



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลัง

พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า

Power Quality and Electromagnetic Compatibility of Grid Connected

Photovoltaic Power Inverter

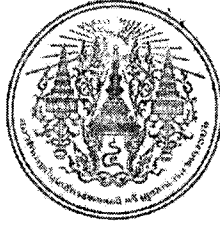
ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาแสน

รศ.ดร.อรรถพล เเงพิทักษ์กุล

ได้รับทุนพัฒนานักวิจัย จากกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลัง
พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อบระบบไฟฟ้า

Power Quality and Electromagnetic Compatibility of Grid Connected
Photovoltaic Power Inverter

ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาสน

รศ.ดร.อรรถพล เเง่พิทักษ์กุล

ได้รับทุนพัฒนานักวิจัย จากกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลัง
พลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อบนไฟฟ้า

แหล่งเงิน ทุนพัฒนานักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 800,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 15 ตุลาคม 2558 ถึง 14 ตุลาคม 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

ผศ.ดร.ชัชยันต์ เจตนาแสน หัวหน้าโครงการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

รศ.ดร.อรุณพล เก่งพิทักษ์กุล ผู้ร่วมโครงการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบนไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยรวม โหมคผลร่วม และโหมคผลต่าง ศึกษาความเป็นไปได้ของรูปแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีค และการใช้วงจรกรอง จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการลดทอนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ออกแบบ และการศึกษาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก รวมทั้งความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าควรใช้วิธีการหลาย ๆ วิธีร่วมกัน เนื่องจากแต่ละวิธีการจะมีการตอบสนองการลดทอนในย่านความถี่ที่แตกต่างกัน การใช้วิธีการต่อลงดินส่งผลให้คุณลักษณะของสัญญาณมีการเลื่อนความถี่จากเดิมและมีสัญญาณรบกวนลดลงเล็กน้อยในความถี่ช่วงปลาย การใช้เฟอร์ไรต์บีคส่งผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 1.5 – 10 เมกะเฮิรตซ์ และการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟส่งผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง 0.15 – 15 เมกะเฮิรตซ์ได้ดีมาก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแบบแยกโหมค พบว่ายังมีการลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างในปริมาณที่เท่ากัน จะยิ่งทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนโดยรวมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนไฟฟ้า สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วม สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลต่าง วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

Research Title: Power Quality and Electromagnetic Compatibility of Grid Connected
Photovoltaic Power Inverter.....

Researcher: Asst.Prof.Dr. Chaiyan Jettanasen.....

Assoc.Prof.Dr. Atthapol Ngaopitakkul.....

Faculty: Engineering..... **Department:** Electrical Engineering.....

ABSTRACT

This research 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. This research investigates the characteristics of the conducted electromagnetic interferences (EMI): conducted emission (CE), common mode (CM), and differential mode (DM), the possibility of electromagnetic interference attenuation using 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 CM and the DM are similar, it will make overall noise reduction more effective.

Keywords: Grid-connected inverter, Electromagnetic interference (EMI), Common mode (CM), Differential mode (DM), Passive EMI filter.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน ทุนพัฒนานักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความอนุเคราะห์จาก นาย ปิยะวิทย์ ศรีโปดก เจ้าหน้าที่ของ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน
รศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	7
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.....	19
2.4.2 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	23
2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss).....	26

สารบัญ

	หน้า
2.5 องค์ประกอบแผง.....	27
2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า.....	28
2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	29
2.5.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	30
บทที่ 3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์	
3.1 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....	31
3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	31
3.1.2 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Shielded room).....	34
3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ.....	38
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	39
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	46
4.2 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง.....	62
4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss).....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้และที่อยู่ระหว่างดำเนินการ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	108
ประวัตินักวิจัย.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกซ์ของอินเวอร์เตอร์.....	2
2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	19
2.3 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Capacitor of Class X).....	20
2.4 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Capacitor of Class Y).....	21
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ประกอบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มี เฟอโรไรต์บีดและตัวกรอง.....	48
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	49
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 1.....	55
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 2.....	56
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 3.....	57
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 4.....	58
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 5.....	59
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 6.....	60
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอโรไรต์บีด และตัวกรองหมายเลข 7.....	61

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	1
1.2 แผนผังการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1 แสดงการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2 โปรแกรมควบคุมและเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
2.3 อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter).....	12
2.4 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.5 เส้นทางการเดินของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.6 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั่วไป.....	20
2.8 ตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างและโหมคผลร่วม.....	23
2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	23
2.10 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมคผลร่วม.....	24
2.11 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง.....	24
2.12 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก.....	27
2.13 ตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	28
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า.....	28
2.15 ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	29
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	29
2.17 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	30
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ.....	30
3.1 ระบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	31
3.2 การตั้งค่าเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
3.3 การเลือกเซลล์แสงอาทิตย์จากโปรแกรม.....	32
3.4 การตั้งค่าสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์.....	33

สารบัญภาพ

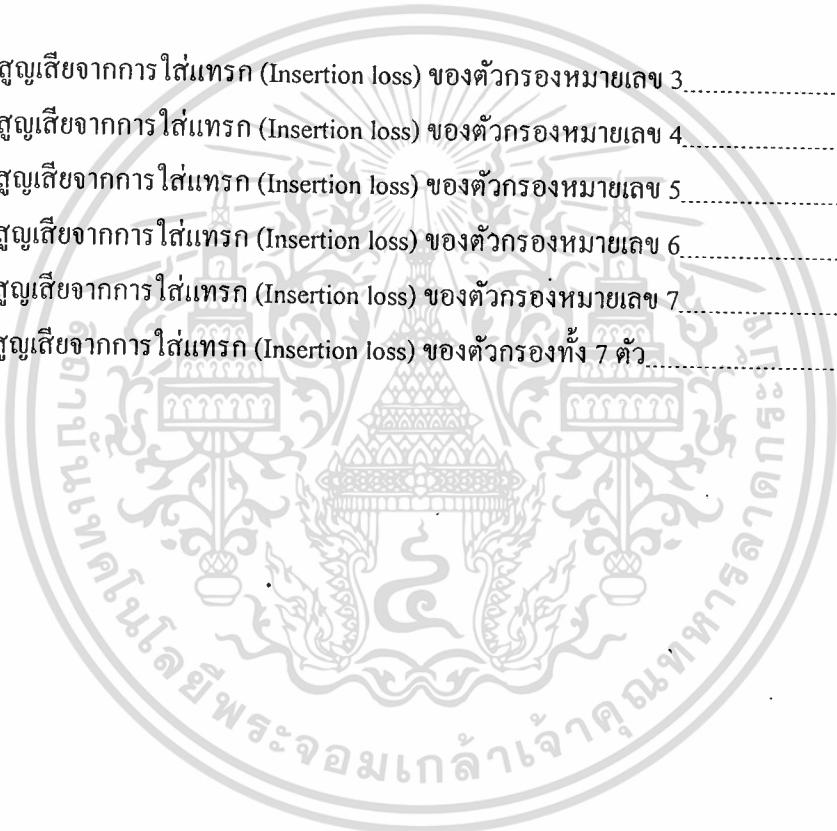
ภาพที่	หน้า
3.5 วิธีการวัดและผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของไฟฟ้า กระแสตรงฝั่งขาออกของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ขาเข้าอินเวอร์เตอร์).....	34
3.6 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Shielded room).....	35
3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสของห้องทดสอบ.....	38
3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	38
3.9 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	41
3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 1.....	43
3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 2.....	43
3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 3.....	43
3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 4.....	44
3.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 5.....	44
3.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 6.....	44
3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 7.....	44
3.17 ขนาดตัวกรองเทียบกับอินเวอร์เตอร์.....	45
4.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อมีและไม่มีเฟอร์ไรต์บีด.....	47
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1.....	51
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2.....	51
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3.....	52
4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4.....	52
4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5.....	53

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเพอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6.....	53
4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเพอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7.....	54
4.9 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อพันเพอร์ไรต์บีดและใส่ตัวกรอง... 54	54
4.10 การวัดสัญญาณรบกวนโหมคผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง.....	62
4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	63
4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน.....	63
4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1.....	64
4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2.....	65
4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3.....	65
4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4.....	66
4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5.....	66
4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6.....	67
4.19 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเพอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7.....	67
4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเพอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร.....	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอร์ไรต์บีด และตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร.....	68
4.22 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกในระบบทดสอบ.....	69
4.23 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 1.....	70
4.24 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 2.....	70
4.25 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 3.....	71
4.26 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 4.....	71
4.27 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 5.....	72
4.28 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 6.....	72
4.29 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 7.....	73
4.30 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองทั้ง 7 ตัว.....	73

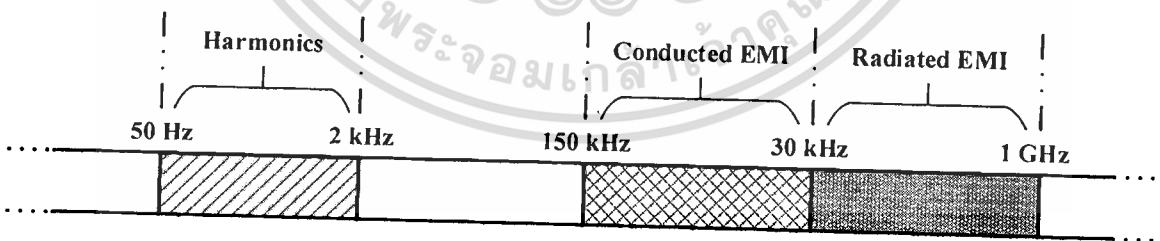


บทที่ 1

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 เฮิรตซ์) สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (ความถี่ 0.15 - 30 เมกะเฮิรตซ์) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (ความถี่ 30 - 1000 เมกะเฮิรตซ์) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า การไฟฟ้าได้มีข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าไว้ว่า “ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า” ในส่วนของข้อกำหนดเทคนิคสำหรับอินเวอร์เตอร์ ด้านการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า กำหนดว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายไฟให้ภาระไฟฟ้าเชิงเส้นที่สมดุล (Balanced Linear Load) อินเวอร์เตอร์

จะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์โมนิกส์จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดดังตารางที่ 1.1 (แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสพิคคของอินเวอร์เตอร์) และต้องควบคุมการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยอินเวอร์เตอร์จะต้องไม่สร้างไฟฟ้ากระแสตรง (DC Injection) จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินกว่า 0.5 % ของกระแสพิคคของอินเวอร์เตอร์ เพราะการไฟฟ้าให้ความสำคัญกับคุณภาพไฟฟ้าทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามาก เนื่องจากสัญญาณรบกวนเหล่านี้มีผลต่อระบบไฟฟ้าทั้งทางด้านความร้อนในสายส่ง รบกวนรีเลย์ป้องกัน และส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 1.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์ [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
ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกส์ (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) แต่ข้อกำหนดเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีฉบับอย่างเป็นทางการ ดังนั้นการทดสอบทั่วไปจะใช้มาตรฐานของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ทั้งการทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ (CE) และการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทาง

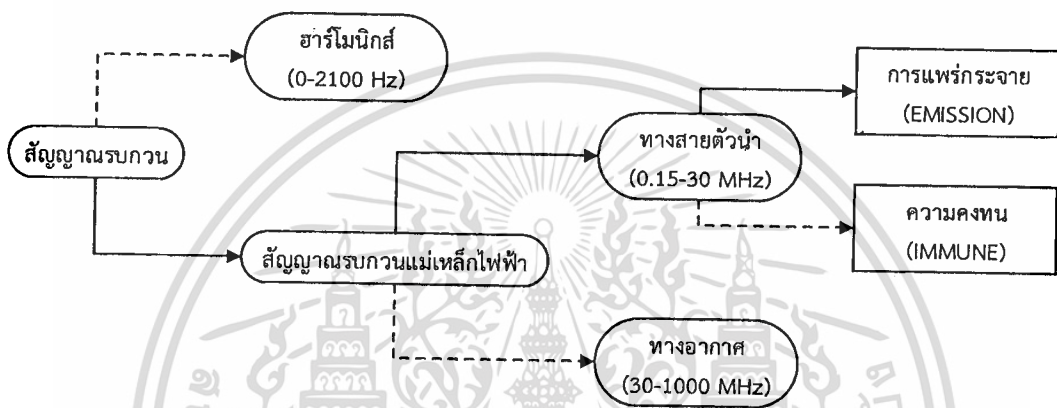
อากาศ (RE) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยอ้างอิงมาตรฐาน EN55022 class B, CISPR17, CISPR14-1, และ CISPR22-B ซึ่งเป็นมาตรฐานของเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นมาตรฐานอ้างอิงไปก่อน

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 สำหรับการศึกษาวิจัยการออกแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแยกเป็น 2 โหมด [15] ได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม [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] ได้ศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟและเน้นการจัดวางอุปกรณ์บนวงจรกรอง มีการศึกษาการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมในทิสแกนสามมิติที่ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าแนวการจัดวางตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมมีผลต่อประสิทธิภาพการลดทอนด้วย

ในงานวิจัยนี้ ได้เน้นการศึกษาการทอนการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ขนาด 300 วัตต์ แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter) เพื่อศึกษาหาเทคนิควิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น รวมถึงการสร้างและเปรียบเทียบวงจรลดทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า ไม่ให้สัญญาณรบกวนนี้ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าในอาคาร โดยใช้ “มาตรฐาน CISPR14-1” เป็นเกณฑ์มาตรฐานควบคุมสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และทำการเปรียบเทียบวงจรของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีส 7 วงจรที่แตกต่างกัน เพื่อหารูปแบบวงจรที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งการใช้เฟอร์ไรต์บีดและการต่อลงดินช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนอีกด้วย ซึ่งสามารถเป็นต้นแบบและแนวทางสำหรับการลดทอนสัญญาณรบกวนทางตัวนำที่เหมาะสมและเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจในอนาคตได้



รูปที่ 1.2 แผนผังรูปแบบการทดสอบสัญญาณรบกวน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตามที่พักอาศัย สำนักงาน หรือ ภาคอุตสาหกรรม โดยพิจารณาจากระบบที่มีใช้ในท้องตลาดทั่วไป
- 1.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ตามที่พักอาศัยตามหลักเกณฑ์ที่การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2.4 ศึกษาหลักการต่างๆ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สวิตชิงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและสอดคล้องตามที่มาตรฐานกำหนด
- 1.2.5 ออกแบบและสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะและการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า ด้วยวิธีการต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด (Ferrite bead) และการใช้ตัวกรองชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) ในการศึกษาจะออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟที่แตกต่างกัน ทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนและเปรียบเทียบสัญญาณที่ลดทอนได้ เพื่อหาวงจรที่เหมาะสมต่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกจากอินเวอร์เตอร์ไปยังระบบไฟฟ้าภายในอาคาร (ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ปีที่ 1

1) การดำเนินงานในเดือนที่ 1

- จัดเตรียมอุปกรณ์หลักที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด ได้แก่ โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง อุปกรณ์สำหรับสร้างชุดต้นแบบ อุปกรณ์และเครื่องมือวัด เป็นต้น
- ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุก ๆ ด้าน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบการต่อเชื่อม ชนิดและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ชนิดตัวกรองสัญญาณ มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ ตัวอย่างการติดตั้งใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนกระบวนการจ่ายไฟฟ้าคืนกลับเข้ากริดของการไฟฟ้า

2) การดำเนินงานในเดือนที่ 2 ถึงเดือนที่ 5

- นำข้อมูลที่รวบรวมได้จากเดือนที่ 1 มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบการนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ การเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ หลักการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพด้านพลังงาน คุณภาพสัญญาณ และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น
- สร้างแบบจำลองการใช้เซลล์แสงอาทิตย์และจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เพื่อศึกษาคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์
- ออกแบบการจำลองอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMI filter และปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า จากนั้นเปรียบเทียบผลการลดทอนที่ได้จากการใช้ EMI filter ที่มีโครงสร้างต่างกันออกไป
- พิจารณาค่าคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนที่ได้จากการจำลองเทียบกับมาตรฐานที่ใช้เชื่อมต่อระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในประเทศไทย

3) การดำเนินงานในเดือนที่ 6

- ในเดือนที่ 6 จัดทำรายงานความก้าวหน้าในหกเดือนแรกส่ง สจล.

4) การดำเนินงานในเดือนที่ 7 ถึงเดือนที่ 12

- นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมาวิเคราะห์ถึงคุณภาพสัญญาณทางไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกรองสัญญาณแบบต่างๆที่ได้ทำการจำลองไว้
- ออกแบบการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด อุปกรณ์ และอินเวอร์เตอร์ ที่เหมาะสมกับการใช้งานตามอาคารบ้านเรือน
- ในเดือนที่ 9 เริ่มทำการสร้างชุดทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อพิจารณาค่าที่ได้จากชุดทดลองกับค่าข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม โดยชุดทดลองได้ทำการติดตั้ง เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์อื่นๆ และเครื่องมือวัด เพื่อทำการวัดค่าและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ เช่น ค่าพลังงานที่ได้, ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor), ค่าฮาร์มอนิกส์หรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เป็นต้น

5) การดำเนินงานในเดือนที่ 10 ถึงเดือนที่ 11

- รวบรวมผลการวิจัยในปีแรกและนำมาเขียนบทความวิชาการ

6) การดำเนินงานในเดือนที่ 12

- จัดทำรายงานสรุปผลงานในปีแรกส่ง สจล.

ปีที่ 2

1) การดำเนินงานในเดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 2

- นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองและการทดลองจริงทั้งหมดของปีแรกมาทำการสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์และรวบรวมผลการวิจัย จากนั้นนำมาเขียนบทความวิชาการ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

2) การดำเนินงานในเดือนที่ 3 ถึงเดือนที่ 8

- ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งในย่านความถี่ต่ำ และความถี่สูง และพิจารณาระดับของสัญญาณรบกวนโดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนด
- ในเดือนที่ 5 รวบรวมผลการวิจัยในปีแรกและนำมาเขียนบทความวิชาการ
- ในเดือนที่ 6 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ส่ง สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในกรณีที่คุณภาพไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าไม่เป็นตามที่มาตรฐานกำหนด จะทำการหาวิธีปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและทำการการลดทอนสัญญาณรบกวนให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยของระบบข้างเคียงและตัวระบบเอง

- เชื่อมต่อโซลาร์อินเวอร์เตอร์กับกริดการไฟฟ้า

3) การดำเนินงานในเดือนที่ 9 ถึงเดือนที่ 11

- นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการปรับปรุงตัวต้นแบบให้มีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีและสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้

4) การดำเนินงานในเดือนที่ 12

- จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ส่ง สจล.

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

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [17-19]

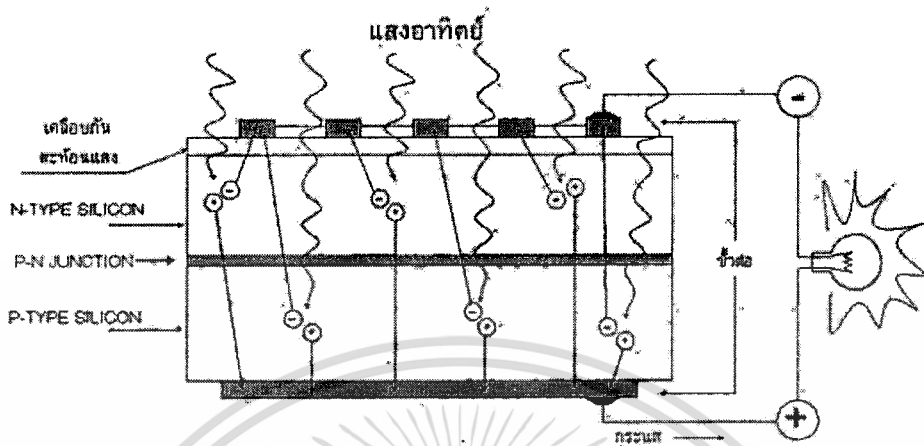
พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานสะอาดที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดในปัจจุบัน แต่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้นั้นยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะกลางวันและมีความเข้มแสงไม่คงที่แน่นอน ขึ้นกับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะมีความเข้มแสงประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร 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 ด้วยการนำสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอนมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.1 รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับ อิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น องค์ประกอบหลักของ “เซลล์แสงอาทิตย์” คือ สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด มาต่อกัน ซึ่งเรียกว่า “P-N Junction” เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและช่องว่างอิสระไปรออยู่ที่ขั้วต่อ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมกับวงจรภายนอก เช่น หลอดไฟ มาต่อคร่อมขั้วต่อ ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนไปยังช่องว่างอิสระ ที่ให้เกิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับวงจรภายนอกได้ และจะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ตราบเท่าที่ยังมีแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที หรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้งานภายหลังได้



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 ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย

2.1.2 เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator)

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

เปลี่ยนแปลงสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิตามรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์จริงได้อีกด้วย ทำให้สะดวกต่อการใช้งานในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการที่ไม่สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้และยังประหยัดพื้นที่การทำงาน เนื่องจากเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับการใช้เซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน จึงสามารถลดความจำเป็นในการใช้พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2

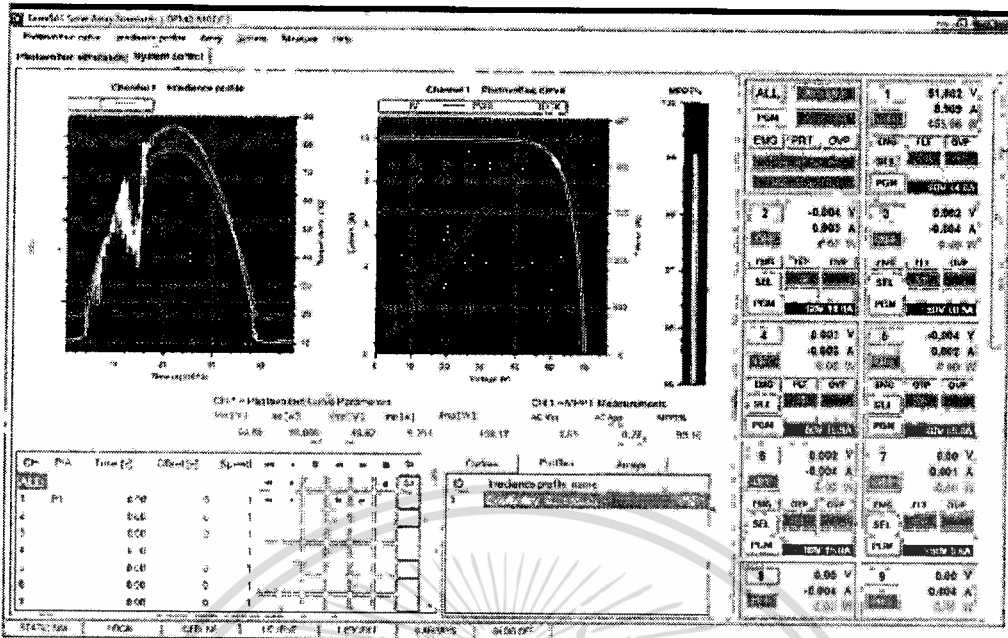
นอกจากนี้อีกหนึ่งเหตุผลที่ใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนการใช้แบตเตอรี่ คือ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน กำลังไฟฟ้าจะถูกดึงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย อินเวอร์เตอร์จะดึงกำลังไฟฟ้าในอัตราสูงสุด ซึ่งอาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมได้เร็วและอาจมีผลต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถควบคุมอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสตรงให้เหมาะสมตามคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

Terrestrial Solar Array Simulator (TerraSAS) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการกำหนดค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ตามคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนด โดยนำข้อมูลเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตหรือที่ถูกสร้างขึ้นมาป้อนลงในโปรแกรม ซึ่งเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้พิกัดในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ (600 โวลต์ 8.3 แอมป์)



ก. เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

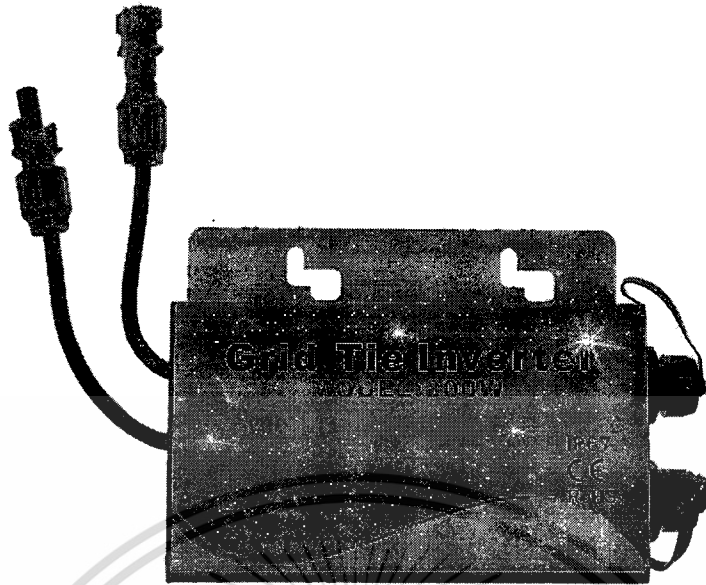


ข. โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (TerraSAS) รูปที่ 2.2 โปรแกรมควบคุมและเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

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



รูปที่ 2.3 อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected inverter)

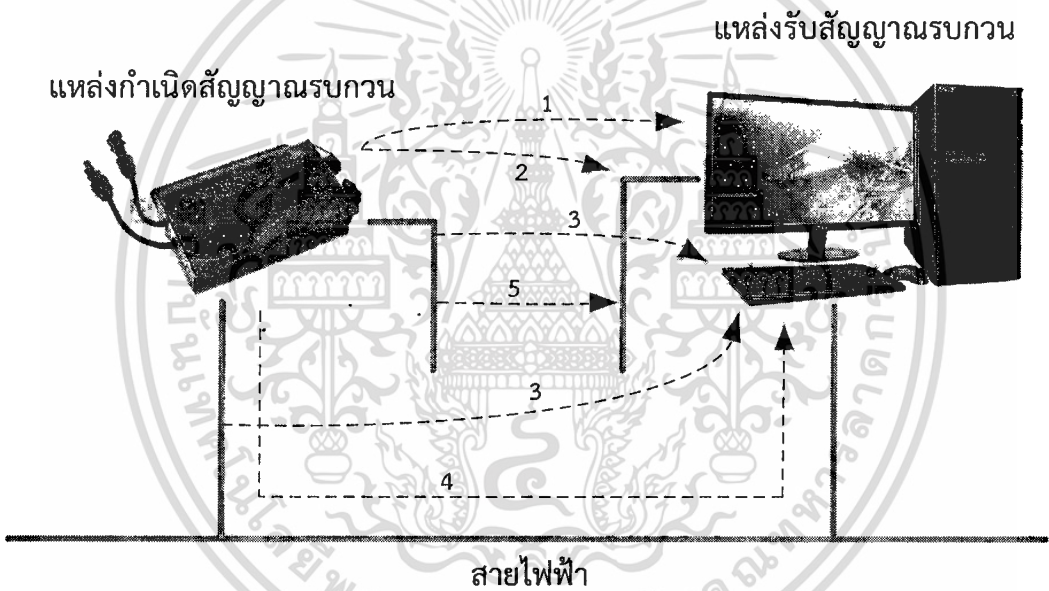
2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

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

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

ธรรมชาติและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ถูกสร้างขึ้น 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

รูปแบบที่ 3 Indirect-radiated Emission : สายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่ 4 Conducted Emission : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบ โดยผ่านทางสายตัวนำที่เชื่อมต่อกันกับตัวรับผลกระทบ

รูปแบบที่ 5 Semi-conducted Emission : สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ

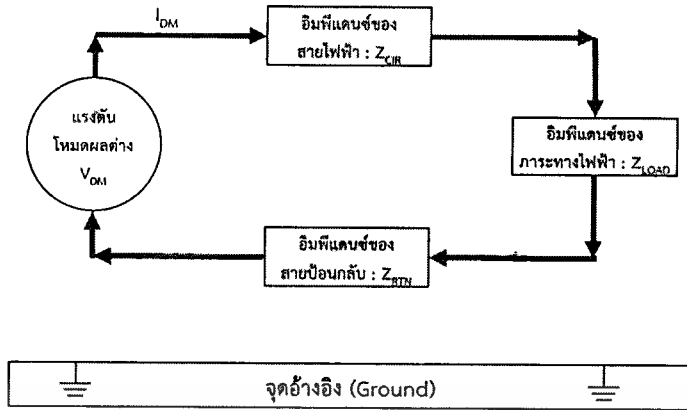
เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดนั้นสามารถสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ จำเป็นต้องลดการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงการทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นทนต่อการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์อื่นด้วย [20-26]

2.3.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

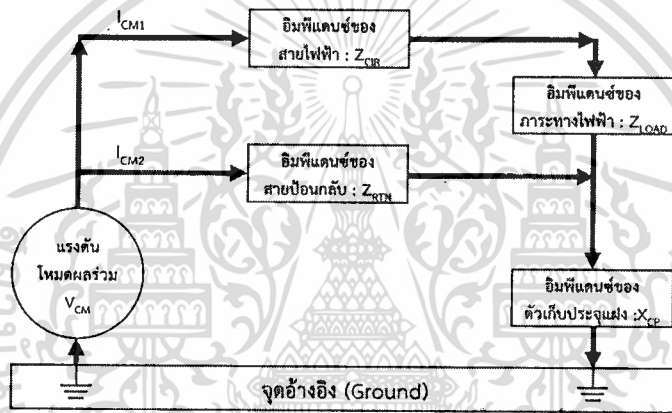
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดและสามารถเดินทางไปยังอุปกรณ์อื่น โดยอาศัยตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อถึงกัน อาทิเช่น สายส่งกำลัง สายสัญญาณควบคุม หรือสายดิน มีความถี่อยู่ในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 โหมดหลักได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common Mode Interference) ตามรูปที่ 2.5



ก. เส้นทางไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม



ข. ลักษณะการไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



ค. ลักษณะการไหลของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

รูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (Common Mode Interference)

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ปรากฏขึ้นระหว่างจุดอ้างอิง (สายดิน) กับสายตัวนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ทั้งคู่เปลี่ยนแปลงพร้อมกันและมีปริมาณสัมพันธ์กันกับจุดอ้างอิง [27] โดยสัญญาณดังกล่าวเกิดจากค่าความเก็บประจุแฝงในวงจรไฟฟ้า ซึ่งตามธรรมชาติค่าความเก็บประจุนี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อมีสัญญาณความถี่สูงไหลผ่าน นั่นหมายความว่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง ๆ สามารถไหลจากสายตัวนำเส้นหนึ่ง ไปอีกเส้นหนึ่งผ่านตัวเก็บประจุแฝงในอากาศได้ตามรูปที่ 2.5 โดยแรงดันโหมดผลร่วม (V_{CM}) เกิดจากกระแสโหมดผลร่วม (I_{CM1}) จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CR}) และภาระทางไฟฟ้า (Z_{LOAD}) แล้วไหลลงสายดินรวมกับกระแสโหมดผลร่วม (I_{CM2}) ที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (Z_{RTN}) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแรงดันของ

สัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับแรงดันของสัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseRTN}$) ตามสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

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

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

สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference)

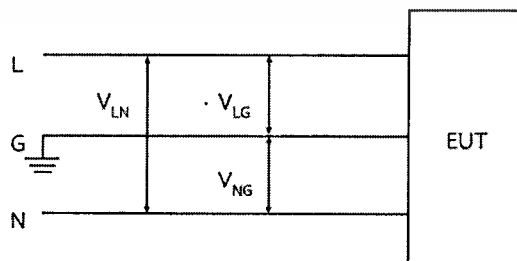
สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างเกิดจากสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างสองสายตัวนำ คือ ตัวนำสัญญาณไป (Signal Line) และตัวนำสัญญาณกลับ (Return Line) มีรูปแบบหรือขนาดแตกต่างกัน [27] ทางเดินของสัญญาณรบกวนในวงจรจะไหลดังรูปที่ 2.5 กระแสโหมดผลต่างจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CIR}) และไหลกลับมาที่อิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (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 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรลกับกราวด์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)



รูปที่ 2.6 การวัดค่าสัญญาณรบกวน [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน และอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้สามารถสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์ได้ ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ดังนั้นหน่วยงานต่าง ๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานขึ้น เพื่อบังคับไม่ให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานและความปลอดภัย มาตรฐานที่กำหนดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีมากมายขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ สถานที่ใช้งาน และรูปแบบการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานสากล กำหนดโดย 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	เครื่องรับการกระจายเสียงและสัญญาณ โทรทัศน์และบริภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง (Sound and television broadcast receivers and associated equipment)
CISPR 14	EN 55014	มอก. 2238	เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน (Household Appliances, Electric tools and Similar Apparatus) [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CISPR 15	EN55015	มอก. 1955	บริษัทส่งสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน (Lighting and Similar Equipment)
CISPR 16	EN55016	-	อุปกรณ์การวัด (Measurement apparatus/methods)
CISPR 22	EN55022	มอก. 1956	บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information technology equipment)
CISPR 25	EN55025	มอก. 2326	ยานยนต์ (Vehicles, boats and internal combustion engines)

2.3.3 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

การทดสอบการแผ่กระจายของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำจะต้องทดสอบในห้องที่
ได้รับการรับรองมาตรฐาน รวมถึงมีการจัดวางอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานด้วย ค่า
ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ
อุปกรณ์ที่จะทดสอบ และประเทศที่จะนำสินค้าขึ้นไปใช้งาน ส่วนใหญ่สินค้าจะมีการสอบเทียบกับ
มาตรฐานในหลายประเทศ เช่น มาตรฐานสากล มาตรฐานยุโรป หรือมาตรฐานอุตสาหกรรม
(มอก.) ของไทย จะยกตัวอย่างการทดสอบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ
เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน (Household
Appliances, Electric Tools and Similar Apparatus) ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก.2238
[39] หรือ EN55014 หรือ CISPR14 [40] ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานมีค่าในการทดสอบเหมือนกันเนื่องจาก
มาตรฐาน มอก.2238 ของไทยอ้างอิงมาจาก CISPR14 และมาตรฐาน EN55014 ของยุโรปก็อ้างอิง
มาจากมาตรฐานสากล CISPR14 เช่นเดียวกัน โดยการทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทาง
สายตัวนำของอินเวอร์เตอร์จะทดสอบในหัวข้อเครื่องใช้และบริภัณฑ์ภายในที่อยู่อาศัยที่ทำให้เกิด
สัญญาณรบกวนที่คล้ายกัน ฟังด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังตารางที่ 2.2 ที่ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์
ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะวัดค่าสูงสุด (Peak) ค่ายอด
เสมือน (Quasi-Peak: QP) และค่าเฉลี่ย (Average: AV) โดยค่าสูงสุดนั้นจะใช้ในมาตรฐานทางทหาร
แต่ในมาตรฐานทั่วไปไม่ได้มีข้อกำหนดสำหรับค่านี้ ดังนั้นค่าที่มาตรฐานทางการค้าทั่วไปจะ
กำหนดมีเพียงแต่ค่ายอดเสมือนและค่าเฉลี่ยเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (CISPR 14-1)

พิสัยความถี่ (MHz)	ที่ขั้วต่อโหนดและขั้วต่อเพิ่มเติม	
	ค่ายอดเสมือนdB(μ V)	ค่าเฉลี่ยdB(μ V)
0.15 ถึง 0.50	ลดลงเชิงเส้นด้วยลอการิทึมของความถี่จาก	
	80	70
0.50 ถึง 5	74	64
5 ถึง 30	74	64

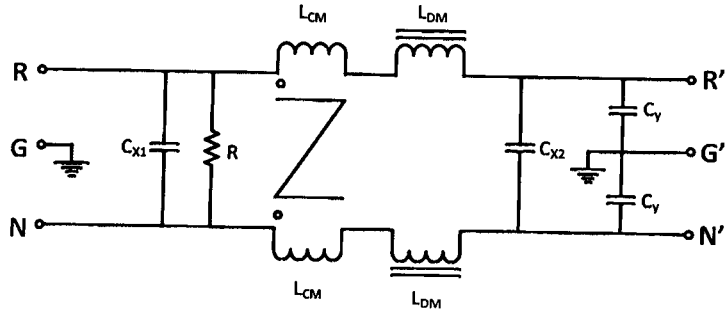
2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำชนิดพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) นั้นมีลักษณะและคุณสมบัติเหมือนวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยเน้นกรองในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่มาตรฐานกำหนด วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้ง 2 โหมด ได้แก่ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ซึ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนนี้มีหลายประเภท ได้แก่ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) [20,22,24-26] วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแอคทีฟ (Active EMI Filter) [29-30] และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไฮบริด (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)
- ตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Common Mode Capacitor: C_Y)
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke: L_{DM})
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (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 14: Sectional specification – Fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains) มาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Capacitor of Class X) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ X1 และ X2 ตามตารางที่ 2.3 [32]

ตารางที่ 2.3 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $0,5 \times C_N/P2$ 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.

ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Common mode capacitor: C_v)

ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมมีหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม มักใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่สูง โดยตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมที่จะนำมาใช้นี้จะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60384-14 ด้วยมาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุ โหมดผลร่วม (Capacitor of Class Y) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ Y1, Y2 และ Y4 ตามตารางที่ 2.4 [33]

ตารางที่ 2.4 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (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	$\leq 500 \text{ V}$	$U_p = 8,0 \text{ kV}$
Y2	Basic insulation or supplementary insulation	$\geq 150 \text{ V}$ $\leq 500 \text{ V}$	When $C_N \leq 1,0 \mu\text{F}$ $U_p = 5 \text{ kV}$ When $C_N > 1,0 \mu\text{F}$ $U_p = \frac{5}{\sqrt{\frac{C_N}{10^{-6} \text{ F}}}}$ in kV
Y4	Basic insulation or supplementary insulation	$< 150 \text{ V}$	$U_p = 2,5 \text{ kV}$

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 $0.5 \times C_N/P2$ 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟจำเป็นต้องตัดขาของตัวเก็บประจุให้สั้นที่สุด เนื่องจากขาของตัวเก็บประจุจะมีคุณลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Lead Inductance) ซึ่งส่งผลให้ค่าความเก็บประจุเสียไปในย่านความถี่สูงได้

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

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

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

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

โดยที่

C_Y คือ ค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม

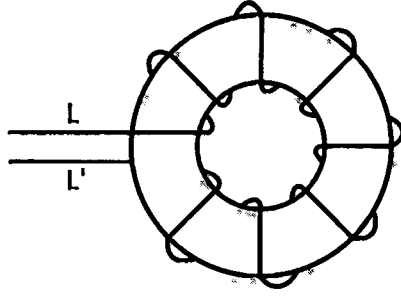
I_g คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสายดิน

U_m คือ ค่าแรงดันของระบบที่ใช้งาน

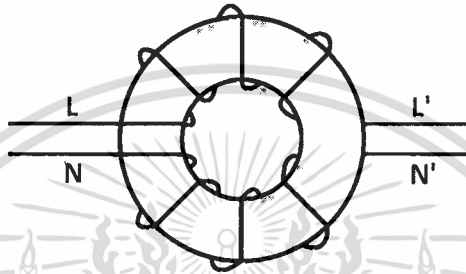
f_m คือ ค่าความถี่ของระบบที่ใช้งาน

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)

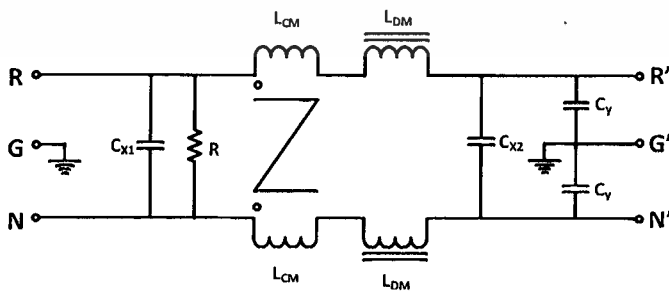


ข. ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke)

รูปที่ 2.8 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างและโหมดผลร่วม

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

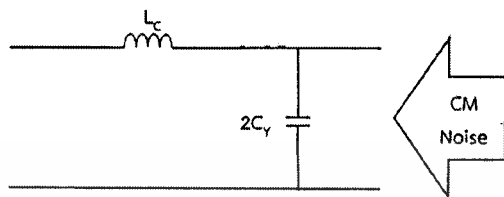
2.4.2 หลักการทำงานของวงจรรองสัญญาณรบกวนชนิดพาสซีฟ [34-39]



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

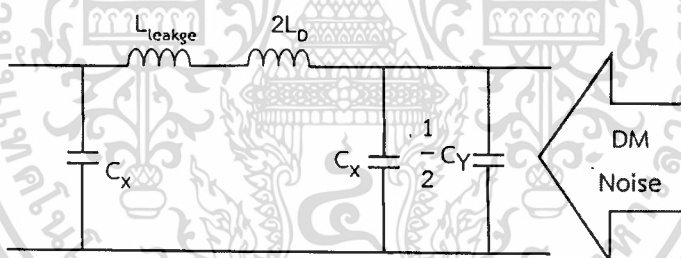
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ มีวงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้งโหมดผลต่างและโหมดผลร่วม อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (L_{CM}) และตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (C_V) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วมในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณ โหมดผลร่วม

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณ โหมดผลต่าง ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_{DM}) ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม ($L_{leakage}$) ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (C_V) และตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_x) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลต่างในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณ โหมดผลต่าง

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

การคำนวณพารามิเตอร์จะคำนวณจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมก่อน เนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (L_{CM}) จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม ($L_{leakage}$) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลนี้ถูกใช้ในการ

คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง (L_{DM}) ด้วย ดังนั้นลำดับการออกแบบจึงมีความสำคัญ เพื่อไม่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มีค่าสูงเกินไปหรือความถี่ตัดผิดเพี้ยนไปจากที่กำหนดไว้

การคำนวณสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วม เริ่มจากการกำหนดค่าความถี่ตัดโหมคผลร่วมและเลือกตัวเก็บประจุโหมคผลร่วม (C_Y) โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ควรเป็นตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) มีค่าไม่เกิน 3.3 นาโนฟารัด จากนั้นคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม (L_C) ตามสมการที่ 2.8

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

โดยที่ $f_{R,CM}$ คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วม
 L_{CM} คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วม
 C_Y คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วม

ต่อมาหาค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม (L_C) ไปหาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม ($L_{leakage}$) ทั้งจากการวัดค่าและการคำนวณ สำหรับการคำนวณสามารถประมาณค่าได้ โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหล ($L_{leakage}$) มีค่าประมาณ 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม (L_C) (โดยทั่วไปใช้ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์) [36-37]

ต่อมาหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง โดยกำหนดค่าความถี่ตัดโหมคผลต่างและเลือกค่าความเก็บประจุโหมคผลต่าง (C_X) แล้วคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง (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 ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลต่าง
 L_D คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลต่าง
 C_X คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลต่าง

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างที่ต้องพันเพิ่ม เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม ($L_{leakage,CM}$) เป็นส่วนหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง (L_D) ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องพันเพิ่มคือผลต่างระหว่างค่าความเหนี่ยวนำ

โหมคผลต่าง (L_D) และค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวม ($L_{leakage, CM}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.10

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

โดยที่ L_{DM} คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างที่ต้องพันเพิ่ม

ในท้ายที่สุดเพื่อให้ตัวเก็บประจุโหมคผลต่างคายประจุได้และทำงานได้ดีขึ้น วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบางตัวจึงได้ติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง โดยค่าตัวต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

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

โดยที่ R คือ ค่าตัวต้านทานที่ติดตั้งขนานกับตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง
 C_X คือ ค่าตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง

2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) [25-26]

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละตัวมีคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาประกอบ รวมทั้งชนิดของอุปกรณ์และรูปแบบการประกอบ ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) เป็นค่าคุณลักษณะที่สามารถบอกได้ว่าการลดทอนสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ของวงจรกรองสัญญาณนี้มีลักษณะเป็นอย่างไร

ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก เป็นค่าที่เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณและหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณหาได้จากสมการที่ 2.12-2.14 มีหน่วยเป็น เดซิเบล แต่เพื่อให้การวัดผลง่ายขึ้น จึงใช้ค่าแรงดันเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ 2.14

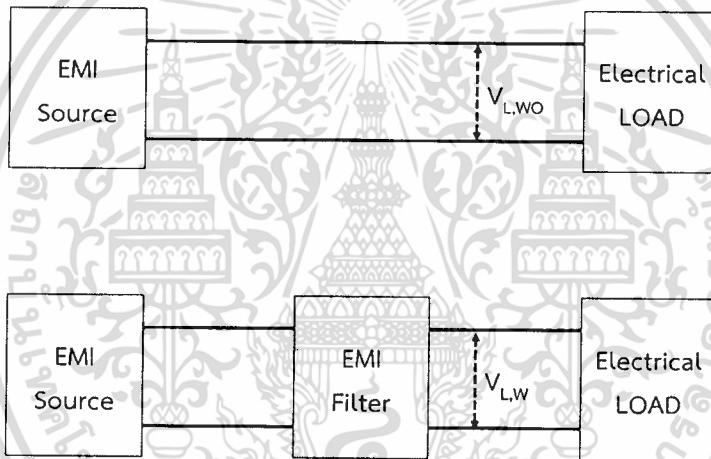
$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{L,wo}}{P_{L,w}} \right) \quad (2.12)$$

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

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

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 ที่ความถี่สูง คุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งหมดล้วนเกิดขึ้นจากองค์ประกอบแฝงที่อยู่ในอุปกรณ์นั้น โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดองค์ประกอบแฝง อาทิเช่น ขาของอุปกรณ์ในวงจรที่ยาวเกินไป อาจทำให้เกิดความต้านทานและความเหนี่ยวนำได้ และการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำอาจทำให้เกิดความเก็บประจุระหว่างขดลวดได้

2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

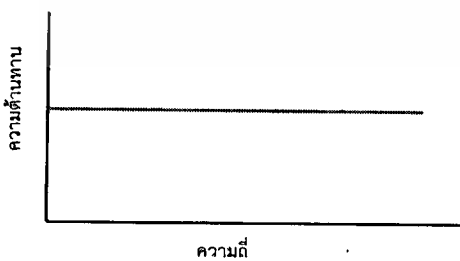
ตัวต้านทาน เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance: L_s) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) ขึ้น ดังรูปที่ 2.13 โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝง นี้เกิดจากความยาวขาของตัวต้านทาน ยิงขาของตัวต้านทานยาวจะส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำแฝงสูง และค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดการถ่ายเทประจุความถี่สูงที่ขาทั้งสองของตัวต้านทาน ยิงขาของตัวต้านทานยาวจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงก็จะสูงตามไปด้วย ในรูปที่ 2.14 แสดงขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ 2.15 แต่ตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ 2.16 และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวต้านทานในทางอุดมคติเปรียบเทียบกับกรณีมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติแล้วจะได้ดังรูปที่ 2.14

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

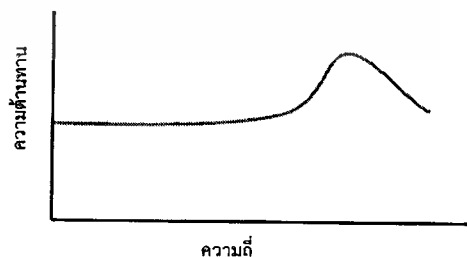
ตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R + j2\pi f L_s} + j2\pi f C_p}$ (2.16)



รูปที่ 2.13 ตัวต้านทาน ไฟฟ้าในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



ก. ในอุดมคติ



ข. เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า

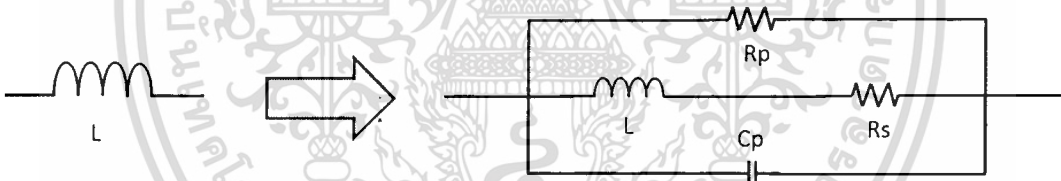
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

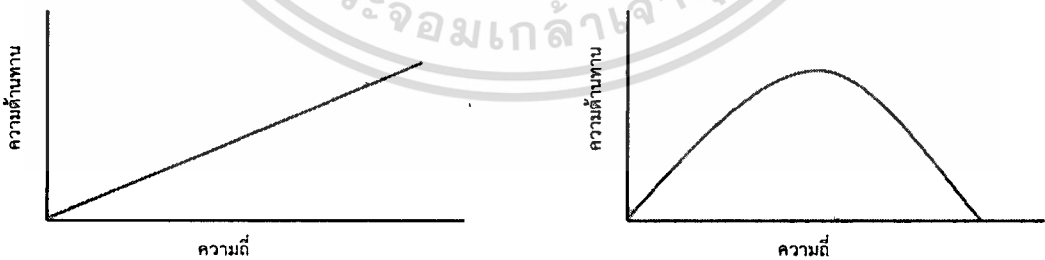
ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อนำมาใช้ที่ความถี่สูงองค์ประกอบแฝงประกอบด้วย ค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p, R_s) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) โดยเป็นผลขององค์ประกอบแฝงมาจากช่องว่างระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำทำตัวเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวด 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



ก. ในอุดมคติ

ข. เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

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

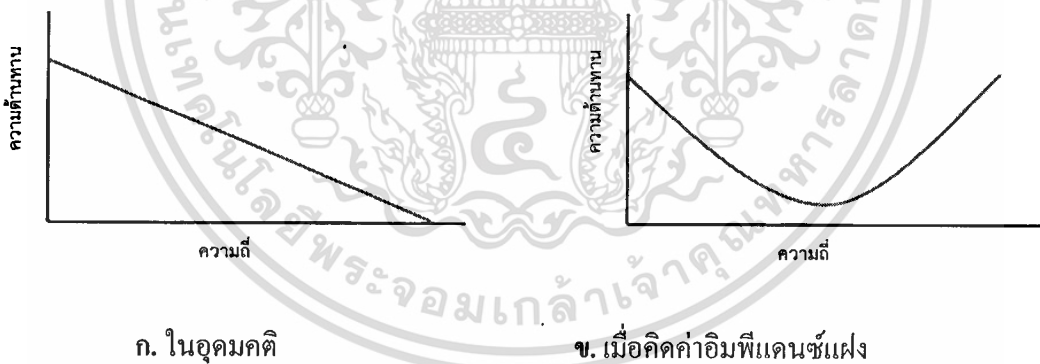
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ
$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi f c} \tag{2.19}$$

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง
$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi f C + \frac{1}{R_p}} + j2\pi f L_s + R_s$$

(2.20)



รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



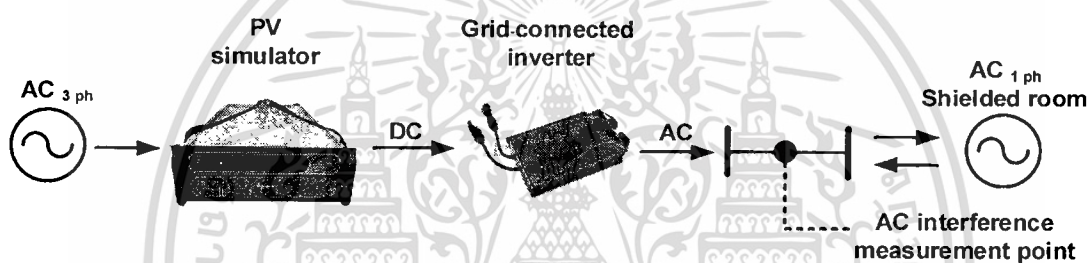
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ

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 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร กระแสไฟฟ้าสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ และค่าแก้ไขความเข้มแสง ซึ่งค่าเหล่านี้ควรตั้งให้ใกล้เคียงกับความต้องการของระบบที่กำหนด หัวข้อที่สองคือสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเลือกจากโปรแกรมหรือกำหนดขึ้นเองก็ได้ดังรูปที่ 3.4

Add Curve (SNL)

Curve parameters
 Voc: 50.000 V Isc: 5.000 A
 Vmp: V Imp: A
 FF: 0.80 Use fill factor

Temperature coefficients
 Bv: -0.360 %/K Bp: -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

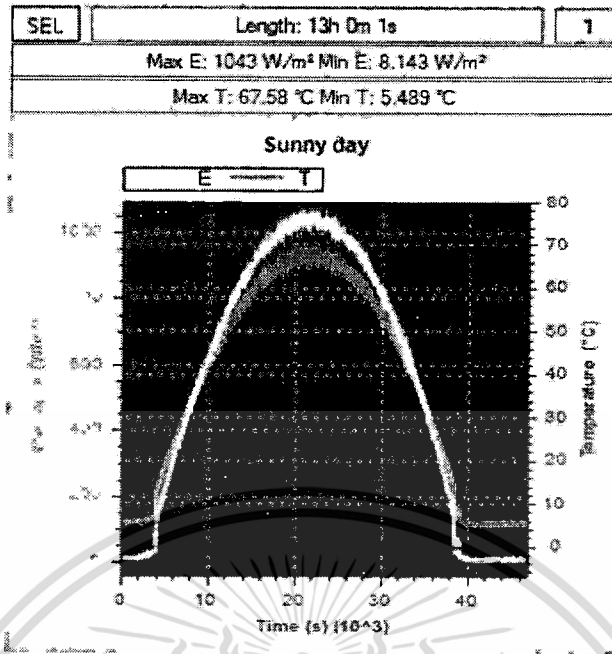
Showing: Keyword search

Sandia modules	513 entries	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	β [1/°C]
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 503 160 [2007 (E)]		43.50	5.10	35.60	4.65	-0.152
Aleo 503 165 [2007 (E)]		43.60	5.20	35.80	4.65	-0.152
Aleo 516 165 [2007 (E)]		30.00	7.90	23.30	7.08	-0.110
Aleo 516 170 [2007 (E)]		30.10	7.95	23.50	7.23	-0.110
Aleo 516 175 [2007 (E)]		30.20	8.10	23.70	7.36	-0.110
Aleo 516 180 [2007 (E)]		30.30	8.15	23.90	7.53	-0.110
Aleo 516 185 [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	7.22	16.82	6.62	-0.085

Available databases: TerraSAS; 2014.1.14 Sandia Labs modules CEC modules

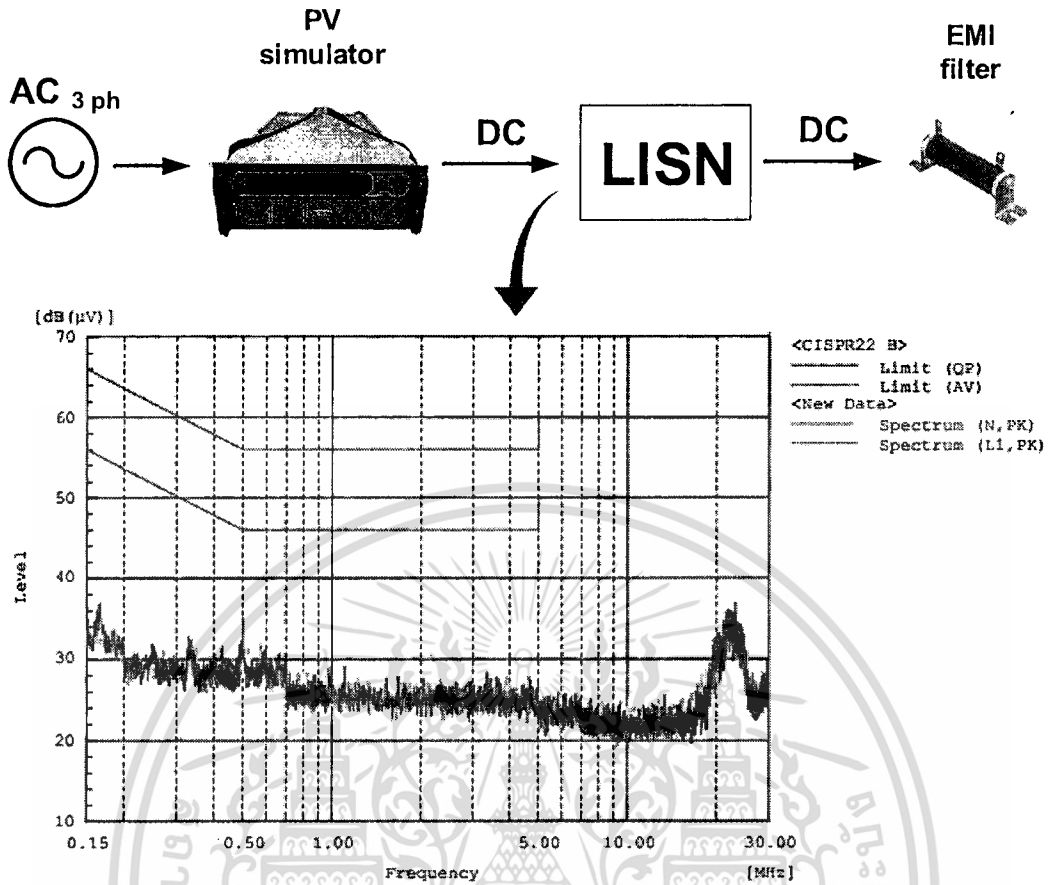
รูปที่ 3.3 การเลือกเซลล์แสงอาทิตย์จากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การตั้งค่าสภาพอากาศและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์

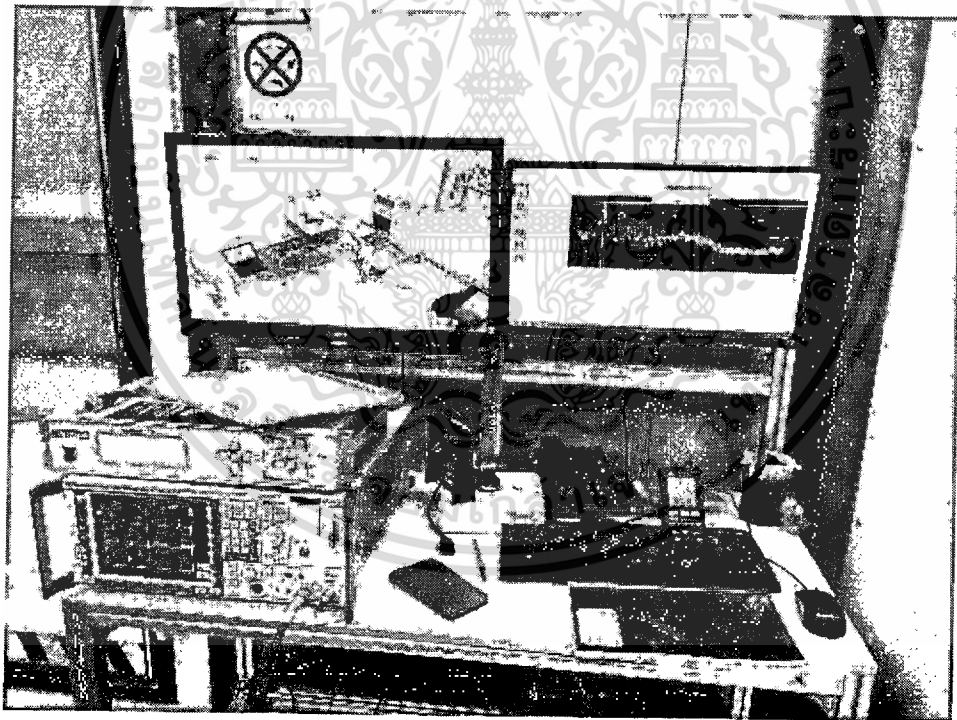
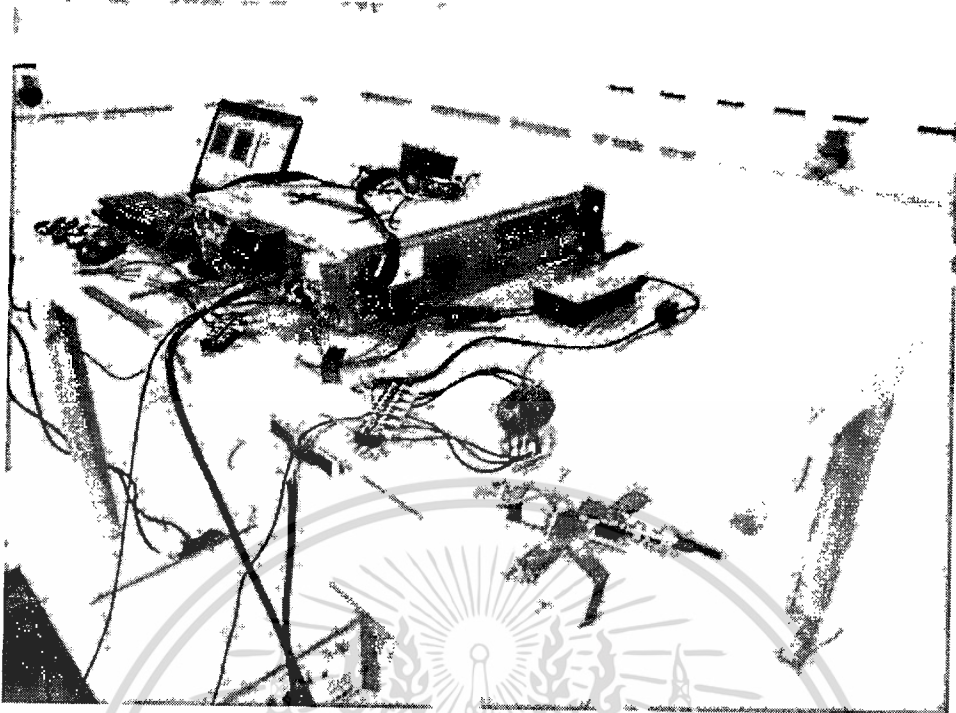
งานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบ อุณหภูมิ และความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ให้คงที่ เนื่องจากการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการวัด จึงจำเป็นต้อง กำหนดค่าต่าง ๆ ให้คงที่ เพื่อความแม่นยำในการวัด เมื่อทำการตั้งค่าเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แล้ว ได้ทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ทั้งฝั่งขาเข้าและขาออกของเครื่อง จำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (Input and output of PV simulator) พบว่าสัญญาณรบกวนของเครื่องทั้งสองฝั่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำฝั่งขาเข้า เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ทำการวัดผ่านตัววัด (LISN) ผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนฝั่งขาเข้ามีผลต่อสัญญาณรบกวนฝั่งขาออกน้อยมาก และผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำฝั่งขาออกเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ทำการวัดผ่านตัววัด (LISN) และใช้ตัวต้านทานเป็นภาระไฟฟ้าดังในรูปที่ 3.5 สัญญาณนี้เป็นกรณีพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากระแสตรงของการทดลองนี้ เนื่องจากเป็นสัญญาณขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ และพบว่าสัญญาณดังกล่าวมีค่าต่ำมาก แต่จะมีการกระเพื่อมของสัญญาณเล็กน้อยที่มีความถี่ประมาณ 2 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.5 วิธีการวัดและผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของไฟฟ้ากระแสตรงฝั่งขาออกของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ขาเข้าอินเวอร์เตอร์)

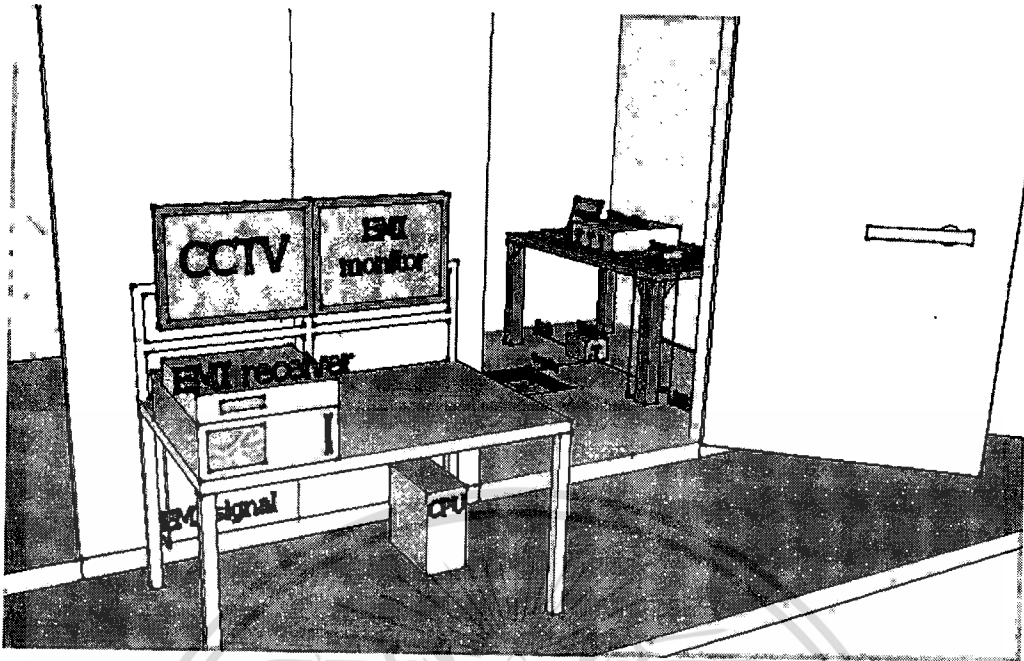
3.1.2 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เป็นห้องที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกอย่างสมบูรณ์ทั้งทางผนังห้องที่มีการปิดด้วยแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนทางอากาศ การต่อลงดินของอุปกรณ์และตัวห้องที่ทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินต่ำมาก และในระบบไฟฟ้ามีการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนจากระบบไฟฟ้าภายนอกห้องไม่ให้เข้าในห้องทดสอบอีกด้วย ดังนั้นทำให้ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้มีความเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูงอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.6

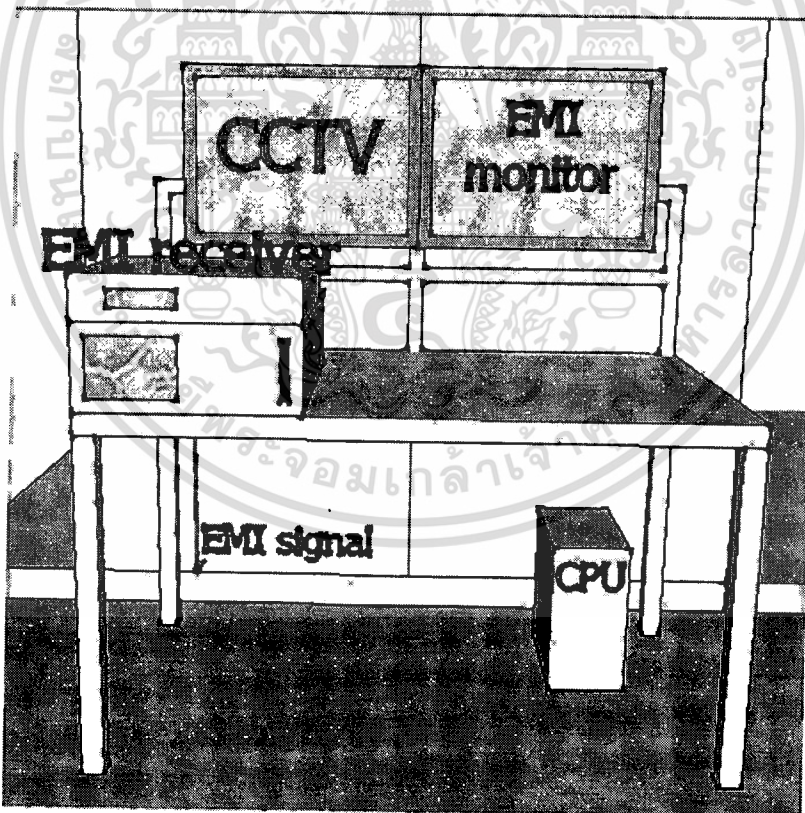


ก. ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

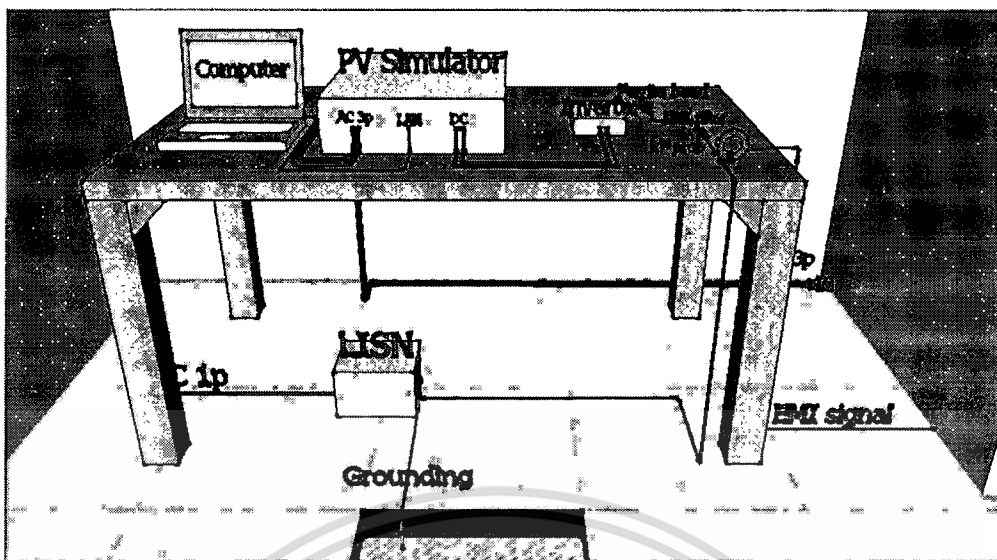


ข. ภาพจำลองห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

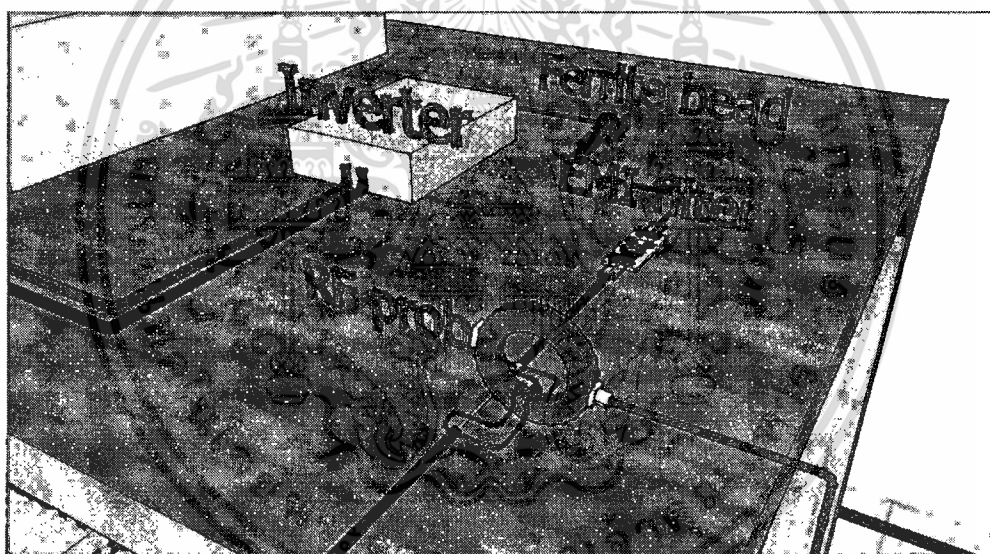


ค. ภาพจำลองเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



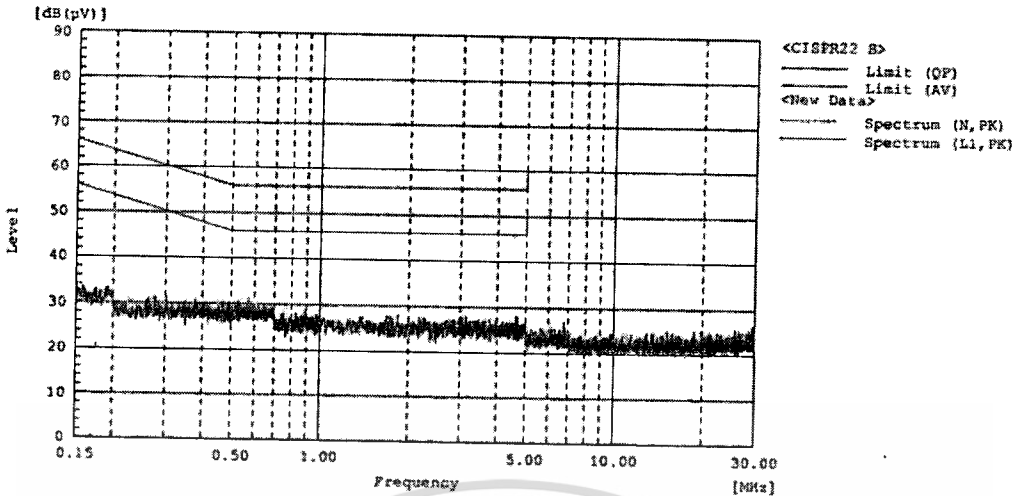
ง. ภาพจำลองระบบชุดทดลองที่ศึกษา



จ. ภาพจำลองอุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 3.6 ห้องทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Shielded room)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

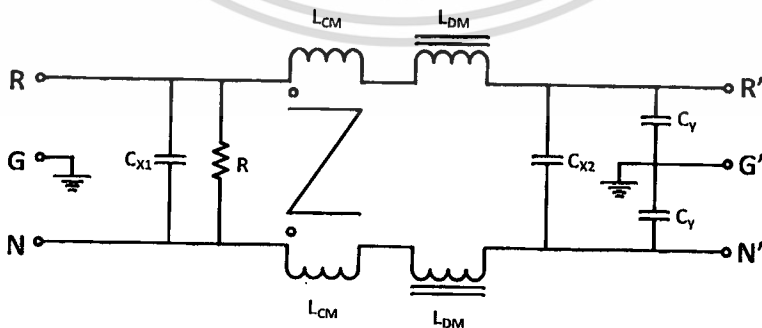


รูปที่ 3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสของห้องทดสอบ

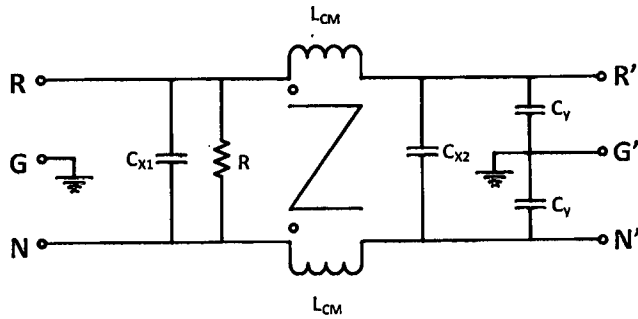
3.2 ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ

ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมี 3 วิธีหลักในการลดทอน ได้แก่ การติดตั้งระบบกราวด์ การใช้เฟอร์ไรท์บีด และการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน ในแต่ละวิธีล้วนแล้วแต่มีความจำเป็นต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น แต่จะให้ได้ผลในช่วงความถี่ใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่นำมาใช้และรูปแบบวงจร

สำหรับการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน เป็นอุปกรณ์หลักที่นิยมใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เนื่องจากสามารถใช้อุปกรณ์สำเร็จรูปมาใช้ได้ แต่วงจรกรองสำเร็จรูปเหล่านี้มีราคาแพงและอาจไม่สามารถกรองได้ตรงกับช่วงความถี่ที่ต้องการกรอง ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์นั้น ๆ จึงมีความสำคัญมาก รูปแบบวงจรกรองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 2 รูปแบบดังแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 3.8



ก. วงจรแบบมีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง



ข. วงจรแบบไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง

รูปที่ 3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

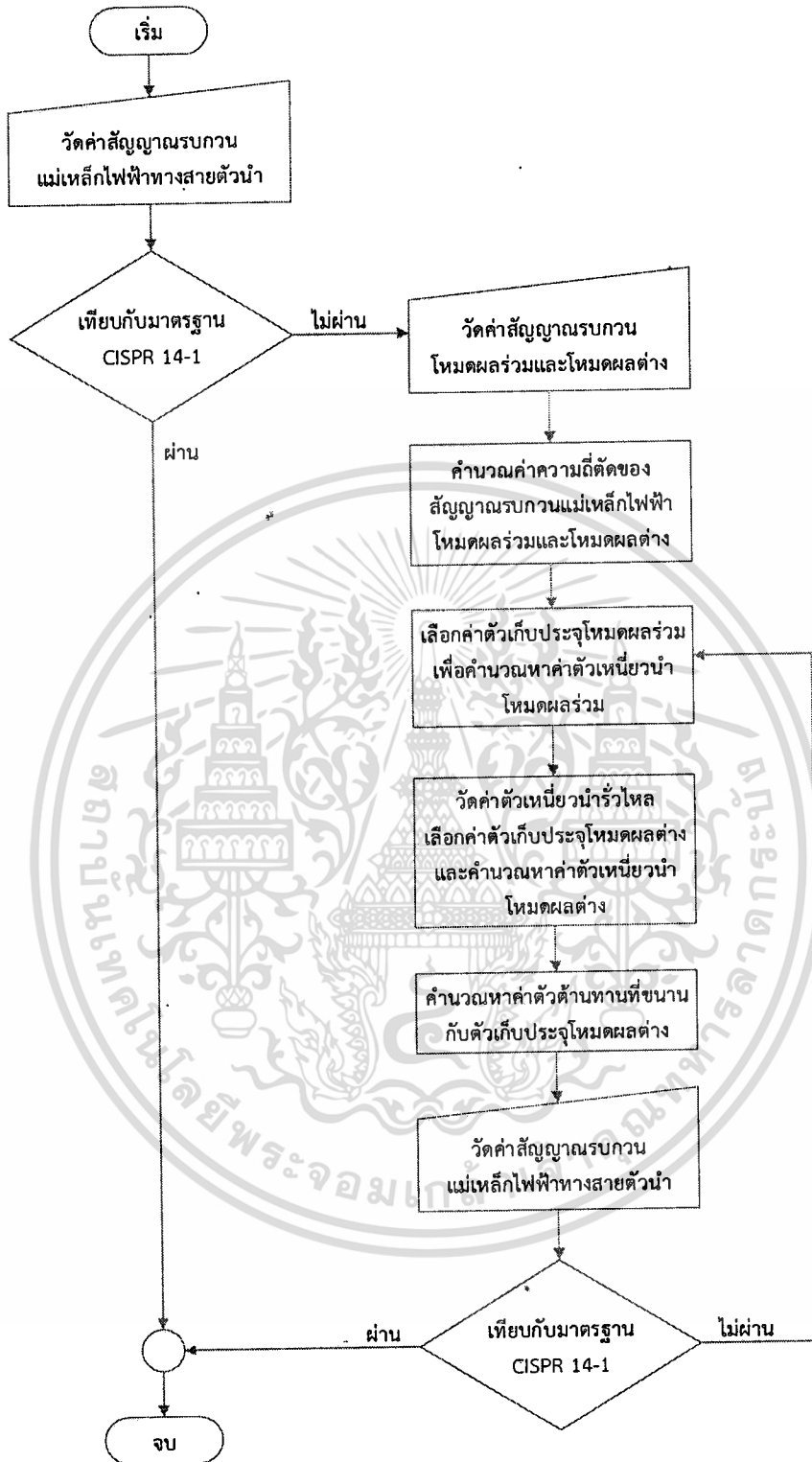
การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมค ได้แก่ โหมคผลร่วมและโหมคผลต่าง สัญญาณรบกวนโหมคผลร่วมจะถูกลดทอนด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและตัวเก็บประจุโหมคผลร่วม ส่วนสัญญาณรบกวนโหมคผลต่างจะถูกลดทอนด้วย ตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง ตัวเหนี่ยวนำแฝงของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม และตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง

ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.9 เพื่อให้ได้ตัวกรองสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ เริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในสายไลน์และสายนิวตรอนเทียบกับมาตรฐานสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออก CISPR 14-1 เพื่อตรวจสอบอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีค่าสัญญาณรบกวนเกินกว่ามาตรฐานกำหนดหรือไม่ นอกจากนี้สาเหตุที่เลือกมาตรฐาน CISPR 14-1 เนื่องจากสัญญาณที่สนใจเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งออกจากอินเวอร์เตอร์ไปยังภาระไฟฟ้าและการไฟฟ้าและอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอาคารที่อยู่อาศัย มาตรฐานนี้จึงเป็นมาตรฐานเดียวที่ตรงตามคุณสมบัติที่กล่าวมา หลังจากวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแล้ว พบว่าสัญญาณนั้นเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงทำการวัดสัญญาณรบกวนแยกโหมคเป็นโหมคผลร่วมและโหมคผลต่าง เพื่อวิเคราะห์สัญญาณและใช้ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนต่อไป ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนนั้นจะเริ่มจากการหาความถี่ตัดที่เหมาะสมของสัญญาณแต่ละตัว โดยแต่ละโหมคอาจมีความถี่ตัดที่ตรงกันหรือต่างกันก็ได้ขึ้นกับคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนและความเหมาะสม เมื่อได้ความถี่ตัดที่เหมาะสมแล้วนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์แต่ละโหมค โดยเริ่มจากโหมคผลร่วมก่อน เริ่มจากการเลือกตัวเก็บประจุโหมคผลร่วม โดยพิจารณาจาก

มาตรฐาน IEC 380 ที่ว่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวเก็บประจุโหมคผลรวมต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 มิลลิแอมป์ ดังนั้นในระบบแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุโหมคผลรวมที่มีค่าน้อยกว่า 35.81 นาโนฟารัด ดังสมการที่ 2.5 - 2.7 แล้วคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวมตามสมการที่ 2.8 ต่อมาการหาค่าพารามิเตอร์โหมคผลต่าง เริ่มจากการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวม โดยมีค่าประมาณ 0.5 - 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลรวม และเลือกค่าตัวเก็บประจุโหมคผลต่างจากความถี่ตัดโหมคผลต่างที่กำหนดไว้ แล้วคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง จากนั้นนำค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลต่างหักลบกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวมแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปเป็นค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างที่แท้จริงที่ใช้สำหรับการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง และสุดท้ายเพื่อให้ตัวเก็บประจุโหมคผลต่างคายประจุได้และทำงานได้ดีขึ้น วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบางตัวจึงติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง



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 ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวม ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ประมาณได้จากตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวม ค่าตัวเก็บประจุโหมคผลรวม ค่าตัวเก็บประจุโหมคผลต่าง ค่าตัวต้านทาน และค่าความถี่ตัดของตัวกรองสัญญาณรบกวนโหมคผลรวมและโหมคผลต่าง

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ประกอบตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

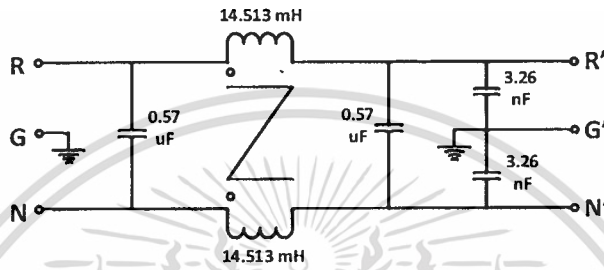
No.	1	2	3	4	5	6	7
$f_{R,CM}$ (Hz)	16,370	30,754	17,023	33,415	30,744	27,822	15,385
$f_{R,DM}$ (Hz)	14,245	35,673	9,346	23,859	15,993	12,722	23,220
L_{CM} (mH)	14.513	6.038	17.224	3.420	6.040	3.470	5.200
$L_{leakage}$ (μ H)	218	90.6	258	50.13	90.6	50.21	78
L_{DM} (μ H)	0	0	179.61	74.67	180	52.31	60.60
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 มีโครงสร้างที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างเหมือนกัน เนื่องจากใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวมในการคำนวณวงจรกรองโหมคผลต่างแทน แบบที่ 1 ใช้ความถี่ตัดที่ประมาณ 15,000 เฮิร์ตซ์ ส่วนแบบที่ 2 จะใช้ความถี่ตัดที่ประมาณ 30,000 เฮิร์ตซ์ แต่ค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลรวม ค่าความเก็บประจุโหมคผลรวม และค่าความเก็บประจุโหมคผลต่าง จะลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของแบบที่ 1 ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 3.10 – 3.11

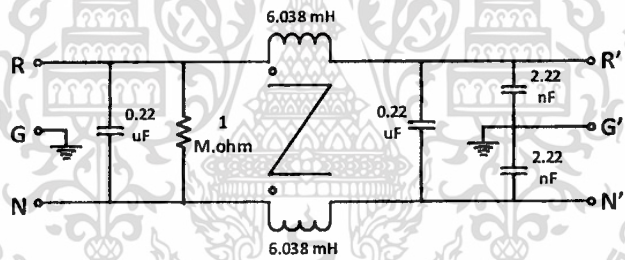
สำหรับแบบที่ 3 – 7 เป็นวงจรกรองแบบที่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง แบบที่ 3 จะมีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงแบบที่ 1 แต่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง แบบที่ 5 จะมีค่าพารามิเตอร์

ใกล้เคียงแบบที่ 2 แต่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง ส่วนแบบที่ 4 จะเหมือนแบบที่ 5 แต่ค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลรวมและโหมคผลต่างจะลดลงครึ่งหนึ่ง แบบที่ 6 และ 7 เหมือนแบบที่ 4 และ 5 แต่มีการเพิ่มค่าความเก็บประจุสูงขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 3.12 – 3.16

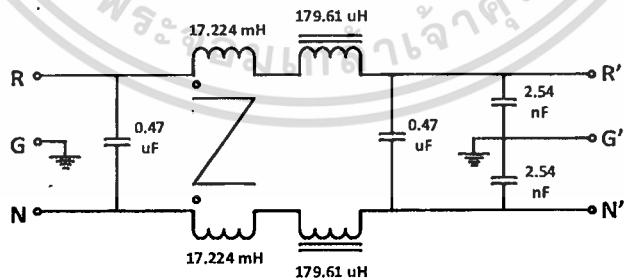
ในส่วนตัวเก็บประจุโหมคผลต่างใช้ตัวเก็บประจุคลาส X2 ตัวเก็บประจุโหมคผลรวมใช้ตัวเก็บประจุคลาส X1/Y1 ตามมาตรฐานไออีซี 60384-14 นอกจากนี้ยังติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมคผลต่างในบางวงจร เพื่อให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุได้ดีขึ้น



รูปที่ 3.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 1

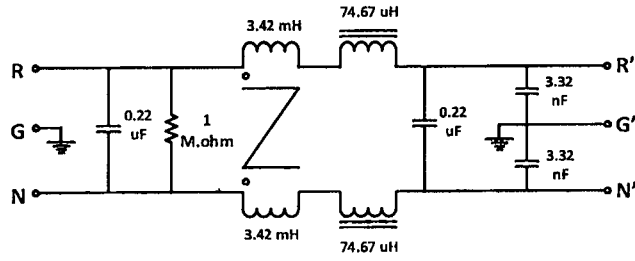


รูปที่ 3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 2

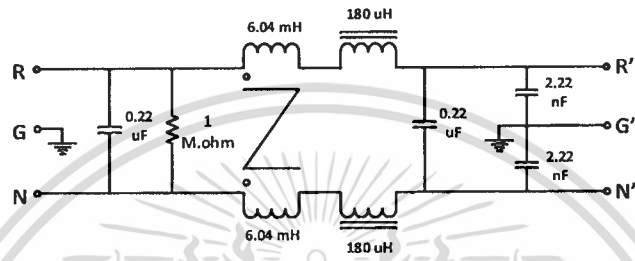


รูปที่ 3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 3

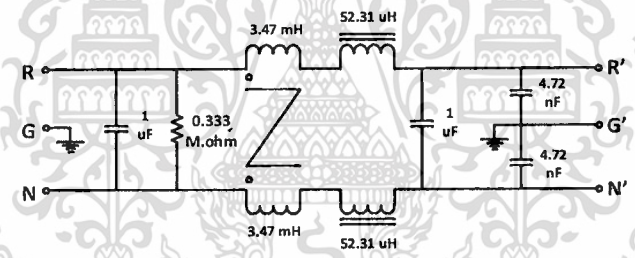
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



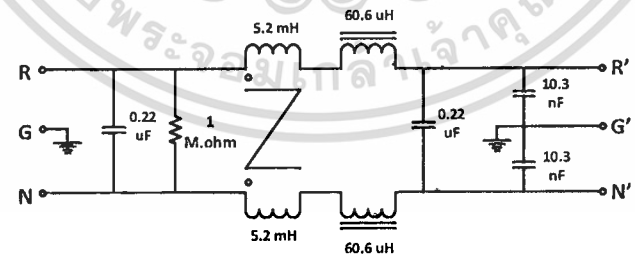
รูปที่ 3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 4



รูปที่ 3.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 5

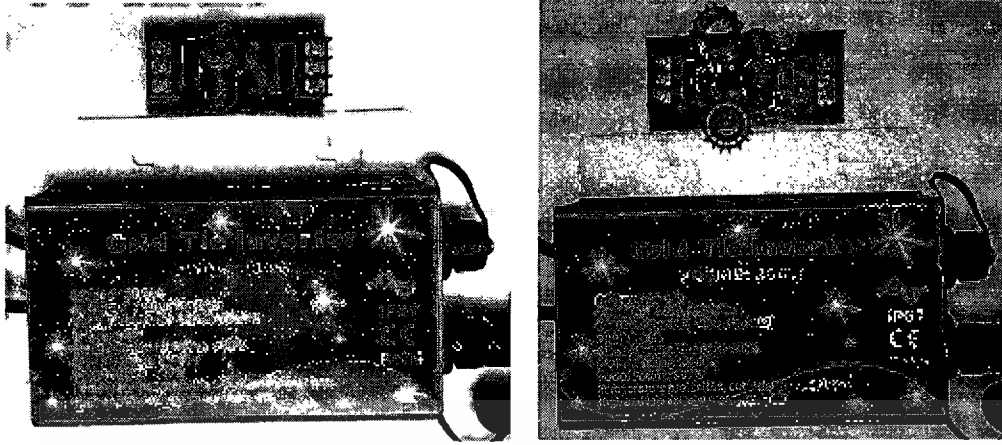


รูปที่ 3.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 6



รูปที่ 3.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ขนาดตัวกรองเทียบกับอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

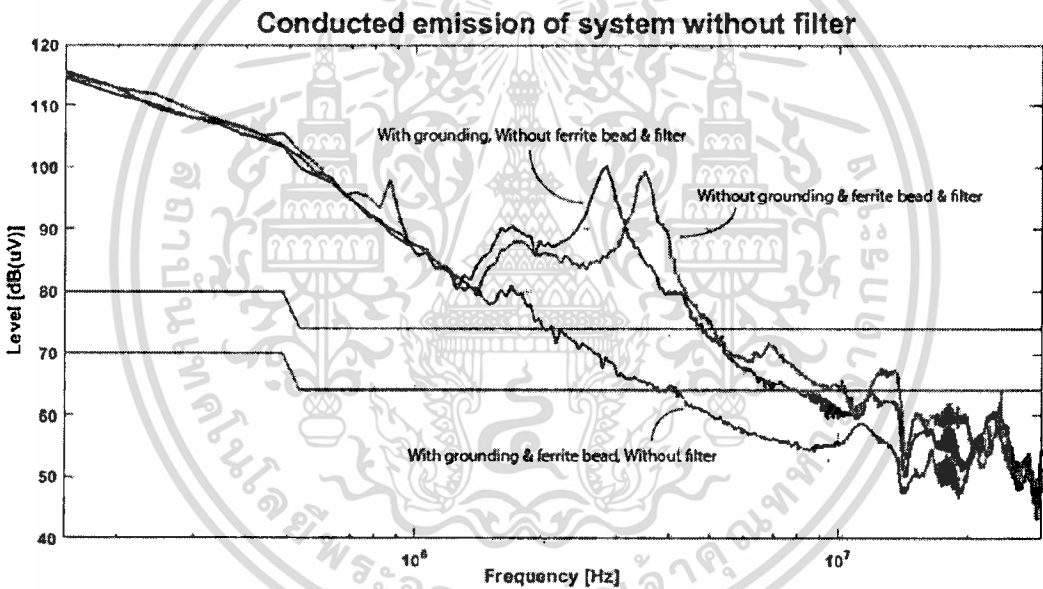
4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

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

สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนเซลล์แสงอาทิตย์จริง เนื่องจากการทดสอบจะดำเนินการในห้องทดสอบที่เป็นระบบปิดและใช้เวลานานในการวัดการใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้ทดสอบและสามารถให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่คงที่และเหมือนกันในทุกกรณี นอกจากนี้มีการวัดสัญญาณรบกวนของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์และสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับของห้องทดสอบด้วย พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และมีผลกระทบต่อผลการทดสอบน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.7 ในการทดสอบนี้ทำการวัดสัญญาณรบกวนขาออกจากรีเลย์อินเวอร์เตอร์ โดยวัดระหว่างอินเวอร์เตอร์และการไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดที่มีการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ อันจะทำให้สุ่มเสี่ยงที่สัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของระบบแล้วตามรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 – 4.2 พบว่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวเกินค่ามาตรฐาน CISPR 14-1 ในช่วงความถี่ 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบวงจรกรองเพื่อลดทอนสัญญาณดังกล่าวให้ลดลงมาอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้การลดทอนสัญญาณทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรท์บีด และการใช้วงจรกรอง สำหรับการลงดินได้เชื่อมสายต่อลงดินและตัวเครื่องของอุปกรณ์ทุกตัวเข้ากับระบบต่อลงดินของห้องทดสอบตั้งแต่ติดตั้งระบบทดสอบ จึงมั่นใจได้ว่าระบบต่อลงดินมีความเสถียรและเชื่อถือได้ การใช้เฟอร์ไรท์บีดพบกับสายตัวนำ สามารถลดทอนสัญญาณในความถี่ 2 – 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ได้สูงสุด 30 เดซิเบล และการใช้วงจรกรองสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในช่วง 0.15 – 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ได้อย่างชัดเจน โดยในการทดลองได้ออกแบบวงจรกรองทั้งหมด 7 แบบ



รูปที่ 4.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อมีและไม่มีเฟอร์ไรท์บีด

ตารางที่ 4.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มี
เฟอร์ไรต์บีดและตัวกรอง

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
ไม่มีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรอง				
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 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีเฟอไรต์บีด แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน

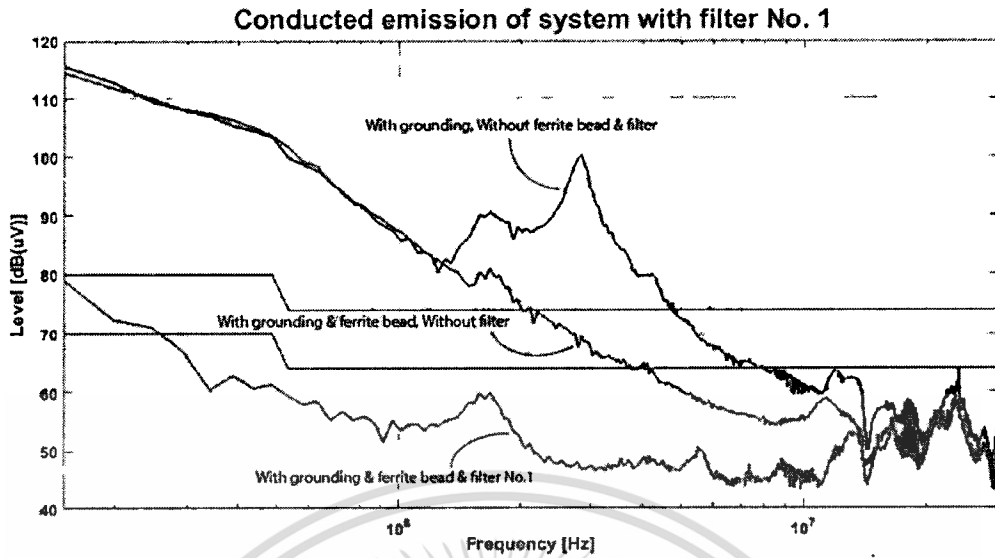
ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอไรต์บีด ไม่มีตัวกรอง				
341346	107.4015	27.4015	37.4015	CISPR 14-1
484855	103.5182	23.5182	33.5182	CISPR 14-1
915384	89.2216	15.2216	25.2216	CISPR 14-1
1680769	80.9775	6.9775	16.9775	CISPR 14-1
2111298	74.1861	0.1861	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

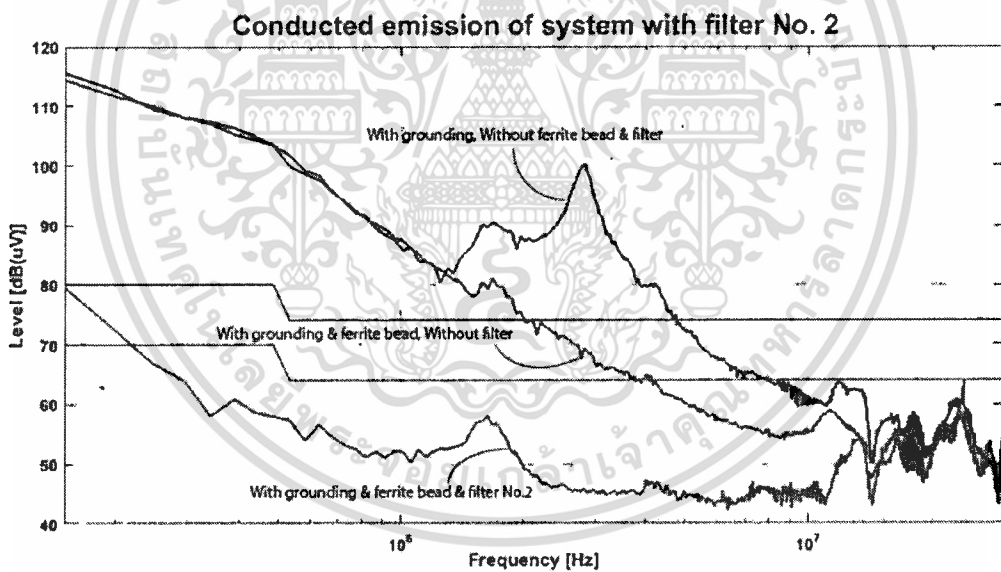
การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยวงจรกรอง

การใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ได้ทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณรบกวนตามบทที่ 3 ซึ่งใช้ความถี่ตัดอยู่ในช่วง 15,000 – 40,000 เฮิร์ตซ์ โดยคาดหวังการลดทอนสัญญาณที่ความถี่ 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์ การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนได้ออกแบบไว้ 2 รูปแบบหลัก ๆ สามารถแยกตามค่าพารามิเตอร์ได้ 7 วงจร แต่ละวงจรมีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบวงจรและค่าพารามิเตอร์ โดยแบบที่ 1 และ 2 เป็นวงจรกรองที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง เนื่องจากใช้ค่าความเหนี่ยวนำร่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวมแทนค่าความเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง ส่วนแบบที่ 3 – 7 เป็นวงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง แต่ในแบบที่ 6 และ 7 จะมีการเพิ่มขนาดของค่าตัวเก็บประจุโหมคผลรวมขึ้น เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการลดทอนสัญญาณรบกวน หาผลการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เหมาะสม รวมถึงศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธีการลดทอนรูปแบบต่าง ๆ ด้วย

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

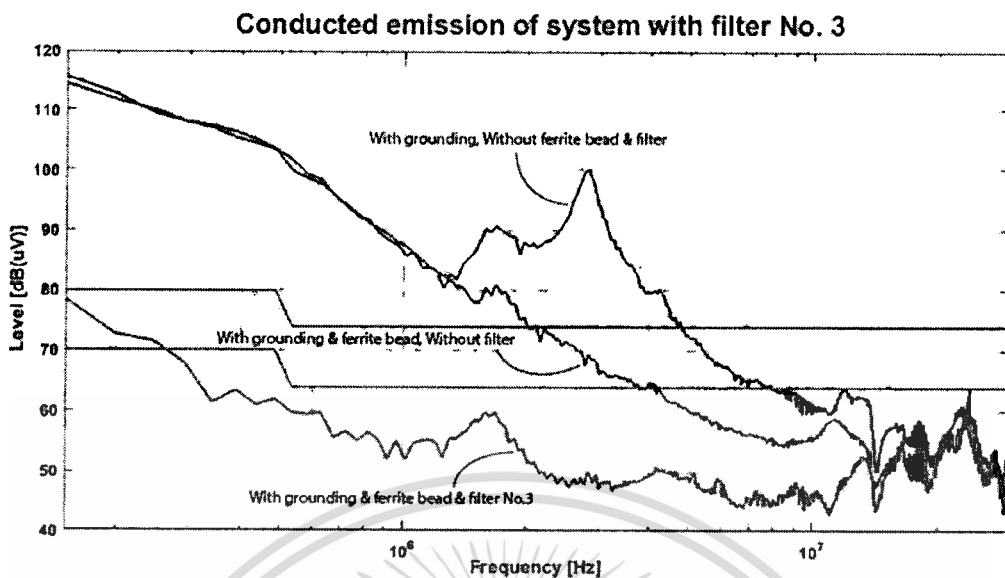


รูปที่ 4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1

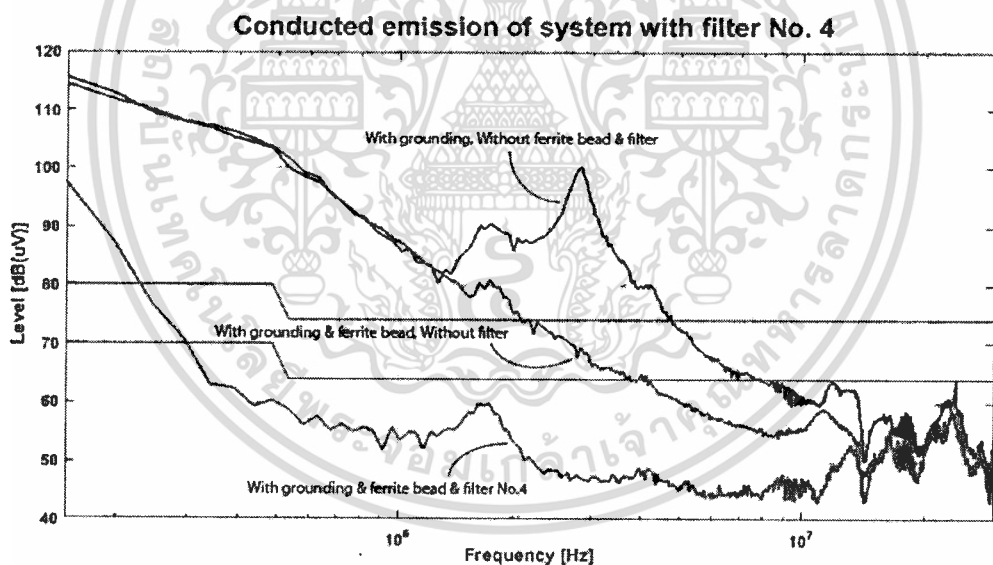


รูปที่ 4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

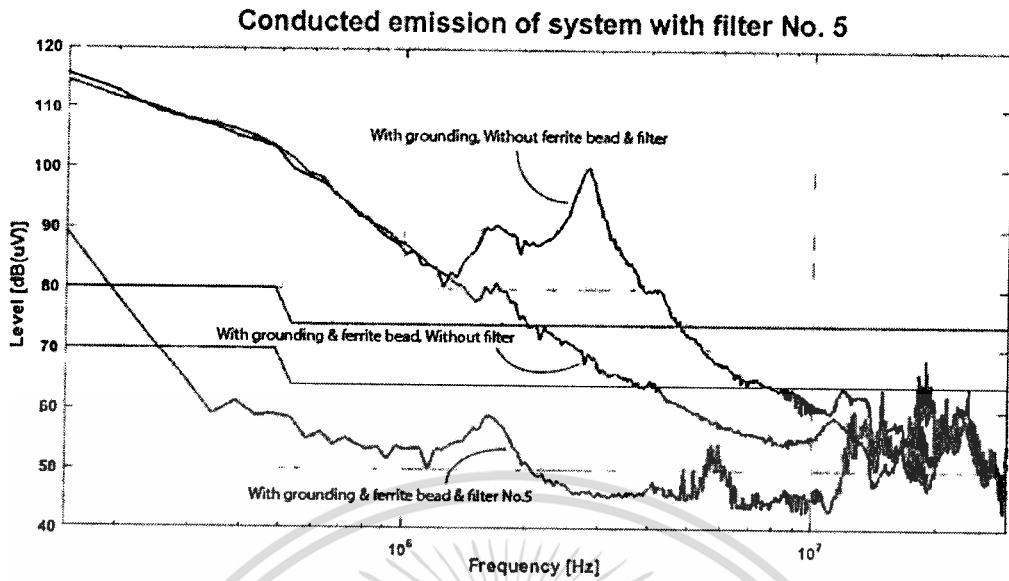


รูปที่ 4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3

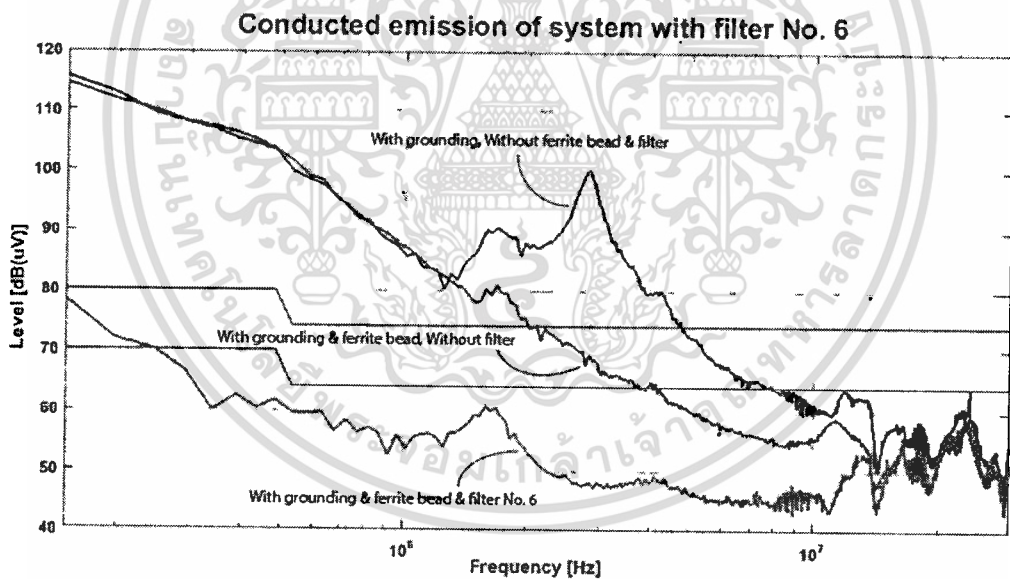


รูปที่ 4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

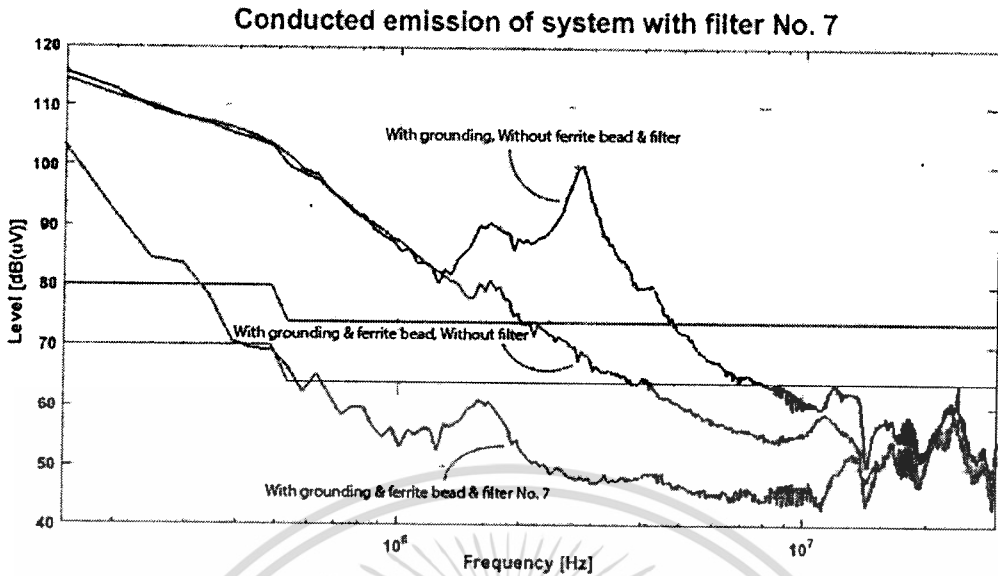


รูปที่ 4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5



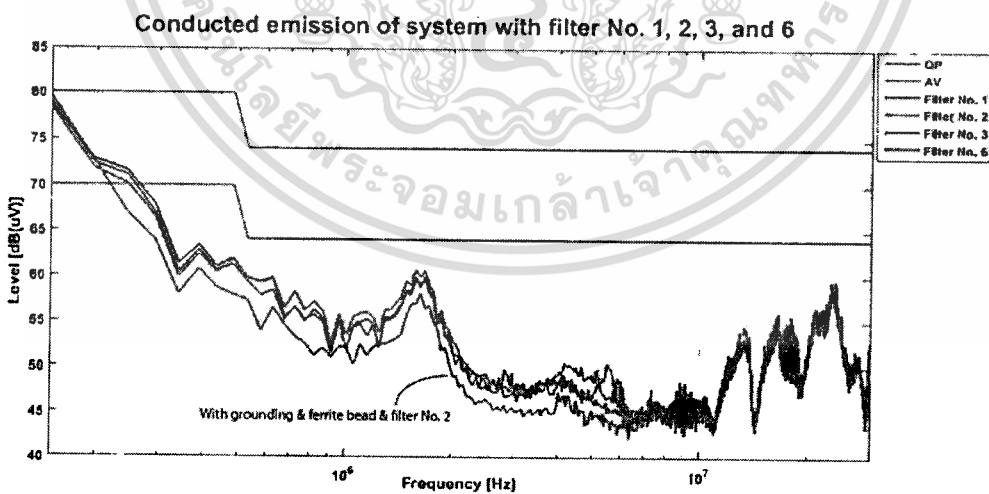
รูปที่ 4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
 ขณะมีเฟอร์ไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7

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



รูปที่ 4.9 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเมื่อพันเฟอร์ไรต์บีคและใส่ตัวกรอง

ตารางที่ 4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมี
เฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 1

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 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
เฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 2

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 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(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
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 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมี
เฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 4

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 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 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดมีเฟอโรไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 5

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอโรไรต์บีดและตัวกรองหมายเลข 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมี
เฟอโรไรต์ปิดและตัวกรองหมายเลข 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

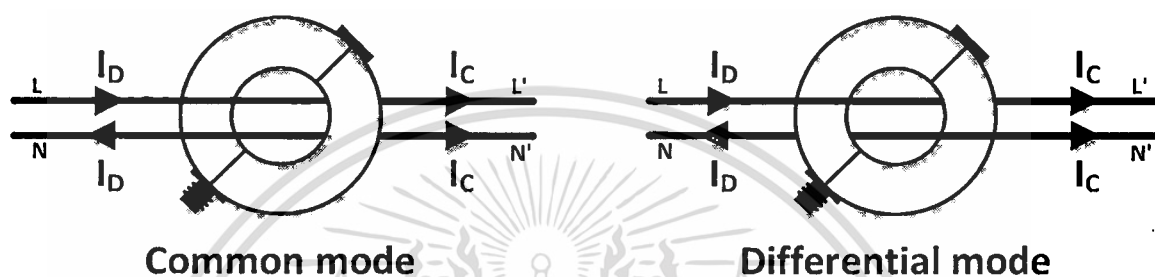
ตารางที่ 4.9 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขะมี
เฟอไรต์บีคและตัวกรองหมายเลข 7

ความถี่ (Hz)	ผล [dB(μ V)]	ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(μ V)]	AV [dB(μ V)]	
มีเฟอไรต์บีคและตัวกรองหมายเลข 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 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแยกตาม โหมดของสัญญาณรบกวน เป็น 2 โหมด คือ สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม และสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.21 โดยวิธีการวัดจะใช้หัววัดสัญญาณแบบคล้องระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัลตามรูปที่ 4.17 เพื่อวัดค่าสัญญาณที่ผ่านทั้งสองสายแล้วแปลงมาเป็นค่าสัญญาณ โหมดผลรวมและโหมดผลต่าง [9,41-43]



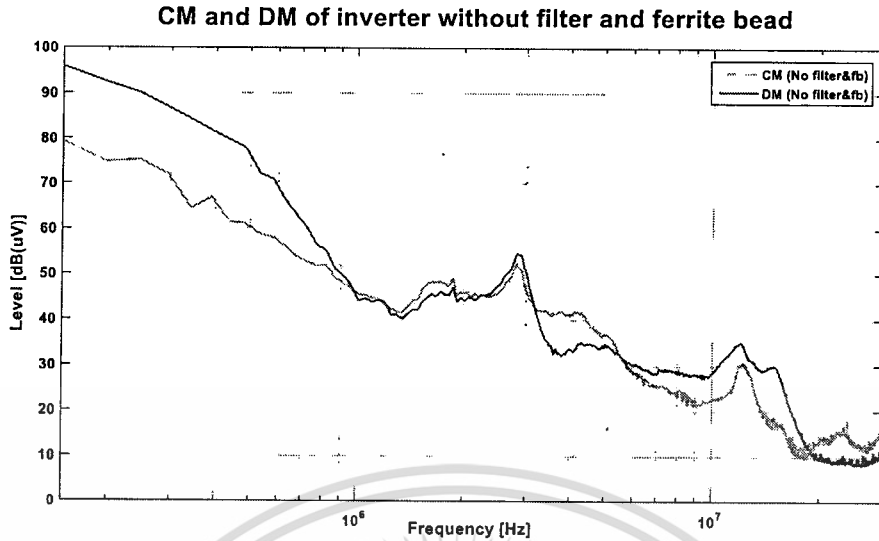
ก. วิธีการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



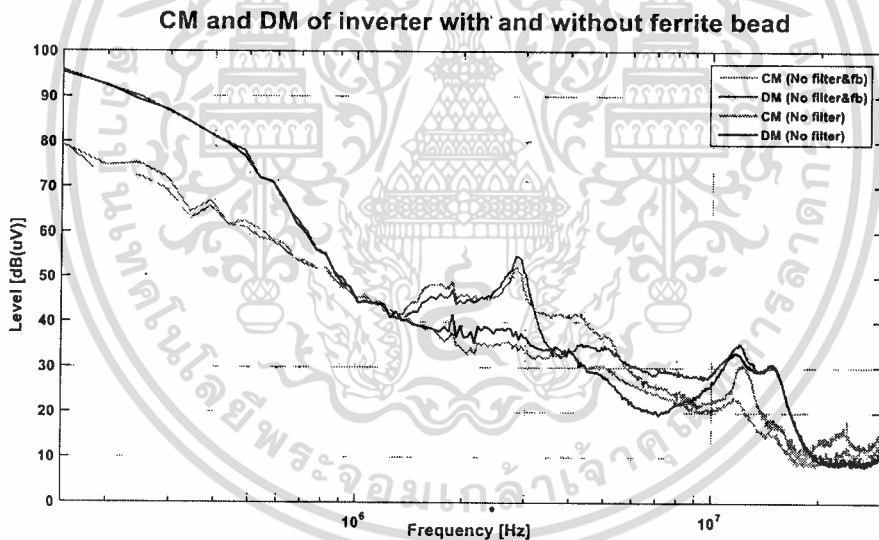
ข. อุปกรณ์วัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (RF current probe)

รูปที่ 4.10 การวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแยก โหมด ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการลดทอนของวงจรที่ออกแบบในแต่ละ โหมดและศึกษาผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ภายในวงจรแต่ละตัว ชั้นแรกทำการวัดสัญญาณรบกวนทั้ง 2 โหมดของอินเวอร์เตอร์ พบว่าสัญญาณรบกวนช่วงความถี่แรก ๆ มีค่าสูง และลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมมีค่าต่ำกว่าสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างดังรูปที่ 4.11 ต่อมาทำการลดทอนสัญญาณด้วยการใช้เฟอร์ไรต์บีด ส่งผลให้สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 1.5 – 4 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าต่ำลงทั้งสองโหมด ซึ่งที่ได้ตรงกับการวัดสัญญาณแบบรวมโหมดดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีเฟอร์ไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวน

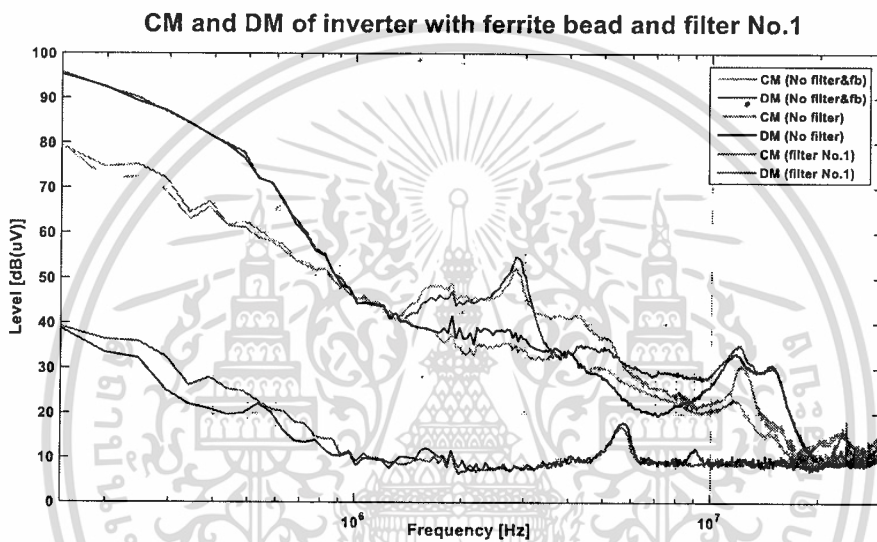


รูปที่ 4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์บีค แต่ไม่มีตัวกรองสัญญาณรบกวน

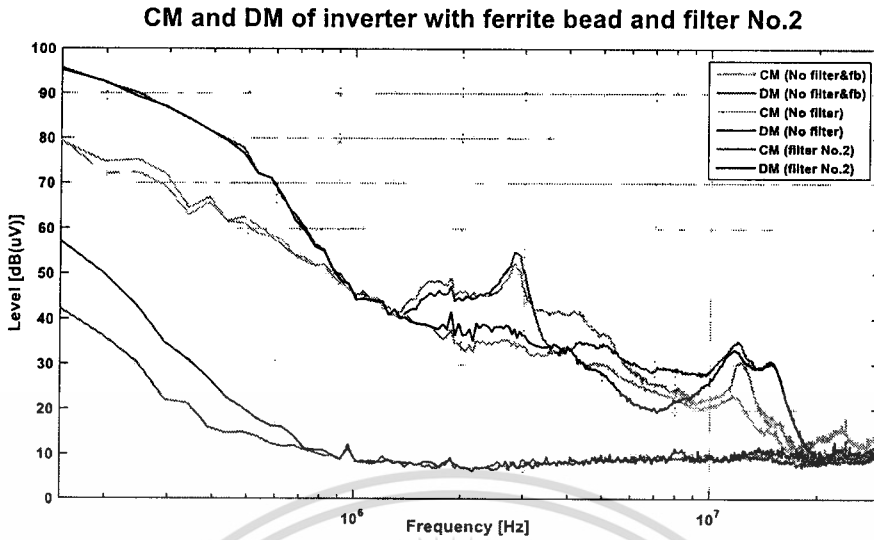
ต่อมาวัดสัญญาณรบกวนขณะที่มีตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร เปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนขณะไม่มีตัวกรองสัญญาณตามรูปที่ 4.13 – 4.19 (การวัดสัญญาณรบกวนแยกโหมดของอินเวอร์เตอร์สำหรับศูนย์ทดสอบยังไม่มีมาตรฐานรองรับที่ชัดเจน) พบว่าตัวกรองหมายเลข 1 3 และ 6 ให้ผลการลดทอนที่น่าพอใจ และการลดทอนโหมดผลต่างสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากกว่าโหมดผลรวม ทำให้สัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดหลังจากการลดทอนมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

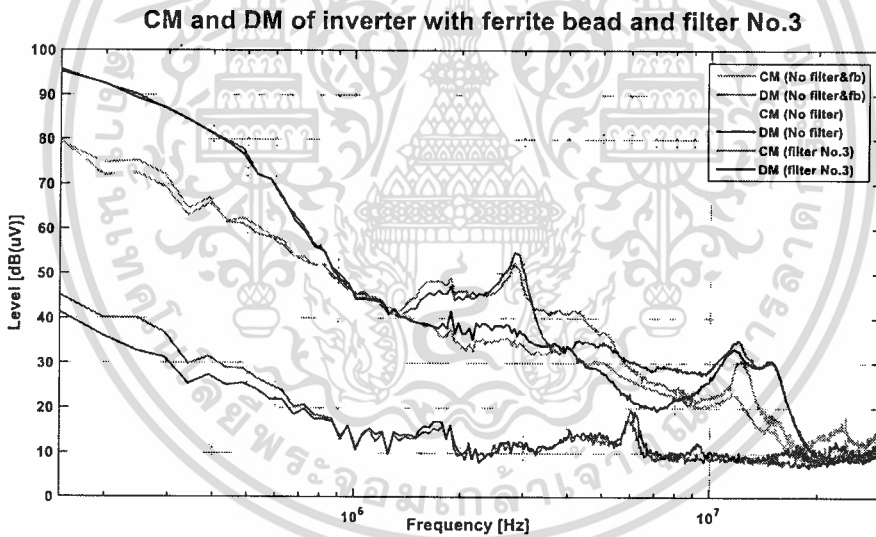
สัญญาณใกล้เคียงกัน สำหรับวงจรรอกหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ผลการลดทอนทำให้รูปแบบสัญญาณช่วงความถี่ต้นยังมีความใกล้เคียงกับรูปแบบสัญญาณก่อนการลดทอน คือ สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างมีค่าสูงกว่าสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมในช่วง 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนความถี่ช่วง 1 – 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ตัวรอกหมายเลข 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีมากเมื่อเทียบกับตัวรอกอื่น ๆ ตามรูปที่ 4.20 และ 4.21 และตัวรอกหมายเลข 4 5 และ 7 ให้ผลการลดทอนไม่น่าพึงพอใจ เพราะสัญญาณรบกวนหลังการลดทอนยังมีค่าสูง โดยเฉพาะในช่วง 0.15 – 1 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 1

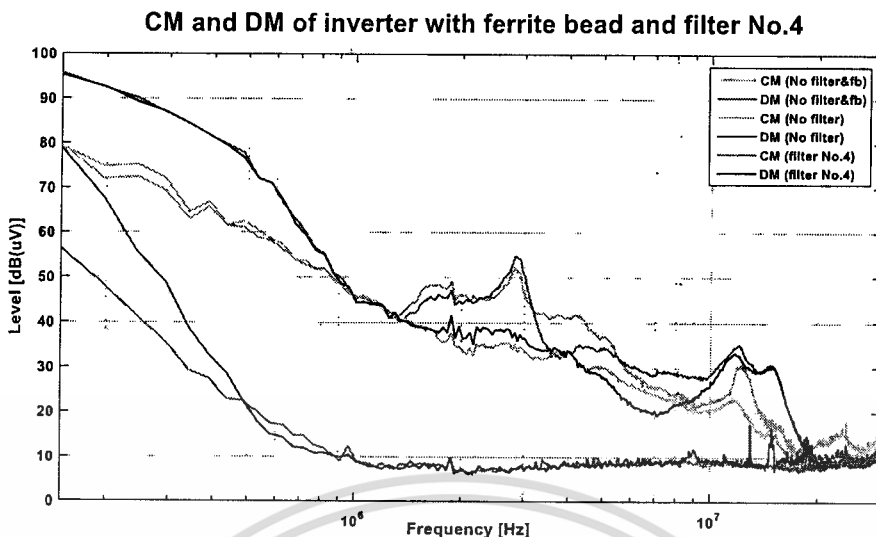


รูปที่ 4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 2

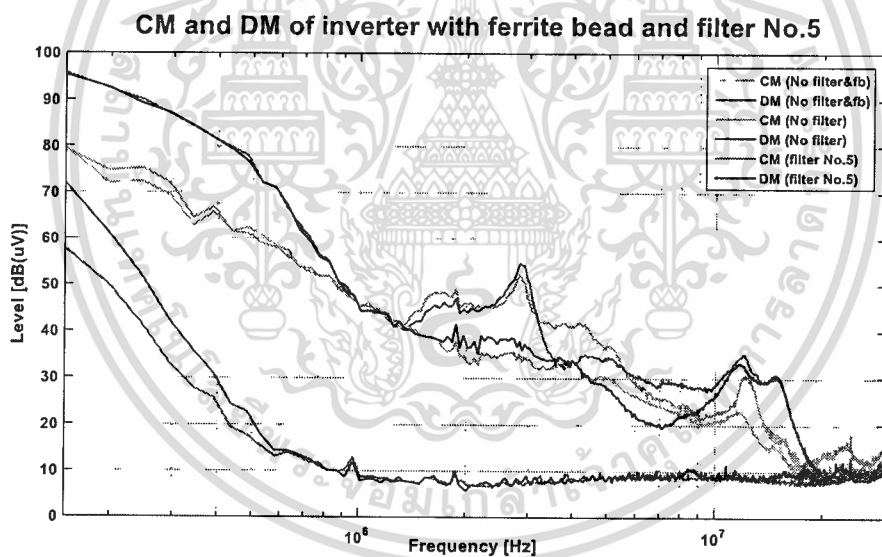


รูปที่ 4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

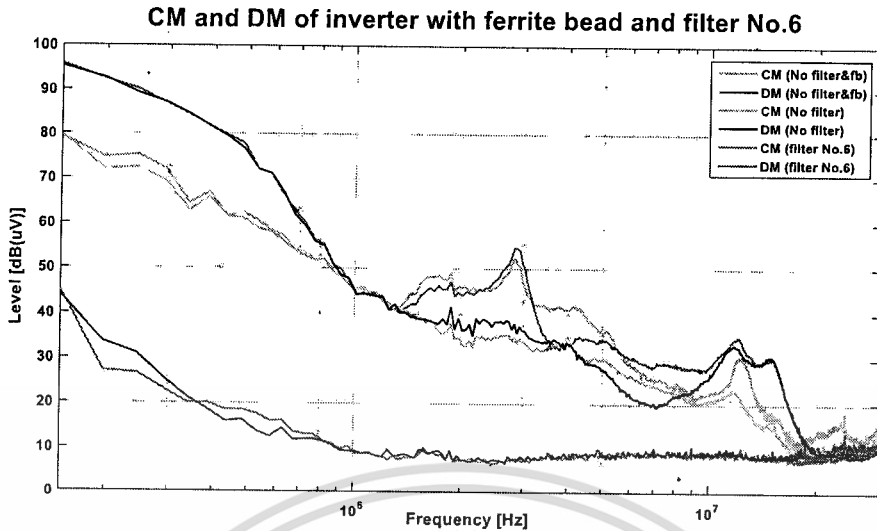


รูปที่ 4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 4

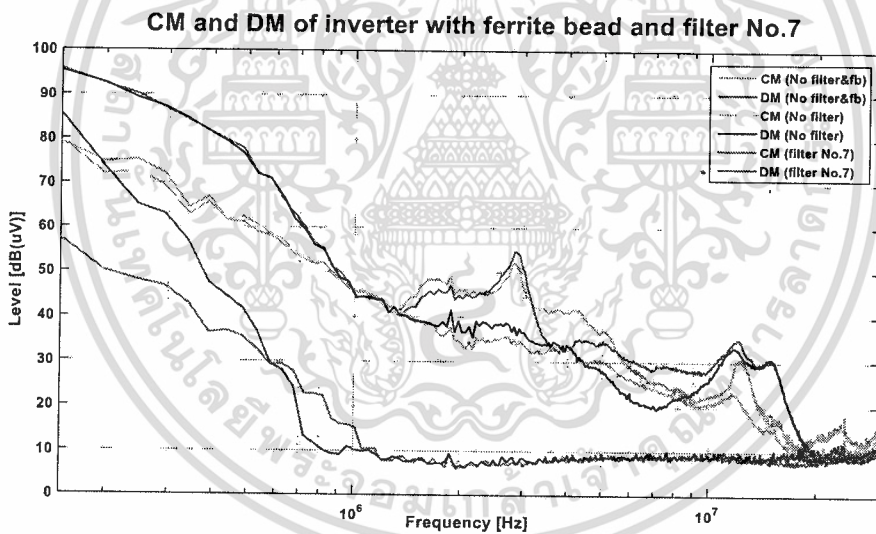


รูปที่ 4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอร์ไรต์บีดและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

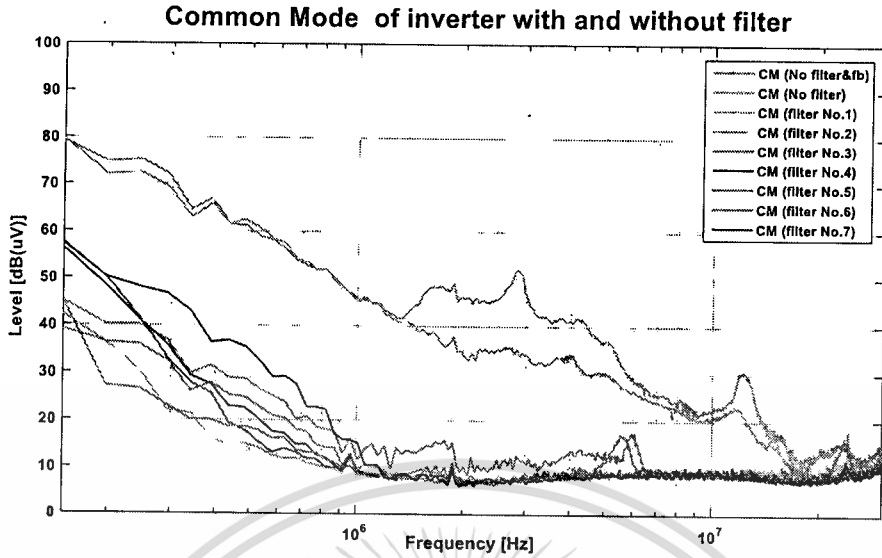


รูปที่ 4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 6

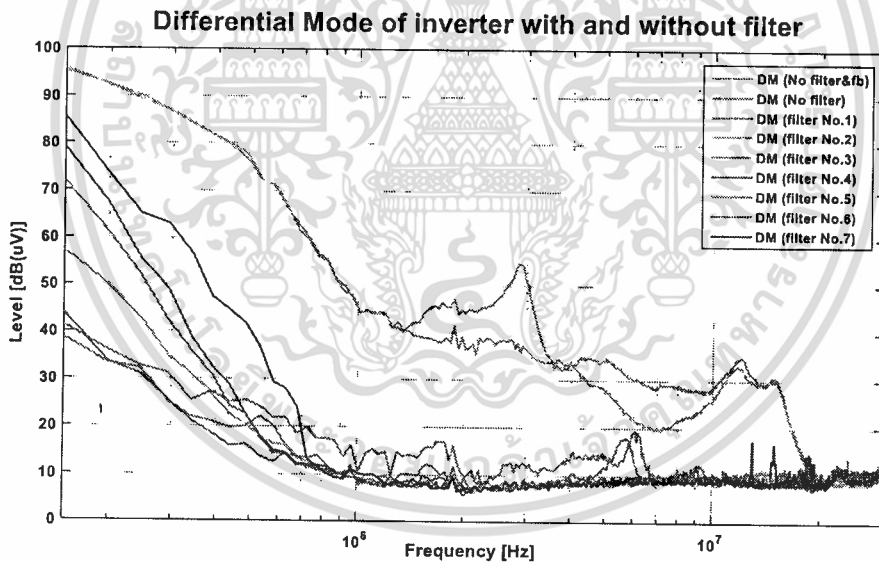


รูปที่ 4.19 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีเฟอไรต์บีคและตัวกรองสัญญาณรบกวนหมายเลข 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟิร์มแวร์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร



รูปที่ 4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีเฟิร์มแวร์ปิดและตัวกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 7 วงจร

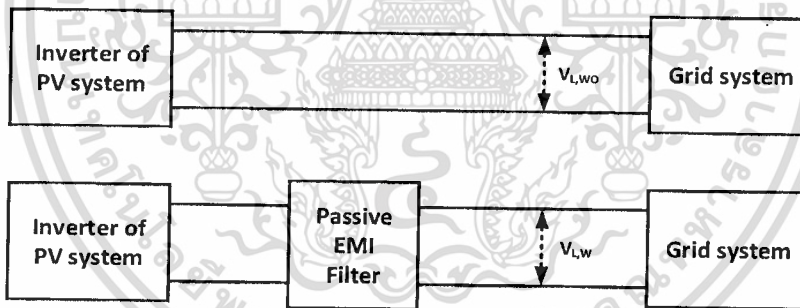
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

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

จากการทดสอบ ตัวกรองสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ในช่วง 0.15 – 15 เมกะเฮิร์ตซ์ และลดทอนได้ดีในช่วง 0.15 – 1.5 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนที่ความถี่ 15 – 30 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้น้อยมากจนแทบจะไม่มีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนเลยดังแสดง ในรูปที่ 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

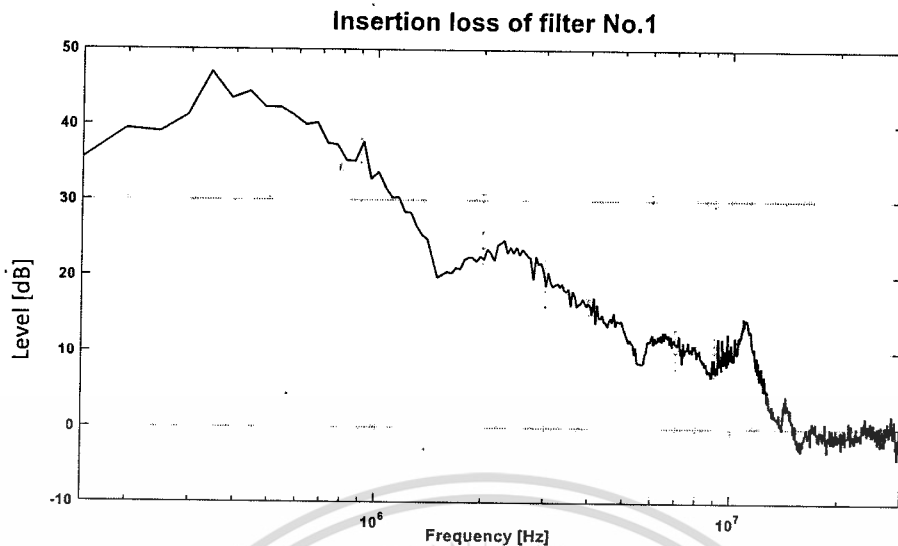


รูปที่ 4.22 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกในระบบทดสอบ

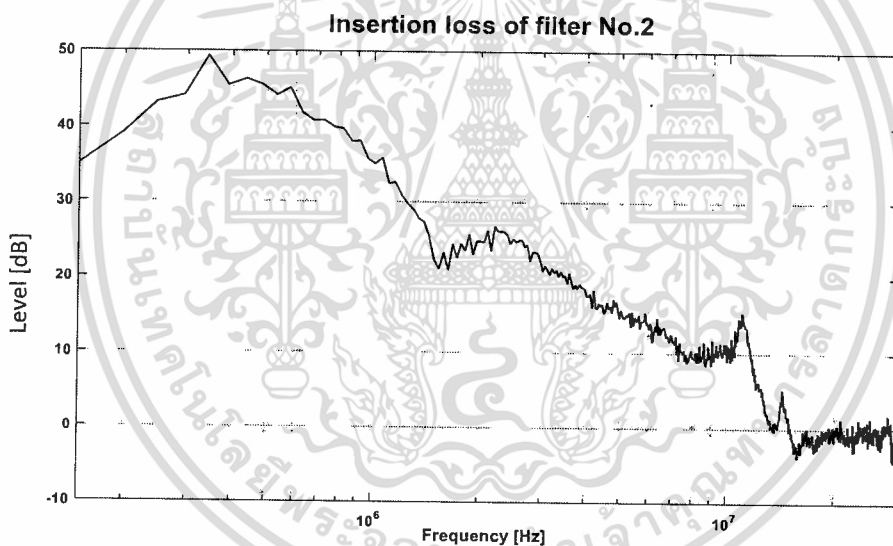
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}}{10^{-6}} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,w}}{10^{-6}} \right) \quad (4.1)$$

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

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

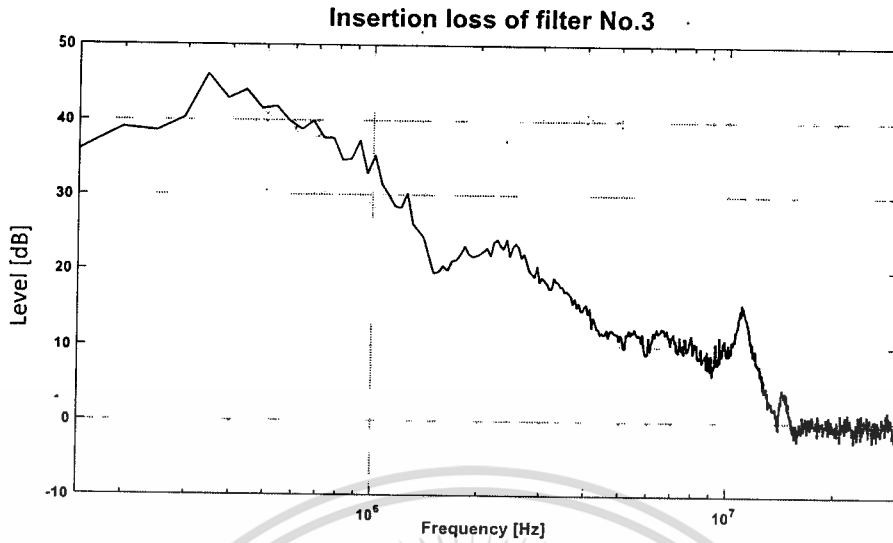


รูปที่ 4.23 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 1

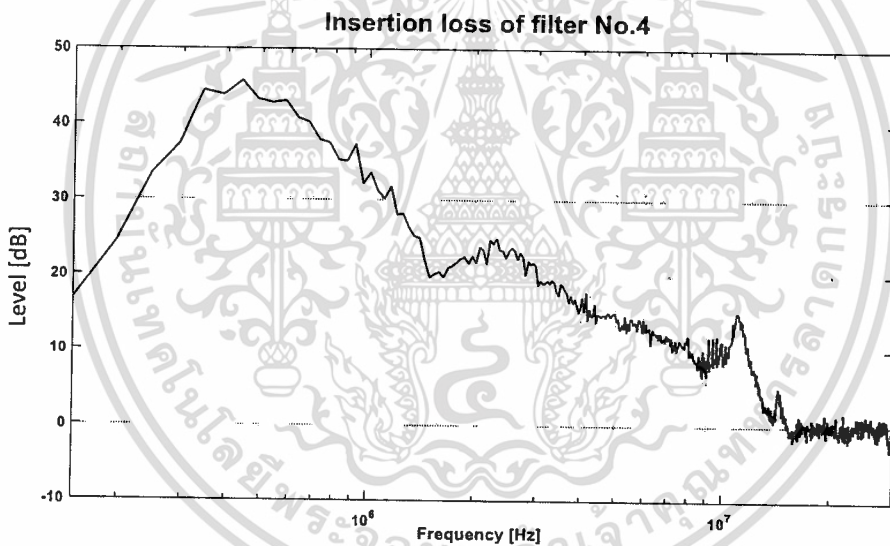


รูปที่ 4.24 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

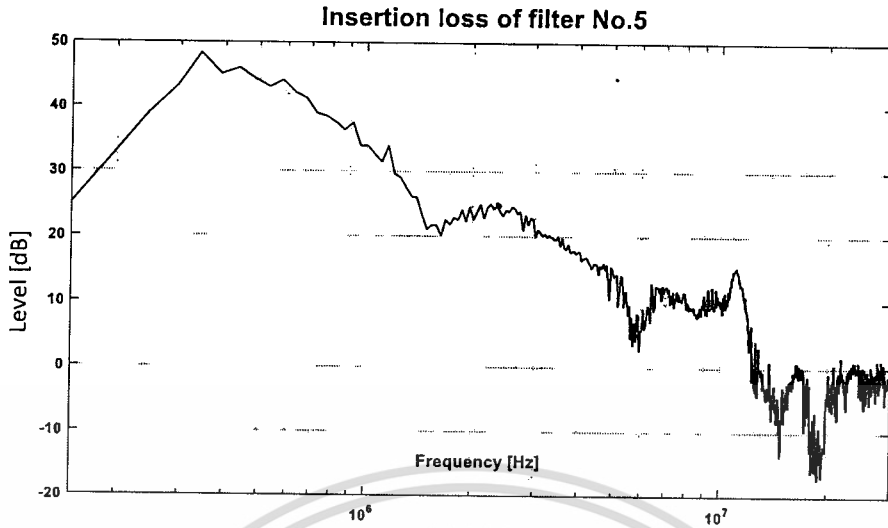


รูปที่ 4.25 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 3

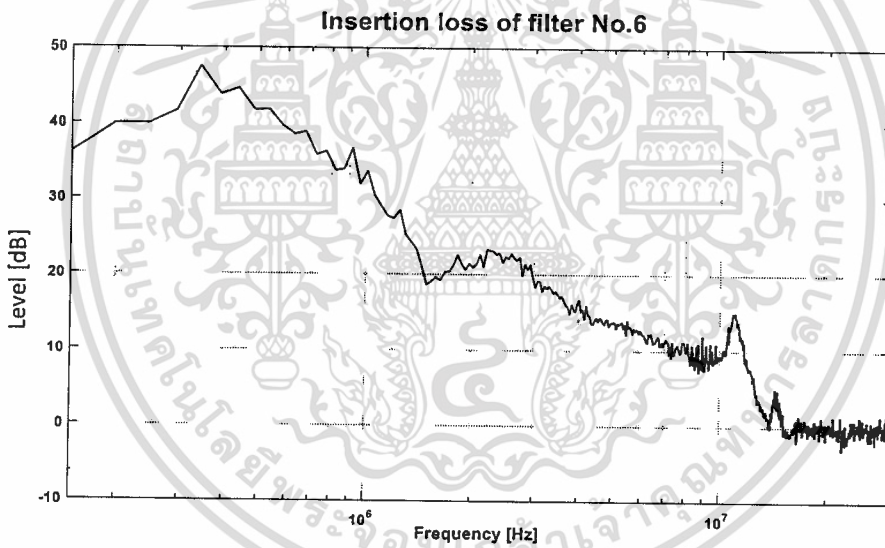


รูปที่ 4.26 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

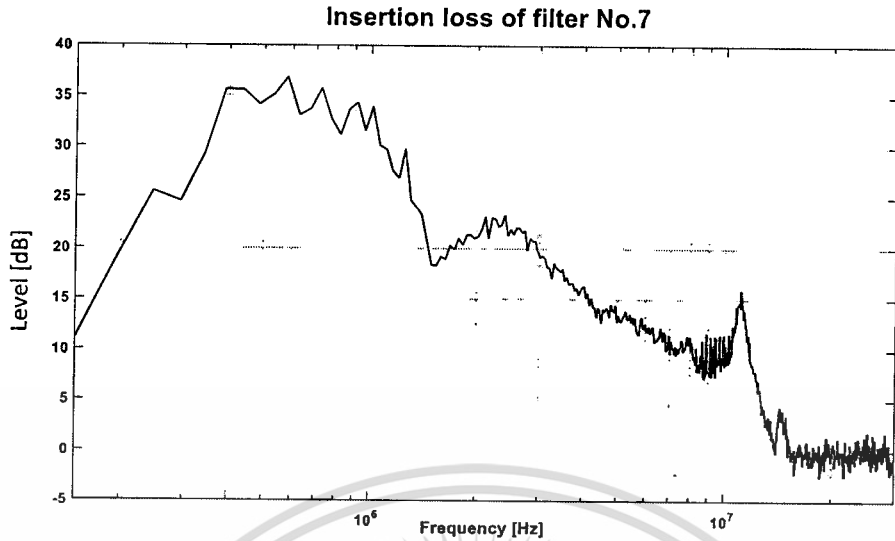


รูปที่ 4.27 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 5

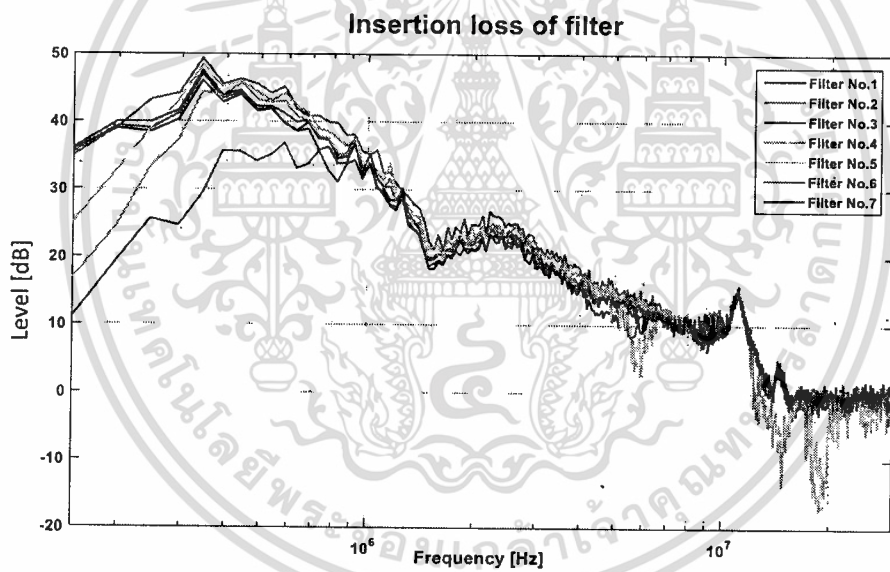


รูปที่ 4.28 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองหมายเลข 7



รูปที่ 4.30 ความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ของตัวกรองทั้ง 7 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาแสดงผลให้เห็นการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการหลัก 3 วิธี คือ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด และการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวน และมีการเปรียบเทียบผลการลดทอนของวงจรกรองสัญญาณทั้ง 7 วงจร ในรูปของสัญญาณรบกวนโดยรวม สัญญาณรบกวนโหมคผลร่วม สัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง และความสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion loss) ดังนั้นในบทนี้จะทำการสรุปผลที่ได้ศึกษา รวมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อของงานวิจัยนี้อีกด้วย

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้ ใช้การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการทดสอบดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นระบบปิด ทำให้ไม่สะดวกในการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทน เครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ความสะดวกในการทดสอบได้ทุกช่วงเวลา สามารถควบคุมสภาพแสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ได้อีกด้วย สำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าต่ำมาก จึงไม่มีผลกระทบต่อทดสอบ และเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับของห้องทดสอบ จึงได้มีการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในระบบไฟฟ้าของห้องทดสอบ พบว่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้มีค่าต่ำมากเช่นกัน จึงไม่ส่งผลต่อผลการทดสอบระบบ ต่อมาได้ทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ฝั่งขาออก (กระแสสลับ 1 เฟส) พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกินขีดจำกัดมาตรฐาน CISPR 14 ในประมาณมาก ในช่วง 0.15 – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ จึงจำเป็นต้องหาวิธีลดทอนสัญญาณให้ผ่านมาตรฐาน CISPR 14 ได้

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 3 วิธี คือ การต่อลงดิน การใช้เฟอร์ไรต์บีด และการใช้วงจรกรอง การต่อลงดินมีความสำคัญต่อระบบมาก เนื่องจากการนำสัญญาณรบกวนส่วนเกินออกจากระบบได้ส่วนหนึ่ง แล้วยังช่วยป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการรั่วไหลของไฟฟ้า ได้อีกด้วย และส่งผลทำให้กราฟสัญญาณรบกวนเลื่อนจากความถี่สูง ไปยังความถี่ที่ต่ำลง สำหรับการ ใช้เฟอร์ไรต์บีด สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ในช่วงความถี่ 1.5 – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยลด

ได้ทั้งสัญญาณรบกวนโดยรวม สัญญาณรบกวน โหมดผลรวม และสัญญาณรบกวน โหมดผลต่าง การเลือกใช้เฟอร์ไรต์บีด จำเป็นต้องดูรายละเอียดคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณรบกวนและช่วงความถี่ทำงานประกอบด้วย จึงจะสามารถกำหนดช่วงการลดทอนสัญญาณรบกวนของเฟอร์ไรต์บีดได้ นอกจากนี้จำนวนรอบการพันก็มีผลต่อช่วงความถี่และปริมาณสัญญาณรบกวนที่สามารถลดทอนได้ ทำให้ยากที่จะกำหนดรูปแบบที่แน่นอนการลดทอนของเฟอร์ไรต์บีด แต่เพื่อให้การลดทอนสัญญาณ โดยใช้เฟอร์ไรต์บีดมีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับระบบ จึงควรเลือกขนาดสายไปให้ใกล้เคียงกับขนาดเฟอร์ไรต์บีดและสายไฟนั้นต้องมีความยาวไม่มากเกินไป ส่วนการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวน จะใช้วงจรกรอง 2 รูปแบบ คือ วงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำโพลผลต่าง และวงจรกรองที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำโพลผลต่าง โดยทำการออกแบบตัวกรองทั้งหมด 7 ตัว ตามหลักการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำอย่างถูกต้อง มีการคำนวณหาความถี่ตัด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ของสัญญาณรบกวน โหมดผลรวมและ โหมดผลต่าง 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 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวน โหมดผลรวมและ โหมดผลต่างได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สัญญาณรบกวนโดยรวมลดลงมากที่สุด จึงเหมาะสมสำหรับการใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าขนาด 300 วัตต์นี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ควรเลือกค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย และเลือกอุปกรณ์ที่ผ่านมาตรฐานสำหรับการใช้สร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะ

5.2.2. สายไฟที่ใช้ในระบบควรมีขนาดและความยาวที่เหมาะสม เพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณที่วัดได้

บทที่ 6
สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (Publications)

การประชุม/สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference) 1 เรื่อง

1. Chaiyan Jettanasen and Chaychan Pothisarn, "Performance and electromagnetic compatibility of a photovoltaic power converter," *2017 International Automatic Control Conference (CACCS)*, Pingtung, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/CACCS.2017.8284248.

วารสาร ระดับนานาชาติ (International Journal) 2 เรื่อง

1. Chaiyan Jettanasen and Chaychan Pothisarn, "Performance and electromagnetic interference mitigation of DC-DC converter connected to photovoltaic panel", *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 2019, Volume 8, No. 6, November 2019. doi: 10.12720/sgce.8.6.806-812
2. Chaiyan Jettanasen and Atthapol Ngaopitakkul, "Characteristics and Effects of Conducted Emission from Grid-Connected and Stand-Alone Micro-Inverter in a Nano-Grid Road Lighting System", *Sustainability* 2019, Volume 11, Issue 20, October 2019. doi.org/10.3390/su11205690.

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. Chryssis "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.

- [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] วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. 2554. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง *Power Electronics*. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : วิ.เจ. พรินต์ติ้ง.
- [21] V. Prasad Kodali. 2001. **Engineering Electromagnetic Compatability: Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models**. 2nd ed. n.d. : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [22] Williams, T. 2001. **EMC for Product Designers**. 3rd ed. Oxford : Newnes.

- [23] ประสิทธิ์ ทัพพุมิ และ ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์. 2549. **EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ – มาตรฐานและการทดสอบ.** กรุงเทพฯ : แอคทีฟ พรินท์.
- [24] ประสิทธิ์ ทัพพุมิ และ ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์. 2549. **EMC 2: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ – 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 : ชีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ.** 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.

- [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] Muger, 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. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง Switch-Mode Power Supplies. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มิน 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. Prempanerach, "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 ก

การประชุม/สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference) 1 เรื่อง

1. Chaiyan Jettanasen and Chaychan Pothisarn, "Performance and electromagnetic compatibility of a photovoltaic power converter," *2017 International Automatic Control Conference (CACCS)*, Pingtung, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/CACCS.2017.8284248.

วารสาร ระดับนานาชาติ (International Journal) 2 เรื่อง

1. Chaiyan Jettanasen and Chaychan Pothisarn, "Performance and electromagnetic interference mitigation of DC-DC converter connected to photovoltaic panel", *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 2019, Volume 8 , No. 6, November 2019. doi: 10.12720/sgce.8.6.806-812
2. Chaiyan Jettanasen and Atthapol Ngaopitakkul, "Characteristics and Effects of Conducted Emission from Grid-Connected and Stand-Alone Micro-Inverter in a Nano-Grid Road Lighting System", *Sustainability* 2019, Volume 11, Issue 20, October 2019. doi.org/10.3390/su11205690.

Performance and Electromagnetic Compatibility of a Photovoltaic Power Converter

C. Jettanasen, and C. Pothisarn

Abstract— This study aims to evaluate the performance of DC-DC converter in photovoltaic system. Electromagnetic compatibility (EMC) characteristics, issues and its effect on photovoltaic power converter are performed and taken into consideration. Ćuk converter has been built in this research. The proposed filter circuit is also created and integrated in Ćuk converter in photovoltaic system, and tested in field testing. The EN 55011 standard has been applied as a reference in order to verify the performance of the proposed filter circuit in terms of Electromagnetic Interference (EMI) reduction in actual application.

I. INTRODUCTION

Electrical energy has become a challenge issue in many parts of the globe due to rapid increase in population and economic growth throughout the developed and developing country. This results in rising of energy demand and decreasing of energy resource, especially fossil fuel. Renewable energy has become the most preferable alternative energy source, which has less environment impact. In particular, solar power. However, solar power equipment and devices consist of power electronic devices that can generate electromagnetic interference (EMI) while it operates. This can cause physical damage and hindering system operation, thus electromagnetic compatibility (EMC) must be analyzed in order to smoothly operate different equipment in common electromagnetic environment.

Literature review in EMC field and its effect on photovoltaic performance has been reviewed. In photovoltaic system, the power quality is the main concerning because system mainly consists of power electronic devices. While the system operates, power quality issue such as harmonics, EMI, noise, and etc. should not exceed the standard value in order to effectively operate the system [1]. The recent research and developing of power converter technologies in photovoltaic application have been reviewed in Kouro and et al. research [2] The EMC issue and its effect to system and optimization in power converter have been discussed in Tonkal and Novoseltsev research [3]. In [4], it presented modelling of EMC behavior in converter. The high frequency EMI filter in switch mode power supply has been discussed in terms of electromagnetic characteristics in order to optimize filter

circuit [5]. EMI filter design using modelling of coaxial inductance or S-parameter has been discussed [6]-[7]. For the noise filter circuit currently used mainly consists of two types: active and passive filter, which are capable of reducing noise in the system. These circuits are commonly used to improve power quality and enable compatibility in the system [8]-[9]. From the researches and studies discussed above, it can be seen that the power electronic part inside the power converter raises concern over power quality and its compatibility with other device in the system. hence, the study and analysis on EMC must be done in order to ensure smooth operation of the photovoltaic system.

This study presents EMC performance of DC-DC Ćuk converter in the photovoltaic system. The electromagnetic characteristics of electromagnetic noise generated in a Ćuk converter are focused. The noise level must be conformed to EN55011 standard, which shows EMC of DC-DC converter system.

II. SIMULATION

The designed Ćuk converter has fixed frequency at 50 Hz level and adjusted duty cycle at 0.3582 in order to calculate the suitable composition of a circuit for user application. The designed circuit is illustrated in Fig.1. Components of the circuit consist of inductors (L1 and L2) that depend on ripple current, capacitors (C1 and C2) that depend on ripple voltage. The Ćuk converter performs properly at the ripple current and voltage at 1% or 0.01. Inductors size in the circuit is 15.5 mH each. The designed capacitors size used in this study are 10 mF and 3.3 μ F for C1 and C2, respectively. MOSFETs have been used as switching devices due to high frequency operation. Input signal of the MOSFETs is generated from output signal of a saw-tooth circuit as shown in Fig. 2.

Electromagnetic interference measurement requires Line Impedance Stabilization Network or LISN. It connects to the front of a boost converter. The stray capacitance per drain leg of the MOSFET to the ground is supposed to be 400 pF.

Research (No. KREF045803) support by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund, Thailand

C. Jettanasen is with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

C. Pothisarn is with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (e-mail: chaichan.po@kmitl.ac.th).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

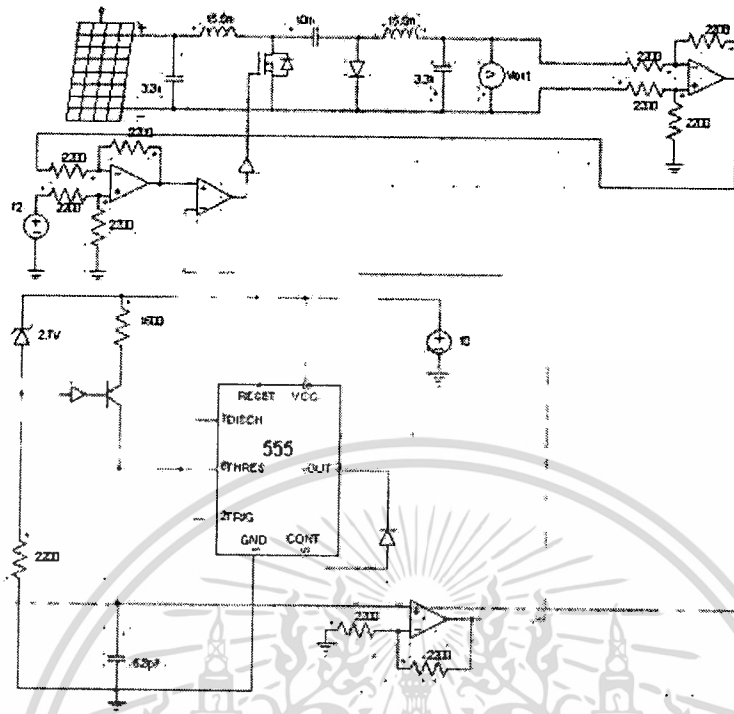


Figure 1 Overview of the Ćuk converter system

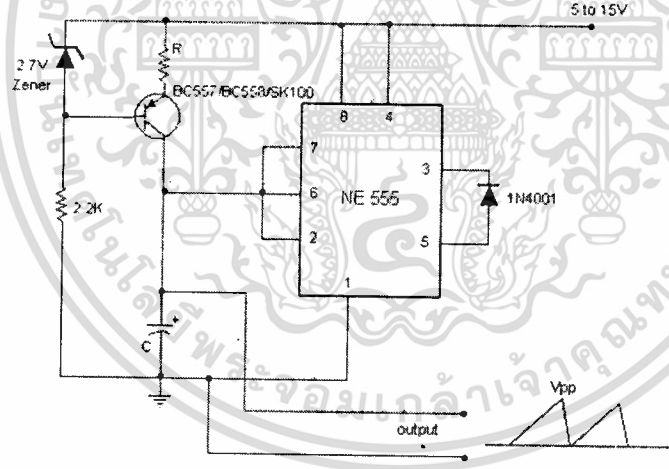


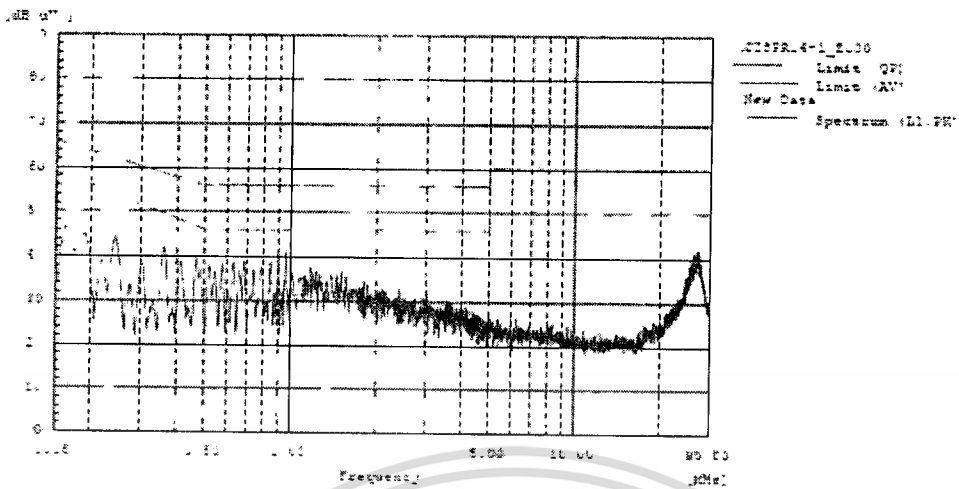
Figure 2. Saw tooth Circuit

III. RESULT

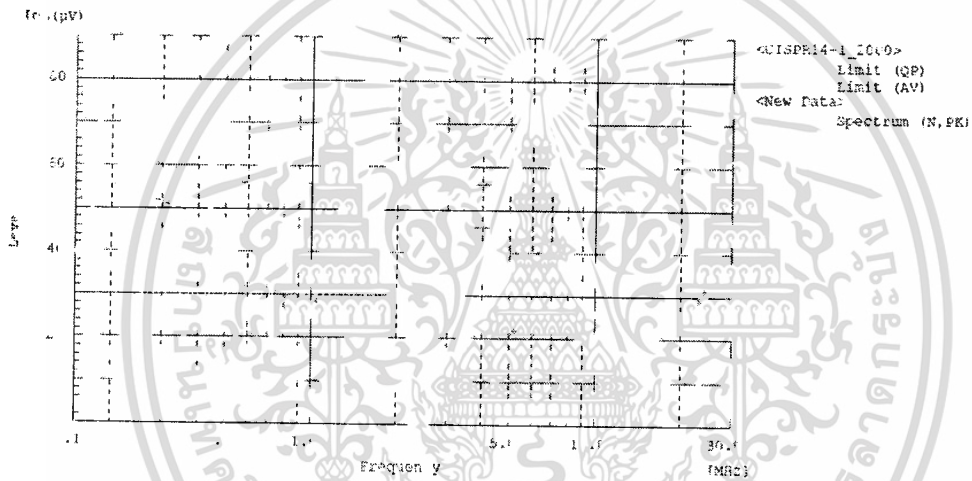
The prototype of the proposed Ćuk converter circuit has been built and tested in EMC testing facility. The EN5011 standard has been used as reference for testing process. The frequency range has been varied from 150 kHz to 30 MHz and data are obtained from both line and neutral.

The result from spectrum analyzer in case of Ćuk converter without filter circuit in both line and neutral is

shown in Fig. 3 (a) and (b) respectively. From the result, it can be seen that EMI value is within standard value. The red line in figure represents quasi peak (QP) and the pink line represents average value (AV). After connected to photovoltaic system, the new testing result from spectrum analyzer in both line and neutral is obtained and illustrated in Fig. 4 (a) and (b) respectively. It can be seen that EMI level also stays within standard value in both line and neutral. Thus, the proposed Ćuk converter circuit generates noise within standard and is compatible with other devices.

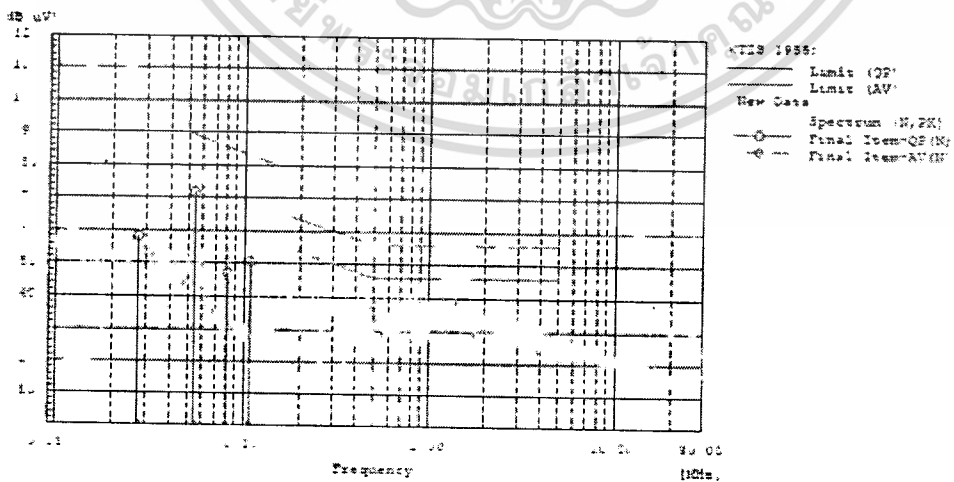


(a) Conducted EMI in line



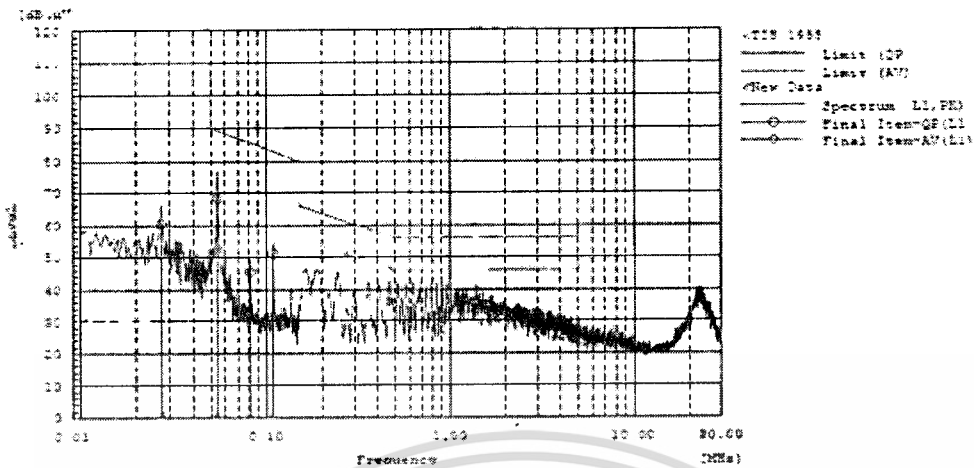
(b) Conducted EMI in neutral

Figure 3. Obtained spectra from spectrum analyzer compared with standard EN55011



(a) Conducted EMI in line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Conducted EMI in neutral

Figure 4. Obtained spectra from spectrum analyzer compared with standard EN55011 in case connected to photovoltaic system

IV. CONCLUSION

This research studied the performance and characteristics of EMI in Ćuk converter connected to photovoltaic system. The noise and EMI signal generated from the proposed Ćuk converter circuit were measured in EMI/EMC testing facility. The obtained data were then compared with EN55011 standard in both normal operation and in case connected with photovoltaic system. The result showed that the proposed Ćuk converter circuit generated noise and EMI within EN5011 standard. Thus, it can be concluded that this proposed Ćuk converter can be applied on photovoltaic system and compatible with other devices or equipment in terms of good functioning and electromagnetic compatibility.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research (No. KREF045803) from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund, Thailand.

REFERENCES

- [1] M. Shahbazi and A. Khorsandi, Chapter 10 - Power Electronic Converters in Microgrid Applications, In *Microgrid*, edited by Magdi S. Mahmoud, Butterworth-Heinemann, 2017, Pages 281-309.
- [2] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov and L. G. Franquelo, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 47-61, March 2015.
- [3] V. E. Tonkal and A. V. Novoseltsev, "Electromagnetic Compatibility (EMC) of Power Converters as a Problem of Parametric Optimization," 1984 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, 1984, pp. 1-4.
- [4] Liang Xue, Chunging Wang, and Jianguo Jiang, "High frequency model and parameter sensitivity analysis of EMI filter's characteristic in switched mode power supply," *Proceedings Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, pp.400-404, 4-7 Nov. 2003.
- [5] Kotny, J.-L., Margueron, X.; Idir, N., "Coupling inductor models for EMI filters," 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009. IECON '09, pp.4092-4097, 3-5 Nov. 2009.
- [6] Y.-C. Son, and Seung-Ki Sul, "A novel active common-mode EMI filter for PWM inverter," *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol.1, pp.545-549, 2002.
- [7] Yo-Chan Son, and Seung-Ki Sul, "Generalization of active filters for EMI reduction and harmonics compensation," *Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting*, vol.2, pp.1209-1214 vol.2, 12-16 Oct. 2003.
- [8] P. Pairodomchai, S. Suwankawin, and S. Sangwongwanich, "Design and Implementation of a Hybrid Output EMI Filter for High-Frequency Common-Mode Voltage Compensation in PWM Inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.45, no.5, pp.1647,1659, Sept.-Oct. 2009.
- [9] Wenjie Chen, Xu Yang, and Zhaoan Wang, "A Novel Hybrid Common-Mode EMI Filter With Active Impedance Multiplication," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.58, no.5, pp.1826-1834, May 2011.

Performance and electromagnetic interference mitigation of DC-DC converter connected to photovoltaic panel

C Jettanasen , C Pothisarn

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract

Renewable energy has been rapidly increased in terms of installed capacity. However, the electronic components inside such a system can cause a serious threat such as Electromagnetic Interference (EMI) to nearby sensitive devices/equipment. This paper aims to study on performance of DC-DC boost converter connected to photovoltaic panel and how to reduce EMI emissions issued in the system. A passive EMI low-pass filtering is one of various mitigation techniques. The designed converter connected to photovoltaic panel and EMI filter are tested in both simulation software and field testing by using EN55022 standard as a reference.

Keywords: Converter, Electromagnetic interference, Renewable energy, Performance analysis

1. Introduction

In recent decade, renewable energy has gained significant role in energy and environment issue, especially the solar power. The reason is a support from government with incentive policy, reduction in installation cost and rapid increase in private sector investment. Data from International Energy Agency (IEA) indicated the rapid increase in solar power penetration level [1]. Photovoltaic (PV) electricity generation is 37 TWh or 0.2% share of global electricity generation in 2010 and its target will be 4,572 TWh or 10.8%, share of global electricity generation in 2050. This results in massive PV installation, thus increasing the various technical issues, such as power quality, electromagnetic interference (EMI). The photovoltaic system requires integrated operation between electronic devices and controlling technique in order to achieve maximum power transfer in energy conversion process with high efficient output [2]-[3].

One of the components in photovoltaic system is a converter used to convert or adjust the voltage and/or current level to load or end user. It increases and regulates voltage on the required level in order to operate equipment or device. However, the operation of DC-DC boost converter can generate electromagnetic interference (EMI) from the switching devices inside electronic components. This noise signals may interrupt other sensitive electronic devices or communication in the system [4]. High speed switching power converters are significant for the more electric aircraft, the work [5] proposed the high frequency EMI attenuation technique for designing ACPI converter, it was shown that reducing the main gate resistor value is an effectively way to reduce EMI causing lower power losses.

The EMI mitigation methodology must be implemented in order to limit this value within standard. Many researches and studied regarding the novel EMI mitigation have been reviewed [6]-[9]. The common mode noise reduction in boost converter has been proposed using current cancellation circuit [7]. The switching frequency modulation circuit to limit EMI generated from PWM frequency modulation-based switching power supply has been discussed [8]. The PFM and PSM hybrid modulation control method implemented with spread spectrum technique has been introduced in [9] to mitigate EMI in LLC resonance power converter. The LED driver is no longer working on a fixed frequency, a spread spectrum method in [10] is also one of various ways are used to overcome the EMI in LED system. EMI filter for

* Manuscript received July 14, 2018; revised July 29, 2019.

Corresponding author. E-mail address: chaiyan.je@kmitl.ac.th

doi: 10.12720/sgce.8.6.806-812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electronic device design has been described in Caponet and et al. research [11]. The Line Impedance Stabilization Network (LISN) is a main part to determine EMI in any electrical/electronic system, such as in power converter [12]-[13]. The Ferrite chokes are normally applied in the system as a filter to suppress EMI, the improved RLC model of the chokes has been studied in [14] by parameter determination technique. From the researches and studies mentioned above, it can be seen that EMI is the main issue in converter including the one that is part of photovoltaic system. The mitigation methodology must be taken into account to meet the Electromagnetic Compatibility (EMC) of the whole system.

This paper proposes a design of DC-DC boost converter in photovoltaic system. The performance and its effect in terms of EMI are addressed using EN55022 standard as a reference. The EMI mitigation methodology using low-pass EMI filter is also presented. The proposed methodology has been testing in field test with photovoltaic panel. The designed circuit and EMI mitigation method can be applied to various electrical/electronic devices that cause EMI issue.

2. Conducted EMI in PV System

The solar power generation system consists of a photo voltaic panel as the DC power source, sensors, controllers and DC-DC converter to matching and maintaining the voltage level to the load. In the DC conversion can easily introduce or form to high-frequency noise, also called Electromagnetic interference (EMI). The disturbance caused by EMI may degrade the overall performance of the circuit in term of the data interruption and losses of data. The problem of EMI also related to system efficiency by generated the high order power losses in the form of heat, sensitive electronics devices might be damaged. The electromagnetic interferences are composed of conducted electromagnetic interference (150 kHz - 30 MHz) and radiated electromagnetic interference (30 MHz - 1000 MHz). In PV system operation is focused on the conducted emission, which is divided into two components; common mode (CM) and differential mode (DM) interference depends on the path of noise delivered in the system. The CM mode the noise conducted on line and neutral in the same direction to the load and flow to reference ground thru the generated parasitic capacitor. The DM mode, noise is conducted on the signal line and ground in opposite direction to each other.

3. Simulation

3.1. Modelling

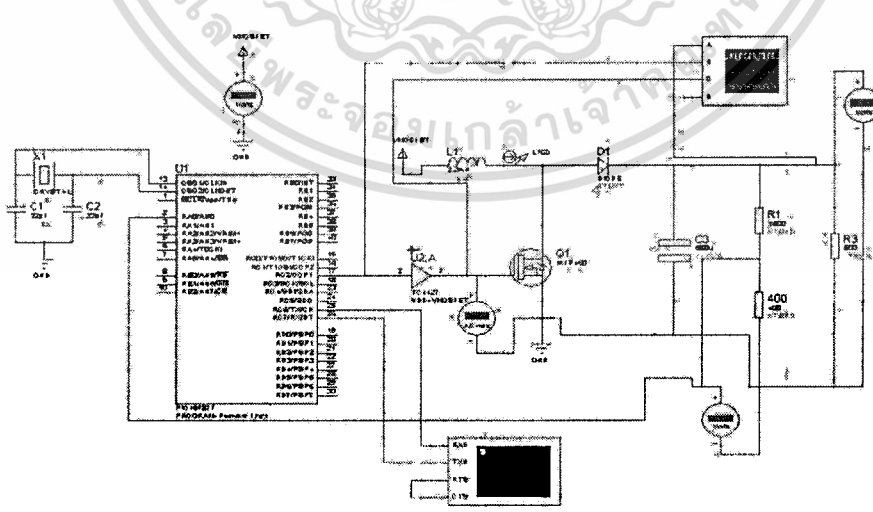


Fig. 1. DC-DC boost converter circuit with load variation

In this study, a boost converter for the photovoltaic system has been designed and investigated in terms of power quality and EMI issues. The designed DC-DC boost converter using PROTEUS software is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shown in Fig. 1. The circuit operation can be described as follows: MOSFET usually functions as switching device in boost converter, controlled by voltage difference between gate and source terminal. The voltage regulation with negative feedback requires a duty cycle of PWM as input data to adjust the output voltage of boost converter, starting from voltage divider to separate the voltage level determining the reference voltage to microcontroller 16F877. If the input voltage is excessive, microcontroller will command the MOSFET to switch lower PWM duty cycle. In the other hand, below expected voltage level, MOSFET will switch higher PWM duty cycle; this aims to remain the output voltage of boost converter to 24 V.

The Line Impedance Stabilization Network (LISN) as illustrated in Fig. 2 was implemented to system. Its role is to stabilize the impedance between source and ground, split noise emitted from the device under test passing to analyzer, and attenuate noise coming from the main power supply passing through the focused system in order to measure or determine the noises and also reach the safety condition.

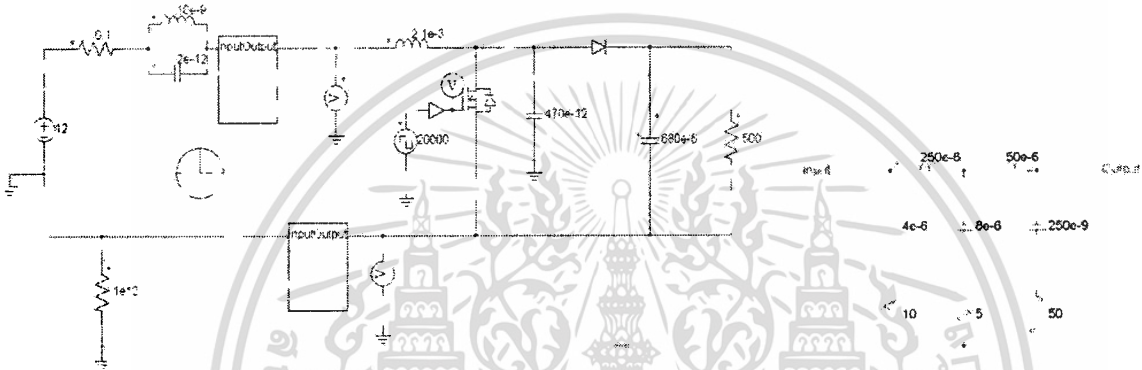


Fig. 2. Boost converter with line impedance stabilization network

3.2. Simulation result

The conducted EMI simulation has been divided into two modes; 1) differential mode (DM) emission: the emission caused by current flowing in line and ground that can be calculated the differential mode voltage by measuring neutral to ground voltage subtracted by line to ground voltage, and the obtained term is divided by 2, and 2) common mode (CM) emission: the emission caused by the current flowing in line through ground bypassing with parasitic conductor generated by ground to circuit, represented by adding line to ground voltage with neutral to ground voltage, and then divided by 2. This calculation is done by mathematical equation written in MATLAB. The EMI is next plotted in frequency domain using Fast Fourier Transform (FFT) and compared with the EN55022 standard. The DM and CM simulation results are depicted, respectively, in Fig. 3.

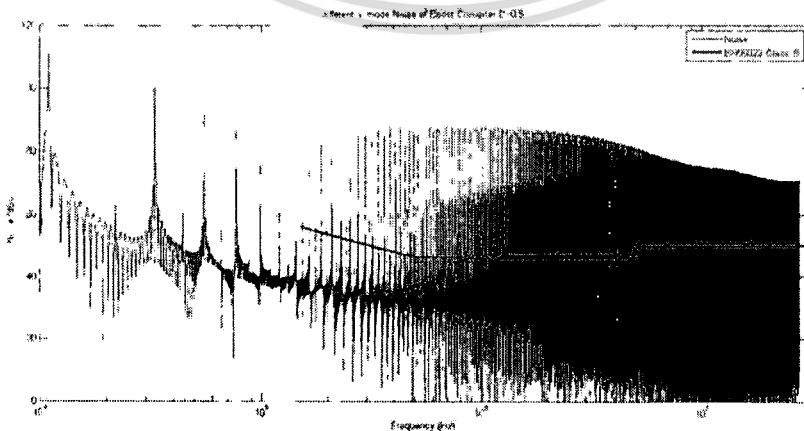


Fig. 3. Spectrum of simulated DM emission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The simulation results in DM and CM noises showed the exceeded amount of EMI emissions compared with the international EMC standard. EMI filter, which is one reduction technique, is taken into account to eliminate excessive unwanted noise out of the system. The function of EMI filter is similar to a low-pass filter. However, it works in high frequency region, containing of appropriated inductor and capacitor. After adding the designed EMI filter, the simulated results are illustrated in Fig. 4, respectively.

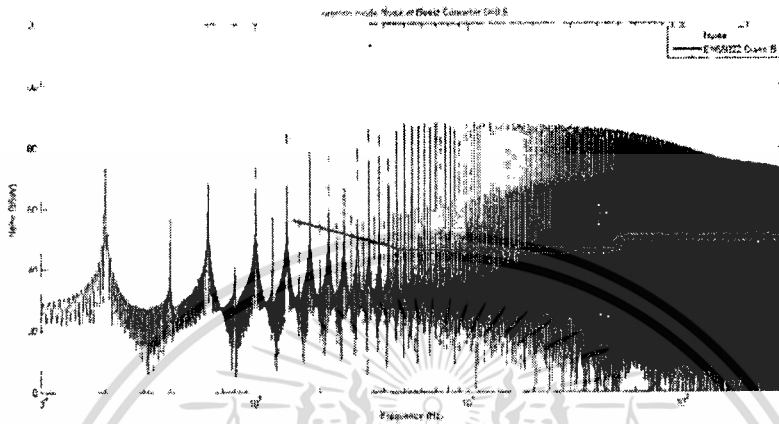


Fig. 4. Spectrum of simulated CM emission

4. Experiment

4.1. EMI examination

The experiment of a proposed boost converter with voltage control connected to PV panel works properly and confirms the simulation results. The electromagnetic interference test results are based on the assumptions and simulation results described above, and the actual values of the tests are divided into two parts, which are noises conducted in line and neutral cable, the test conditions are 220 Volt 50 Hz within room temperature (25 Celsius) and 60% humidity with EN55022 Class B standard are shown in Fig. 5 and Fig. 6.

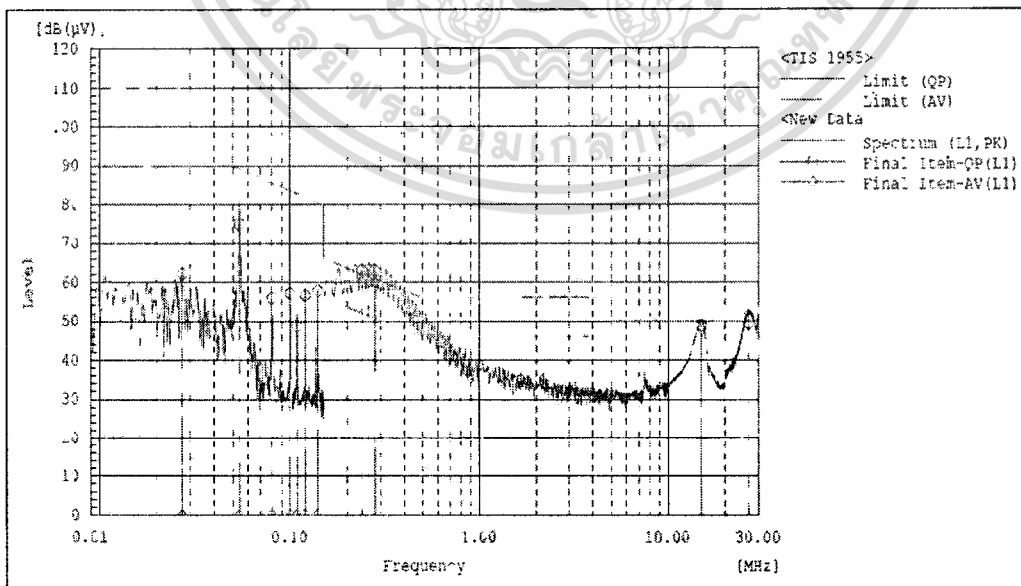


Fig. 5. Noise distribution in line cable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

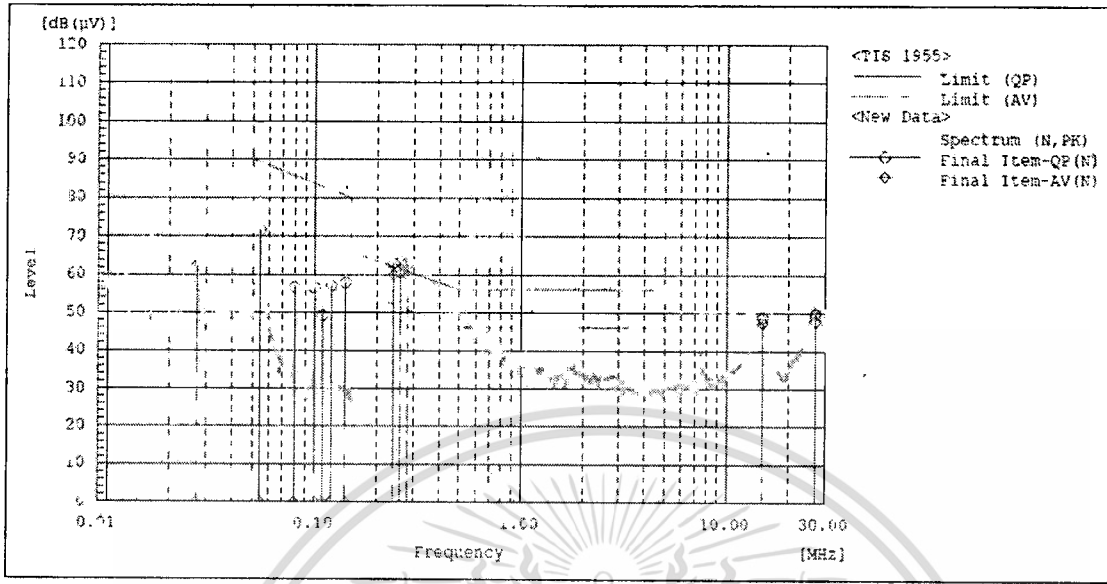


Fig. 6. Noise distribution in neutral cable

The tests result in form of a graph show data about electromagnetic interference level at various frequencies in the conducted noise emission range with laboratory level tools. It is obvious that magnitude of conducted EMI is exceeded the standard. These points cause electrical power losses in the circuit and may cause the system not to function properly. The results of the points which are exceeded the EN55022 Class B standard and high peak that should be lowered points are shown in the Table 1 and Table 2. The high peak point affects the durability of the sensitive electronics devices.

Table 1. Information on the measurement of noise distribution in line cable

No.	Frequency MHz	Reading QP dB(µV)	Reading CAV dB(µV)	c.f dB	Result QP dB(µV)	Result CAV dB(µV)	Limit QP dB(µV)	Limit AV dB(µV)	Margin QP dB	Margin CAV dB
1	0.02713	51.8		10.3	62.1		110.0	0.0	47.9	
2	0.05419	64.7		10.2	74.9		89.3	0.0	14.4	
3	0.08004	45.7		10.2	55.9		85.7	0.0	29.8	
4	0.09999	47.0		10.1	57.1		83.7	0.0	26.6	
5	0.10853	38.7		10.1	48.8		82.9	0.0	34.1	
6.	0.12003	46.4		10.2	56.6		82.0	0.0	25.4	
7	0.13998	47.6		10.2	57.8		80.6	0.0	22.8	
8	0.23987	52.9	49.9	10.2	63.1	60.1	62.1	52.1	-1.0	-8.0
9	0.25961	53.0	50.0	10.2	63.2	60.2	61.4	51.4	-1.8	-8.8
10	0.27939	52.8	49.9	10.2	63.0	60.1	60.8	50.8	-2.2	-9.3
11	15.001	38.2	36.9	10.8	49.0	47.7	60.0	50.0	11.0	2.3
12	26.6196	40.1	38.0	11.1	51.2	49.1	60.0	50.0	8.8	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Information on the measurement of noise distribution in neutral cable

No.	Frequency MHz	Reading QP dB(uV)	Reading CAV dB(uV)	c.f dB	Result QP dB(uV)	Result CAV dB(uV)	Limit QP dB(uV)	Limit AV dB(uV)	Margin QP dB	Margin CAV dB
1	0.02713	51.9		10.3	62.2		110.0	0.0	47.8	
2	0.05449	61.4		10.2	71.6		89.3	0.0	17.6	
3	0.07998	46.4		10.2	56.6		85.7	0.0	29.1	
4	0.100	46.3		10.1	56.4		83.7	0.0	27.3	
5	0.1085	36.1		10.1	49.2		82.9	0.0	33.7	
6	0.12002	46.7		10.2	56.9		82.0	0.0	25.1	
7	0.140	47.6		10.2	57.8		80.6	0.0	22.8	
8	0.23931	52.9	49.8	10.2	63.1	60.0	62.1	52.1	-1.0	-7.9
9	0.26005	53.2	50.2	10.2	63.4	60.1	61.4	51.4	-2.0	-9.0
10	0.2803	52.7	49.7	10.2	62.9	59.9	60.8	50.8	-2.1	-9.1
11	14.9596	38.1	36.7	10.7	48.8	47.4	60.0	50.0	11.2	2.6
12	26.9408	39.2	37.2	10.6	49.8	47.8	60.0	50.0	10.2	2.2

4.2. EMI filter

According to the EMI examination results the EMI filter has been taken into order to mitigate the conducted emission in the points which the EMI values exceeded the standard. When the low pass EMI filter connected to the system, the EMI effect is significantly reduced. As shown in Fig.7, most of the high peak value are satisfactory diminished.

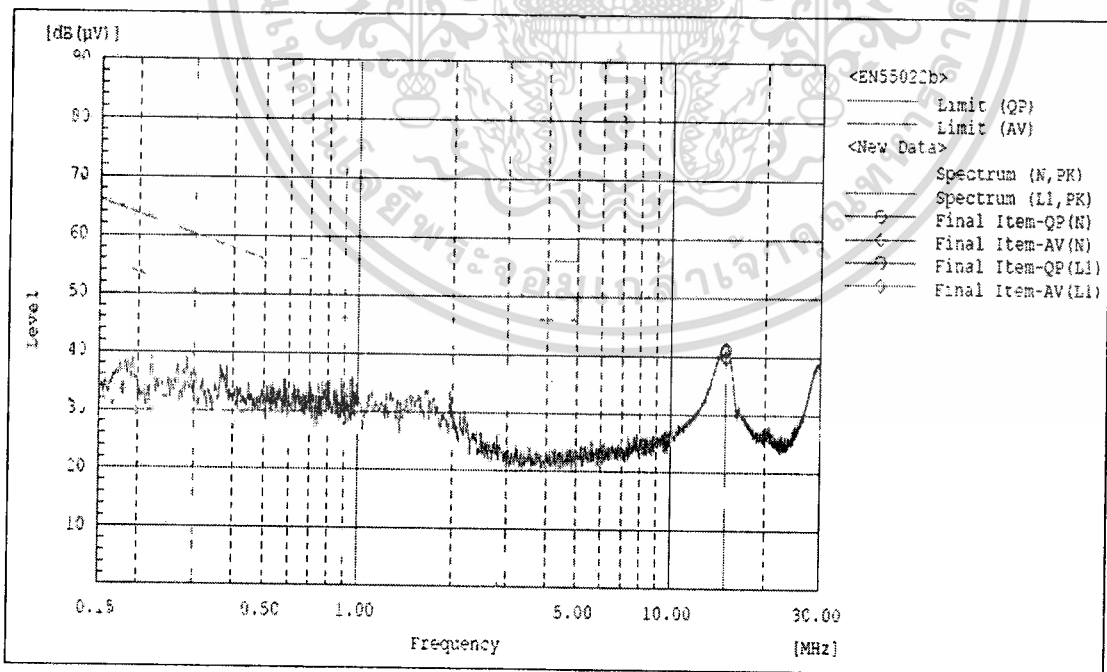


Fig. 7. Noise distribution in line and neutral cable of improved circuit with EMI filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Conclusion

This paper proposed the design of DC-DC boost converter in photovoltaic system and EMI mitigation using passive low-pass EMI filter. The result has revealed that conventional boost converter generated EMI which is needed to be reduced. After inserting the proposed low-pass EMI filter, the conducted EMI in both line and neutral has been reduced significantly. By comparing with EN55022 Class B standard, it has shown that low-pass EMI filter mitigates EMI within standard value. Thus, it showed the effectiveness of the EMI mitigation method in such a system. This can also be extended to be used for various electrical/electronic devices/equipment that contain electronic components with high EMI generation.

Although the EMI mitigation improved the performance and reliability of the system, lower overall efficiency must be compromised. The balancing of efficiency and EMI is a necessary key, the highest system efficiency within excepted EMI level is the desire of every circuit creator.

Acknowledgements

The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research (No. KREF 045803), from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund, Thailand.

References

- [1] International Energy Agency (IEA), "Solar Photovoltaic Roadmap"
- [2] Azam MA, AshfanoorKabir M, Imam MH, and Abdullah-Al-Nahid S. Advanced artificial intelligence algorithms for microcontroller based maximum power point tracking of photovoltaic. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, 2012; 1(3): 143-155.
- [3] Yang B, Li W, Zhao Y, He X. Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Apr. 2010; 25(4): 992-1000.
- [4] Channi HK, and Sohal HS. Power quality innovation in harmonic filtering, *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences (IJREAS)*, Feb. 2012; 2(2): 518-528.
- [5] Charalambous A, Yuan X, and McNeill N. High-Frequency EMI Attenuation at Source With the Auxiliary Commutated Pole Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, July 2018; 33(7): 5660-5676.
- [6] Farhadi A, and Jalilian A. Modeling, simulation and reduction techniques of electromagnetic conducted emission due to operation of power electronic converters. *International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPO'07)*, Sevilla, Spain, 2007.
- [7] Shoyama M, Ohba M, and Ninomiya T. Common-mode noise reduction by current cancellation in balanced buck-boost switching converter. *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Xi'an, 2004; 3: 1505-1510.
- [8] Feng L, and Chen DY. Reduction of power supply EMI emission by switching frequency modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 9(1): 132-137, Jan 1994.
- [9] Park HP, Kim M and Jung JH. Spread spectrum technique to reduce EMI emission for an LLC resonant converter using a hybrid modulation method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, May 2018; 33(5): 3717-3721.
- [10] Yanuar HM, Hidayat R, Firmansyah E. An experimental study of conducted EMI mitigation on the LED driver using spread spectrum technique. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 62(3), pp. 293-299. Retrieved 15 Apr. 2018.
- [11] Caponet MC, Profumo F, and Tenconi A. EMI filters design for power electronics. 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), Cairns, Qld., 2002; 2027-2032.
- [12] Beer ASD, Wooding GN and Van Wyk JD. Problematic aspects when using a LISN for converter EMI characterisation, *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town, 2013; 633-637.
- [13] Stahl J., Kuebrich D. and Duerbaum T. Characterisation of an effective EMI noise separation including a standard LISN, 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Berlin, 2010: 13-16.
- [14] Li H, Feng C, Yang Z and Yang Z. An improved ferrite choke RLC model and its parameters determination method, *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 2017; 6995-6999.

Article

Characteristics and Effects of Conducted Emission from Grid-Connected and Stand-Alone Micro-Inverters in a Nano-Grid Road Lighting System

Chaiyan Jettanasen and Atthapol Ngaopitakkul *

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Bangkok 10520, Thailand;
chaiyan.je@kmitl.ac.th

* Correspondence: atthapol.ng@kmitl.ac.th

Received: 1 September 2019; Accepted: 12 October 2019; Published: 15 October 2019



Abstract: A road lighting system is important for drivers and uses a lot of energy. The road lighting system must be installed throughout roads which have a long distance and a large volume, which causes power loss in the power transmission line. The concept of combining a power generation system by using a solar power system and a road lighting system is presented to solve this problem; it is called “a nano-grid road lighting system”. The nano-grid system consists of a grid-connected system and a stand-alone system and both systems use micro-inverters to convert the electric power for LED luminaire loads. Both micro-inverters are comprised of switching devices that cause the conducted emission (CE) in the electrical system. The LED luminaire is a very sensitive load because it is less resistant to the CE. Therefore, this research studies the CE in the nano-grid system in each period according to the working pattern of the device to study the CE characteristics for use in the design of CE attenuation methods in the future. The CE of the stand-alone system which is used at nighttime gives a higher level than the grid-connected system and exceeds the Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) 14-1 standard. The CE of the grid-connected system has a high level in the early frequency ranges, whereas the CE of the stand-alone system has a high level throughout the test frequency range.

Keywords: electromagnetic interference (EMI); conducted emission (CE); common mode (CM); differential mode (DM); grid-connected micro-inverter; stand-alone micro-inverter; photovoltaic; renewable energy; nano-grid

1. Introduction

The road lighting system is very important for road travel. It uses a large amount of electricity and has a long-distance that causes power loss in the electrical transmission line. To solve this problem, the idea of combining the power generation system and the road lighting system is presented to reduce power loss in the transmission line. In the same way, if too much electricity is produced for the use of the road lighting system, it may be sent back to the grid for sale. This concept is called “A nano-grid system”. The concept of creating a nano-grid road lighting system has been presented in several research works [1–13]. The combination of power-generation and electrical-load systems results in a concept referred to as nano-grid system. Each country has different power sources that are suitable for use in each nano-grid system.

In addition, the road lighting system is developed in the lighting and communication control between each pole in many researches. For the lighting control, the CEN/TR 13201 standard is the heart of the street lighting system. In the research of C.B. Soh et al. [14,15], the intelligent street lighting is designed by using the Arduino Mega Board with ATmega1280 chip to communicate with

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

sensors and control the lighting dimmer. The Xbee module is used to be the wireless communication board between street lighting models. Four different lighting dimming schedules are presented in this research including: economic, intense, balance, and no dimming. The economic schedule can reduce 126 kWh/year/lamp of the street lighting energy consumption. L.T. Doulos et al. [16] presented that LEDs should be used in the street lighting system due to its low power requirements and low CO₂ emission. The methodology for evaluating a lighting tender is presented to select the most energy efficient equipment and replace the existing luminaires with new LED luminaires. The fluctuation of the indicators depends on the geometric characteristics of each grid. The Installation Lighting Factor (ILF) should be between 0.8 and 1.3 for M classes (National roadways) and The Utilance (U) factor should be more than 50%. L.T. Doulos et al. [17] present the control system of tunnel lighting systems. The control systems are classified into four scenarios: existing control switching (Scenario A), proposed control switching (Scenario B), LED retrofit 10% step control dimming (Scenario C), and LED retrofit continuous control dimming (Scenario D). The scenario B can save energy 35%. The replacing of existing luminaires with LEDs (Scenario D) energy savings can reach 54%. In Pasolini et al.'s research [18], the infrastructure architecture and main task are designed for the smart street lighting system. the street lighting system consists of the LEDs lamp control system, communication system, and data center. The light controller (LC) is used to turn on/off and dim the LED lamp. The internet of thing (IOT) is a main part of this research. The power line communication (PLC), narrowband-IoT (NB-IoT), the long-term evolution (LTE), the low-power wide-area network (LPWANs), the long-range (LoRa), and sigfox are discussed about the advantages/disadvantages of each method to find the most suitable method. The overall saving of 80% energy and operations costs. In the research of Wojnicki Igor et al. [19], Applying dynamic control results in energy savings, which have been verified for both 2004 and 2014 standards. It is far greater for the 2014 one and reaches 40.82%. They can significantly increase energy consumption due to additional lighting requirements for such areas. Thus, decreasing the consumption by the dynamic control becomes more and more important. The research of Wojnicki Igor and Kotulski Leszek [20] presented the suitability of traffic density and energy detection parameters used in street lighting systems to reduce the cost of installing control systems, data collection, and electricity system. The data collection cost consists of the devices, data transmission, communication hardware, storage and software licensing. Therefore, properly designed working frequency of the traffic density detection system can help to reduce the electricity cost of streetlights and data collection costs. From the above research, all of the street lighting system researches focus on developing the technology, but the power quality and the electrical interference are also the main topic for the efficient street lighting system.

This nano-grid system supplies the electric power to an LED luminaire directly, so there may be some electromagnetic noises caused by the nano-grid system being sent to the LED luminaire. Electromagnetic noises are divided into 3 main frequencies: harmonics (0–2,100 Hz), conducted emission electromagnetic interferences (CE EMI: 150 kHz–30 MHz), and radiated emission electromagnetic interferences (RE EMI: 30 MHz–1 GHz). In general, the harmonics are reduced from the low pass filter circuit within the inverter because it affects the output waveform of the alternating current and it is easy to observe and measure. On the other hand, the electromagnetic interference (EMI) has a high frequency, so it is difficult to measure and needs specific tool to measure the EMI. In the nano-grid road lighting system, the conducted emission (CE) is a great importance interference because the nano-grid system is connected to the LED luminaire and the grid system directly. The CE from the nano grid can result in LED luminaire control system malfunction, shorten LED luminaire life, and grid relay malfunction. To prevent this problem, CE characteristics must be studied and analyzed in form and cause of the signal to design and apply appropriate CE attenuation methods. The CE is divided into two modes according to the current flow of signals; a common mode (CM) and a differential mode (DM) [21].

The use of the nano-grid system as an electricity generation system requires to consider the CE caused by the nano-grid system. the CE will affect various electrical devices connected to the nano-grid system. The study of CE characteristics is very important. It can be used to consider appropriate CE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

attenuation methods. The research of Hirofumi Akagi et al. [22] explains that EMI is divided into two forms according to the frequency range: conducted range and radiated range. Regarding the electrical system, the CE from a device, which is connected to the system through the conductor, is a major disturbance to the system. Hirofumi Akagi et al. investigated the CE of an inverter-driven motor, rated at 400 V and 15 kW, theoretically and experimentally. The CE could interfere with other electronic equipment through power lines, while the radiated emission could cause malfunctions, particularly to radio-controlled devices in the vicinity of the noise source. In the research of Di Han et al. [23,24], the comparison between output CM chokes for SiC drive operating at 20 kHz–200 kHz switching frequencies is present. Both 20 kHz and 200 kHz CM chokes are used to reduce the CE in variable speed drives (VSDs) and each frequency CM choke is varying a CM inductance (L_{CM}) included 2 mH, 10 mH, and 50 mH. Higher impedance CM inductor is needed to attenuate the noise at an increased switching frequency. The present research focuses on the CE characteristics from the nano-grid system in each duration. In the literature, several concepts have been studied the CE characteristics in the other systems and there is no analysis in each working period. Therefore, it is not conclusive for the CE characteristics from the nano-grid system which is difficult to design and implement the CE attenuation technique. In the present work, a grid-connected system and a stand-alone system of the nano-grid system were studied in terms of CE including CM and DM characteristics in order to design and apply the appropriate CE attenuation methods in the future.

In this research, the CE characteristics of the nano-grid system will be presented. This research focuses on the CE comparison from the grid-connected micro-inverter and the stand-alone micro-inverter in the nano-grid system of the road lighting system. The measurement results were collected in 3 forms: total CE, CM, and DM. The total CE is compared with the CISPR 14-1 standard [14] and compared between the grid-connected system and the stand-alone system. The result is found that the total CE in the stand-alone system is higher than the grid-connected system in the high-frequency range that may result in more radiated interference. In the CM and DM measurement, the CM and DM affect the CE directly, but in the stand-alone system the CM is higher than the DM considerably. In the road lighting system, LED luminaire is used to be a load of the system. The CE from the nano-grid system will affect the LED luminaire directly. In the result, the CE of the nano-grid system exceeds the CISPR 14-1 standard [21]. In the daytime, the CE of the grid-connected system will affect the LED luminaire and the CE of the stand-alone system will affect the LED luminaire in the nighttime. Therefore, in future the CE attenuation should be applied to this system along the day, especially during the nighttime which has the highest CE level.

This paper is organized into five sections as follows. The nano-grid system is simulated into the laboratory experimental setup and the CE measurement method will be explained in Section 2. In Section 3, results of CE from the grid-connected micro-inverter and the stand-alone micro-inverter will be presented and separated into CM and DM. Finally, the conclusion will be presented in Section 4.

2. Experimental Setup and Testing Methods

2.1. The Road Lighting System

Mainstreaming Energy Efficiency in Thai Municipalities presents the pilot project to improve energy consumption and lighting quality of roadway lighting in Thailand [25]. In this plan, the conventional road lighting systems are carried out to replace 250-watt HPS luminaires with 120-watt LED luminaires due to HPS luminaires providing poor average illuminance and uniformity values, and they being lower than the standard, as the conventional lighting systems were installed and used for a long time, leading to deterioration of the luminaire and lamp efficiency, hence decreased lighting quality. Papers [26] present a positive effect on LED luminaire installation, which can improve lighting quality and energy efficiency of road lighting in Thailand.

Thailand is located near the equator which has high sunlight irradiance and the sunlight throughout the year, so the solar power generation is the most suitable. It is found that solar power potential

in Thailand is 17–20 MJ/m² per day or with an average of 1000 W/m² for roughly 5 h per day [27]. For this reason, the integration of solar systems into road lighting systems is presented in terms of overall performance, charge controller, life cycle assessment, environmental impact, and economic feasibility [27–29]. However, paper [29] showed that using stand-alone solar road lighting systems causes high initial installation costs from energy storage system. As a result, a nano-grid road lighting system which is a road lighting system that uses a solar system to generate electrical energy, enabling operation in a stand-alone mode and a grid connection mode is presented in order to provide outstanding of using solar energy for road lighting systems as shown in Figure 1.

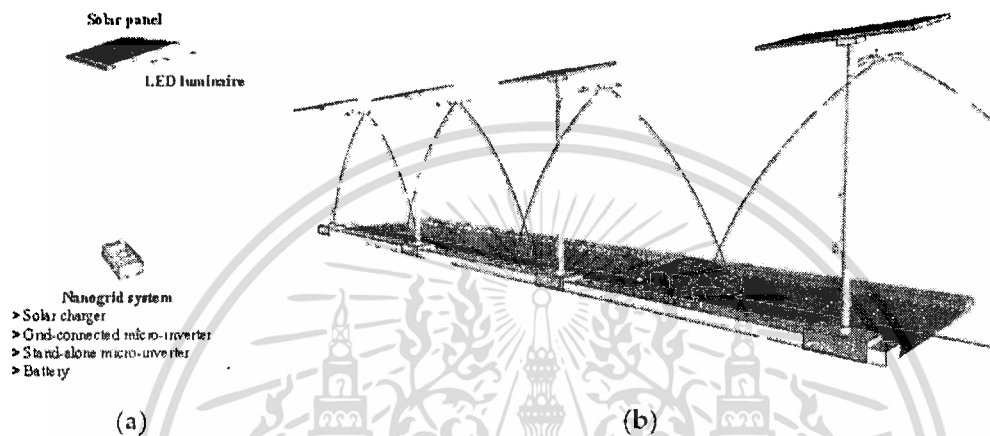


Figure 1. The road lighting system: (a) Element of the road lighting pole; (b) The road lighting system.

2.2. The Nano-Grid System of the Road Lighting System

The concept of a nano-grid road lighting system is a road lighting system that uses solar energy to produce electrical power, enabling operation in a stand-alone mode and a grid connection mode. During the day, the system generates electricity from the solar energy installed on the top of light poles and then stores it in batteries. If the energy produced from solar energy exceeds consumption or the batteries are full, the surplus energy is sent to the electrical grid. During the night, the system draws the electricity from the batteries to supply the road lighting systems. However, when the solar power is low due to rainy or cloudy days, there is not enough electricity to supply the road lighting systems. Thus, the electricity from the electrical grid is used to supply the road lighting system. It is found that the nano-grid road lighting system does not need to install a number of batteries and solar panels, resulting in high flexibility and low cost of installation.

The main road lighting system in Thailand that has a moderate traffic volume (M2) is utilized in the study case. In this category, 120-watt LED luminaires are used, which are installed by staggered arrangements. The mounting height, overhang, and spacing between luminaires are determined to be 9, 1, and 36 m, respectively. In addition, the boom angle is 15°. Due to Thailand being located near the equator, this location receives high solar irradiance owing to high solar generation performance with an average of 1000 W/m² for roughly 5 h per day. The road lighting systems need to cover lighting for 12 hours per day, leading to a load lighting system consuming energy of 1400 Wh for using a 120-watt LED luminaire. For this reason, a solar power of 300 W is enough for a road lighting system.

This nano-grid system of the road lighting system in the study case is divided into two sub-systems; a grid-connected system and a stand-alone system. Considering the Figure 2, a 300 W solar panel generates the direct current power from sunshine and send it to the grid-connected system and the stand-alone system. In the grid-connected system, a grid-connected micro-inverter is employed to convert the direct current into an alternating current power and sends the power to a grid system or a road lighting system. On the other hand, the stand-alone system uses a stand-alone micro-inverter to

convert the power, and then sends it to the road lighting system only. Both the grid-connected system and the stand-alone system are intended to supply power to the road lighting system.

This nano-grid system in Figure 2a is modelled by using an experimental setup, but the test is operated in the shielded room and takes long time, so it is difficult to use the solar panel. A Photovoltaic (PV) simulator is used instead of the solar panel because it can supply the electric power as a solar panel and control voltage, current, irradiance, and temperature of the solar panel all day as shown in Figure 2b. In this research, the PV simulator is used to supply the 28.8 V 300 W direct current power and makes irradiance and temperature of the solar panel constant during the test.

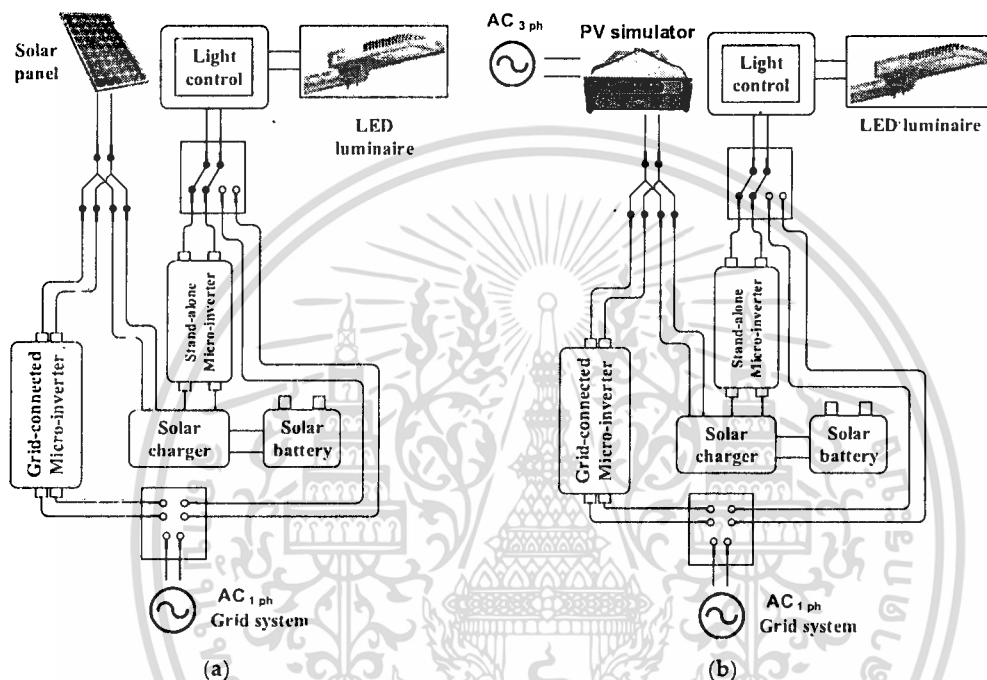


Figure 2. Component of the nano-grid road lighting system: (a) Proposed nano-grid system; (b) The PV simulator used instead of the solar panel.

2.3. The CE Measuring Method and the CISPR 14-1 Standard

Generally, when the electric power is supplied to a load, noises from the power source would also be sent to the load. This nano-grid system is a solar power generation system, so it must use an inverter, which is a switching device, to convert the electric power and cause of electromagnetic interference (EMI). The EMI is a harmful noise in sensitive electrical/electronic systems. The EMI can be divided into two types according to the frequency range; a conducted EMI (0.15 MHz–30 MHz) and a radiated EMI (30 MHz–1000 MHz). For the conducted EMI, conducted emission (CE) is popularly considered in several research [21–24]. The CE is a spreading out noise signal from the interested device which may affect to the other equipment. Impacts of CE are LED luminaire interference, electrical protection system interference, and nano-grid system interference. Therefore, the study of the CE characteristics is very important.

This research focuses on the CE characteristics of the grid-connected micro-inverter and the stand-alone micro-inverter because both micro-inverters have switching device components which are the cause of the CE. The study of the characteristics and origin of CE will make CE attenuation easier and more efficient in future. This CE test is compared with the CISPR 14-1 standard [21] as shown in Table 1, which is the requirement for household appliances, electric tools and similar apparatus (Part 1: Emission). The CISPR 14-1 consists of a quasi-peak limit and an average limit. The CE must be lower than the quasi-peak limit, it will be considered to pass the CISPR 14-1 standard [21]. To make the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

test results meet the standards, the electrical systems of the shielded-room and other devices are tested on the effects that will have on the nano-grid system. Figure 3 shows that the CE of the PV simulator and the shielded-room electrical grids have a low level and do not affect the nano-grid system.

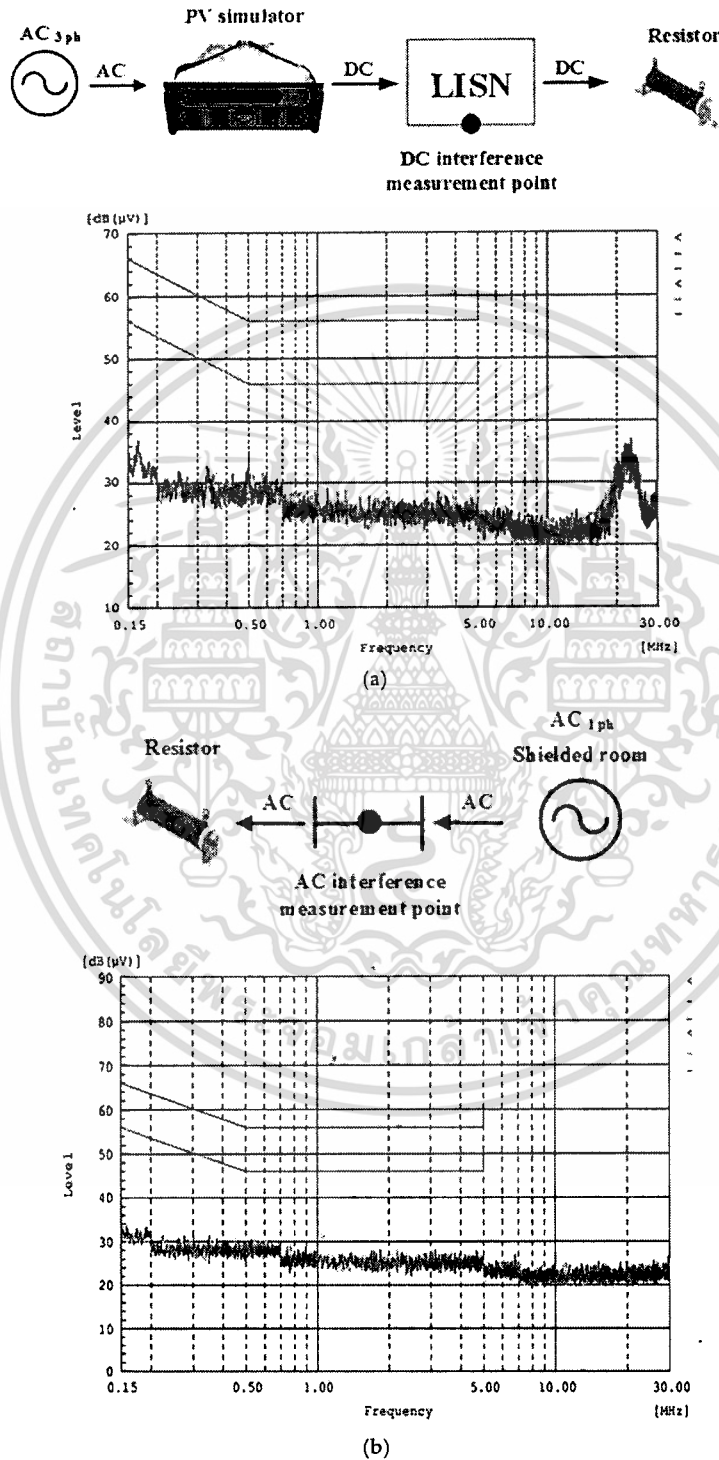


Figure 3. Conducted emission (CE) of the PV simulator and shielded room: (a) CE of the PV simulator; (b) CE of the shielded room.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. The Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) 14-1 standard [21].

Frequency Range (MHz)	Quasi-peak Level (dB·(μV))	Average Level (dB·(μV))
	Linear Level Scale with Decade Frequency Scale	
0.15–0.50	80–74	70–64
0.50–5.00	74	64
5.00–30.0	74	64

The CE can be separated into two modes: a common mode (CM) and a differential mode (DM). The CM is an interference signal which appears on the two signal lines simultaneously in the same direction and phase. The signal on each line returns through a common ground. On the other hand, the DM is a signal that appears on two lines of a closed loop, but current flow is in opposite directions. CM and DM may have different characteristics, but both directly affect the CE. Therefore, the CE attenuation requires consideration of CM and DM signal characteristics.

This research is operated in a shielded room. A passive probe in Figure 4a is used to measure the CE and a RF current probe in Figure 4b is used to measure the CM and the DM separately. The RF current probe is probe of the Fischer Custom Communications, Inc. (FCC) with bandwidth 10 kHz–1 GHz (P/N: F-65 and S/N: 161362). The signals from both probes are sent to the EMI receiver and shown on an EMI monitor as depicted in number 2 and 3 of Figure 5. In number 8 of Figure 5, the LISN is a low-pass filter placed between a grid system and the equipment under test (EUT) to create a known impedance and to provide a radio frequency (RF) noise measurement port. It also isolates the unwanted RF signals from the shielded-room single-phase grid system. In addition, the LISN can be used to predict conducted emission for diagnostic and pre-compliance testing.



Figure 4. Probes for CE, common mode (CM), and differential mode (DM) measurements: (a) a passive probe; (b) a radio frequency (RF) current probe.

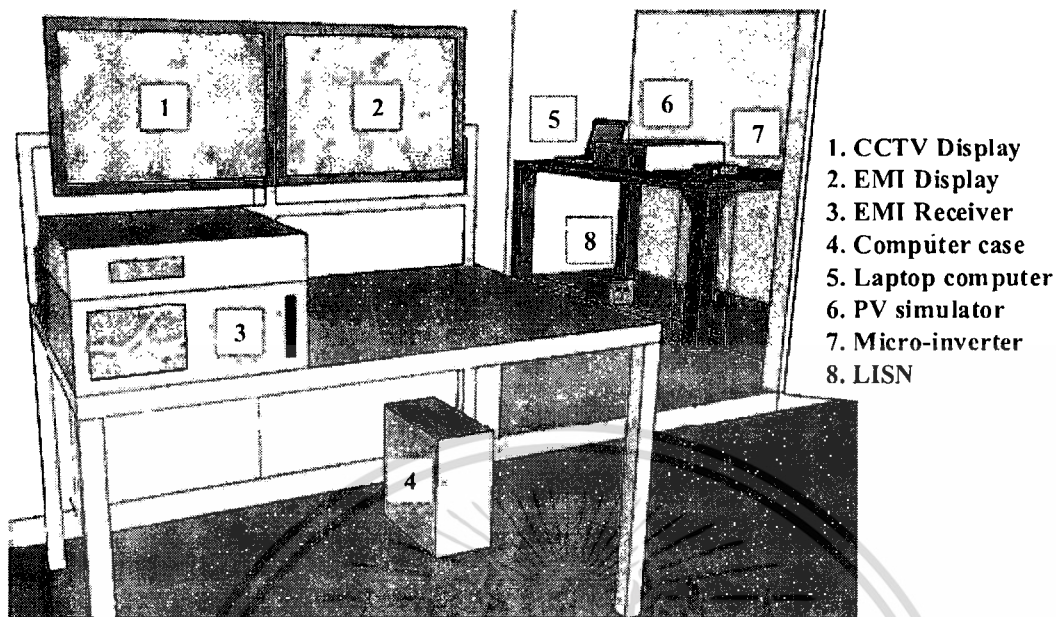


Figure 5. Elements in the shielded room.

3. Results

3.1. CE of the Grid-Connected Micro-Inverter

In a grid-connected system part, a 300w solar panel is installed at a road lighting pole to generate an electrical energy in form of a direct current. A grid-connected micro-inverter is employed to convert the direct current into an alternative current and send it to the grid system via the connected point (combination among a solar power system, a grid system, and a road lighting system). Then, a road lighting system requests the electric energy from the connected point via a light control to an LED luminaire as illustrated in Figure 6a. Normally, in the daytime, the energy from the solar power system is sent to the grid system for sale. In the nighttime without sunshine, the energy from the grid system is supplied to the LED luminaire.

This nano-grid system is modelled using an experimental setup in a laboratory. Considering Figure 6b, the PV simulator is used instead of the solar panel in the nano-grid system. A conducted emission (CE) is determined at the measuring point by a passive probe and a RF current probe. The signals from both probes are sent to the EMI receiver and shown on EMI display in front of the shielded room as shown in Figure 3. The passive probe is used to measure the CE from the output of the grid-connected micro-inverter in the nano-grid system. The passive probe's result is presented in Figure 7a. In addition, CM and DM from the output of the grid-connected micro-inverter are measured by the RF current probe and shown in Figure 7b.

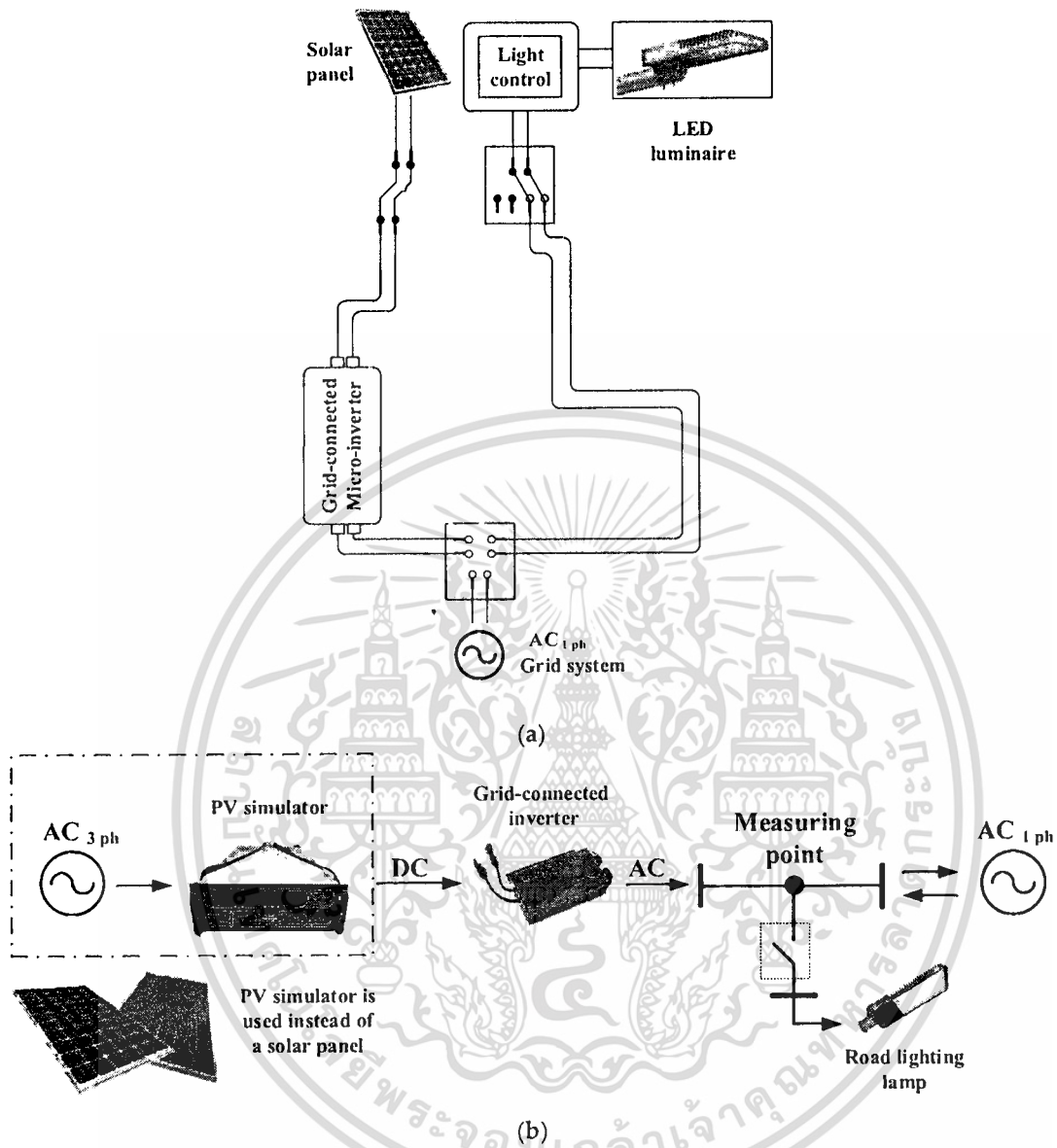


Figure 6. The grid-connected solar power system connected to the road lighting system: (a) Operation of the grid-connected solar power system; (b) The experimental setup of the grid-connected solar power system.

When considering Figures 7a and 3, it makes sure that the CE in Figure 7a is the result of the grid-connected micro-inverter only. This CE exceeds the quasi peak limit of the CISPR 14-1 standard [21] in the range of 0.15 MHz–5 MHz and the maximum level is 115.58 decibel micro-voltage (dB(μV)) at 0.15 MHz. The CE is high in the early frequency range and then gradually decreases when the frequency increases. It can be considered that this grid-connected micro-inverter mainly generates the CE more than the RE which has a higher frequency. This CE should be attenuated by an EMI filter for making the low CE in the nano-grid system.

In Figure 7b CM and DM are shown and give the same effect as the CE. CM and DM have a highest level in the early frequency and steadily decrease as the frequency increases. The DM is slightly greater than the CM. CM and DM should be reduced in the near level to improve the CE attenuation efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

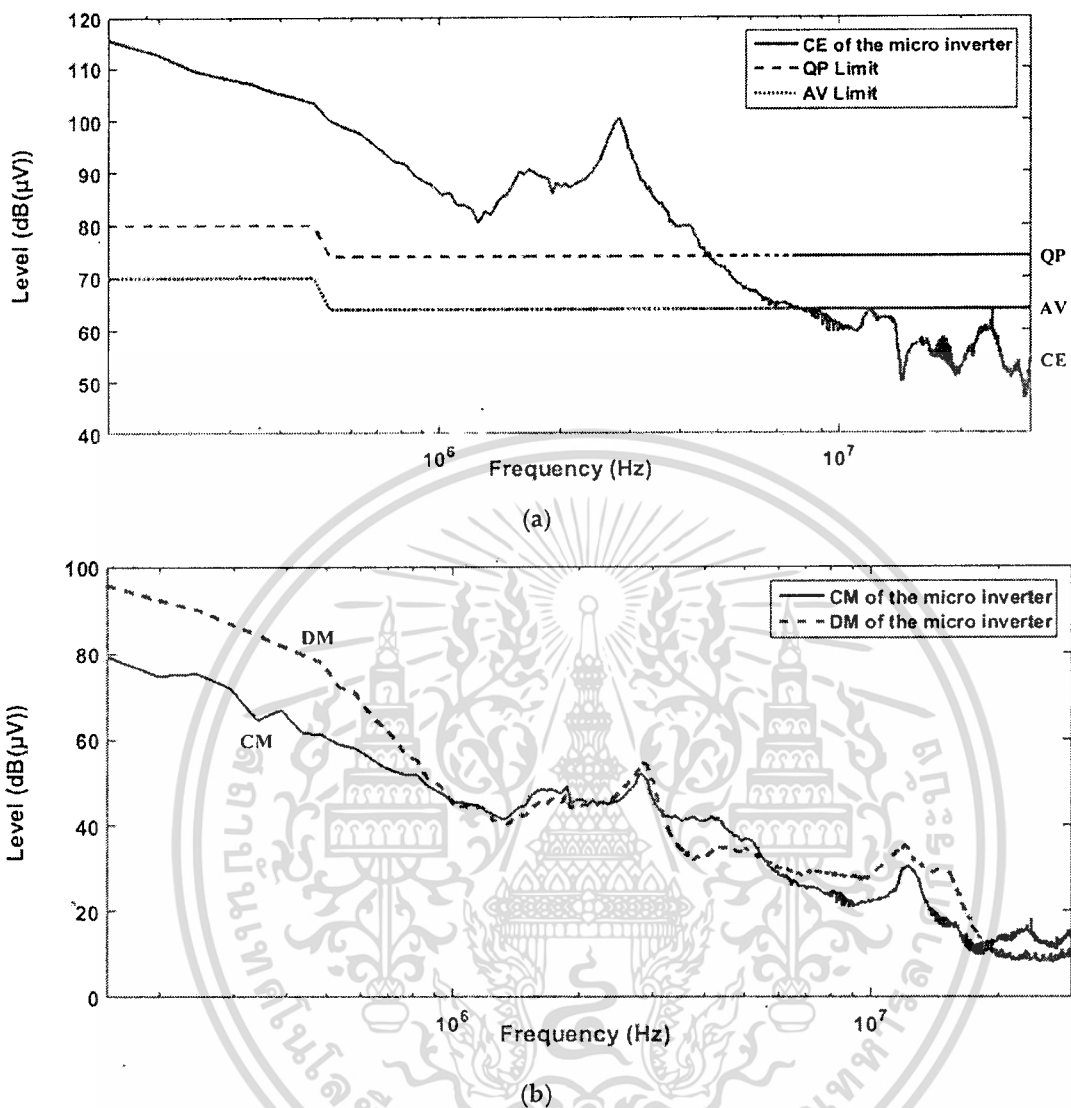


Figure 7. CE of the grid-connected micro inverter: (a) CE of the grid-connected micro inverter compared with the CISPR 14 standard; (b) CM and DM of the grid-connected micro inverter.

3.2. CE of the Stand-Alone Micro-Inverter

The nano-grid stand-alone solar power system is simulated in a laboratory as shown in Figure 8. The PV simulator, which is used instead of the 300 W solar panel, generates the direct current power and sends it to a solar charger. The solar charger is used to control a current flow to charge batteries or supply a load. During daytime, the solar charger sends the direct current power to charge batteries. On the other hand, at nighttime, this power is supplied to a stand-alone micro-inverter, which is used to convert the direct current into the alternating current and then sends to the LED luminaire via the lighting control. The stand-alone system is different from the grid-connected system because it does not have a grid connection calibration system. The stand-alone system uses the charger control to manage the power flow that may be another reason for CE in the stand-alone system. For the CE measurement in Figure 8b, CE, CM, and DM are measured at the measuring point. The CE is measured by the passive probe and the CM and DM are measured by the RF current probe.

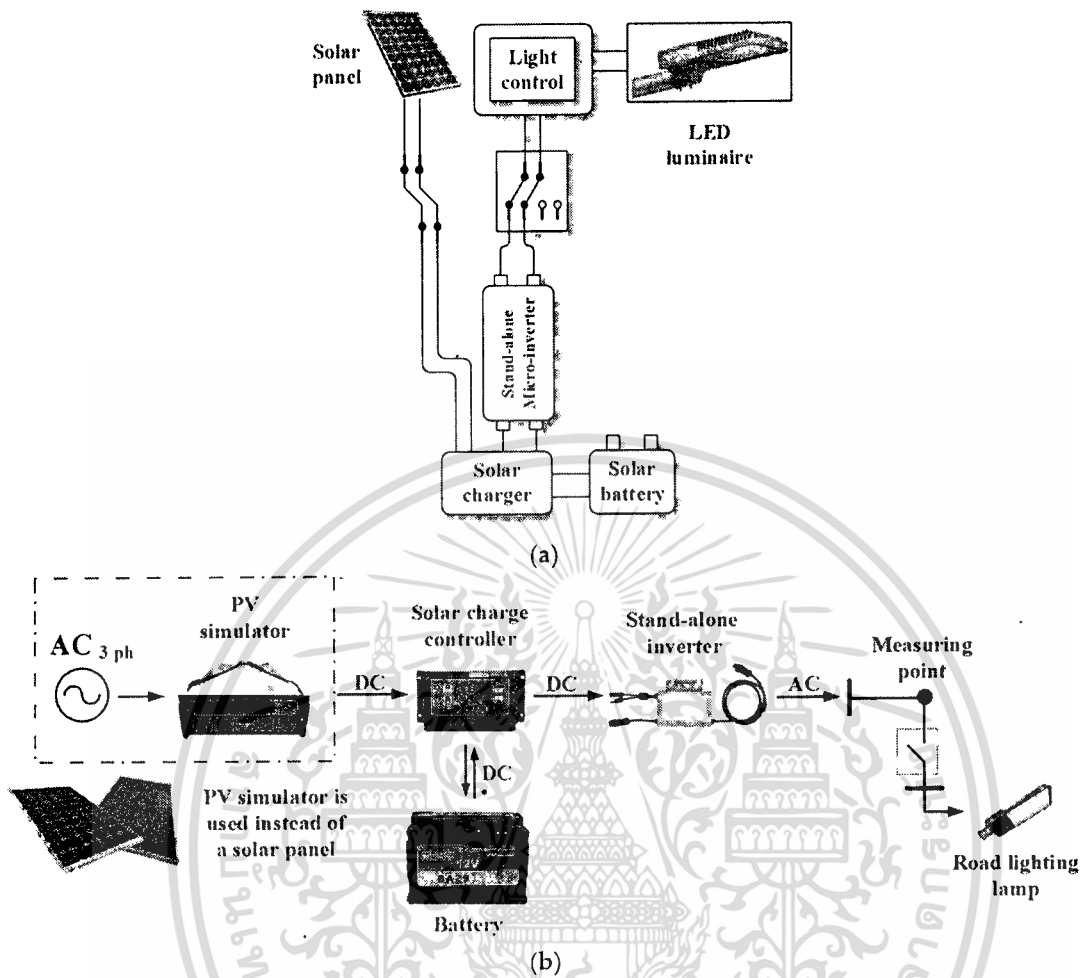


Figure 8. The stand-alone solar power system connected to the road lighting system: (a) Operation of the stand-alone solar power system; (b) The experimental setup of the stand-alone solar power system.

The CE result in Figure 9a exceeds the CISPR 14-1 standard [21] in the range of 0.15 MHz–25 MHz and the maximum level is 106.76 decibel micro-voltage ($\text{dB}(\mu\text{V})$). The CE has a high level throughout the frequency range of the measurement, so it may have a negative effect in terms of a radiated emission (RE). The EMI attenuation should use an EMI filter for the low frequency and a shielding cover for the high frequency.

In Figure 9b, CM and DM of the stand-alone micro-inverter are measured at the measuring point by the RF current probe. CM and DM have the same level in early frequency and then the CM is significantly higher than the DM. The CM noise appears on the two signal lines simultaneously in the same direction and phase. The signal on each line returns through a common ground. In the range of 10 MHz–30 MHz, characteristics of CE and CM are similar, so it is necessary to ensure that in this frequency range, the CM is dominant over the CE. For this system, a CM choke and a ferrite bead may be required to mitigate the CM.

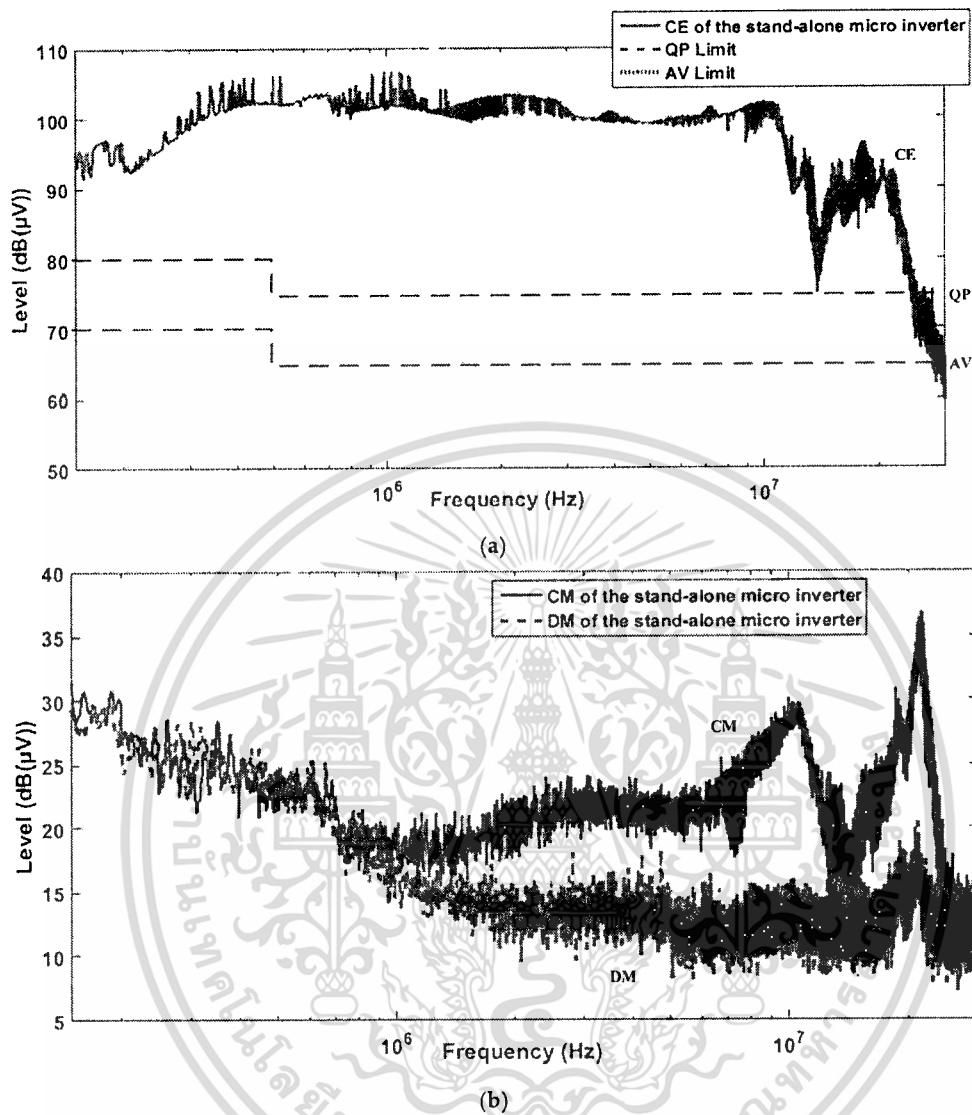


Figure 9. CE of the stand-alone micro inverter: (a) CE of the stand-alone micro inverter compared with the CISPR 14-1 standard; (b) CM and DM of the stand-alone micro inverter.

4. Discussion

In this research, both the grid-connected system and the stand-alone system work together. Normally, in the daytime, the electrical energy from the solar panel is sent to the solar charger controller to be stored in batteries, but, when the energy storage is full, the electric power will be sent to the grid-connected system. Then, it is converted into the alternating current by the grid-connected micro-inverter and supplied to the grid system or the road lighting system. At nighttime, the electrical energy from the energy storage is disbursed via the solar charger controller to the stand-alone micro-inverter. The alternating current from the stand-alone micro-inverter is supplied to turn on the LED luminaire.

The CE of both the grid-connected system and the stand-alone system exceed the CISPR 14-1 standard [21]. The grid-connected system has a high CE level in the low frequency range and the stand-alone system has a high CE level throughout the measurement frequency range. Therefore, the road lighting system will get the CE signal throughout the day and the heaviest during the night. This issue is very important because the LED luminaire of the streetlight is sensitive to noise and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

over-voltage, so this issue may cause the LED luminaire to deteriorate or damage. In the future, this problem may be solved by applying a grounding, an EMI filter, a ferrite bead, and a shielding cover with inverters, the LED luminaire, or electrical devices which are connected to this nano-grid system by an electric wire. Each method is suitable for each frequency range.

5. Conclusions

The CE characteristics from grid-connected and stand-alone micro-inverters in the nano-grid system of the road lighting system were studied and compared in each period. Throughout the day, the CE from the nano-grid system exceeds the CISPR 14-1 standard [21], especially during the night. In daytime, the CE is generated by the grid-connected micro-inverter and sent to the grid system or the road lighting system. CE, CM, and DM of the grid-connected system have a high level in the early frequency and then gradually decrease when the CE frequency increases. At nighttime, the CE is generated by the solar charger controller and the stand-alone micro-inverter; this electrical power is only supplied to the LED luminaire. The CE of the stand-alone system has high level throughout the measurement frequency range. The DM gradually decreases when the frequency increases. The CM increased steadily and has the highest value at the end of the measurement range. The CM of the stand-alone system affects the CE directly. This CE may deteriorate or damage the LED luminaire or the wire-connected electrical devices. Therefore, in future research, the CE attenuation method should be used to reduce this CE and protect this road lighting system.

Author Contributions: C.J. conceptualization, formal analysis and design the experiment. A.N. performed the experiments, investigation and analyzed the data; C.J. funding acquisition, and A.N. contributed resource; C.J. wrote the paper, and A.N. review and editing.

Funding: This research was funded by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund grant number KREF045803.

Acknowledgments: The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research (No. KREF045803) from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund, Thailand.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Yoomak, S.; Jettanasen, C.; Ngaopitakkul, A.; Bunjongjit, S.; Leelajindakraierk, M. Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system. *Energy Build.* **2018**, *159*, 542–557. [CrossRef]
2. Tannous, S.; Manneh, R.; Harajli, H.; Zakhem, H.E. Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of traditional grid-connected and solar stand-alone street light systems: A case study for rural areas in Lebanon. *J. Clean. Prod.* **2018**, *186*, 963–977. [CrossRef]
3. Panguloori, R.B.; Mishra, P.R.; Kumar, S. Power distribution architectures to improve system efficiency of centralized medium scale PV street lighting system. *Sol. Energy* **2013**, *97*, 405–413. [CrossRef]
4. Roche, O.M.; Blanchard, R.E. Design of a solar energy centre for providing lighting and income-generating activities for off-grid rural communities in Kenya. *Renew. Energy* **2018**, *118*, 685–694. [CrossRef]
5. Shaahid, S.M.; Elhadidy, M.A. Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+ diesel+ battery) power systems in hot climates. *Renew. Energy* **2003**, *28*, 1741–1753. [CrossRef]
6. Shaahid, S.M.; Elhadidy, M.A. Prospects of autonomous/stand-alone hybrid (photovoltaic+ diesel+ battery) power systems in commercial applications in hot regions. *Renew. Energy* **2004**, *29*, 165–177. [CrossRef]
7. Ramadhani, F.; Bakar, K.A.; Hussain, M.A.; Erixno, O.; Nazir, R. Optimization with traffic-based control for designing standalone streetlight system: A case study. *Renew. Energy* **2017**, *105*, 149–159. [CrossRef]
8. Hoşsain, M.; Mekhilef, S.; Olatomiwa, L. Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia. *Sustain. Cities Soc.* **2017**, *28*, 358–366. [CrossRef]
9. Milosavljević, D.D.; Pavlović, T.M.; Piršl, D.S. Performance analysis of A grid-connected solar PV plant in Niš, republic of Serbia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *44*, 423–435. [CrossRef]

10. Bhattacharya, P.; Dey, S.; Mustaphi, B. Some Analytical Studies on the Performance of Grid Connected Solar Photovoltaic System with Different Parameters. *Procedia Mater. Sci.* **2014**, *6*, 1942–1950. [CrossRef]
11. Hasan, R.; Mekhulef, S.; Scyedmahmoudian, M.; Horan, B. Grid-connected isolated PV microinverters: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *67*, 1065–1080. [CrossRef]
12. Omar, M.A.; Mahmoud, M.M. Grid connected PV- home systems in Palestine: A review on technical performance, effects and economic feasibility. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *82*, 2490–2497. [CrossRef]
13. Elkholly, A.; Fahmy, F.H.; Abou El-Ela, A.A.; El-Shafy, A.; Nafeh, A.; Spea, S.R. Experimental evaluation of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt. *J. Electr. Syst. Inf. Technol.* **2016**, *3*, 217–229. [CrossRef]
14. Solţ, C.B.; Tan, J.J.; Tseng, K.J.; Woo, W.L.; Teo, J.W.R. Intelligent Street Lighting for Smart Cities. In Proceedings of the 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Singapore, 22–25 May 2018; pp. 1027–1031.
15. Daneshvar, M.; Mohammadi-ivatloo, B.; Asadi, S.; Zare, K.; Anvari-Moghaddam, A. Optimal Day-Ahead Scheduling of the Renewable Based Energy Hubs Considering Demand Side Energy Management. *Smart Energy Syst. Technol.* **2019**. [CrossRef]
16. Doulos, L.T.; Sioutis, I.; Kontaxis, P.; Zissis, G.; Faidas, K. A decision support system for assessment of street lighting tenders based on energy performance indicators and environmental criteria: Overview, methodology and case study. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *51*, 101759. [CrossRef]
17. Doulos, L.T.; Sioutis, I.; Tsangrassoulis, A.; Canale, L.; Faidas, K. Minimizing lighting consumption in existing tunnels using a no-cost fine-tuning method for switching lighting stages according revised luminance levels. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I & CPS Europe), Genova, Italy, 11–14 June 2019.
18. Pasolini, G.; Toppan, P.; Zabini, F.; De Castro, C.; Andrisano, O. Design, Deployment and Evolution of Heterogeneous Smart Public Lighting Systems. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 3281. [CrossRef]
19. Wojnicki, I.; Komnata, K.; Kotulski, L. Comparative Study of Road Lighting Efficiency in the Context of CEN/TR 13201 2004 and 2014 Lighting Standards and Dynamic Control. *Energies* **2019**, *12*, 1524. [CrossRef]
20. Wojnicki, I.; Kotulski, L. Empirical Study of How Traffic Intensity Detector Parameters Influence Dynamic Street Lighting Energy Consumption: A Case Study in Krakow, Poland. *Sustainability* **2018**, *10*, 1221. [CrossRef]
21. Wang, Y. Comparison of Differential-Mode and Mixed-Mode Conducted Emission for Household Appliances in Power-Line Communication System. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **2017**, *59*, 2023–2028. [CrossRef]
22. Akagi, H.; Shimizu, T. Attenuation of Conducted EMI Emissions from an Inverter-Driven Motor. *IEEE Trans. Power Electron.* **2008**, *23*, 282–290. [CrossRef]
23. Han, D.; Morris, C.T.; Lee, W.; Sarlioglu, B. Comparison Between Output CM Chokes for SiC Drive Operating at 20- and 200-kHz Switching Frequencies. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2017**, *53*, 2178–2188. [CrossRef]
24. Kennedy, S.; Yuce, M.R.; Redouté, J. Evaluation of Conducted Emission Test Methods for Charge Pump DC/DC Converters. *IEEE Trans. Reliab.* **2017**, *66*, 170–177. [CrossRef]
25. Phon-Amnuaisuk, S. Energy Efficient Street Lighting Programs—Case Studies from Thailand and Tonga. 2012. Available online: <https://www.scribd.com/document/340174668/5-DSM-Workshop-EE-Street-Lighting-Programs-Sommai-Phon-Amnuaisuk-July2012#> (accessed on 1 October 2019).
26. Yoomak, S.; Ngaopitakkul, A. Optimisation of lighting quality and energy efficiency of LED luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *38*, 333–347. [CrossRef]
27. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. *The Solar Map*; Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy: Bangkok, Thailand, 2017.
28. Fara, L.; Craciunescu, D. Output Analysis of Stand-alone PV Systems: Modeling, Simulation and Control. *Energy Procedia* **2017**, *112*, 595–605. [CrossRef]
29. Yoomak, S.; Ngaopitakkul, A. Feasibility Analysis of Different Energy Storage Systems for Solar Road Lighting Systems. *IEEE Access* **2019**, *7*, 101992–102001. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

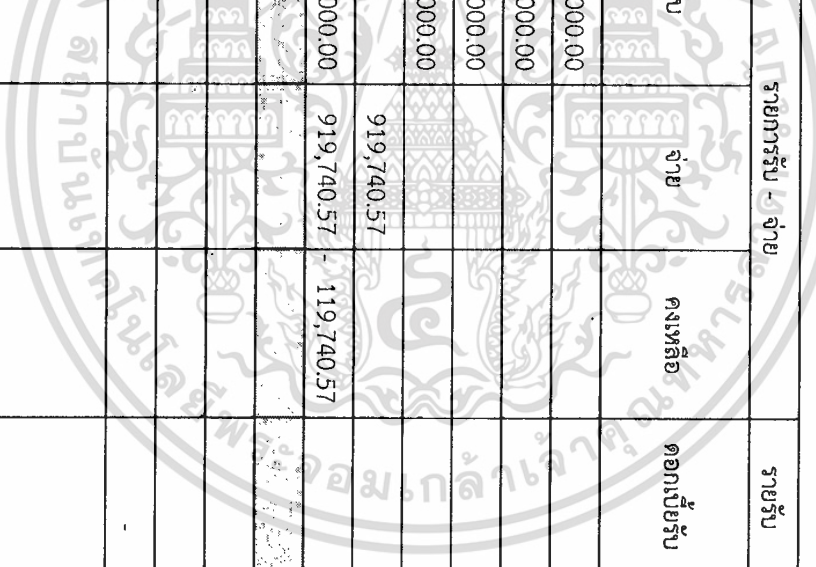
บันทึกการรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน : ทุนพัฒนานักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ : ศึกษาสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อบนไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสนา

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายรับ		รายจ่าย		รวม รายจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ		
	งบประมาณที่ได้รับการอนุมัติ (ตามแผน)		800,000.00							
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 40%)		320,000.00							
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 50%)		400,000.00							
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3 = 10%)		80,000.00							
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			919,740.57						
	งบประมาณคงเหลือ		800,000.00	919,740.57	119,740.57					
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย									
ครั้งที่ 1										
5 ม.ค. 59	ไม้ตัดขาว 10 มม.	IV5900003				-			19,260.00	19,260.00
13 ม.ค. 59	BNC to Mini Tweezer Model SAGK4-K combine with XLAM-414/SC	GTRC15-015				-			40,660.00	40,660.00
20 ม.ค. 59	on grid Inverter	0159-04				-			4,815.00	4,815.00
26 ม.ค. 59	ดอกสว่าน	INV-201601260053				-			180.00	180.00
1 ก.พ. 59	ปลั๊กไฟ	S1602007858				-			11,984.00	11,984.00
3 ก.พ. 59	ARDUINO UNO R3	INV-201602030015				-			470.00	470.00



บันทึกการรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน :

ทุนพัฒนานวัตกรรม - ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ :

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ :

ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายจ่าย		รวม
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย	
3 ก.พ. 59	มอดเตอร์ชอริกิต	IV5900014				-	17,515.90	17,515.90
4 ก.พ. 59	TLP350					-	425.00	425.00
9 ก.พ. 59	สายไฟ T-WV	IV5900029				-	16,264.00	16,264.00
11 ก.พ. 59	Grove-GPS Module	E16B231				-	1,407.05	1,407.05
12 ก.พ. 59	Main circuit Breaker	IV5900038				-	17,227.00	17,227.00
18 ก.พ. 59	Switch	43/2130				-	898.80	898.80
18 ก.พ. 59	ลูกโซอริกิต	IV5900053				-	20,308.60	20,308.60
18 ก.พ. 59	ไม้	50/2489				-	1,551.50	1,551.50
19 ก.พ. 59	TLP250(F)	711/0623				-	120.23	120.23
18 ก.พ. 59	ปูน EPOXY	576/28797				-	278.20	278.20
1 มี.ค. 59	Transformer	INS-581				-	856.00	856.00
1 มี.ค. 59	inverter driver board	720				-	425.00	425.00
4 มี.ค. 59	Power mosfet	INV-201603040022				-	156.00	156.00
8 มี.ค. 59	Micro inverter	HS5900003				-	7,500.00	7,500.00
8 มี.ค. 59	high power inductor	INV-201603080033				-	100.00	100.00
9 มี.ค. 59	single phase energy meter	IV5903-0069				-	4,718.70	4,718.70
9 มี.ค. 59	Resistor	INV-201603090038					408.00	408.00

บันทึกการรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน :

ทุนพัฒนานวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ :

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ :

ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายจ่าย		รวม	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย		ค่าวัสดุ
12 มี.ค. 59	ปรับ EPOXY	579/28923						310.30	310.30
14 มี.ค. 59	Resistor	INV-201603140059						145.00	145.00
5 มี.ค. 59	shottky barrier ciode	INV-201603150070						180.00	180.00
18 มี.ค. 59	photocoupler IGBT Out	INV-201603180093						160.00	160.00
18 มี.ค. 59	shottky barrier diode	INV-201603180098						439.00	439.00
19 มี.ค. 59	ปรับ EPOXY	580/28975						909.50	909.50
19 มี.ค. 59	switching 10A 12V	020/0978						888.10	888.10
19 มี.ค. 59	Resistor	INV-201603190104						541.00	541.00
20 มี.ค. 59	inverter driver board	747						870.00	870.00
21 มี.ค. 59	ทางกลักัมปู	INV-201603210105						1,020.00	1,020.00
21 มี.ค. 59	photocoupler IGBT Out	INV-201603210112						512.00	512.00
22 มี.ค. 59	nichicon 105C,E-cap capacitor	INV-201603220116						164.00	164.00
22 มี.ค. 59	ARDUINO UNO R3	INV-201603220127						631.00	631.00
22 มี.ค. 59	photocoupler IGBT Out	INV-201603220118						570.00	570.00
23 มี.ค. 59	ค่าทดสอบ inverter สถานีไฟฟ้า	5903BG1202					19,260.00		19,260.00
25 มี.ค. 59	แปดเตอร์	23B/16032080						410.00	410.00
25 มี.ค. 59	ปรับ EPOXY	581/29014						246.10	246.10

บันทึกรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน :

ทุนพัฒนานวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ :

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ :

ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายจ่าย		รวม	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย		ค่าวัสดุ
26 มี.ค. 59	PWM controller	INV-201603260147						320.00	320.00
28 มี.ค. 59	ทางปลาเสียบแบน	INV-201603280157						331.00	331.00
31 มี.ค. 59	high power inductor	INV-201603310180						178.00	178.00
31 มี.ค. 59	Tranformer	INS-583						856.00	856.00
31 มี.ค. 59	Tranformer	INS-582						749.00	749.00
5 เม.ย. 59	chock 800mH 8A	IV1604010						2,568.00	2,568.00
6 เม.ย. 59	shottky diode	INV-201604060047						553.00	553.00
7 เม.ย. 59	แถบพันทองแดง	031/1535						150.00	150.00
7 เม.ย. 59	photocoupler IGBT Out	INV-201604070055						312.00	312.00
7 เม.ย. 59	Li battery	HM0022594						327.00	327.00
9 เม.ย. 59	ไซดาง 22 มิล	17/1621						160.00	160.00
11 เม.ย. 59	testing service fee	E0006884						8,560.00	8,560.00
18 เม.ย. 59	ปรีน EPOXY	INV-201604180064						242.00	242.00
19 เม.ย. 59	พัดลม DC 5V	TWS-BILL-115-2016						590.00	590.00
19 เม.ย. 59	Resistor	INV-201604190083						610.00	610.00
19 เม.ย. 59	STM32F429I-Discovery	CS5900388						2,396.80	2,396.80
19 เม.ย. 59	ปรับเอกสาร							400.00	400.00

บันทึกรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน :

ทุนพัฒนานวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ :

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ :

ผศ. ดร. ชัยยนต์ เจตนาแสน

ว/ค/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายจ่าย		รวม
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย	
22 เม.ย. 59	EMC chamber	NE0003104					8,560.00	8,560.00
12 พ.ค. 59	แผนพิมพ์ตัวเหนี่ยวนำ	501					1,643.00	1,643.00
13 ก.ค. 59	ตัวต้านทานปรับค่าได้	INV-201607130011					2,670.00	2,670.00
16 ส.ค. 59	สายไฟ THW	PPS08-00231					131,824.00	131,824.00
19 ส.ค. 59	หลอดไฟ	PPS08-00281					34,772.86	34,772.86
24 ส.ค. 59	เบรกเกอร์	PPS08-00355					40,050.23	40,050.23
26 ส.ค. 59	ทางเสียบแบบ	INV-201608260046					300.00	300.00
29 ส.ค. 59	ถ่าน AA	139/6912					571.38	571.38
25 ก.ย. 59	หลอดไฟ 200 W	1060					350.00	350.00
26 ก.ย. 59	ค่าทดสอบ EMI	601393					19,260.00	19,260.00
4 ต.ค. 59	ค่าทดสอบ EMI	610020					6,420.00	6,420.00
23 พ.ย. 59	ค่าทดสอบ EMI	60214					20,865.00	20,865.00
6 ธ.ค. 59	ค่าทดสอบ EMI	255/140					20,865.00	20,865.00
11 ม.ค. 60	ค่าทดสอบ EMI	270/181					38,520.00	38,520.00
4 ก.พ. 60	เสาโลหะ	23B/17020321					1,562.00	1,562.00
4 ก.พ. 60	ทางปลาแลกหุ้ม	23B/17020320					218.90	218.90
8 ก.พ. 60	ปรี้น EPOXY	614/30672					1,440.22	1,440.22

บัญชีรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน : ทุนพัฒนามานักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ : คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการจ่าย		รวม
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย	
14 ก.พ. 60	Terminal block	74/0541					1,165.58	1,165.58
15 ก.พ. 60	Terminal block	INV-201702150067					300.00	300.00
17 ก.พ. 60	หม้อแปลง	030B/01478					1,722.70	1,722.70
22 ก.พ. 60	digital signal controller	INV-2017022220100					1,208.00	1,208.00
3 มี.ค. 60	Terminal block	INV-2017030300005					290.00	290.00
8 มี.ค. 60	mosfet	74/0946					6,099.83	6,099.83
10 มี.ค. 60	copper foil shielding tap EMI	39109963					3,457.50	3,457.50
14 มี.ค. 60	film cap	75/0031					1,908.33	1,908.33
15 มี.ค. 60	ปรี้น EPOXY	618/30865					5,418.48	5,418.48
20 มี.ค. 60	power plug	055/2716					3,890.52	3,890.52
20 มี.ค. 60	ค่าทดสอบ EMI	122/152					19,260.00	19,260.00
21 มี.ค. 60	single phase EMI filter	75/0157					1,730.69	1,730.69
23 มี.ค. 60	ปรี้น EPOXY	619/30913					278.20	278.20
25 มี.ค. 60	แกนเทอร์รอยใหญ่	INV-201703250096					265.00	265.00
17 เม.ย. 60	ค่าทดสอบ EMI	165/152					58,582.50	58,582.50
14 พ.ค. 60	adaptor NB	ORV600512					642.00	642.00
31 พ.ค. 60	สาย RG58 A/U	INV-201705310040					2,950.00	2,950.00

ข้อมูลนี้เป็นไปเพื่อประโยชน์ด้านการค้า
 ของเอกสารที่นำเข้าไป

บันทึกรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

แหล่งทุน :

ทุนพัฒนานักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ :

คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมตอระบบไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ :

ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสนา

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายจ่าย		รวม	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	ค่าใช้สอย		ค่าวัสดุ
2 ก.ค. 60	timer omron	PT507-00020						20,015.42	20,015.42
3 ก.ค. 60	หลอดไฟ	JCI07-0016						30,222.15	30,222.15
6 ก.ค. 60	สายไฟ THW	JCI07-0068						30,174.00	30,174.00
17 ก.ค. 60	ปลั๊ก	JCI07-0196						20,169.50	20,169.50
19 ก.ค. 60	สายไฟ THW	JCI07-0223						20,078.55	20,078.55
20 ก.ค. 60	เบรกเกอร์	PP07-0235						20,287.20	20,287.20
21 ก.ค. 60	รางวางสาย	IV6000384						14,907.24	14,907.24
24 ก.ค. 60	สายไฟ THW	IV6000389						23,368.80	23,368.80
28 ก.ค. 60	ไม้ตัด 10 มม.	IV6000397						20,865.00	20,865.00
31 ก.ค. 60	สายไฟ THW	IV6000404						17,344.70	17,344.70
1 ส.ค. 60	ค่าทดสอบ EMI	070/166						44,940.00	44,940.00
27 พ.ย. 60	แกน EE	1489/74440						523.36	523.36
27 พ.ย. 60	แกนเฟอร์ไรต์	1211/60506						181.90	181.90
29 พ.ย. 60	แกนเทอร์รอยเล็ก	INV-201711290091						750.00	750.00
9 ธ.ค. 60	CB-power sync	HS6012039						1,240.00	1,240.00
19 ธ.ค. 60	ค่านับถือออกพร้อมลูกบิล	054/2674						765.05	765.05

ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลภายในของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัญชีรายการรับ - จ่ายเงิน สัญญาเลขที่ KREF045803 ตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2560

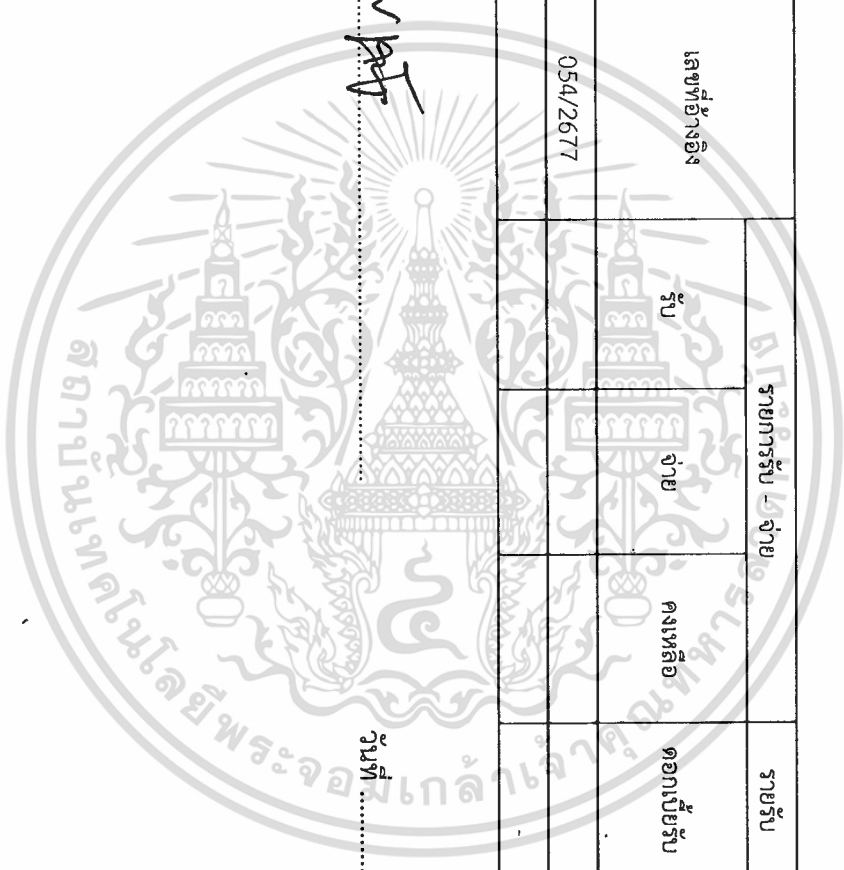
แหล่งทุน : ทุนพัฒนานานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2558

ชื่อโครงการ : คุณภาพสัญญาณและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กำลังพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับไฟฟ้า

ชื่อหัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสนา

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		รายการรับ	รายการจ่าย		รวม
			รับ	จ่าย		คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	
19 ต.ค. 60	ชื่อต่อบิลออก	054/2677						428.00
	รวมครั้งที่ 1				247,972.50	671,768.07		919,740.57

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ *Dr. Chaiyant* วันที่



ประวัติคณะวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษาสูงสุด

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Diplôme d'Ingénieur et Master de Recherche en Génie Electrique (Bachelor & Master Degree in Electrical Engineering)	Génie Electrique (Electrical Engineering)	Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France	2548
Doctorat en Génie Electrique (Ph.D. in Electrical Engineering)	Génie Electrique (Electrical Engineering)	Ecole Centrale de Lyon, France	2551

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ

- EMI/EMC in power electronic systems
- ESD in electrical/electronic system and application
- Conversion of electrical energy
- Piezoelectricity
- Power electronics

ประสบการณ์ทำงาน

May – September 2019; Acting Dean, International College, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

October 2018; Acting Dean, Faculty of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

2015 – present; Vice President for International Affairs, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

2012 – 2015; Associate Dean of College of Data Storage Innovation (currently College of Advanced Manufacturing Innovation), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2011 – present; Assistant Professor in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

2010 – 2012; Manager of Research Unit of Electrostatic Discharge in Hard Disk Drive Industry, College of Data Storage Innovation (currently College of Advanced Manufacturing Innovation), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

2009 – present; lecturer at Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

ผลงาน

(a) International Journal Papers

1. Chaichan Pothisarn and Chaiyan Jettanasen, "The study on wavelet coefficient behavior of simultaneous fault on the hybrid between overhead and underground distribution system", International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 8, no. 3, pp. 367 – 371, May 2019.
2. S. Yoomak, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "Design of solar charger challenging various solar irradiance and temperature levels for energy storage", International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Volume 14, Issue 6, Pages 2071-2090; December 2018.
3. N. Phannil, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "Harmonics and reduction of energy consumption in lighting systems by using led lamps", Energies, Volume 11, Issue 11, Article number 3169; November 2018.
4. S. Yoomak, C. Jettanasen, A. Ngaopitakkul, S. Bunjongjit, and M. Leelajindakraierk, "Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system", Energy and Building, Volume 159, 15 January 2018, Pages 542-557.
5. P. Chiradeja, A. Ngaopitakkul, and C. Jettanasen, "Energy Savings Analysis and Harmonics Reduction for the Electronic Ballast of T5 Fluorescent Lamp in a Building's Lighting System", Elsevier Energy and Buildings, ISSN 0378-7788, Vol. 97, June 2015, pp. 107 – 117.
6. J. Jiraprasertwong, and C. Jettanasen, "Practical design of a passive EMI filter for reduction of EMI generation", Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Volume 2, 2015, Pages 639-642, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, IMECS 2015; Kowloon; Hong Kong; 18-20 March 2015.

7. P. Sripodok, and C. Jettanasen, "Mitigation of conducted and radiated EMI generation in high-frequency switching devices", Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Volume 2, 2015, Pages 630-633, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, IMECS 2015; Kowloon; Hong Kong; 18-20 March 2015.
8. P. Songsukthawan, and C. Jettanasen, "Performance analysis of maximum power transfer in piezoelectric energy harvesting", Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Volume 2, 2015, Pages 670-673, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, IMECS 2015; Kowloon; Hong Kong; 18-20 March 2015.
9. C. Jettanasen, "Analysis of PWM Strategy for Reduction of Conducted Electromagnetic Interference in an Adjustable-Speed AC Motor Drive", International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), ISSN 1974-9821, Vol. 6, No. 3, June 2013.
10. Chaiyan Jettanasen, "Modeling and Optimizing a Passive EMI Filter to Attenuate Common-Mode Currents at High Frequency in a Three-Phase Adjustable-Speed AC Motor Drive", International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), ISSN 1349-4198, Vol. 8, No. 10 (A), October 2012, pp. 6629 – 6642 (ISI Impact Factor 2010: 1.664).
11. C. Jettanasen, F. Costa, C. Vollaie, "Common mode emissions measurements and simulation in variable-speed drive systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 11, November 2009, pp. 2456 – 2464.

(b) International/National Conference Papers

1. A. Ngaopitakkul, and C. Jettanasen, "The effects of multi-distributed generator on distribution system reliability", 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT-Asia 2017, Pages 1-6, Auckland; New Zealand; 8 June 2018.
2. C. Jettanasen, and C. Pothisarn, "Performance and electromagnetic compatibility of a photovoltaic power converter", 2017 International Automatic Control Conference, CACS 2017, Volume 2017-November, Pages 1-4, Pingtung; Taiwan; 7 February 2018.
3. P. Songsukthawan, and C. Jettanasen, "Generation and storage of electrical energy from piezoelectric materials", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017, Pages 2256-2259, Kaohsiung; Taiwan; 3-7 June 2017.

4. N. Phannil, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "Power quality analysis of grid connected solar power inverter" 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017, Pages 1508-1513, Kaohsiung; Taiwan; 3-7 June 2017.
5. C. Jettanasen, and C. Pothisarn, "Performance and electromagnetic compatibility of a photovoltaic power converter," 2017 International Automatic Control Conference (CACs), Pingtung, 2017, pp. 1-4.
6. J. Jiraprasertwong, and C. Jettanasen, "Electromagnetic interference in photovoltaic system and mitigation of conducted noise at DC side" IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, Pages 915-920, Singapore; 22-25 November 2016.
7. D.N. Pombejara, C. Jettanasen, and K. Rittipad, "Wireless communication and its effect to tunneling giant magneto-resistive (TGMR) reader in head gimbal assembly process" MATEC Web of Conferences, Volume 54, Cape Town; South Africa; 1-3 February 2016.
8. Piyawit Sripodok, and Chaayan Jettanasen, "A Study of Attenuation of Conducted EMI Generation in Switching Power Supply using Filter Techniques", The 3rd IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2015 (ICISIP2015), Fukuoka, Japan, September 2-5, 2015, pp. 356-360.
9. Panapong Songsukthawan, and Chaayan Jettanasen, "Simulation and FEM Analysis of Applied Force Effects for Energy Harvesting in Piezoelectric Bimorph Device", The 3rd IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2015 (ICISIP2015), Fukuoka, Japan, September 2-5, 2015, pp. 283-287.
10. P. Songsukthawan, and C. Jettanasen, "Performance Analysis of Maximum Power Transfer in Piezoelectric Energy Harvesting", The 2015 IAENG International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, March 16-18, 2015, pp. 665-669.
11. J. Jiraprasertwong, and C. Jettanasen, "Practical Design of a Passive EMI Filter for Reduction of EMI Generation", The 2015 IAENG International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, March 16-18, 2015, pp. 639-642.
12. P. Sripodok, and C. Jettanasen, "Mitigation of Conducted and Radiated EMI Generation in High-Frequency Switching Devices", The 2015 IAENG International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, March 16-18, 2015, pp. 630-633.
13. Jukkrit Jiraprasertwong, and Chaayan Jettanasen, "Analysis and Mitigation of Conducted Electromagnetic Interference in a Photovoltaic Single-Phase Inverter", IEEE TENCON 2014, Bangkok, Thailand, October 22-25, 2014.

14. **C. Jettanasen** and A. Ngaopitakkul, "*Study of Harmonics Issued from Electronic Ballast Used to Reduce Energy Consumption in Thailand's Building*", The 1st International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG 2014), Taipei, Taiwan, April 23-25, 2014.
15. **C. Jettanasen** and C. Pothisarn, "*Analytical Study of Harmonics Issued from LED Lamp Driver*", The 2014 IAENG International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, March 12-14, 2014, pp. 683-686.
16. **Chaiyan Jettanasen** and Surakit Thongsuk, "*Attenuation of High-Frequency Electromagnetic Noise in a Single-Phase AC Motor Drive*", 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2013), Busan, Korea, October 26-29, 2013.
17. **Chaiyan Jettanasen** and Nuchtitia Suttisinthong, "*Mitigation of Conducted Electromagnetic Interference Emissions in DC-DC Converter*", The Eighth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2013), Kumamoto, Japan, September 14-17, 2013.
18. **C. Jettanasen**, "*Analysis of Conducted Electromagnetic Interference Generated by PWM Inverter Fed-AC Motor Drives*", The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), Sapporo, Japan, October 21-24, 2012.
19. **C. Jettanasen**, "*Reduction of Common-Mode Voltage Generated by Voltage-Source Inverter using Proper PWM Strategy*", 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & Technical Exhibition on EMC RF/Microwave Measurement & Instrumentation, Singapore, May 21-24, 2012.
20. **C. Jettanasen**, "*Design of Electrostatic Discharge Event Detector*", IEEE TENCON 2011, Bali, Indonesia, November 21-24, 2011.
21. **C. Jettanasen**, "*Pulse Width Modulation Technique to Attenuate Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source Inverter-fed AC Motor Drive*", The International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011), Hong Kong, July 10-14, 2011.
22. **C. Jettanasen**, "*Optimization of EMI filter located at the PWM inverter output to reduce parasitic high-frequency currents in AC motor windings*", The Fifth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2010), Xi'an, China, December 20-22, 2010, pp. 1327-1332.
23. **C. Jettanasen**, "*Passive common-mode EMI filter adapted to an adjustable-speed AC motor drive*", The 9th International Power and Energy Conference IPEC2010, Singapore, October 27-29, 2010, pp. 1025-1030.

24. C. Jettanasen, "*Influence of power shielded cable and ground on distribution of common mode currents flowing in variable-speed AC motor drive systems*", 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & Technical Exhibition on EMC RF/Microwave Measurement & Instrumentation, Beijing, China, April 12-16, 2010, pp. 953-956.
25. C. Jettanasen, "*Minimization of common-mode conducted noise in PWM inverter-fed AC motor drive systems using optimized passive EMI filter*", The 2010 IAENG International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, March 17-19, 2010, pp. 1249-1252.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

..... สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษาสูงสุด

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
B.Eng	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	2545
M.Eng	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	2547
D.Eng	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	2550

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ

Power System, Power System Protection, Application of Wavelet Transform to power system protection, Artificial Neural Networks, Energy Saving, Lighting Control

ผลงาน**(a) Journals**

1. A. Ngaopitakkul and C. Jettanasen, "Selection of Proper Activation Functions in Back-Propagation Neural Networks Algorithm for Identifying the phase with fault appearance in Transformer Windings," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 8, No. 6, pp. 4299-4318. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)
2. S. Bunjongjit and A. Ngaopitakkul, "Selection of Proper Artificial Neural Networks for Fault Classification on Single Circuit Transmission Line," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 8, No. 1(A), pp. 361-374. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)
3. A. Ngaopitakkul and C. Jettanasen, "The comparisons technique of coefficient DWT for identifying Simultaneous Fault Types on Transmission System," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 7, No. 10, pp. 5789-5800. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) International Conference Papers

1. K. Kunadumrongrath, and A. Ngaopitakkul, “Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Transmission Line” *In Proceedings of 2012 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2012(IMECS2012)*, Hong Kong, March 2012.
2. C. Pothisarn, C. Jettanasen, J. Klomjit, and A. Ngaopitakkul, “Coefficient Comparison Technique of Discrete Wavelet Transform for Discriminating between External Short Circuit and Internal Winding Fault in Power Transformer” *In Proceedings of 2012 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2012(IMECS2012)*, Hong Kong, March 2012.
3. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, “The Combination of Discrete Wavelet Transform and Self Organizing Map for Identification of Fault Location on Transmission Line” *In Proceedings of 2012 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2012(IMECS2012)*, Hong Kong, March 2012.
4. C. Jettanasen, A. Ngaopitakkul, P. Chiradeja and C. Pothisarn, “Internal Fault Classification in Transformer Windings using Combination of Discrete Wavelet Transforms and Probabilistic Neural Networks” *In Proceedings of International Conference on Applied and Theoretical Information Systems Research (ATISR2012)*, Taiwan, February 2012.
5. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, “Application of DWT and Fuzzy Logic Algorithm for Classifying Simultaneous Fault Types” *In Proceedings of IEEE Region 10 Conference (TENCON2011)*, Indonesia, November 2011.
6. A. Ngaopitakkul, and A. Yodkhuang, “Application of DWT for Identifying Type of Fault Occurred in Wind Turbine System” *In Proceedings of IEEE Region 10 Conference (TENCON2011)*, Indonesia, November 2011.
7. C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, “The spectrum comparison technique of DWT for discriminating between external fault and internal fault in power transformer” *In Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011)*, Hong Kong, July 2011.
8. A. Ngaopitakkul and M. Leelajindakrairerk, “Identification of Fault Location on Single-Circuit Transmission Lines using Hybrid Neural Networks” *In Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011)*, Hong Kong, July 2011.

9. A. Ngaopitakkul, and C. Jettanasen, "Miscalculations of Fault Location in Underground Distribution System due to Behavior of Simultaneous Fault" *In Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011)*, Hong Kong, July 2011.
10. C. Pothisarn, C. Jettanasen, A. Ngaopitakkul, and C. Apisit, "Identification of Fault Location for Simultaneous Fault in Distribution System using Discrete Wavelet Transform" *In Proceedings of the fifth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2010)*, China, December 2010.
11. A. Ngaopitakkul, and C. Apisit, "Uncertainty of Fault Location Prediction due to Behavior of Simultaneous Fault in Electrical Power System using traveling wave theory" *In Proceedings of the fifth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2010)*, China, December 2010.
12. A. Ngaopitakkul, C. Apisit, C. Jettanasen, and C. Pothisarn, "Identification of Simultaneous Fault Types in Electrical Power System using the comparisons technique of DWT coefficients" *In Proceedings of the fifth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2010)*, China, December 2010.

ประวัติการทำงานที่สำคัญ และ Professional Activities

- Reviewer: The 11th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2010), Nagaoka, Japan.
- Reviewer: ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, Communication.
- Reviewer: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008), Bangkok, Thailand, 2008.
- Committee: IEEJ-EIT Joint Symposium : Advanced Technology in Power Systems (2008-2009)
- Committee: Illuminating Engineering Association of Thailand (TIEA) (Jan 2008 – Present)
- Committee: Thai Mechanical and Electrical Design and Consulting Engineer Association (MECT) (Oct 2008 – Present)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- Mar 2012 – Sep 2013 Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent for Fault Diagnosis in Distribution System” {Supported by the National Research Council of Thailand, Thailand}
- Sep 2011 – May 2012 Advisor of Research Project “Study and analysis of harmonics issued from electronic ballast of T5 fluorescent lamp” {Supported by EPPO Fund, Thailand}
- Oct 2010 – Sep 2011 Researcher of Project “The Classification of fault in power transformer using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}
- Sep 2010 – May 2011 Advisor of Research Project “Feasibility and System Impact Study of Energy Saving using T5 in Building” {Supported by EPPO Fund, Thailand}
- Dec 2009 – Nov 2011 Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent Algorithm for Simultaneous Fault Diagnosis in Electrical Power Transmission Systems” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Fund, Thailand}
- Oct 2009 – Sep 2010 Head of Research Project “Fault Diagnosis in Underground Cable Systems using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}
- Oct 2008 – Sep 2009 Researcher of Project “Fault Analysis on Single Circuit Transmission Line Using Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}

Oct 2007 – Sep 2008 Researcher of Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Neural Network for Fault Diagnosis in Transmission Systems”
{Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้