

$$L_C = \frac{1}{3C_y(2\pi f_{CM,con})^2}$$

แทนค่า $f_{CM,con}$ = 75.17 kHz และ C_y = 4700 pF

$$L_C = \frac{1}{3(4700\times10^{-12})(2\pi\times75.17\times10^3)^2}$$

$$L_C = 0.32\ mH$$

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke)

เลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง C_x = 0.68 μF ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

จากนั้นหาค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่างได้จากสมการที่ (3.6)

$$L_D = \frac{1}{2C_x(2\pi f_{DM,con})^2}$$

แทนค่า $f_{DM,con}$ = 33.58 kHz และ C_x = 0.68 μF

$$L_D = \frac{1}{2(0.68\times10^{-6})(2\pi\times33.58\times10^3)^2}$$

$$L_D = 16.52\ \mu H$$

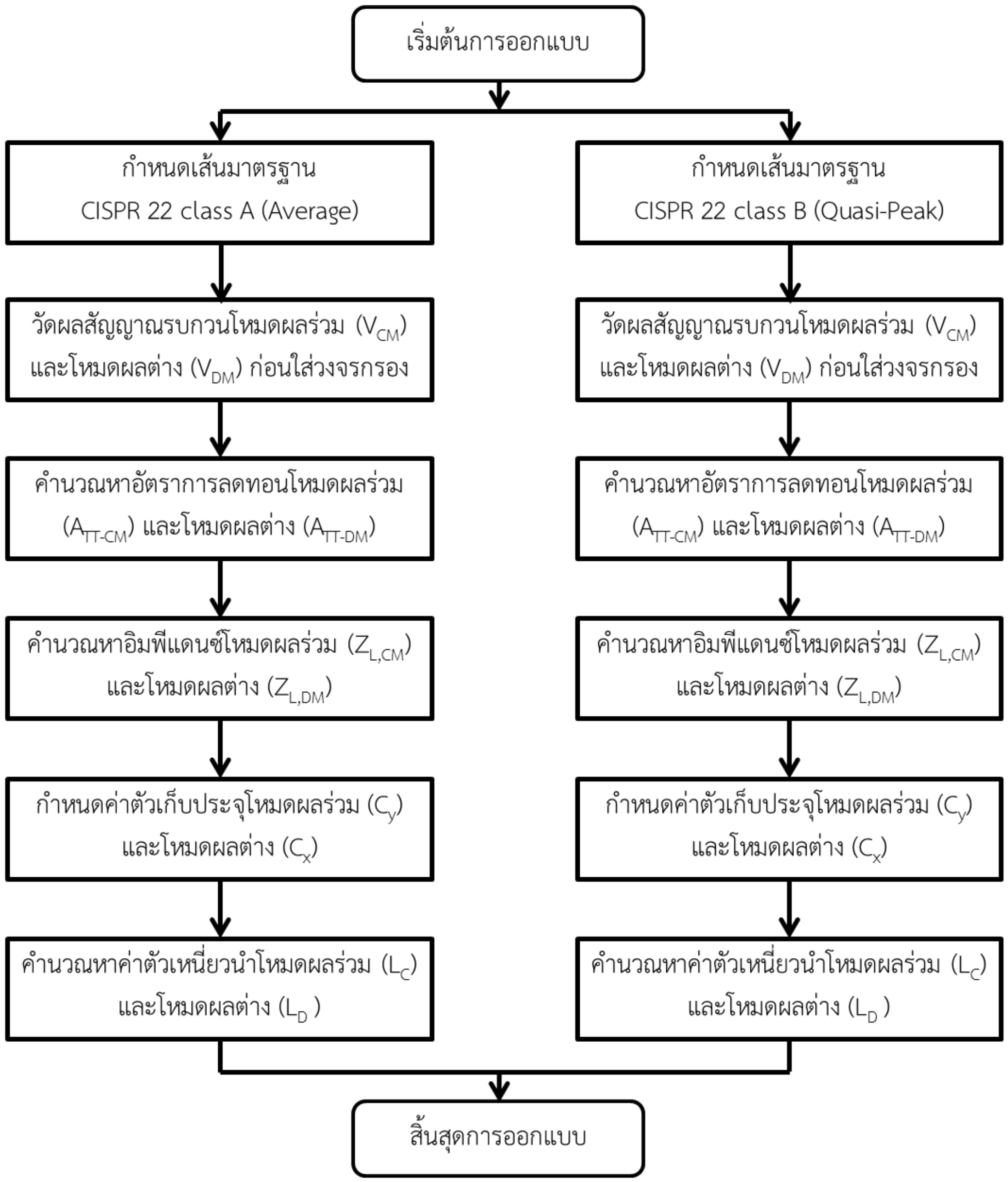
ตารางที่ 3.5 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

	L_C (mH)	L_D (μH)	C_x (μF)	C_y (pF)
ค่าที่คำนวณได้	0.32	16.52	0.68	4700
ค่าที่ใช้จริง	0.33	18	0.68	4700

รูปที่ 3.27 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen ที่ใช้จริงในการทดลอง

3.8.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

ในการออกแบบวิธีดังกล่าวนำที่มาใช้ในการทดลองโดยมีขั้นตอนการคำนวณและออกแบบวงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.19 และวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.20

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.19 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.19 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 60 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.20 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

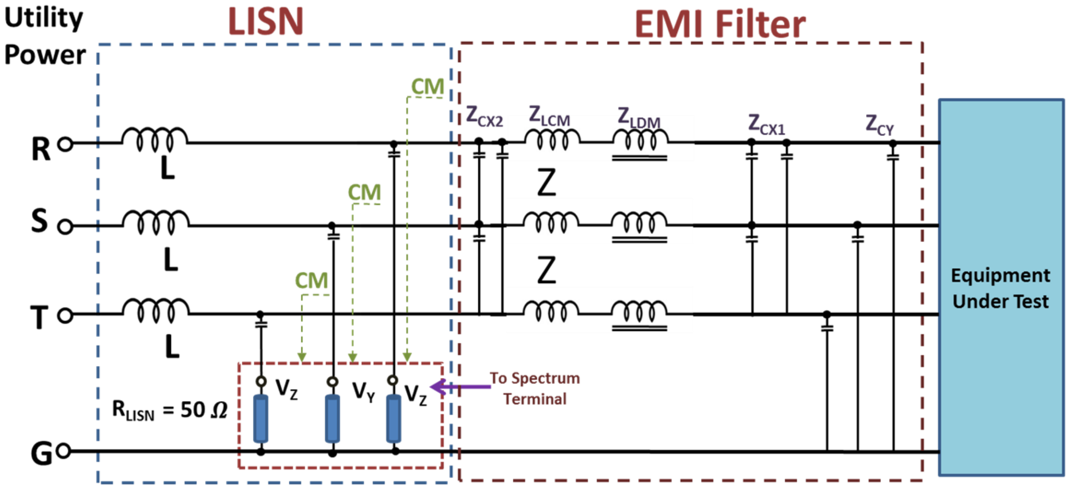
จากรูปที่ 3.20 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-DM} = 86 - 60 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาอิมพีแดนซ์ (Impedance)

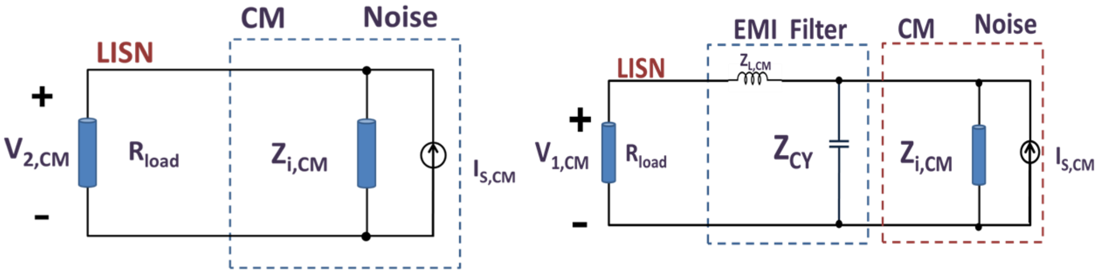
ในขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง (Chokes) โดยแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส ในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส

เพื่อให้ง่ายต่อการหาค่าอิมพิแดนซ์ จึงแยกเป็นวงจรสมมูลแบบเฟสเดียวในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

อิมพีแดนซ์โหมดผลร่วม (CM Impedance)



รูปที่ 3.30 วงจรสมมูลแบบใส่กับไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมแบบเฟสเดียว

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.30 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.7)

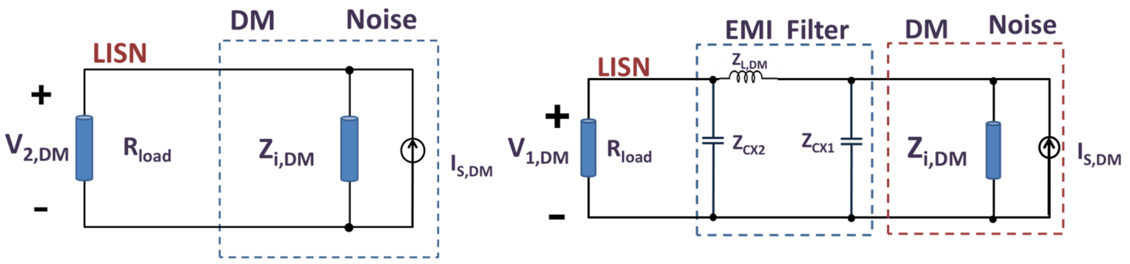
$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3}$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}CM}$ = 12 dBµV f = 150 kHz C_y = 4700 pF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,CM} = (12-1)\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(3\times4700\times10^{-12})} - \frac{50}{3}$$

$$Z_{L,CM} = 811.0895\ \Omega$$

อิมพีแดนซ์โหมดผลต่าง (DM Impedance)



รูปที่ 3.31 วงจรสมมูลแบบใส่กับไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างแบบเฟสเดียว

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.31 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลต่างได้จากสมการที่ (3.8)

$$Z_{L,DM} = \left| \frac{(A_{TT\text{-}DM} - 1)\left(\frac{1}{2\pi fC_X}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{2\pi fC_X}\right)(2R_{load})}{\frac{1}{2\pi fC_X} + 2R_{load}} \right|$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV f = 150 kHz C_X = 0.68 μF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,DM} = \frac{(26-1)\left(\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})}\right)(2\times50)}{\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})} + (2\times50)}$$

$$Z_{L,DM} = 2.4734\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าตัวเหนี่ยวนำ (Chokes)

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke)

สามารถหาตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke) ได้จากสมการที่ (3.9)

$$L_C = \frac{Z_{L,CM}}{2\pi f}$$

แทนค่า $Z_{L,CM}$ = 811.0895 Ω และ f = 150 kHz

$$L_C = \frac{811.0895}{2\pi \times 150 \times 10^3}$$

$$L_C = 0.86\ mH$$

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke)

สามารถหาตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke) ได้จากสมการที่ (3.10)

$$L_D = \frac{Z_{L,DM}}{2(2\pi f)}$$

แทนค่า $Z_{L,CM}$ = 2.4734 Ω และ f = 150 kHz

$$L_D = \frac{2.4734}{2(2\pi \times 150 \times 10^3)}$$

$$L_D = 1.31\ \mu H$$

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.23 และวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.24

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.23 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.23 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 60 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.24 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.24 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-DM} = 86 - 60 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาอิมพีแดนซ์ (Impedance)

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง (Chokes) โดยแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส ในรูปที่ 3.29

เพื่อให้ง่ายต่อการหาค่าอิมพิแดนซ์ จึงแยกเป็นวงจรสมมูลแบบเฟสเดียวในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

อิมพีแดนซ์โหมดผลร่วม (CM Impedance)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.30 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.7)

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3}$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}CM}$ = 12 dBμV f = 150 kHz C_y = 4700 pF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,CM} = (12-1)\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(3\times4700\times10^{-12})} - \frac{50}{3}$$

$$Z_{L,CM} = 811.0895\ \Omega$$

อิมพีแดนซ์โหมดผลต่าง (DM Impedance)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.31 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลต่างได้จากสมการที่ (3.8)

$$Z_{L,DM} = \left| \frac{(A_{TT\text{-}DM} - 1)(\frac{1}{2\pi fC_x})^2 - 2(\frac{1}{2\pi fC_x})(2R_{load})}{\frac{1}{2\pi fC_x} + 2R_{load}} \right|$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV f = 150 kHz C_x = 0.68 μF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,DM} = \frac{(26-1)(\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})})^2 - 2(\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})})(2\times50)}{\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(0.68\times10^{-6})} + (2\times50)}$$

$$Z_{L,DM} = 2.4734\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าตัวเหนี่ยวนำ (Chokes)

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke)

สามารถหาตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (CM Choke) ได้จากสมการที่ (3.9)

$$L_C = \frac{Z_{L,CM}}{2\pi f}$$

แทนค่า $Z_{L,CM}$ = 811.0895 Ω และ f = 150 kHz

$$L_C = \frac{811.0895}{2\pi \times 150 \times 10^3}$$

$$L_C = 0.86\ mH$$

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke)

สามารถหาตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (DM Choke) ได้จากสมการที่ (3.10)

$$L_D = \frac{Z_{L,DM}}{2(2\pi f)}$$

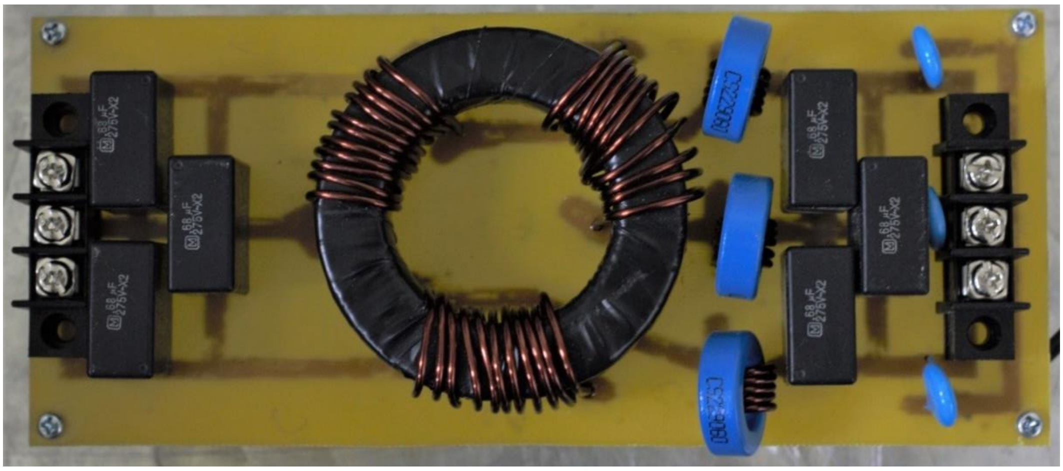
แทนค่า $Z_{L,CM}$ = 2.4734 Ω และ f = 150 kHz

$$L_D = \frac{2.4734}{2(2\pi \times 150 \times 10^3)}$$

$$L_D = 1.31\ \mu H$$

ตารางที่ 3.6 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

	L_C (mH)	L_D (μH)	C_x (μF)	C_y (pF)
ค่าที่คำนวณได้	0.86	1.31	0.68	4700
ค่าที่ใช้จริง	0.81	1.30	0.68	4700

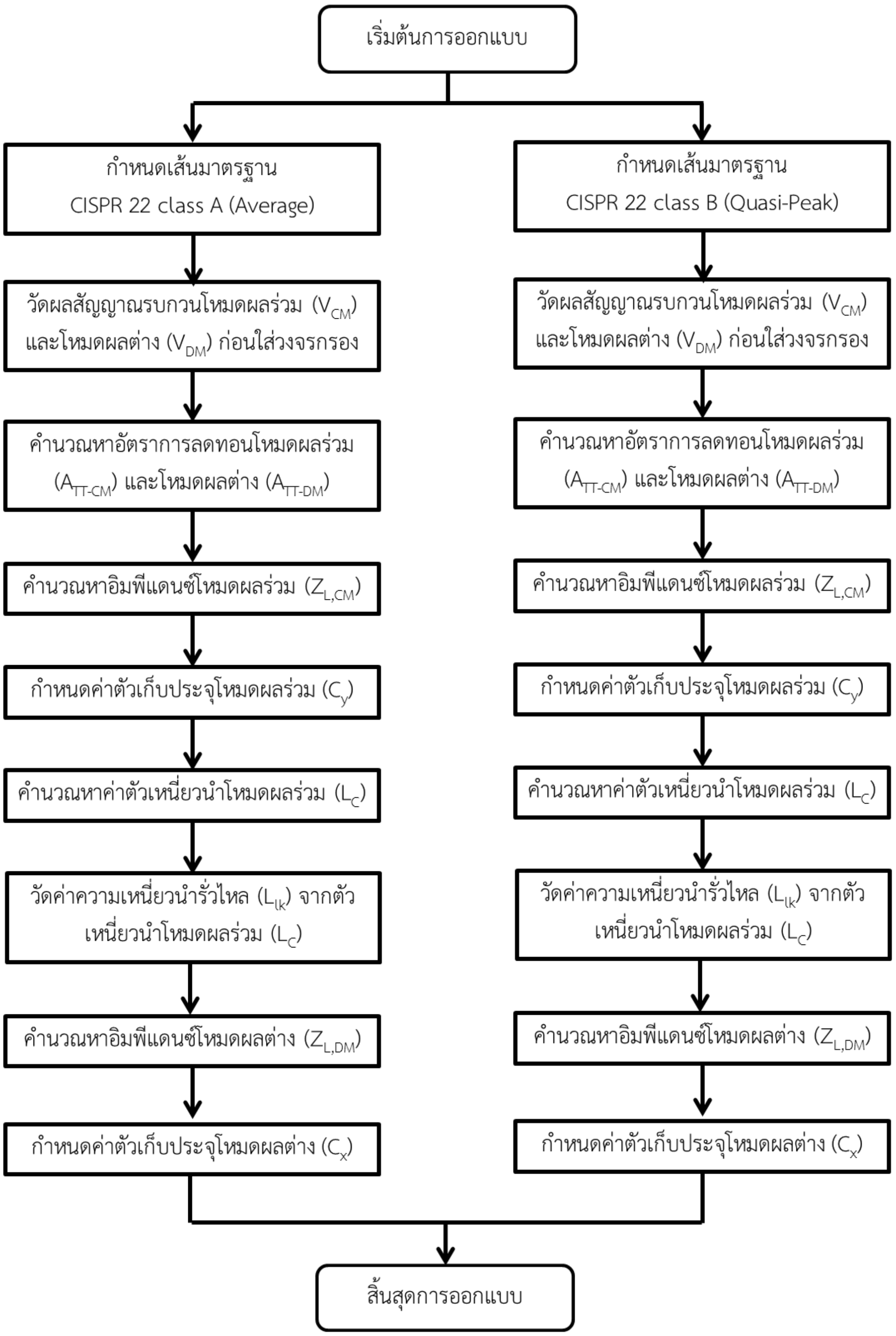


รูปที่ 3.32 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai ที่ใช้จริงในการทดลอง

3.8.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

สำหรับวงจรกรองนี้ ขั้นตอนการหาเหมือนกับหัวข้อ 3.8.2 จุดสำคัญของวิธีนี้คือตัดองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke : L_D) ออกโดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance : L_{lk}) มาคำนวณเพื่อออกแบบตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (X-Capacitor : C_x)

โหมดผลร่วม (Common-mode) สามารถออกแบบตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.8.2 ทุกประการสำหรับโหมดผลต่าง (Differential-mode) มีขั้นตอนการหา ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.33 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.19 และวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.20

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.19 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.19 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 60 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.20 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.20 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-DM} = 86 - 60 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาอิมพีแดนซ์ (Impedance)

อิมพีแดนซ์โหมดผลร่วม (CM Impedance)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.30 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.7)

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3}$$

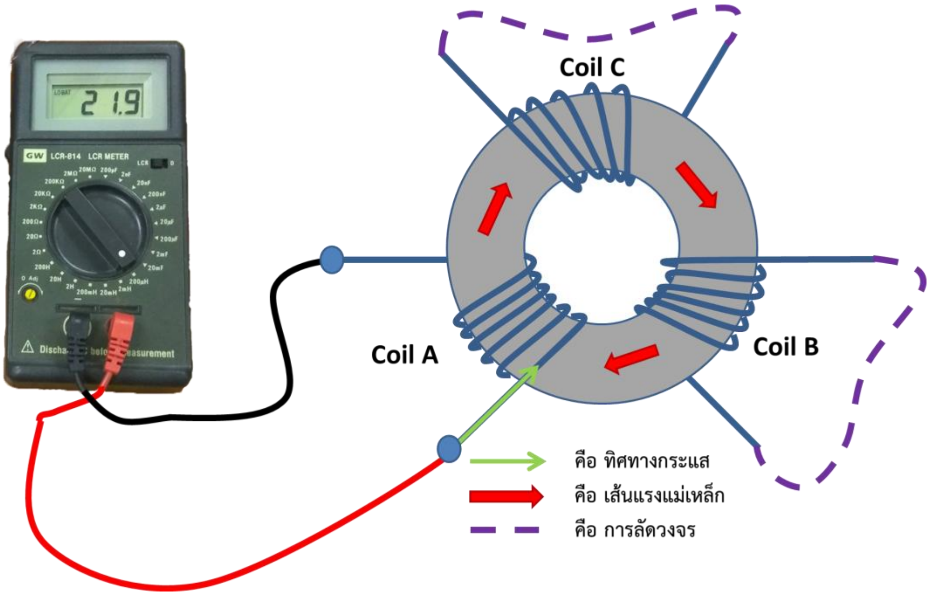
แทนค่า $A_{TT\text{-}CM}$ = 12 dBμV f = 150 kHz C_y = 4700 pF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,CM} = (12-1)\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(3\times4700\times10^{-12})} - \frac{50}{3}$$

$$Z_{L,CM} = 811.0895\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance : L_{lk})

เริ่มต้นโดยใช้ LCR Meter วัดที่ขดลวดชุดใดชุดหนึ่งของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมสามเฟส (Three-phase common-mode choke) และทำการลัดวงจร (Short circuit) กับขดลวดอีก 2 ชุด ที่เหลือ ตามรูปที่ 3.34 จากนั้นค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่วัดได้ คือ L_{lk} = 21.9 μH



รูปที่ 3.34 การวัดค่าเส้นความเหนี่ยวนำรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบสามเฟสที่ใช้จริง

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าอิมพีแดนซ์โหมดผลต่าง (Differential-mode impedance)

สามารถหาได้จากสมการที่ (3.11)

$$Z_{L,DM} = 2(2\pi f)L_{lk}$$

แทนค่า f = 150 kHz และ L_{lk} = 21.9 μH

$$Z_{L,DM} = 2(2\pi \times 150 \times 10^{3})(21.9 \times 10^{-6})$$

$$Z_{L,DM} = 41.2805\,\Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (X-Capacitor : C_x)

สามารถหาได้จากสมการที่ (3.12)

$$C_x = \frac{2(A_{TT\text{-}DM}\text{-}1)}{(2\pi f)(Z_{L,DM}+2(2R_{load})+\sqrt{(Z_{L,DM}+2(2R_{load}))^2+4(A_{TT\text{-}DM}\text{-}1)(2R_{load}Z_{L,DM})})}$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV f = 150 kHz $Z_{L,DM}$ = 41.2805 Ω และ R_{load} = 50 Ω

$$C_x = \frac{2(26\text{-}1)}{(2\pi\times150\times10^{3})(41.2805+2(2\times50)+\sqrt{(41.2805+2(2\times50))^2+4(26\text{-}1)(2\times50\times41.2805)})}$$

$$C_x = 0.06\ \mu F$$

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

ขั้นตอนที่ 1 วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดลอง วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้ดังรูปที่ 3.23 และวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ได้ดังรูปที่ 3.24

ขั้นตอนที่ 2 หาอัตราการลดทอน (Attenuation)

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม (Attenuation of Common-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.23 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$A_{TT-CM} = V_{CM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.23 แทนค่า V_{CM} = 72 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-CM} = 72 - 60 + 6$$

$$A_{TT-CM} = 12\ dB\mu V$$

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง (Attenuation of Differential-mode)

เริ่มต้นโดยการคิดความถี่แรกตำแหน่งสูงสุดที่เกินเส้น Limit line จากรูปที่ 3.24 ความถี่ดังกล่าวคือ 150 kHz สามารถหาได้จาก สมการที่ (3.2)

$$A_{TT-DM} = V_{DM} - Limit + 6$$

จากรูปที่ 3.24 แทนค่า V_{DM} = 86 dBμV และ Limit = 66 dBμV ที่ตำแหน่งความถี่ 150 kHz

$$A_{TT-DM} = 86 - 60 + 6$$

$$A_{TT-DM} = 26\ dB\mu V$$

ขั้นตอนที่ 3 หาอิมพีแดนซ์ (Impedance)

อิมพีแดนซ์โหมดผลร่วม (CM Impedance)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.26 การพิสูจน์ขั้นตอนการหาสมการจะแสดงอยู่ในภาคผนวก สามารถหาค่าอิมพิแดนซ์โหมดผลร่วมได้จากสมการที่ (3.7)

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3}$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}CM}$ = 12 dBμV f = 150 kHz C_y = 4700 pF และ R_{load} = 50 Ω

$$Z_{L,CM} = (12-1)\frac{1}{2\pi(150\times10^{3})(3\times4700\times10^{-12})} - \frac{50}{3}$$

$$Z_{L,CM} = 811.0895\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance : L_{lk})

เริ่มต้นโดยใช้ LCR Meter วัดที่ขดลวดชุดใดชุดหนึ่งของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมสามเฟส (Three-phase common-mode choke) และทำการลัดวงจร (Short circuit) กับขดลวดอีก 2 ชุดที่เหลือ ตามรูปที่ 3.34 จากนั้นค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่วัดได้ คือ L_{lk} = 21.9 μH

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าอิมพีแดนซ์โหมดผลต่าง (Differential-mode impedance)

สามารถหาได้จากสมการที่ (3.11)

$$Z_{L,DM} = 2(2\pi f)L_{lk}$$

แทนค่า f = 150 kHz และ L_{lk} = 21.9 μH

$$Z_{L,DM} = 2(2\pi\times150\times10^{3})(21.9\times10^{-6})$$

$$Z_{L,DM} = 41.2805\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (X-Capacitor : C_x)

สามารถหาได้จากสมการที่ (3.12)

$$C_x = \frac{2(A_{TT\text{-}DM}-1)}{(2\pi f)(Z_{L,DM}+2(2R_{load})+\sqrt{(Z_{L,DM}+2(2R_{load}))^2+4(A_{TT\text{-}DM}-1)(2R_{load}Z_{L,DM})})}$$

แทนค่า $A_{TT\text{-}DM}$ = 26 dBμV f = 150 kHz $Z_{L,DM}$ = 41.2805 Ω และ R_{load} = 50 Ω

$$C_x = \frac{2(26\text{-}1)}{(2\pi\times150\times10^3)(41.2805+2(2\times50)+\sqrt{(41.2805+2(2\times50))^2+4(26\text{-}1)(2\times50\times41.2805)})}$$

$$C_x = 0.06\ \mu F$$

ตารางที่ 3.7 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีที่นำเสนอ

	L_C (mH)	C_x (μF)	C_y (pF)
ค่าที่คำนวณได้	0.86	0.06	4700
ค่าที่ใช้จริง	0.81	0.47	4700

รูปที่ 3.35 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ ที่ใช้จริงในการทดลอง

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองเพื่อทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปแรงดันไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (V_{CM}) แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (V_{DM}) ณ ความถี่ที่ได้ตั้งขอบเขตไว้ (150 kHz – 30 MHz) โดยนำผลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง โดยสัญญาณอ้างอิงจะเป็นผลจากระบบที่ไม่มีการใส่วงจรกรอง โดยทำการเปรียบเทียบกับการใส่วงจรกรองในรูปแบบต่างๆที่อยู่ในโหมดเดียวกัน โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen ส่วนที่ 2 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai ส่วนที่ 3 วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอ สรุปผลการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่างๆจากกราฟและแผนภูมิรูปภาพ การเปรียบเทียบจะมีรายละเอียดดังนี้

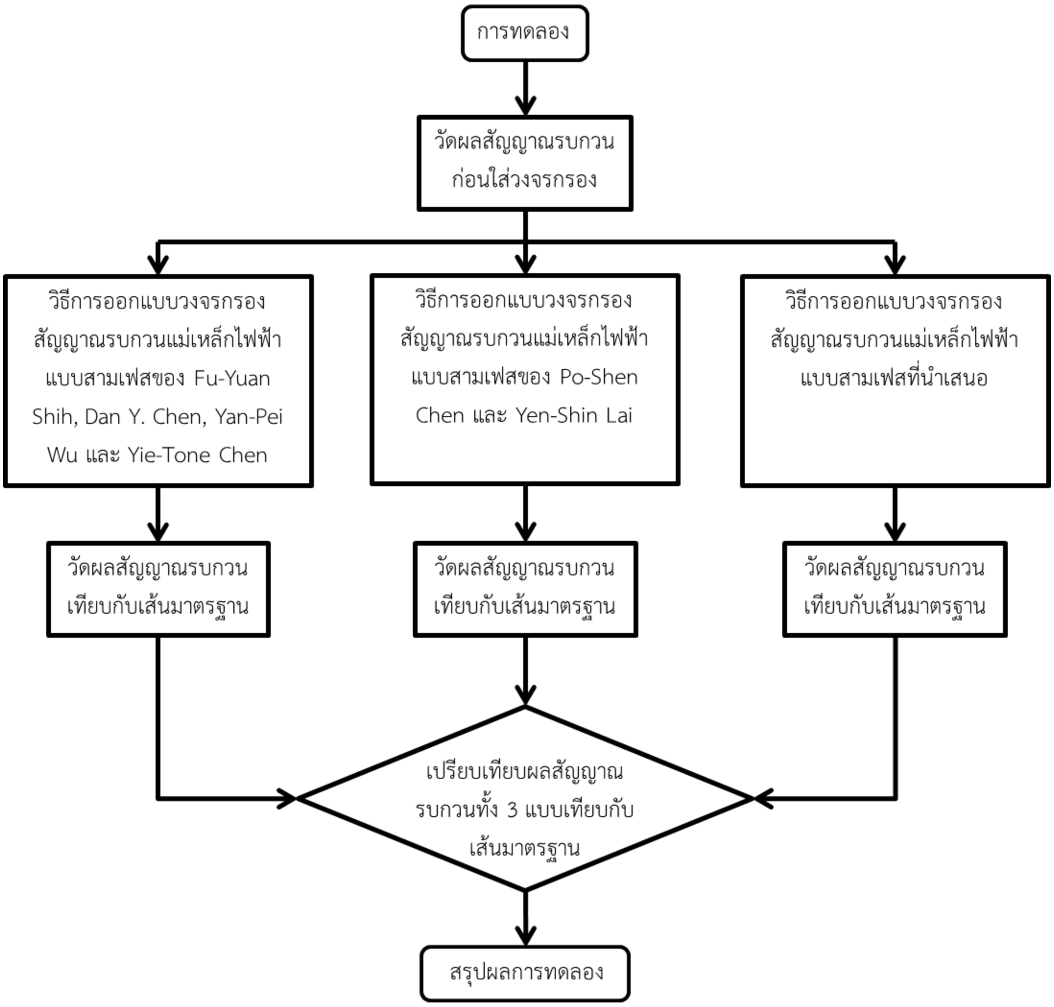
1.การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม(V_{CM}) ในโหมดผลต่าง 1(V_{DM1}) ในโหมดผลต่าง2(V_{DM2}) ในโหมดผลต่าง3(V_{DM3}) ที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์($V_{L1\text{-}G}$) ที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์($V_{L2\text{-}G}$) ที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์($V_{L3\text{-}G}$) ที่นิวทรัล เทียบกับกราวด์($V_{N\text{-}G}$) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรอง (without filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

2.การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม(V_{CM}) ในโหมดผลต่าง 1(V_{DM1}) ในโหมดผลต่าง2(V_{DM2}) ในโหมดผลต่าง3(V_{DM3}) ที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์($V_{L1\text{-}G}$) ที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์($V_{L2\text{-}G}$) ที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์($V_{L3\text{-}G}$) ที่นิวทรัล เทียบกับกราวด์($V_{N\text{-}G}$) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรอง (without filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

3.การเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม(V_{CM}) ในโหมดผลต่าง 1(V_{DM1}) ในโหมดผลต่าง2(V_{DM2}) ในโหมดผลต่าง3(V_{DM3}) ที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์($V_{L1\text{-}G}$) ที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์($V_{L2\text{-}G}$) ที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์($V_{L3\text{-}G}$) ที่นิวทรัล เทียบกับกราวด์($V_{N\text{-}G}$) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรอง (without filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าใช้วิธีที่นำเสนอ

4.1 การทดลองการวัดผลสัญญาณรบกวนของวงจรกรองในแต่ละรูปแบบในโหมดต่างๆ

ขั้นตอนการทดลองแสดงตามแผนผังด้านล่างดังรูปที่ 4.1

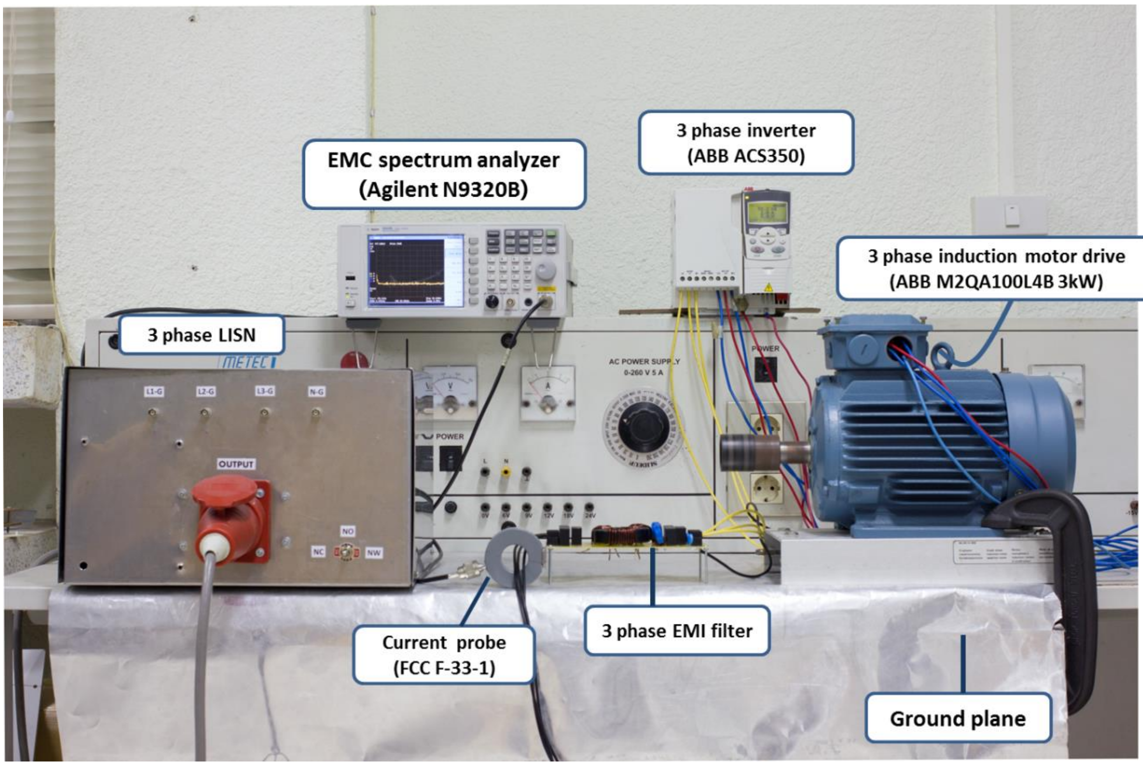


รูปที่ 4.1 แผนผังการทดลอง

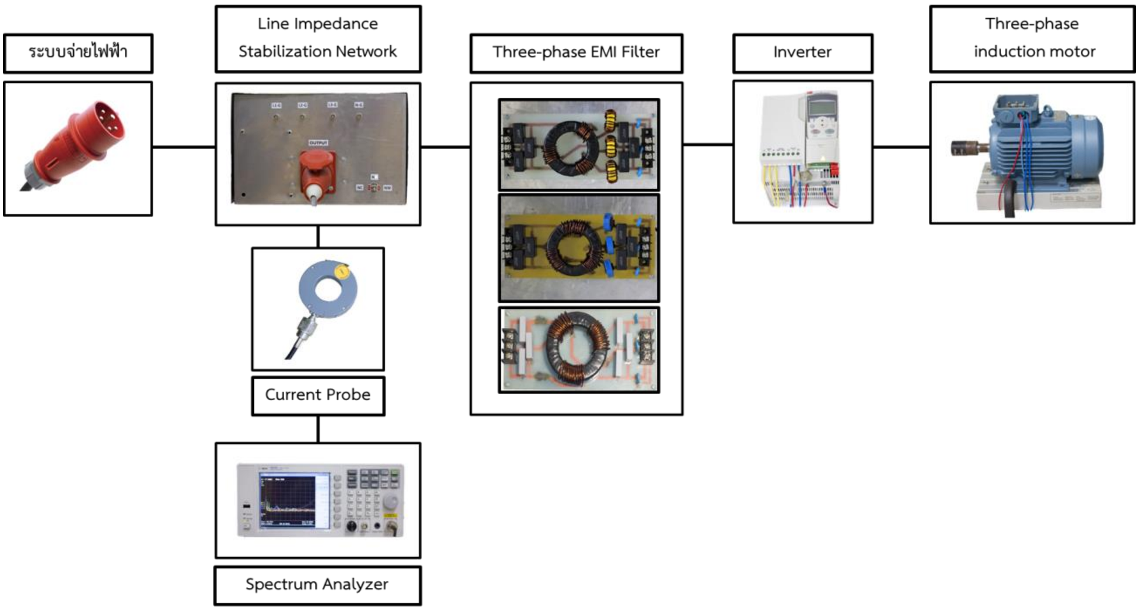
4.2 การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

4.2.1 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4.2 เป็นการต่ออุปกรณ์เพื่อที่จะทำการทดสอบสมรรถนะมีอุปกรณ์ดังนี้ คือ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณสำหรับงานด้านความเข้ากันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Spectrum Analyzer) เครื่องโครงข่ายเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) สำหรับ 3 เฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 Phase Induction Motor Drives) ตัวอินเวอร์เตอร์ (3 Phase Inverter) และ Current Probe ทำการต่ออุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.3



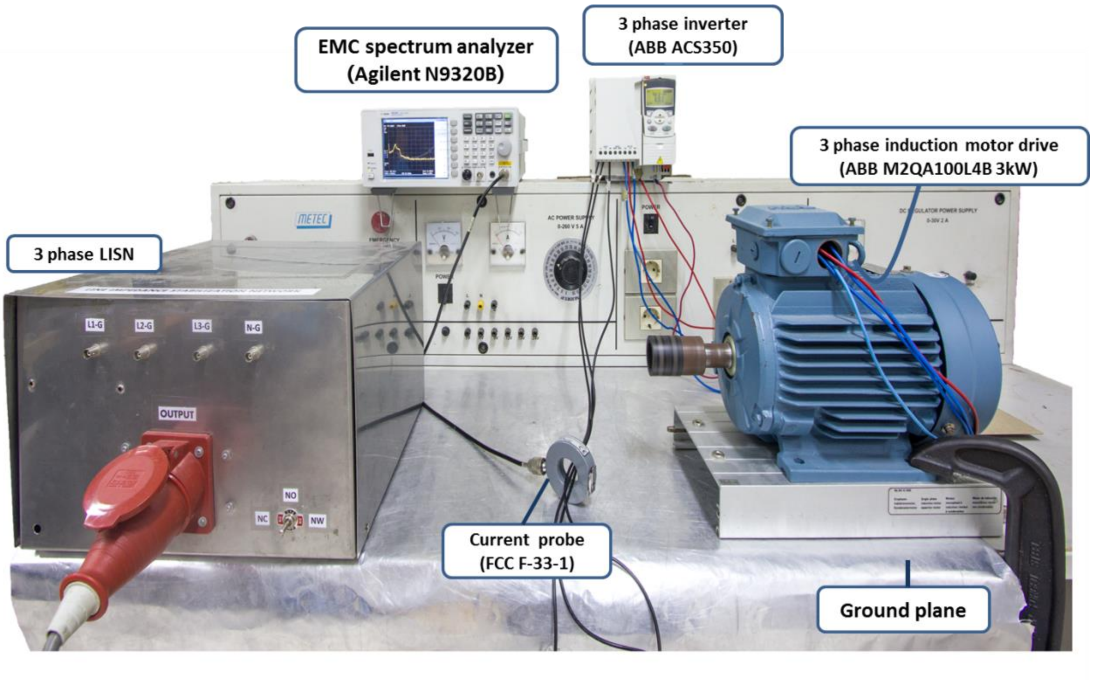
รูปที่ 4.2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส



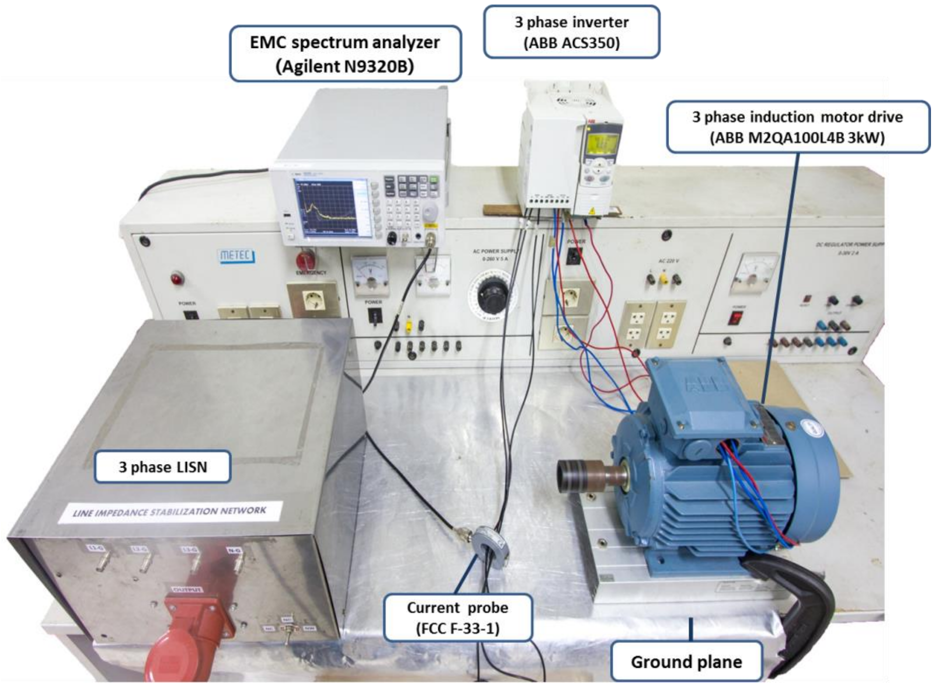
รูปที่ 4.3 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะเพื่อวัดสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส

4.3 รูปแบบการทดลองการวัดสัญญาณรบกวน (EMI Filter) ในกรณีต่างๆ

4.3.1 การทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

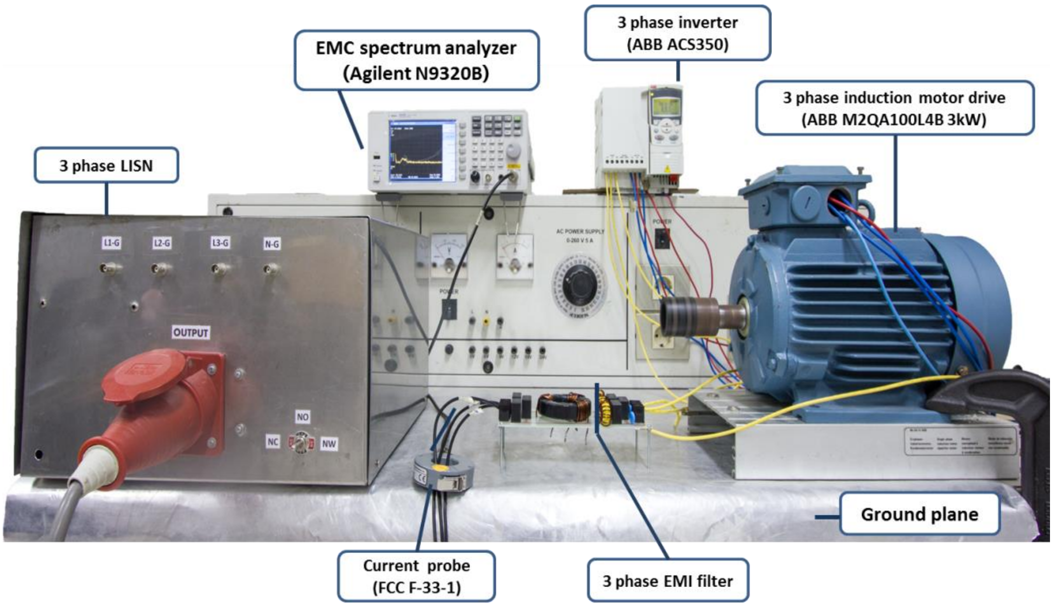


รูปที่ 4.4 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส

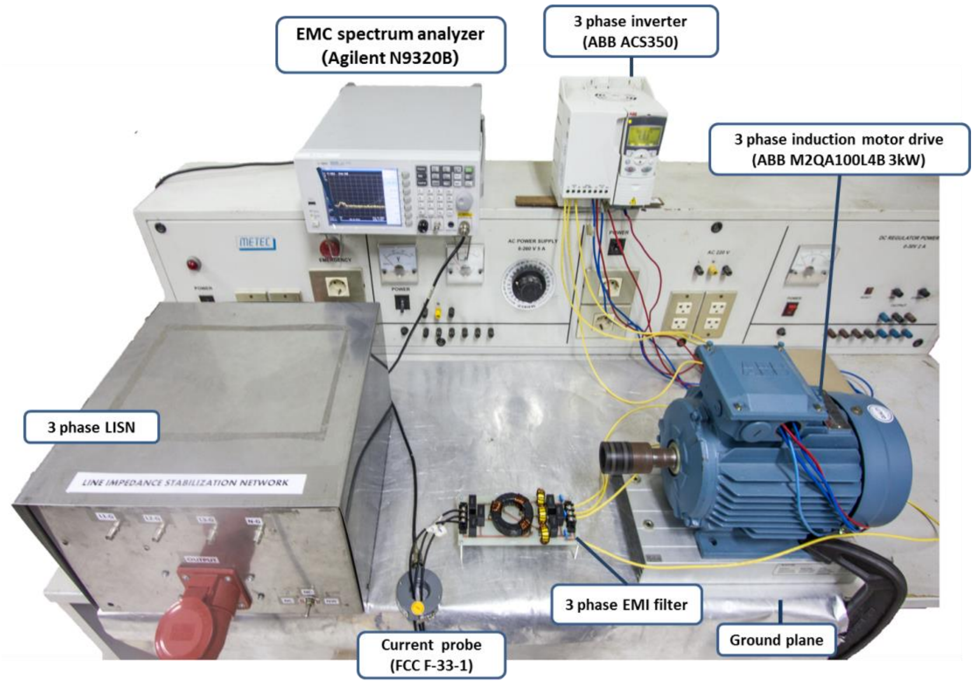


รูปที่ 4.5 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส

4.3.2 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

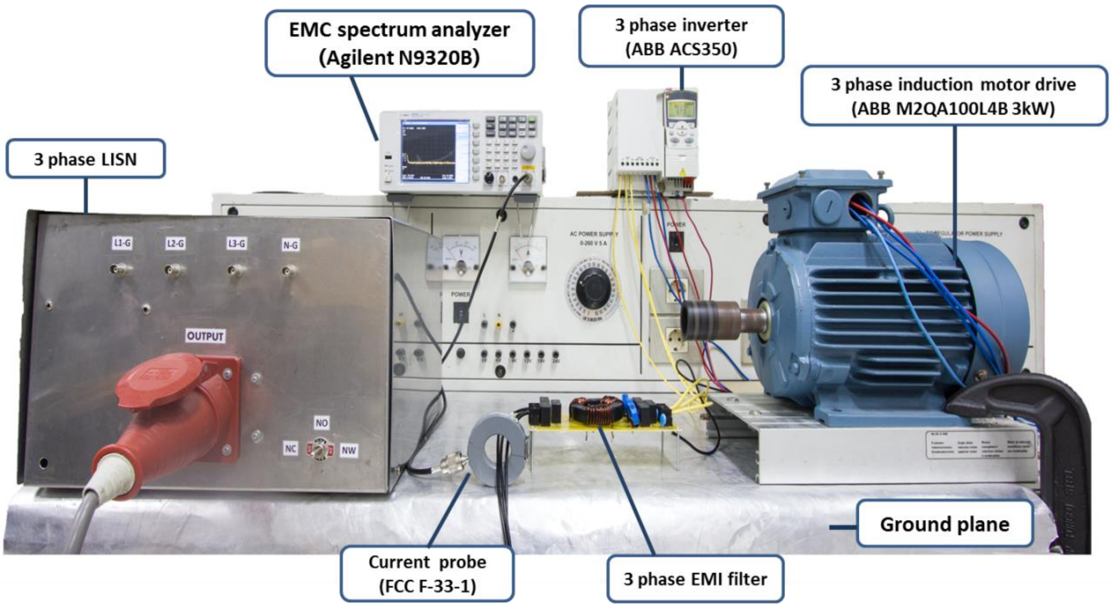


รูปที่ 4.6 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

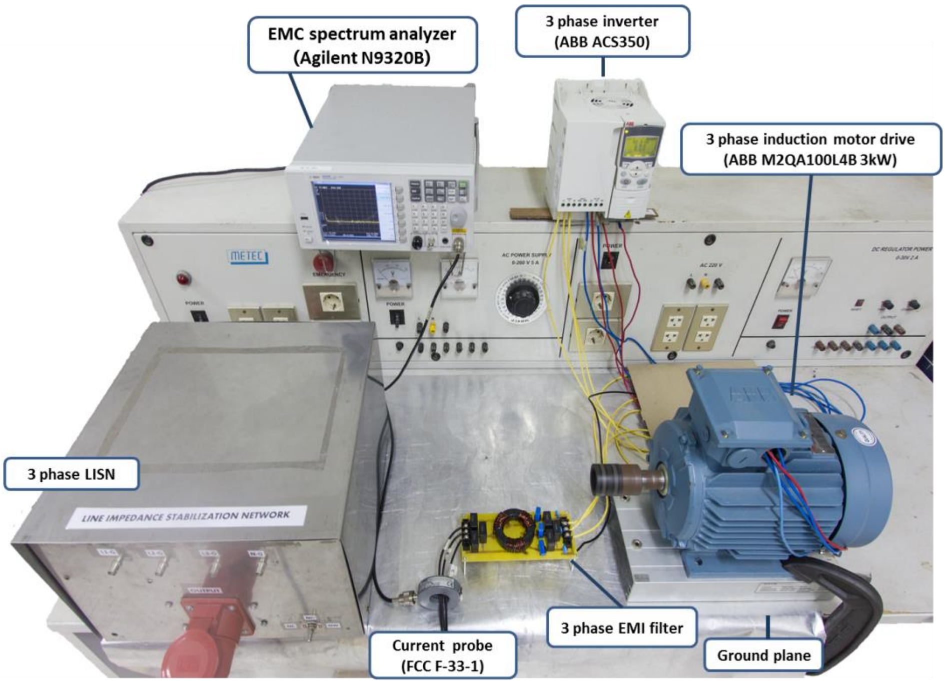


รูปที่ 4.7 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen

4.3.3 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

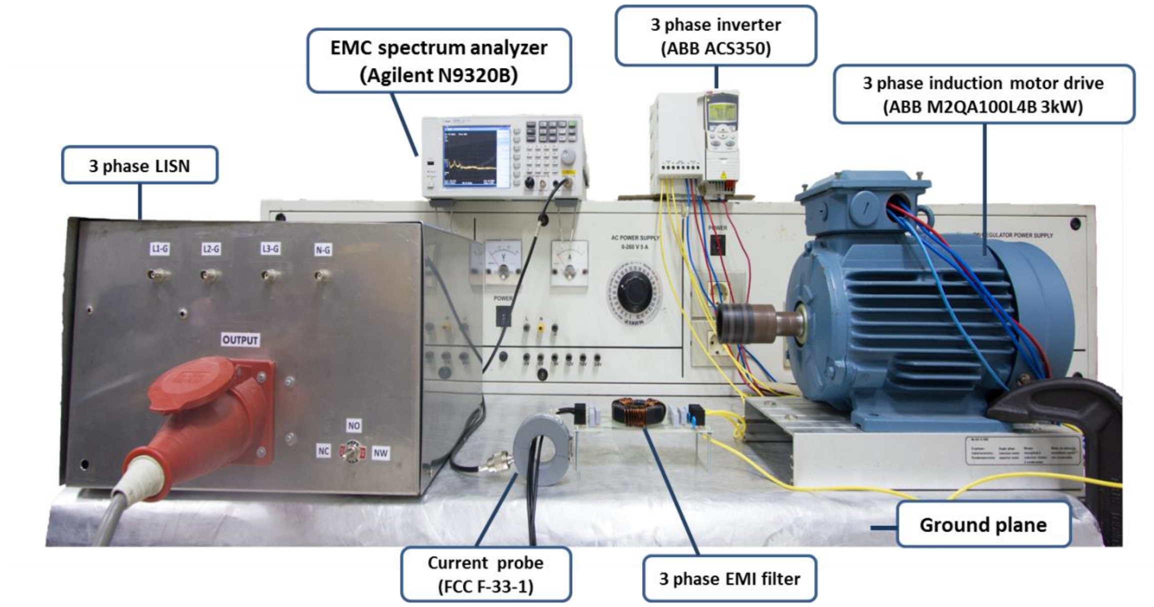


รูปที่ 4.8 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

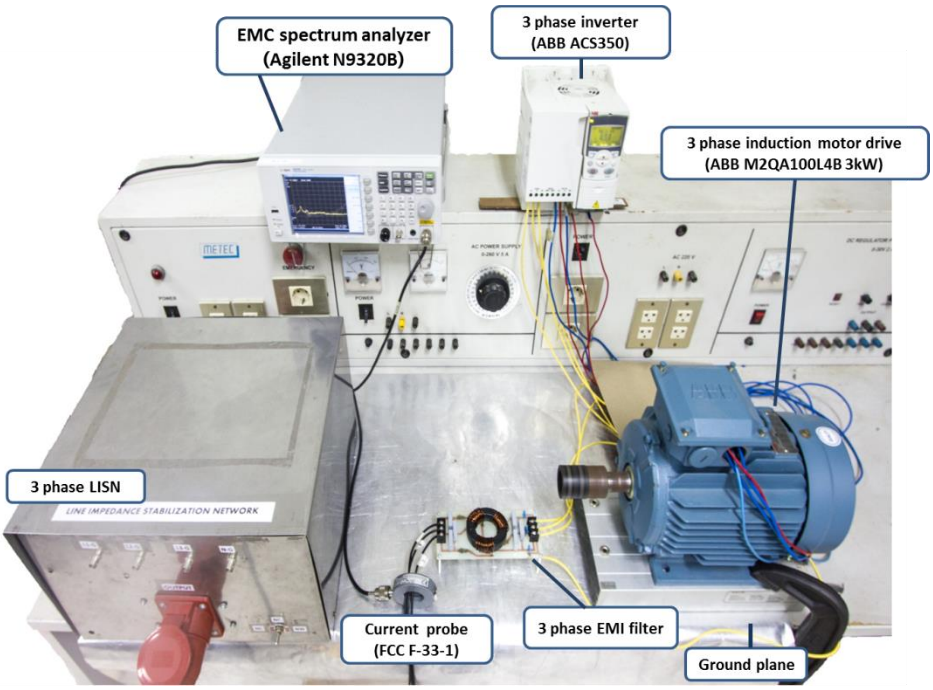


รูปที่ 4.9 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai

4.3.4 การทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ



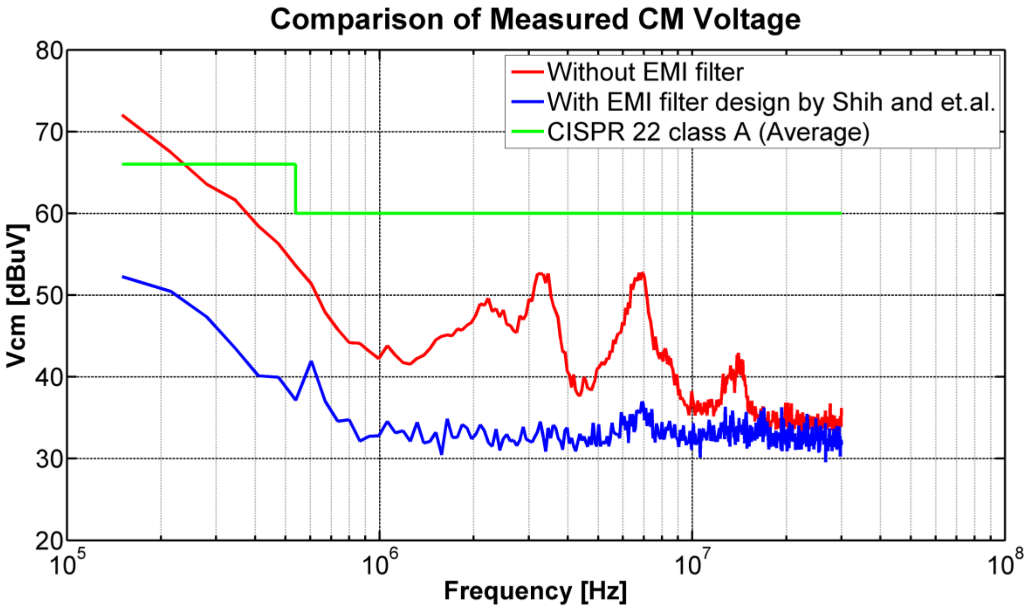
รูปที่ 4.10 ภาพด้านหน้าของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ



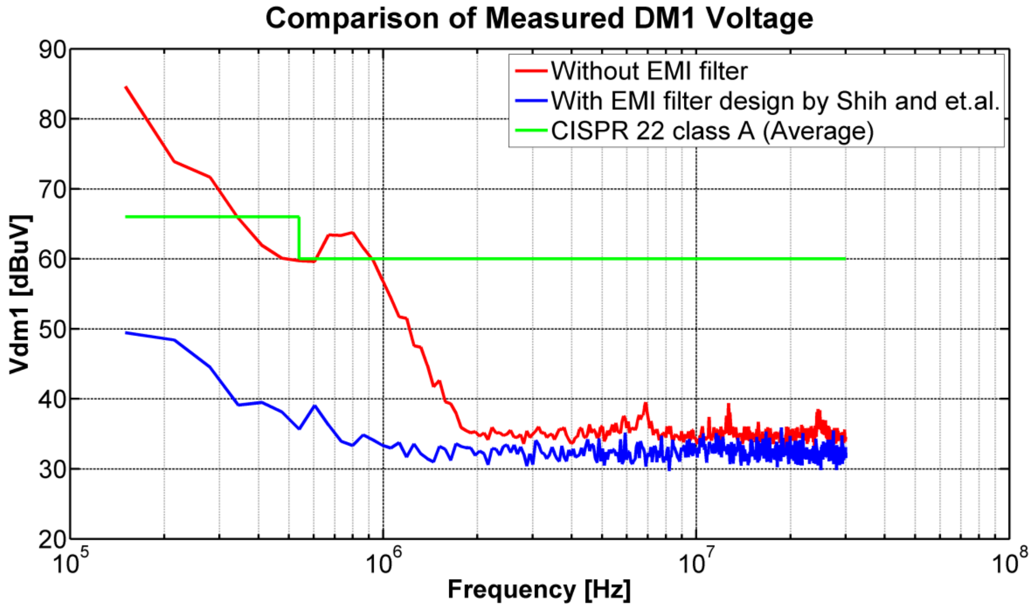
รูปที่ 4.11 ภาพด้านบนของการทดลองกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ากับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ในแต่ละกรณี ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

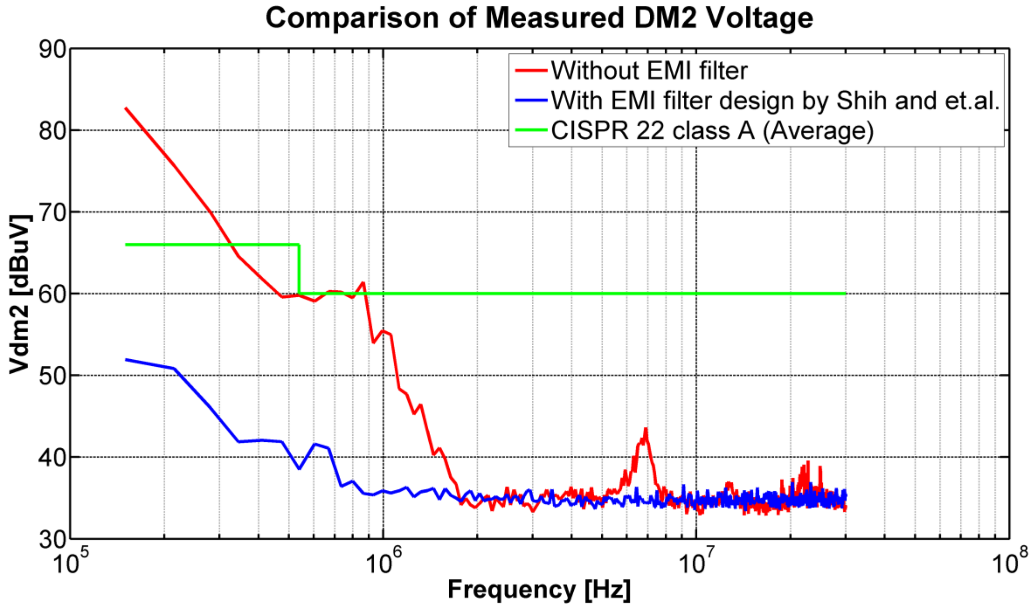
4.4.1 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)



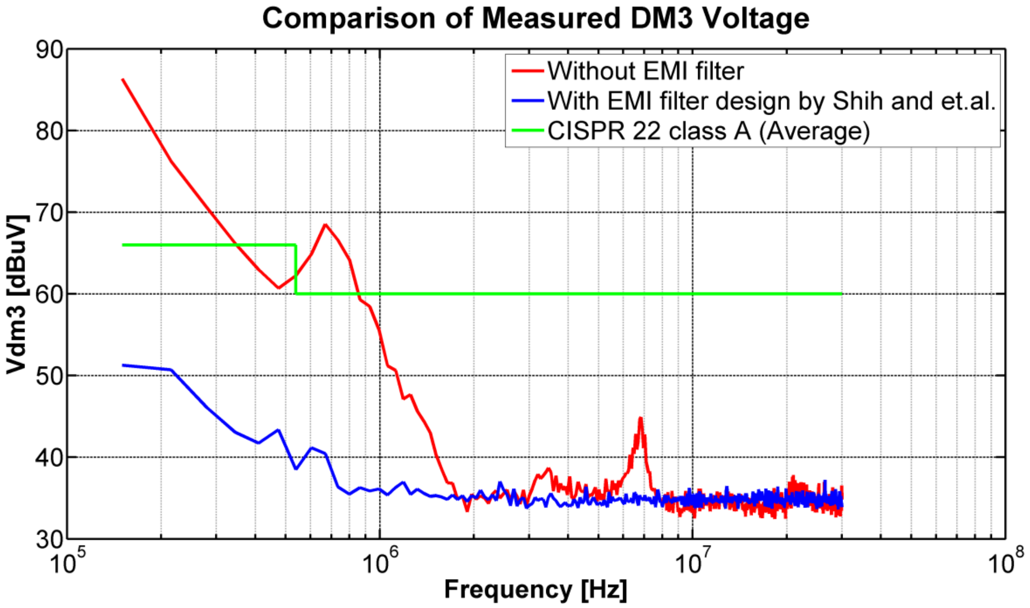
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



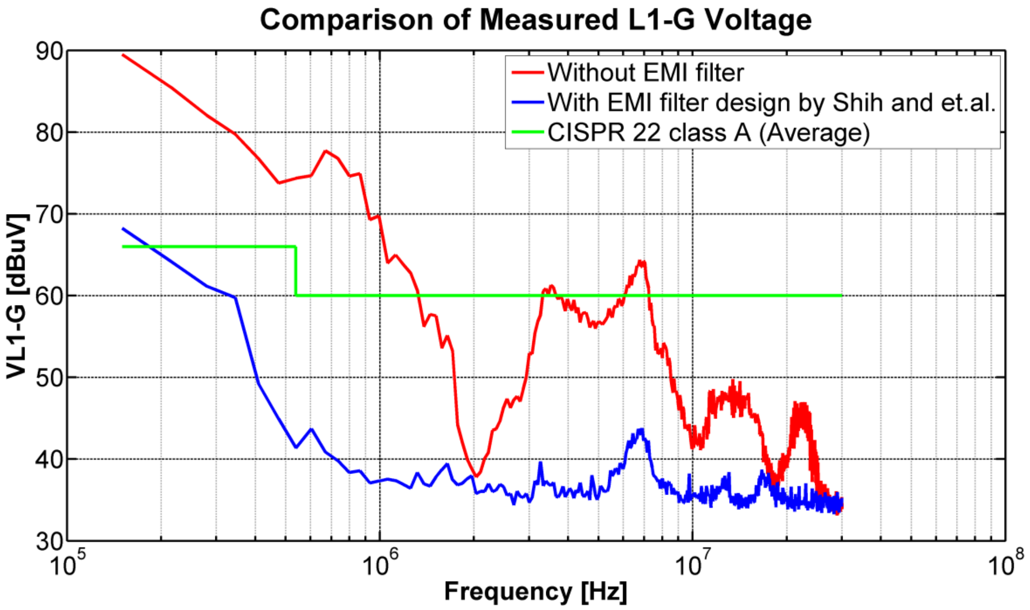
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



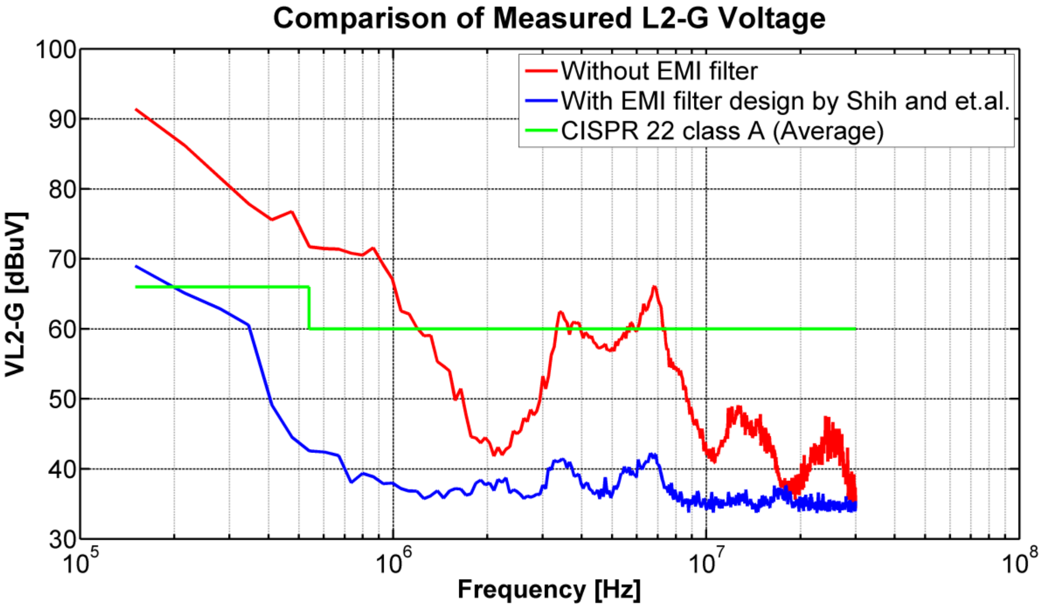
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



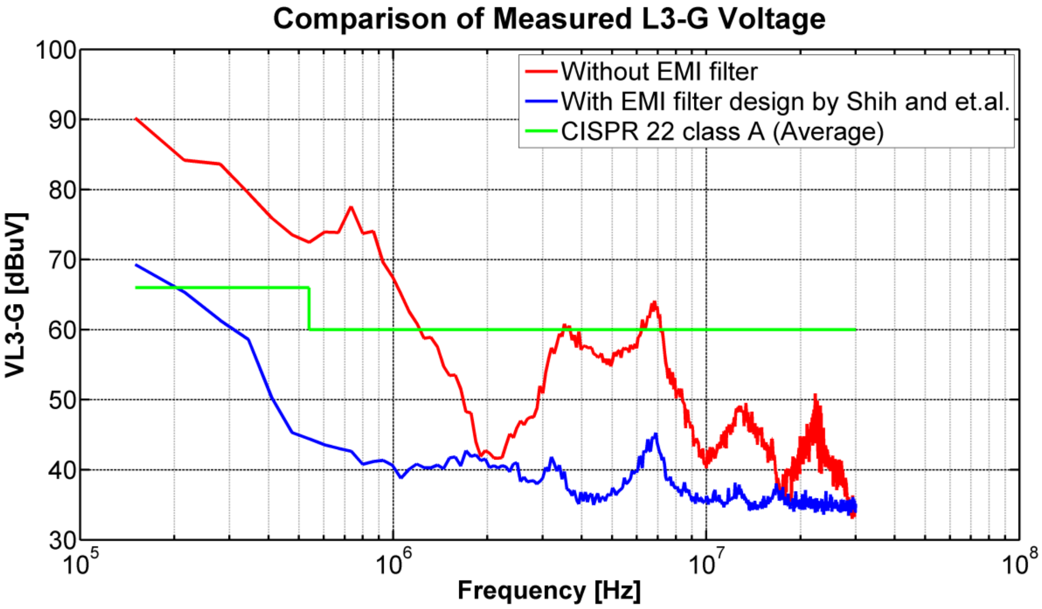
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



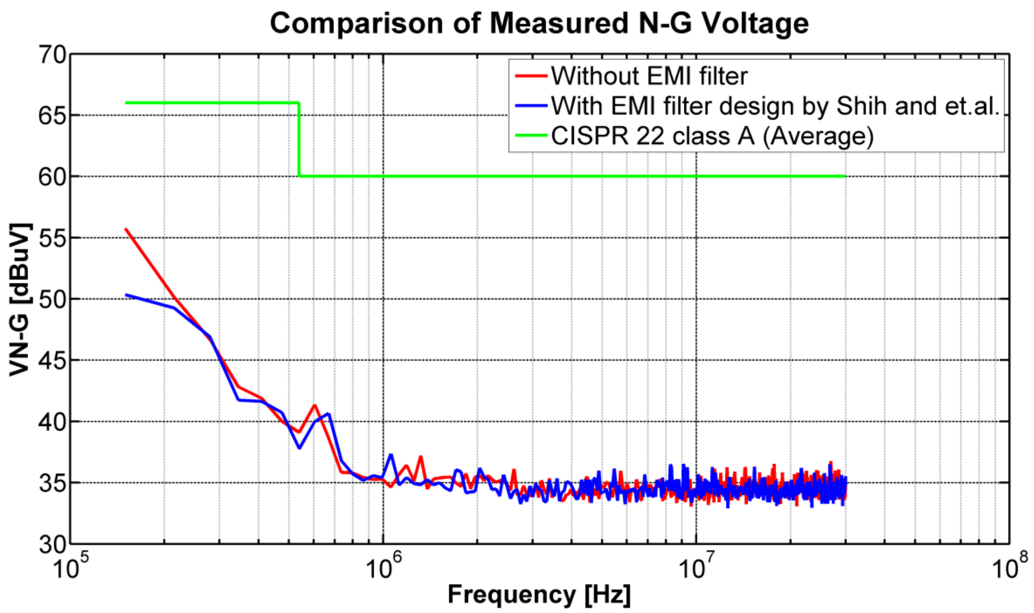
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

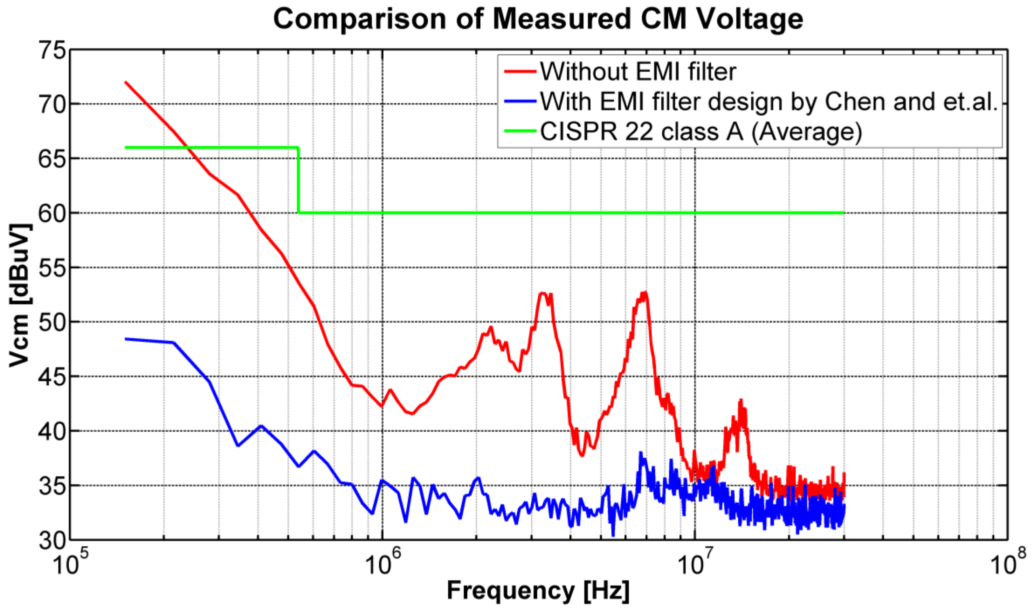


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

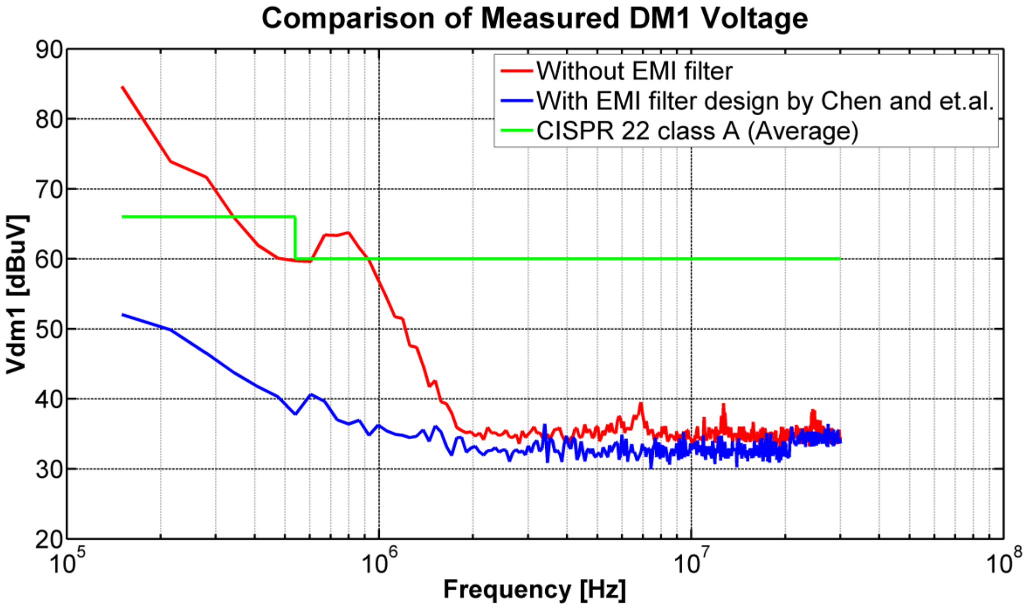


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

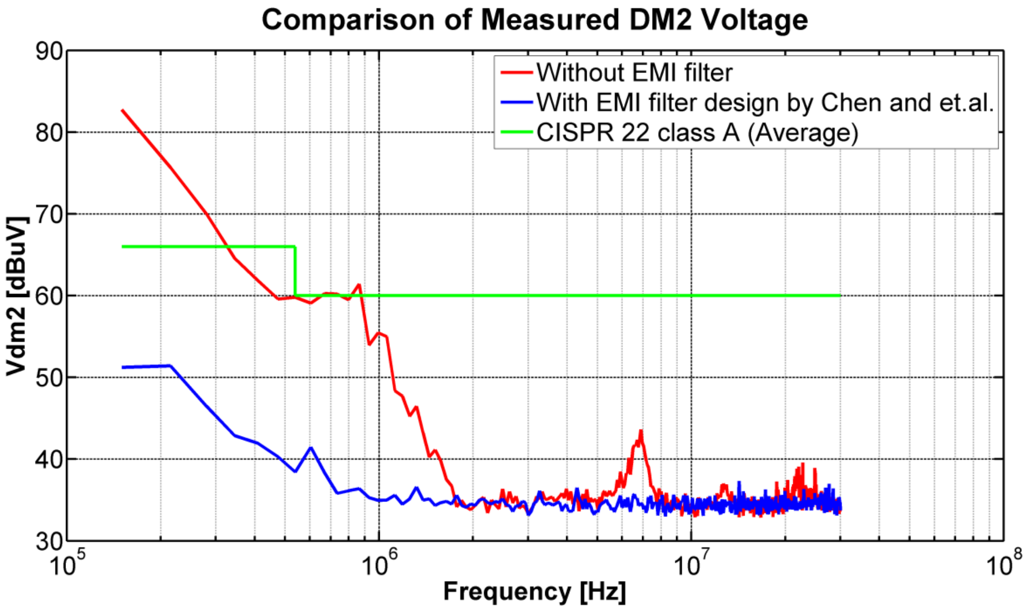
4.4.2 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)



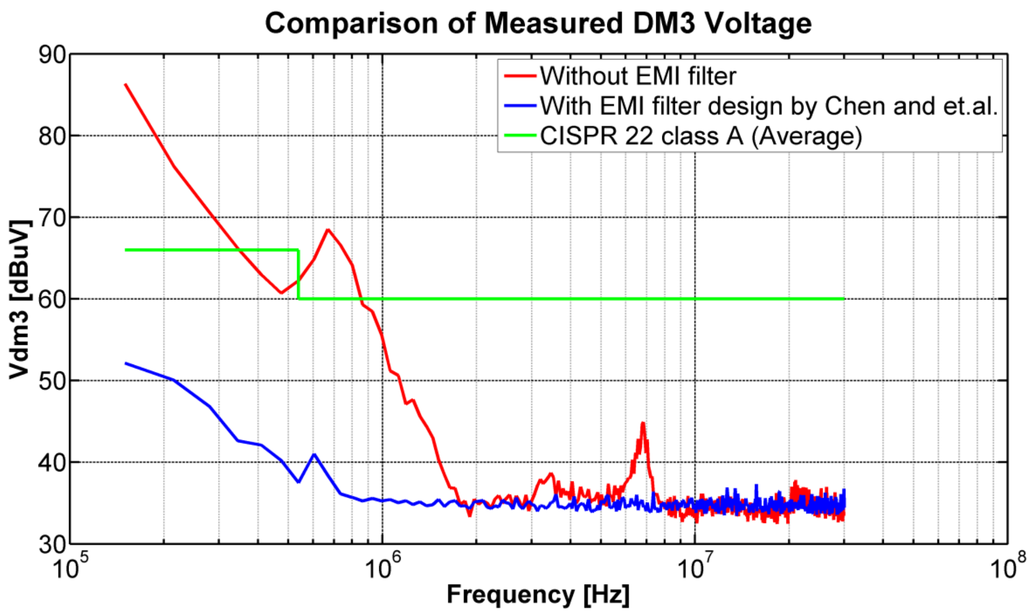
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



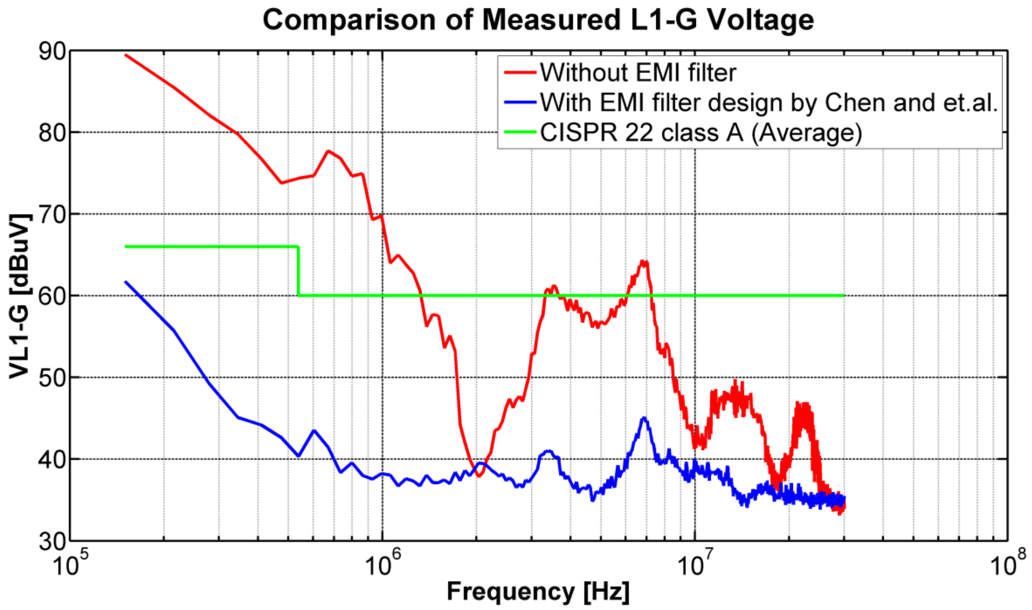
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



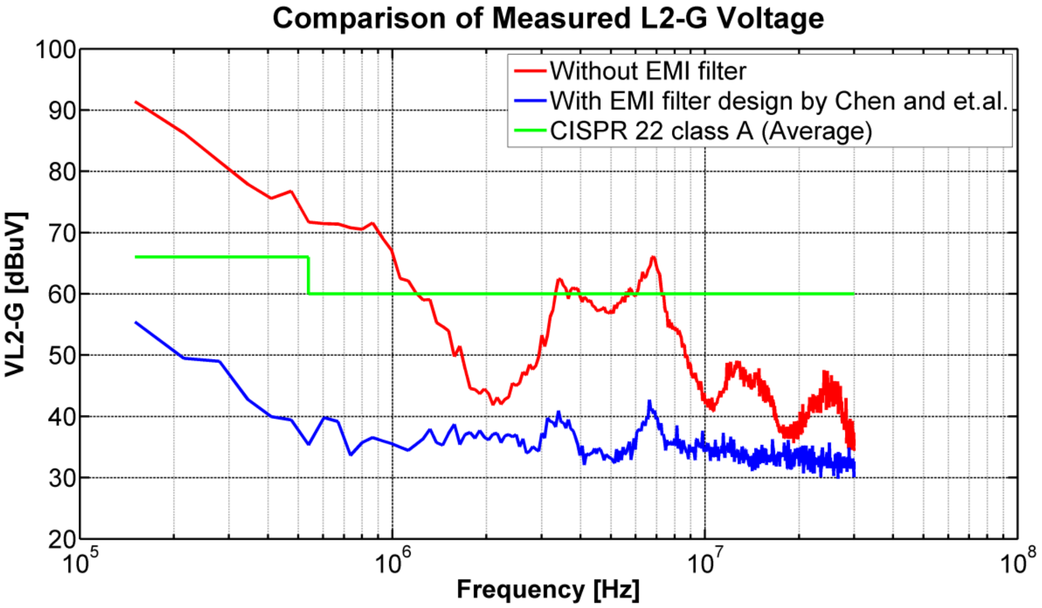
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



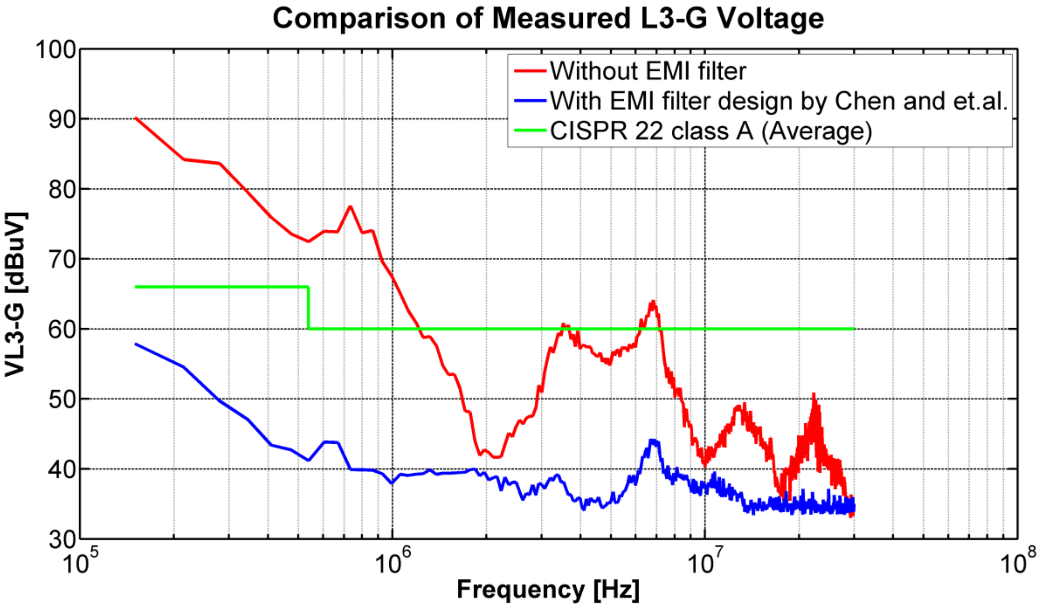
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



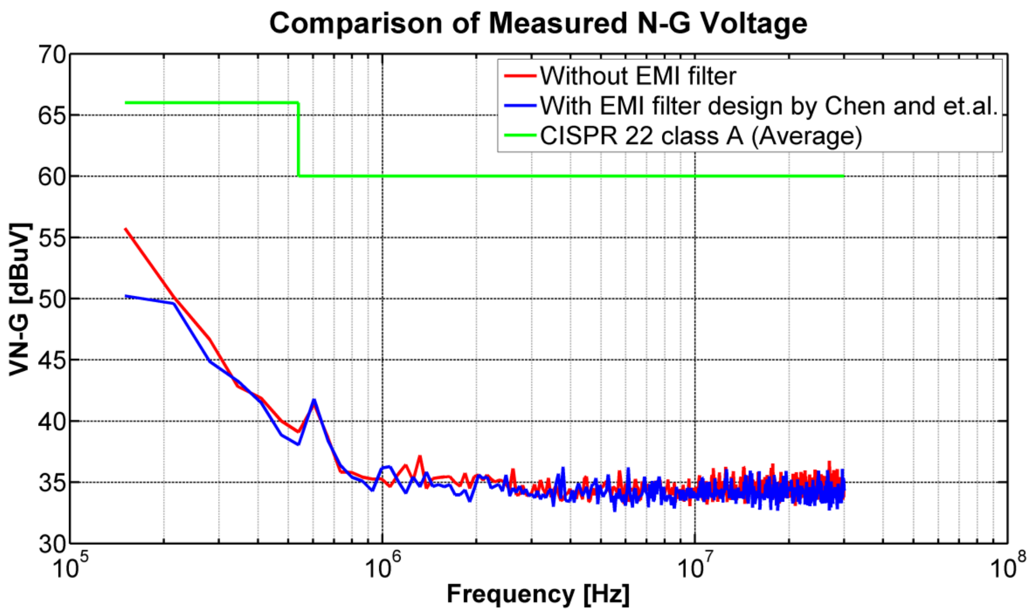
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ ($V_{L2\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

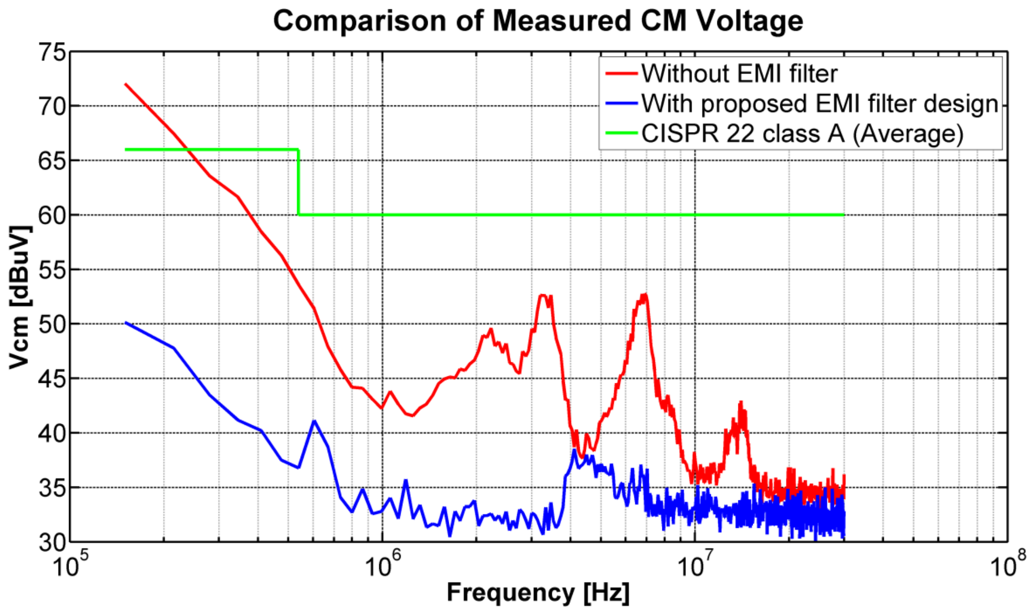


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ ($_{VL3\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

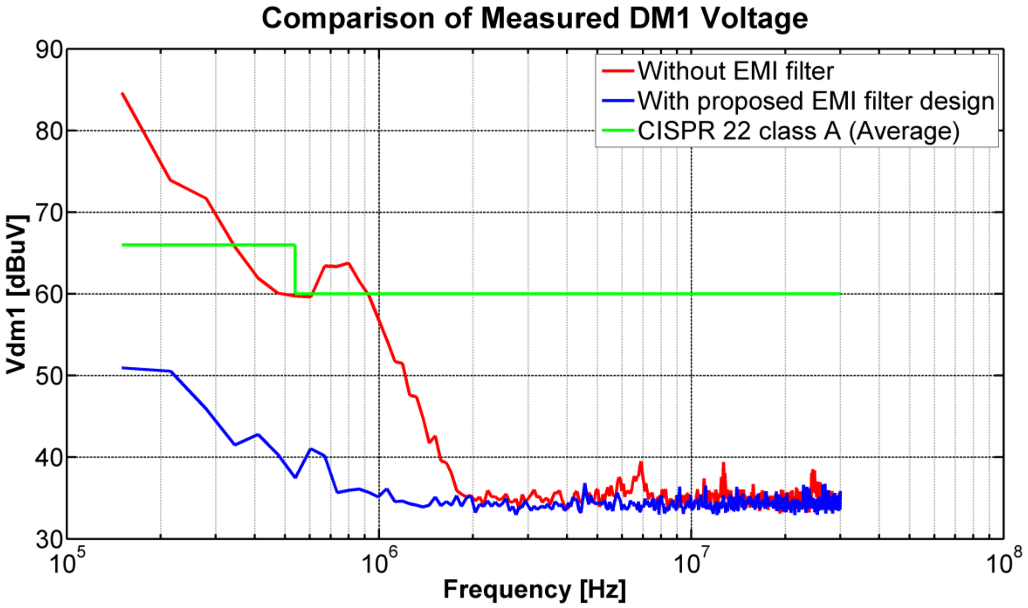


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

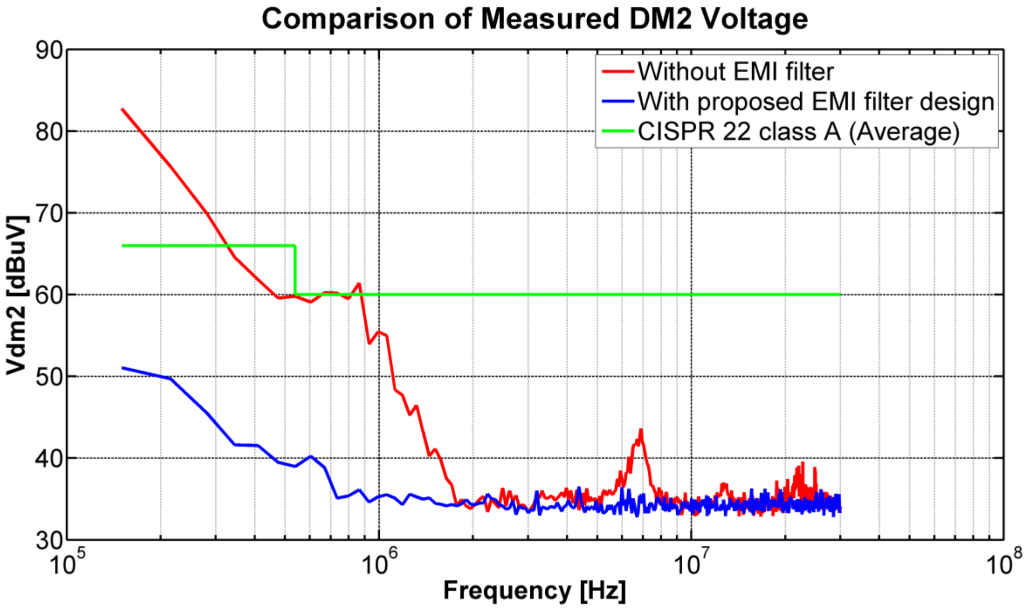
4.4.3 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีที่นำเสนอ เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)



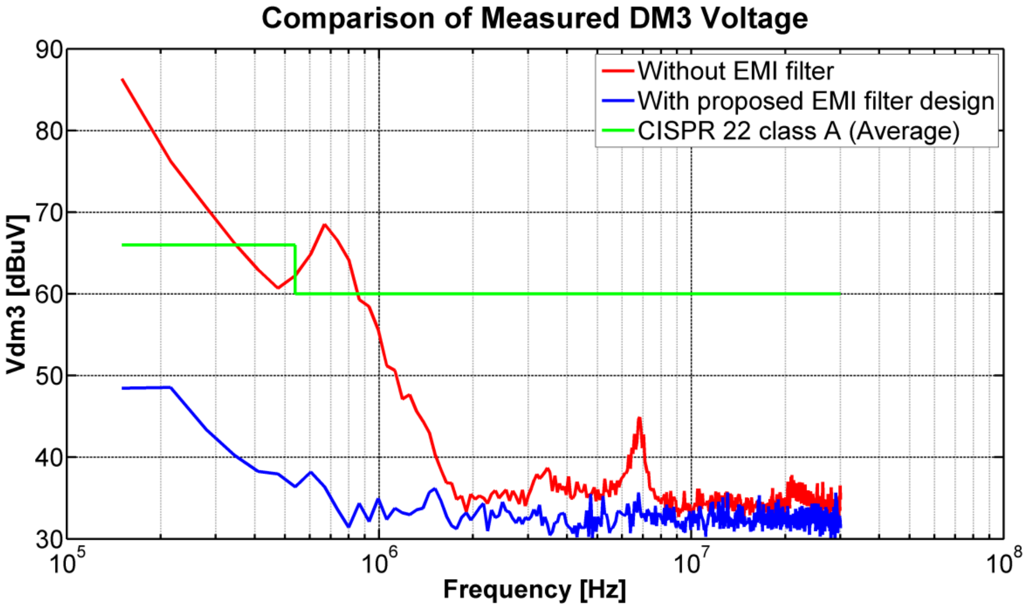
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



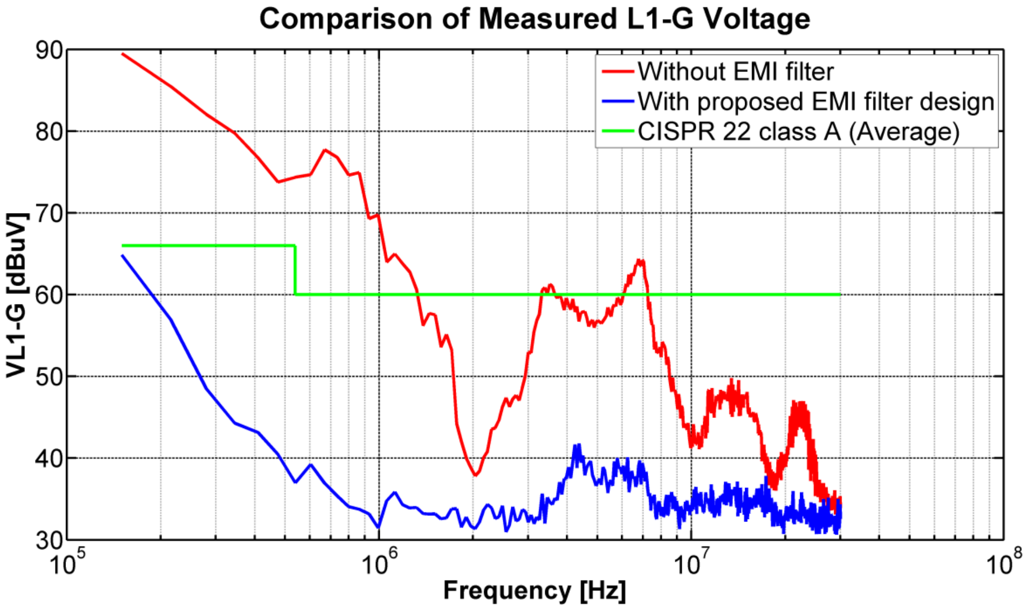
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



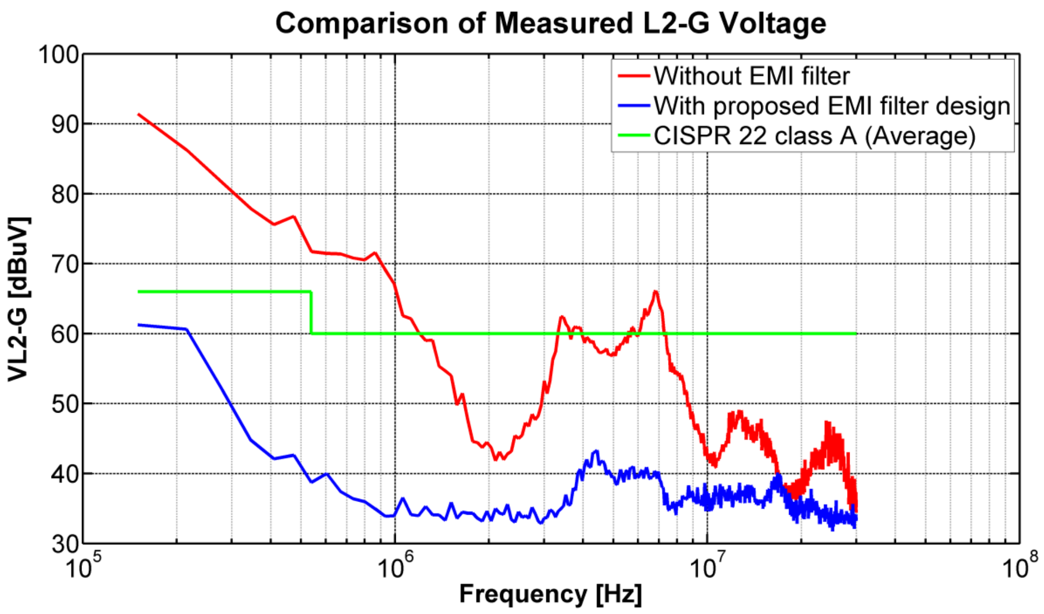
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



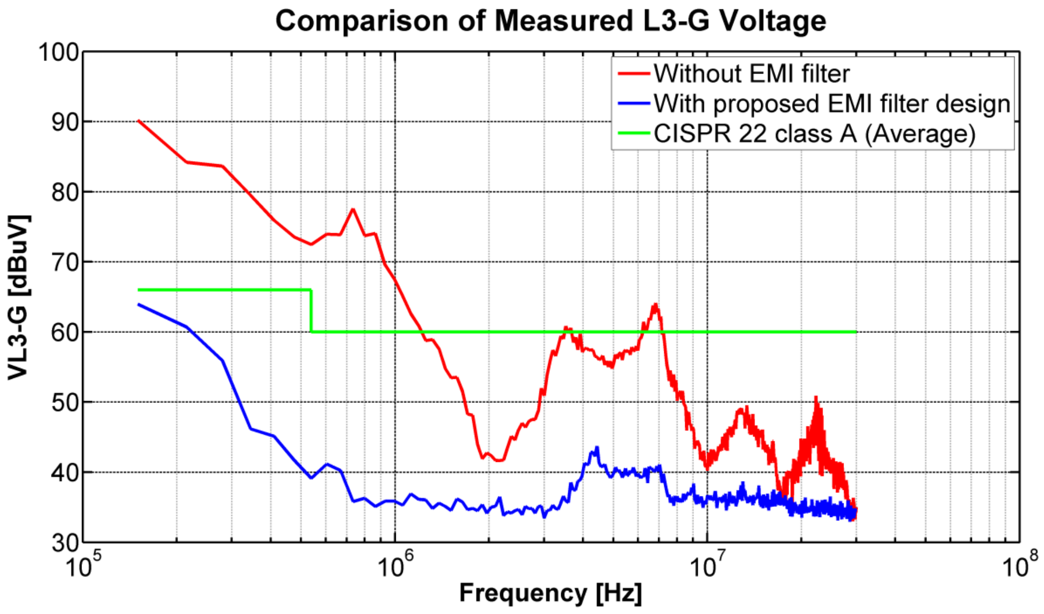
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



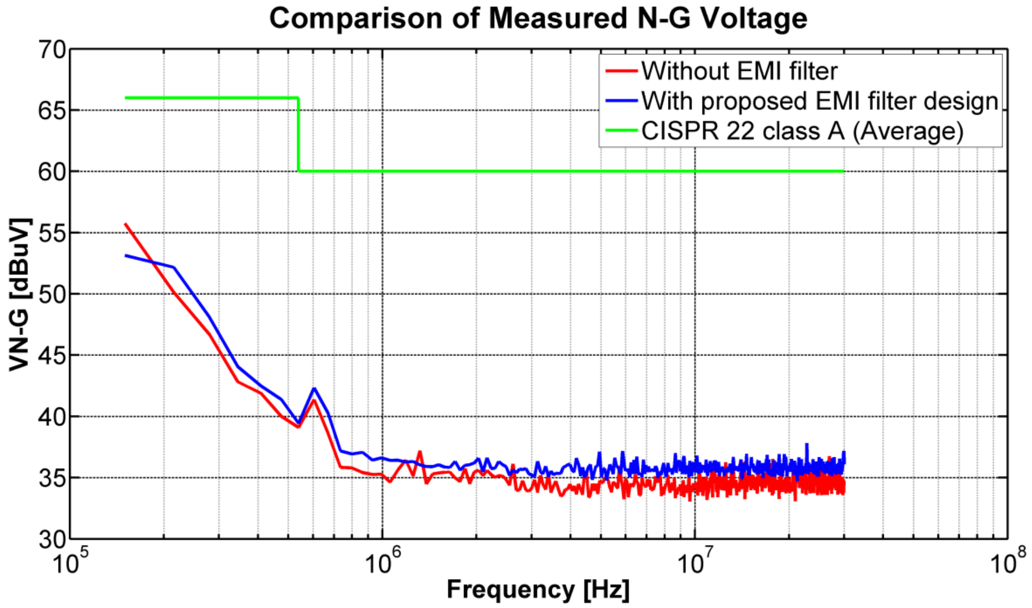
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

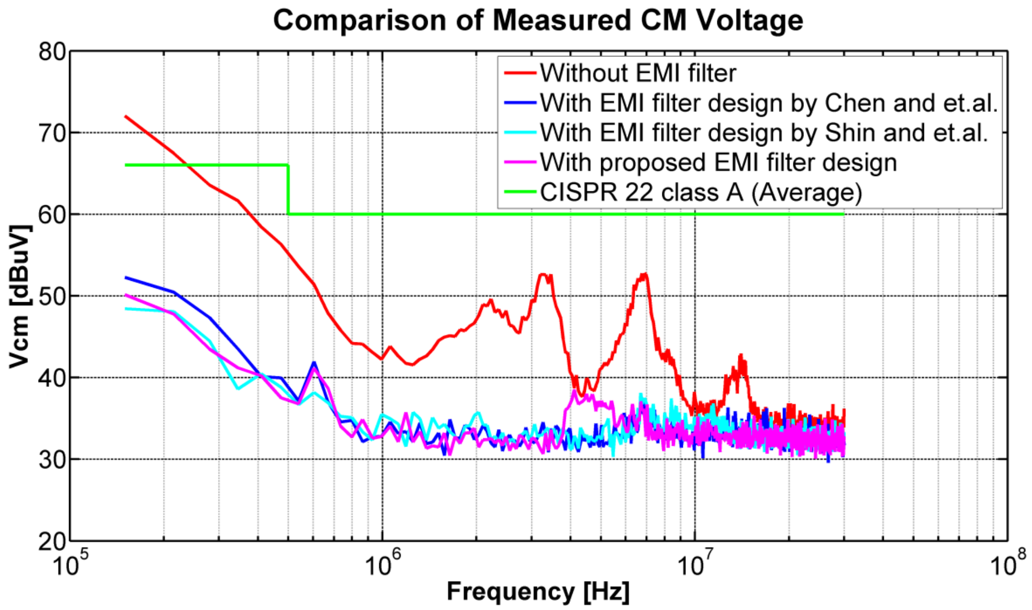


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

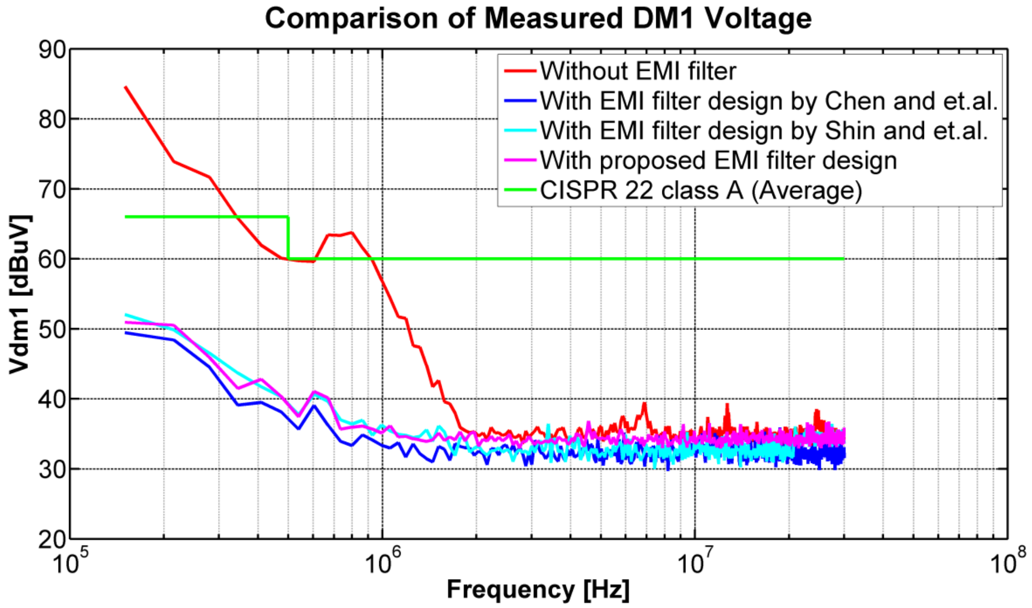


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

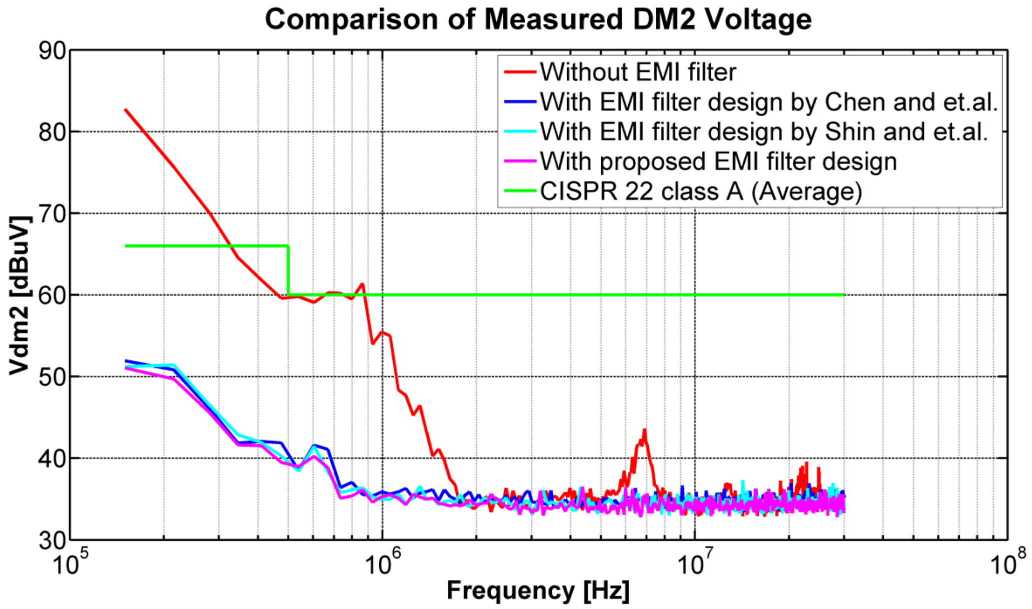
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทุกกรณีกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที



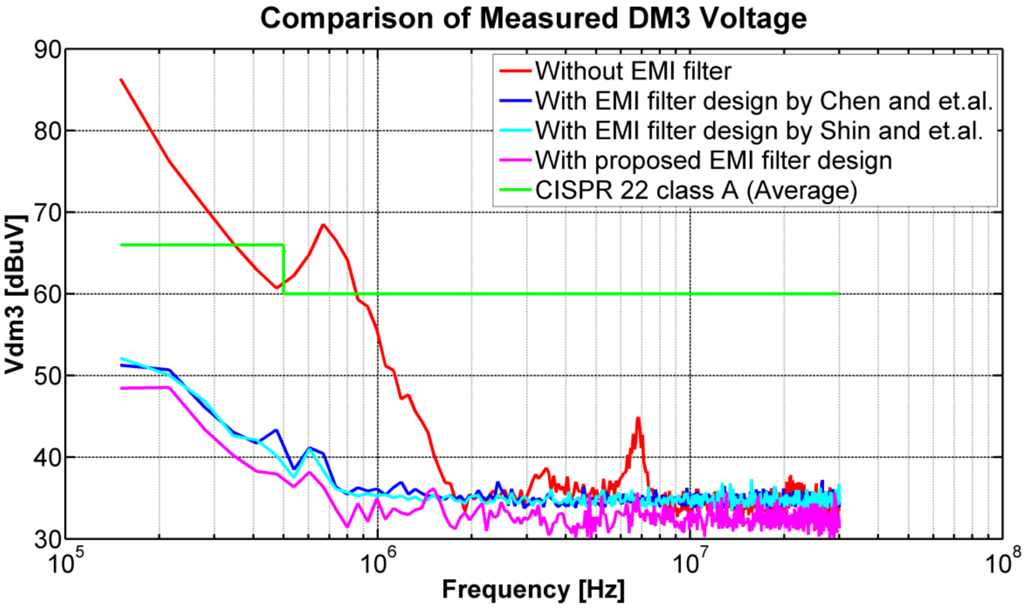
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



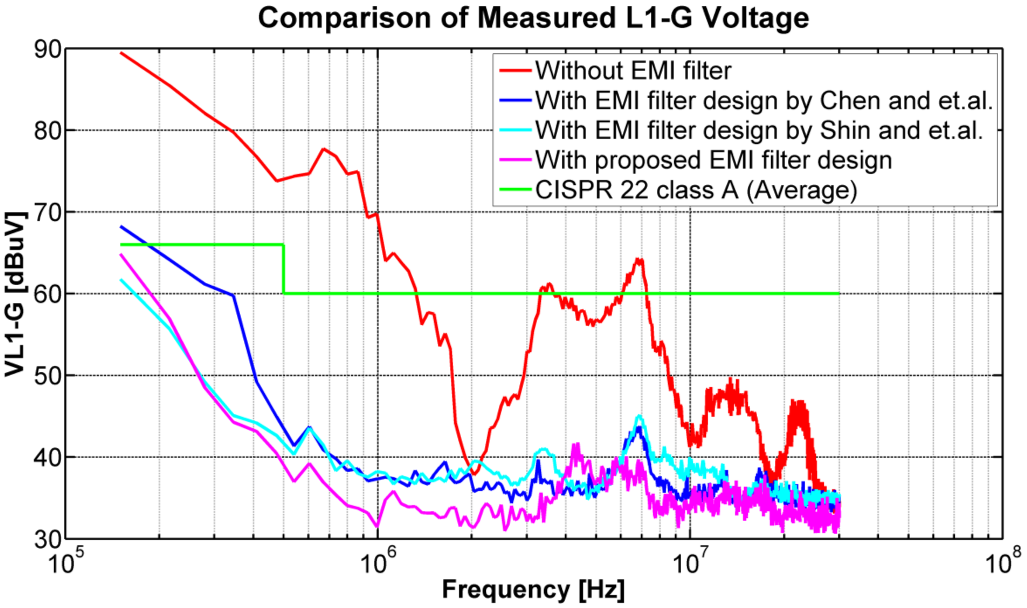
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



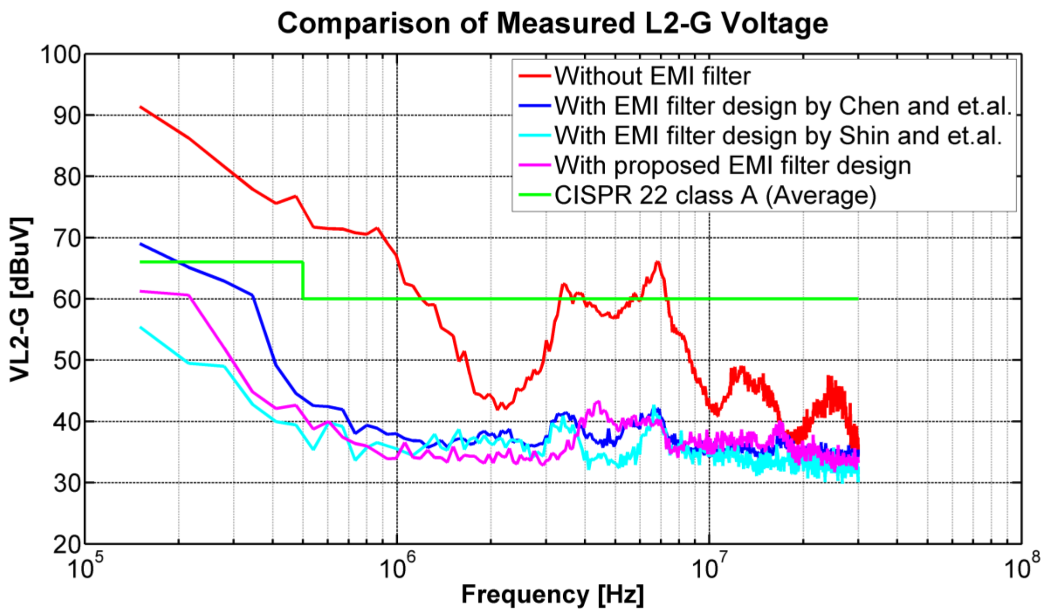
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



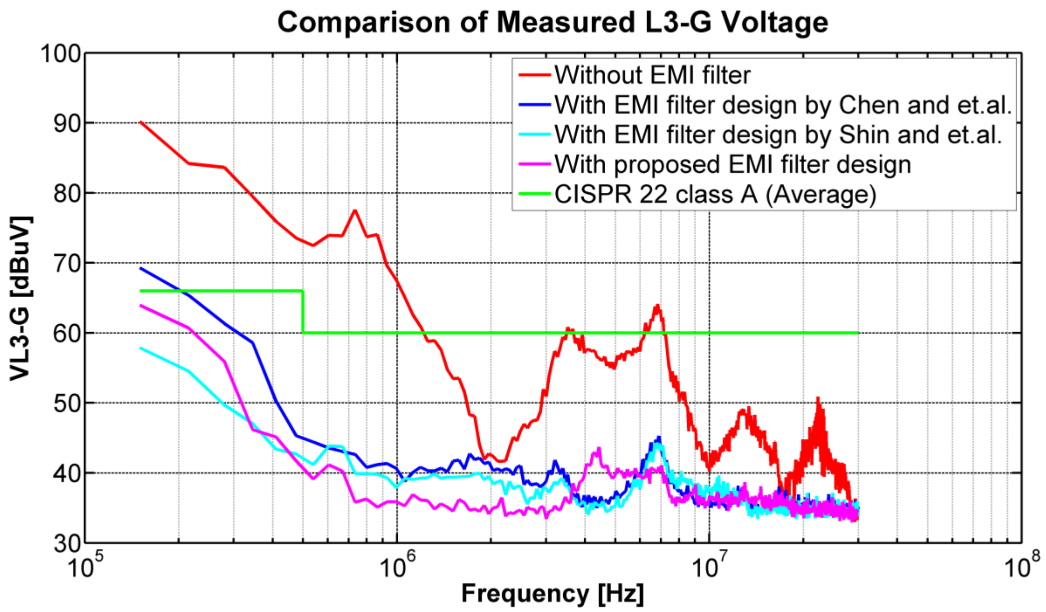
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



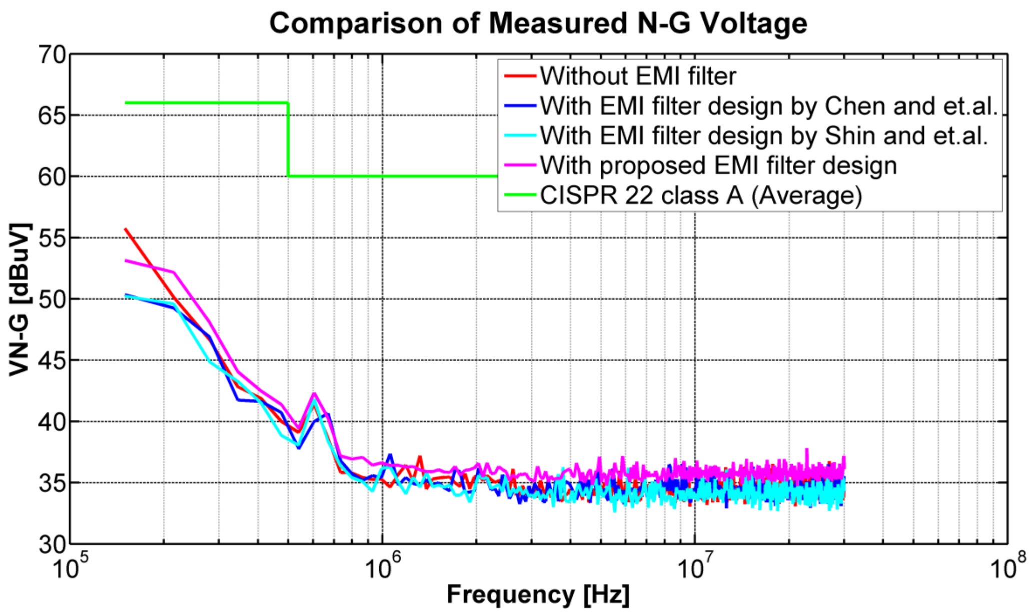
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ ($V_{L2\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



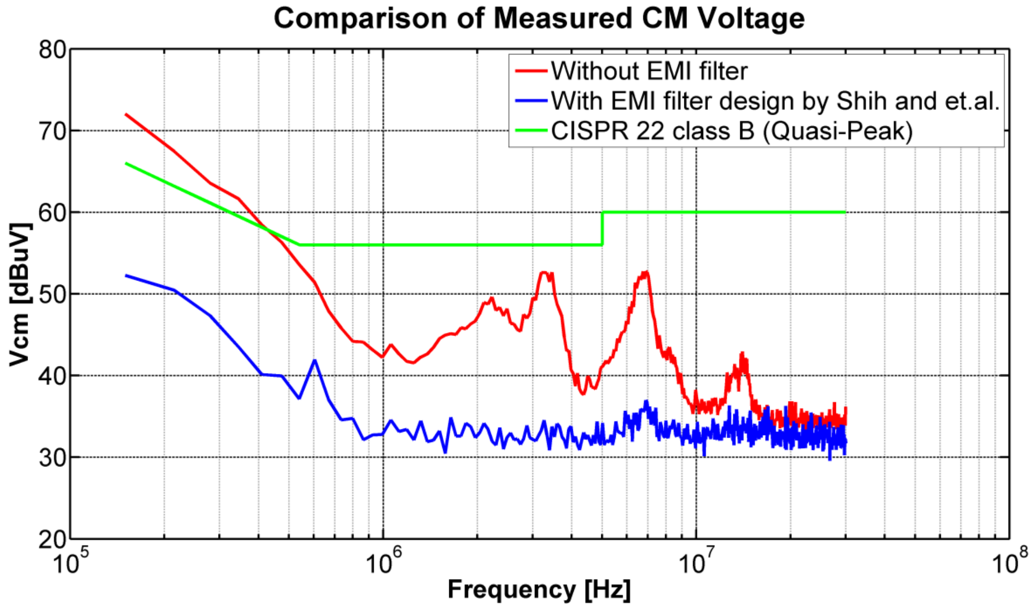
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ ($V_{L3\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



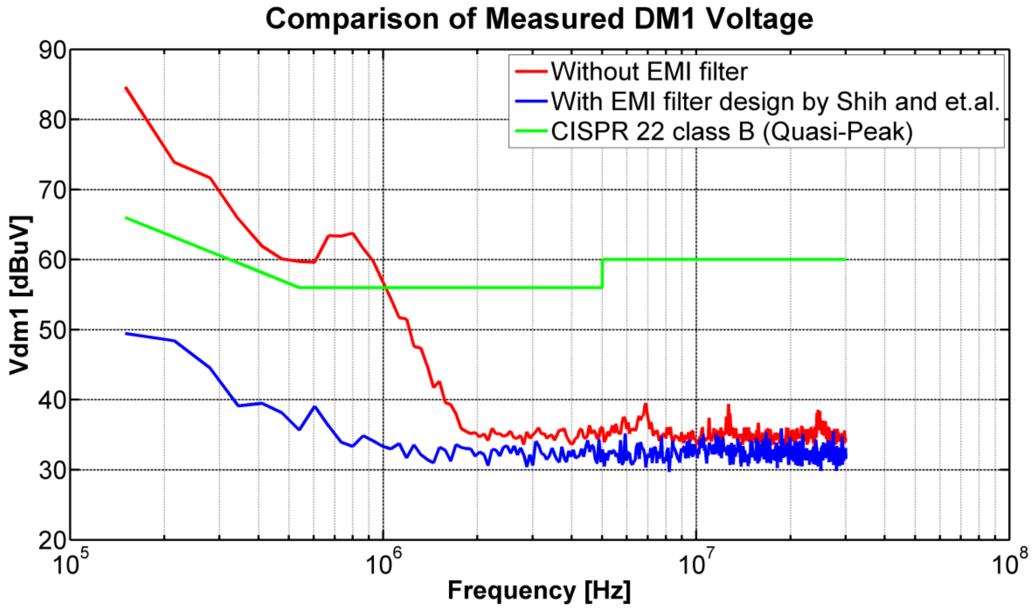
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)

4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ากับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ในแต่ละกรณี ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

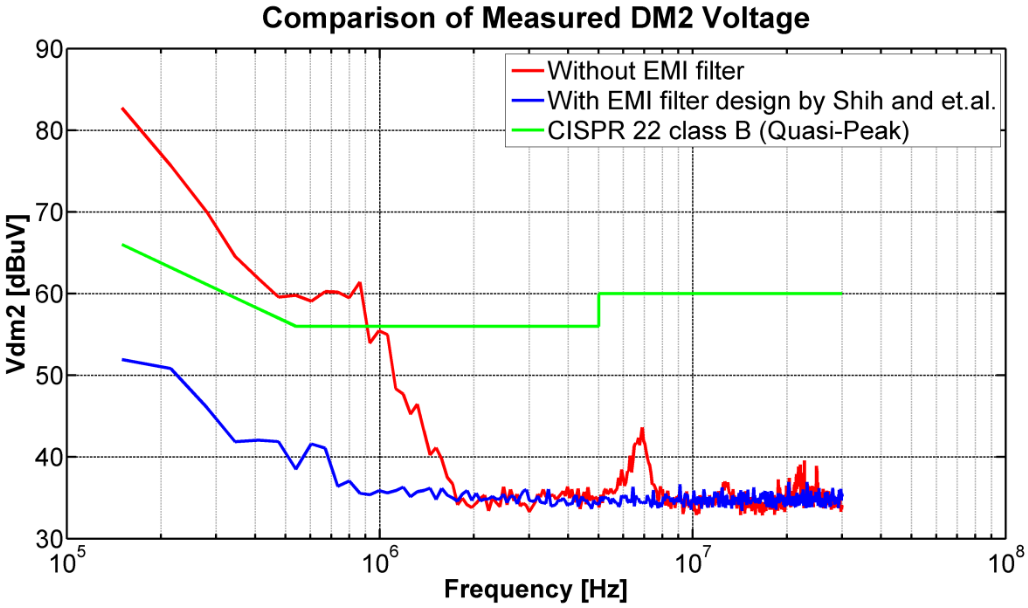
4.6.1 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)



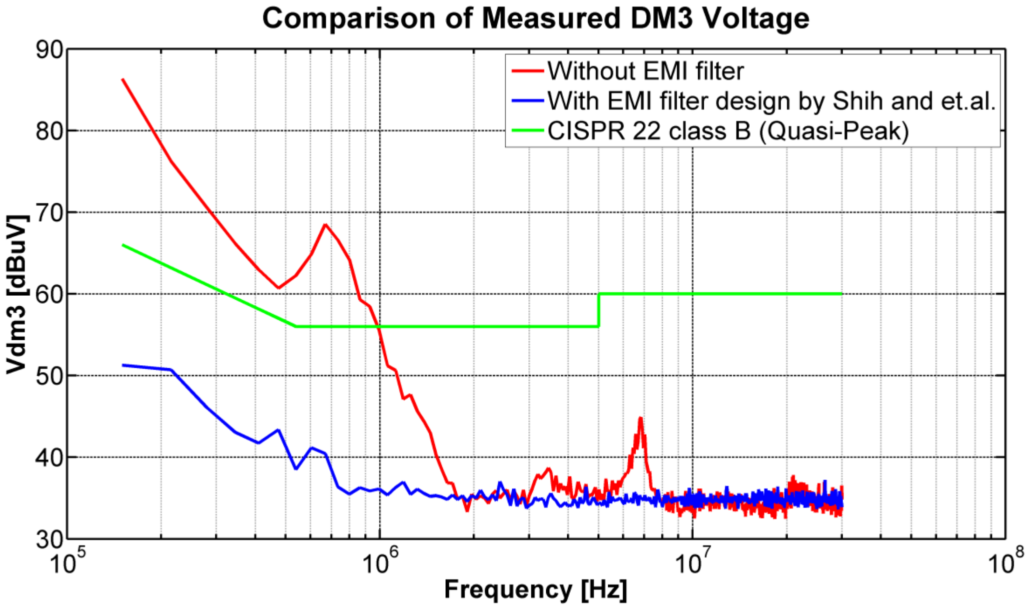
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



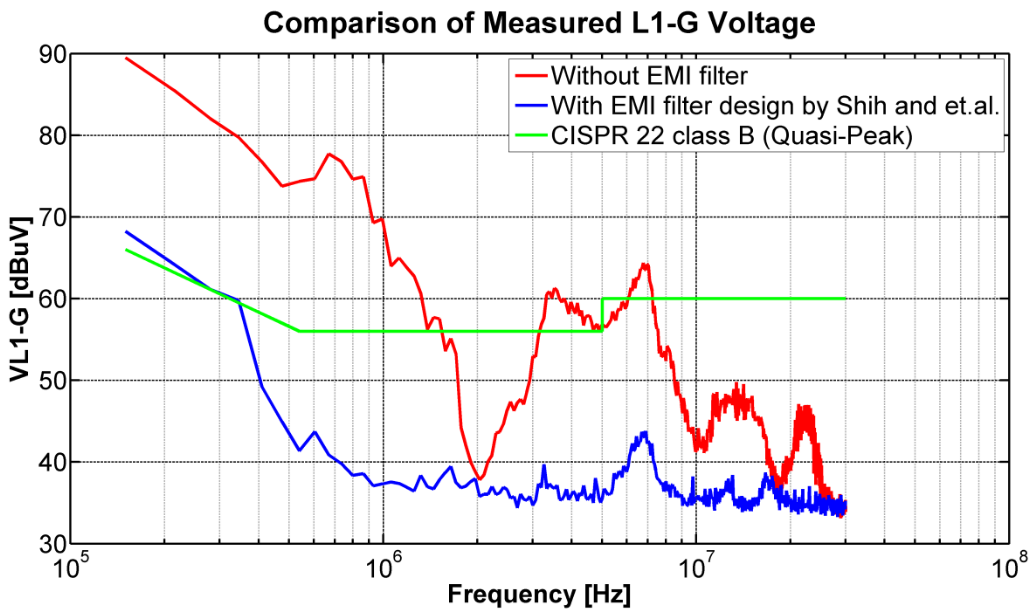
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



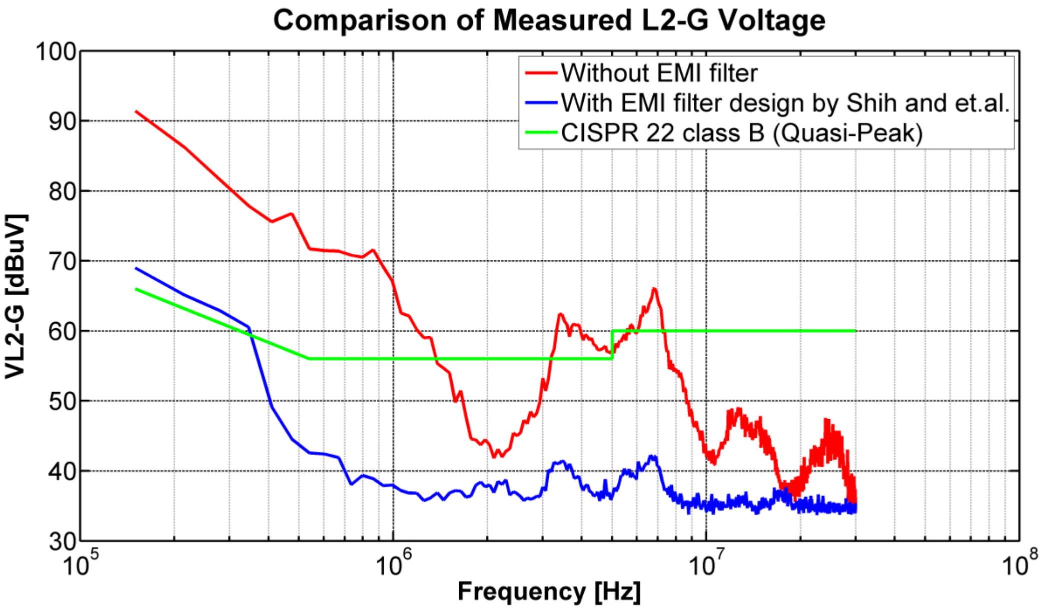
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



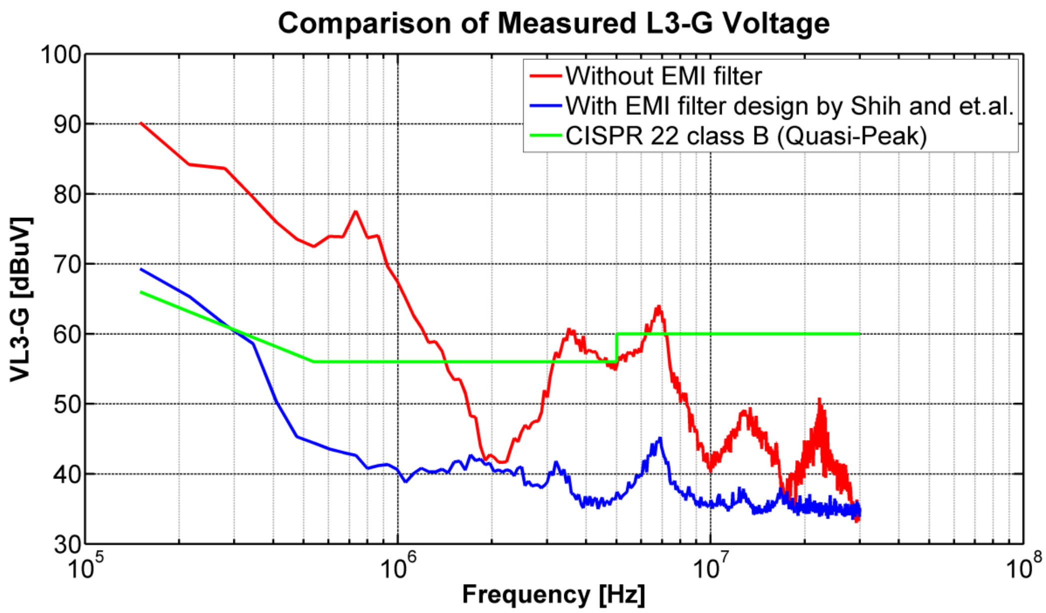
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



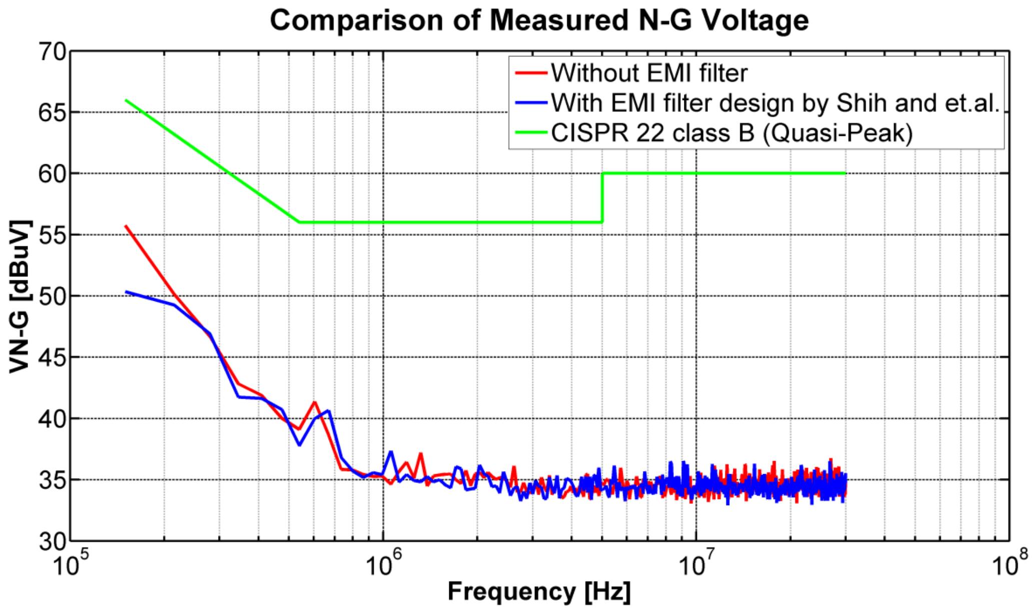
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 1 เทียบกับกราวด์ ($V_{L1\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 2 เทียบกับกราวด์ ($V_{L2\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

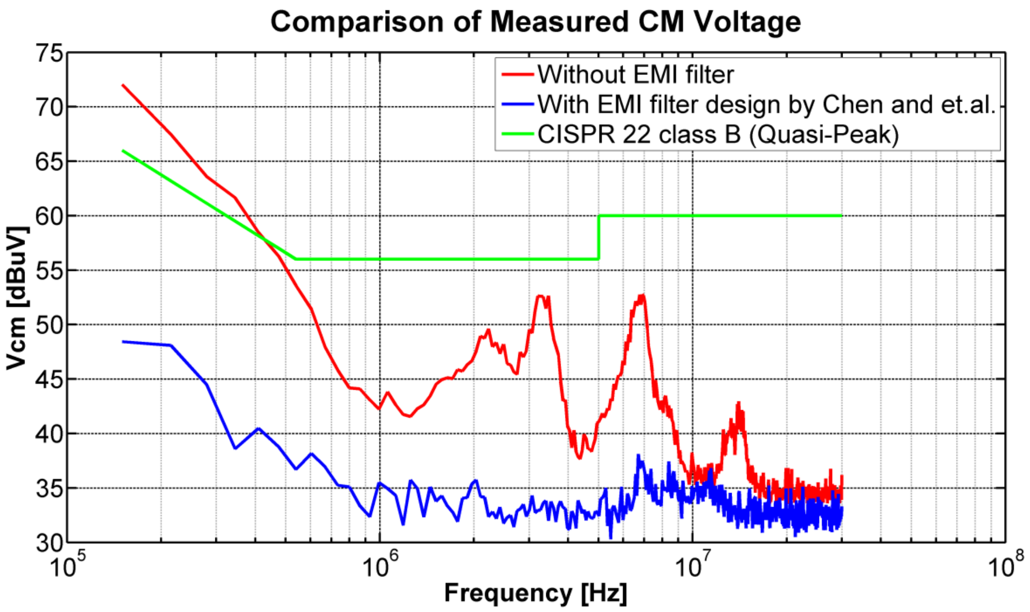


รูปที่ 4.50 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์ 3 เทียบกับกราวด์ ($V_{L3\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

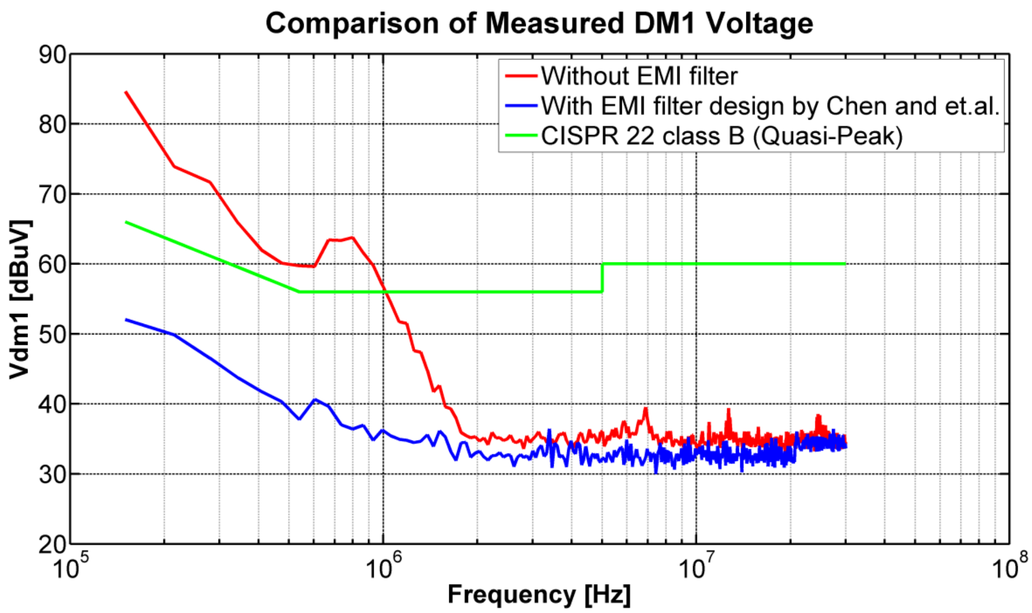


รูปที่ 4.51 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ ($V_{N\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu และ Yie-Tone Chen (With EMI filter)

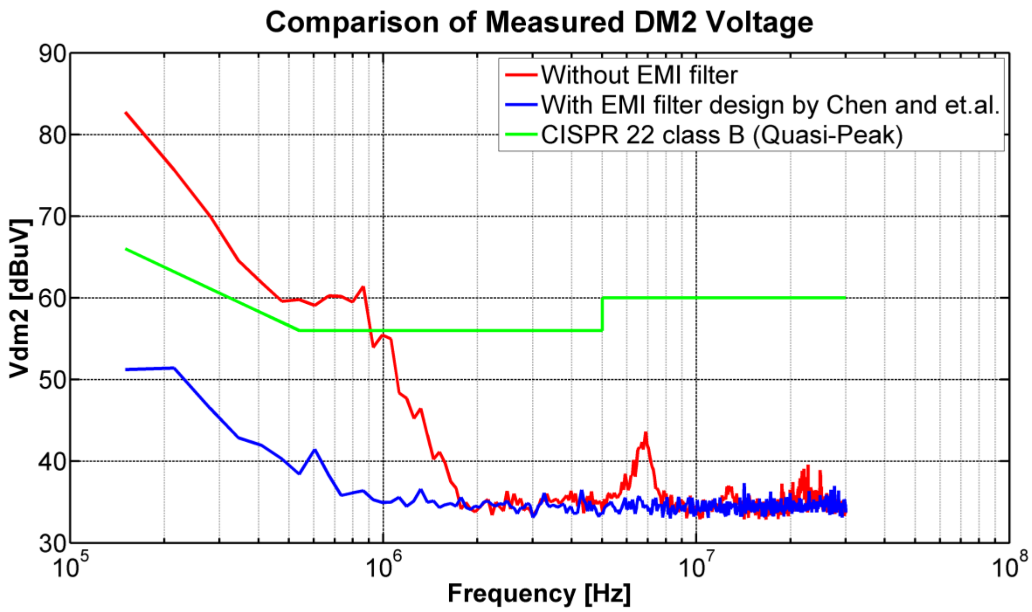
4.6.2 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)



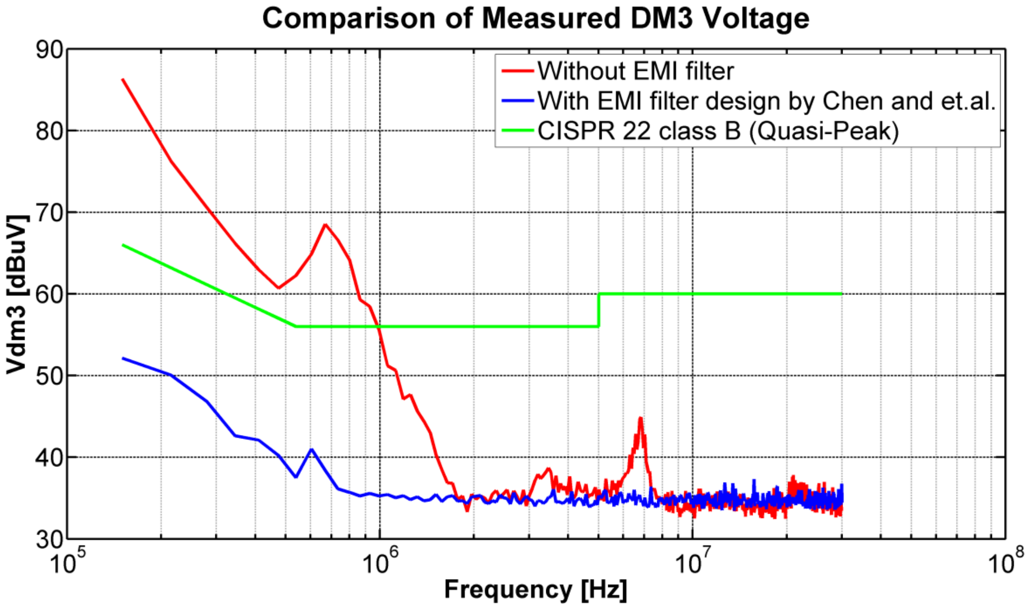
รูปที่ 4.52 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



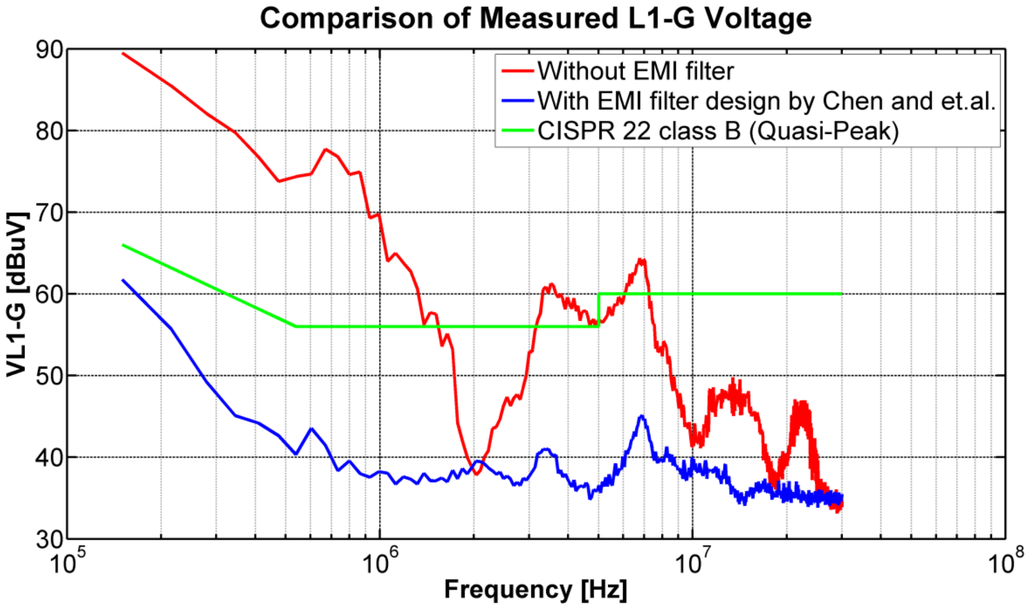
รูปที่ 4.53 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



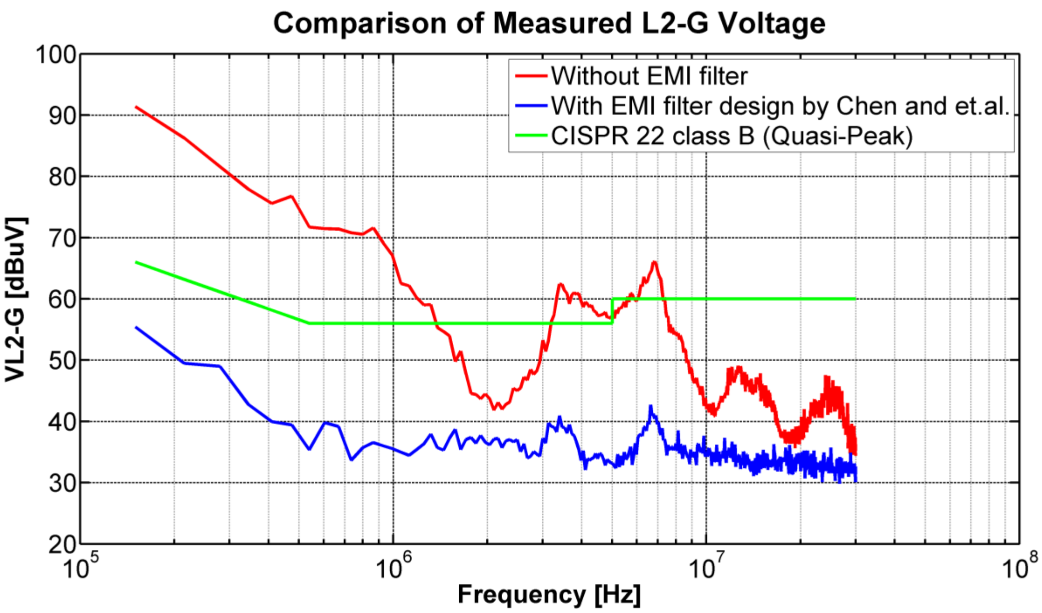
รูปที่ 4.54 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



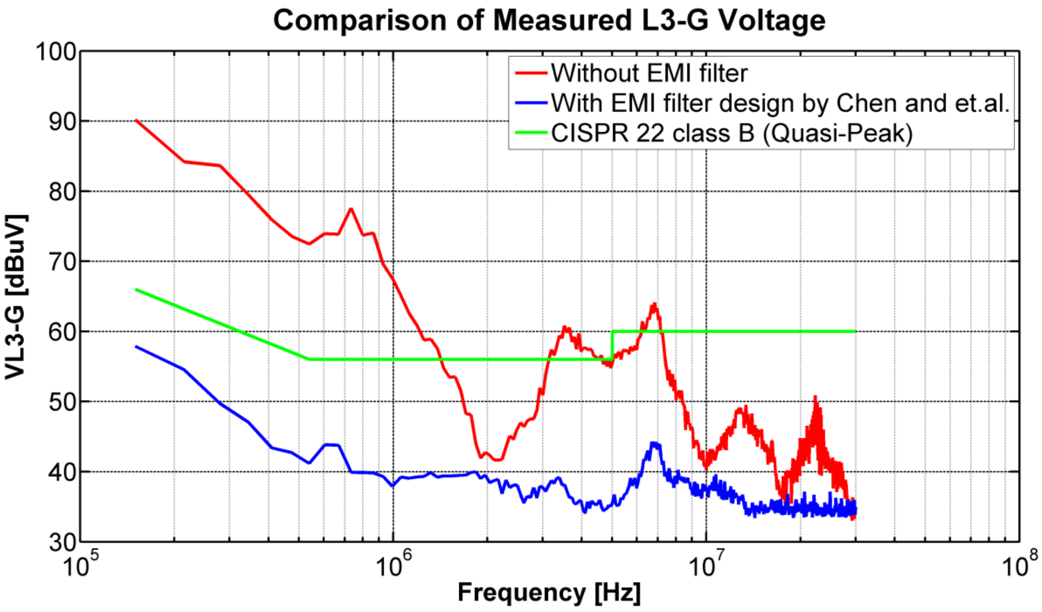
รูปที่ 4.55 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



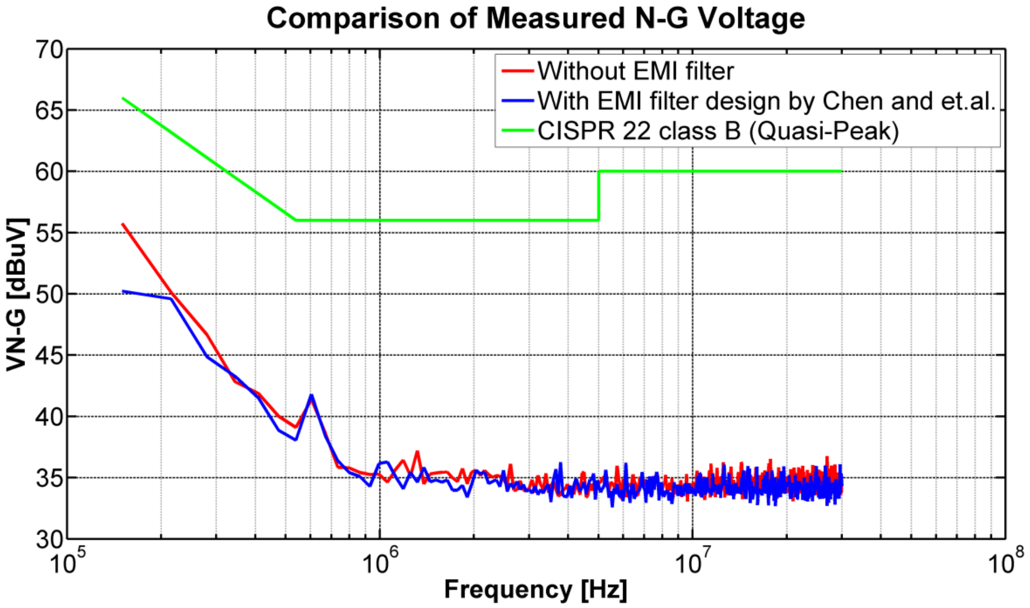
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)



รูปที่ 4.57 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ ($V_{L2\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

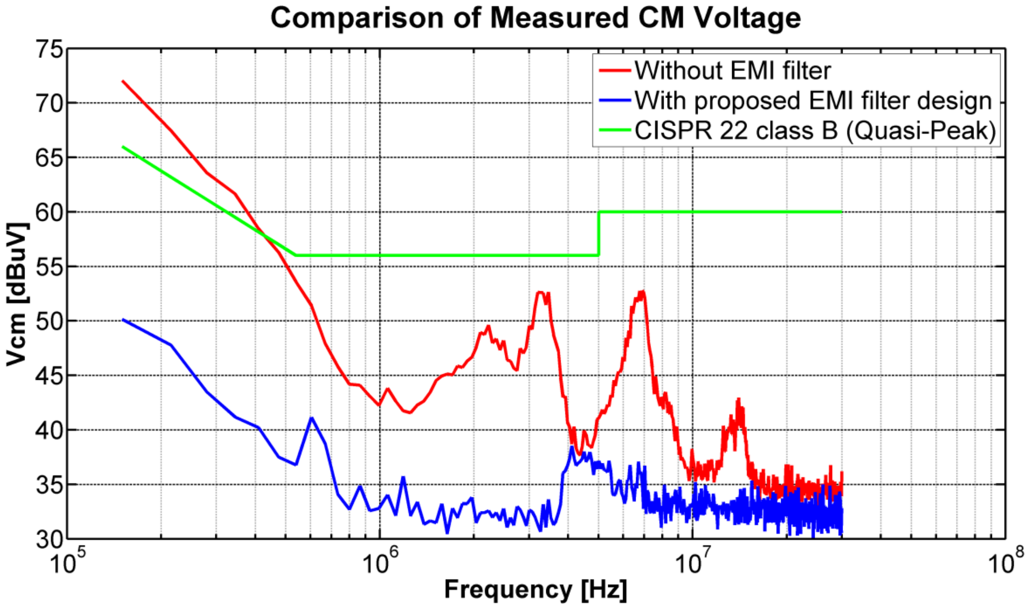


รูปที่ 4.58 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ ($_{VL3\text{-}G}$) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

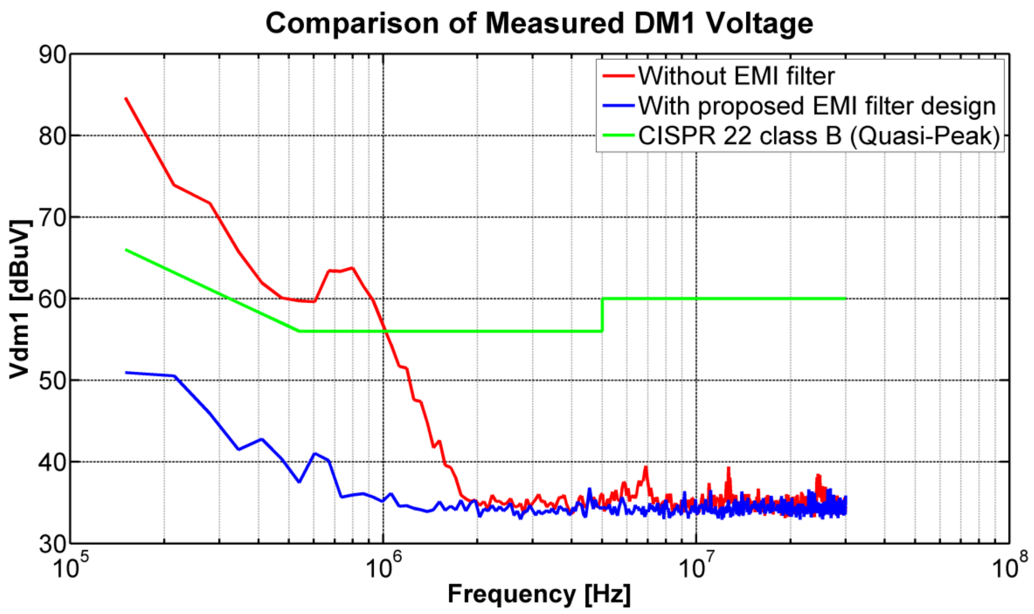


รูปที่ 4.59 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีของ Po-Shen Chen และ Yen-Shin Lai (With EMI filter)

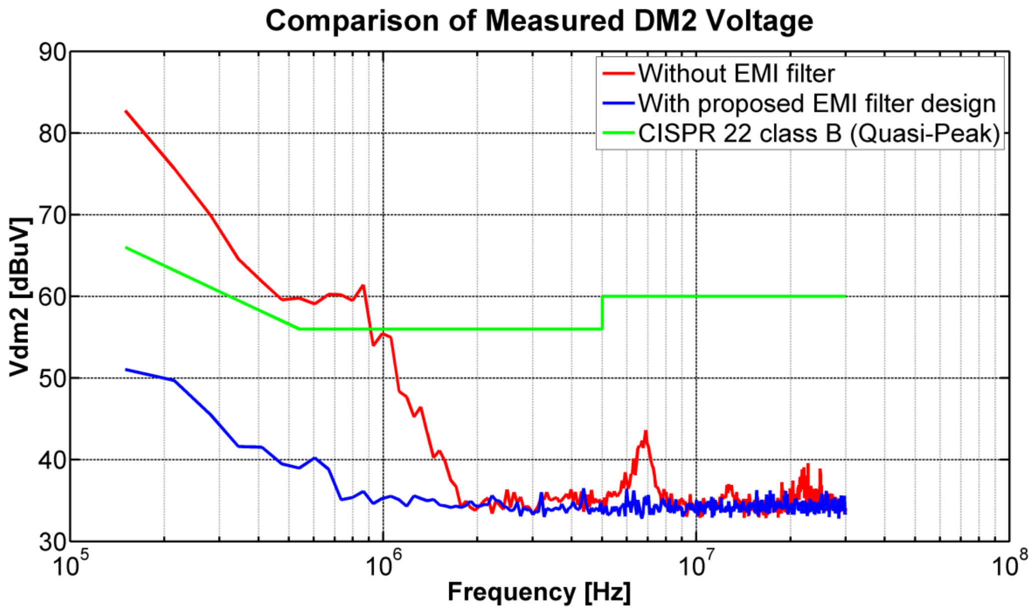
4.6.3 กรณีไม่ใส่วงจรกรองและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยใช้วิธีที่นำเสนอ เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)



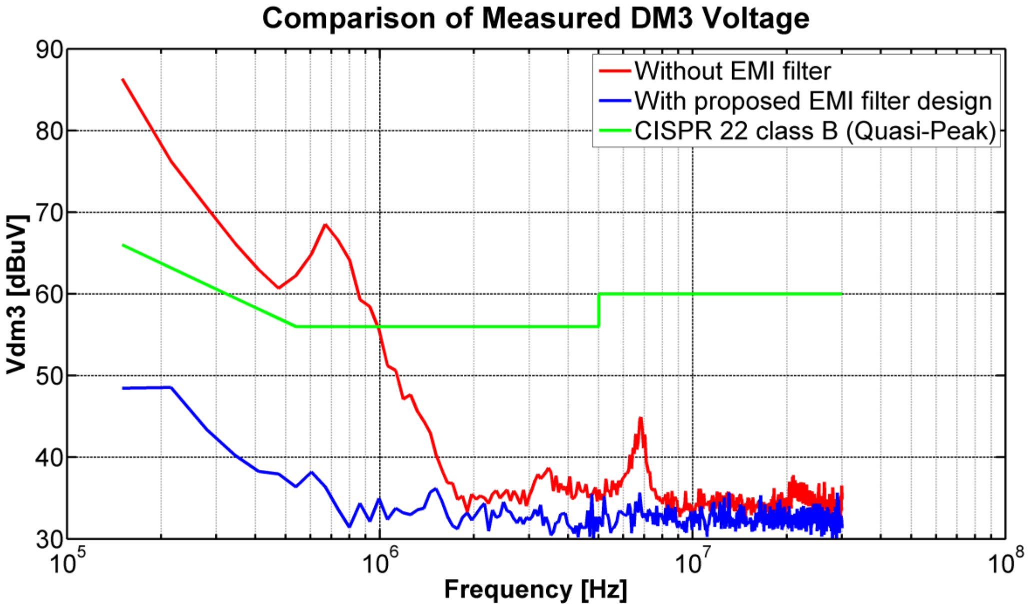
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



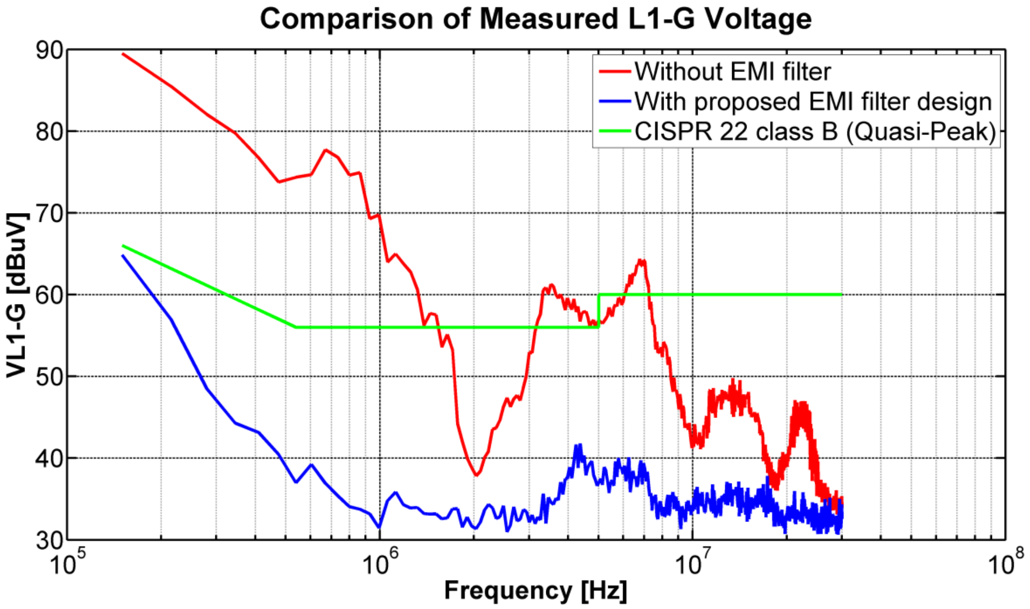
รูปที่ 4.61 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



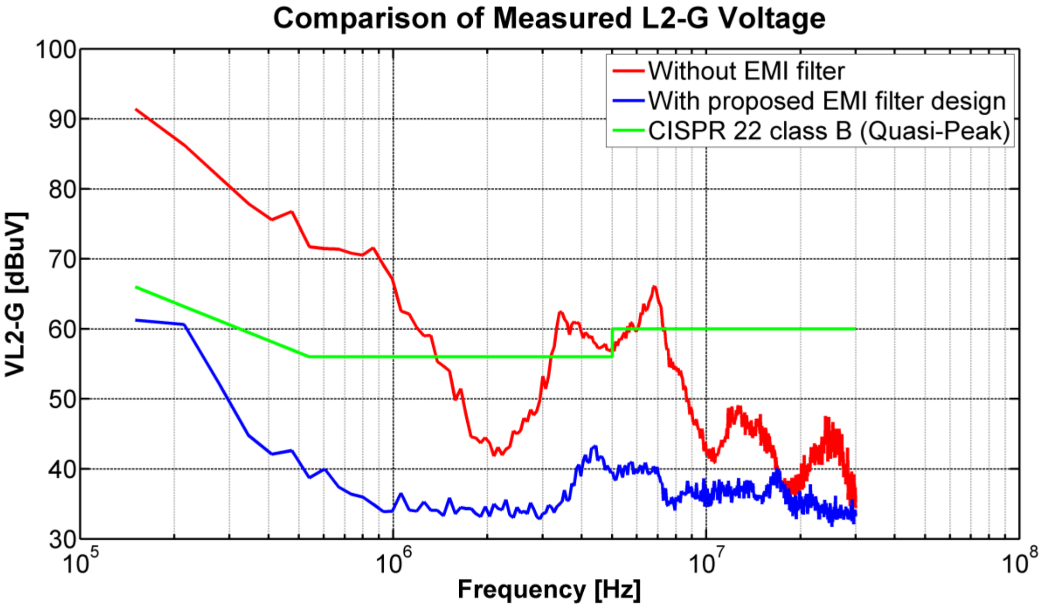
รูปที่ 4.62 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



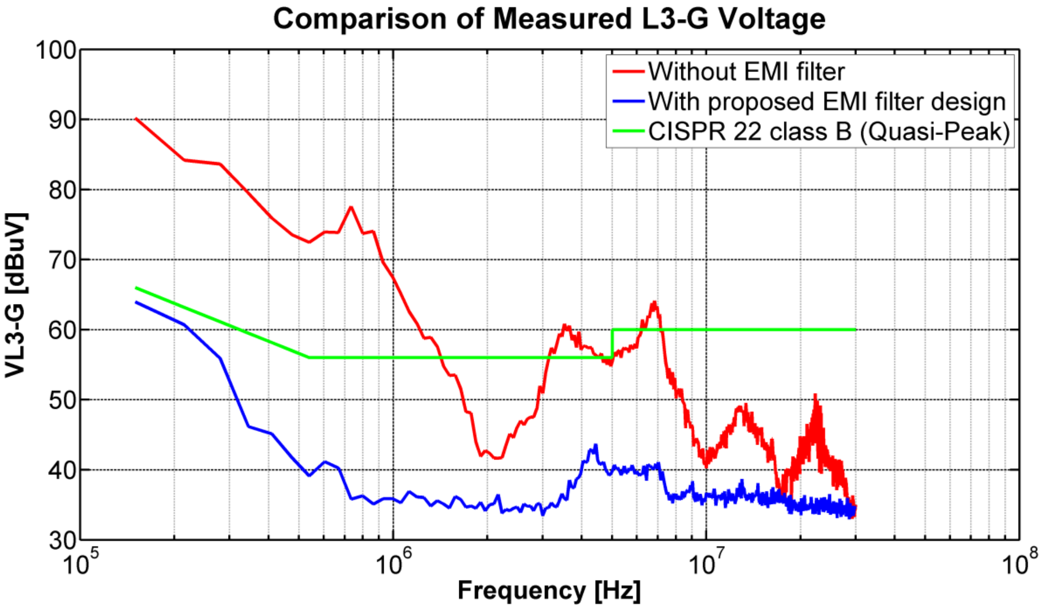
รูปที่ 4.63 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



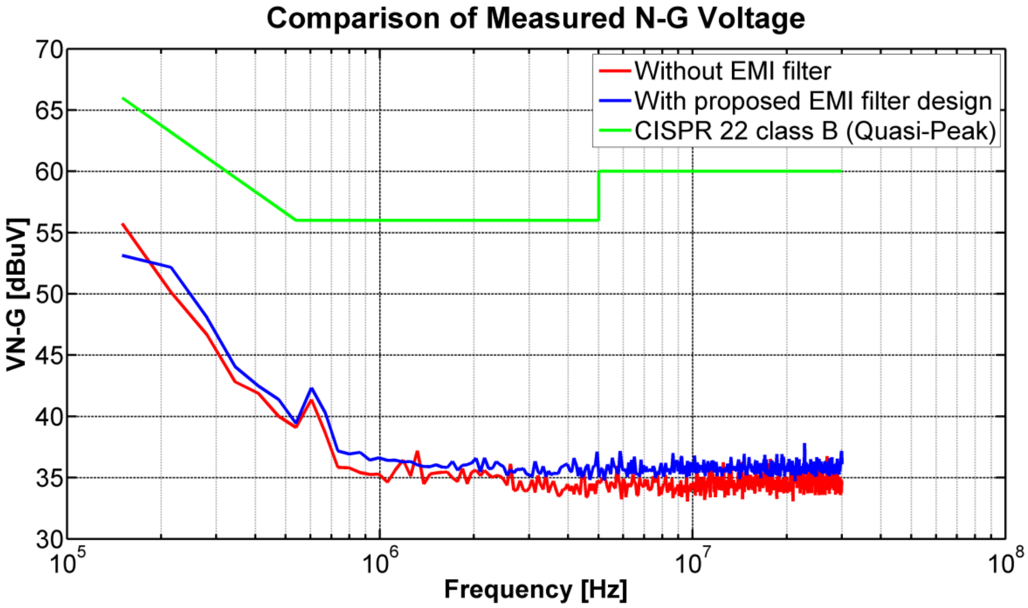
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)



รูปที่ 4.65 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

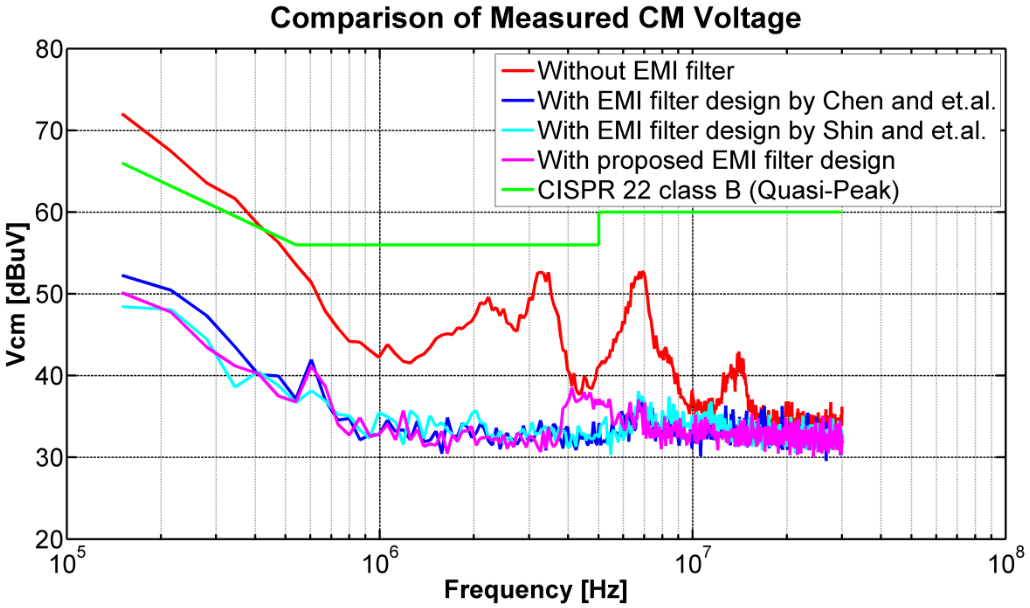


รูปที่ 4.66 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

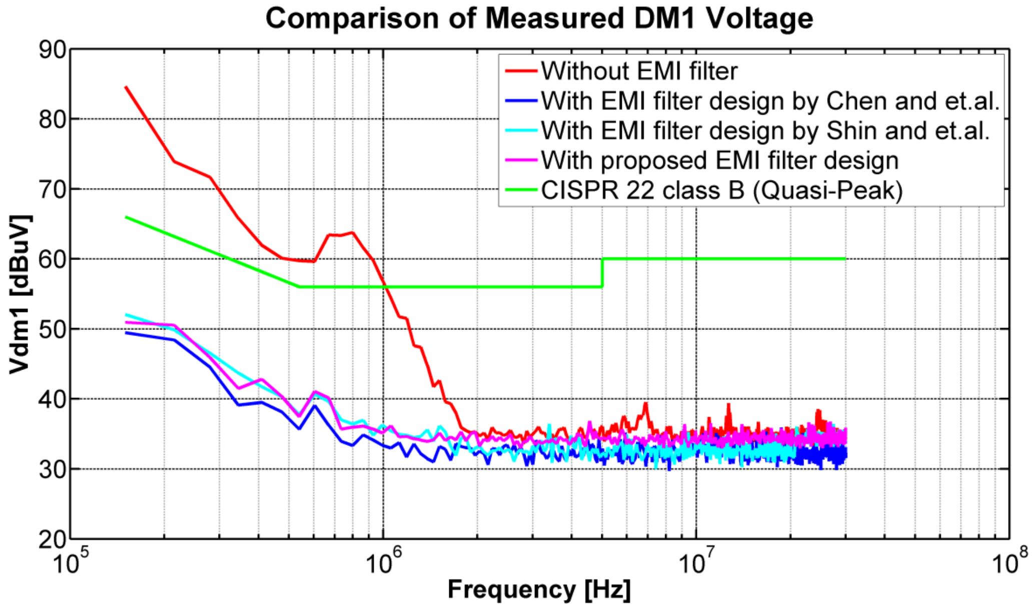


รูปที่ 4.67 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีที่นำเสนอ (With EMI filter)

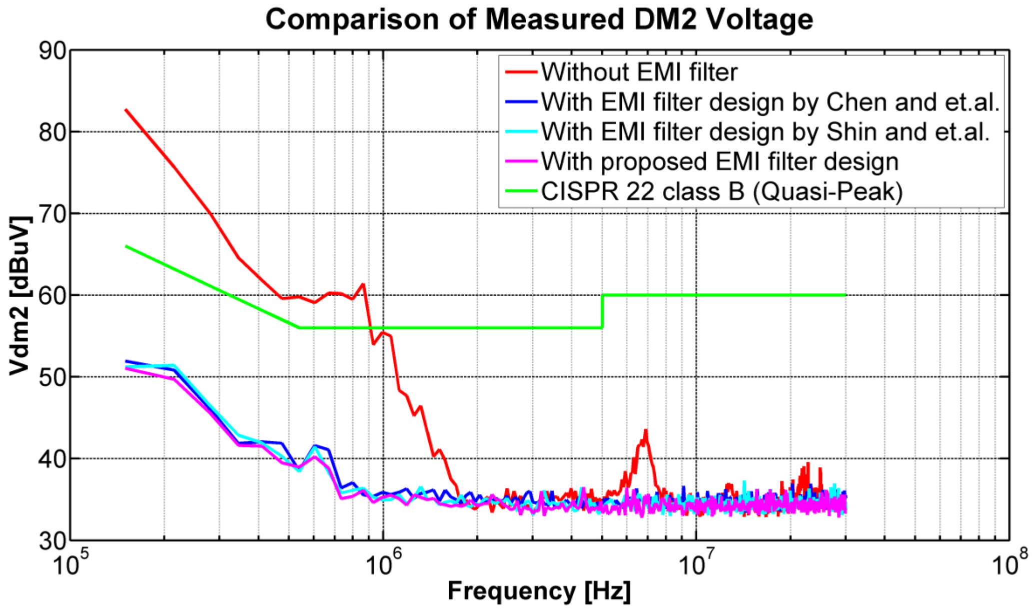
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทุกกรณีกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที



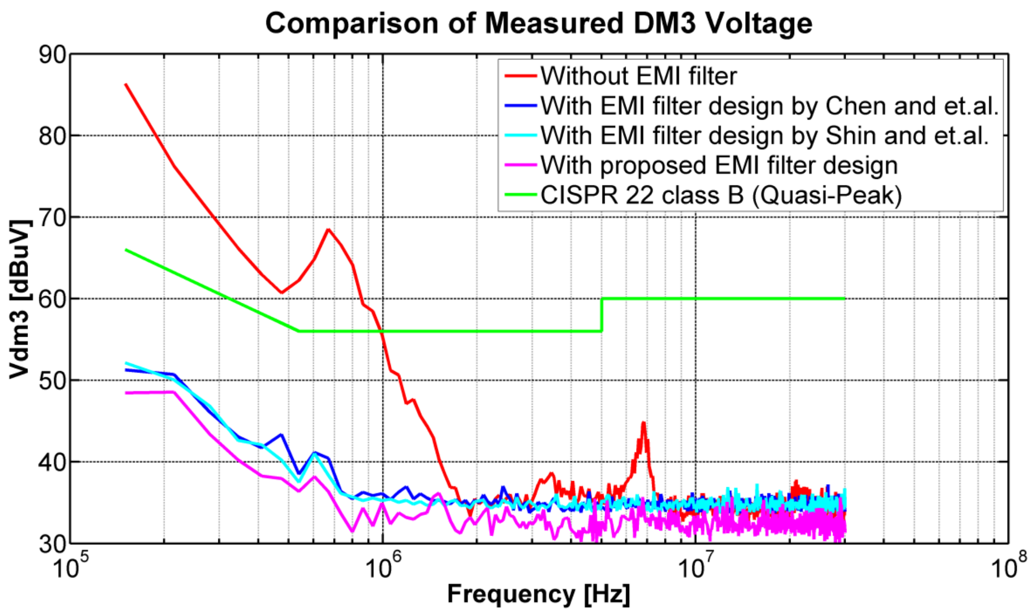
รูปที่ 4.68 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลร่วม (V_{CM}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



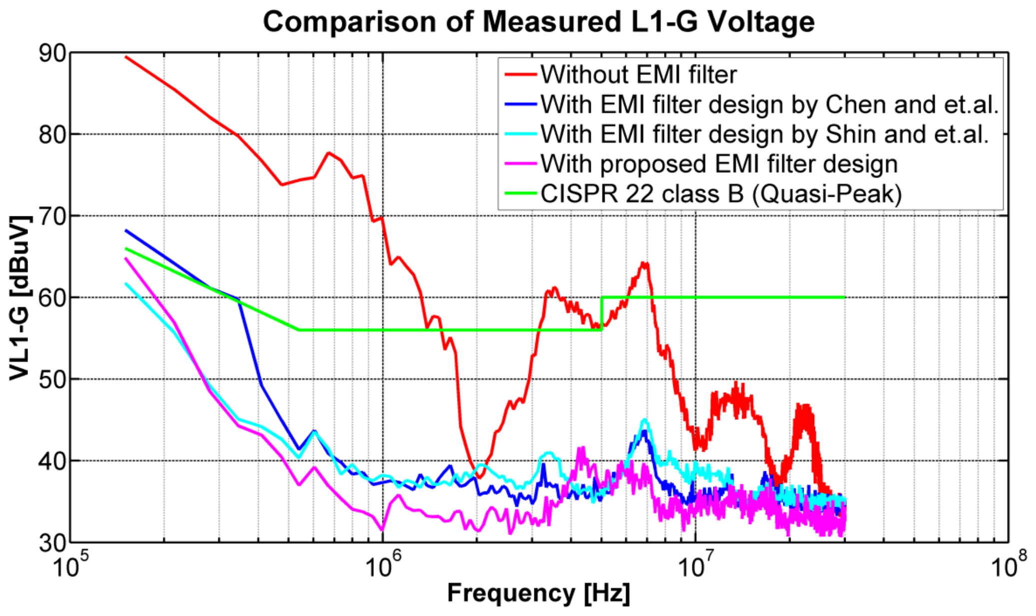
รูปที่ 4.69 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง1 (V_{DM1}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



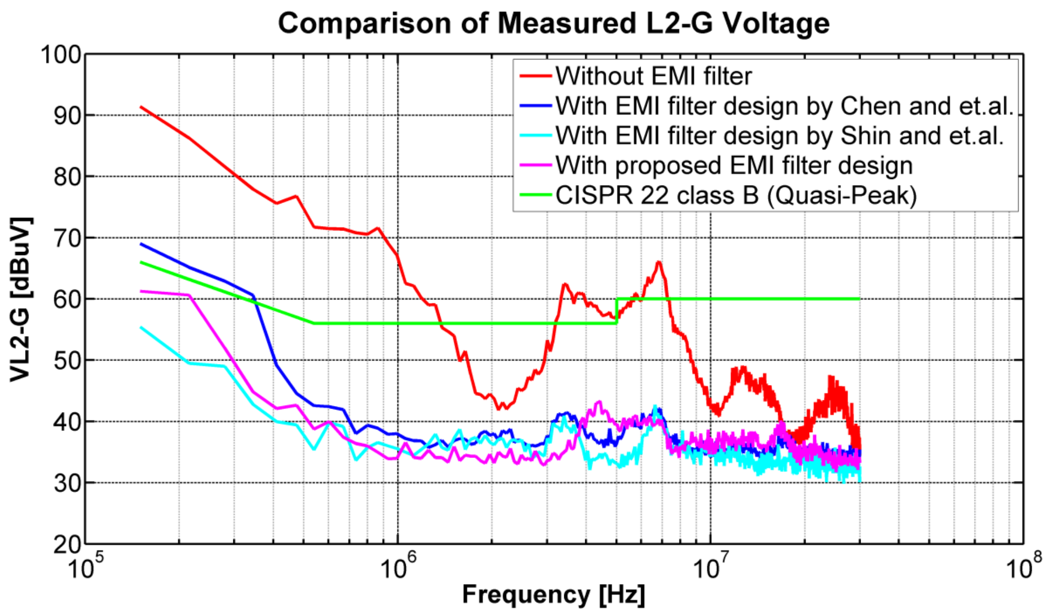
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง2 (V_{DM2}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



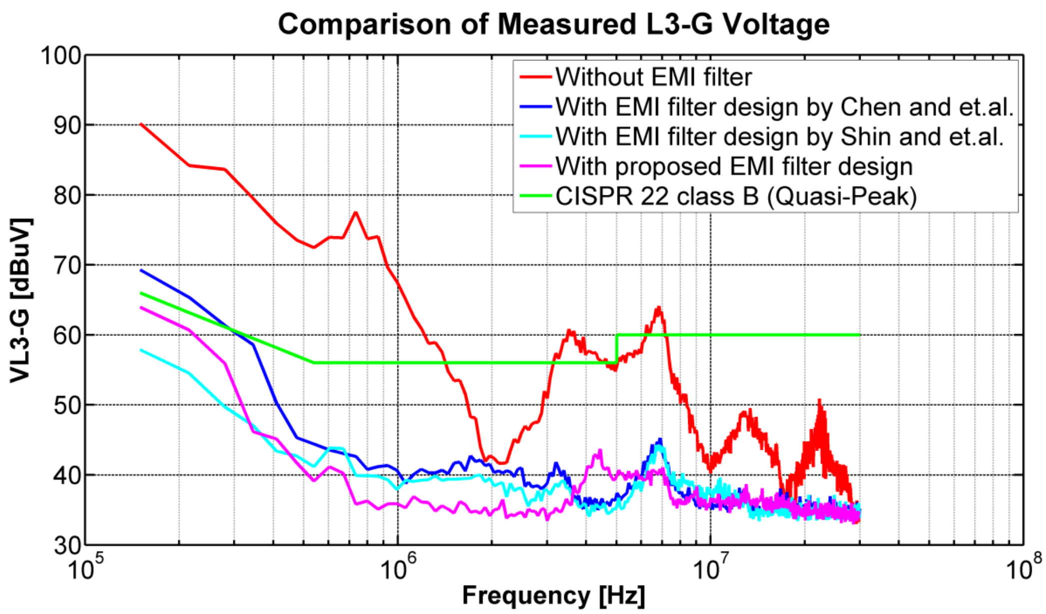
รูปที่ 4.71 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่โหมดผลต่าง3 (V_{DM3}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



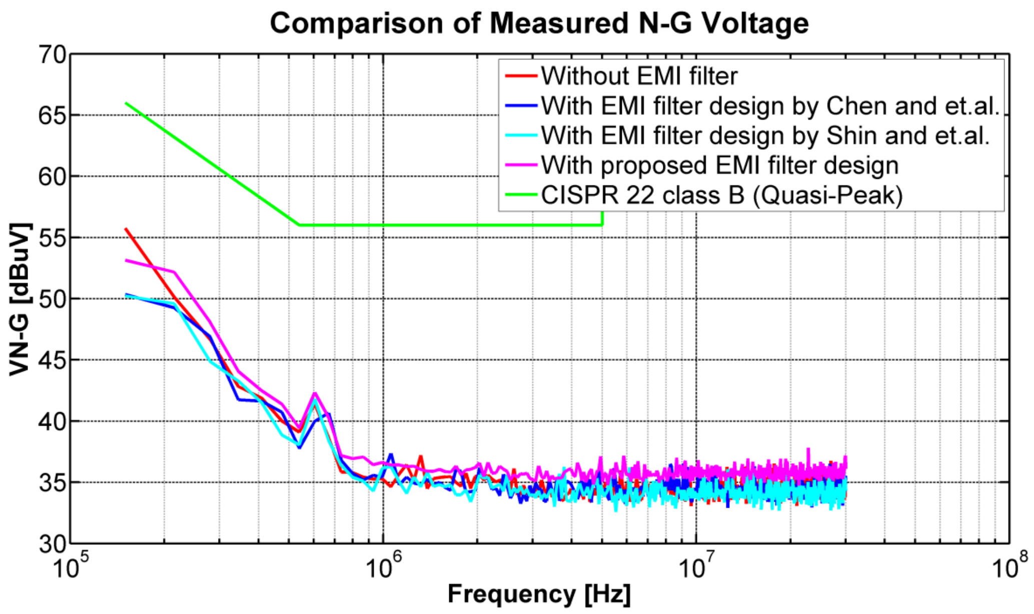
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์1 เทียบกับกราวด์ (V_{L1-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



รูปที่ 4.73 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์2 เทียบกับกราวด์ (V_{L2-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



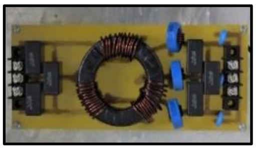
รูปที่ 4.74 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่ไลน์3 เทียบกับกราวด์ (V_{L3-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)



รูปที่ 4.75 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่นิวทรัล (Neutral) เทียบกับกราวด์ (V_{N-G}) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ระหว่างระบบที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (Without EMI filter) กับระบบที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ (With EMI filter)

4.8 ตารางวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

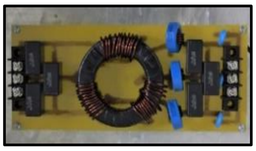
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common-mode noise) และโหมดผลต่าง (Differential-mode noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

	EMI filter by Shih and et.al.	EMI filter by Chen and et.al. 	Proposed EMI filter
Common-mode noise	✓	✓	✓
Differential-mode noise 1	✓	✓	✓
Differential-mode noise 2	✓	✓	✓
Differential-mode noise 3	✓	✓	✓

หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ แสดงว่าวงจรนั้นสามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

เครื่องหมาย ✗ แสดงว่าวงจรนั้นไม่สามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

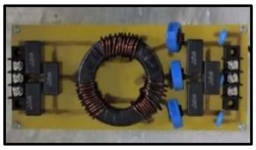
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (total noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average)

	EMI filter by Shih and et.al.	EMI filter by Chen and et.al. 	Proposed EMI filter
L1-G	✗	✓	✓
L2-G	✗	✓	✓
L3-G	✗	✓	✓
N-G	✓	✓	✓

หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ แสดงว่าวงจรนั้นสามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

เครื่องหมาย ✗ แสดงว่าวงจรนั้นไม่สามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

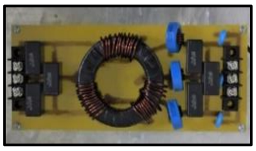
ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วม (Common-mode noise) และโหมดผลต่าง (Differential-mode noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

	EMI filter by Shih and et.al.	EMI filter by Chen and et.al. 	Proposed EMI filter
Common-mode noise	✓	✓	✓
Differential-mode noise 1	✓	✓	✓
Differential-mode noise 2	✓	✓	✓
Differential-mode noise 3	✓	✓	✓

หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ แสดงว่าวงจรนั้นสามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

เครื่องหมาย ✗ แสดงว่าวงจรนั้นไม่สามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

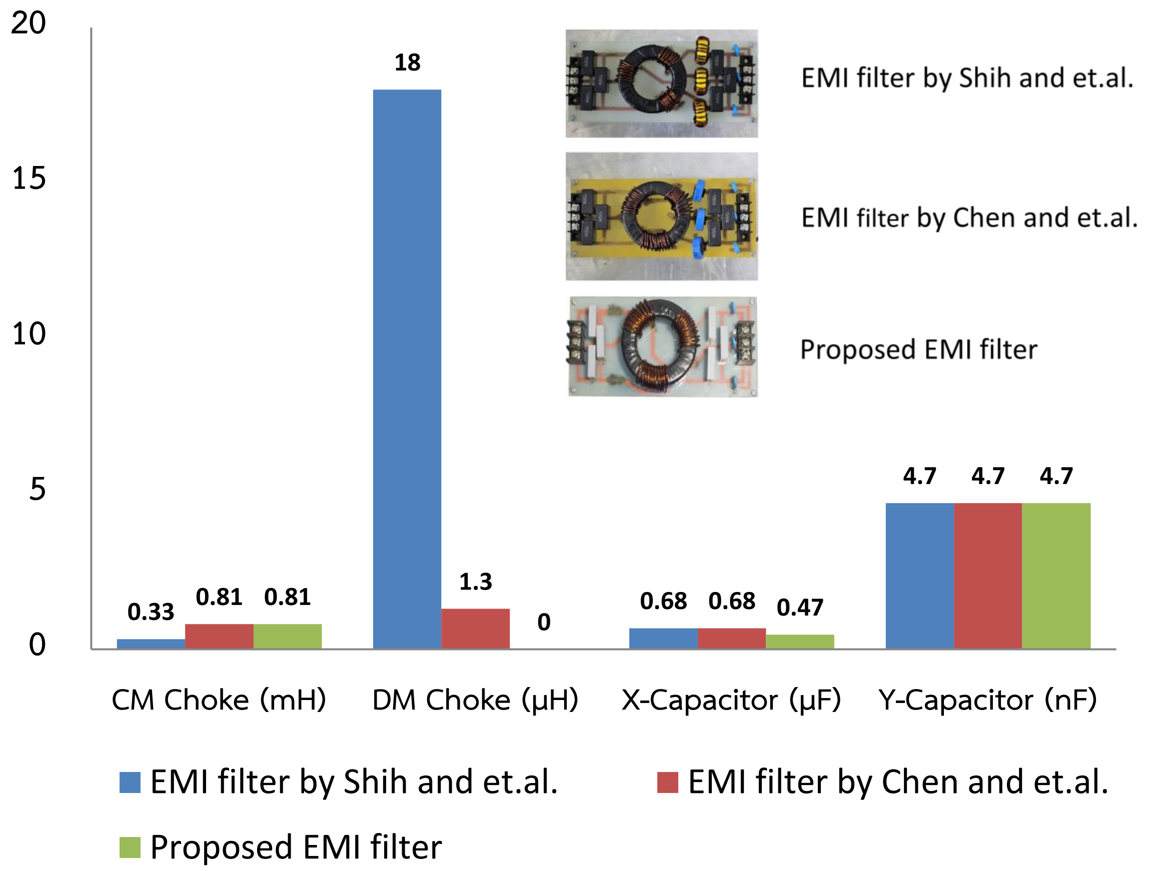
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม (total noise) เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (Quasi-Peak)

	EMI filter by Shih and et.al.	EMI filter by Chen and et.al. 	Proposed EMI filter
L1-G	✗	✓	✓
L2-G	✗	✓	✓
L3-G	✗	✓	✓
N-G	✓	✓	✓

หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ แสดงว่าวงจรนั้นสามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

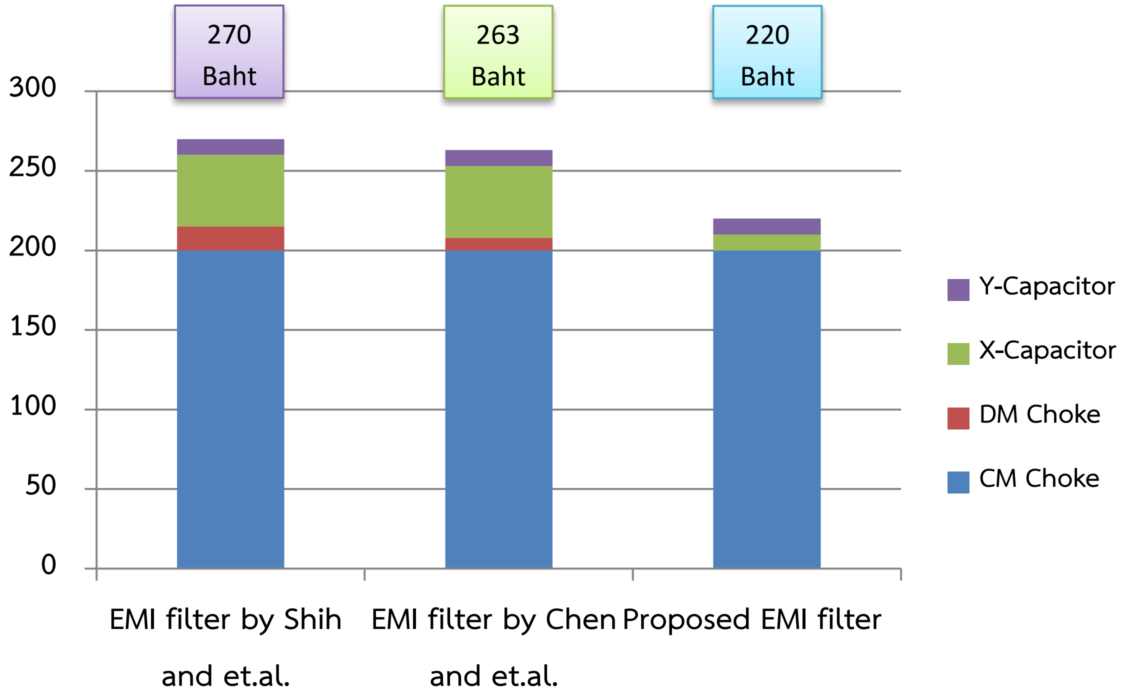
เครื่องหมาย ✗ แสดงว่าวงจรนั้นไม่สามารถลดทอนสัญญาณได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน

4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง



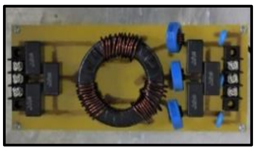
รูปที่ 4.76 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

4.10 การเปรียบเทียบราคา (Baht) ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.77 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบราคาของการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 4.5 สรุปผลราคาอุปกรณ์ของโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

	EMI filter by Shih and et.al.	EMI filter by Chen and et.al. 	Proposed EMI filter
CM Choke	200	200	200
DM Choke	15	8	-
X-Capacitor	45	45	10
Y-Capacitor	10	10	10
Total (Baht)	**270**	**263**	**220**

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนาที่เกิดจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟสและอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้โดยใช้วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามเฟสโดยใช้วิธีต่างๆที่กล่าวมา และสามารถเทียบหาสัดส่วนที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยไม่ใส่วงจรกรอง โดยให้ค่าสัญญาณนี้เป็นค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิงเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรกรอง 3 รูปแบบ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่า วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของ Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu and Yie-Tone Chen ไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม (Total Noise) ให้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class A (Average) และ CISPR 22 class B (Quasi-Peak) ได้ แต่วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของ Po-Shen Chen and Yen-Shin Lai จะมีความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าทั้งหมดใน 3 รูปแบบ ซึ่งวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอ จะมีขนาดของวงจรกับค่าพารามิเตอร์โหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง มีค่าน้อยที่สุดในทั้ง 3 แบบ สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 150 kHz-30 MHz นี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอนั้น สามารถลดผลสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างได้ (Differential Mode) โดยไม่ต้องมีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential-mode choke : L_{DM}) แต่เป็นการใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance) ที่วัดได้จากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common-mode choke : L_{CM}) เพื่อเป็นการลดขนาดรูปแบบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าให้ดูเหมาะสมนั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีที่นำเสนอนี้ เป็นเพียงการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ผ่านเส้นมาตรฐานเท่านั้น เพราะการลดทอนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดอุปกรณ์ที่ออกแบบ รวมถึงความแม่นยำเครื่องมือวัดและสภาพแวดล้อมที่ใช้ทำการทดลอง สำหรับในการทดลองนี้ ผู้ทำการทดลองได้มองถึงสภาพแวดล้อมในปัจจุบันและอุปกรณ์เท่าที่หาได้ง่ายซึ่งมีอยู่ตามตามท้องตลาด ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงการนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในสภาพแวดล้อมต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

ผศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. (2557). ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์อักษรสัมพันธ์.

ประภากร สมบุญ, พีรวิชญ์ พันธ์เศรษฐ์, ศิริพร ศิรวุฒินานนท์, สถาพร อุไรพันธุ์. (2557). การศึกษาวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำสำหรับการประยุกต์ใช้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส. ปริญญานิพนธ์.มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu, Yie-Tone Chen.(1996). **A Procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications**. Taipei, Taiwan: IEEE Trans

Po-Shen Chen and Yen-Shin Lai.(2010). **Effective EMI Filter Design Method for Three-Phase Inverter Based Upon Software Noise Separation.** Taipei, Taiwan: IEEE Trans

http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Electromagnetic_Compatibility_on_Telecommunications/index.php#b
online: 14 May. 2016

http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-03.html
online: 14 May. 2016

http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/73026/47ce9593a2bf3242d652fae1f0ebedab?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.the.2007.51
online: 14 May. 2016

http:// www.radio-electronics.com/info/circuits/emc-emi/tutorial-basics-summary.php
online: 14 May. 2016

ภาคผนวก ก

(ตารางขนาดขดลวดทองแดงมาตรฐาน)

ตารางขนาดขดลวดทองแดงมาตรฐาน

เบอร์ลวดทองแดงมาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter)	พื้นที่หน้าตัด (Area)	ทนกระแสได้ (A)
	mm	mm^2	
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

ตารางขนาดขดลวดทองแดงมาตรฐาน (ต่อ)

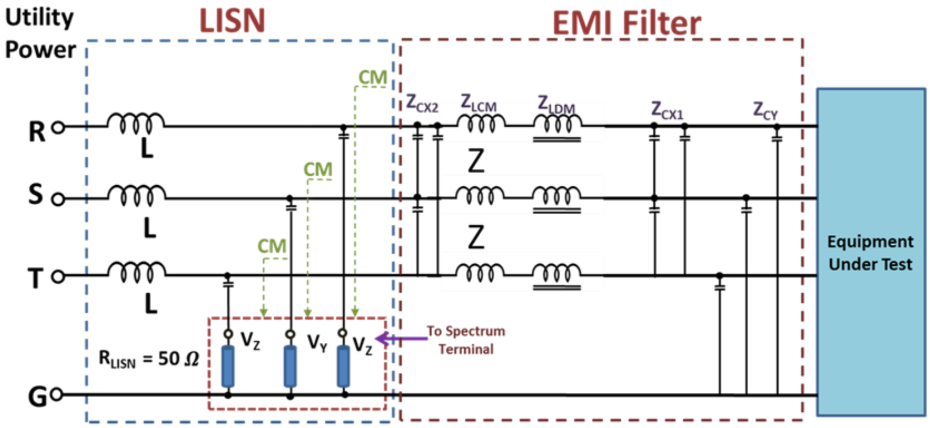
23	0.61	0.2922	0.972
24	0.56	0.2463	0.817
25	0.51	0.2047	0.675
26	0.45	0.1624	0.547
27	0.40	0.1288	0.432
28	0.38	0.1134	0.370
29	0.36	0.1021	0.312
30	0.31	0.0755	0.243
31	0.29	0.0661	0.204
32	0.28	0.0616	0.176
33	0.25	0.0510	0.169
34	0.23	0.0451	0.137
35	0.21	0.0346	0.108
36	0.19	0.0285	0.098
37	0.17	0.0227	0.078
38	0.15	0.0177	0.063
39	0.13	0.0133	0.046
40	0.12	0.0114	0.039
41	0.11	0.0101	0.033
42	0.10	0.0081	0.027
43	0.091	0.0065	0.022
44	0.081	0.0052	0.017
45	0.071	0.0040	0.013
46	0.061	0.0029	0.0097
47	0.051	0.0020	0.0068
48	0.041	0.0013	0.0047
49	0.030	0.0007	0.0024
50	0.025	0.0005	0.0017

ภาคผนวก ข

(การพิสูจน์หาสมการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์)

การพิสูจน์หาสมการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์

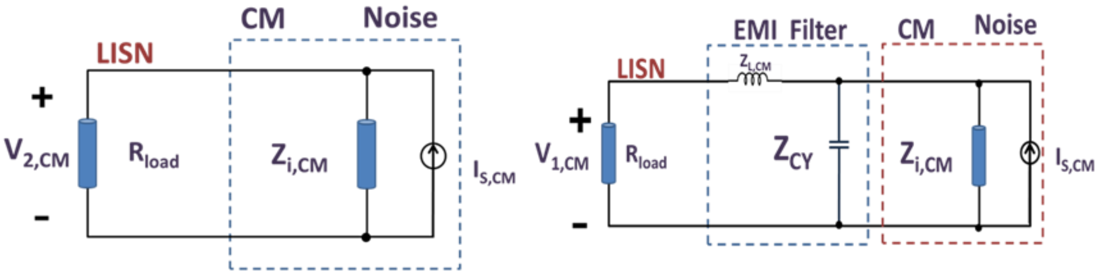
อิมพีแดนซ์ในการคำนวณ เกิดจากการใส่ EMI filter ในระบบสามเฟส ซึ่งจะแสดงใน ดังรูปที่ 1



รูปที่ภาคผนวก ข 1 วงจรสมมูลแบบสามเฟสขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากนั้นแยกองค์ประกอบออกจากกัน คือ โหมดผลร่วม (Common-mode) และโหมดผลต่าง (Differential-mode) เพื่อให้ง่ายขึ้นต่อการพิสูจน์ จึงเปลี่ยนรูปวงจรสมมูลจากระบบสามเฟส เป็นเฟสเดียว และสมมติให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เป็นแหล่งจ่ายกระแส (Current source) และกำหนดองค์ประกอบที่ใส่ใน EMI filter คือ LC ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3

อิมพีแดนซ์โหมดผลร่วม (CM Impedance)



รูปที่ภาคผนวก ข 2 วงจรสมมูลขณะไม่ใส่กับใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม

อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม

$$A_{TT-CM} = \frac{V_{noise\ without\ filter}}{V_{noise\ with\ filter}} = \frac{V_{2,CM}}{V_{1,CM}} \qquad (1)$$

เมื่อ $A_{TT\text{-}CM}$ คือ อัตราการลดทอนโหมดผลร่วม

$V_{noise\ with\ filter}$ คือ แรงดันสัญญาณรบกวนที่วัดจาก LISN ขณะใส่วงจรกรอง (dBμV)

$V_{noise\ without\ filter}$ คือ แรงดันสัญญาณรบกวนที่วัดจาก LISN ขณะไม่ใส่วงจรกรอง (dBμV)

จากรูปที่ 2 วงจรสมมูลตำแหน่ง CM noise ตัวแปร $Z_{i,CM}$ หมายถึง อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และแรงดันตกคร่อมขณะไม่ใส่วงจรกรอง แสดงดังนี้

$$V_{2,CM} = I_{S,CM} \frac{Z_{i,CM}}{Z_{i,CM} + R_{load}} R_{load} \tag{2}$$

ในการพิสูจน์มุมมองของสัญญาณรบกวนจะมองเป็นแหล่งจ่ายกระแส และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะไม่สนใจอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ($Z_{i,CM} \to \infty$)

กำหนดให้ $Z_{i,CM} \gg R_{load}$

$$V_{2,CM} \approx I_{S,CM} R_{load} \tag{3}$$

จากรูปที่ 2 วงจรสมมูลกรณีใส่วงจรกรอง แสดงดังนี้

กำหนดให้

$$Z_1 = (Z_{L,CM} + R_{load}) \| Z_{CY} = \frac{(Z_{L,CM} + R_{load}) Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} \tag{4}$$

และ

$$I_{Z_1} = \frac{Z_{i,CM}}{Z_{i,CM} + Z_1} I_{S,CM} \tag{5}$$

$$V_{Z_1} = I_{Z_1} Z_1 = \frac{Z_{i,CM}}{Z_{i,CM} + Z_1} I_{S,CM} \cdot \frac{(Z_{L,CM} + R_{load}) Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} \tag{6}$$

แรงดันตกคร่อมขณะใส่วงจรกรอง สามารถหาโดยใช้ Voltage divider

$$V_{1,CM} = \frac{R_{load}}{Z_{L,CM} + R_{load}} V_{Z_1} \tag{7}$$

$$V_{1,CM} = \frac{R_{load}}{Z_{L,CM} + R_{load}} \cdot \frac{Z_{i,CM}}{Z_{i,CM} + Z_1} I_{S,CM} \cdot \frac{(Z_{L,CM} + R_{load}) Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} \tag{8}$$

$$V_{1,CM} = \frac{I_{S,CM} Z_{i,CM}}{Z_{i,CM} + Z_1} \cdot \frac{Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} R_{load} \tag{9}$$

กำหนดให้ $Z_{i,CM} \gg Z_1$

$$V_{1,CM} = I_{S,CM} \frac{Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} R_{load} \tag{10}$$

นำสมการที่ (3) และ (10) แทนค่าลงในสมการที่ (1)

$$A_{TT-CM} = \frac{V_{2,CM}}{V_{1,CM}} = \frac{I_{S,CM} R_{load}}{I_{S,CM} \dfrac{Z_{CY}}{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}} R_{load}} \tag{11}$$

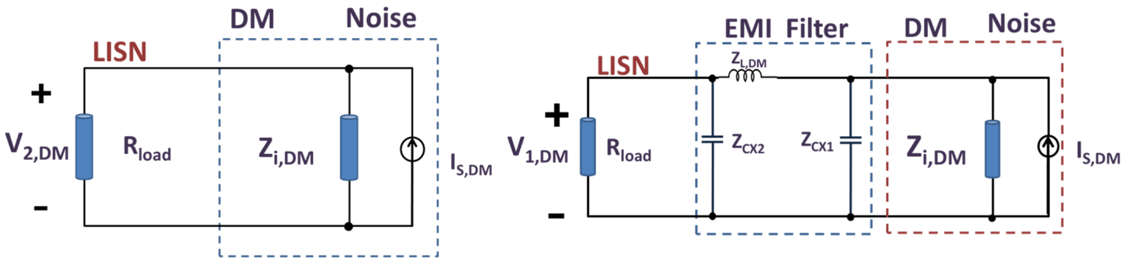
$$A_{TT-CM} = \frac{Z_{CY} + Z_{L,CM} + R_{load}}{Z_{CY}} \tag{12}$$

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1) Z_{CY} - R_{load} \tag{13}$$

กำหนดให้ $Z_{CY} = \dfrac{1}{2\pi f (3C_y)}$ และ $R_{load} = \dfrac{R_{load}}{3}$

$$Z_{L,CM} = (A_{TT-CM} - 1)\frac{1}{2\pi f(3C_y)} - \frac{R_{load}}{3} \tag{14}$$

อิมพีแดนซ์โหมดผลต่าง (DM Impedance)



รูปที่ภาคผนวก ข 3 วงจรสมมูลขณะไม่ใส่กับใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง

$$A_{TT-DM} = \frac{V_{noise\,without\ filter}}{V_{noise\,with\ filter}} = \frac{V_{2,CM}}{V_{1,CM}} \tag{15}$$

เมื่อ $A_{TT\text{-}DM}$ คือ อัตราการลดทอนโหมดผลต่าง

$V_{noise\ with\ filter}$ คือ แรงดันสัญญาณรบกวนที่วัดจาก LISN ขณะใส่วงจรกรอง (dBμV)

$V_{noise\ without\ filter}$ คือ แรงดันสัญญาณรบกวนที่วัดจาก LISN ขณะไม่ใส่วงจรกรอง (dBμV)

จากรูปที่ 3 วงจรสมมูลตำแหน่ง DM noise ตัวแปร $Z_{i,CM}$ หมายถึง อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และแรงดันตกคร่อมขณะไม่ใส่วงจรกรอง แสดงดังนี้

$$V_{2,CM} = I_{S,DM}\frac{Z_{i,DM}}{Z_{i,DM} + R_{load}}R_{load} \tag{16}$$

ในการพิสูจน์มุมมองของสัญญาณรบกวนจะมองเป็นแหล่งจ่ายกระแส และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะไม่สนใจอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน $(Z_{i,DM} \rightarrow \infty)$

กำหนดให้ $Z_{i,DM} \gg R_{load}$

$$V_{2,CM} \approx I_{S,DM} R_{load} \tag{17}$$

จากรูปที่ 3 วงจรสมมูลกรณีใส่วงจรกรอง เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยเริ่มต้นจากการยุบวงจรทีละขั้นจากซ้ายไปขวาของวงจรสมมูล ซึ่งจะแสดงดังนี้
กำหนดให้

$$Z_1 = R_{load} \parallel Z_{CX2} = \frac{Z_{CX2} R_{load}}{Z_{CX2} + R_{load}} \tag{18}$$

และ

$$Z_2 = (Z_{L,DM} + Z_1) \parallel Z_{CX1} = \frac{Z_{CX1}(Z_{L,DM} + Z_1)}{Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1} \tag{19}$$

จาก Current divider หากระแสที่ Z_2

$$I_{Z_2} = \frac{Z_{i,DM}}{Z_{i,DM} + Z_2} I_{S,DM} \tag{20}$$

จาก Current divider หากระแสที่ $Z_{L,DM}$

$$I_{L,DM} = \frac{Z_{CX1}}{Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1} I_{Z_2} \tag{21}$$

จาก Current divider หากระแสที่ $V_{1,DM}$

$$I_{1,DM} = \frac{Z_{CX2}}{Z_{CX2} + R_{load}} I_{L,DM} \tag{22}$$

หาแรงดันตกคร่อมวงจรสมมูลกรณีใส่วงจรกรอง จากกฎของโอห์ม

$$V_{1,CM} = I_{1,DM} R_{load} \tag{23}$$

แทนค่ากระแสที่หาได้จากสมการที่ (20), (21) และ (22) แทนลงในสมการที่ (23)

$$V_{1,CM} = \frac{Z_{CX2}}{Z_{CX2} + R_{load}} \cdot \frac{Z_{CX1}}{Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1} \cdot \frac{Z_{i,DM}}{Z_{i,DM} + Z_2} I_{S,DM} R_{load} \tag{24}$$

$$V_{1,CM} = \frac{I_{S,DM} Z_{i,DM}}{Z_{i,DM} + Z_2} \cdot \frac{Z_{CX1}}{Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1} \cdot \frac{Z_{CX2}}{Z_{CX2} + R_{load}} R_{load} \tag{25}$$

กำหนดให้ $Z_{i,DM} \gg Z_2$

$$V_{1,CM} \approx I_{S,DM} \cdot \frac{Z_{CX1} Z_{CX2} R_{load}}{(Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1)(Z_{CX2} + R_{load})} \tag{26}$$

นำสมการที่ (17) และ (26) แทนค่าลงในสมการที่ (15)

$$A_{TT-DM} = \frac{V_{2,DM}}{V_{1,DM}} = \frac{I_{S,DM} R_{load}}{I_{S,DM} \dfrac{Z_{CX1} Z_{CX2} R_{load}}{(Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1)(Z_{CX2} + R_{load})}} \tag{27}$$

$$A_{TT-DM} = \frac{(Z_{CX1} + Z_{L,DM} + Z_1)(Z_{CX2} + R_{load})}{Z_{CX1} Z_{CX2}} \tag{28}$$

กำหนดให้ $Z_{CX1} = Z_{CX2} = Z_{CX}$

$$A_{TT-DM} = \frac{(Z_{CX} + Z_{L,DM} + Z_1)(Z_{CX} + R_{load})}{Z_{CX}^{2}} \tag{29}$$

$$Z_{L,DM} = \frac{Z_{CX}^{2} A_{TT-DM}}{Z_{CX} + R_{load}} - Z_{CX} - Z_1 \tag{30}$$

$$Z_{L,DM} = \frac{Z_{CX}{}^{2} A_{TT-DM} - Z_{CX}(Z_{CX} + R_{load}) - Z_1(Z_{CX} + R_{load})}{Z_{CX} + R_{load}} \tag{31}$$

จาก

$$Z_1 = \frac{Z_{CX\,2} R_{load}}{Z_{CX\,2} + R_{load}} = \frac{Z_{CX} R_{load}}{Z_{CX} + R_{load}} \tag{32}$$

แทนค่า Z_1 ลงในสมการที่ (31)

$$Z_{L,DM} = \frac{Z_{CX}{}^{2} A_{TT-DM} - Z_{CX}{}^{2} - Z_{CX} R_{load} - Z_{CX} R_{load}}{Z_{CX} + R_{load}} \tag{33}$$

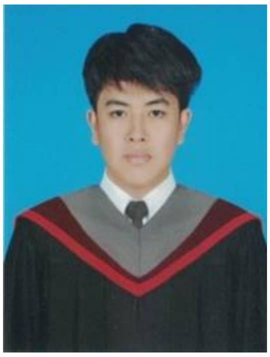
$$Z_{L,DM} = \left| \frac{(A_{TT-DM} - 1) Z_{CX}{}^{2} - 2 Z_{CX} R_{load}}{Z_{CX} + R_{load}} \right| \tag{34}$$

กำหนดให้ $Z_{CX} = \dfrac{1}{2\pi f C_x}$ และ $R_{load} = 2R_{load}$

$$Z_{L,DM} = \left| \frac{(A_{TT-DM} - 1)(\frac{1}{2\pi f C_X})^{2} - 2(\frac{1}{2\pi f C_X})(2R_{load})}{\frac{1}{2\pi f C_X} + 2R_{load}} \right| \tag{35}$$

ประวัติย่อผู้ทำโครงงาน

ประวัติย่อผู้ทำโครงงาน



ชื่อ ชื่อสกุล	นายวราเทพ ผดุงถิ่น
วันเดือนปีเกิด	3 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	เขตสะพานสูง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	97/56 ซ.กรุงเทพกรีฑา 20 แยก 2 แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง จ.กรุงเทพมหานคร 10250
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	082-459-2990
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2557	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนศรีพฤฒา
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ