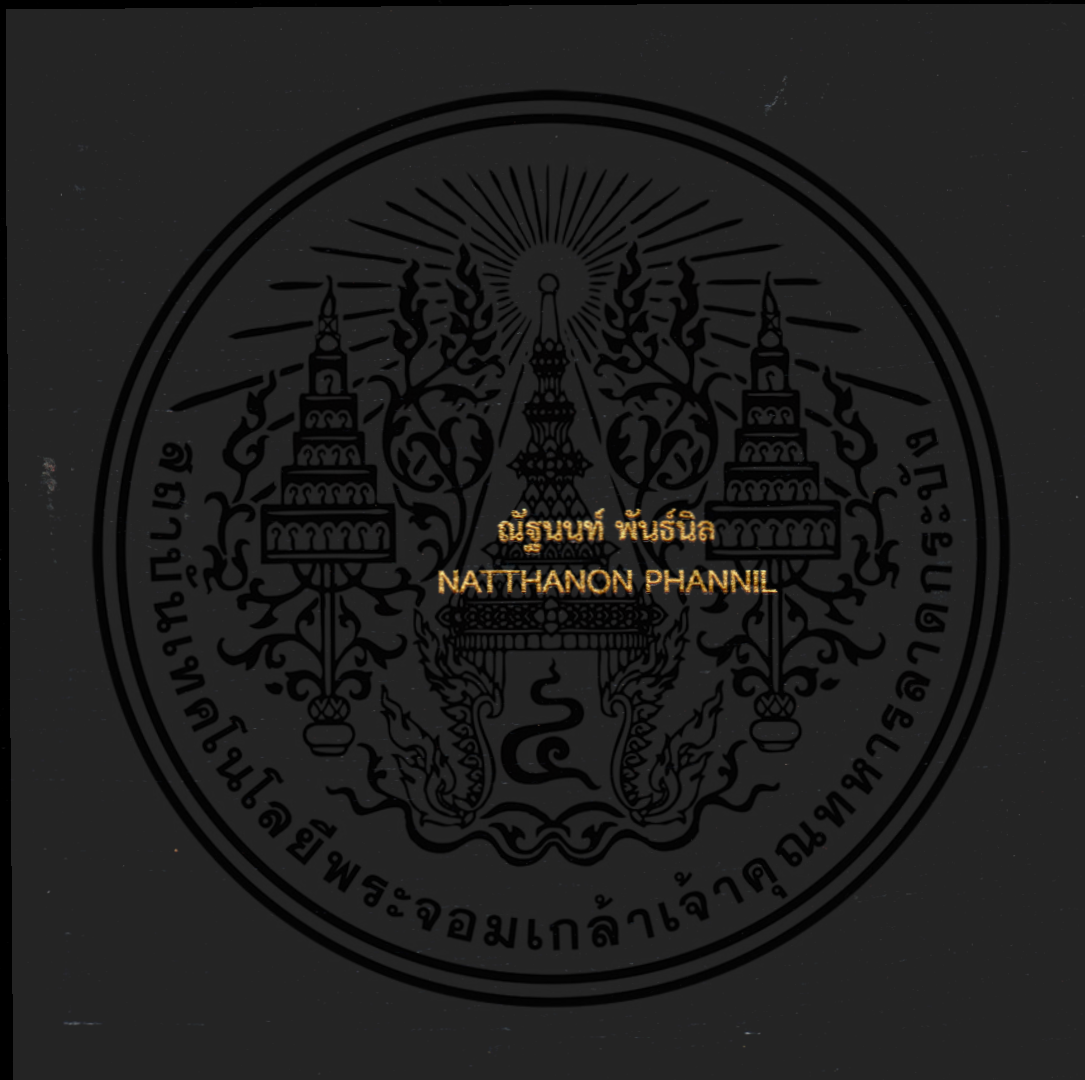


คุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของ
อินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า

POWER QUALITY AND ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE MITIGATION
OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-082

คุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของ
อินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า

POWER QUALITY AND ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE MITIGATION
OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER QUALITY AND ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE MITIGATION
OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER INVERTER



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

2018

KMITL-2018-EN-M-020-082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลัง
พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า
Thesis Title Power Quality and Electromagnetic Interference Mitigation of Grid
Connected Photovoltaic Power Inverter
นักศึกษา นายณัฐนนท์ พันธุ์นิล
รหัสประจำตัว 58601150
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-082

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสุวรรณกุล	
รศ.ดร.อรรถพล	เงาพิทักษ์กุล	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-303 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า
นักศึกษา	นายณัฐนนท์ พันธุ์นิล
รหัสประจำตัว	58601150
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ จากนั้นอินเวอร์เตอร์ทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอาคาร งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยรวม โหมดผลรวม และโหมดผลต่าง ศึกษาความเป็นไปได้ของรูปแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด และการใช้วงจรกรอง จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการลดทอนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ออกแบบ และการศึกษาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก รวมทั้งความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าควรใช้วิธีการหลาย ๆ วิธีร่วมกัน เนื่องจากแต่ละวิธีการจะมีการตอบสนองการลดทอนในย่านความถี่ที่แตกต่างกัน การใช้วิธีการต่อลงดินส่งผลให้คุณลักษณะของสัญญาณมีการเลื่อนความถี่จากเดิมและมีสัญญาณรบกวนลดลงเล็กน้อยในความถี่ช่วงปลาย การใช้เฟอร์ไรต์บีดส่งผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 1.5 – 10 เมกะเฮิรตซ์ และการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟส่งผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง 0.15 – 15 เมกะเฮิรตซ์ได้ดีมาก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแบบแยกโหมด พบว่ายังมีการลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวมและโหมดผลต่างในปริมาณที่เท่ากัน จะยิ่งทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนโดยรวมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Thesis	Power Quality and Electromagnetic Interference Mitigation of Grid Connected Photovoltaic Power Inverter
Student	Mr.Natthanon Phannil
Student ID.	58601150
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chaiyan Jettanasen

ABSTRACT

This thesis presents an attenuation of the conducted emission (CE) generated by a grid-connected inverter. A PV simulator is used to replace a photovoltaic module as a direct current power supply. Then the grid-connected inverter converts the direct current to an alternating current and sends it to a grid system. This research investigates the characteristics of the conducted electromagnetic interferences (total mode, common mode, and differential mode), the possibility of electromagnetic interference attenuation for 3 approaches (grounding, ferrite bead, and EMI filter), the comparative study of the attenuation of the EMI filter, insertion losses, and economic values. The results show that EMI mitigation should be used with more than one method because each attenuation technique is effective in different frequency ranges. The grounding method resulted in the EMI characteristics shifted and the noise was slightly reduced in the last frequency range. The use of ferrite bead resulted in a noticeable decrease in the range of 1.5 - 10 MHz. The use of passive EMI filters has resulted in a reduction in electromagnetic interference in the 0.15 - 15 MHz range. In addition, when analyzing the EMI attenuation, if the EMI reduction in the common mode and the differential mode are similar, it will make overall noise reduction more effective.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน ที่กรุณาให้ คำแนะนำ แนวทางในการดำเนินงาน และ ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่างๆ ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล ที่กรุณาให้ คำแนะนำ สิ่ง อำนวยความสะดวกในการทำงาน และเป็นที่ปรึกษาทั้งในด้านงานและเรื่องอื่น ๆ กับผู้วิจัย ซึ่ง เปรียบเสมือนอาจารย์ที่ปรึกษาอีกคนหนึ่งของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายปิยะวิทย์ ศรีโปดก เจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและ มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณนายจักรกฤษณ์ จิระประเสริฐวงศ์ ที่ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะในการทำงานวิจัย ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ช่วยแนะนำวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดระหว่างการ ทำงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าอย่างมาก

ขอขอบคุณนายปณพงค์ สงสุขสวัสดิ์ นายสันธิติ อยู่มาก และนายสันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร ที่เอื้อเฟื้อรถยนต์ แรงกาย และแรงใจ ในการขนอุปกรณ์ต่าง ๆ ไปทดสอบ ให้คำแนะนำในการเรียน เป็นที่ปรึกษาและที่พึ่งพิงเมื่อข้าพเจ้าประสบปัญหา เป็นเสมือนพี่ชายและเพื่อนในเวลาเดียวกัน ทำให้ ข้าพเจ้ามีความสุขทุกครั้งที่ได้เข้าห้องโปรเจคและสนุกทุกครั้งที่ได้อยู่ด้วยกัน และช่วยเหลือข้าพเจ้า ด้านต่างๆ เสมอมา

ขอขอบคุณมิตรของข้าพเจ้าทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าด้านต่างๆ จนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือจนทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

ณัฐนนท์ พันธุ์นิล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	6
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	8
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.1.2 เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator).....	9
2.2 อินเวอร์เตอร์.....	11
2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC).....	12
2.3.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	14
2.3.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.3.3 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำชนิดพาสซีฟ.....	19
2.4.1 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	20
2.4.2 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	24
2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.5 องค์ประกอบแผง.....	28
2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า.....	28
2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	29
2.5.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	30
บทที่ 3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์	
3.1 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....	32
3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	32
3.1.2 ห้องทดสอบสัญญาณ รบกวนแม่เหล็ก กั้นทางสายตัวนำ (Shielded room).....	35
3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ.....	39
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	40
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	47
4.2 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง.....	63
4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss).....	70
4.4 การเปรียบเทียบความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ V อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์.....	2
2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	19
2.3 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Capacitor of Class X).....	21
2.4 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Capacitor of Class Y).....	22
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ประกอบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	43
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มี เฟอโรไรต์ปิดและตัวกรอง.....	49
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	50
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 1.....	56
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 2.....	57
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 3.....	58
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 4.....	59
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 5.....	60
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 6.....	61
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์ปิด และตัวกรองหมายเลข 7.....	62
4.10 ราคาวงจรกรองทั้ง 7 แบบเทียบกับวงจรกรองตามท้องตลาดทั่วไป.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	1
1.2 แผนผังการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1 แสดงการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2 โปรแกรมควบคุมและเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.3 อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter).....	12
2.4 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.6 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั่วไป.....	20
2.8 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างและโหมดผลรวม.....	23
2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	24
2.10 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	24
2.11 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	25
2.12 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก.....	28
2.13 ตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	29
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า.....	29
2.15 ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	30
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	30
2.17 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	31
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ.....	31
3.1 ระบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	32
3.2 การตั้งค่าเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
3.3 การเลือกเซลล์แสงอาทิตย์จากโปรแกรม.....	33
3.4 การตั้งค่าสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
3.5 วิธีการวัดและผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวของไฟฟ้า กระแสดรงผึ้งขาออกของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ขาเข้าอินเวอร์เตอร์).....	35

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.6 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Shielded room).....	38
3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสของห้องทดสอบ.....	39
3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	40
3.9 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	42
3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 1.....	44
3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 2.....	44
3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 3.....	44
3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 4.....	45
3.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 5.....	45
3.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 6.....	45
3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 7.....	45
3.17 ขนาดตัวกรองเทียบกับอินเวอร์เตอร์.....	46
4.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อมีและไม่มีเฟอร์ไรต์บีด.....	48
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1.....	52
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2.....	52
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3.....	53
4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4.....	53
4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5.....	54
4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6.....	54
4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.9 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อพื้นเฟอร์ไรต์ปิดและใส่ตัวกรอง.....	55
4.10 การวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง.....	63
4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	64
4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	64
4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1.....	65
4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2.....	66
4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3.....	66
4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4.....	67
4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5.....	67
4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6.....	68
4.19 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7.....	68
4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิด และตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร.....	69
4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิด และตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร.....	69
4.22 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกในระบบทดสอบ.....	70
4.23 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 1.....	71
4.24 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 2.....	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.25 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 3.....	72
4.26 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 4.....	72
4.27 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 5.....	73
4.28 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 6.....	73
4.29 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 7.....	74
4.30 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองทั้ง 7 ตัว.....	74

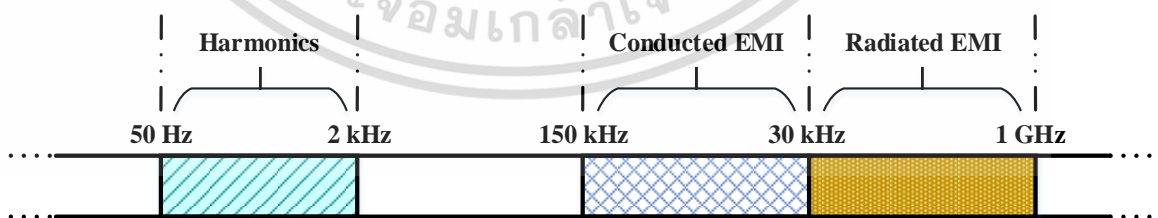


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ทำให้เกิดการสร้างสรรค์นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ๆ ขึ้นมากมาย ซึ่งการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะมีการใช้งานที่มีสัมพันธ์ซึ่งกันและกันทั้งทางด้าน การติดต่อสื่อสาร การส่งกำลังไฟฟ้า การสัมผัสกันของอุปกรณ์ และการใช้งานในพื้นที่เดียวกัน สามารถก่อให้เกิดการรบกวนต่อกันได้ เช่น การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารที่พักอาศัย จำเป็นจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตชิง หม้อแปลง ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์เหล่านี้สามารถก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ ทั้งการส่งผ่านสายตัวนำและแพร่ทางอากาศ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน โดยรบกวนการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ป้องกันทางระบบไฟฟ้า เพื่อไม่ให้มีสัญญาณรบกวนที่มากเกินไปไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอาคาร ดังนั้นก่อนการเชื่อมต่อหรือการจ่ายไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอาคารหรือการไฟฟ้าควรมีการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเสียก่อน สัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามช่วงความถี่ ได้แก่ สัญญาณฮาร์โมนิกส์ (ความถี่ 0 - 2100 เฮิร์ตซ์) สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (ความถี่ 0.15 - 30 เมกะเฮิร์ตซ์) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (ความถี่ 30 - 1000 เมกะเฮิร์ตซ์) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า การไฟฟ้าได้มีข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าไว้ “ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า” ในส่วนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดเทคนิคสำหรับอินเวอร์เตอร์ ด้านการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า กำหนดว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายไฟให้ภาระไฟฟ้าเชิงเส้นที่สมดุล (Balanced Linear Load) อินเวอร์เตอร์จะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกส์จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดดังตารางที่ 1.1 (แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์) และต้องควบคุมการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยอินเวอร์เตอร์จะต้องไม่สร้างไฟฟ้ากระแสตรง (DC Injection) จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินกว่า 0.5 % ของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์ เพราะการไฟฟ้าให้ความสำคัญกับคุณภาพไฟฟ้าทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามก เนื่องจากสัญญาณรบกวนเหล่านี้มีผลต่อระบบไฟฟ้าทั้งทางด้านความร้อนในสายส่ง รบกวนรีเลย์ป้องกัน และส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 1.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของอินเวอร์เตอร์ [1-2]

อันดับคี่	ขีดจำกัดกระแส (%)	อันดับคู่	ขีดจำกัดกระแส (%)
3 - 9	4.0	2 - 10	1.0
11 - 15	2.0	12 - 16	0.5
17 - 21	1.5	18 - 22	0.375
23 - 33	0.6	24 - 34	0.15
35 ขึ้นไป	0.3	36 ขึ้นไป	0.075
ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์ (THDi) 5.0 %			

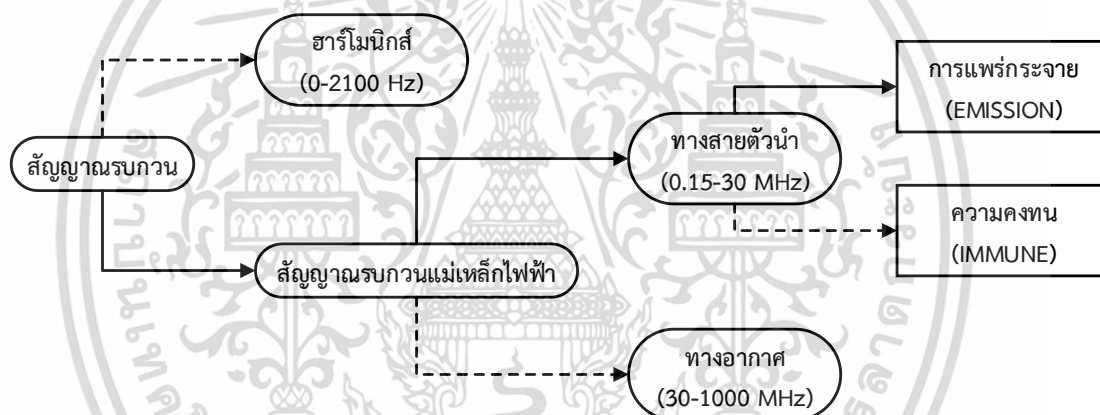
สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งที่ต่อมา คือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference : EMI) เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก ทำให้สัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอื่นข้างเคียงได้ อาทิเช่น สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำของอินเวอร์เตอร์ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมของวงจรเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมถึงกันทางสายตัวนำ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของอินเวอร์เตอร์ส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร วิทยุ และเรดาร์ เป็นต้น ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนเป็นผลเกี่ยวเนื่องกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference : EMI) หลายประเทศจึงได้ตั้งข้อกำหนดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จะนำเข้ามาขายในประเทศนั้น ๆ โดยจะต้องผ่านการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อหลัก ได้แก่ การแพร่กระจายสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission) และความคงทนต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Immune) แต่ข้อกำหนดเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีระเบียบอย่างเป็นทางการ ดังนั้นการทดสอบทั่วไปจะใช้มาตรฐานของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ทั้งการทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ

(CE) และการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (RE) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยอ้างอิงมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน EN55022 class B, CISPR17, CISPR14-1, และ CISPR22-B ซึ่งเป็นมาตรฐานของเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นมาตรฐานอ้างอิงไปก่อน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดทอนได้หลายวิธี เช่น การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ [3-12] การใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟ [13-14] และการใช้วงจรกรองแบบผสม [46-47, 41] เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้ล้วนให้ผลการลดทอนที่ต่างกัน ทั้งคุณลักษณะและความถี่การลดทอนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า การลดทอนโดยใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากใช้งานง่าย ราคาถูก สามารถลดทอนได้อย่างเห็นผล และหาซื้อง่าย [3] แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบการลดทอนของวงจรกรองแบบพาสซีฟก็อาจจะแตกต่างกันในแต่ละระบบที่นำไปใช้งาน ดังนั้นการใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟจึงควรมีการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับระบบนั้น ๆ ด้วย เพื่อลดความถี่รบกวนระหว่างวงจรกรองและระบบ นอกจากนี้การจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรกรองก็มีผลต่อประสิทธิภาพการลดทอนด้วย [4] เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ อาทิ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ทั้งหลายเหล่านี้สามารถปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามารบกวนกันเองภายในวงจรกรองได้ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรกรองต่ำลงได้ สำหรับการศึกษาวิจัยการออกแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำได้โดยการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแยกเป็น 2 โหมด [15] ได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโพลผสมรวม [16] และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง จากนั้นนำผลการวัดที่ได้ไปออกแบบการลดทอนตามความเหมาะสมต่อไป ในงานวิจัยของ J. Ji และ W. Chen [3] ได้นำเสนอการเปรียบเทียบลดทอนของวงจรกรองแบบพาสซีฟและแอคทีฟ ซึ่งพบว่าผลที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่วงจรกรองแบบแอคทีฟจะให้ผลดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการวิเคราะห์การจัดวางและความเหมาะสมของพารามิเตอร์ของวงจรกรองแบบพาสซีฟก็อาจให้ผลการลดทอนที่ดีเสมอกันได้ ซึ่งในงานวิจัยเรื่อง A Layout Method of Passive EMI Filter ของ Junpeng Ji [4] ได้ศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ และเน้นการจัดวางอุปกรณ์บนวงจรกรอง มีการศึกษาการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมในทิศแกนสามมิติที่ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าแนวการจัดวางตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมมีผลต่อประสิทธิภาพการลดทอนด้วย

ในงานวิจัยนี้ ได้เน้นการศึกษาการทอนการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ขนาด 300 วัตต์ แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter) เพื่อศึกษาหาเทคนิควิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น รวมถึงการสร้างและเปรียบเทียบวงจรถอดสัญญาณรบกวนที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า ไม่ให้สัญญาณรบกวนนี้ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าในอาคาร โดยใช้ “มาตรฐาน CISPR14-1” เป็นเกณฑ์มาตรฐานควบคุมสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และทำการเปรียบเทียบวงจรถอดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ 7 วงจรที่แตกต่างกัน เพื่อหารูปแบบวงจรที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งการใช้เฟอร์ไรต์และการต่อลงดินช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนอีกด้วย ซึ่งสามารถเป็นต้นแบบและแนวทางสำหรับการลดทอนสัญญาณรบกวนทางตัวนำที่เหมาะสม และเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจในอนาคตได้



รูปที่ 1.2 แผนผังรูปแบบการทดสอบสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.2 เพื่อศึกษารูปแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อระบบใช้งาน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลการลดทอนของตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) ในแต่ละรูปแบบ

1.2.4 ส่งเสริมการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนดังกล่าวส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าโดยรวม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะและการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า ด้วยวิธีการต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด (Ferrite bead) และการใช้ตัวกรองชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) ในการศึกษาจะออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ 7 วงจรที่แตกต่างกัน ทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนและเปรียบเทียบสัญญาณที่ลดทอนได้ เพื่อหาวงจรที่เหมาะสมต่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกจากอินเวอร์เตอร์ไปยังระบบไฟฟ้าภายในอาคาร (ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์)

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น อินเวอร์เตอร์ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการลดทอนสัญญาณรบกวน และตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.2 ออกแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า และวางแผนการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

1.4.3 ออกแบบวงจรของตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ เพื่อใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวน

1.4.4 จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือวัดและบันทึกผล

1.4.5 สร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทำการทดลอง

1.4.6 ทดสอบและปรับปรุงตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.4.7 สรุปผลของงานวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถอธิบายคุณลักษณะและวิธีการแก้ไขสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

1.5.2 เพิ่มความตระหนักถึงสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า และความเข้ากันทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อวงจรหรือระบบไฟฟ้าข้างเคียง

1.5.3 สามารถปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งหาวิธีการลดทอนที่เหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนด

1.5.4 เป็นองค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถต่อยอดนำไปออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการ แผนงานของการศึกษาทดลอง ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของอุปกรณ์และหลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเพื่อศึกษาการลดทอนสัญญาณในงานวิจัยนี้ นำเสนอมาตรฐานที่ใช้ทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และอธิบายทฤษฎีการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟแต่ละวงจร เพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับกัน รวมถึงรายละเอียดต้นทุนของวงจรกรองแต่ละวงจร

บทที่ 4 แสดงผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเมื่อใช้วงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเทียบกับมาตรฐาน CISPR 14-1 และเปรียบเทียบต้นทุน คุณภาพการลดทอนสัญญาณรบกวน เพื่อวิเคราะห์หาวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและดำเนินการจัดทำ การทดลองหรือ ทดสอบ สรุปผลความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกัน ตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องต่อไป

ภาคผนวก สำหรับในส่วนนี้จะประกอบด้วยผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพิ่มเติม มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง และบทความวิชาการรวม 1 บทความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

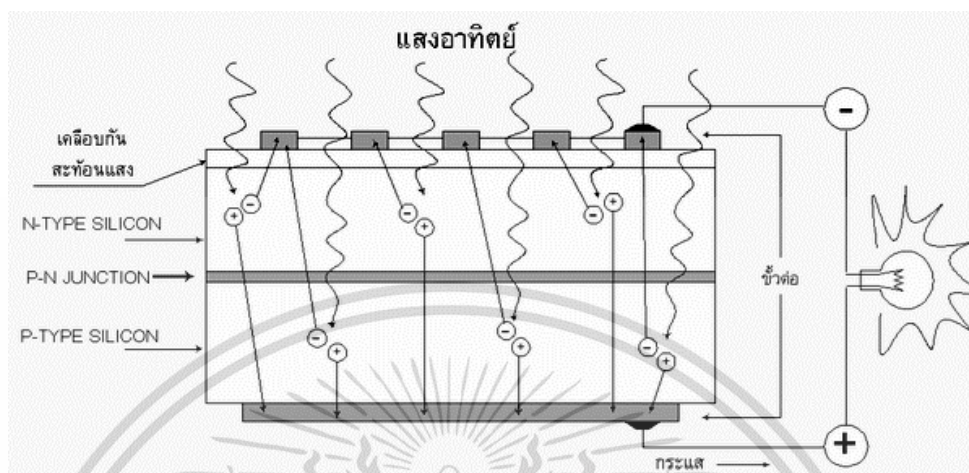
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [17-19]

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานสะอาดที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดในปัจจุบัน แต่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้นั้นยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะกลางวันและมีความเข้มแสงไม่คงที่แน่นอน ขึ้นกับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก จะมีความเข้มแสงประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร ปริมาณแสงอาทิตย์จะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่และจะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ดังนั้นหากต้องการให้ได้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดต่อวัน ก็ต้องปรับพื้นที่รับแสงตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอ นอกจากนี้การเอียงของแกนโลกทำให้ซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ไม่พร้อมกัน จึงต้องปรับมุมพื้นที่รับแสงในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูกาลด้วย เพื่อให้สามารถรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งปี ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นขนานที่ 6-10 องศาเหนือ จะได้รับแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่พบมากในทุกวันนี้ เป็นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในอาคารหรือขายให้กับการไฟฟ้า โดยใช้หลักการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการนำสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอนมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบาง เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.1 รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า โพรตรอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับ อิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น องค์ประกอบหลักของ “เซลล์แสงอาทิตย์” คือ สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด มาต่อกัน ซึ่งเรียกว่า “P-N Junction” เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะทำให้ถ่ายเทพลังงานให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและช่องว่างอิสระไปรออยู่ที่ขั้วต่อ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมกับวงจรภายนอก เช่น หลอดไฟมาต่อคร่อมขั้วต่อ ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนไปยังช่องว่างอิสระ ที่ให้เกิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

ก็บังจรรยาจนอกได้ และจะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ตรวจจับที่ยังมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที หรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้งาน ภายหลังได้



รูปที่ 2.1 แสดงการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ [19]

คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ [17]

ตัวแปรที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานต่างกันในแต่ละพื้นที่ และมีความสำคัญในการนำไปคำนวณระบบติดตั้งหรือจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ ได้แก่

- **ความเข้มของแสง** กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่า เมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่ความเข้มของแสงมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยมาก ความเข้มของแสงมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยวัดที่ระดับน้ำทะเล ขณะที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก และมีสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอก

- **อุณหภูมิ** กระแสไฟฟ้าแทบจะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย

2.1.2 เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator)

เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator) เป็นเครื่องมือที่ใช้จำลองการจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการรับไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จากห้องปฏิบัติการ แล้วแปลงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเครื่องมือนี้สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสตรงได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำลองรูปแบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในขณะที่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิตามรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์จริงได้อีกด้วย ทำให้สะดวกต่อการใช้งานในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการที่ไม่สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้และยังประหยัดพื้นที่การทำงาน เนื่องจากเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีความจำลิ่งไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับการใช้เซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ขนาดจำลิ่งไฟฟ้าเท่ากัน จึงสามารถลดความจำเป็นในการใช้พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2

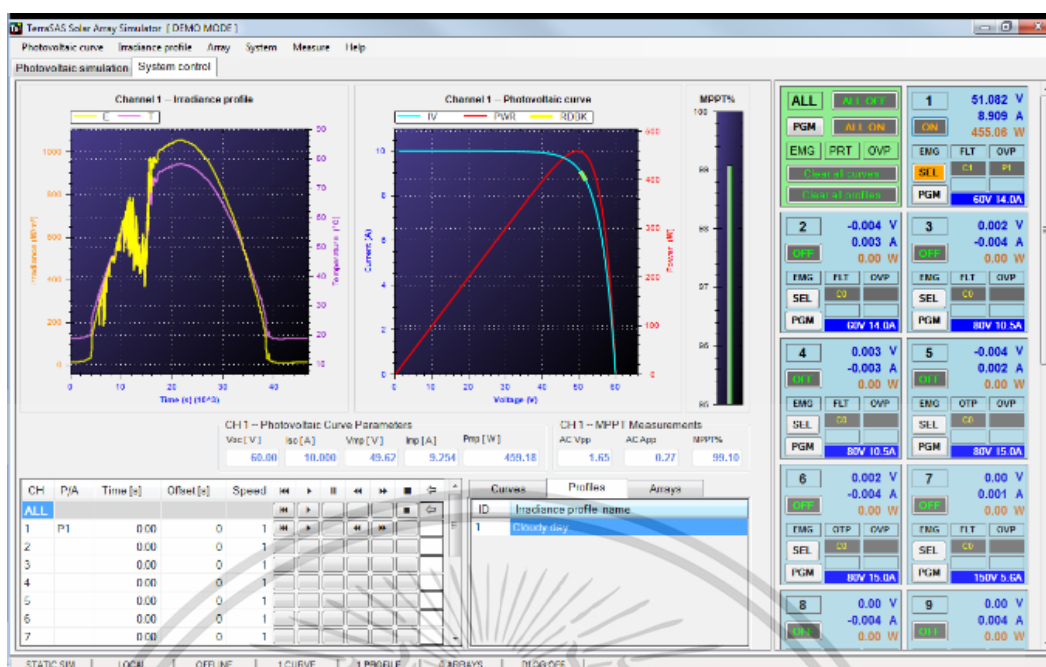
นอกจากนี้อีกหนึ่งเหตุผลที่ใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนการใช้แบตเตอรี่ คือ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน จำลิ่งไฟฟ้าจะถูกดึงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์จะดึงจำลิ่งไฟฟ้าในอัตราสูงสุด ซึ่งอาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมได้เร็วและอาจมีผลต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถควบคุมอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสตรงให้เหมาะสมตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

Terrestrial Solar Array Simulator (TerraSAS) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการกำหนดค่าการจ่ายจำลิ่งไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ตามคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนด โดยนำข้อมูลเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตหรือที่ถูกสร้างขึ้นมาป้อนลงในโปรแกรม ซึ่งเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้พิกัดในการจ่ายจำลิ่งไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ (600 โวลต์ 8.3 แอมป์)



ก. เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (TerraSAS)
รูปที่ 2.2 โปรแกรมควบคุมและเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารบ้านพักอาศัยส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการสวิตชิง โดยส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านั้นจะใช้อุปกรณ์สวิตชิง เช่น ไดโอด มอสเฟต (MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ซึ่งที่ขาดไม่ได้ในการควบคุมการเปิด-ปิดของอุปกรณ์สวิตชิง คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการเปิด-ปิดตามที่โปรแกรมไว้

สำหรับการเชื่อมต่อการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าทุกตัวจะต้องมีวงจรในการควบคุมการเชื่อมต่อ โดยจะตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า มุมเฟสทางไฟฟ้า และความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ต้องการเชื่อมต่อ จากนั้นจะตรวจสอบฝั่งไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจึงสั่งรีเลย์ให้ทำการเชื่อมต่อระบบ เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter)

2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

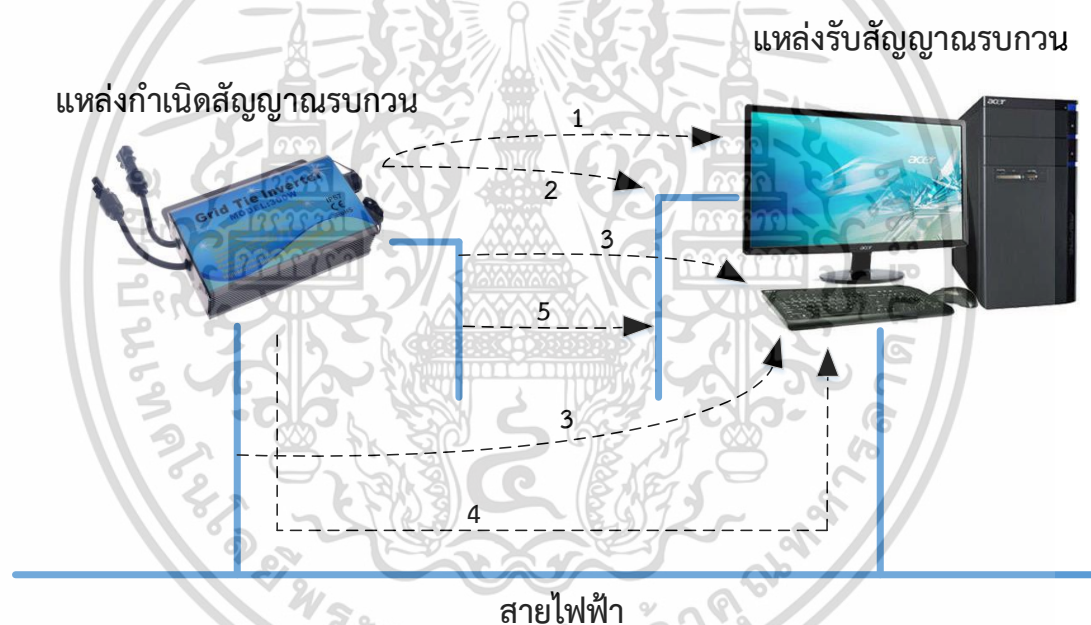
“ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) หมายถึง ความสามารถของอุปกรณ์ (Device), เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (System) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียหรือผลกระทบใด ๆ ต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน” [20]

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นมีความจำเป็น เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างเป็นปกติ เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีการปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางสายตัวนำ (Conducted Emission) และทางอากาศ (Radiated Emission) เมื่อเกิดการแผ่สัญญาณรบกวนแล้ว อาจจะทำให้เกิดการรบกวนหรือการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น เพื่อให้เข้าใจง่ายสามารถอธิบายได้ว่า “การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) หมายถึง การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” [20] ผลที่เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่ความถี่ของสัญญาณรบกวนที่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ที่ความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากจะได้รับผลกระทบได้ง่าย ซึ่งการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ถูกสร้างขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงควรมีการควบคุมทั้งด้านภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Immunity) และการปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission)

การเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีส่วน 3 ส่วนหลัก ๆ ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) ตัวกลาง (coupling path) และตัวรับผลกระทบ (receptor) โดยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนจะแผ่กระจายผ่านตัวกลางไปยังตัวรับผลกระทบ ทั้งนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่งเครื่องนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) และตัวรับผลกระทบ (receptor) โดยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [20]

รูปแบบที่ 1 Radiated Emission : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบ

รูปแบบที่ 2 Indirect-conducted Emission : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ แล้วนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่ 3 Indirect-radiated Emission : สายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ

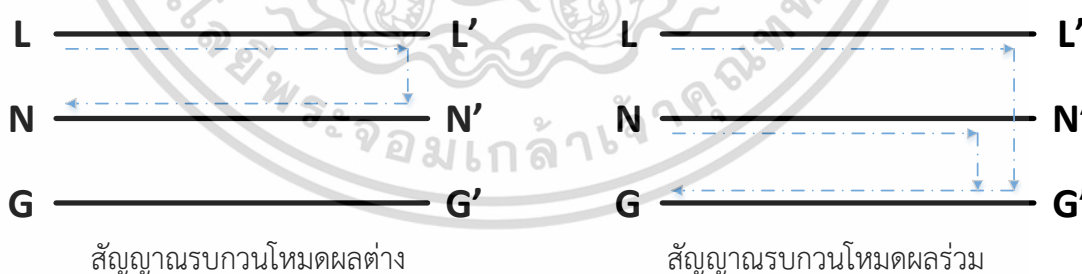
รูปแบบที่ 4 Conducted Emission : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบ โดยผ่านทางสายตัวนำที่เชื่อมต่อกันกับตัวรับผลกระทบ

รูปแบบที่ 5 Semi-conducted Emission : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ

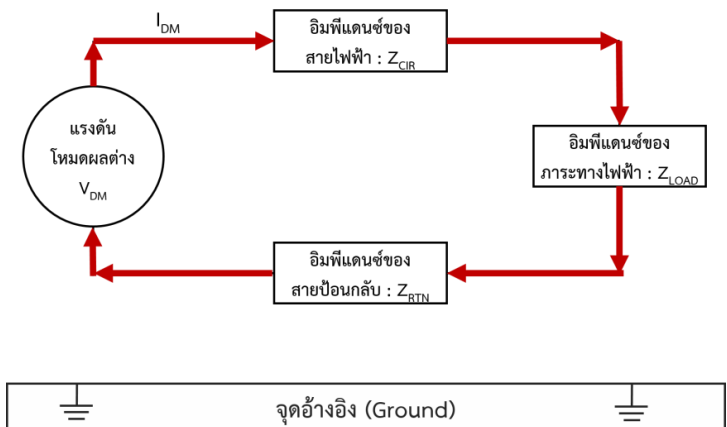
เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดนั้นสามารถสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ จำเป็นต้องลดการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงการทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นทนต่อการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์อื่นด้วย [20-26]

2.3.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

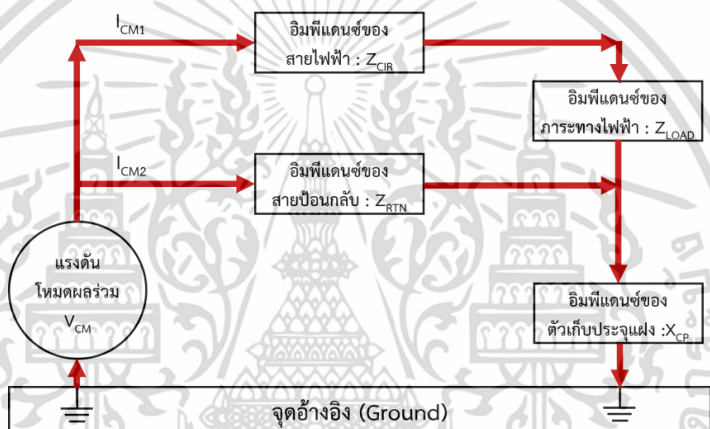
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดและสามารถเดินทางไปยังอุปกรณ์อื่น โดยอาศัยตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน อาทิเช่น สายส่งกำลัง สายสัญญาณควบคุม หรือสายดิน มีความถี่อยู่ในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 โหมดหลัก ได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม (Common Mode Interference) ตามรูปที่ 2.5



ก. เส้นทางไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม



ข. ลักษณะการไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



ค. ลักษณะการไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

รูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common Mode Interference)

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ปรากฏขึ้นระหว่างจุดอ้างอิง (สายดิน) กับสายตัวนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ทั้งคู่เปลี่ยนแปลงพร้อมกันและมีปริมาณสัมพันธ์กันกับจุดอ้างอิง [27] โดยสัญญาณดังกล่าวเกิดจากค่าความเก็บประจุแฝงในวงจรไฟฟ้า ซึ่งตามธรรมชาติค่าความเก็บประจุนี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อมีสัญญาณความถี่สูงไหลผ่าน นั่นหมายความว่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง ๆ สามารถไหลจากสายตัวนำเส้นหนึ่งไปอีกเส้นหนึ่งผ่านตัวเก็บประจุแฝงในอากาศได้ตามรูปที่ 2.5 โดยแรงดันโหมดผลรวม (V_{CM}) เกิดจากกระแสโหมดผลรวม (I_{CM1}) จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CIR}) และภาระทางไฟฟ้า (Z_{LOAD}) แล้วไหลลงสายดินรวมกับกระแสโหมดผลรวม

(I_{CM2}) ที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (Z_{RTN}) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแรงดันของสัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับแรงดันของสัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseRTN}$) ตามสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

$$V_{noiseCIR} = I_{CM1} \mathcal{X}(Z_{CIR} + Z_{LOAD} + X_{Cp}) \quad (2.1)$$

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

สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference)

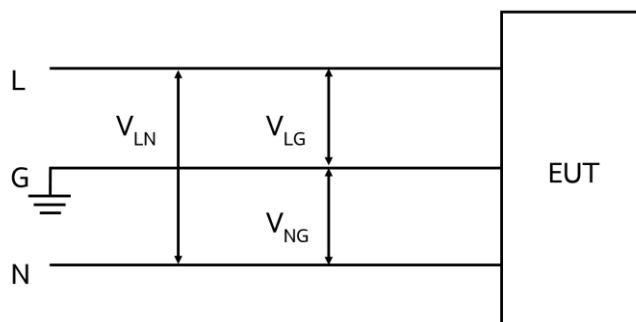
สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างเกิดจากสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างสองสายตัวนำ คือ ตัวนำสัญญาณไป (Signal Line) และตัวสัญญาณกลับ (Return Line) มีรูปแบบหรือขนาดแตกต่างกัน [27] ทางเดินของสัญญาณรบกวนในวงจรจะไหลดังรูปที่ 2.5 กระแสโหมดผลต่างจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CIR}) และไหลกลับมาที่อิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (Z_{RTN})

ในการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (V_{DM}) และโหมดผลรวม (V_{CM}) นั้นสามารถวัดได้จากสายไลน์ นิวทรอน และกราวด์ ดังรูปที่ 2.6 จากนั้นคำนวณหา V_{CM} ได้จากสมการที่ 2.3 และคำนวณหา V_{DM} ได้จากสมการที่ 2.4

$$V_{CM} = \frac{(V_{LG} + V_{NG})}{2} \quad (2.3)$$

$$V_{DM} = \frac{(V_{LG} - V_{NG})}{2} \quad (2.4)$$

โดยที่	V_{CM}	คือ แรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
	V_{LG}	คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
	V_{DM}	คือ แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
	V_{NG}	คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรอลกับกราวด์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)



รูปที่ 2.6 การวัดค่าสัญญาณรบกวน [20]

2.3.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน และอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้สามารถสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์ได้ ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ดังนั้นหน่วยงานต่าง ๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานขึ้น เพื่อบังคับไม่ให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานและความปลอดภัย มาตรฐานที่กำหนดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีมากมาย ขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ สถานที่ใช้งาน และรูปแบบการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานสากลกำหนดโดย Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) หรือในภาษาอังกฤษเรียกว่า International Special Committee on Radio Interference มาตรฐานยุโรป กำหนดโดย European Committee for Standardization (CEN) มาตรฐานสหรัฐอเมริกา กำหนดโดย Federal Communications Commission (FCC) และมาตรฐานเฉพาะทาง เช่น มาตรฐานทางทหาร เป็นต้น ในส่วนของไทยนั้นมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ซึ่งกำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.)

ในประเทศไทยนั้นมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอ้างอิงจากมาตรฐานของยุโรป ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐานสากล ตามตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานยุโรป และมาตรฐานสากล

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

International	European	มอก.	หัวข้อ/รายการ
CISPR 11	EN55011		งานอุตสาหกรรม การทดลองวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics)
CISPR 12	EN55012		ยานยนต์ (Vehicles, boats and internal combustion engines)
CISPR 13	EN55013	มอก.2185	เครื่องรับการกระจายเสียงและสัญญาณโทรทัศน์และบริภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง (Sound and television broadcast receivers and associated equipment)
CISPR 14	EN 55014	มอก.2238	เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้าและเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน (Household Appliances, Electric tools and Similar Apparatus) [28]
CISPR 15	EN55015	มอก.1955	บริภัณฑ์ส่องสว่างและบริภัณฑ์ที่คล้ายกัน (Lighting and Similar Equipment)
CISPR 16	EN55016		อุปกรณ์การวัด (Measurement apparatus/methods)
CISPR 22	EN55022	มอก.1956	บริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information technology equipment)
CISPR 25	EN55025	มอก. 2326	ยานยนต์ (Vehicles, boats and internal combustion engines)

2.3.3 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

การทดสอบการแผ่กระจายของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำจะต้องทดสอบในห้องที่ได้รับ การรับรองมาตรฐาน รวมถึงมีการจัดวางอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานด้วย ค่าของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ อุปกรณ์ที่จะทดสอบ และประเทศที่จะนำสินค้านั้นไปใช้งาน ส่วนใหญ่สินค้าจะมีการสอบเทียบกับ มาตรฐานในหลายประเทศ เช่น มาตรฐานสากล มาตรฐานยุโรป หรือมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไทย จะยกตัวอย่างการทดสอบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องสำเร็งที่คล้ายกัน (Household Appliances, Electric Tools and Similar Apparatus) ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก.2238 [39] หรือ EN55014 หรือ CISPR14 [40] ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานมีค่าในการทดสอบเหมือนกันเนื่องจากมาตรฐาน มอก.2238 ของไทยอ้างอิงมาจาก CISPR14 และมาตรฐาน EN55014 ของยุโรปก็อ้างอิงมาจากมาตรฐานสากล CISPR14 เช่นเดียวกัน โดยการทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์จะทดสอบในหัวข้อเครื่องใช้และบริภัณฑ์ภายในที่อยู่อาศัยที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่คล้ายกัน ฝั่งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังตารางที่ 2.2 ที่ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะวัดค่าสูงสุด (Peak) ค่ายอดเสมือน (Quasi-Peak: QP) และค่าเฉลี่ย (Average: AV) โดยค่าสูงสุดนั้นจะใช้ในมาตรฐานทางทหาร แต่ในมาตรฐานทั่วไปไม่ได้มีข้อกำหนดสำหรับค่านี้ ดังนั้นค่าที่มาตรฐานทางการค้าทั่วไปจะกำหนดมีเพียงแค่ค่ายอดเสมือนและค่าเฉลี่ยเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (CISPR 14-1)

พิสัยความถี่ (MHz)	ที่ขีดต่อโหลดและขีดต่อเพิ่มเติม	
	ค่ายอดเสมือน dB(μ V)	ค่าเฉลี่ย dB(μ V)
0.15 ถึง 0.50	ลดลงเชิงเส้นด้วยลอการิทึมของความถี่จาก	
	80	70
0.50 ถึง 5	74	64
5 ถึง 30	74	64

2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำชนิดพาสซีฟ

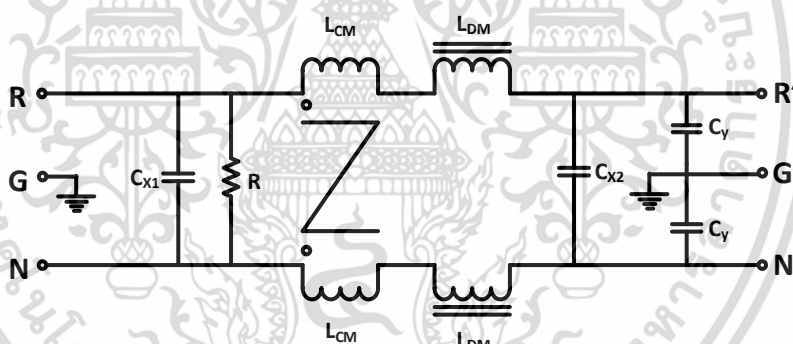
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) นั้นมีลักษณะและคุณสมบัติเหมือนวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยเน้นกรองในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่มาตรฐานกำหนด วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้ง 2 โหมด ได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ซึ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนนี้มีหลายประเภท ได้แก่ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) [20,22,24-26] วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแอกทีฟ (Active EMI Filter) [29-30] และวงจรกรองสัญญาณรบกวน

แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไฮบริด (Hybrid EMI Filter) [31] นอกจากนี้วงจรกรองสัญญาณทุกชนิดก่อนจะวางจำหน่ายเชิงพาณิชย์นั้นจะต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60939 [32] ในงานวิจัยฉบับนี้สนใจในการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ เนื่องจากใช้งานง่าย ตอบสนองการกรองสัญญาณรบกวนได้ดี และมีราคาไม่แพง

2.4.1 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ที่สำคัญดังนี้ดังรูปที่ 2.7

- ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Differential Mode Capacitor: C_X)
- ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Common Mode Capacitor: C_Y)
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke: L_{DM})
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke: L_{CM})
- ตัวต้านทาน (Resistor: R)



รูปที่ 2.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั่วไป

ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Differential mode capacitor: C_X)

ตัวเก็บประจุโหมดผลต่างมีหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ส่วนใหญ่ใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม (Metallized Polypropylene Film Capacitor) โดยตัวเก็บประจุโหมดผลต่างที่จะนำมาใช้นี้จะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60384-14 (Fixed capacitors for use in electronic equipment – Part 1 4: Sectional specification – Fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains)

มาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุโหมตผลต่าง (Capacitor of Class X) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ X1 และ X2 ตามตารางที่ 2.3 [32]

ตารางที่ 2.3 ระดับของตัวเก็บประจุโหมตผลต่าง (Capacitor of Class X)

Subclass	Peak impulse voltage in service	Application	Peak impulse voltage U_p applied before endurance test
X1	2.5 kV 4.0 kV	High pulse application	When $C_N \leq 1.0 \mu\text{F}$ $U_p = 4 \text{ kV}$ When $C_N > 1.0 \mu\text{F}$ $U_p = \frac{4}{\sqrt{\frac{C_N}{10^{-6}}}}$ in kV
X2	2.5 kV	General purpose	When $C_N \leq 1.0 \mu\text{F}$ $U_p = 2.5 \text{ kV}$ When $C_N > 1.0 \mu\text{F}$ $U_p = \frac{2.5}{\sqrt{\frac{C_N}{10^{-6}}}}$ in kV
ตัวเก็บประจุ X1 อาจถูกแทนที่ได้โดย ตัวเก็บประจุ Y2 หรือ Y1 ที่มี U_R เท่ากันหรือสูงกว่า			
ตัวเก็บประจุ X2 อาจถูกแทนที่ได้โดย ตัวเก็บประจุ X1 หรือ Y2 หรือ Y1 ที่มี U_R เท่ากันหรือสูงกว่า			
หมายเหตุ 1 The factor used for the reduction of U_p for capacitance values above $1.0 \mu\text{F}$ maintains $0.5 \times C_N U_P$ constant for these capacitance values; C_N is in F.			
หมายเหตุ 2 Overvoltage categories in association with rated impulse voltage and rated mains voltage are found in IEC 60664-1.			

ตัวเก็บประจุโหมตผลร่วม (Common mode capacitor: C_Y)

ตัวเก็บประจุโหมตผลร่วมมีหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วม มักใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่สูง โดยตัวเก็บประจุโหมตผลร่วมที่จะนำมาใช้นี้จะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60384-14 ด้วยมาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุโหมตผลร่วม (Capacitor of Class Y) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ Y1, Y2 และ Y4 ตามตารางที่ 2.4 [33]

ตารางที่ 2.4 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Capacitor of Class Y)

Subclass	Type of insulation bridged	Range of rated voltages	Peak impulse voltage U_P applied before endurance test
Y1	Double insulation or reinforced insulation	≤ 500 V	$U_P = 8,0$ kV
Y2	Basic insulation or supplementary insulation	≥ 150 V ≤ 500 V	When $C_N \leq 1,0 \mu\text{F}$ $U_P = 5$ kV When $C_N > 1,0 \mu\text{F}$ $U_P = \frac{5}{\sqrt{\frac{C_N}{10^{-6}}}}$ in kV
Y4	Basic insulation or supplementary insulation	< 150 V	$U_P = 2,5$ kV
ตัวเก็บประจุ Y2 อาจถูกแทนที่ได้โดย ตัวเก็บประจุ Y1 ที่มี U_R เท่ากันหรือสูงกว่า			
หมายเหตุ 1 For definitions of basic, supplementary, double and reinforced insulation, see IEC 61140.			
หมายเหตุ 2 The factor used for the reduction of U_P for capacitance values above $1,0 \mu\text{F}$ maintains $0,5 \times C_N U_P$ constant for these capacitance values; C_N is in F.			
หมายเหตุ 3 Overvoltage categories in association with rated impulse voltage and rated mains voltage are found in IEC 60664-1.			

ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟจำเป็นต้องตัดขาของตัวเก็บประจุให้สั้นที่สุด เนื่องจากขาของตัวเก็บประจุจะมีคุณลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Lead Inductance) ซึ่งส่งผลให้ค่าความเก็บประจุเสียไปในย่านความถี่สูงได้

นอกจากนี้การเลือกค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลรวมซึ่งต่อลงสายดินนั้นจะต้องคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านลงสายดินเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายด้วย ตามมาตรฐาน IEC 380 กระแสต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 mA ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหาค่า C_Y สูงสุดได้ตามสมการที่ (2.5-2.7) [45]

$$C_Y = \frac{I_g}{U_m \times 2\pi f_m} \times 10^6 \quad (2.5)$$

$$C_Y = \frac{3.5}{220\sqrt{2} \times 2\pi \times 50} \times 10^6 \quad (2.6)$$

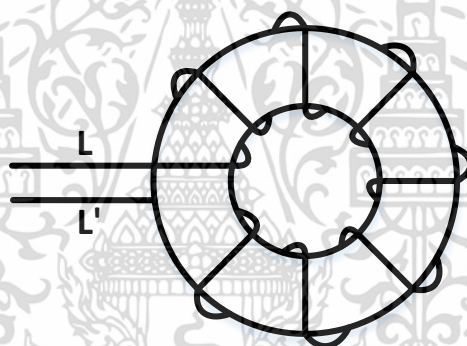
$$C_Y = 35.81 \text{ nF} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

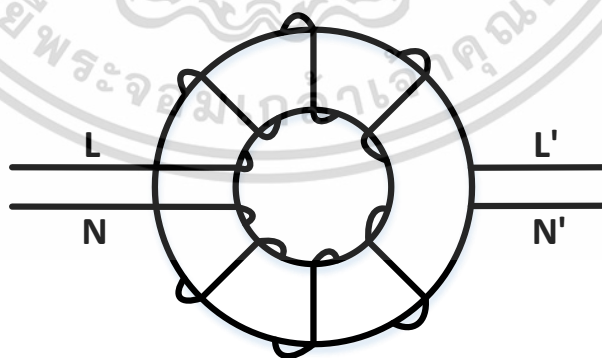
โดยที่	C_Y	คือ ค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม
	I_g	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสายดิน
	U_m	คือ ค่าแรงดันของระบบที่ใช้งาน
	f_m	คือ ค่าความถี่ของระบบที่ใช้งาน

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ ช่วยลดทอนขนาดของสัญญาณรบกวน ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke) ช่วยกรองสัญญาณโหมดผลต่าง และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke) ช่วยกรองสัญญาณโหมดผลร่วม ซึ่งตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างจะพันเหมือนตัวเหนี่ยวนำทั่วไป แต่ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมจะมีลักษณะการพันขดลวดที่แตกต่างออกไป ดังรูปที่ 2.8



ก. ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke)



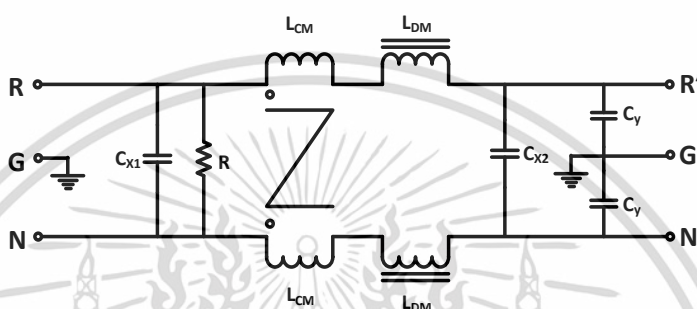
ข. ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke)

รูปที่ 2.8 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างและโหมดผลร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

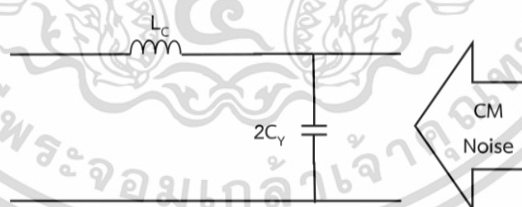
แกนของตัวเหนี่ยวนำนิยมใช้เป็นแกนเฟอร์ไรต์ ที่มีค่าความซาบซึมแม่เหล็กสูง (High Magnetic Permeability) ซึ่งทำให้ใช้จำนวนรอบของลวดทองแดงน้อยกว่าแกนชนิดอื่น เหมาะสำหรับการใช้งานด้านความถี่สูง นอกจากนี้ระหว่างขดลวดแต่ละขดนั้นจะมีค่าตัวเก็บประจุเกิดขึ้น (Stray Capacitance) การเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในย่านความถี่สูงมีค่าสูงขึ้นและชดเชยค่าตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้น [20,22]

2.4.2 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนชนิดพาสซีฟ [34-39]



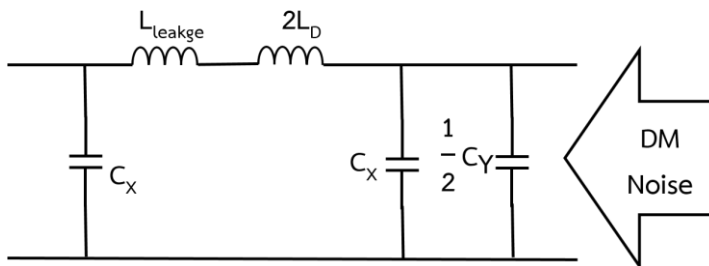
รูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ [4,6-8,15,40]

จากรูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ มีวงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้งโหมดผลต่างและโหมดผลรวม อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (L_{CM}) และตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (C_Y) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลรวมในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลรวม

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณโหมดผลต่าง ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_{DM}) ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage}$) ตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (C_Y) และตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_X) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลต่างในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลต่าง

การออกแบบและคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรกรอง เริ่มจากการนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์มาหาค่าสูงสุดและความเหมาะสมในการลดทอนสัญญาณรบกวนของแต่ละโหมด โดยการใช้เส้นความชันการลดทอนสัญญาณของรูปแบบวงจรกรองที่เลือก เพื่อหาปริมาณค่าสัญญาณที่ต้องการลดทอน และความถี่ตัด (Cut-off frequency) ของแต่ละโหมด สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของวงจรกรอง

การคำนวณพารามิเตอร์จะคำนวณจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมก่อน เนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (L_{CM}) จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage}$) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลนี้ถูกใช้ในการคำนวณหา ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_{DM}) ด้วย ดังนั้นลำดับการออกแบบจึงมีความสำคัญ เพื่อไม่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มีค่าสูงเกินไปหรือความถี่ตัดผิดเพี้ยนไปจากที่กำหนดไว้

การคำนวณสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม เริ่มจากการกำหนดค่าความถี่ตัดโหมดผลรวมและเลือกตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (C_Y) โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ควรเป็นตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) มีค่าไม่เกิน 3.3 นาโนฟารัด จากนั้นคำนวณหา ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (L_C) ตามสมการที่ 2.8

$$L_{CM} = \left(\frac{1}{2\pi f_{R,CM}} \right)^2 \times \frac{1}{2C_Y} \tag{2.8}$$

- โดยที่ $f_{R,CM}$ คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม
- L_{CM} คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม
- C_Y คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม

ต่อมามีค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (L_C) ไปหาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage}$) ทั้งจากการวัดค่าและการคำนวณ สำหรับการคำนวณสามารถ

ประมาณค่าได้ โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหล ($L_{leakage}$) มีค่าประมาณ 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (L_C) (โดยทั่วไปใช้ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์) [36-37]

ต่อมาหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง โดยกำหนดค่าความถี่ตัดโหมดผลต่างและเลือกค่าความเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_X) แล้วคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) ตามสมการที่ 2.9

$$L_D = \left(\frac{1}{2\pi f_{R,DM}} \right)^2 \times \frac{1}{C_X} \quad (2.9)$$

โดยที่ $f_{R,DM}$ คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง
 L_D คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง
 C_X คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ต้องพันเพิ่ม เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage,CM}$) เป็นส่วนหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องพันเพิ่มคือผลต่างระหว่างค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) และค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage,CM}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$L_{DM} = \frac{L_D - L_{leakage}}{2} \quad (2.10)$$

โดยที่ L_{DM} คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่ต้องพันเพิ่ม

ในท้ายที่สุดเพื่อให้ตัวเก็บประจุโหมดผลต่างคายประจุได้และทำงานได้ดีขึ้น วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบางตัวจึงได้ติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง โดยค่าตัวต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$R = \frac{1}{2.21C_X} \quad (2.11)$$

โดยที่ R คือ ค่าตัวต้านทานที่ติดตั้งขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง
 C_X คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง

2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) [25-26]

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละตัวมีคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาประกอบ รวมทั้งชนิดของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปแบบการประกอบ ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) เป็นค่าคุณลักษณะที่สามารถบอกได้ว่าการลดทอนสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ของวงจรกรองสัญญาณนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร

ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก เป็นค่าที่เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณและหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณหาได้จากสมการที่ 2.12-2.14 มีหน่วยเป็น เดซิเบล แต่เพื่อให้การวัดผลง่ายขึ้น จึงใช้ค่าแรงดันเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ 2.14

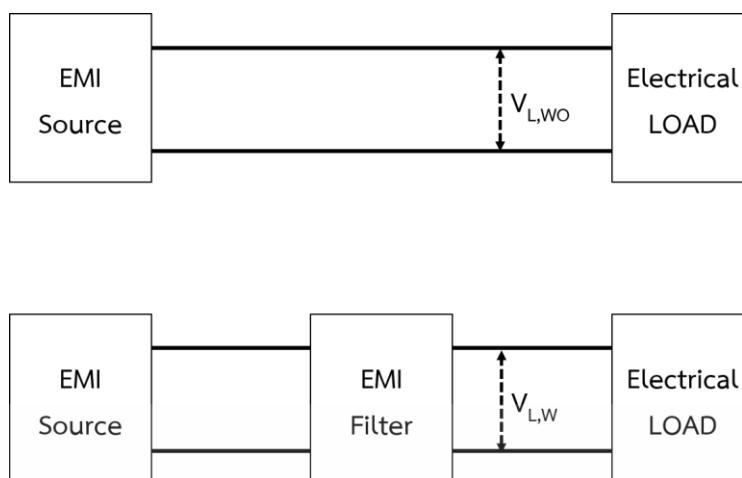
$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{L,wo}}{P_{L,w}} \right) \quad (2.12)$$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}^2/R_L}{V_{L,w}^2/R_L} \right) \quad (2.13)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}}{V_{L,w}} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่ IL_{dB} คือ ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)
 $P_{L,wo}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ
 $P_{L,w}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ
 $V_{L,wo}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ
 $V_{L,w}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

จากรูปที่ 2.12 เป็นตัวอย่างการวัดสัญญาณแรงดันก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ($V_{L,wo}$) และสัญญาณแรงดันหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ($V_{L,w}$) เพื่อทำการหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ 2.14



รูปที่ 2.12 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

2.5 องค์ประกอบแฝง

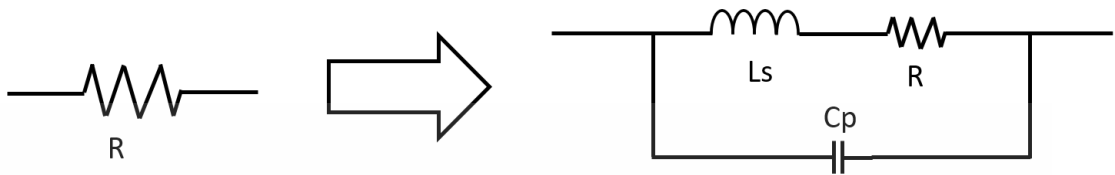
ตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติร่วมกัน กล่าวคือ ตัวต้านทานไม่ได้มีเพียงแต่ค่าความต้านทานเท่านั้น แต่จะมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำแฝงอยู่ด้วย ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็เช่นกัน ที่ความถี่สูงคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งหมดล้วนเกิดขึ้นจากองค์ประกอบแฝงที่อยู่ในอุปกรณ์นั้น โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดองค์ประกอบแฝง อาทิเช่น ขาของอุปกรณ์ในวงจรที่ยาวเกินไปอาจทำให้เกิดความต้านทานและความเหนี่ยวนำได้ และการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำอาจทำให้เกิดความเก็บประจุระหว่างขดลวดได้

2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

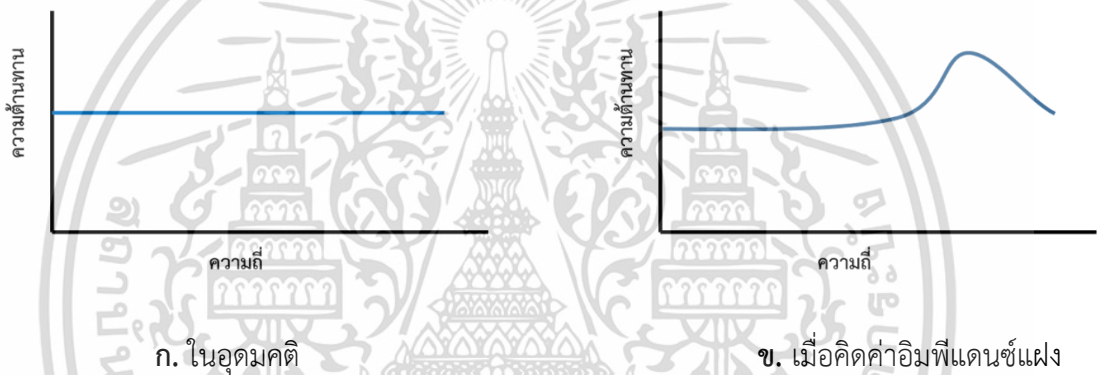
ตัวต้านทาน เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance: L_s) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) ขึ้น ดังรูปที่ 2.13 โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝงนี้เกิดจากความยาวขาของตัวต้านทาน ยิ่งขาของตัวต้านทานยาวจะส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำแฝงสูง และค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดการถ่ายเทประจุความถี่สูงที่ขาทั้งสองของตัวต้านทาน ยิ่งขาของตัวต้านทานยาวจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงก็จะสูงตามไปด้วย ในรูปที่ 2.14 แสดงขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ 2.15 แต่ตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ 2.16 และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานในทางอุดมคติเปรียบเทียบกับกรณีมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติแล้วจะได้ดังรูปที่ 2.14

ตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = R$ (2.15)

ตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R + j2\pi f L_s} + j2\pi f C_p}$ (2.16)



รูปที่ 2.13 ตัวต้านทานไฟฟ้าในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



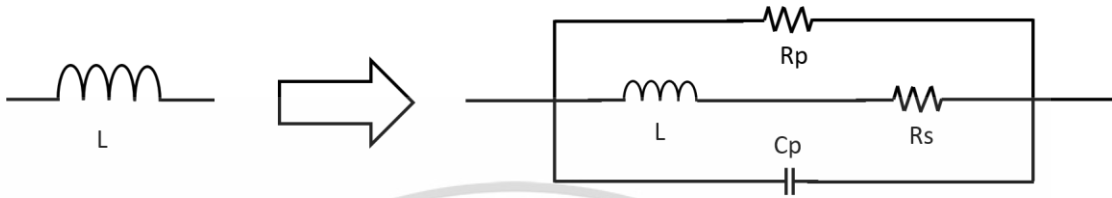
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า

2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

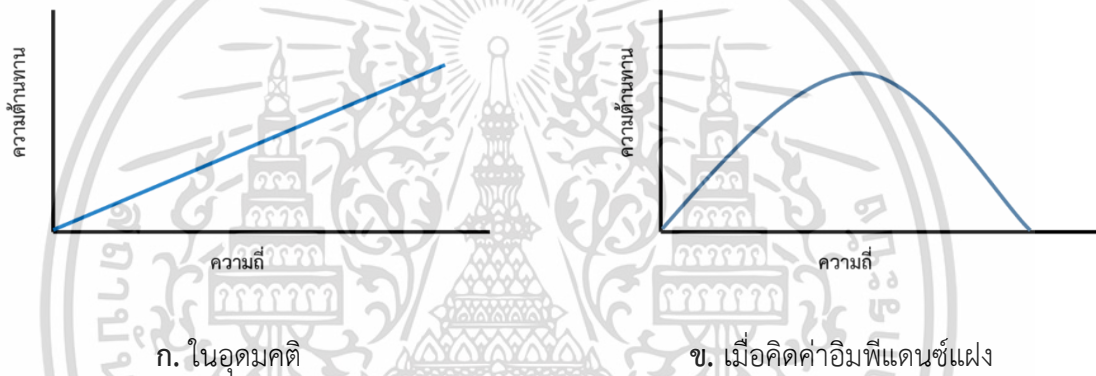
ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อนำมาใช้ที่ความถี่สูงองค์ประกอบแฝงประกอบด้วย ค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p, R_s) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) โดยเป็นผลขององค์ประกอบแฝงมาจากช่องว่างระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำทำตัวเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวด ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p, R_s) เป็นผลของความต้านทานเนื่องจากความยาวของลวดตัวนำของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นเทคนิคและรูปแบบการพันจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับลดค่าองค์ประกอบแฝงดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.15 - 2.16 และสมการที่ 2.17 - 2.18

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL$ (2.17)

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_s + j2\pi fL} + \frac{1}{R_p} + j2\pi fC_p}$ (2.18)



รูปที่ 2.15 ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



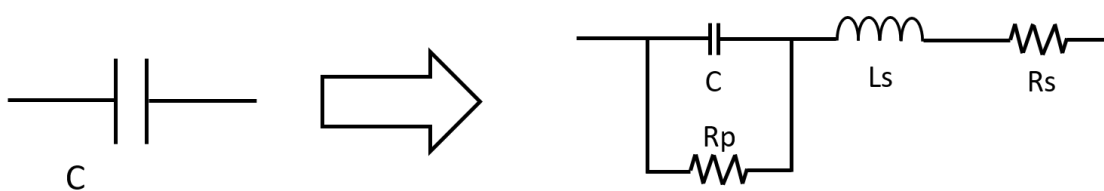
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.5.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

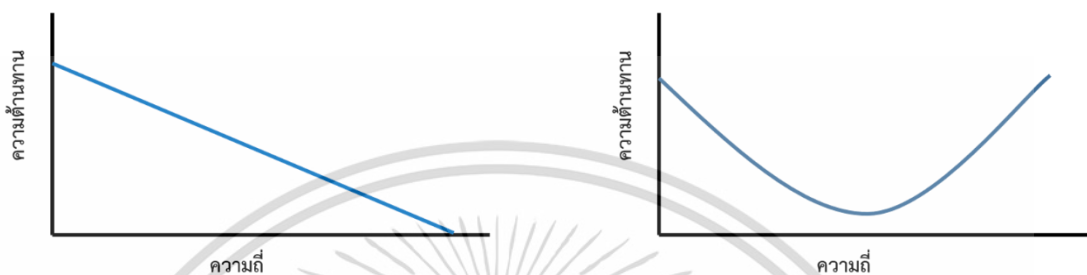
ตัวเก็บประจุไฟฟ้า จะมีองค์ประกอบพารามิเตอร์แฝงคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p, R_s) และมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance: L_s) ซึ่งเกิดจากขาของตัวเก็บประจุที่ยาวเกินไป เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าองค์ประกอบแฝงและอิมพีแดนซ์ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.17 - 2.18 และสมการที่ 2.19 - 2.20

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC}$ (2.19)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC + \frac{1}{R_p}} + j2\pi fL_s + R_s$ (2.20)



รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



ก. ในอุดมคติ

ข. เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ

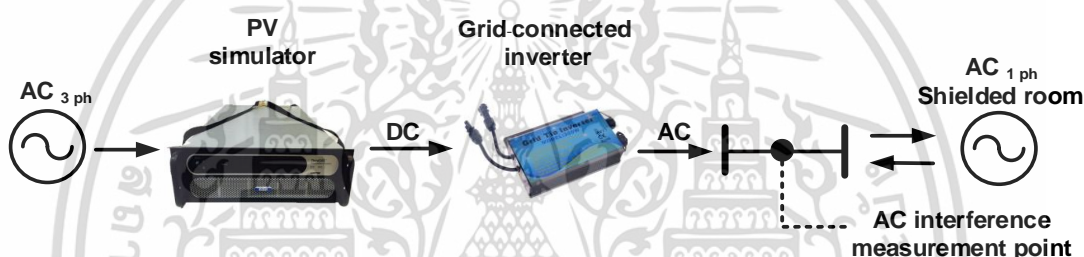
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ออกแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ เป็นการจำลองระบบจากระบบจริง โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator) แทนเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะรับไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จากห้องปฏิบัติการแล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยหลักการทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะถูกจ่ายไปยังอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จ่ายให้กับการไฟฟ้าและภาระไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator) สามารถตั้งค่าได้ 2 หัวข้อหลัก หัวข้อแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง สามารถเลือกรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีในขายทั่วไปตามคุณสมบัติของแต่ละยี่ห้อได้จากโปรแกรม หรือกำหนดรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นใหม่ก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2-3.3 โดยจะทำการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด กระแสไฟฟ้ลัดวงจร กระแสไฟฟ้าสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ และค่าแก้ไขความเข้มแสง ซึ่งค่าเหล่านี้ควรตั้งให้ใกล้เคียงกับความต้องการของระบบที่กำหนด หัวข้อที่สองคือสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเลือกจากโปรแกรมหรือกำหนดขึ้นเองก็ได้ดังรูปที่ 3.4

Add Curve (SNL)

Curve parameters

Voc 50.000 V Isc 5.000 A

Vmp 44.721 V Imp 4.472 A

FF 0.80 Use fill factor

Temperature coefficients

β_v -0.360 %/°K β_p -0.500 %/°K

Irradiance correction

Voc 46.505 V E 200 W/m²

Name Curve 50V 5A

ADD

รูปที่ 3.2 การตั้งค่าเซลล์แสงอาทิตย์

Import data from SAM libraries

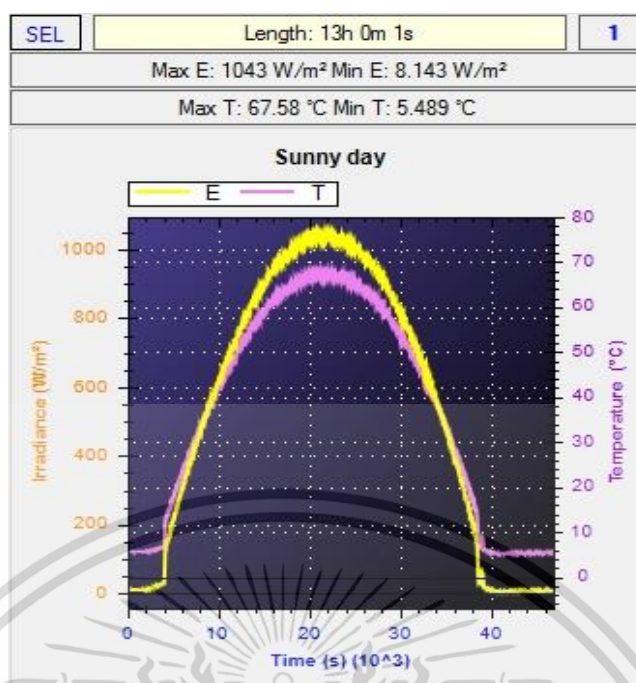
Showing: -- Keyword search Next match Prev match First match

Sandia modules : 513 entries	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	β [V/°C]
Advent Solar AS160 [2006]	42.83	5.56	32.41	5.03	-0.170
Advent Solar Ventura 210 [2008]	35.31	8.34	27.61	7.49	-0.133
Advent Solar Ventura 215 [2009]	35.92	8.49	27.92	7.74	-0.135
Aleo S03 160 [2007 (E)]	43.50	5.10	35.60	4.65	-0.152
Aleo S03 165 [2007 (E)]	43.60	5.20	35.80	4.65	-0.152
Aleo S16 165 [2007 (E)]	30.00	7.90	23.30	7.08	-0.110
Aleo S16 170 [2007 (E)]	30.10	7.95	23.50	7.23	-0.110
Aleo S16 175 [2007 (E)]	30.20	8.10	23.70	7.38	-0.110
Aleo S16 180 [2007 (E)]	30.30	8.15	23.90	7.53	-0.110
Aleo S16 185 [2007 (E)]	30.50	8.20	24.10	7.67	-0.110
AstroPower AP-100 [2001]	20.99	7.07	16.07	6.19	-0.080
AstroPower AP-100 [2000 (E)]	20.10	7.20	16.10	6.20	-0.084
AstroPower AP-110 [2001]	21.45	6.99	17.03	6.11	-0.085
AstroPower AP-110 [1999 (E)]	20.70	7.50	16.70	6.60	-0.084
AstroPower AP-120 [2001]	21.52	7.32	16.82	6.52	-0.085

Available databases TerraSAS: 2014.1.14 Sandia Labs modules CEC modules

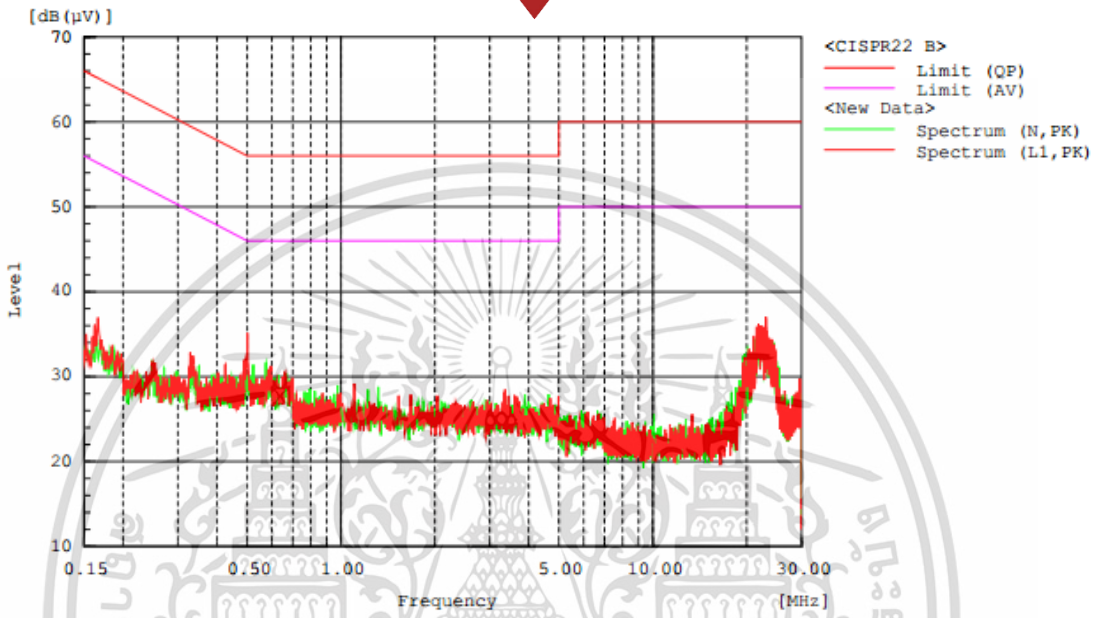
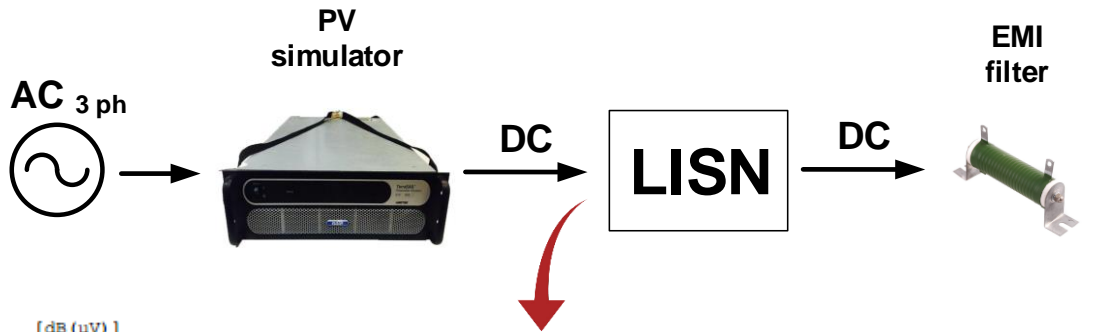
รูปที่ 3.3 การเลือกเซลล์แสงอาทิตย์จากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การตั้งค่าสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบ อุณหภูมิ และความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ให้คงที่ เนื่องจากการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการวัด จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าต่าง ๆ ให้คงที่ เพื่อความแม่นยำในการวัด เมื่อทำการตั้งค่าเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ได้ทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ทั้งฝั่งขาเข้าและขาออกของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (input and output of PV simulator) พบว่าสัญญาณรบกวนของเครื่องทั้งสองฝั่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำฝั่งขาเข้าเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ทำการวัดผ่านตัววัด (LISN) ผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนฝั่งขาเข้ามีผลต่อสัญญาณรบกวนฝั่งขาออกน้อยมาก และผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำฝั่งขาออกเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ทำการวัดผ่านตัววัด (LISN) และใช้ตัวต้านทานเป็นภาระไฟฟ้าดังในรูปที่ 3.5 สัญญาณนี้เป็นกรณีพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากระแสตรงของการทดลองนี้ เนื่องจากเป็นสัญญาณขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ และพบว่าสัญญาณดังกล่าวมีค่าต่ำมาก แต่จะมีการกระเพื่อมของสัญญาณเล็กน้อยที่ความถี่ประมาณ 2 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.5 วิธีการวัดและผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของไฟฟ้ากระแสตรงฝั่งขาออกของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ขาเข้าอินเวอร์เตอร์)

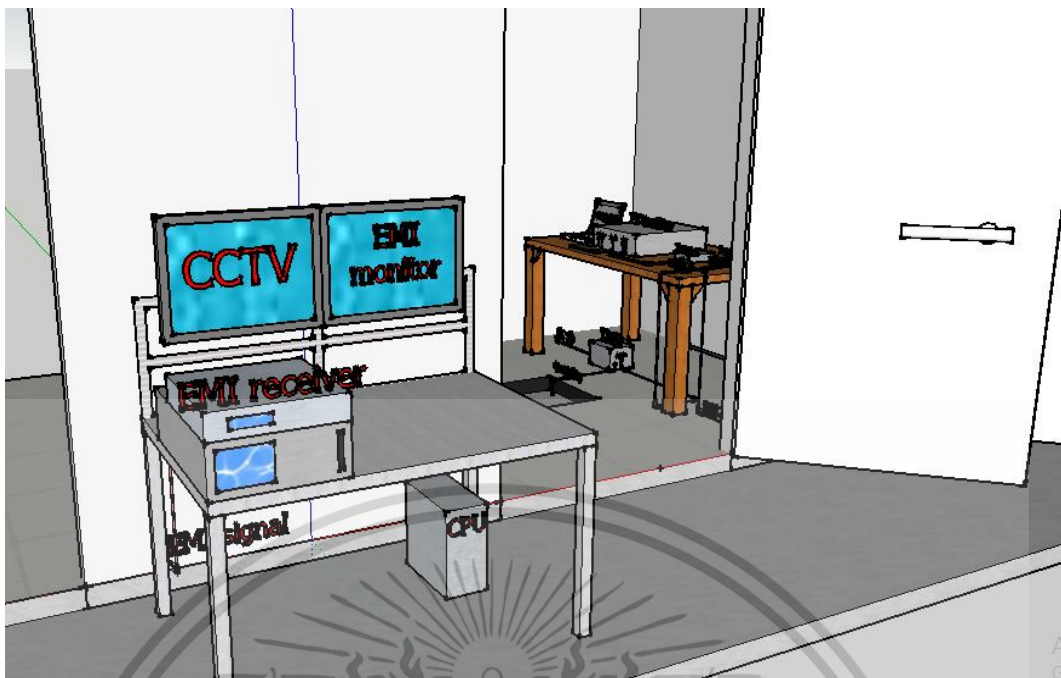
3.1.2 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เป็นห้องที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกอย่างสมบูรณ์ทั้งทางผนังห้องที่มีการปิดด้วยแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนทางอากาศ การต่อลงดินของอุปกรณ์และตัวห้องที่ทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินต่ำมาก และในระบบไฟฟ้ามีการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนจากระบบไฟฟ้าภายนอกห้องไม่ให้เข้าไปในห้องทดสอบอีกด้วย ดังนั้นทำให้ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้มีความเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูงอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.6

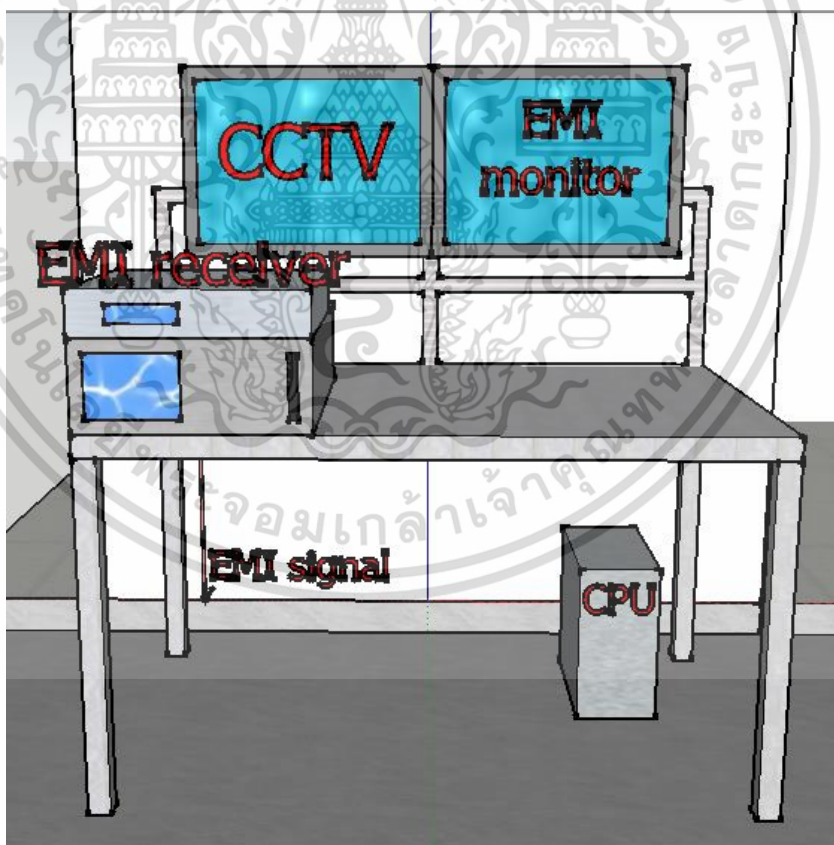


ก. ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

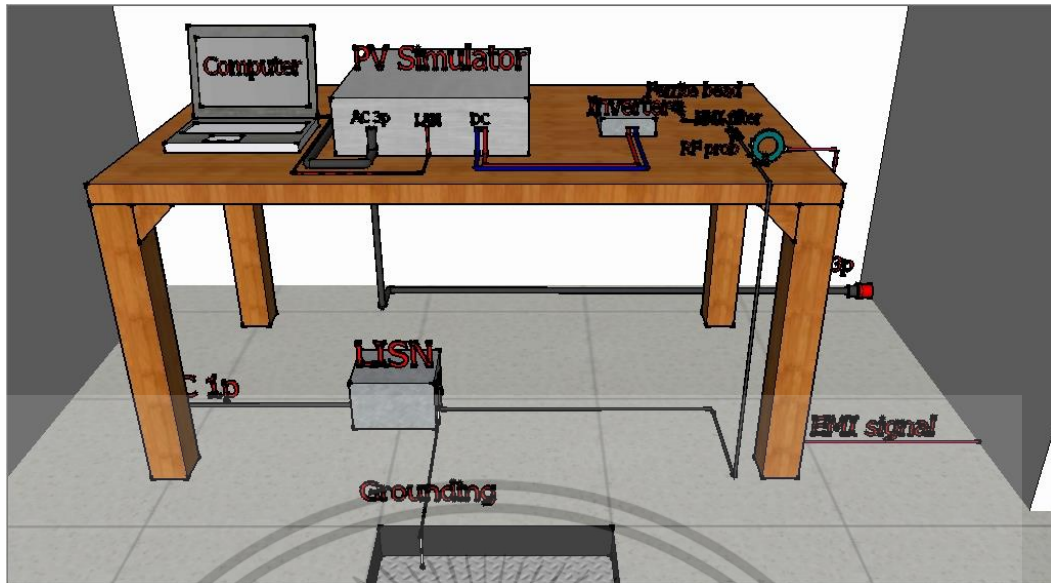


ข. ภาพจำลองห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

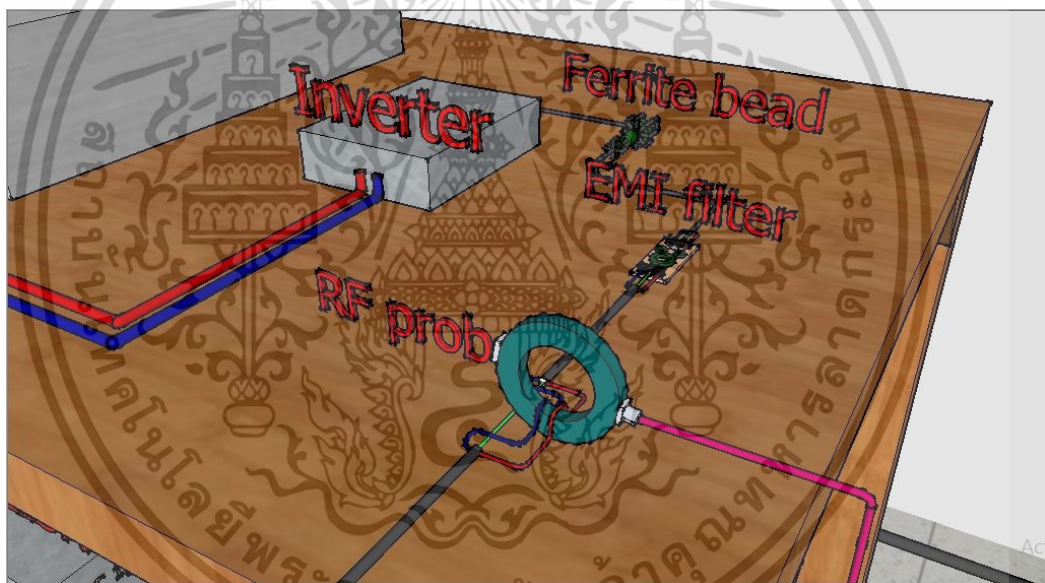


ค. ภาพจำลองเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



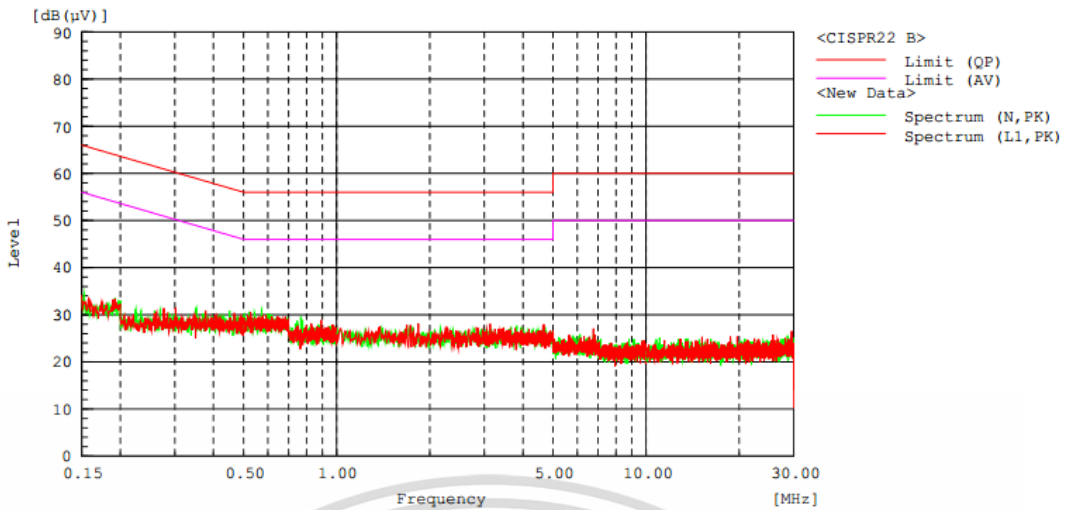
ง. ภาพจำลองระบบชุดทดลองที่ศึกษา



จ. ภาพจำลองอุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 3.6 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Shielded room)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

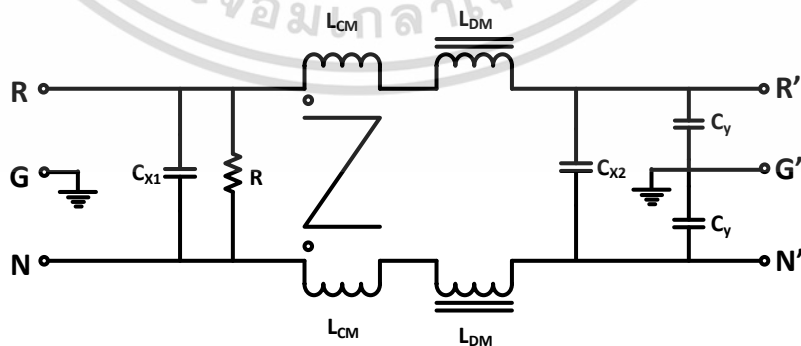


รูปที่ 3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสของห้องทดสอบ

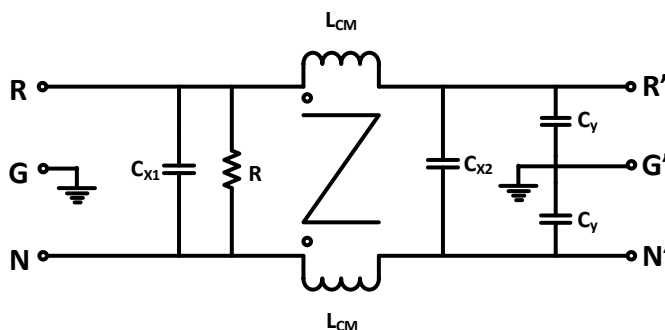
3.2 ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ

ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมี 3 วิธีหลักในการลดทอน ได้แก่ การติดตั้งระบบกราวด์ การใช้เฟอร์ไรท์บีท และการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน ในแต่ละวิธีล้วนแล้วแต่มีความจำเป็นต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น แต่จะให้ได้ผลในช่วงความถี่ใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่นำมาใช้และรูปแบบวงจร

สำหรับการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน เป็นอุปกรณ์หลักที่นิยมใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เนื่องจากสามารถชั่งวงจรกรองสำเร็จรูปมาใช้ได้ แต่วงจรกรองสำเร็จรูปเหล่านี้มีราคาแพงและอาจไม่สามารถกรองได้ตรงกับช่วงความถี่ที่ต้องการกรอง ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์นั้น ๆ จึงมีความสำคัญมาก รูปแบบวงจรกรองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 2 รูปแบบดังแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 3.8



ก. วงจรแบบมีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง



ข. วงจรแบบไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมตผลต่าง

รูปที่ 3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง สัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมจะถูกลดทอนด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมตผลร่วมและตัวเก็บประจุโหมตผลร่วม ส่วนสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างจะถูกลดทอนด้วย ตัวเหนี่ยวนำโหมตผลต่าง ตัวเหนี่ยวนำแฝงของตัวเหนี่ยวนำโหมตผลร่วม และตัวเก็บประจุโหมตผลต่าง

ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.9 เพื่อให้ได้ตัวกรองสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ เริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในสายไลน์และสายนิวตรอนเทียบกับมาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออก CISPR 14-1 เพื่อตรวจสอบอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีค่าสัญญาณรบกวนเกินกว่ามาตรฐานกำหนดหรือไม่ นอกจากนี้สาเหตุที่เลือกมาตรฐาน CISPR 14-1 เนื่องจากสัญญาณที่สนใจเป็นสัญญาณไฟฟ้า กระแสสลับที่ส่งออกจากอินเวอร์เตอร์ไปยังภาระไฟฟ้าและการไฟฟ้า และอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอาคารที่อยู่อาศัย มาตรฐานนี้จึงเป็นมาตรฐานเดียวที่ตรงตามคุณสมบัติที่กล่าวมา หลังจากวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแล้ว พบว่าสัญญาณนั้นเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงทำการวัดสัญญาณรบกวนแยกโหมตเป็นโหมตผลร่วมและโหมตผลต่าง เพื่อวิเคราะห์สัญญาณและใช้ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนต่อไป ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนนั้นจะเริ่มจากการหาความถี่ตัดที่เหมาะสมของสัญญาณแต่ละตัว โดยแต่ละโหมตอาจมีความถี่ตัดที่ตรงกันหรือต่างกันก็ได้ขึ้นกับคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนและความเหมาะสม เมื่อได้ความถี่ตัดที่เหมาะสมแล้วนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์แต่ละโหมตโดยเริ่มจากโหมตผลร่วมก่อน เริ่มจากการเลือกตัวเก็บประจุโหมตผลร่วม โดยพิจารณาจากมาตรฐาน IEC 380 ที่ว่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวเก็บ

ประจุโหมตผลรวมต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 มิลลิแอมป์ ดังนั้นในระบบแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุโหมตผลรวมที่มีค่าน้อยกว่า 35.81 นาโนฟารัด ดังสมการที่ 2.5 - 2.7 แล้วคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำโหมตผลรวมตามสมการที่ 2.8 ต่อมาการหาค่าพารามิเตอร์โหมตผลต่าง เริ่มจากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมตผลรวม โดยมีค่าประมาณ 0.5 - 2 เพอร์เซ็นต์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมตผลรวม และเลือกค่าตัวเก็บประจุโหมตผลต่างจากความถี่ตัดโหมตผลต่างที่กำหนดไว้ แล้วคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโหมตผลต่าง จากนั้นนำค่าความเหนี่ยวนำโหมตผลต่างหักลบกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมตผลรวมแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปเป็นค่าตัวเหนี่ยวนำโหมตผลต่างที่แท้จริงที่ใช้สำหรับการพันตัวเหนี่ยวนำโหมตผลต่าง และสุดท้ายเพื่อให้ตัวเก็บประจุโหมตผลต่างคายประจุได้และทำงานได้ดีขึ้น วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบางตัวจึงติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมตผลต่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักที่นิยมใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เนื่องจากสามารถลดทอนสัญญาณได้อย่างเห็นผล การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนครั้งนี้ได้ทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณ 7 แบบ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ประกอบด้วย ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ประมาณได้จากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลรวม ค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง ค่าตัวต้านทาน และค่าความถี่ตัดของตัวกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

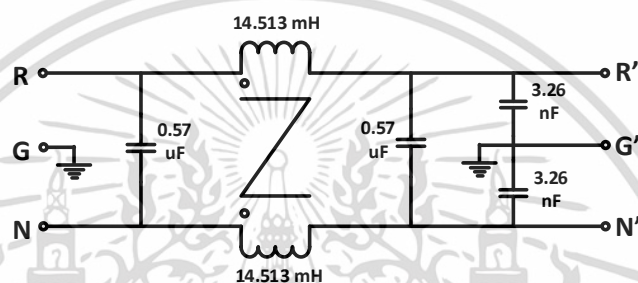
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ประกอบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

No.	1	2	3	4	5	6	7
$f_{R,CM}$ (Hz)	16,370	30,754	17,023	33,415	30,744	27,822	15,385
$f_{R,DM}$ (Hz)	14,245	35,673	9,346	23,859	15,993	12,722	23,220
L_{CM} (mH)	14.513	6.038	17.224	3.420	6.040	3.470	5.200
$L_{leakege}$ (μ H)	218	90.6	258	50.13	90.6	50.21	78
L_{DM} (μ H)	0	0	179.61	74.67	180	52.31	60.60
C_X (μ F)	0.57	0.22	0.47	0.22	0.22	1	0.22
C_Y (nF)	3.26	2.22	2.54	3.32	2.22	4.72	10.3
R (MOhm)	0	1	0	1	1	0.333	1

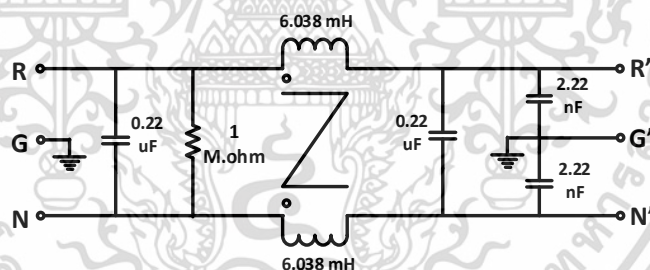
จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 7 แบบ โดยแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีโครงสร้างที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างเหมือนกัน เนื่องจากใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมในการคำนวณวงจรกรองโหมดผลต่างแทน แบบที่ 1 ใช้ความถี่ตัดที่ประมาณ 15,000 เฮิรตซ์ ส่วนแบบที่ 2 จะใช้ความถี่ตัดที่ประมาณ 30,000 เฮิรตซ์ แต่ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ค่าความเก็บประจุโหมดผลรวม และค่าความเก็บประจุโหมดผลต่าง จะลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของแบบที่ 1 ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 3.10 – 3.11

สำหรับแบบที่ 3 – 7 เป็นวงจรกรองแบบที่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง แบบที่ 3 จะมีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงแบบที่ 1 แต่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง แบบที่ 5 จะมีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงแบบที่ 2 แต่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ส่วนแบบที่ 4 จะเหมือนแบบที่ 5 แต่ค่าความเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างจะลดลงครึ่งหนึ่ง แบบที่ 6 และ 7 เหมือนแบบที่ 4 และ 5 แต่มีการเพิ่มความเก็บประจุสูงขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 3.12 – 3.16

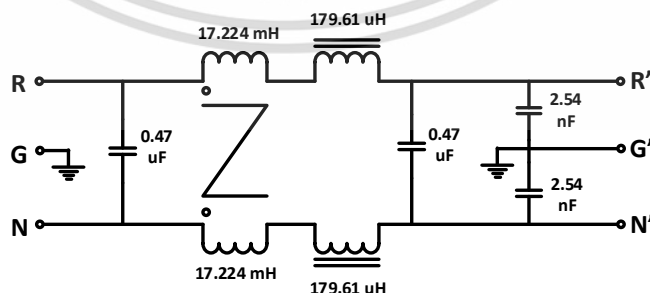
ในส่วนตัวเก็บประจุโหมดผลต่างใช้ตัวเก็บประจุคลาส X2 ตัวเก็บประจุโหมดผลรวมใช้ตัวเก็บประจุคลาส X1/Y1 ตามมาตรฐานไออีซี 60384-14 นอกจากนี้ยังติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่างในบางวงจร เพื่อให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุได้ดีขึ้น



รูปที่ 3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 1

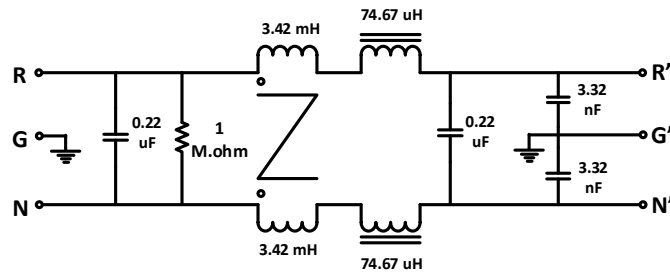


รูปที่ 3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 2

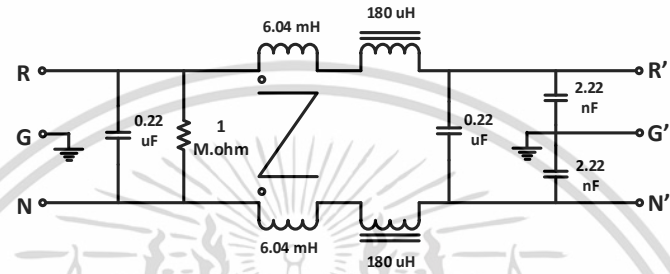


รูปที่ 3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 3

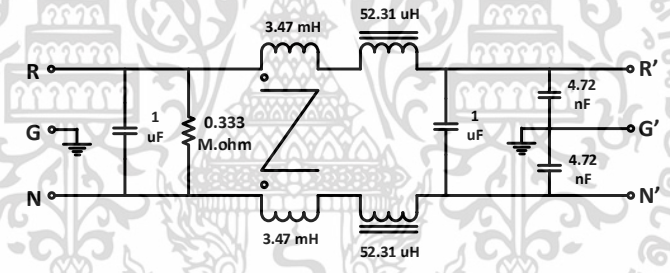
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



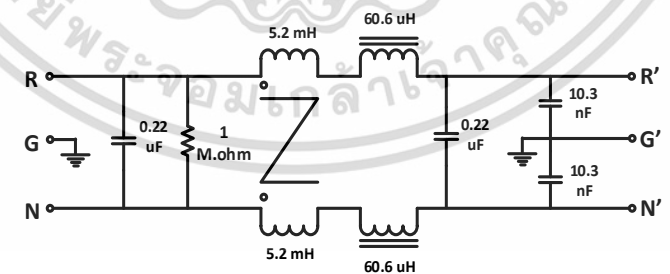
รูปที่ 3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 4



รูปที่ 3.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 5



รูปที่ 3.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 6



รูปที่ 3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ขนาดตัวกรองเทียบกับอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

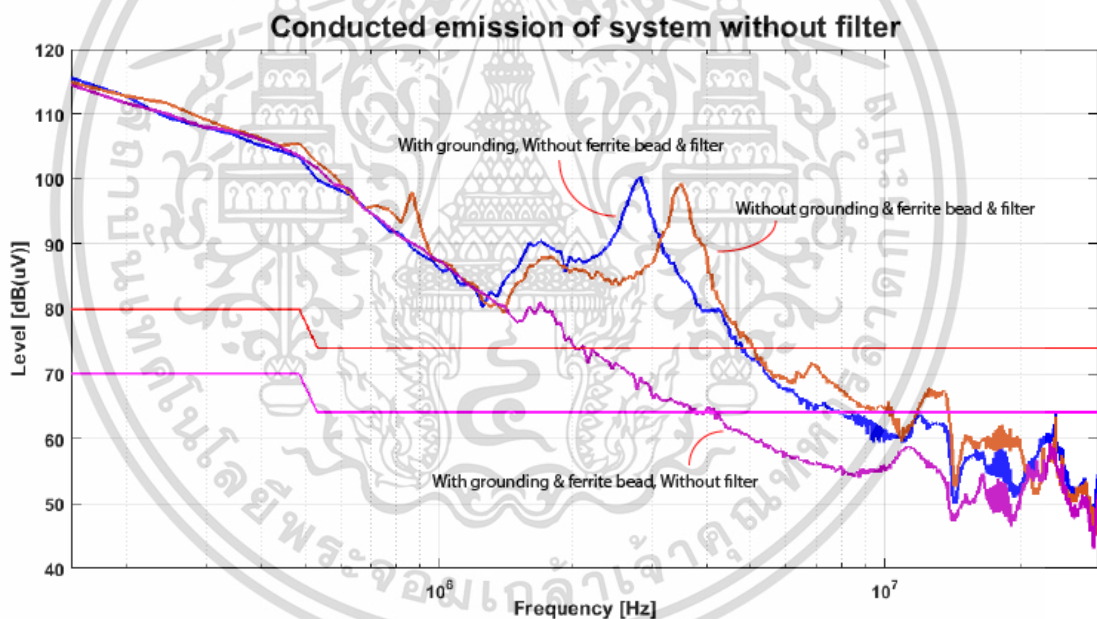
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเน้นที่อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการสวิตชิง ซึ่งส่งผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนความถี่สูง และสัญญาณดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ในระบบที่เชื่อมต่อกันทางสายตัวนำด้วย สำหรับระบบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า เช่น การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใช้งานในอาคารบ้านพักอาศัย หรือการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อส่งขายการไฟฟ้า เป็นต้น ไฟฟ้าเหล่านี้เมื่อผลิตแล้วจะถูกส่งไปยังภาระไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันทางสายตัวนำ ทำให้สัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากระบบการผลิตไฟฟ้าก็ถูกส่งไปยังภาระไฟฟ้าด้วย ดังนั้นการลดทอนสัญญาณรบกวนให้มีค่าต่ำ ก่อนส่งไฟฟ้าไปยังภาระไฟฟ้าจึงมีความสำคัญมาก เพราะมีผลต่อการลดความเสียหายที่อาจเกิดจากสัญญาณรบกวน และเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบอีกด้วย ปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ชัดเจน จะมีเพียงข้อกำหนดเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคารที่พักอาศัย หรือข้อกำหนดเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทางด้านอุตสาหกรรม ทำให้ไม่สามารถหามาตรฐานมากำหนดอินเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม อินเวอร์เตอร์ก็ถือเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในอาคารชนิดหนึ่ง และอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก 300 วัตต์ จึงใช้ข้อกำหนดเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคารที่พักอาศัยมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบ

สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนเซลล์แสงอาทิตย์จริง เนื่องจากการทดสอบจะดำเนินการในห้องทดสอบที่เป็นระบบปิดและใช้เวลานานในการวัด การใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้ทดสอบและสามารถให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่คงที่และเหมือนกันในทุกกรณี นอกจากนี้มีการวัดสัญญาณรบกวนของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์และสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับของห้องทดสอบด้วย พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและมีผลกระทบต่อผลการทดสอบน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.7 ในการทดสอบนี้ทำการวัดสัญญาณรบกวนขาออกจากอินเวอร์เตอร์ โดยวัดระหว่างอินเวอร์เตอร์และการไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดที่มีการ

เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ อันจะทำให้สุ่มเสี่ยงที่สัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้

หลังจากวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของระบบแล้วตามรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 – 4.2 พบว่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวเกินค่ามาตรฐาน CISPR 14-1 ในช่วงความถี่ 0.15 – 1 เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบวงจรกรองเพื่อลดทอนสัญญาณดังกล่าวให้ลดลงมาอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐาน โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้การลดทอนสัญญาณทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ การต่อลงดิน การใช้ เฟอร์ไรต์ปิด และการใช้วงจรกรอง สำหรับการลงดินได้เชื่อมสายต่อลงดินและตัวเครื่องของอุปกรณ์ ทุกตัวเข้ากับระบบต่อลงดินของห้องทดสอบตั้งแต่ติดตั้งระบบทดสอบ จึงมั่นใจได้ว่าระบบต่อลงดินมี ความเสถียรและเชื่อถือได้ การใช้เฟอร์ไรต์ปิดพบกับสายตัวนำ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในความถี่ 2 – 20 เมกะเฮิรตซ์ ได้สูงสุด 30 เดซิเบล และการใช้วงจรกรองสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 0.15 – 20 เมกะเฮิรตซ์ ได้อย่างชัดเจน โดยในการทดลองได้ออกแบบวงจรกรองทั้งหมด 7 แบบ



รูปที่ 4.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อมีและไม่มีเฟอร์ไรต์ปิด

ตารางที่ 4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มี
เฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรอง

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μV)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μV)]	AV [dB(μV)]	
ไม่มีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรอง				
341346	106.9718	26.9718	36.9718	CISPR 14-1
484855	103.3466	23.3466	33.3466	CISPR 14-1
915384	88.2457	14.2457	24.2457	CISPR 14-1
1680769	90.5216	16.5216	26.5216	CISPR 14-1
2111298	87.1270	13.1270	23.1270	CISPR 14-1
2828846	100.3475	26.3475	36.3475	CISPR 14-1
3976923	79.7840	5.7840	15.7840	CISPR 14-1
5507692	69.4655	-4.5345	5.4655	CISPR 14-1
7325480	65.4939	-8.5061	1.4939	CISPR 14-1
8808413	63.4663	-10.5337	-0.5337	CISPR 14-1
10865384	59.5478	-14.4522	-4.4522	CISPR 14-1
12922355	62.5315	-11.4685	-1.4685	CISPR 14-1
14309615	50.8440	-23.1560	-13.1560	CISPR 14-1
16462259	57.0795	-16.9205	-6.9205	CISPR 14-1
17658173	57.9186	-16.0814	-6.0814	CISPR 14-1
19045432	51.8890	-22.1110	-12.1110	CISPR 14-1
23685576	60.1401	-13.8599	-3.8599	CISPR 14-1
29043269	46.7596	-27.2404	-17.2404	CISPR 14-1
30000000	54.5739	-19.4261	-9.4261	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมี
เฟอร์ไรต์ปิด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน

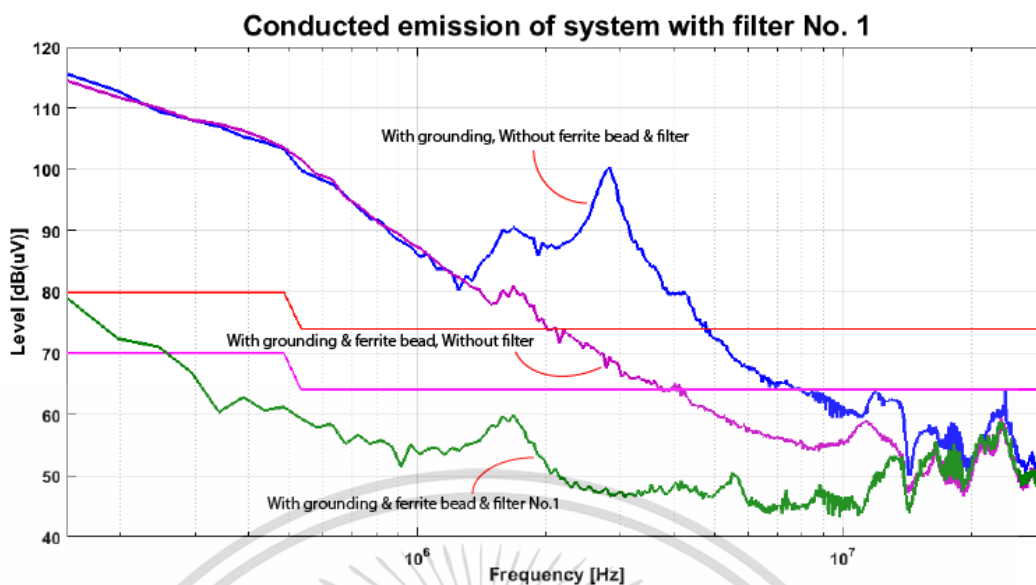
ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอร์ไรต์ปิด ไม่มีตัวกรอง				
341346	107.4015	27.4015	37.4015	CISPR 14-1
484855	103.5182	23.5182	33.5182	CISPR 14-1
915384	89.2216	15.2216	25.2216	CISPR 14-1
1680769	80.9775	6.9775	16.9775	CISPR 14-1
2111298	74.1861	0.1861	10.1861	CISPR 14-1
2828846	69.3793	-4.6207	5.3793	CISPR 14-1
3976923	64.4436	-9.5564	0.4436	CISPR 14-1
5507692	59.0563	-14.9437	-4.9437	CISPR 14-1
7325480	56.1905	-17.8095	-7.8095	CISPR 14-1
8808413	55.3899	-18.6101	-8.6101	CISPR 14-1
10865384	58.1099	-15.8901	-5.8901	CISPR 14-1
12922355	55.8955	-18.1045	-8.1045	CISPR 14-1
14309615	48.3043	-25.6957	-15.6957	CISPR 14-1
16462259	54.6597	-19.3403	-9.3403	CISPR 14-1
17658173	52.8316	-21.1684	-11.1684	CISPR 14-1
19045432	47.5630	-26.4370	-16.4370	CISPR 14-1
23685576	58.4980	-15.5020	-5.5020	CISPR 14-1
29043269	43.8068	-30.1932	-20.1932	CISPR 14-1
30000000	51.5948	-22.4052	-12.4052	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

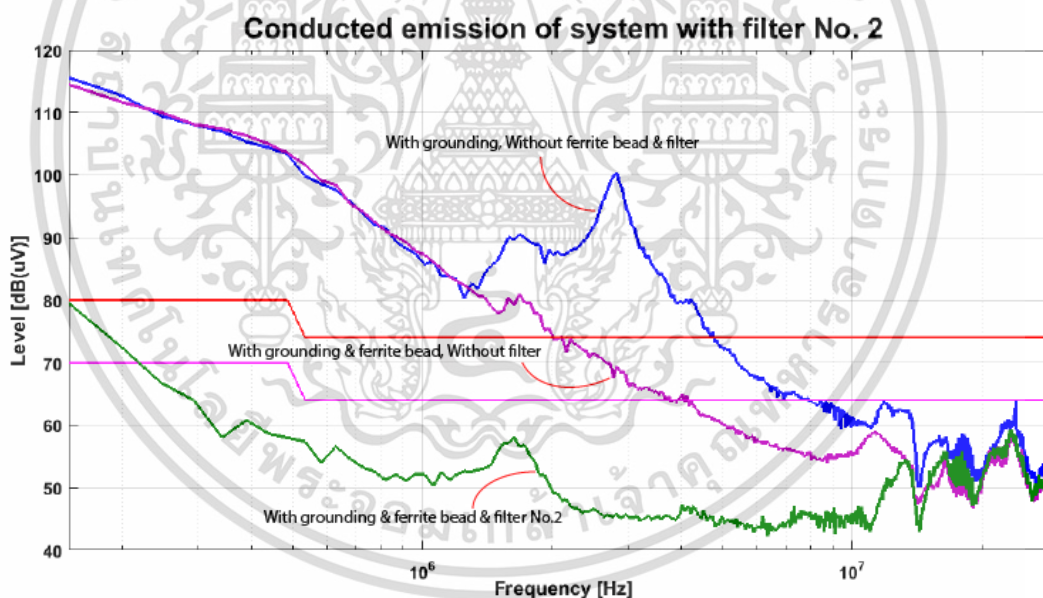
การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยวงจรกรอง

การใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ได้ทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนตามบทที่ 3 ซึ่งใช้ความถี่ตัดอยู่ในช่วง 15,000 – 40,000 เฮิรตซ์ โดยคาดหวังการลดทอนสัญญาณที่ความถี่ 0.15 – 1 เมกะเฮิรตซ์ การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนได้ออกแบบไว้ 2 รูปแบบหลัก ๆ สามารถแยกตามค่าพารามิเตอร์ได้ 7 วงจร แต่ละวงจรมีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบวงจรและค่าพารามิเตอร์ โดยแบบที่ 1 และ 2 เป็นวงจรกรองที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหลดผลต่าง เนื่องจากใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหลดผลรวมแทนค่าความเหนี่ยวนำโหลดผลต่าง ส่วนแบบที่ 3 – 7 เป็นวงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำโหลดผลต่าง แต่ในแบบที่ 6 และ 7 จะมีการเพิ่มขนาดของค่าตัวเก็บประจุโหลดผลรวมขึ้น เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการลดทอนสัญญาณรบกวน หาผลการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เหมาะสม รวมถึงศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธีการลดทอนรูปแบบต่าง ๆ ด้วย

สำหรับผลของตัวกรองที่มีต่อสัญญาณรบกวน เมื่อทำการลดทอนสัญญาณด้วยการต่อลงดินและเฟอร์ไรต์ปิดแล้ว พบว่ายังมีสัญญาณรบกวนเกินขีดจำกัดมาตรฐาน CISPR 14-1 ในช่วง 0.15 – 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยวงจรกรองทุกตัวสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 0.15 – 20 เมกะเฮิรตซ์ได้ แต่คุณภาพการลดทอนจะแตกต่างกันไปในแต่ละวงจร วงจรกรองหมายเลข 1 2 3 และ 6 ให้ผลการลดทอนใกล้เคียงกัน สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนผ่านมาตรฐาน CISPR 14-1 และลดทอนได้มากกว่า 40 เดซิเบลไมโครโวลต์ และหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากที่สุดดังรูปที่ 4.2 – 4.4 และ 4.7 วงจรกรองหมายเลข 4 5 และ 7 ให้ผลการลดทอนที่ไม่น่าพึงพอใจ เนื่องจากการลดทอนที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐาน CISPR 14-1 ในช่วง 0.15 – 3 เมกะเฮิรตซ์ แม้สัญญาณรบกวนช่วงอื่นจะผ่านมาตรฐาน แต่ก็ยังมีค่าสูง นอกจากนี้ตัวกรองหมายเลข 5 ส่งผลให้มีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นในช่วง 15 – 20 เมกะเฮิรตซ์ อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.6 และ 4.8

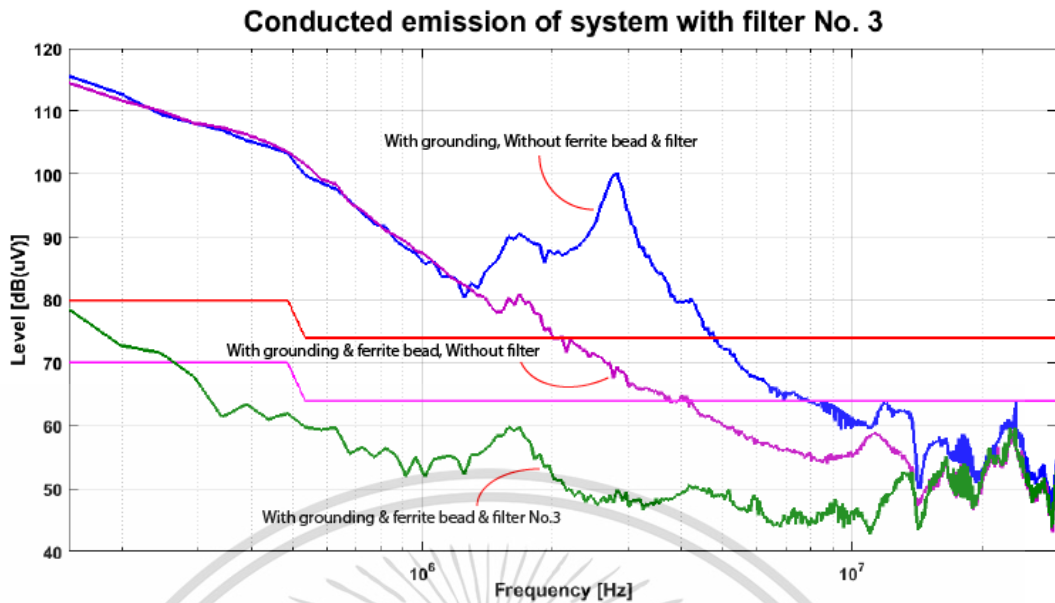


รูปที่ 4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1

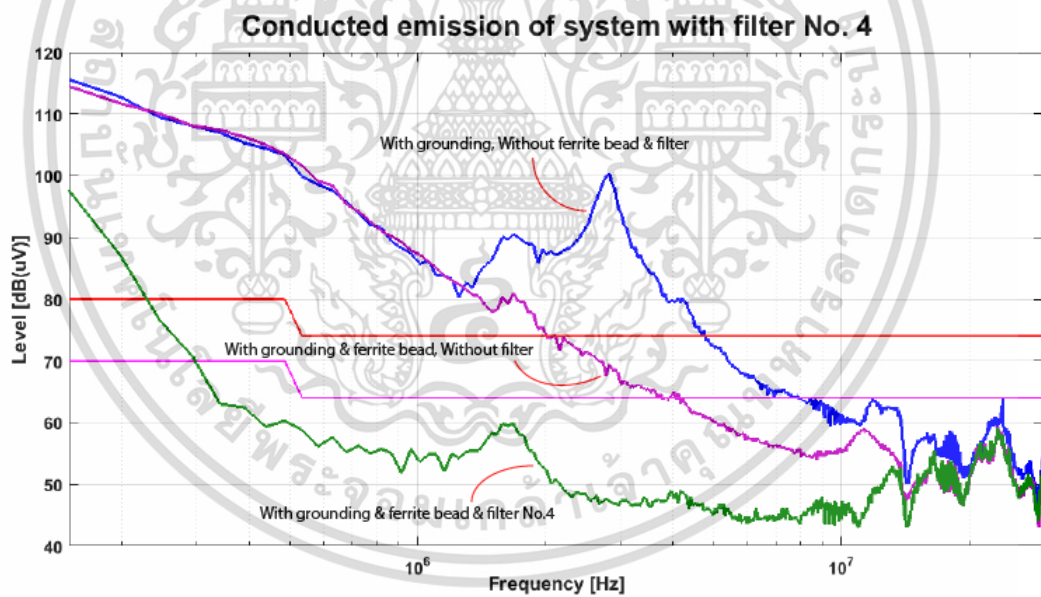


รูปที่ 4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

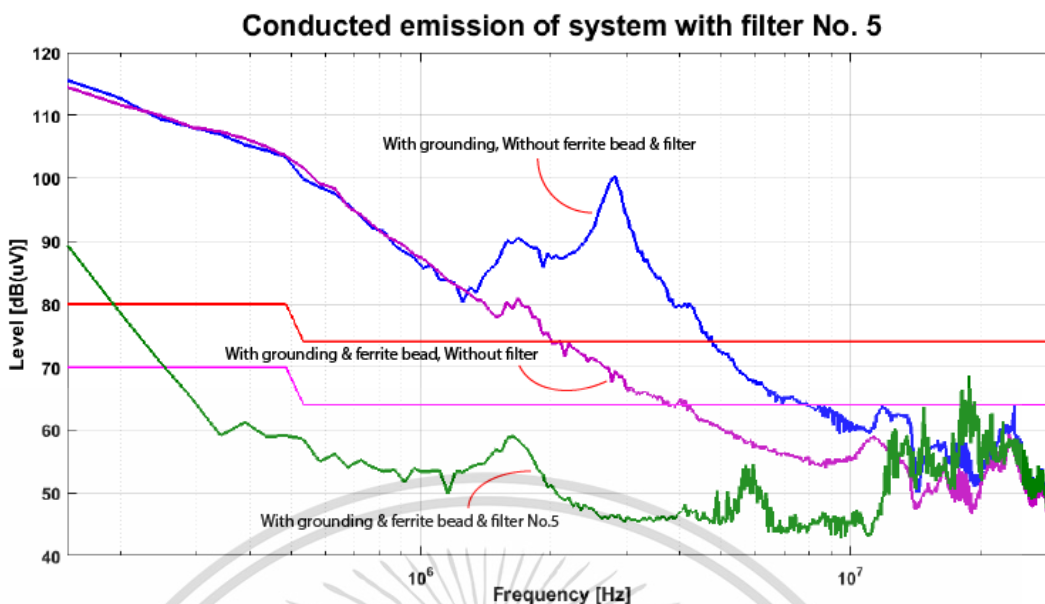


รูปที่ 4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3

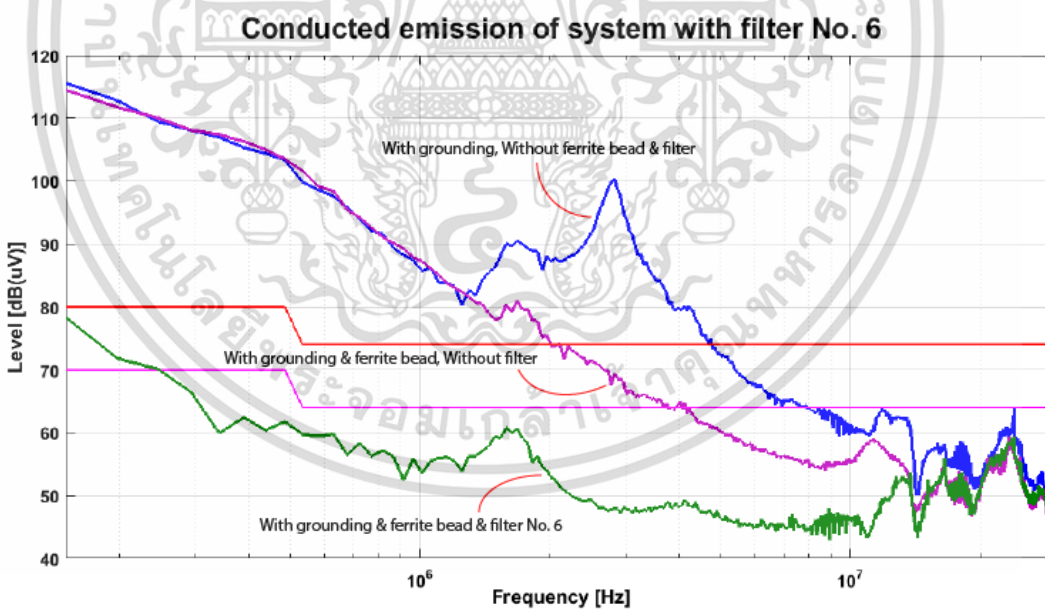


รูปที่ 4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

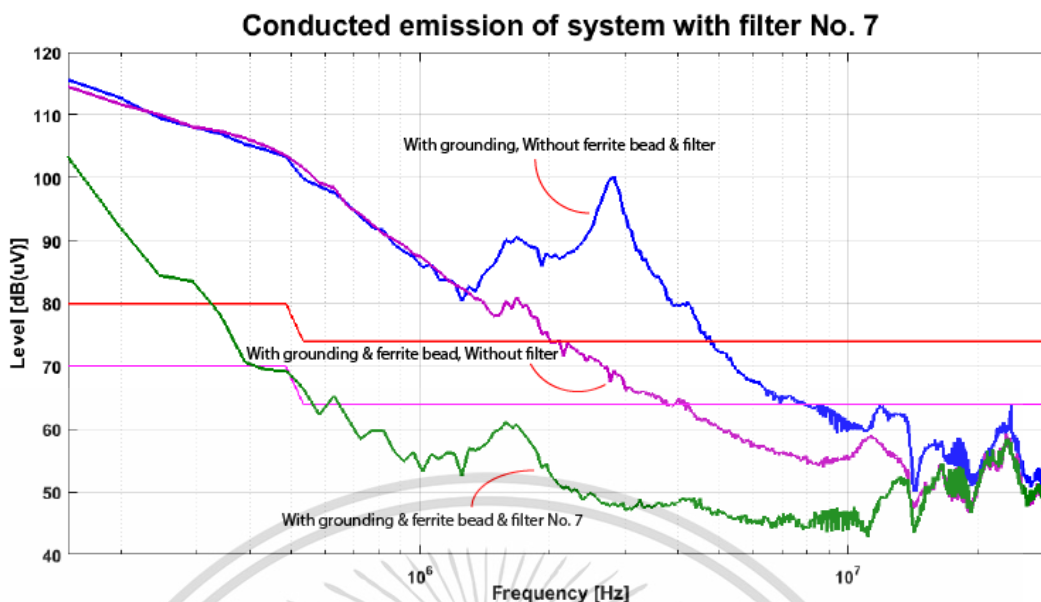


รูปที่ 4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5



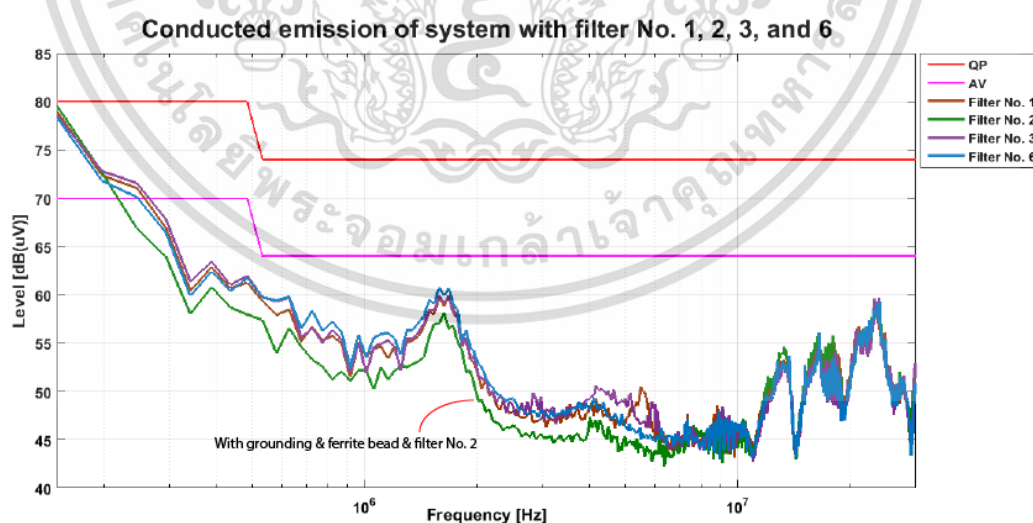
รูปที่ 4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
 ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7

เมื่อเปรียบเทียบผลการลดทอนสัญญาณรบกวนทั้ง 7 ตัวตามรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.5 – 4.11 พบว่าหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้ดีที่สุด แม้ว่าอุปกรณ์ในวงจรจะมีปริมาณน้อยสุด และไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง แต่ผลการทดลองก็แสดงให้เห็นว่าสามารถลดทอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.9 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อพันเฟอร์ไรต์ปิดและใส่ตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 1

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μV)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μV)]	AV [dB(μV)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 1				
341346	60.4189	-19.5811	-9.5811	CISPR 14-1
484855	61.2623	-18.7377	-8.7377	CISPR 14-1
915384	51.5164	-22.4836	-12.4836	CISPR 14-1
1680769	59.9328	-14.0672	-4.0672	CISPR 14-1
2111298	51.2343	-22.7657	-12.7657	CISPR 14-1
2828846	46.7867	-27.2133	-17.2133	CISPR 14-1
3976923	47.9263	-26.0737	-16.0737	CISPR 14-1
5507692	50.4842	-23.5158	-13.5158	CISPR 14-1
7325480	47.6185	-26.3815	-16.3815	CISPR 14-1
8808413	48.6056	-25.3944	-15.3944	CISPR 14-1
10865384	43.4882	-30.5118	-20.5118	CISPR 14-1
12922355	53.1367	-20.8633	-10.8633	CISPR 14-1
14309615	43.9808	-30.0192	-20.0192	CISPR 14-1
16462259	55.6710	-18.3290	-8.3290	CISPR 14-1
17658173	54.2348	-19.7652	-9.7652	CISPR 14-1
19045432	47.4909	-26.5091	-16.5091	CISPR 14-1
23685576	58.7327	-15.2673	-5.2673	CISPR 14-1
29043269	43.9388	-30.0612	-20.0612	CISPR 14-1
30000000	52.1983	-21.8017	-11.8017	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมี
เฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 2

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 2				
341346	58.0264	-21.9736	-11.9736	CISPR 14-1
484855	57.9532	-22.0468	-12.0468	CISPR 14-1
915384	51.0847	-22.9153	-12.9153	CISPR 14-1
1680769	56.5147	-17.4853	-7.4853	CISPR 14-1
2111298	47.9191	-26.0809	-16.0809	CISPR 14-1
2828846	45.9085	-28.0915	-18.0915	CISPR 14-1
3976923	45.9351	-28.0649	-18.0649	CISPR 14-1
5507692	44.2310	-29.7690	-19.7690	CISPR 14-1
7325480	47.1035	-26.8965	-16.8965	CISPR 14-1
8808413	46.0808	-27.9192	-17.9192	CISPR 14-1
10865384	43.4759	-30.5241	-20.5241	CISPR 14-1
12922355	54.0084	-19.9916	-9.9916	CISPR 14-1
14309615	43.0545	-30.9455	-20.9455	CISPR 14-1
16462259	55.2179	-18.7821	-8.7821	CISPR 14-1
17658173	54.8955	-19.1045	-9.1045	CISPR 14-1
19045432	47.6299	-26.3701	-16.3701	CISPR 14-1
23685576	57.9131	-16.0869	-6.0869	CISPR 14-1
29043269	45.5877	-28.4123	-18.4123	CISPR 14-1
30000000	52.3185	-21.6815	-11.6815	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 3

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μV)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μV)]	AV [dB(μV)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 3				
341346	61.3695	-18.6305	-8.6305	CISPR 14-1
484855	61.9637	-18.0363	-8.0363	CISPR 14-1
915384	51.9692	-22.0308	-12.0308	CISPR 14-1
1680769	59.7824	-14.2176	-4.2176	CISPR 14-1
2111298	51.2198	-22.7802	-12.7802	CISPR 14-1
2828846	49.8488	-24.1512	-14.1512	CISPR 14-1
3976923	49.1547	-24.8453	-14.8453	CISPR 14-1
5507692	46.6800	-27.3200	-17.3200	CISPR 14-1
7325480	46.9203	-27.0797	-17.0797	CISPR 14-1
8808413	45.8318	-28.1682	-18.1682	CISPR 14-1
10865384	43.7143	-30.2857	-20.2857	CISPR 14-1
12922355	51.2274	-22.7726	-12.7726	CISPR 14-1
14309615	43.8399	-30.1601	-20.1601	CISPR 14-1
16462259	54.3696	-19.6304	-9.6304	CISPR 14-1
17658173	53.0014	-20.9986	-10.9986	CISPR 14-1
19045432	46.9420	-27.0580	-17.0580	CISPR 14-1
23685576	58.4632	-15.5368	-5.5368	CISPR 14-1
29043269	44.3053	-29.6947	-19.6947	CISPR 14-1
30000000	52.9422	-21.0578	-11.0578	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 4

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 4				
341346	62.9779	-17.0221	-7.0221	CISPR 14-1
484855	60.2413	-19.7587	-9.7587	CISPR 14-1
915384	51.7992	-22.2008	-12.2008	CISPR 14-1
1680769	59.9344	-14.0656	-4.0656	CISPR 14-1
2111298	50.7693	-23.2307	-13.2307	CISPR 14-1
2828846	47.3699	-26.6301	-16.6301	CISPR 14-1
3976923	48.7232	-25.2768	-15.2768	CISPR 14-1
5507692	44.8012	-29.1988	-19.1988	CISPR 14-1
7325480	45.9758	-28.0242	-18.0242	CISPR 14-1
8808413	45.2683	-28.7317	-18.7317	CISPR 14-1
10865384	43.9003	-30.0997	-20.0997	CISPR 14-1
12922355	51.6130	-22.3870	-12.3870	CISPR 14-1
14309615	43.1105	-30.8895	-20.8895	CISPR 14-1
16462259	53.2257	-20.7743	-10.7743	CISPR 14-1
17658173	53.1896	-20.8104	-10.8104	CISPR 14-1
19045432	46.9758	-27.0242	-17.0242	CISPR 14-1
23685576	58.1143	-15.8857	-5.8857	CISPR 14-1
29043269	44.9548	-29.0452	-19.0452	CISPR 14-1
30000000	52.7782	-21.2218	-11.2218	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 5

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μV)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μV)]	AV [dB(μV)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 5				
341346	59.0941	-20.9059	-10.9059	CISPR 14-1
484855	59.1423	-20.8577	-10.8577	CISPR 14-1
915384	51.6508	-22.3492	-12.3492	CISPR 14-1
1680769	58.4054	-15.5946	-5.5946	CISPR 14-1
2111298	49.2032	-24.7968	-14.7968	CISPR 14-1
2828846	45.9882	-28.0118	-18.0118	CISPR 14-1
3976923	46.7137	-27.2863	-17.2863	CISPR 14-1
5507692	50.9240	-23.0760	-13.0760	CISPR 14-1
7325480	46.1486	-27.8514	-17.8514	CISPR 14-1
8808413	46.1467	-27.8533	-17.8533	CISPR 14-1
10865384	43.2185	-30.7815	-20.7815	CISPR 14-1
12922355	55.8401	-18.1599	-8.1599	CISPR 14-1
14309615	54.9742	-19.0258	-9.0258	CISPR 14-1
16462259	53.7512	-20.2488	-10.2488	CISPR 14-1
17658173	54.0698	-19.9302	-9.9302	CISPR 14-1
19045432	57.9415	-16.0585	-6.0585	CISPR 14-1
23685576	57.4751	-16.5249	-6.5249	CISPR 14-1
29043269	49.3915	-24.6085	-14.6085	CISPR 14-1
30000000	53.5546	-20.4454	-10.4454	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 6

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 6				
341346	59.8811	-20.1189	-10.1189	CISPR 14-1
484855	61.7371	-18.2629	-8.2629	CISPR 14-1
915384	52.4268	-21.5732	-11.5732	CISPR 14-1
1680769	60.6496	-13.3504	-3.3504	CISPR 14-1
2111298	51.4887	-22.5113	-12.5113	CISPR 14-1
2828846	47.9230	-26.0770	-16.0770	CISPR 14-1
3976923	48.2608	-25.7392	-15.7392	CISPR 14-1
5507692	45.0336	-28.9664	-18.9664	CISPR 14-1
7325480	47.1705	-26.8295	-16.8295	CISPR 14-1
8808413	47.0328	-26.9672	-16.9672	CISPR 14-1
10865384	43.6116	-30.3884	-20.3884	CISPR 14-1
12922355	52.3515	-21.6485	-11.6485	CISPR 14-1
14309615	43.2857	-30.7143	-20.7143	CISPR 14-1
16462259	53.7421	-20.2579	-10.2579	CISPR 14-1
17658173	52.3684	-21.6316	-11.6316	CISPR 14-1
19045432	47.0978	-26.9022	-16.9022	CISPR 14-1
23685576	59.1281	-14.8719	-4.8719	CISPR 14-1
29043269	45.1675	-28.8325	-18.8325	CISPR 14-1
30000000	50.7208	-23.2792	-13.2792	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

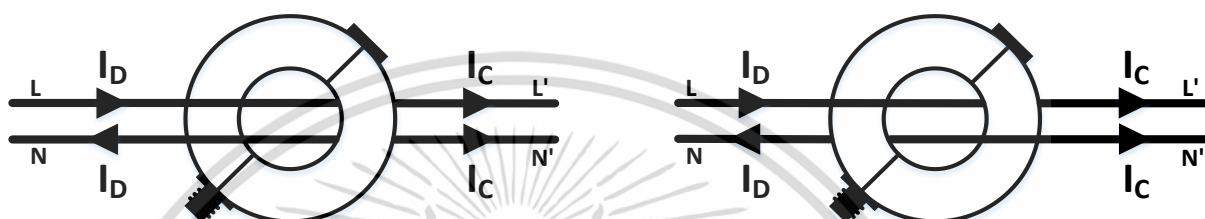
ตารางที่ 4.9 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 7

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μV)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μV)]	AV [dB(μV)]	
มีเฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 7				
341346	78.1487	-1.8513	8.1487	CISPR 14-1
484855	69.3237	-10.6763	-0.6763	CISPR 14-1
915384	54.8347	-19.1653	-9.1653	CISPR 14-1
1680769	60.6852	-13.3148	-3.3148	CISPR 14-1
2111298	51.0431	-22.9569	-12.9569	CISPR 14-1
2828846	48.3052	-25.6948	-15.6948	CISPR 14-1
3976923	48.2000	-25.8000	-15.8000	CISPR 14-1
5507692	45.7392	-28.2608	-18.2608	CISPR 14-1
7325480	46.6163	-27.3837	-17.3837	CISPR 14-1
8808413	46.1539	-27.8461	-17.8461	CISPR 14-1
10865384	43.7265	-30.2735	-20.2735	CISPR 14-1
12922355	51.6425	-22.3575	-12.3575	CISPR 14-1
14309615	43.9133	-30.0867	-20.0867	CISPR 14-1
16462259	54.3513	-19.6487	-9.6487	CISPR 14-1
17658173	53.5108	-20.4892	-10.4892	CISPR 14-1
19045432	47.4473	-26.5527	-16.5527	CISPR 14-1
23685576	58.2468	-15.7532	-5.7532	CISPR 14-1
29043269	44.6193	-29.3807	-19.3807	CISPR 14-1
30000000	52.3229	-21.6771	-11.6771	CISPR 14-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแยกตามโหมดของสัญญาณรบกวนเป็น 2 โหมด คือ สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.21 โดยวิธีการวัดจะใช้หัววัดสัญญาณแบบคล้องระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัลตามรูปที่ 4.17 เพื่อวัดค่าสัญญาณที่ผ่านทั้งสองสายแล้วแปลงมาเป็นค่าสัญญาณโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง [9,41-43]



Common mode

Differential mode

ก. วิธีการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

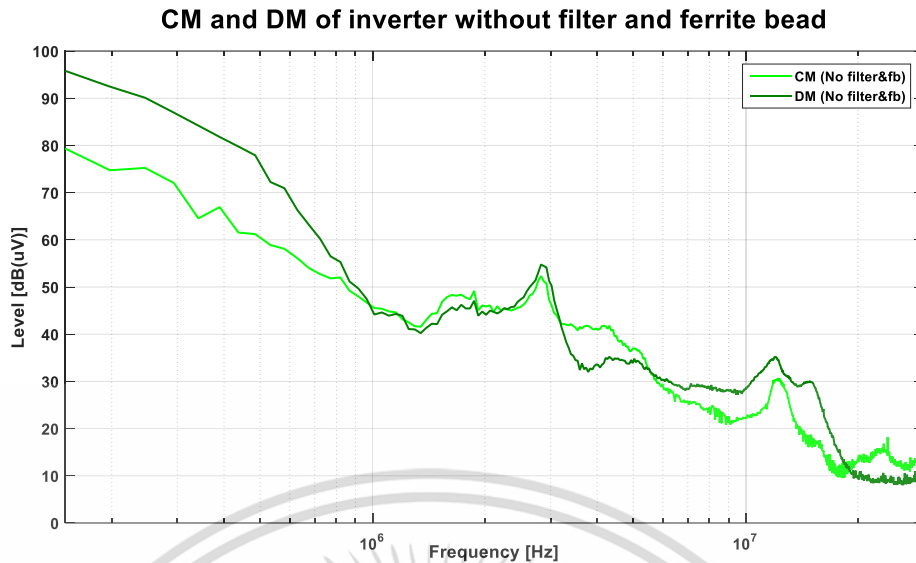


ข. อุปกรณ์วัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (RF current probe)

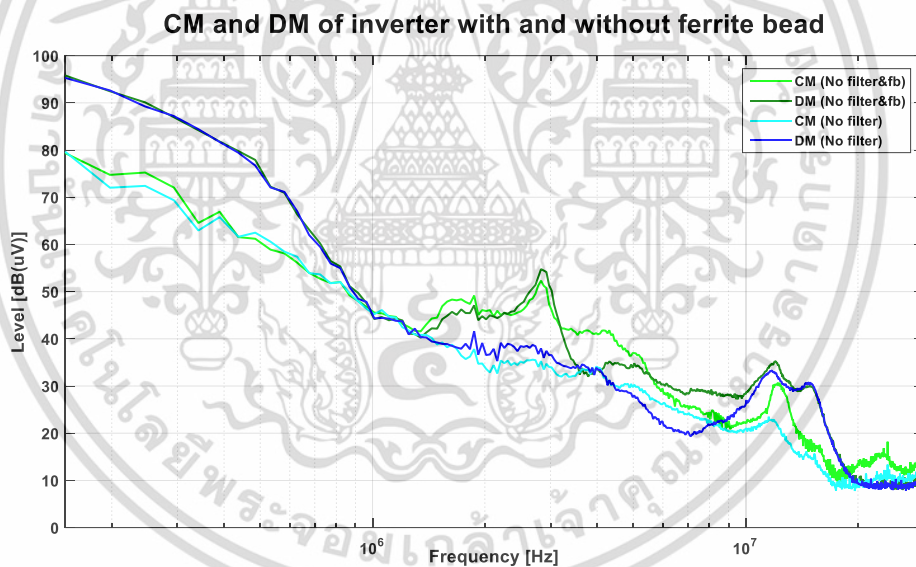
รูปที่ 4.10 การวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแยกโหมด ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการลดทอนของวงจรที่ออกแบบในแต่ละโหมดและศึกษาผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ภายในวงจรแต่ละตัว ขั้นแรกทำการวัดสัญญาณรบกวนทั้ง 2 โหมดของอินเวอร์เตอร์ พบว่า สัญญาณรบกวนช่วงความถี่แรก ๆ มีค่าสูง และลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมมีค่าต่ำกว่าสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างดังรูปที่ 4.11 ต่อมาทำการลดทอนสัญญาณด้วยการใช้เฟอร์ไรต์ปิด ส่งผลให้สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 1.5 - 4 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าต่ำลงทั้งสองโหมด ซึ่งที่ได้ตรงกับ การวัดสัญญาณแบบรวมโหมดดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
 ขณะไม่มีเฟอร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวน

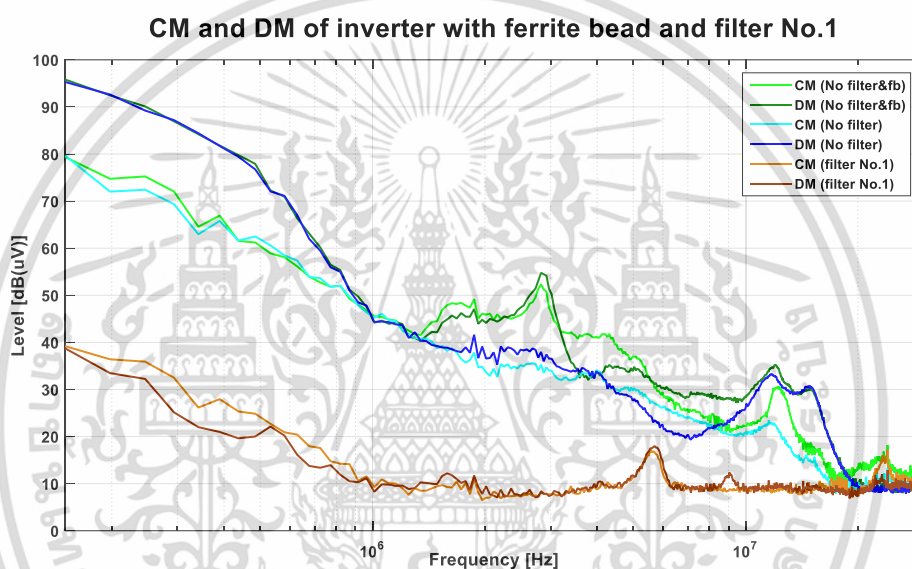


รูปที่ 4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
 ขณะมีเฟอร์ไรต์ปิด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน

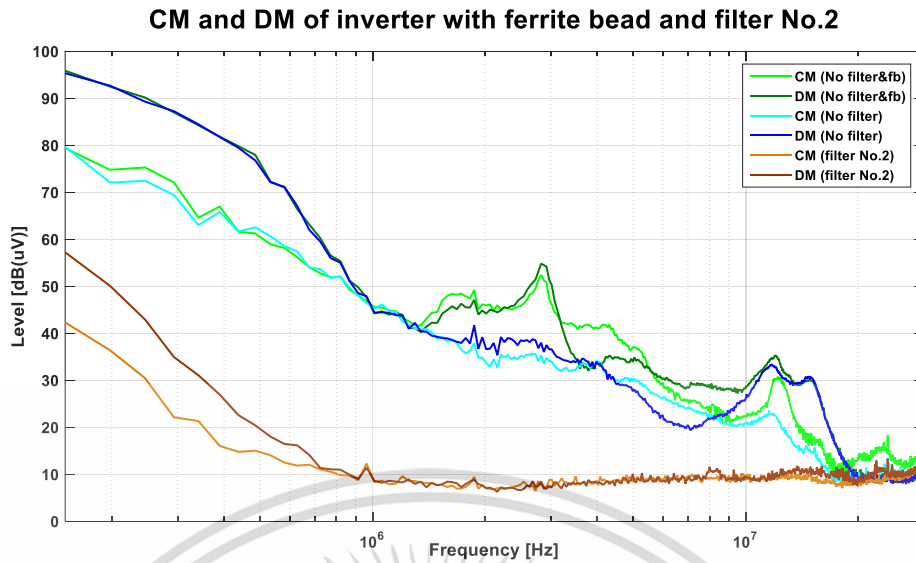
ต่อมาวัดสัญญาณรบกวนขณะที่มีตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร เปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนขณะไม่มีตัวกรองสัญญาณตามรูปที่ 4.13 – 4.19 (การวัดสัญญาณรบกวนแยกโหมดของอินเวอร์เตอร์สำหรับศูนย์ทดสอบยังไม่มีมาตรฐานมารองรับที่ชัดเจน) พบว่าตัวกรองหมายเลข 1 3 และ 6 ให้ผลการลดทอนที่น่าพอใจ และการลดทอนโหมดผลต่างสามารถลดทอนสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

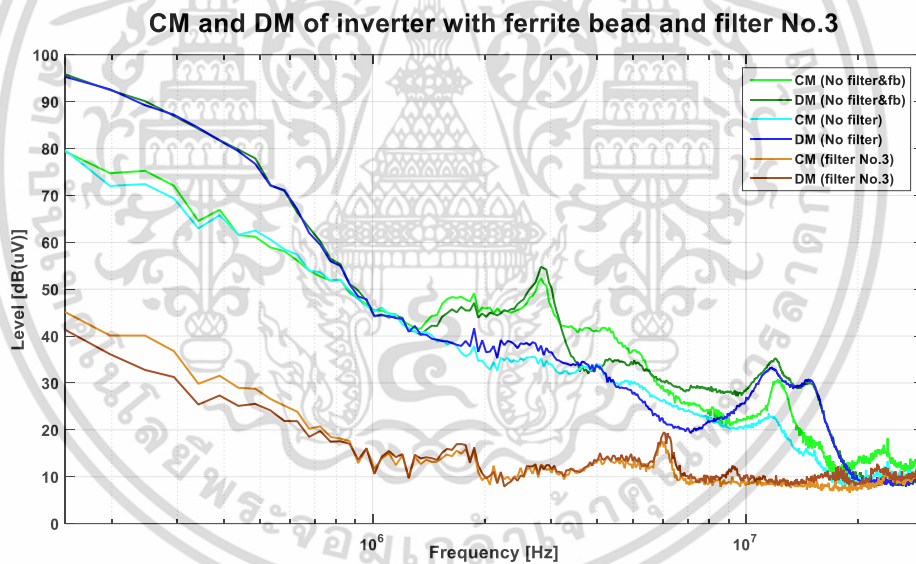
ได้มากกว่าโหมดผลรวม ทำให้สัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดหลังจากการลดทอนมีค่าสัญญาณใกล้เคียงกัน สำหรับวงจรหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ผลการลดทอนทำให้รูปแบบสัญญาณช่วงความถี่ต้นยังมีความใกล้เคียงกับรูปแบบสัญญาณก่อนการลดทอน คือ สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างมีค่าสูงกว่าสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม ในช่วง 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนความถี่ช่วง 1 – 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ตัวกรองหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีมากเมื่อเทียบกับตัวกรองอื่น ๆ ตามรูปที่ 4.20 และ 4.21 และตัวกรองหมายเลข 4 5 และ 7 ให้ผลการลดทอนไม่น่าพึงพอใจ เพราะสัญญาณรบกวนหลังการลดทอนยังมีค่าสูง โดยเฉพาะในช่วง 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟร์ไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1

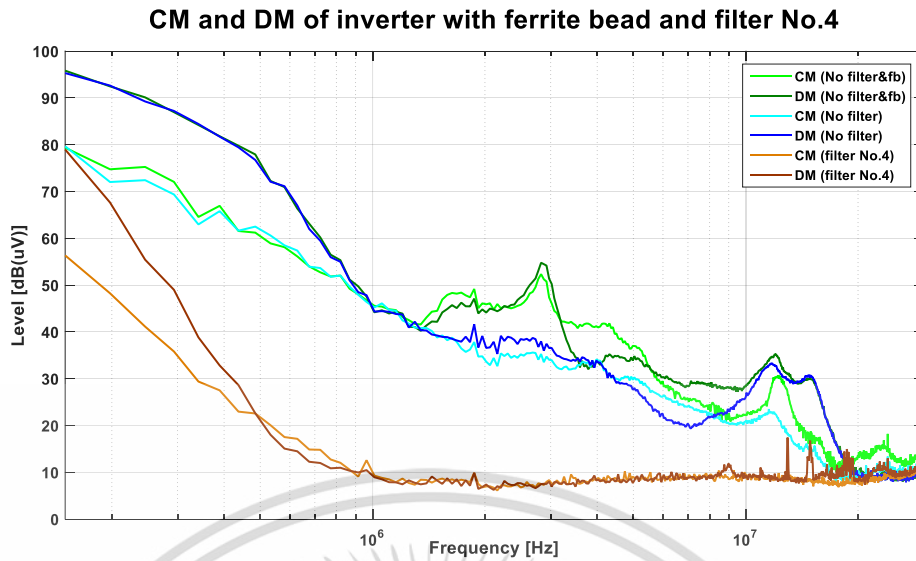


รูปที่ 4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2

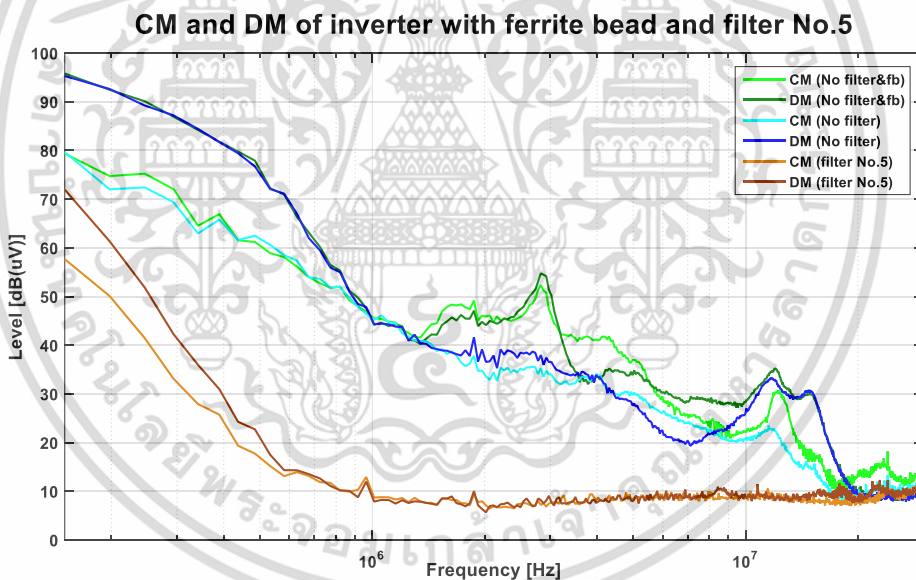


รูปที่ 4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

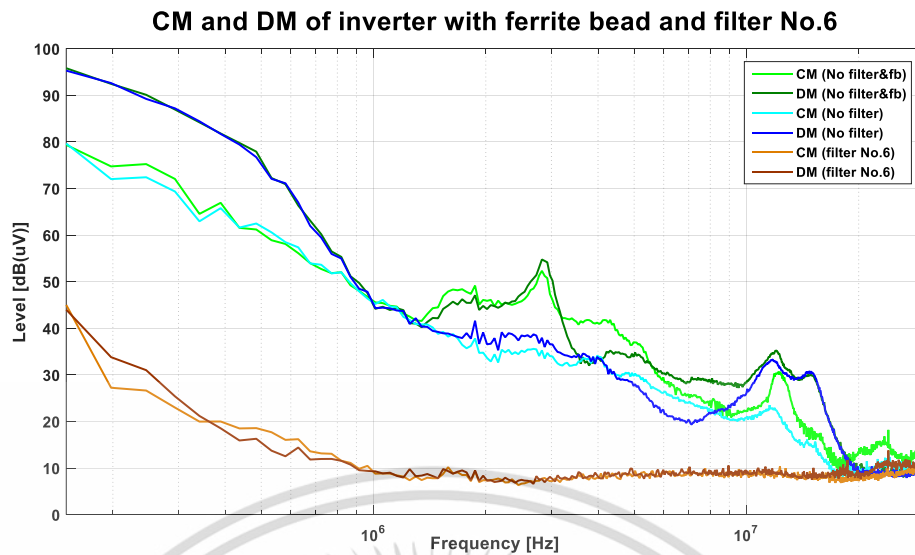


รูปที่ 4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4

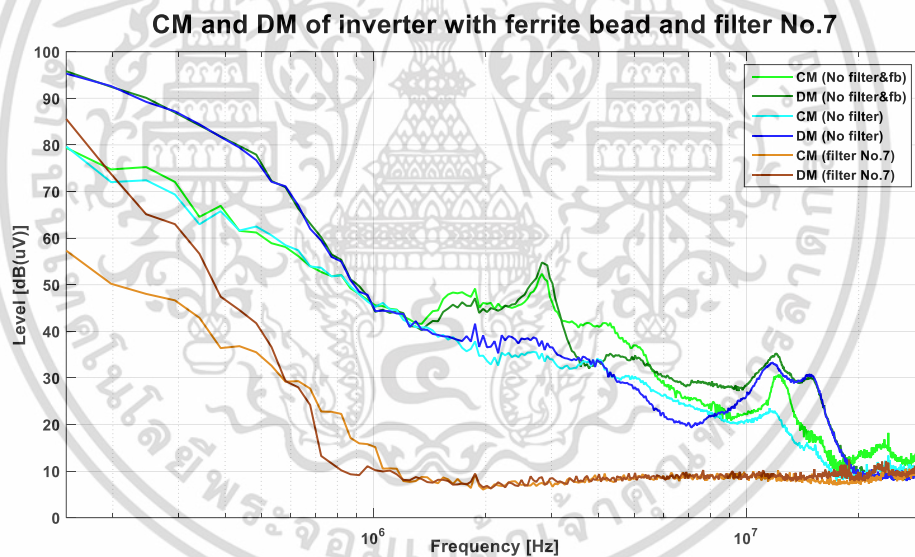


รูปที่ 4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

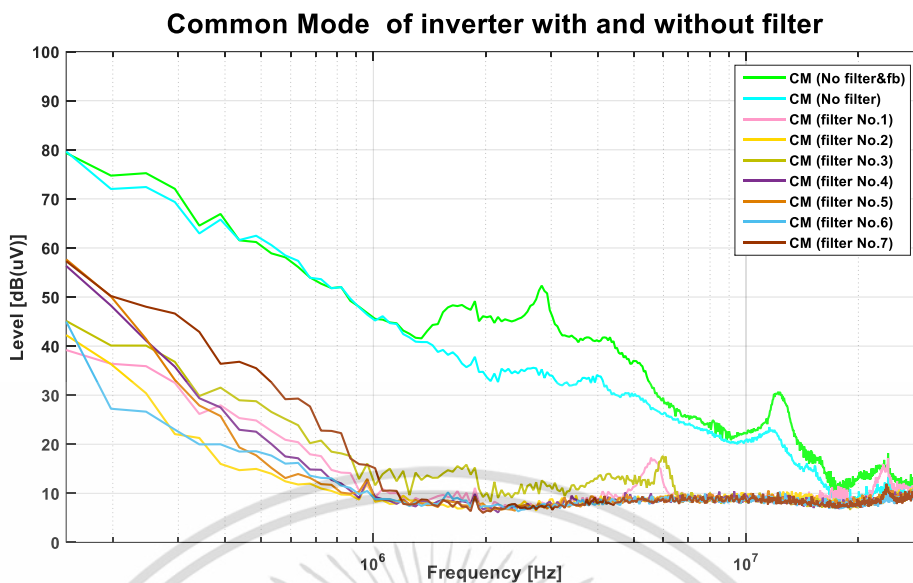


รูปที่ 4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6

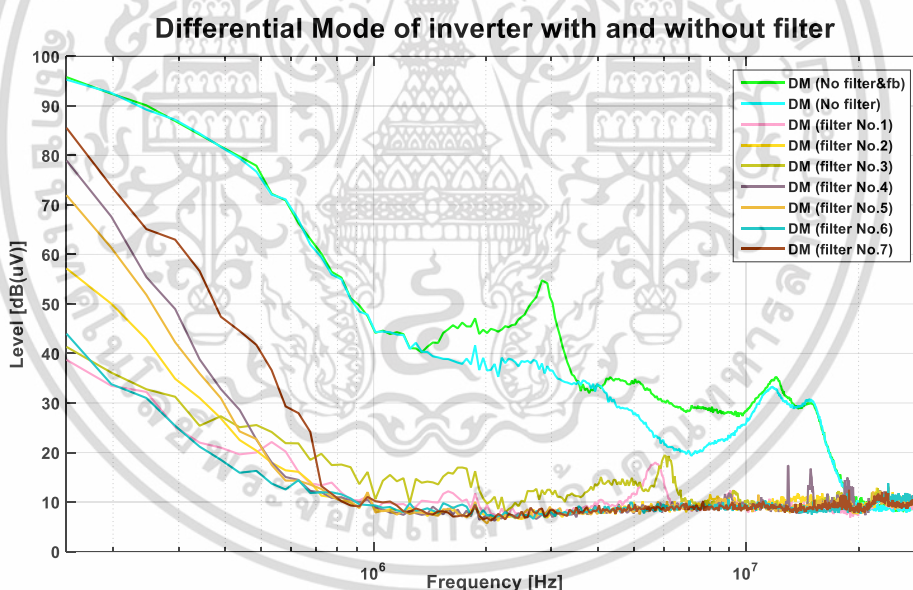


รูปที่ 4.19 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร



รูปที่ 4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร

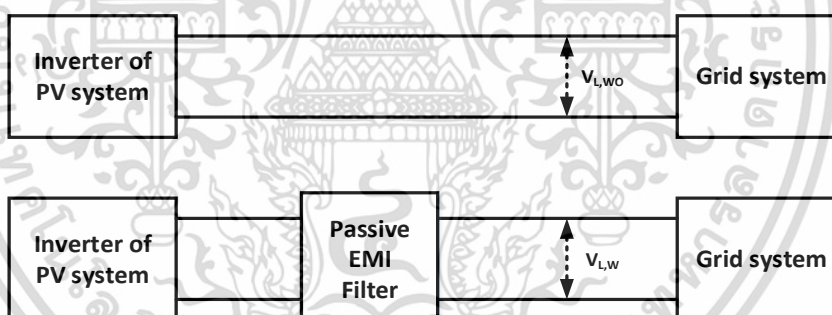
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

การหาค่าความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ด้วยการหาค่าผลต่างของสัญญาณรบกวนระหว่างก่อนและหลังใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อศึกษาคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแต่ละตัว ซึ่งค่าความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) แสดงถึงความสามารถในการลดทอนของวงจรกรองในแต่ละความถี่

จากการทดสอบ ตัวกรองสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ในช่วง 0.15 – 15 เมกะเฮิรตซ์ และลดทอนได้ดีในช่วง 0.15 – 1.5 เมกะเฮิรตซ์ ส่วนที่ความถี่ 15 – 30 เมกะเฮิรตซ์ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้น้อยมากจนแทบจะไม่มีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนเลยดังแสดงในรูปที่ 4.23 – 4.30 เมื่อเปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองทั้ง 7 ตัว พบว่าตัวกรองหมายเลข 2 ให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด แต่หมายเลข 5 และ 7 ให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแย่มากที่สุด

จากรูปที่ 4.22 และสมการที่ 4.1 – 4.2 การคำนวณค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของระบบที่ศึกษานี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของสัญญาณรบกวนขณะที่มีและไม่มีการใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 4.22 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกในระบบทดสอบ

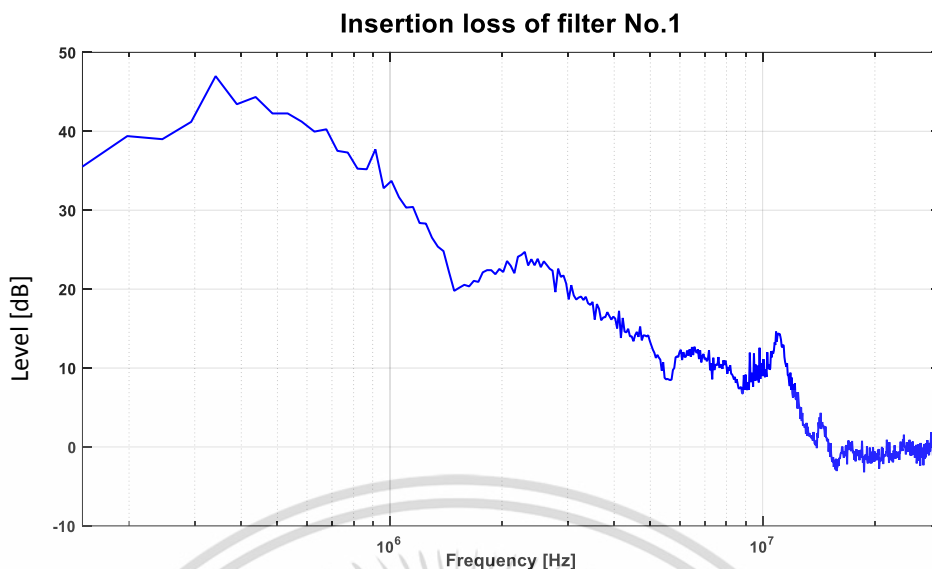
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}}{10^{-6}} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,w}}{10^{-6}} \right) \quad (4.1)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}}{V_{L,w}} \right) \quad (4.2)$$

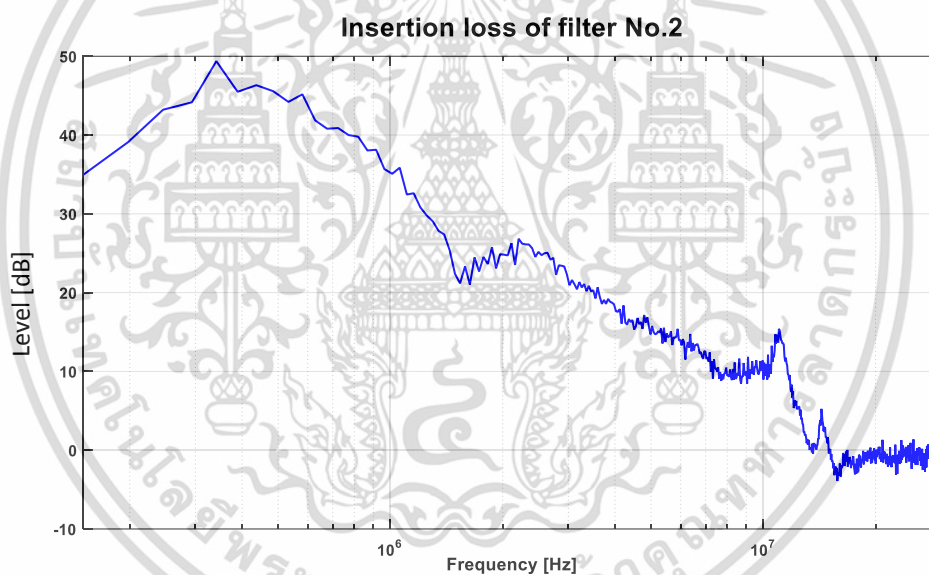
โดยที่ IL_{dB} คือ ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

$V_{L,wo}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

$V_{L,w}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

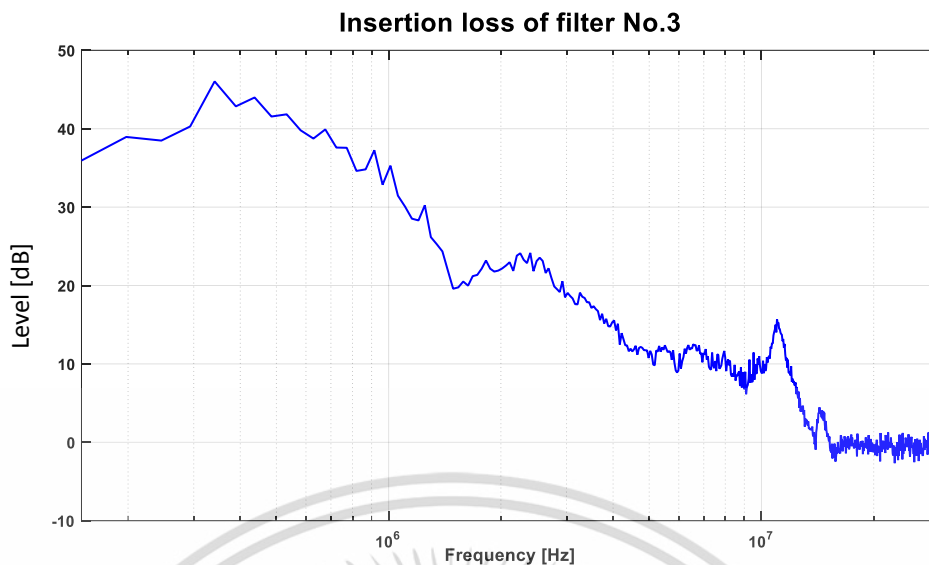


รูปที่ 4.23 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 1

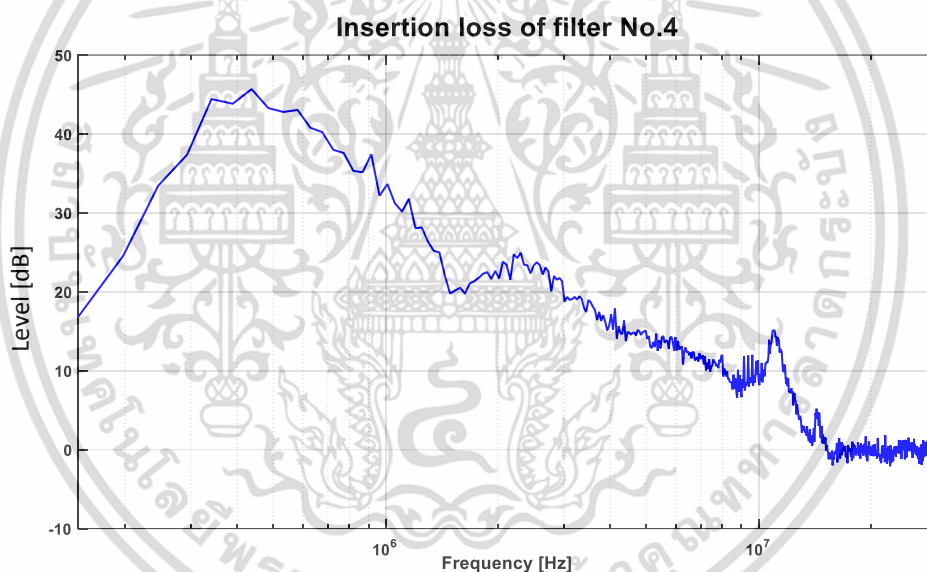


รูปที่ 4.24 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

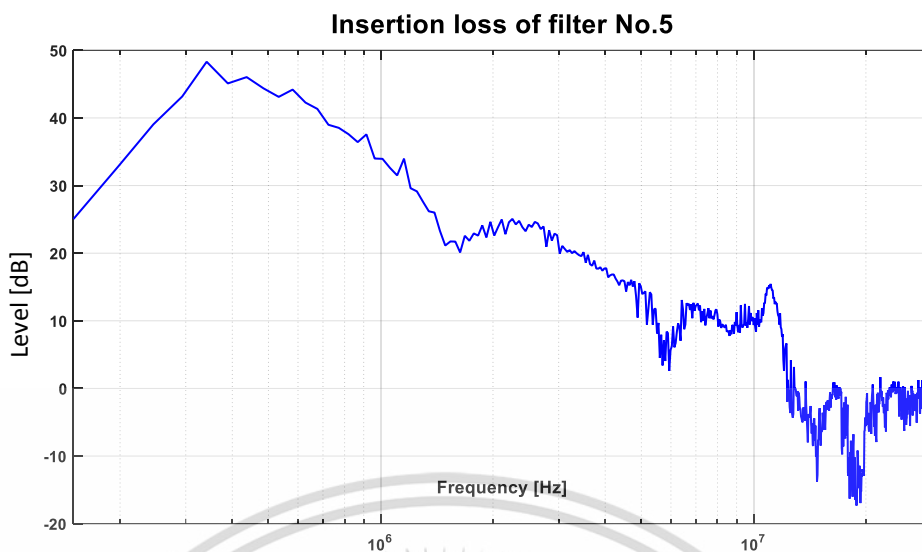


รูปที่ 4.25 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 3

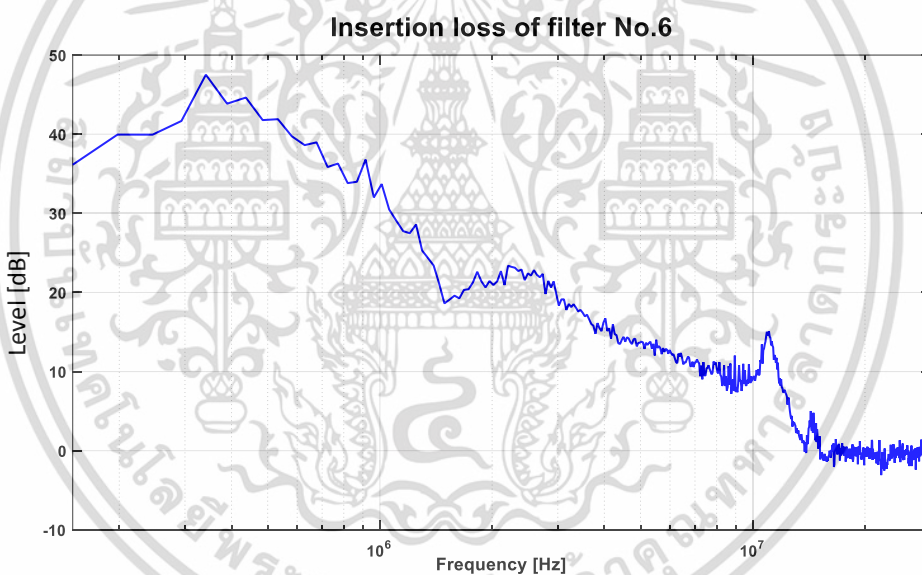


รูปที่ 4.26 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

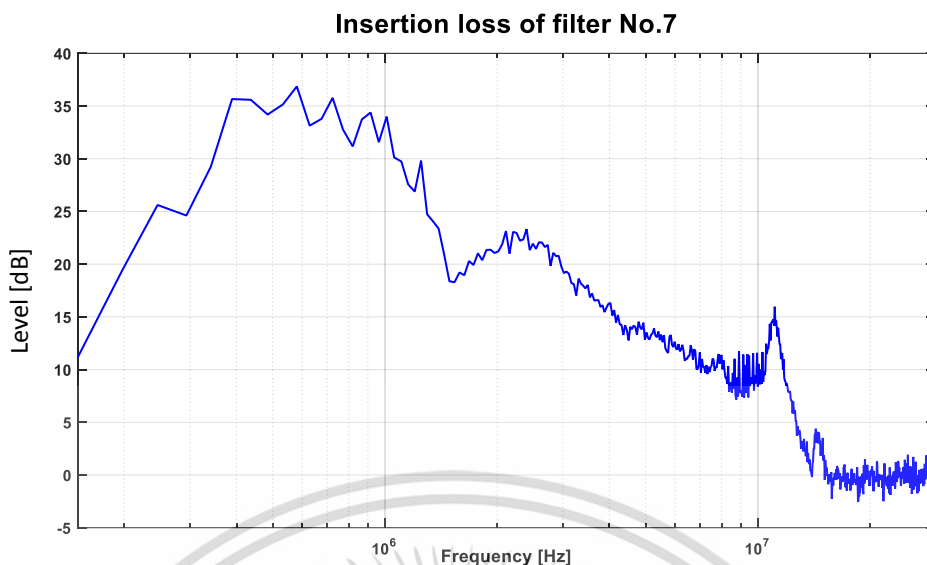


รูปที่ 4.27 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 5

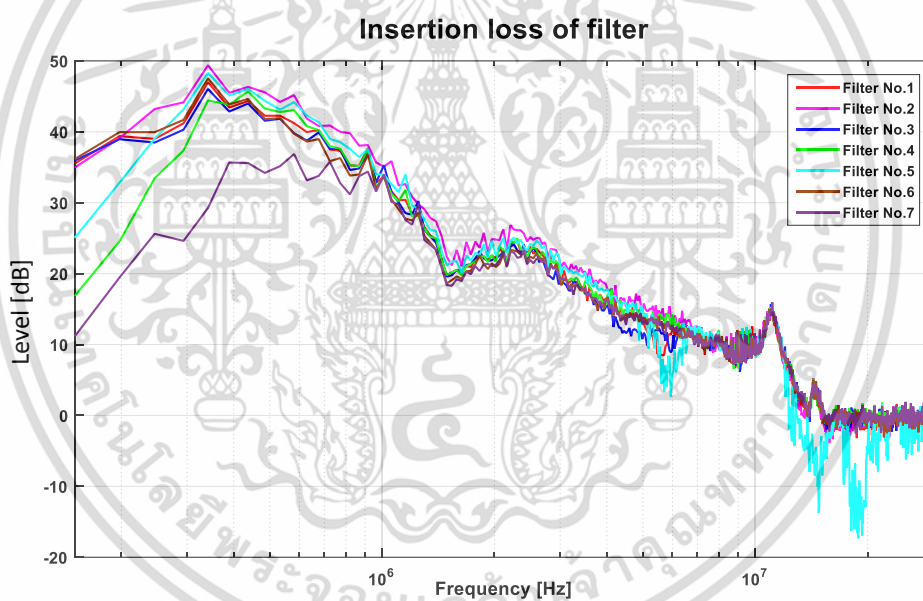


รูปที่ 4.28 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 7



รูปที่ 4.30 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองทั้ง 7 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในปัจจุบันนิยมใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบสำเร็จรูป ซึ่งต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาแพง อีกทั้งบางตัวก็ไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในควมถี่ที่ต้องการได้ ดังนั้นการศึกษาการออกแบบและสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนในงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญมาก เพื่อแสดงให้เห็นถึงรูปแบบวงจรที่มีและไม่มีประสิทธิภาพ และแสดงให้เห็นว่าตัวกรองที่มีราคาสูงก็อาจจะไม่สามารถลดทอนสัญญาณตามที่ต้องการได้ เพราะการเลือกใช้วงจรควรเลือกจากรูปแบบวงจรที่น่าเชื่อถือ อุปกรณ์ภายในวงจรที่มีคุณภาพ และอาจต้องใช้การลดทอนรูปแบบอื่นมารวมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนให้สูงขึ้น โดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

ในหัวข้อการเปรียบเทียบความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจนี้ ได้เปรียบเทียบราคาของตัวกรองสัญญาณรบกวนในท้องตลาด และราคาตัวกรองสัญญาณรบกวนที่ถูกสร้างขึ้นรวมกับราคาของเฟอร์ไรต์ปิดตามตารางที่ 4.10 เพื่อให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการออกแบบและสร้างวงจรกรองด้วยตนเอง หรือการนำวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนอื่น ๆ มาช่วย เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อตัวกรองสัญญาณรบกวนจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

ตารางที่ 4.10 ราคาวงจรกรองทั้ง 7 แบบเทียบกับวงจรกรองตามท้องตลาดทั่วไป

วงจกรอง สัญญาณรบกวน	ราคา (บาท)		ราคารวม (บาท)
	วงจกรองสัญญาณรบกวน	เฟอร์ไรต์ปิด	
สำเร็จรูป	125 - 414	-	125 - 414
หมายเลข 1	70	60	130
หมายเลข 2	54	60	114
หมายเลข 3	78	60	138
หมายเลข 4	74	60	134
หมายเลข 5	74	60	134
หมายเลข 6	100	60	160
หมายเลข 7	94	60	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการทดสอบของวงจรรองสำเร็จรูปกับวงจรรองที่ถูกสร้างขึ้นให้ผลการลดทอนใกล้เคียงกัน ซึ่งยังมีความจำเป็นต้องใช้เฟอร์ไรต์ปิดช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนด้วย เพื่อให้ได้ผลการลดทอนที่สมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของวงจรรองทั้ง 7 หมายเลขพบว่าวงจรรองหมายเลข 2 ให้ผลการลดทอนดีที่สุด จากตารางที่ 4.10 พบว่าวงจรรองสำเร็จรูปมีราคาต่ำสุดอยู่ที่ 125 บาท ในขณะที่ราคาของวงจรรองหมายเลข 2 ที่สร้างขึ้นร่วมกับเฟอร์ไรต์ปิดมีราคารวมอยู่ที่ประมาณ 114 บาท ซึ่งถือว่าทั้งสองวงจรมีราคาใกล้เคียงกัน ส่วนผลการลดทอนที่ได้พบว่าตัวกรองหมายเลข 2 ร่วมกับเฟอร์ไรต์ปิดสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า เพราะลดทอนสัญญาณรบกวนได้ถึง 2 รอบ โดยเฟอร์ไรต์ปิดจะมีผลในการลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 1-20 เมกะเฮิร์ตซ์ และสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนลงได้สูงสุด 32 เดซิเบลไมโครโวลต์ ที่ความถี่ 2.781 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนวงจรรองหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 0.15 – 20 เมกะเฮิร์ตซ์และลดทอนได้มากกว่า 40 เดซิเบลไมโครโวลต์ ดังนั้นการสร้างวงจรรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2 ควบคู่กับการใช้เฟอร์ไรต์ปิดและการต่อลงดินตามที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้อย่างเห็นผล และลดค่าใช้จ่ายลงได้ในระดับหนึ่ง

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาแสดงผลให้เห็นการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการหลัก 3 วิธี คือ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด และการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวน และมีการเปรียบเทียบผลการลดทอนของวงจรกรองสัญญาณทั้ง 7 วงจร ในรูปของสัญญาณรบกวนโดยรวม สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง และความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ดังนั้นในบทนี้จะทำการสรุปผลที่ได้ศึกษา รวมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้อีกด้วย

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้ ใช้การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการทดสอบดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นระบบปิด ทำให้ไม่สะดวกในการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทน เครื่องจำลองแผงเซลล์สามารถให้ความสะดวกในการทดสอบได้ทุกช่วงเวลา สามารถควบคุมสภาพแสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ได้อีกด้วย สำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าต่ำมาก จึงไม่มีผลกระทบต่อทดสอบ และเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับของห้องทดสอบ จึงได้มีการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในระบบไฟฟ้าของห้องทดสอบ พบว่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้มีค่าต่ำมากเช่นกัน จึงไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบระบบ ต่อมาได้ทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ฝั่งขาออก (กระแสสลับ 1 เฟส) พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกินขีดจำกัดมาตรฐาน CISPR 14 ในประมาณมากในช่วง 0.15 – 10 เมกะเฮิรตซ์ จึงจำเป็นต้องหาวิธีลดทอนสัญญาณให้ผ่านมาตรฐาน CISPR 14 ให้ได้

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 3 วิธี คือ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด และการใช้วงจรกรอง การต่อลงดินมีความสำคัญต่อระบบมาก เนื่องจากการนำสัญญาณรบกวนส่วนเกินออกจากระบบได้ส่วนหนึ่ง แล้วช่วยป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการรั่วไหลของไฟฟ้าได้อีกด้วย

และส่งผลทำให้กราฟสัญญาณรบกวนเลื่อนจากความถี่สูงไปยังความถี่ที่ต่ำลง สำหรับการใส่เฟอร์ไรต์ปิด สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ในช่วงความถี่ 1.5 – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยลดได้ทั้งสัญญาณรบกวนโดยรวม สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง การเลือกใช้เฟอร์ไรต์ปิด จำเป็นต้องดูรายละเอียดคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณรบกวนและช่วงความถี่ทำงานประกอบด้วย จึงจะสามารถกำหนดช่วงการลดทอนสัญญาณรบกวนของเฟอร์ไรต์ปิดได้ นอกจากนี้จำนวนรอบการพันก็มีผลต่อช่วงความถี่และปริมาณสัญญาณรบกวนที่สามารถลดทอนได้ ทำให้ยากที่จะกำหนดรูปแบบที่แน่นอนการลดทอนของเฟอร์ไรต์ปิด แต่เพื่อให้การลดทอนสัญญาณโดยใช้เฟอร์ไรต์ปิดมีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับระบบ จึงควรเลือกขนาดสายไปให้ใกล้เคียงกับขนาดเฟอร์ไรต์ปิด และสายไฟนั้นต้องมีความยาวไม่มากเกินไป ส่วนการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวน จะใช้วงจรกรอง 2 รูปแบบ คือ วงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง และวงจรกรองที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง โดยทำการออกแบบตัวกรองทั้งหมด 7 ตัว ตามหลักการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำอย่างถูกต้อง มีการคำนวณหาความถี่ตัด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวได้ถูกเลือกอย่างมีมาตรฐาน การทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรกรองหมายเลข 4 5 และ 7 ให้ผลการลดทอนสัญญาณไม่เป็นที่น่าพึงพอใจ เนื่องจากไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนโดยรวมให้ผ่านมาตรฐาน CISPR 14-1 ได้ และนอกจากนี้วงจรหมายเลข 5 ยังส่งผลให้สัญญาณรบกวนช่วงความถี่ 5 – 7 และ 12 – 30 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับวงจรกรองหมายเลข 1 2 3 และ 6 ให้ผลการลดทอนสัญญาณที่น่าพึงพอใจ เพราะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนให้ผ่านมาตรฐาน CISPR 14-1 ได้ โดยเฉพาะวงจรกรองหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่างได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สัญญาณรบกวนโดยรวมลดลงมากที่สุด จึงเหมาะสมสำหรับการใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าขนาด 300 วัตต์นี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ควรเลือกค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย และเลือกอุปกรณ์ที่ผ่านมาตรฐานสำหรับการใช้สร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะ
2. สายไฟที่ใช้ในระบบควรมีขนาดและความยาวที่เหมาะสม เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่วัดได้

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนทั้ง 3 วิธี และเปรียบเทียบการลดทอนของ วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 แบบ ทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลดลงจนผ่าน มาตรฐาน CISPR 14-1 ได้ การนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดนั้นสามารถทำได้อีกมากมาย ทั้งการศึกษาการ ลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศ การศึกษาภูมิคุ้มกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า การปรับให้ วงจรกรองสัญญาณรบกวนมีขนาดเล็ก หรือพัฒนาเป็นวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ แอคทีฟหรือแบบไฮบริด รวมถึงการทดสอบเชิงประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปที่วงจรกรอง ทั้งหมดนี้เป็นหัวข้อที่น่าสนใจและสามารถต่อยอดงานวิจัยนี้ได้ทั้งสิ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2559. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559. กรุงเทพฯ : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [2] การไฟฟ้านครหลวง. 2558. ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558. กรุงเทพฯ : การไฟฟ้านครหลวง.
- [3] J. Ji, W. Chen, Z. Gu, X. Yang and X. Zhang, "A control method of digital active EMI filter," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 1141-1145.
- [4] J. Ji, W. Chen, X. Yang, X. Zhang and N. Zhi, "A layout method of passive EMI filter," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 2346-2349.
- [5] W. Xin, S. Ke and L. Weiguo, "Design and performance of a passive EMI filter for three-stage aircraft starter/generator system," 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), Beijing, 2016, pp. 560-563.
- [6] D. Hamza, Q. Mei and P. K. Jain, "Implementation of an EMI active filter in grid-tied PV micro-inverter controller and stability verification," IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, 2012, pp. 477-482.
- [7] H. C. Yen, C. S. Moo, Y. C. Hsieh and Y. C. Chuang, "Integrated design of EMI and passive filters for power electronic converters with PFC circuit," ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No.01TH8570), Pusan, 2001, pp. 1055-1059 vol.2.
- [8] Y. Chu, S. Wang and Q. Wang, "Modeling and Stability Analysis of Active/Hybrid Common-Mode EMI Filters for DC/DC Power Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 9, pp. 6254-6263, Sept. 2016.
- [9] G. Chrysis "High-Frequency Switching Power Supply: Theory and Design, " McGraw-Hill Publishing Company, Second Edition, 1989, pp. 265-270.
- [10] Choi, B., Kim Lee, D., Choi, D.S., Sun, J.: 'Analysis of input filter interactions in switching power converters', IEEE Trans. Power Electr., 2007, 22, (2), pp. 452-460
- [11] Song Zheng, S. Wang and Bor-Lin Li, "The application of multi-stage EMI filter design method in planar EMI filter," 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, 2015, pp. 140-143.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] W. Xie, S. Wang, C. Chen and B. Zhou, "The application of the passive EMI filter in a medium-power VFD," 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, 2015, pp. 2476-2480.
- [13] Wenjie Chen, Xu Yang and Zhaoan Wang, "An active EMI filtering technique for improving passive filter low-frequency performance," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 1, pp. 172-177, Feb. 2006.
- [14] Shuo Wang, Rengang Chen, F. C. Lee and J. D. van Wyk, "Improved passive filter configurations for high-frequency conducted EMI in power electronics," 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, 2005, pp. 16 pp.-P.16.
- [15] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, " Power Electronic: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1995, pp. 500-502.
- [16] Jin, M., Weiming, M.: 'Power converter EMI analysis including IGBT nonlinear switching transient model', IEEE Trans. Ind. Electr., 2006, 53, (5), pp. 1577–1583
- [17] S. Z. Mohammad Noor, A. M. Omar, N. N. Mahzan and I. R. Ibrahim. 2013. "A Review of Single-Phase Single Stage Inverter Topologies for Photovoltaic System" 69-74. in *IEEE 4th Control and System Graduate Research Colloquium*. Shah Alam : IEEE.
- [18] Q. Zhou, C. Xun, Q. Dan and S. Liu. 2015. "Grid-connected PV inverter reliability considerations: A review." 266-274. in *2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. Changsha : IEEE.
- [19] กรมการกิจการพลังงาน. 2559. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 53ง ระเบียบคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ว่าด้วยมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า วิธีการตรวจสอบ และการรับรองผลการตรวจสอบอุปกรณ์ประเภทอินเวอร์เตอร์ (Grid-connected inverter) ระบบแรงดันต่ำ พ.ศ. 2559. กรุงเทพฯ : กรมการกิจการพลังงาน.
- [20] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์. 2554. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : วิ.เจ. พรินติ้ง.
- [21] V. Prasad Kodali. 2001. *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models*. 2nd ed. n.d. : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Williams, T. 2001. *EMC for Product Designers*. 3rd ed. Oxford : Newnes.
- [23] ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ และไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์. 2549. *EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ – มาตรฐานและการทดสอบ*. กรุงเทพฯ : แอคทีฟ พรีนซ์.
- [24] ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ และไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์. 2549. *EMC 2: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ – มาตรฐานและการติดตั้ง*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [25] Henry W. Ott. 2009. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey : John Wiley.and Sons.
- [26] Clayton R. Paul. 2006. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. 2nd ed. New Jersey : John Wiley.and Sons.
- [27] IEEE Standard Association. 2014. "American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility (EMC) including Electromagnetic Environmental Effects (E3)." 1-152. in *ANSI C63.14-2014 (Revision of ANSI C63.14-2009)*. n.p. : IEEE.
- [28] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. *เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้าและเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน : ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ*. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [29] Y. C. Son and Seung-Ki Sul. 2006. "Generalization of active filters for EMI reduction and harmonics compensation." 545-551. in *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 42. no. 2. n.p. : IEEE.
- [30] N. Mortensen and G. Venkataramanan. 2008. "An Active Common Mode EMI Filter for Switching Converters." 1-7. in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Edmonton : IEEE.
- [31] S. Ostroznik, P. Bajec and P. Zajec. 2010. "A Study of a Hybrid Filter." 935-942. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 57. no. 3. n.p. : IEEE.
- [32] IEC 60939-1. 2010. *Passive Filter Units for Electromagnetic Interference Suppression – Part 1: Generic Specification*. 3rd ed. Geneva : International Electrotechnical Commission.
- [33] IEC 60384-14. 2016. *Fixed Capacitor for Use in Electronic Equipment – Part 14: Sectional Specification – Fixed Capacitors for Electromagnetic Interference Suppression and Connection to the Supply Mains*. 4.1th ed. Geneva : International Electrotechnical Commission.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] D. Dong, X. Zhang, F. Luo, D. Boroyevich and P. Mattavelli. 2012. "Common-Mode EMI Noise Reduction for Grid-Interface Converter in Low-Voltage DC distribution system." 451-457. in *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Orlando, FL : IEEE.
- [35] R. B. Selvakumar and S. Jessianitha. 2015. "An Effective Method for Electromagnetic Interference (EMI) Reduction in Single-Phase Full Bridge Inverters." 1-7. in *2015 IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. Coimbatore : IEEE.
- [36] J. L. Kotny, T. Duquesne and N. Idir. 2011. "EMI Filter Design Using High Frequency Models of the Passive Components." 143-146. in *2011 IEEE 15th Workshop on Signal Propagation on Interconnects (SPI)*. Naples : IEEE.
- [37] Y. Levron, H. Kim and R. W. Erickson. 2014. "Design of EMI Filters Having Low Harmonic Distortion in High-Power-Factor Converters." 3404-3413. in *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 29. no. 7. n.p. : IEEE.
- [38] J. Zhang, W. Chen, X. Song, H. Huang and X. Yang. 2014. "On Discussion of DC Side EMI Filter Design for Conducted Noise Suppression in Photovoltaic System." 441-445. in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*. Shanghai : IEEE.
- [39] J. Zhang, W. Chen, B. Zhang, X. Song and H. Huang. 2015. "Optimal Design of EMI Filters for PV System Based on Parasitic Parameter and Stability Analysis." 2744-2751. in *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*. Seoul : IEEE.
- [40] C. Khun, W. Khan-ngern and M. Kando, "Passive EMI Filter Performance Improvements with Common Mode Voltage Cancellation Technique for PWM Inverter," 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, 2007, pp. 257-261.
- [41] Ting, G., Dan, Y.C., Lee, F.C.: 'Separation of the common-mode and differential-mode conducted EMI noise', IEEE Trans. Power Electr., 1996, 11, (3), pp. 480-488
- [42] Jin, M., Weiming, M., Qijun, J., Lei, P.K.Z., Zhihua, Z.: 'Identification of essential coupling path models for conducted EMI prediction in switching power converters', IEEE Trans. Power Electr., 2006, 21, (6), pp. 1795-1803

- [43] Mugur, P., Roudet, R.J., Crebier, J.C.: 'Power electronic converter EMC analysis through state variable approach techniques', IEEE Trans. EMC, 2001, 43, (2), pp. 229–238
- [44] D. Hamza and P. Jain. 2010. "Conducted EMI in grid-tied PV system." 1-7. in *Intelec 2010*. Orlando, FL : IEEE.
- [45] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2554. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง Switch-Mode Power Supplies. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มินิ เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [46] J. Biela, A. Wirthmueller, R. Waespe, M. L. Heldwein, K. Raggl and J. W. Kolar, "Passive and Active Hybrid Integrated EMI Filters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1340-1349, May 2009.
- [47] W. Khan-ngern and Y. Prempaneerach, "Reduction of conducted emission for UPSs using passive EMI filters," IEEE. APCCAS 1998. 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Microelectronics and Integrating Systems. Proceedings (Cat. No.98EX242), Chiangmai, 1998, pp. 189-192.
- [48] D. Hamza, M. Sawan and P. K. Jain, "Suppression of common-mode input electromagnetic interference noise in DC-DC converters using the active filtering method," in IET Power Electronics, vol. 4, no. 7, pp. 776-784, Aug. 2011.
- [49] Wang, J.B.: 'Reduction in conducted EMI noises of a switching power supply after thermal management design', IEE Proc. – Electronic Power Appl., 2003, 150, (3), pp. 301–310
- [50] Gonzalez, D., Gago, J., Balcells, J.: 'New simplified method of simulation of conducted EMI generated by switched power converters', IEEE Trans. Ind. Electr., 2003, 50, (6), pp. 1078–1084
- [51] Chen, R., van Wyk, J., Wang, D.S., Odendaal, W.G.: 'Technologies and characteristics of integrated EMI filters for switch mode power supplies'. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf., Aachen, Germany, 2004



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Quality Analysis of Grid Connected Solar Power Inverter

Natthanon Phannil, Chaiyan Jettanasen, and Atthapol Ngaopitakkul

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

E-mail: aun_2535_006@hotmail.com, kjchaiya@staff.kmitl.ac.th

Abstract – Photovoltaic (PV) energy has been widely interested today because it is clean and endless energy without causing pollution. To produce electricity from solar energy, it would be required an inverter to convert the direct current into alternating current. The inverter is the cause of problems that affect the stability of the power system because it is a switching device served to adjust the frequency of the AC power as needed. At the same time, it can cause harmonics which result in waveform distortion and affect electronic devices that receive power. Then, it could make electronic device malfunction. This paper studies the characteristics of harmonics on grid, PV system, and load. The result shows that most grid's harmonics are affected from PV system and load when the inverter power up to almost the rated power, meanwhile, percentages of harmonics are reduced and harmonics of load depend on the type of load. Next, comparing harmonics on three sides, and found that harmonics of PV system hardly affect to load and harmonics of grid are more affected from load than PV system.

Keywords – Distributed Generation (DG); Harmonic distortion; Photovoltaic energy (PV); Power quality; Solar inverter

I. INTRODUCTION

Most electricity production by solar energy is separated into two forms. First one is solar rooftop, which is a small electricity production and can manage unused space on the rooftop for gaining benefits. This configuration generates less energy than grid system, but if there are many solar rooftops in the area, it can generate much energy and reduce electrical power consumption in transmission line. Another form is solar farm, which is a large electricity production and generates huge energy. Since both forms send electrical power to transmission line, so it is required to control electrical power quality and stability in power transmission system. Regarding power quality, the significant factor is harmonics that are generated by solar system, and then the generated power will be sent to customers in the area. If the solar system has more harmonics, it would affect to electric/electronic equipment, and power transmission system.

A number of research papers in field of harmonics from PV system and the effect of inverter have been reviewed. Fei Wang and et al [1], introduced a way to forecast impedance network quasi-resonance between DG inverters and the grid. Harmonic interactions between the grid and a certain number of DG inverters can be preliminarily estimated. In [2], by using the fourth-order band pass filter, the proposed harmonic detector can effectively extract harmonic components without phase delay. In [3], a closed-form analytical approximation of the output harmonic spectrum of a single-phase two level inverter under the action of hysteresis current control has been done. The selective harmonic elimination problem using artificial neural networks (ANNs) to generate the switching angles in an 11-level full-bridge cascade inverter was powered by five varying dc input sources [4]. In [5], it analyzed the limitations of the standard resonant current control operating under abnormal grid conditions and introduced a control scheme from a three-phase PV inverter. Abhijit Kulkarni and et al [6], showed a novel design of inverter current control that mitigated lower order harmonics. The complete design had been validated with experimental results and good agreement with theoretical analysis of the overall system was observed. In [7], a harmonic impedance synthesis technique for voltage-controlled distributed generation inverters in order to damp harmonic voltage distortion on a distribution network was investigated. Md Shirajum Munir and et al [8], studied an in-depth analysis and comparison of different compensation schemes based on the virtual harmonic damping impedance concept, carried out in photovoltaic (PV) interfacing inverters. Solution eliminates the bulky electrolytic capacitors while smaller amount of AC capacitors were needed to compare with the buck-type AC-AC converters that continuous grid-side current was obtained, which implied that no extra grid-side filters were needed [9]. In [10], it applied the selective harmonic elimination (SHE) technique to determine the switching angles for a multilevel inverter that cooperated with specially connected transformers. In [11], it studied the combination of the grid voltage feedforward and the multi-HR control was proposed to suppress

low-order harmonics. The comparative analysis, simulations and experiments indicated that the proposed strategy greatly improved the ability of the inverter to reject the current harmonics induced by multi-harmonic sources as long as the grid feedforward and the resonant control were complementary. In [12], it showed a frequency adaptive selective harmonic control (FA-SHC) scheme that could be designed for grid-connected inverters to optimally mitigate feed-in current harmonics. Experimental tests had demonstrated the effectiveness of the proposed FA-SHC scheme in terms of accurate frequency adaptability and also fast transient response. Haitao Hu and et al [13], presented a clarification study to identify the potential resonance phenomenon between photovoltaic (PV) inverters and the distribution system that can be attenuated if the damping resistance, such as damping resistor and residential linear loads, was large enough.

The harmonics in PV system are presently a concerned problem of power system because they affect to electric equipment of the end users and stability of the transmission system. Therefore, in this study, different configurations by connecting to PV system and loads are carried out in order to reveal the real behavior of the harmonics in the considered system.

II. EXPERIMENTATION

For experiment, we used a PV Simulator to generate direct current of solar energy. Then, an on-grid inverter transformed direct current to alternating current for sending to grid connected and/or electrical loads. There are 5 types of loads, which are herein incandescent, ballast, incandescent and ballast, Light Emitting Diode (LED), and motor. In this system, we connected solar energy from PV simulator to on-grid inverter, grid system, and loads at the connecting point. The testing results were recorded using oscilloscope to keep current and voltage waveforms of the system at the connecting point, and using Power Quality Analyzer to keep electrical parameters and harmonics as shown in Figure 1.

Solar energy was sent to each load according to the load power.

- Incandescent of 500 W
- Ballast of 850 W
- Incandescent and Ballast of 1000 W
- LED lamp of 300 W
- Motor of 200 W

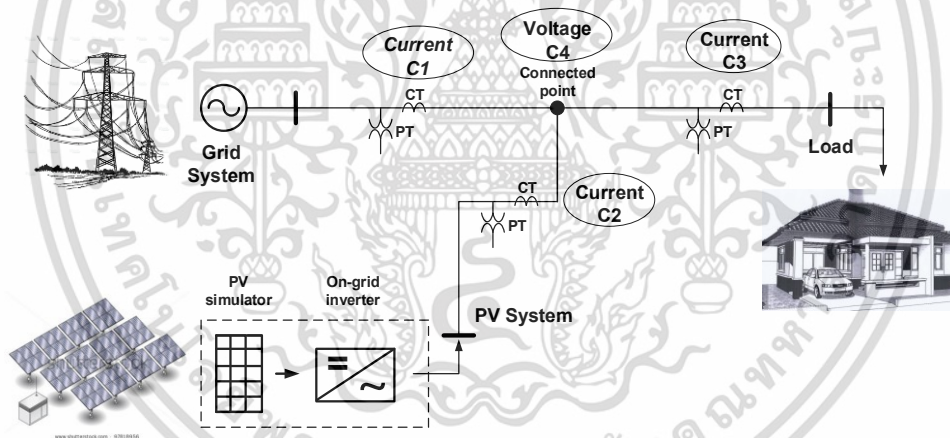


Fig. 1. Overview of experimentation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

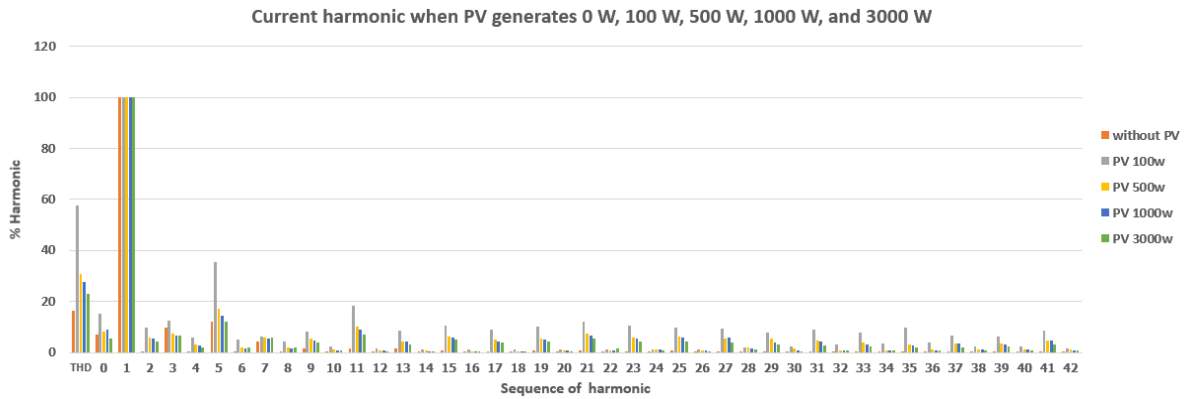


Fig. 2. Current harmonics when PV generates 0W, 100W, 500W, 1000W, and 3000W without loads connected

III. RESULT

The result shows that the system is study include 2 states. Frist, when the PV system doesn't feed power to connected point, loads receive power from grid and generate harmonics that pay back to the grid. Therefore, the harmonics in this state are load's harmonics. Next, when the PV system feed power to connected point. In this study, it is mainly considered into 2 configurations: with and without PV system, to observe the harmonics generated in the system. In two cases, the voltage harmonics measured at the connecting point are both low whereas the current harmonics are high.

When PV generates more electrical power to the system, the voltage harmonics are still unchanged. But the current harmonics can be more, depending on the supplied power and the type of load; the non-linear load with active component such as LED with its driver can cause and increase the total harmonics in the system. Therefore, we will mainly pay attention to the current harmonics in grid system, PV system and load.

When the PV does not generate energy, grid feeds low power to the connected inverter; the current harmonics percentage generated from inverter in each harmonic order are shown in Fig. 2. It is found that the grid-connected inverter behaves like an electrical load because it receives power from the grid for system connection verification; hence, there is low current flowing from grid to inverter. While PV generates 100

W, total current harmonics are increased, especially the 5th and 11th orders, then PV operation was changed to 500 W, 1000 W, and 3000 W, harmonics production were also investigated though they are lower than 100 W. operation. Thus, it seems to be conclude that the switching devices inside the grid-tie inverter cause the increment of current harmonics. When the PV generates high current and power, the fundamental current is high. Comparison study of current harmonics in the system is divided into two configurations; with and without PV connection, measuring at three positions (grid system, PV system, and load). There are five types of load, which are considered in the experiment, consisting of incandescent, ballast, incandescent with ballast, LED lamp, and motor.

The first comparison was the case of incandescent as a load. When PV did not generate power, the current harmonics percentage in 3rd, 5th, and 7th orders were 9.7%, 12.26%, and 6.28% respectively, and total harmonics distortion was 17.25% measured at PV system position whereas the grid and load position were relatively small amount because there was more power delivered from grid to load than the inverter as shown in Fig. 4. After the PV generated energy, current harmonics at load side was unchanged. Overall current harmonics of grid and PV system were stepped-up and dramatically increased in 5th and 11th orders.

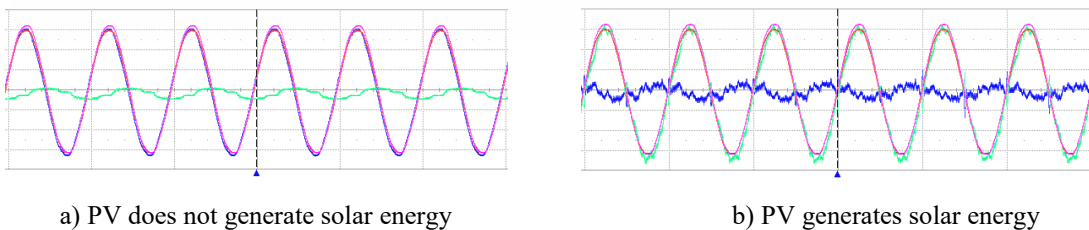


Fig. 3. Voltage and current waveforms in case of incandescent load when PV generates and does not generate solar energy

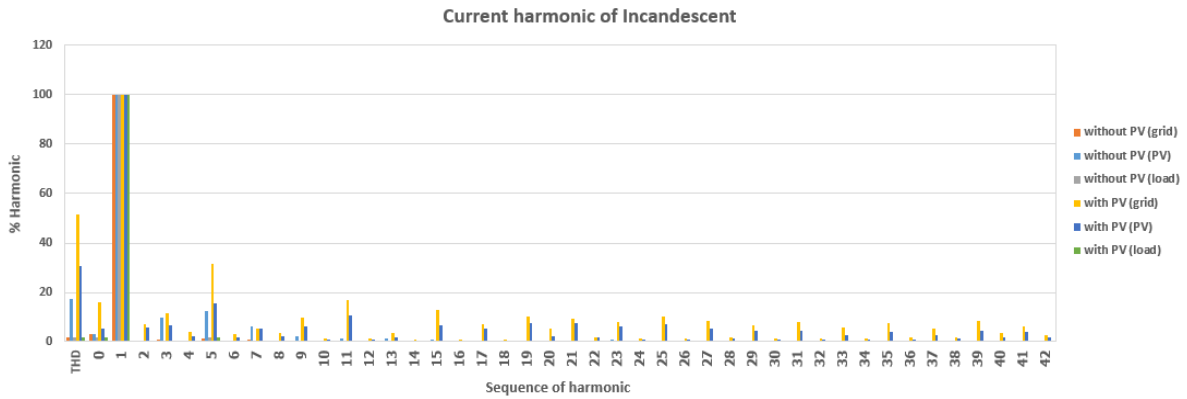


Fig. 4. Current harmonics in case of incandescent load when PV generates and does not generate solar energy

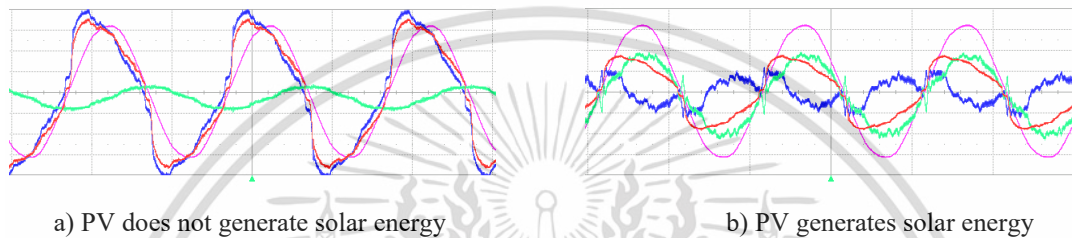


Fig. 5. Voltage and current waveforms in case of LED lamp load when PV generates and does not generate solar energy

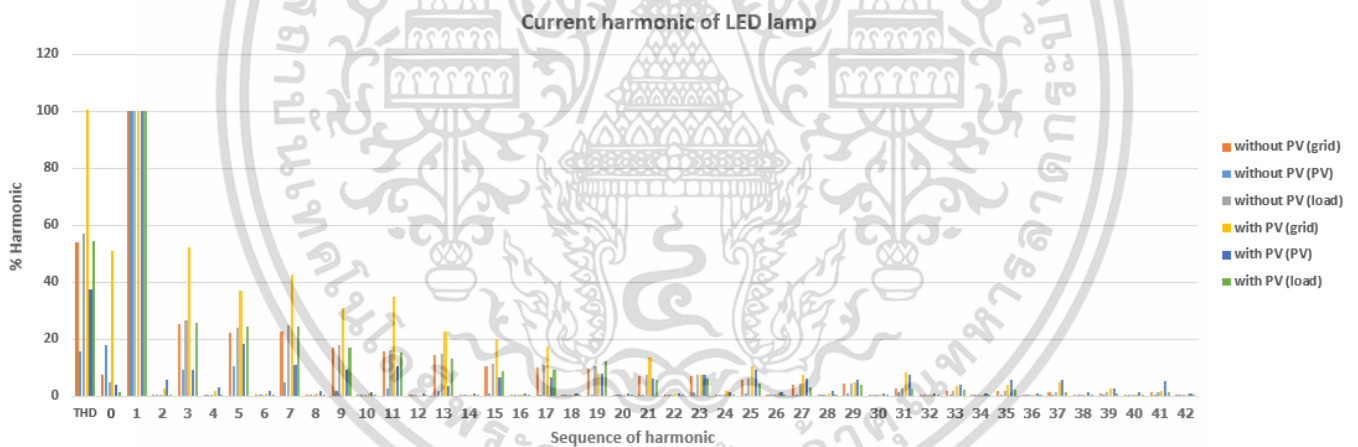


Fig. 6. Current harmonics in case of LED lamp load when PV generates and does not generate solar energy

The second comparison was the case of ballasts as a load. The current harmonics percentage when PV did not generate power in 3rd, 5th, and 7th orders are 9.46%, 2.73%, and 1.11% respectively, measured at load position. In PV system position, current harmonics at 3rd, 5th, 7th, 9th, and 11th orders were 8.72%, 11.23%, 5.65%, 2.21%, and 2.28% respectively. Current harmonics measured at load and PV system positions affected to grid position at 3rd and 5th orders, which were 9.54% and 3.46% respectively. Current harmonics of grid side and load side

were similar because grid sent more current to load than inverter. After the PV generated energy, current harmonics at load and grid position petty increased. Current harmonics at PV system position in 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, 8th, 9th, 10th, and 11th orders increased to 4.33%, 5.593%, 2.14%, 14.65%, 1.29%, 8.89%, 1.31%, 6.27%, 0.97%, and 7.624% respectively.

The third comparison was for the combination of incandescent and ballasts loads. The current harmonics percentage when PV did not generate power in 3rd, 5th, and 7th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

orders are 8.11%, 1.95%, and 1.18% respectively measured at load position. In PV system position, current harmonics at 3rd, 5th, 7th, 9th, and 11th orders were 88.92%, 11.21%, 5.48%, 2.25%, and 2.3% respectively. Current harmonics measured at grid position at 3rd, 5th, and 7th orders were 8.04%, 2.48%, 1.03% respectively. Current harmonics were more significant than the first case but less than the second one. After the PV generated energy, current harmonics at load position were unchanged. Current harmonics at 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, 8th, 9th, 10th, and 11th orders of PV system position drastically increased to 4.27%, 5.77%, 2.07%, 17.28%, 1.29%, 7.31%, 1.23%, 6.06%, 0.92%, and 7.87% respectively and grid position was slightly increased in odd orders. So, it could be conclude that current harmonics of grid side are more affected from load side than PV system side.

For the fourth case, the load taken into account was LED lamp with its driver. In Fig. 5(a), current harmonics at load position when PV did not generate power were different from the previous cases and had high values in order 3rd, 5th, 7th, 9th, 11th, 13th, 15th, 17th, 19th, 21st, 23rd, 25th, 27th, 29th, 31st, 33rd, 35th, 37th, 39th, and 41st orders that were 26.46%, 23.88%, 24.78%, 18.25%, 16.58%, 15.51%, 11.94%, 11.67%, 11.02%, 8.12%, 8.10%, 6.63%, 4.73%, 5.01%, 3.29%, 2.48%, 2.29%, 1.57%, 1.31%, and 1.48% respectively. In PV system position, current harmonics were similar to the former cases, including 3rd, 5th, 7th, 9th, and 11th orders of current harmonics, which were 9.21%, 10.54%, 5.04%, 1.77%, and 2.50% respectively. Current harmonics measured at grid position at 3rd, 5th, 7th, 9th, 11th, 13th, 15th, 17th, 19th, 21st, 23rd, 25th, 27th, 29th, 31st, 33rd, 35th, 37th, 39th, and 41st were 25.37%, 22.06%, 22.79%, 17.08%, 15.91%, 14.77%, 11.16%, 10.96%, 10.40%, 7.62%, 7.64%, 6.27%, 4.43%, 4.79%, 3.11%, 2.36%, 2.15%, 1.51%, 1.22%, and 1.37% respectively as shown in Fig. 6. It can be seen that current harmonics of LED lamp had more than other cases. After PV generated energy as shown in Fig. 5(b), current harmonics of load side were unchanged. Current harmonics of PV system position at 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, 8th, 9th, 10th, and 11th orders drastically increased to 5.6%, 9.1%, 3.26%, 18.48%, 1.75%, 11.23%, 1.77%, 9.25%, 1.37%, and 10.77% respectively. In grid position, current harmonics were more increased at 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, 8th, 9th, 10th, and 11th orders to 2.93%, 52.41%, 2.06%, 39.95%, 1.13%, 42.45%, 1.14%, 30.94%, 0.95%, and 34.79% respectively because there were effects from current harmonics of load and PV system.

The last comparison case was for load of motor. The current harmonics percentage when PV did not generate power in 3rd and 5th orders was 3.97% and 2.75% measured at load position. Current harmonics at 3rd, 5th, 7th, 9th, 11th, and 13th orders were 8.78%, 11.56%, 6.85%, 2.08%, 2.16%, and 1.29% respectively. In PV system position. Grid current harmonics at 3rd and 5th orders were 4.9% and 1.98%. This case is similar to the third case. After

the PV generated energy, current harmonics at load position were unchanged. Overall current harmonics at PV system and grid position slightly increased.

IV. CONCLUSION

This paper presented the comparison results of no-load and with different loads system between PV generating system and without PV generation. The experimental results concluded that grid-connected inverter behaves as load when PV does not generate solar energy because it receives power from grid to verify the system connection. The operation of passive components and switching equipment affects to the current harmonics generation because the system has low current flow. During PV does not generate solar energy, percentage of current harmonics decrease because current flow in the system increases.

Regarding the comparison study of current harmonics in the system with various loads, it can be analyzed that grid harmonics are mostly affected from harmonics of load and PV system but harmonics of load has more affect than PV system. Resistive and inductive loads generate less current harmonics than capacitive one and switching load, and harmonics of PV system do not affect to load.

REFERENCE

- [1] F. Wang, J. L. Duarte, M. A. M. Hendrix and P. F. Ribeiro, "Modeling and Analysis of Grid Harmonic Distortion Impact of Aggregated DG Inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 786-797, March 2011.
- [2] Sung-Wook Kang and Kyeong-Hwa Kim, "Sliding mode harmonic compensation strategy for power quality improvement of a grid-connected inverter under distorted grid condition," in *Power Electronics, IET*, vol. 8, no. 8, pp. 1461-1472, 8 2015.
- [3] A. Z. Albanna and C. J. Hatziaodoni, "Harmonic Modeling of Hysteresis Inverters in Frequency Domain," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1110-1114, May 2010.
- [4] F. Filho, L. M. Tolbert, Y. Cao and B. Ozpineci, "Real time selective harmonic minimization for multilevel inverters connected to solar panels using Artificial Neural Network angle generation," *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, 2010, pp. 594-598.
- [5] M. Castilla, J. Miret, A. Camacho, J. Matas and L. G. de Vicuna, "Reduction of Current Harmonic Distortion in Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters via Resonant Current Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1464-1472, April 2013.
- [6] A. Kulkarni and V. John, "Mitigation of Lower Order Harmonics in a Grid-Connected Single-Phase PV Inverter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5024-5037, Nov. 2013.
- [7] X. Wang, F. Blaabjerg and Z. Chen, "Synthesis of Variable Harmonic Impedance in Inverter-Interfaced Distributed Generation Unit for Harmonic Damping Throughout a Distribution Network," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, pp. 1407-1417, July-Aug. 2012.

- [8] S. Munir and Y. W. Li, "Residential Distribution System Harmonic Compensation Using PV Interfacing Inverter," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 816-827, June 2013.
- [9] Q. Liu, Y. Deng and X. He, "Boost-type inverter-less shunt active power filter for VAR and harmonic compensation," in *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 535-542, March 2013.
- [10] C. m. Young and S. f. Wu, "Selective harmonic elimination in multi-level inverter with zig-zag connection transformers," in *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 876-885, April 2014.
- [11] J. Xu, T. Tang and S. Xie, "Research on low-order current harmonics rejections for grid-connected LCL-filtered inverters," in *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 5, pp. 1227-1234, May 2014.
- [12] Y. Yang, K. Zhou, H. Wang, F. Blaabjerg, D. Wang and B. Zhang, "Frequency Adaptive Selective Harmonic Control for Grid-Connected Inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 3912-3924, July 2015.
- [13] H. Hu, Q. Shi, Z. He, J. He and S. Gao, "Potential Harmonic Resonance Impacts of PV Inverter Filters on Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 151-161, Jan. 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐนนท์ พันธุ์นิล
วัน เดือน ปีเกิด	24 สิงหาคม 2535
ที่อยู่	10 หมู่ 8 ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110 E-mail: aun_2535_006@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 2.) การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ 3.) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 4.) ระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า
ปัจจุบัน	นักศึกษา ปริญญาโท สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และที่ปรึกษาเทคโนโลยี (ITA) ของโปรแกรมสนับสนุนการพัฒนา เทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP) สวทช.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้