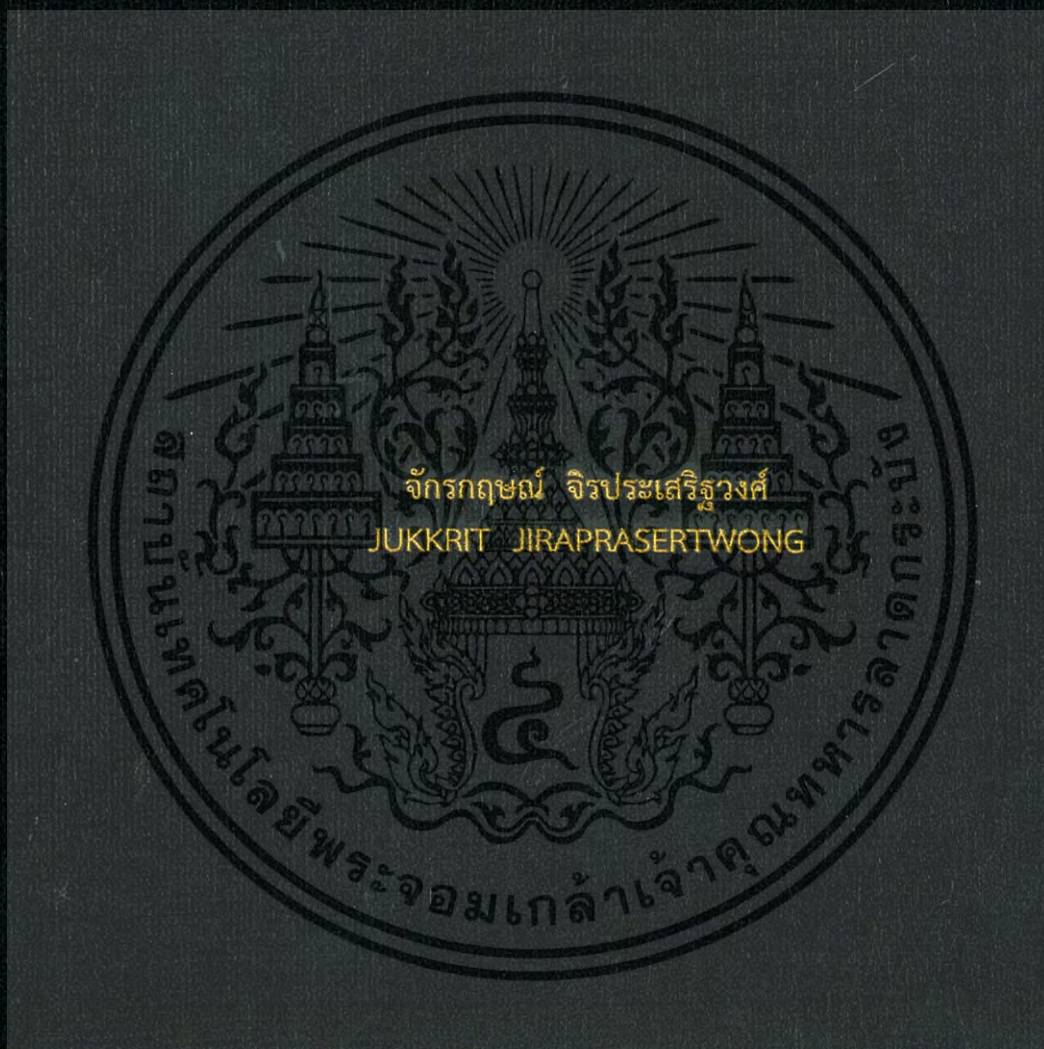


การวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์
แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE REDUCTION
IN A SINGLE-PHASE FULL BRIDGE INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-020-090

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์
แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE REDUCTION
IN A SINGLE-PHASE FULL BRIDGE INVERTER



T148827

จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์

JUKKRIT JIRAPRASERTWONG

เลขหมู่ 148827
เลขทะเบียน
วันเดือนปี 23 พ.ย. 2560

00267091

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE REDUCTION
IN A SINGLE-PHASE FULL BRIDGE INVERTER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-020-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์
แบบฟลูบริดจ์ 1 เฟส
Thesis Title Analysis of Electromagnetic Interference Reduction in a Single-Phase Full
Bridge Inverter
นักศึกษา นายจักรกฤษณ์ จิระประเสริฐวงศ์
รหัสประจำตัว 57601402
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-090

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วุฒินพล	ธाराธีรเศรษฐ์	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชินเงิน	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 09.30-11.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส
นักศึกษา	นายจักรกฤษณ์ จิระประเสริฐวงศ์
รหัสประจำตัว	57601402
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางสายตัวนำและทางอากาศซึ่งเกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส โดยจัดทำอินเวอร์เตอร์ขนาดพิกัด 300 วัตต์ แรงดันกระแสตรงด้านขาเข้า 24 โวลต์ แรงดันกระแสสลับด้านขาออก 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ขึ้นเพื่อศึกษารูปแบบและขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจากนั้นศึกษาการออกแบบเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากนั้นเปรียบเทียบกับมาตรฐาน CISPR14 (หรือ EN55014) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ โดยจะกล่าวถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรอง รวมถึงหลักการเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบวงจรกรอง นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนในระบบที่ไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดินด้วย ในส่วนของการกรองสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศจะใช้วัสดุโลหะเพื่อดูดซับและสะท้อนสัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นจะวัดผลการลดทอนสัญญาณรบกวนตามมาตรฐาน CISPR22 (หรือ EN55014) เพื่อวิเคราะห์การออกแบบวงจรกรองสัญญาณและการเลือกใช้วัสดุโลหะในการชิลด์ นอกจากนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Analysis of Electromagnetic Interference Reduction in a Single-Phase Full Bridge Inverter
Student	Mr.Jukkrit Jiraprasertwong
Student ID.	57601402
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chaiyan Jettanasen

ABSTRACT

This thesis presents the attenuation of conducted and radiated electromagnetic interferences, which are caused by a single-phase full bridge 300-watt inverter. This inverter functions with DC input voltage of 24 V, and output voltage of 220 V and 50 Hz. The inverter is carried out in order to study the pattern and magnitudes of electromagnetic noise induced in the system, then find out an approach to reduce the occurred interference and compared with CISPR14 (or EN55014) standard. In this research, passive electromagnetic interference (EMI) filters will be used to mitigate noise in grid power line and ground. It discusses the design parameters in the passive EMI filter including the principle of selecting the filter component material in the section. It also compares the effect of ungrounded and grounded systems. Regarding the shielding, metal materials are used to absorb and reflect distracting signals from the inverter. After that, the electromagnetic noise will be measured and analyzed with electromagnetic compatibility (EMC) standard CISPR22 (or EN55014) for the filter design and the selection of metal materials. In addition, the relationship between EMI filter and radiated noise is shown.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และสละเวลาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณนายปิยะวิทย์ ศรีโปดก เจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณนางสาวจิตาภา จงศรีวัฒนพร คู่หมั้นของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจและช่วยสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณมิตรของข้าพเจ้าทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าด้านต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KREF025606) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัย

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่ให้โอกาสและคอยให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

จักรกฤษณ์ จิระประเสริฐวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 อินเวอร์เตอร์.....	6
2.1.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	7
2.1.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	9
2.1.3 มาตรฐานและการทดสอบอินเวอร์เตอร์.....	11
2.2 คุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	12
2.2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics).....	12
2.2.2 มาตรฐานสัญญาณฮาร์โมนิกส์ในสัญญาณไฟฟ้า.....	14
2.2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC).....	17
2.2.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางสายตัวนำ.....	19
2.2.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ.....	22
2.2.6 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	23
2.2.7 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
2.3 วงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter).....	27
2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	29
2.4.1 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	29
2.4.2 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	32
2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.5 การขีดลัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ.....	37
2.6 องค์ประกอบแฝง.....	38
2.6.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า.....	39
2.6.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	39
2.6.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	40
2.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
บทที่ 3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส.....	45
3.1 การออกแบบอินเวอร์เตอร์.....	45
3.2 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ.....	48
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	52
3.3 การออกแบบตัวขีดลัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	54
4.1 การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	54
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	58
4.2.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	60
4.2.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	68
4.2.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเมื่อติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ รบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	76
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ.....	79
4.3.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	80
4.3.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	83
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบ.....	86
4.5 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่าง ในสายตัวนำ.....	91
4.5.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาเข้า ของอินเวอร์เตอร์.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.5.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาเข้า ของอินเวอร์เตอร์.....	94
4.6 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss).....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	125



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015).....	1
1.2 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015).....	2
2.1 เงื่อนไขการสวิตชิงแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์.....	10
2.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อร่วม.....	16
2.3 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนเดิมที่มีอยู่).....	16
2.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแส.....	17
2.5 มาตรฐานด้านการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
2.6 เครื่องใช้และบริภัณฑ์ภายในที่อยู่อาศัยที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่คล้ายกัน และอุปกรณ์ควบคุมการควบคุมค่าที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	26
2.7 ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ารบกวนสำหรับพิสัยความถี่ 30 ถึง 300 เมกะเฮิรตซ์.....	26
2.8 ขีดจำกัดสำหรับสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายเป็นคลื่นของ ITE ประเภท B ที่ระยะวัด 10 เมตร.....	27
2.9 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Capacitor of Class X).....	30
2.10 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Capacitor of Class Y).....	31
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ.....	52
3.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าการลดทอนสัญญาณของวัสดุอคูมิเนียมและสแตนเลส.....	53
4.1 มาตรฐานด้านการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	57
4.2 มาตรฐานด้านการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	59
4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า.....	61
4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	64
4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระ ทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน.....	68
4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า.....	70
4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน.....	75
4.9 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก.....	77
4.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก.....	79
4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีการะทางไฟฟ้า.....	81
4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน.....	83
4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้า.....	84
4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน.....	85
4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะไม่มีและมีการะทางไฟฟ้า.....	88
4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้าและติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	89
4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้าและติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟหลังปิดหุ้มด้วยโลหะ.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์.....	6
2.2 สัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	7
2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟตที่มีไดโอดภายใน.....	7
2.4 สัญลักษณ์อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Components).....	8
2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์.....	9
2.6 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	9
2.7 สัญญาณรูปไซน์ในโดเมนเวลา (Sine Wave in Time Domain).....	13
2.8 สัญญาณรูปไซน์ในโดเมนความถี่ (Sine Wave in Frequency Domain).....	13
2.9 สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Square Wave in Time Domain).....	14
2.10 สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมในโดเมนความถี่ (Square Wave in in Frequency Domain).....	14
2.11 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดจริงในโดเมนเวลา (Real Sine Wave in Time Domain).....	15
2.12 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดจริงในโดเมนความถี่ (Real Sine Wave in Frequency Domain).....	15
2.13 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.14 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวน.....	20
2.15 การวัดค่าสัญญาณรบกวน.....	21
2.16 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	25
2.17 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ.....	25
2.18 วงจรสมมูลของความถี่ต่ำผ่านและกราฟคุณลักษณะ.....	28
2.19 วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบพายและแบบที.....	28
2.20 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	29
2.21 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common mode choke: CM Choke).....	32
2.22 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	32
2.23 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วม.....	33
2.24 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลต่าง.....	33
2.25 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ โดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D).....	35
2.26 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง โดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D).....	35
2.27 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss)	36
2.28 รูปแบบการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Transmission Line Model).....	37
2.29 ตัวอย่างวัสดุชนิดที่มีรูระบายอากาศ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้เข้าใช้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.30 ตัวต้านทานไฟฟ้าในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	39
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า.....	39
2.32 ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	40
2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ.....	40
2.34 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ.....	40
2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ.....	41
2.36 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
2.37 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	42
2.38 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและการชิลด์.....	43
2.39 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	43
2.40 การป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	44
3.1 โครงสร้างการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	45
3.2 มอสเฟตกำลัง IRFP3710PbF.....	46
3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ทางกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์.....	46
3.4 ไอซีขับเกทมอสเฟต IR2110.....	46
3.5 วงจรขับเกทมอสเฟตโดยใช้ไอซี IR2110.....	46
3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F4011.....	47
3.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	48
3.8 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	49
3.9 GUI ที่ช่วยในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	50
3.10 ผังการทำงานของโปรแกรมช่วยในการออกแบบวงจรกรอง สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	51
4.1 สัญญาณควบคุมมอสเฟตจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	54
4.2 สัญญาณแรงดันด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	55
4.3 สัญญาณแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ก่อนกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์.....	55
4.4 สัญญาณแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลังกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์.....	55
4.5 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	56
4.6 ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	57
4.7 การวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในห้องทดสอบ.....	58
4.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นนั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.9 บล็อกไดอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	60
4.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า.....	61
4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	64
4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน.....	67
4.13 บล็อกไดอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	69
4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า.....	70
4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	72
4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน.....	74
4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก.....	76
4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก.....	78
4.19 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศจากสายตัวนำ.....	79
4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า.....	80
4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน.....	82
4.22 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้า.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.23 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวน ทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อกับสายดิน.....	85
4.24 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ.....	86
4.25 วัสดุโลหะที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ.....	86
4.26 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะไม่มีและมีการะทางไฟฟ้า.....	87
4.27 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ.....	88
4.28 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟหลังปิดหุ้มด้วยโลหะ.....	90
4.29 การวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง.....	91
4.30 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้า.....	92
4.31 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3.....	93
4.32 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3 เชื่อมต่อกับสายดิน.....	94
4.33 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้า.....	95
4.34 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3.....	96
4.35 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3 เชื่อมต่อกับสายดิน.....	97
4.36 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขณะไม่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	98
4.37 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขณะติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	98
4.38 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อติดตั้งด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	99
4.39 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อติดตั้งด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับสายดิน.....	99
4.40 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อติดตั้งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.41 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อติดตั้งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายดิน.....	100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณการใช้พลังงานสูงขึ้นจากอดีตมากและในอนาคตนั้นแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นทั่วโลกอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น มลภาวะของโลกที่มากขึ้น มลพิษที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือความกังวลในเรื่องแหล่งที่มาของเชื้อเพลิงที่กำลังจะหมดไปในอนาคต จากปัญหาดังกล่าวทำให้ทั่วโลกให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น เช่น พลังงานจากชีวมวล ก๊าซชีวภาพ น้ำ ลม และแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า รวมทั้งเป็นทรัพยากรที่ไม่มีวันหมดซึ่งจะให้ความมั่นคงทางพลังงานได้ต่อไป ซึ่งประเทศไทยได้เป็นเล็งเห็นความสำคัญของการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยได้กำหนดนโยบายตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579 (PDP2015) ให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 20 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด [1] ตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579 (PDP2015) [1]

ประเภทเชื้อเพลิง	ณ ปี 2557 ประมาณร้อยละ	ณ ปี 2569 ประมาณร้อยละ	ณ ปี 2579 ประมาณร้อยละ
ซื้อไฟฟ้าพลังงานน้ำต่างประเทศ	7	10-15	15-20
ถ่านหินเทคโนโลยีสะอาด (รวมลิกไนต์)	20	20-25	20-25
พลังงานหมุนเวียน (รวมพลังน้ำ)	8	10-20	15-20
ก๊าซธรรมชาติ	64	45-50	30-40
นิวเคลียร์	-	-	0-5
ดีเซล/น้ำมันเตา	1	-	-

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากแสงของดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกนั้น สามารถแปลงเป็นพลังงานได้มากมายมหาศาล หากเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินนั้น พลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบที่ผิวโลกเป็นเวลาหนึ่งเดือนนั้นหากนำมาใช้ได้ทั้งหมด จะเท่ากับพลังงานจากถ่านหินแปดล้านๆตัน [2] ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการสนับสนุนการทำวิจัยและการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ รวมทั้งสนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 นั้น มีเป้าหมายการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 6,000 เมกะวัตต์ ซึ่งมากเป็นอันดับหนึ่งเทียบกับพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ [3] ตามตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579
(Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) [3]

ประเภทเชื้อเพลิง	สถานภาพ สิ้นปี 2557* (เมกะวัตต์)	เป้าหมายปี 2579 (เมกะวัตต์)
1. ชยะชุมชน	65.72	500.00
2. ชยะอุตสาหกรรม	-	50.00
3. ชีวมวล	2,451.82	5,570.00
4. ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย)	311.50	600.00
5. พลังน้ำขนาดเล็ก	142.01	376.00
6. ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน)	-	680.00
7. พลังงานลม	224.47	3,002.00
8. พลังงานแสงอาทิตย์	1,298.51	6,000.00
9. พลังน้ำขนาดใหญ่	-	2,906.40**
รวมเมกะวัตต์ติดตั้ง (เมกะวัตต์)	4,494.03	19,684.40
รวมพลังงานไฟฟ้า (ล้านหน่วย)	17,217	65,588.07
ความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ (ล้านหน่วย)	174,467	326,119.00
สัดส่วนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (%)	9.87	20.11

* รวมการผลิตไฟฟ้าจากระบบ (Including off grid power generation) และไม่รวมการผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำขนาดใหญ่

** เป็นกำลังการผลิตติดตั้งที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน โดยพลังน้ำขนาดใหญ่ถูกรวมเป็นเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน
ในแผน AEDP2015

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells/Photovoltaic Panels) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันเป็นที่นิยมมากเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก ซึ่งเป็นการผลิตไฟฟ้าที่ไม่ปล่อยมลพิษและไม่กระทบสิ่งแวดล้อม รวมทั้งไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงประกอบกับราคาต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์มีราคาถูกลงเรื่อยๆ ปัจจุบันที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cells) รวมทั้งการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต้องศึกษาพื้นที่ที่ติดตั้งและมุมการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย [4-5]

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานนั้นอุปกรณ์ที่ขาดไม่ได้ คือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีแรงดันไม่คงที่ อินเวอร์เตอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพและคุณภาพของไฟฟ้าที่ได้มานั้นขึ้นอยู่กับอินเวอร์เตอร์ ในด้านของประสิทธิภาพนั้นมีการวิจัยและคิดค้นวงจรอินเวอร์เตอร์มากมายหลากหลายแบบ [6-9] รวมทั้งความน่าเชื่อถือของอินเวอร์เตอร์ [10] หรือเทคนิคการควบคุม เช่น การควบคุมการสวิตชิงของอุปกรณ์สวิตซ์ให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) [11] เป็นต้น ส่วนในด้านคุณภาพนั้นก็ละเลยไม่ได้เช่นกัน เพราะหมายถึงอายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต่อใช้งาน รวมทั้งความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผู้ใช้ด้วย คุณภาพไฟฟ้านั้นสามารถตรวจวัดได้จากฮาร์โมนิกส์ [12-13] และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในไทยมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อินเวอร์เตอร์ด้วย [14]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกหัวข้อความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคต จึงได้มีการเริ่มศึกษาความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น [15-16] ทั้งนี้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) นั้นเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์อินเวอร์เตอร์ เป็นต้น ดังนั้นการลดสัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์ [17-18] จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์และเครื่องใช้ไฟฟ้าไม่เสียหาย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น รวมทั้งเกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้อีกด้วย โดยเทคนิคที่จะนำมาศึกษาและวิจัยนั้นจะลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า [19-25]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการใช้งานอินเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยมีคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าที่ดี

1.2.2 เพื่อศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส ขนาด 300 วัตต์

1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) ให้มีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนและเหมาะสมต่อการใช้งาน

1.2.4 ส่งเสริมการใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีคุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านมาตรฐาน เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส โดยสร้างอินเวอร์เตอร์ต้นแบบขนาดพิกัด 300 วัตต์ แรงดันกระแสตรงด้านขาเข้า 24 โวลต์ แรงดันกระแสสลับด้านขาออก 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ และใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) เป็นอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในการศึกษาจะออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ เพื่อใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและอินเวอร์เตอร์ (วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์) และออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ เพื่อใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำระหว่างอินเวอร์เตอร์และภาระทางไฟฟ้า (วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าและด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ และจะทำการสร้างวงจรกรองขึ้นเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณและการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส นอกจากนี้จะใช้วัสดุโลหะชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วย และทำการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในห้องทดสอบ ซึ่งในห้องปิดที่ทดสอบไม่สามารถใช้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นจึงใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อให้สัญญาณที่วัดได้มีความแม่นยำ

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น อินเวอร์เตอร์ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.4.2 ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการทำงานวิจัย เช่น MATLAB เป็นต้น
- 1.4.3 ออกแบบวงจรของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าและด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.4.4 จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและจัดทำวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และจัดเตรียมเครื่องมือวัดเพื่อบันทึกผลการทดสอบ
- 1.4.5 สร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทำการทดลอง
- 1.4.6 ทดสอบและปรับปรุงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้ลดทอนสัญญาณได้ดียิ่งขึ้น
- 1.4.7 สรุปผลของงานวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 ทำให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์
- 1.5.2 ทำให้สามารถอธิบายและแก้ไขสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์
- 1.5.3 ทำให้สามารถอธิบายและแก้ไขสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศของอินเวอร์เตอร์
- 1.5.4 ทำให้เพิ่มคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าและความปลอดภัยให้กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้
- 1.5.5 ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งหาวิธีการลดทอนที่เหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนด
- 1.5.6 ต่อยอดการผลิตและพัฒนาอุตสาหกรรมและพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ทำให้ไทยเป็นผู้ผลิต เพื่อรองรับการส่งออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางสายตัวนำและทางอากาศของอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการและแผนงานของการศึกษาทดลอง ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกใช้งาน อุปกรณ์และหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเพื่อศึกษาการลดทอนสัญญาณในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ได้แนะนำมาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สำคัญได้อธิบายทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟและการออกแบบตัวชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบอินเวอร์เตอร์ ตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟแต่ละตัวเพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกัน และคำนวณค่าการดูดซับและการสะท้อนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของโลหะที่นำมาใช้ชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ

บทที่ 4 แสดงผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเมื่อใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเทียบกับมาตรฐาน EN55014 และวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำเทียบกับมาตรฐาน EN55014 นอกจากนี้แสดงผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศเทียบกับมาตรฐาน EN55022 เมื่อใช้วัสดุโลหะชิลด์สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งระบบ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและดำเนินการจัดทำทดสอบ สรุปผลความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกัน ตลอดจนข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องต่อไป

ภาคผนวก สำหรับในส่วนนี้จะประกอบด้วยผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มเติม มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง และบทความวิชาการรวม 3 บทความ

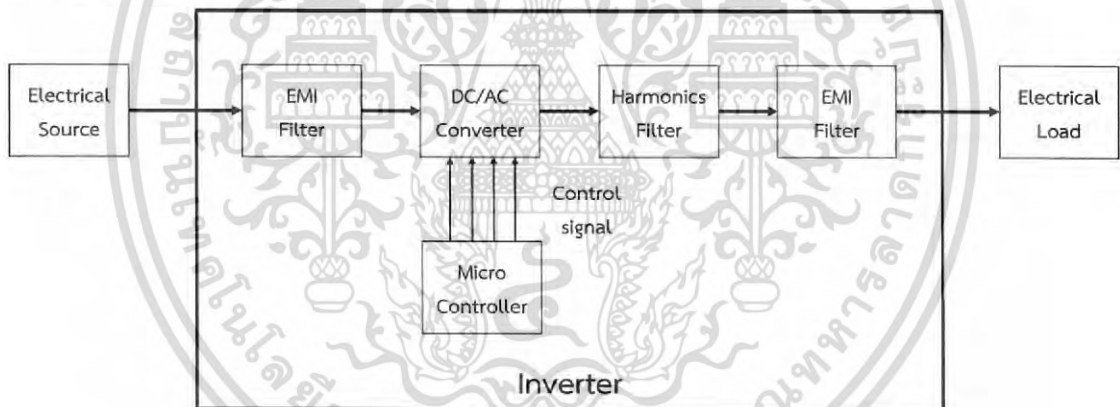
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์คืออุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) ซึ่งในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาให้กับอุปกรณ์ต่างๆ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้านให้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการสวิตซ์ ซึ่ง เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยส่วนประกอบสำคัญนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC Converter) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านั้นจะใช้อุปกรณ์สวิตซ์เช่น มอสเฟต (MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ซึ่งที่ขาดไม่ได้ในการควบคุมการสวิตซ์ของอุปกรณ์คือไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งจะส่งสัญญาณไปควบคุมการสวิตซ์ตามที่โปรแกรมไว้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

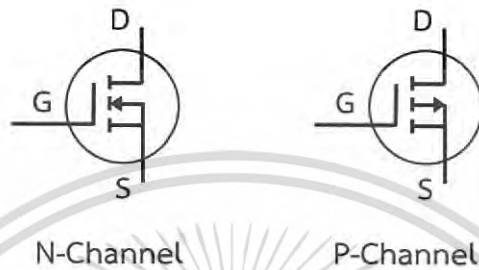
อุปกรณ์ที่สำคัญอีกส่วนคือ วงจรกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filter) ซึ่งต่ออยู่ที่ด้านขาออกของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC/AC Converter) เพื่อกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์ด้านขาออกให้เหลือเพียงสัญญาณความถี่มูลฐานที่ 50 เฮิร์ตซ์ และวงจรกรองสัญญาณอีกสองวงจรคือ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI Filter) โดยใส่ไว้ด้านขาเข้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและด้านหลังของวงจรกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์เพื่อไม่ให้สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนอุปกรณ์อื่นที่เชื่อมต่ออยู่กับอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรรินเวอร์เตอร์

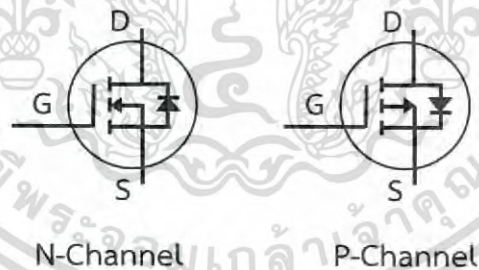
มอสเฟต (MOSFET: Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)

มอสเฟตเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นประเภทที่ใช้แรงดันในการควบคุมการทำงาน เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สวิตช์นั้นสามารถเปิดปิดวงจรด้วยความถี่สูงได้ โดยมอสเฟตนั้นมี 2 ชนิด คือ พี-ชาแนล (P-Channel) และ เอ็น-ชาแนล (N-Channel) สัญลักษณ์ตามรูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอสเฟตนั้นมี 3 ขา ได้แก่ ขาเกต (Gate) ขาเดรน (Drain) และขาซอส (Source) [26]



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

นอกจากมอสเฟตจะสามารถสวิตช์เปิดปิดด้วยความเร็วสูงได้นั้น มอสเฟตยังสามารถทนแรงดันและนำกระแสสูงได้ด้วยหรือเรียกว่ามอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) โดยส่วนมากมอสเฟตชนิดนี้จะมีไดโอดภายในหรือเรียกว่าบอดีไดโอด (Body Diode) เชื่อมต่ออยู่ระหว่างขาซอส (Source) และขาเดรน (Drain) โดยกระแสที่ไหลในไดโอดภายในจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสเดรน-ซอส สัญลักษณ์สามารถเขียนได้ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟตที่มีไดโอดภายใน

โดยส่วนมากแล้วมอสเฟตที่ใช้งานจะเป็นชนิด เอ็น-ชาแนล (N-Channel) ซึ่งการควบคุมมอสเฟตชนิดนี้จะควบคุมการทำงานโดยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอส (V_{GS}) โดยช่วงเวลากการสวิตช์ของมอสเฟตกำลังส่วนมากจะมีความเร็วอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาทีถึงหลักร้อยของนาโนวินาทีขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง ในขณะที่มอสเฟตนำกระแส นั้นจะมีค่าความสูญเสียเกิดขึ้นจากความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอส ($R_{DS(on)}$) โดยค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับซอสของมอสเฟตนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็จะมากขึ้นด้วย [26-28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างใกล้เคียงคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผล หน่วยความจำ และพอร์ตการเชื่อมต่อเพื่อรับและส่งข้อมูล ซึ่งมีความสมบูรณ์ในตัวเองสามารถโปรแกรม เพื่อให้ส่งคำสั่งไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อื่นได้ ซึ่งปัจจุบันมีมากมายให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของงาน [29]

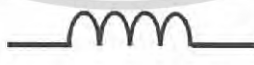
อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Gate Driver) ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งการนั้นจำเป็นต้องมีวงจรขับเคลื่อน เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นมีรูปแบบและกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ การจะทำให้มอเตอร์กำลังทำงานได้ การจะทำให้มอเตอร์กำลังเริ่มทำงานต้องควบคุมแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกตและขาซอส (V_{GS}) ให้มีค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage) ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 โวลต์ และการควบคุมไม่ให้มอเตอร์กำลังไม่นำกระแสต้องทำให้แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอสมีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (V_{GS}) การที่มอเตอร์จะทำหน้าที่สวิตช์ได้เร็วเท่าไรขึ้นอยู่กับความเร็วในการเก็บ และคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแฝงด้านขาเข้าของมอเตอร์กำลัง (Parasitic Input Capacitance) ซึ่งจะช่วยให้แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอสมีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (V_{GS}) ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มอเตอร์กำลังหยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังจะต้องมีความสามารถจ่ายกระแส (Sourcing) และดึงกระแส (Sinking) ได้อย่างรวดเร็วเพื่อช่วยให้มอเตอร์กำลังสามารถสวิตช์ในย่านความถี่สูงได้ โดยปัจจุบันวงจรขับเคลื่อนสามารถออกแบบใช้งานได้ง่ายเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรถูกรวมไว้อยู่ในรูปของไอซี (Integrated-Circuit: IC) ซึ่งมีให้เลือกใช้มากมายตามความเหมาะสม [26]

อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Components) ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โดยมีสัญลักษณ์ตามรูปที่ 2.4 อุปกรณ์เหล่านี้มีหน้าที่หลากหลายและใช้งานในหลายส่วนของอินเวอร์เตอร์ เช่น ตัวเก็บประจุที่ใส่ไว้หน้าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) เพื่อช่วยให้แรงดันก่อนเข้าวงจรเรียบขึ้น หรือตัวต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรขับเคลื่อน หรือใช้ประกอบเป็นวงจรกรองสัญญาณ (Filter) ใช้เพื่อกรองฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณไฟฟ้าและกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการใช้งานออกจากอินเวอร์เตอร์ ในส่วนอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Components) และวงจรกรองสัญญาณนั้นจะอธิบายโดยละเอียดต่อไป



Resistor : R

ก. ตัวต้านทาน



Inductor : L

ข. ตัวเหนี่ยวนำ



Capacitor : C

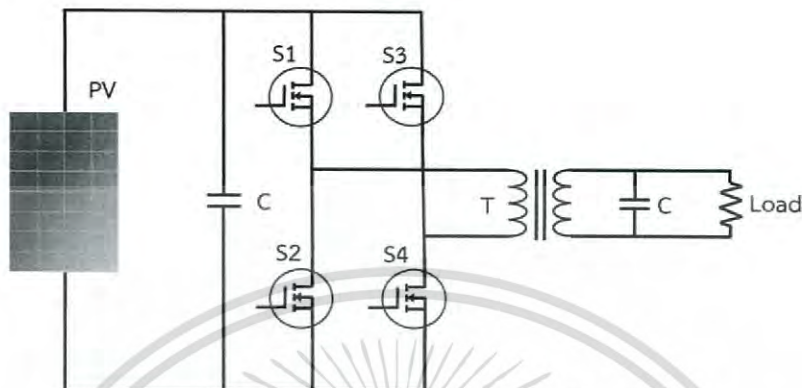
ค. ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Components)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

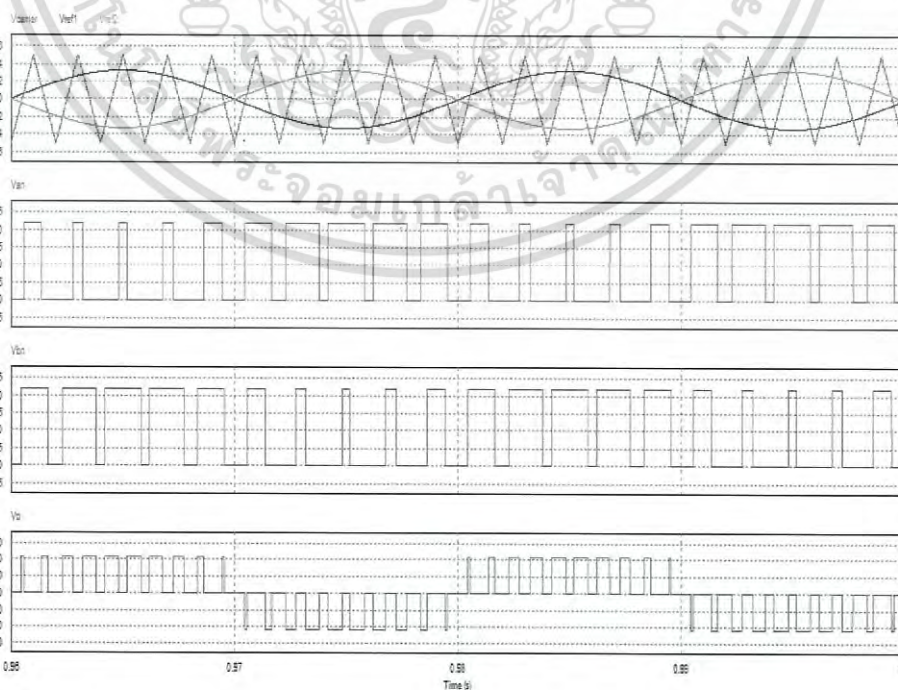
2.1.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [26]

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวนั้นแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge Inverter) และแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter) ซึ่งส่วนมากจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ เนื่องจากรองรับกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า



รูปที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

จากรูปที่ 2.5 คือ วงจรไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า, DC/AC Converter ซึ่งมีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ และภาระทางไฟฟ้า โดยในส่วนของ DC/AC Converter นั้นประกอบด้วย S1, S2, S3, S4 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ควบคุมได้ทั้งแบบไบโพลาร์ (Bipolar Voltage Switching) กับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar Voltage Switching) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบยูนิโพลาร์ โดยจะควบคุมสวิตช์ S1, S2 โดยใช้สัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) และควบคุมสวิตช์ S3, S4 โดยใช้สัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ตามรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.6 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [26] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 การสวิตช์ซึ่งจะมีลักษณะตามตารางที่ 2.1 โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อ $V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}$: สวิตช์ S1 จะนำกระแส $V_{\text{AN}} = V_d$
- เมื่อ $V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}$: สวิตช์ S2 จะนำกระแส $V_{\text{AN}} = 0$
- เมื่อ $-(V_{\text{control}}) > V_{\text{tri}}$: สวิตช์ S3 จะนำกระแส $V_{\text{BN}} = V_d$
- เมื่อ $-(V_{\text{control}}) < V_{\text{tri}}$: สวิตช์ S4 จะนำกระแส $V_{\text{BN}} = 0$

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตช์ซึ่งแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ [1]

รูปแบบ	สวิตช์ นำกระแส	สวิตช์ นำกระแส	V_{AN}	V_{BN}	V_o
1	S1	S4	V_d	0	V_d
2	S2	S3	0	V_d	$-V_d$
3	S1	S3	V_d	V_d	0
4	S2	S4	0	0	0

การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นและช่วงโอเวอร์มอดูเลต สำหรับช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นจะเป็นช่วงที่สัญญาณความถี่หลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกแปรผันกับอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) โดย m_a หาได้จากสมการที่ (2.1) ซึ่งในช่วงมอดูเลตเชิงเส้น m_a มีค่าระหว่าง 0-1 และในช่วงช่วงโอเวอร์มอดูเลต m_a มีค่ามากกว่า 1

$$m_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \quad (2.1)$$

โดย V_{control} = ค่ายอดของสัญญาณไซน์ที่ใช้ควบคุม
 V_{tri} = ค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ในการมอดูเลตนั้น สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าความถี่สวิตช์ที่ใช้จะมีความถี่สูงกว่าสัญญาณไซน์มากเพื่อให้การกรองสัญญาณพาหะที่ไม่ต้องการออกทำได้ง่ายขึ้น สัดส่วนค่าความถี่สวิตช์ต่อค่าความถี่ของสัญญาณไซน์ถูกเรียกว่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (m_f) หาได้จากสมการที่ (2.2)

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.2)$$

โดย f_s = ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์
 f_1 = ความถี่หลักมูลด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 มาตรฐานและการทดสอบอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ขายในท้องตลาดจำเป็นที่จะต้องมีมาตรฐานรองรับ เพื่อควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งแต่ละประเทศก็จะมีมาตรฐานกำหนดไว้ชัดเจน ส่วนในประเทศไทยนั้นก็ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้ ยกตัวอย่างหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานไว้เช่น สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) เป็นหน่วยงานที่ควบคุมการดำเนินงานของกิจการไฟฟ้า กิจการก๊าซธรรมชาติ และกิจการโครงข่ายพลังงาน ซึ่งคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานได้ออกระเบียบมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า วิธีการตรวจสอบและการรับรองผลการตรวจสอบอุปกรณ์ประเภทอินเวอร์เตอร์ (Grid-Connected Inverter) ระบบแรงดันต่ำอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ประเภทอินเวอร์เตอร์ (Grid-Connected Inverter) ระบบแรงดันต่ำ [14] ให้มีมาตรฐานไม่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทดสอบดังต่อไปนี้

(1) การทดสอบเฉพาะแบบ (Design Test or Type Test) หรือการทดสอบในห้องทดสอบ (Laboratory Test) ที่ได้รับการรับรองจากหน่วยตรวจสอบและรับรองมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ที่ได้รับใบอนุญาตเป็นหน่วยตรวจสอบและรับรองมาตรฐานจาก กกพ. โดยจะต้องมีการทดสอบ

- ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics), การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Injection), การเชื่อมต่อกลับคืนเข้ากับระบบโครงข่าย (Response to Utility Recover) โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 1547.1 - 2005
- แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 6100
- การป้องกันการจ่ายไฟแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Anti-Islanding) โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 62116
- การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power Control), การควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active Power Control), การทนต่อสถานะแรงดันต่ำชั่วขณะ (Low Voltage Fault Ride Through), การป้องกันแรงดันต่ำและแรงดันเกิน (Under and Over Voltage Protection), การป้องกันความถี่ต่ำและความถี่เกิน (Under and Over Frequency Protection) โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบตามการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย

(2) การทดสอบประจำ ที่ไม่เกี่ยวกับรุ่น (Routine Test) จะต้องมีการทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ทุกตัวก่อนการติดตั้งใช้งาน คือ

- ช่วงแรงดัน (Voltage Range)
- ช่วงความถี่ (Frequency Range)
- การป้องกันการจ่ายไฟแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Anti-Islanding)

(3) การทดสอบภาคสนาม (Field test) เป็นการทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย เพื่อตรวจสอบความเรียบร้อยก่อนเชื่อมต่อเข้าระบบ จะต้องมีการทดสอบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารพลังงานเพื่อให้บริการแก่ผู้สนใจเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การป้องกันการจ่ายไฟแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Anti-Islanding)
- การเชื่อมต่อกลับคืนเข้ากับระบบโครงข่าย (Response to Utility Recover)
- การทดสอบปลดการเชื่อมต่อ (Load Rejection)
- แรงดัน (Voltage Level)
- ความถี่ (Frequency)
- ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)
- แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ในการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิกาค่านั้น มีรายละเอียดขั้นตอนและวิธีการทดสอบเป็นแนวทางเดียวกันกับสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ซึ่งระบุไว้ในระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [30] โดยจะต้องทดสอบในห้องทดสอบ (Laboratory Test) และมีตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าและการทดสอบภาคสนาม (Field Test)

การไฟฟ้านครหลวง

ในการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงนั้นมีรายละเอียดขั้นตอนและวิธีการทดสอบเป็นแนวทางเดียวกันกับสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ซึ่งระบุไว้ในระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558 [31] โดยจะต้องทดสอบการออกแบบ (Design Test) ซึ่งเป็นการทดสอบในห้องทดสอบ และมีการทดสอบประจำเครื่อง (Routine Test) โดยต้องดำเนินการกับอินเวอร์เตอร์ทุกเครื่องที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน

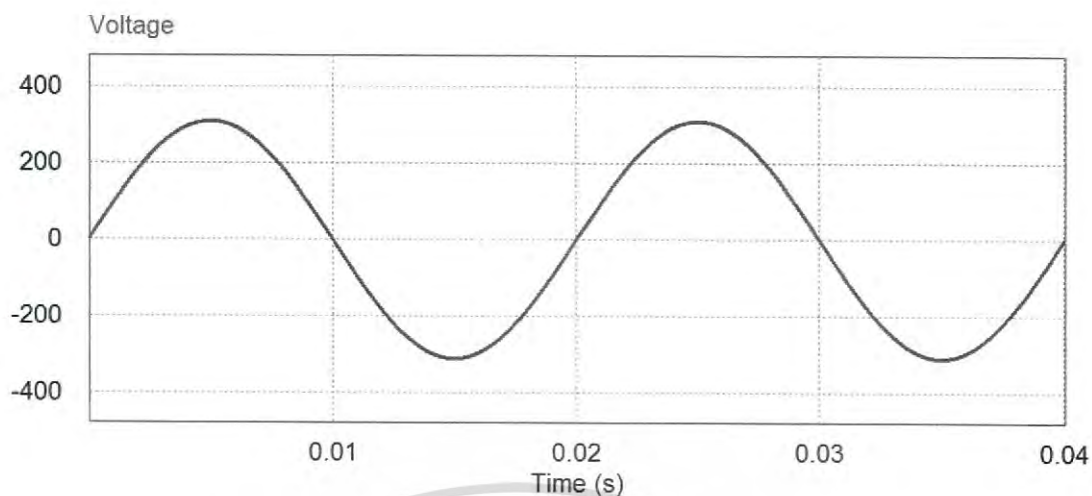
2.2 คุณภาพไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

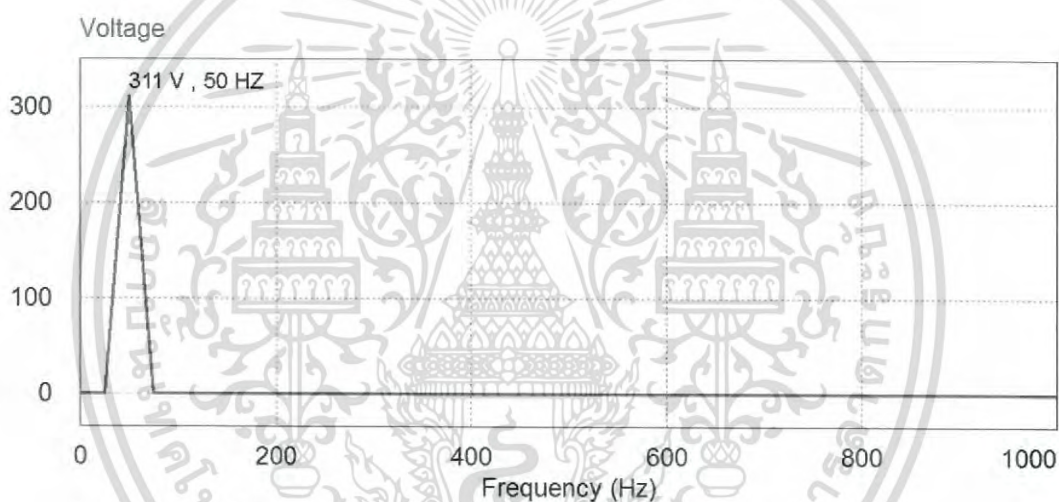
ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่ของสัญญาณเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลหรืออาจจะนับความถี่หลักมูลเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ก็ว่าได้ โดยสัญญาณที่มีความถี่เป็นสองเท่าของสัญญาณที่ความถี่หลักมูลคือสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 2 และโดยสัญญาณที่มีความถี่เป็นสามเท่าของสัญญาณที่ความถี่หลักมูลคือสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็นต้น

ไฟฟ้าที่เราใช้อยู่ในบ้านที่อยู่อาศัยนั้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งรูปสัญญาณดังกล่าวเป็นรูปสัญญาณในโดเมนเวลา (Time Domain) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) จะได้สัญญาณดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) มีเพียงแอมพลิจูดของสัญญาณที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เพียงความถี่เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



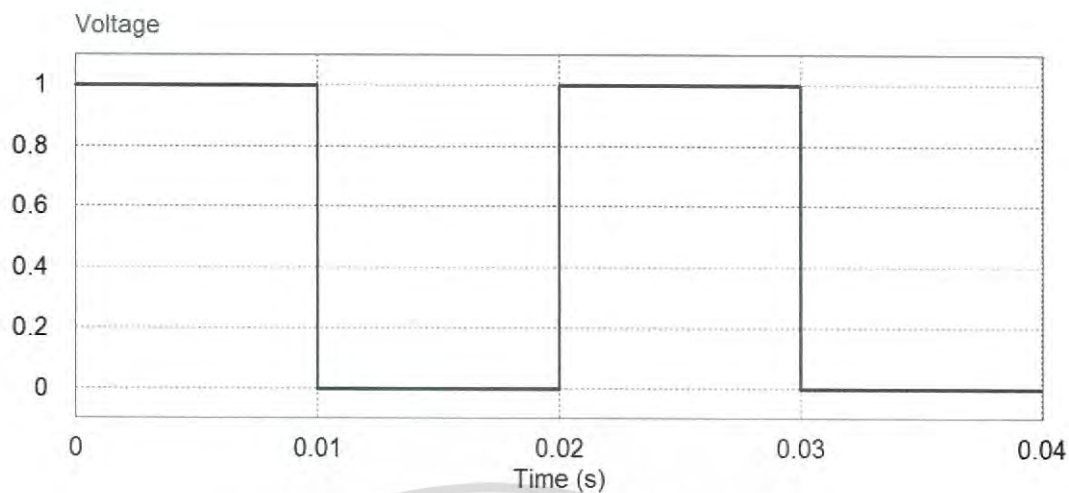
รูปที่ 2.7 สัญญาณรูปไซน์ในโดเมนเวลา (Sine Wave in Time Domain)



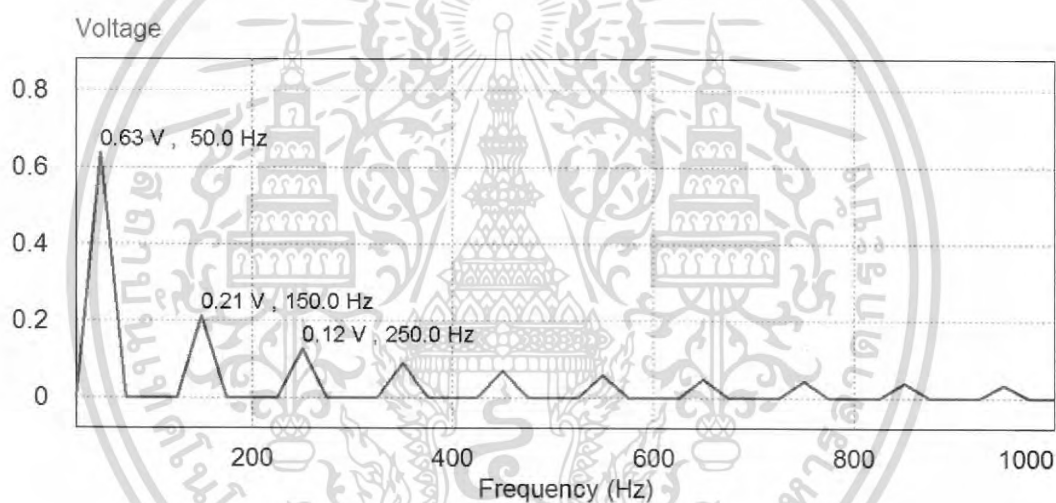
รูปที่ 2.8 สัญญาณรูปไซน์ในโดเมนความถี่ (Sine Wave in Frequency Domain)

เพื่อให้เห็นตัวอย่างของแรงดันฮาร์มอนิกส์จึงวิเคราะห์สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) ดังรูปที่ 2.9 โดยสัญญาณดังกล่าวมีความถี่ 50 Hz เท่ากับสัญญาณรูปไซน์รูปที่ 2.7

จากรูปที่ 2.10 เป็นการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมจากรูปที่ 2.9 ในโดเมนความถี่ ซึ่งสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมนั้นจะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกส์อื่นๆ จำนวนมาก ได้แก่ ฮาร์มอนิกส์ที่ 1, 3, 5, 7, 9 ... ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 2.9 สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Square Wave in Time Domain)

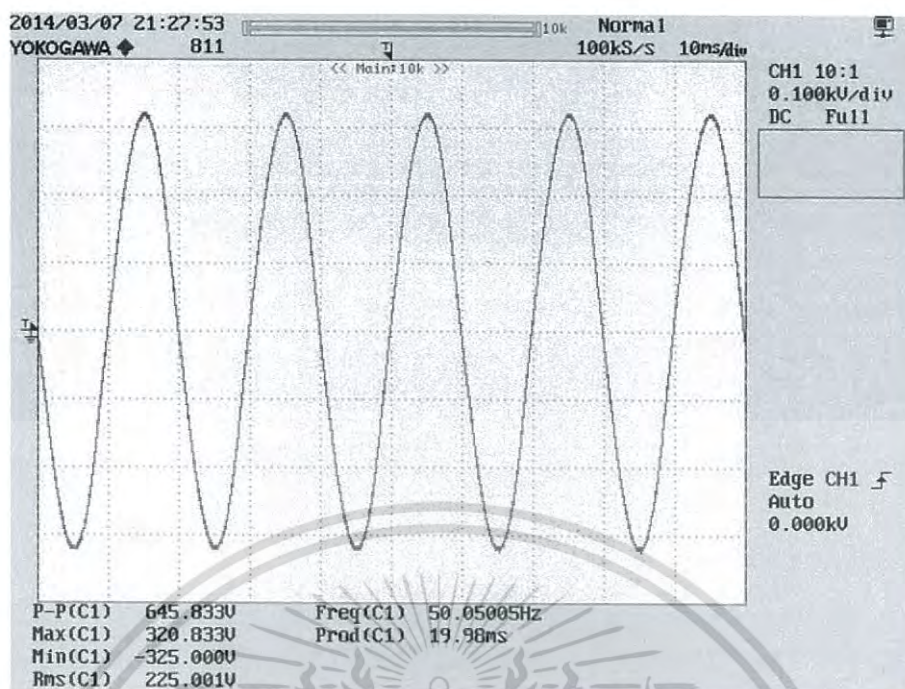


รูปที่ 2.10 สัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมในความถี่ (Square Wave in Frequency Domain)

2.2.2 มาตรฐานสัญญาณฮาร์มอนิกในสัญญาณไฟฟ้า

ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณไซน์ที่เกิดขึ้นจริงนั้นมักจะมีฮาร์มอนิกอื่นนอกจากความถี่หลักมูลปนอยู่ด้วย บางครั้งมากจนกระทั่งสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนอย่างชัดเจนหรืออาจจะมีปนอยู่น้อยมากจนสัญญาณไซน์ไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ในรูปที่ 2.11 เป็นรูปสัญญาณไซน์ในโดเมนเวลาที่วัดจริง และในรูปที่ 2.12 เป็นรูปสัญญาณไซน์ดังกล่าวในโดเมนความถี่ ซึ่งจะปรากฏฮาร์มอนิกอันดับอื่นผสมอยู่เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดจริงในโดเมนเวลา (Real Sine Wave in Time Domain)



รูปที่ 2.12 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดจริงในโดเมนความถี่ (Real Sine Wave in Frequency Domain)

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 จะเห็นได้ว่าสัญญาณไซน์นั้นมักจะมีฮาร์มอนิกอันดับอื่นปนอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นจึงต้องมีมาตรฐานกำหนดเพื่อให้นิยามของสัญญาณรูปไซน์

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทยนั้น มีมาตรฐานกำหนดในด้านฮาร์มอนิกส์ เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้า หรือควบคุมดูแลให้ผู้ผลิตไฟฟ้ารายอื่น หรือผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีสัญญาณฮาร์มอนิกส์อยู่ในมาตรฐาน โดยในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีข้อกำหนดตามตารางที่ 2.2 และตามตารางที่ 2.3 ดังนี้ [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม *

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (KV)	อันดับฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม (A_{rms})																
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	6	4	6
11 และ 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	1	1
22,24 และ 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1
69	8	5	4	7	3	4	2	1	1	4	1	4	1	1	1	1	1
115 และสูงกว่า	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1

* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนเดิมที่มีอยู่)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kv)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกสรรมของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11,12,22 และ 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 และสูงกว่า	1.5	1	0.5

โดยที่ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกสรรม (Total Harmonic Distortion : THD) มีหาได้ ดังนี้

$$\%THD \text{ (Voltage)} = \%THD_v = \frac{\sqrt{V_{2,rms}^2 + V_{3,rms}^2 + \dots}}{V_{1,rms}} \times 100 \quad (2.3)$$

$$\%THD \text{ (Current)} = \%THD_i = \frac{\sqrt{I_{2,rms}^2 + I_{3,rms}^2 + \dots}}{I_{1,rms}} \times 100 \quad (2.4)$$

สำหรับมาตรฐานของสัญญาณฮาร์โมนิกในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวง เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายไฟฟ้าจะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดตามตารางที่ 2.4 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของกระแส

อันดับคี่	ขีดจำกัดกระแส (%)	อันดับคู่	ขีดจำกัดกระแส (%)
3 – 9	4.0	2 – 10	1.0
11 – 15	2.0	12 – 6	0.5
17 – 21	1.5	18 – 22	0.375
23 – 33	0.6	24 – 34	0.15
≥35	0.3	≥36	0.075
ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THDi 5.0 %)			

2.2.3 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

“ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) หมายถึง ความสามารถของอุปกรณ์ (Device), เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (System) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียหรือผลกระทบใดๆ ต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน” [26]

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นมีความจำเป็นเพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างเป็นปกติ เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีการปล่อยสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาไม่ว่าจะเป็นการแผ่กระจายทางสายตัวนำ (Conducted Emission) หรือการแผ่คลื่นทางอากาศ (Radiated Emission) และเมื่อเกิดการแผ่แล้วอาจจะทำให้เกิดการรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นหรือการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า “การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) หมายถึง การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประเด็นสำคัญ คือ เป็นผลที่เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” [26] โดยสามารถแบ่งการรบกวนทางสายตัวนำและการแผ่ทางอากาศได้จากความถี่ของสัญญาณโดยที่ความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์จะพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และที่ความถี่ 30 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิรตซ์จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) มากจะได้รับผลกระทบได้ง่าย ซึ่งการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ทุกเมื่อ ทั้งจากธรรมชาติและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ถูกสร้างขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงควรมีภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Immunity)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหัวข้อที่นานาชาติต่างให้ความสำคัญ จึงมีมาตรฐานต่างๆ กำหนดการทดสอบด้านนี้มากมาย เพื่อให้การทำความเข้าใจในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงขอยกตัวอย่างคำแปล หรือคำนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility), การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference) และการแผ่กระจาย (Emission) ตาม American National Standard Dictionary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of Electromagnetic Compatibility (EMC) including Electromagnetic Environmental Effects (E3) [32] ดังนี้

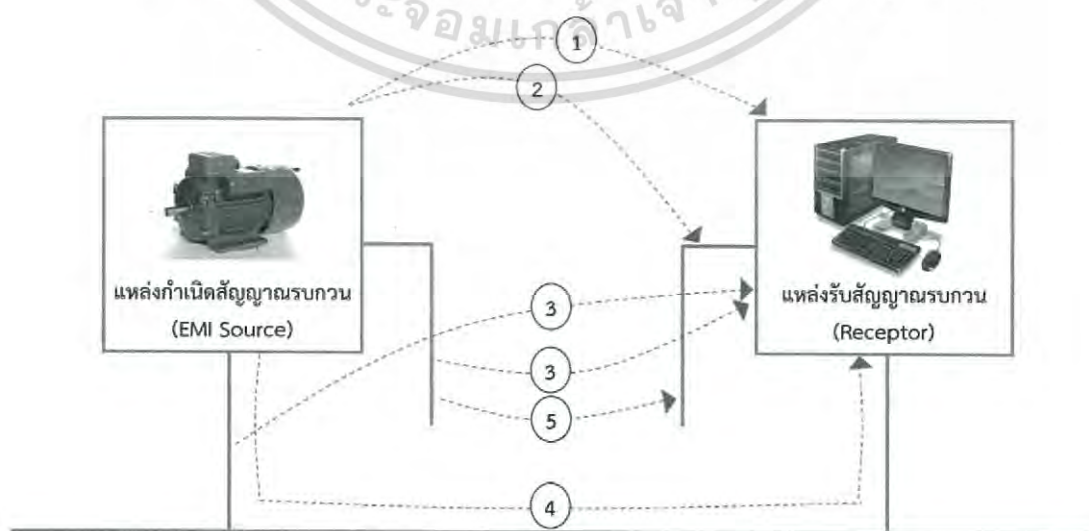
“**Electromagnetic (EM) Compatibility:** The ability of systems, equipment, and devices that utilize the EM spectrum to operate in their intended operational environments without suffering unacceptable degradation or causing unintentional degradation because of EM radiation or response. It involves the application of sound EM spectrum management; system, equipment, and device design configuration that ensures interference-free operation; and clear concepts and doctrines that maximize operational effectiveness.”

“**Electromagnetic Interference (EMI):** Any electromagnetic disturbance that interrupts, obstructs, or otherwise degrades or limits the effective performance of electronics and electrical equipment. It can be induced intentionally, as in some forms of electronic warfare, or unintentionally, as a result of spurious emissions and responses, intermodulation products, and the like.”

“**Emission: (A)** The phenomenon by which electromagnetic (EM) energy emanates from a source.”

การเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกัน คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source), ตัวกลาง (Coupling Path) และตัวรับผลกระทบ (Receptor) โดยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายผ่านตัวกลางไม่ว่าจะเป็นทางสายตัวนำหรือทางอากาศไปยังตัวได้รับผลกระทบ ทั้งนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่งเครื่องนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) และตัวรับผลกระทบ (Receptor) กล่าวคือ สามารถผลิตสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนอุปกรณ์อื่น หรือถูกสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์อื่นรบกวนได้ในขณะเดียวกัน

โดยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.13 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [26] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่ 1 Radiated Emission

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI Source) แผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบ (Receptor)

รูปแบบที่ 2 Indirect-conducted Emission

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI Source) แผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ แล้วนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ (Receptor)

รูปแบบที่ 3 Indirect-radiated Emission

สายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI Source) เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (Receptor)

รูปแบบที่ 4 Conducted Emission

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI Source) ส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบ โดยผ่านทางสายตัวนำที่เชื่อมต่อกันกับตัวรับผลกระทบ (Receptor)

รูปแบบที่ 5 Semi-conducted Emission

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI Source) เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ (Receptor)

เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดนั้นสามารถสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังนั้นเพื่อเกิดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบนั้น จำเป็นต้องลดการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงการทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นทนต่อการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์อื่น ซึ่งมีกล่าวไว้ใน [26,33-38]

2.2.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางสายตัวนำ

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเมื่อเกิดจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดแล้ว สัญญาณดังกล่าวสามารถเดินทางไปยังอุปกรณ์อื่นโดยอาศัยตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันอยู่ ไม่ว่าจะเป็นสายส่งกำลัง สายสัญญาณควบคุม หรือแม้แต่สายดิน [26,33-38] โดยส่วนมากมาตรฐานต่างๆ จะกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ใช้ทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้าในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อให้การทำความเข้าใจในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงขอยกตัวอย่างคำแปล หรือคำนิยามของการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำตาม American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility (EMC) including Electromagnetic Environmental Effects [32] ซึ่งให้คำนิยามไว้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common Mode Interference)

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม หมายถึง สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่ปรากฏขึ้นระหว่างระนาบอ้างอิง (สายดิน) กับสายตัวนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ทั้งคู่เปลี่ยนแปลงพร้อมกัน และมีปริมาณสัมพันธ์กันกับระนาบอ้างอิง [32] โดยสัญญาณดังกล่าวเกิดจากค่าความเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ในวงจรไฟฟ้า ซึ่งตามธรรมชาติค่าความเก็บประจุจะมีค่าน้อยลงเมื่อสัญญาณที่มีความถี่สูงไหลผ่าน นั่นหมายความว่าสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงๆ สามารถไหลจากสายตัวนำเส้นหนึ่งไปอีกเส้นหนึ่งผ่านตัวเก็บประจุแฝงในอากาศได้นั่นเอง ตามรูปที่ 2.14 โดยแรงดันโหมดผลรวม (V_{CM}) เกิดจากกระแสโหมดผลรวม (I_{CM1}) จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CIR}) และภาระทางไฟฟ้าไหลลงสายดินรวมกับกระแสโหมดผลรวมจะไหลผ่าน (I_{CM2}) อิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (Z_{RTN}) และไหลลงสายดิน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแรงดันของสัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับแรงดันของสัญญาณรบกวนที่สายไฟฟ้า ($V_{noiseRTN}$) ตามสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ซึ่งเหตุนี้เองที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างขึ้น

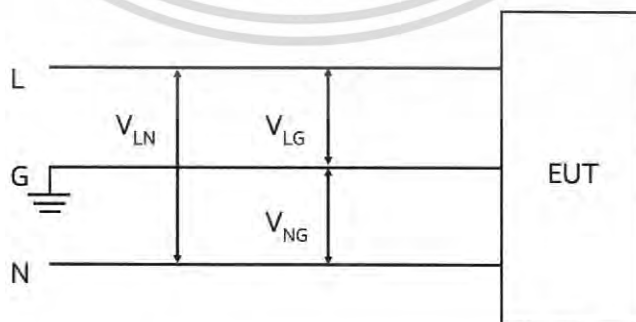
$$V_{noiseCIR} = I_{CM1} \times (Z_{CIR} + Z_{LOAD} + X_{cp}) \quad (2.5)$$

$$V_{noiseRTN} = I_{CM2} \times (Z_{RTN} + X_{cp}) \quad (2.6)$$

สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference)

สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างเกิดจากสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างสองสายตัวนำ คือ ตัวนำสัญญาณไป (Signal Line) และตัวนำสัญญาณกลับ (Return Line) มีรูปแบบหรือขนาดแตกต่างกัน [32] ทางเดินของสัญญาณรบกวนในวงจรจะไหล ดังรูปที่ 2.14 กระแสโหมดผลต่างจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า (Z_{CIR}) และไหลกลับมาที่อิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ (Z_{RTN})

ในการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (V_{DM}) และสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (V_{CM}) นั้นสามารถวัดได้จากสายไลน์, นิวทริล และกราวด์ ดังรูปที่ 2.15 จากนั้นคำนวณหา V_{CM} ได้จากสมการที่ (2.7) และคำนวณหา V_{DM} ได้จากสมการที่ (2.8)



รูปที่ 2.15 การวัดค่าสัญญาณรบกวน [26]

$$V_{CM} = \frac{(V_{LG} + V_{NG})}{2} \quad (2.7)$$

$$V_{DM} = \frac{(V_{LG} - V_{NG})}{2} \quad (2.8)$$

โดย V_C คือ แรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

V_{LG} คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

V_{DM} คือ แรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

V_{NG} คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

2.2.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเมื่อเกิดจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดแล้ว สัญญาณดังกล่าวสามารถเดินทางไปอุปกรณ์อื่นโดยอาศัยการแผ่กระจายทางอากาศได้ โดยส่วนมากมาตรฐานต่างๆ จะกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ใช้ทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของอุปกรณ์ไฟฟ้าในย่านความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 2 จิกกะเฮิรตซ์ เพื่อให้การทำความเข้าใจในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงขอยกตัวอย่างคำแปล หรือคำนิยามของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศตาม American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility (EMC) including Electromagnetic Environmental Effects [32] ให้คำนิยามของ (Radiated emission) ไว้ดังนี้

“Radiated emission (RE): Desired or undesired electromagnetic energy, in the form of electric and magnetic fields, which is propagated through space.”

เพื่อให้เข้าใจสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศมากขึ้นจึงต้องเข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับสนาม [34,37] ดังนี้

สนามไฟฟ้า (Electric Field: E field: V/m) เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างตัวนำไฟฟ้าสองตัว โดยค่าสนามไฟฟ้านี้มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field: H Field: A/m) เกิดจากกระแสไหลในตัวนำไฟฟ้า โดยค่าสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมป์ต่อเมตร โดยวัดจากระยะทางที่ห่างจากตัวนำไฟฟ้า

คลื่นระนาบ (Plane Wave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมกันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสงประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที โดยสัดส่วนของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก (E/H) เรียกว่า ความต้านทานสัมบูรณ์คลื่น (Wave Impedance) ซึ่งค่านี้เองที่จะอธิบายถึงรูปแบบการรบกวนและการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งออกเป็น สนามไกล (Far Field) และสนามใกล้ (Near Field)

สนามไกล (Far Field) นั้นเป็นคลื่นระนาบ (Plane Wave) เป็นช่วงที่สนามไฟฟ้า (E Field) รวมตัวกับสนามแม่เหล็ก (H Field) แล้ว ซึ่งช่วงความถี่นี้หาได้จากสมการที่ (2.9) ดังนั้นในสนามไกลจะมีค่าความต้านทานสัมบูรณ์คลื่น (Wave Impedance) คงที่ ซึ่งในช่วงพื้นที่ว่างไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นค่ามีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม ดังสมการที่ (2.11)

$$\text{สนามไกล (far field)} \quad D > \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น สัญญาให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.10) ค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย D คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนาม มีหน่วยเป็นเมตร (m)
 λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ค่าความต้านทานสัมบูรณ์คลื่นในพื้นที่ว่าง (Wave Impedance of Free space)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \quad \text{โอห์ม } (\Omega) \quad (2.11)$$

โดย $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร (H/m)
 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ ฟารัดต่อเมตร (F/m)

สนามใกล้ (Near Field) เป็นช่วงที่สนามไฟฟ้า (E Field) ไม่รวมตัวกับสนามแม่เหล็ก (H Field) โดยช่วงความถี่นี้หาได้จากสมการที่ (2.10) ซึ่งในขณะนั้นสนามไฟฟ้า (E field) มีค่าอิมพีแดนซ์สูง แต่สนามแม่เหล็ก (H Field) มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

2.2.6 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน หากแต่อุปกรณ์ไฟฟ้าก็ได้สร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์ อันเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) จนทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะถูกเรียกว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interferences) อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดสามารถสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังนั้นหน่วยงานต่างๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานขึ้นมา เพื่อบังคับไม่ให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานและความปลอดภัย มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility) นั้นมีมากมายขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ หรือขึ้นอยู่กับการใช้งาน ในแต่ละประเทศ ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานสากล ซึ่งออกโดย International Special Committee on Radio Interference (CISPR) หรือมาตรฐานของยุโรป ซึ่งออกโดย European Committee for Standardization (CEN) หรือ FCC REGULATIONS ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดโดย Federal Communications Commission หรือมาตรฐานเฉพาะทาง เช่น มาตรฐานทางทหาร ในส่วนของไทยนั้นมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ซึ่งกำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เช่น มอก.2238 ชีตจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน และมอก.1956 ชีตจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ เป็นต้น

ในประเทศไทยนั้นมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอ้างอิงจากมาตรฐานของยุโรป ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐานสากล ตามตารางที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานของยุโรป และมาตรฐานสากล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

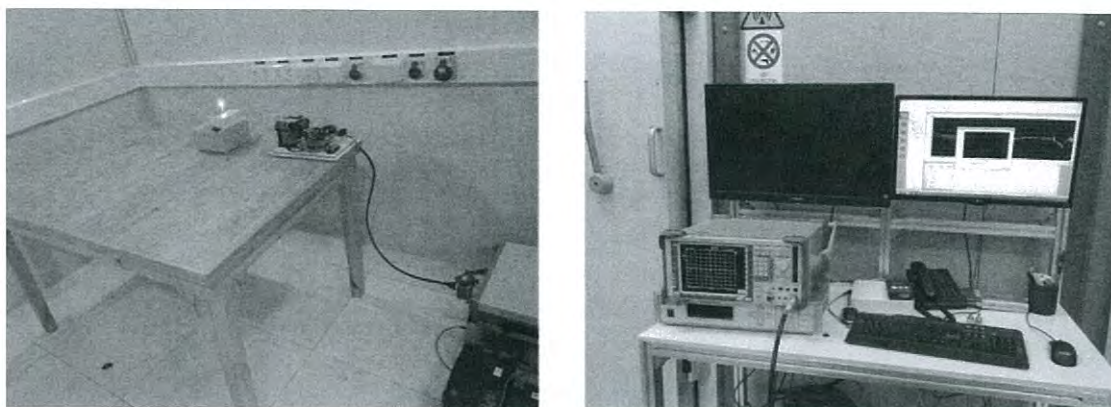
ตารางที่ 2.5 มาตรฐานด้านการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

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

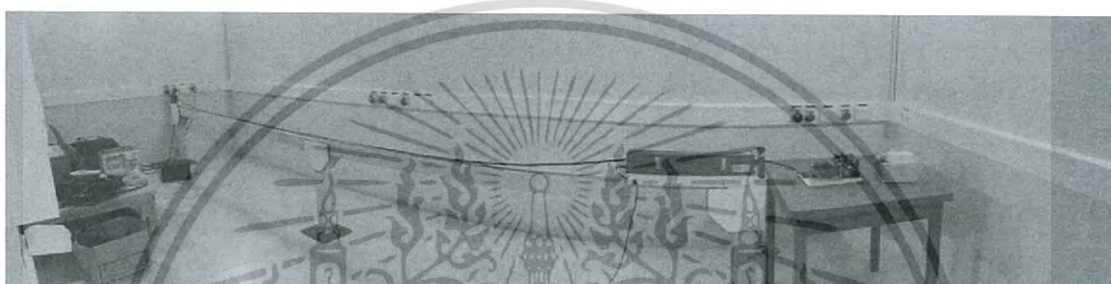
2.2.7 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดสอบการแผ่กระจายของสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำดังรูปที่ 2.16 และการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งการทดสอบนั้นจะต้องทดสอบในห้องที่ได้รับมาตรฐานและได้รับการรับรอง รวมถึงมีการจัดวางอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานด้วย

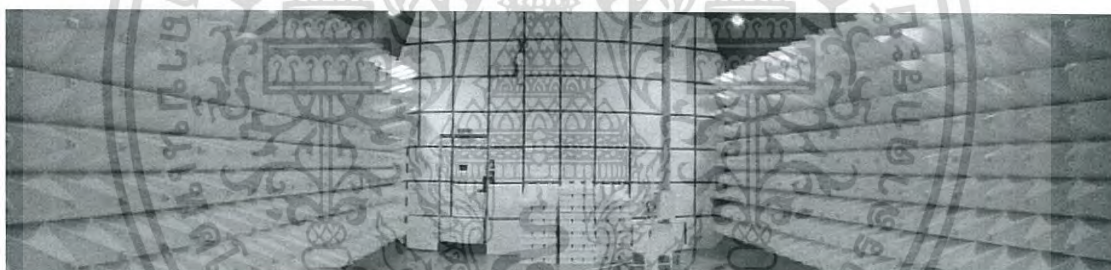
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ



ก. การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศเฉพาะที่แผ่กระจายทางสายตัวนำ



ข. การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของระบบเครื่องใช้ไฟฟ้า

รูปที่ 2.17 การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

การทดสอบทั้งสองแบบนี้ค่าของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและสัญญาณรบกวนทางอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งจะเทียบกับมาตรฐานใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่จะทดสอบ และขึ้นอยู่กับว่าจะใช้สินค้านั้นที่ประเทศใด ส่วนใหญ่สินค้าจะมีการสอบเทียบกับมาตรฐานในหลายประเทศ เช่น มาตรฐานสากล มาตรฐานยุโรป หรือมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ของไทย จะยกตัวอย่างการทดสอบอินเวอร์เตอร์ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบเครื่องใช้ไฟฟ้า เอกสารภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องสำเร็งที่คล้ายกัน (Household Appliances, Electric ครัวเรือนไฟฟ้าทุกชนิด) ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tools and Similar Apparatus) ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก.2238 [39] หรือ EN55014 หรือ CISPR14 [40] ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานมีค่าในการทดสอบเหมือนกันเนื่องจากมาตรฐาน มอก.2238 ของไทยอ้างอิงมาจาก CISPR14 ซึ่งมาตรฐาน EN55014 ของยุโรปนั้นก็ได้อ้างอิงมาจาก มาตรฐานสากล CISPR14 เช่นเดียวกันโดยการทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ ของอินเวอร์เตอร์จะทดสอบในหัวข้อเครื่องใช้และบริภัณฑ์ภายในที่อยู่อาศัยที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่คล้ายกัน และอุปกรณ์ควบคุมการควบคุมค่าที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทดสอบทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังตารางที่ 2.6 โดยทดสอบที่ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ และทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศของสายตัวนำ โดยเทียบกับค่ามาตรฐานตามตารางที่ 2.7 ที่ความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะวัดค่าสูงสุด (Peak) ค่ายอดเสมือน (Quasi-Peak: QP) และค่าเฉลี่ย (Average: AV) โดยค่าสูงสุดนั้นจะใช้ในมาตรฐานทางทหาร แต่ในมาตรฐานทั่วไปไม่ได้มีข้อกำหนดสำหรับค่านี้ ดังนั้นค่าที่มาตรฐานทางการค้าทั่วไปจะกำหนดเพียงแค่ว่ายอดเสมือนและค่าเฉลี่ยเท่านั้น

ตารางที่ 2.6 เครื่องใช้และบริภัณฑ์ภายในที่อยู่อาศัยที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่คล้ายกัน และอุปกรณ์ควบคุมการควบคุมค่าที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

พิสัยความถี่	ที่ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าประธาน		ที่ขั้วต่อโหลดและขั้วต่อเพิ่มเติม					
	1	2	3	4	5			
(MHz)	dB(μ V) ค่ายอดเสมือน		dB(μ V) ค่าเฉลี่ย		dB(μ V) ค่ายอดเสมือน		dB(μ V) ค่าเฉลี่ย	
0.15 ถึง 0.50	ลดลงเชิงเส้นด้วยลอการิทึมของความถี่จาก							
	66 ถึง 56		59 ถึง 46		80		70	
0.50 ถึง 5	56		46		74		64	
5 ถึง 30	60		50		74		64	

ตารางที่ 2.7 ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ารบกวนสำหรับพิสัยความถี่ 30 ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์

1	เครื่องใช้ภายในที่อยู่อาศัยและที่คล้ายกัน		เครื่องมือ					
	2	3	4	5	6	7	8	9
พิสัยความถี่ (MHz)	กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของมอเตอร์ไม่เกิน 700 W		กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของมอเตอร์เกิน 700 W แต่ไม่เกิน 1000 W		กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของมอเตอร์เกิน 1000 W		กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของมอเตอร์เกิน 1000 W	
	ค่ายอดเสมือน dB(pW)	ค่าเฉลี่ย dB(pW)	ค่ายอดเสมือน dB(pW)	ค่าเฉลี่ย dB(pW)	ค่ายอดเสมือน dB(pW)	ค่าเฉลี่ย dB(pW)	ค่ายอดเสมือน dB(pW)	ค่าเฉลี่ย dB(pW)
30 ถึง 300	เพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความถี่จาก		เพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความถี่จาก		เพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความถี่จาก		เพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความถี่จาก	
	45 ถึง 55	35 ถึง 45	45 ถึง 55	35 ถึง 45	49 ถึง 59	39 ถึง 49	55 ถึง 65	45 ถึง 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

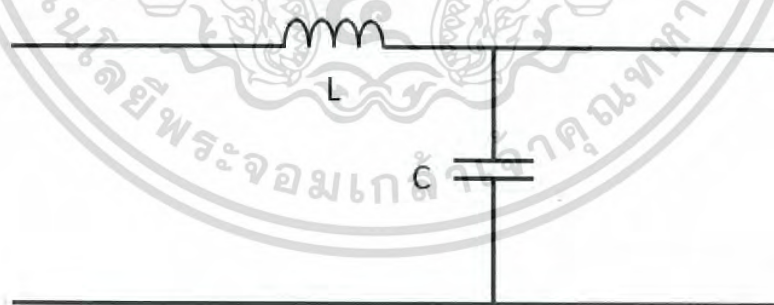
นอกจากนี้ ในงานวิจัยไม่เพียงแต่ทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ และการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศของสายตัวนำเท่านั้น แต่ยังทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศของทั้งระบบอีกด้วย แต่เนื่องจาก มอก.2238 [41] หรือ EN55014 หรือ CISPR14 [42] ไม่มีข้อกำหนดดังกล่าวไว้ จึงได้นำมาตรฐานมอก.1956 หรือ EN55022 หรือ CISPR22 class B มาใช้ในการเปรียบเทียบ โดยได้กำหนดค่ายอดเสมือน (Quasi-Peak: QP) ตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ขีดจำกัดสำหรับสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายเป็นคลื่นของ ITE ประเภท B ที่ระยะวัด 10 เมตร

พิสัยความถี่ MHz	ขีดจำกัดค่ายอดเสมือน dB(uV/m)
30 ถึง 230	30
230 ถึง 1000	37

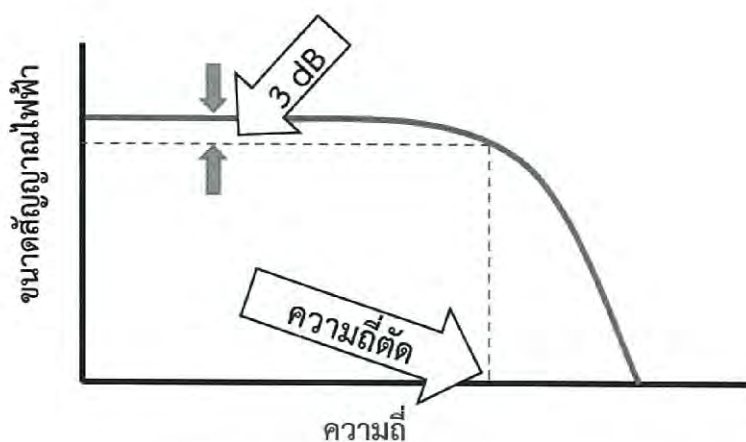
2.3 วงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter)

วงจรกรองความถี่มีไว้เพื่อกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้อาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณที่ไหลผ่านตัวมัน โดยตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) สัญญาณความถี่ต่ำจะไหลผ่านได้ง่ายกว่าสัญญาณความถี่สูง และตัวเก็บประจุ (Capacitor) สัญญาณความถี่สูงจะไหลผ่านได้ง่ายกว่าสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งวงจรกรองความถี่มีหลากหลายแบบ เช่น วงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) วงจรกรองแบบสูงผ่าน (High-Pass Filter) และวงจรกรองแถบผ่าน (Band-Pass Filter)



ก. วงจรสมมูลของวงจรกรองแบบต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. กราฟคุณลักษณะ

รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของวงจรกรองแบบต่ำผ่านและกราฟคุณลักษณะ

วงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) จะมีโครงสร้างแบบง่ายตามรูปที่ 2.18 ก. ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ต่ออนุกรมกับวงจรเพื่อลดทอนขนาดของสัญญาณความถี่สูง โดยให้เฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำไหลผ่าน และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อขนานกับวงจรเพื่อให้สัญญาณความถี่สูงไหลผ่านตัวมัน โดยไม่ไหลไปยังภาระทางไฟฟ้า โดยมีการกรองสัญญาณในลักษณะดังกราฟในรูป 2.18 ข. ซึ่งในการออกแบบนั้นจำเป็นต้องกำหนดความถี่ตัดของวงจร โดยมีสูตรการคำนวณ ดังสมการ (2.12) ซึ่งความถี่ตัด คือ ความถี่ที่วงจรกรองเริ่มกรองสัญญาณอย่างชัดเจนในทางปฏิบัติการหาค่าความถี่ตัดจากกราฟใดๆ จะหาค่าความถี่ตัดในจุดที่สัญญาณไฟฟ้าลดลง 3 dB

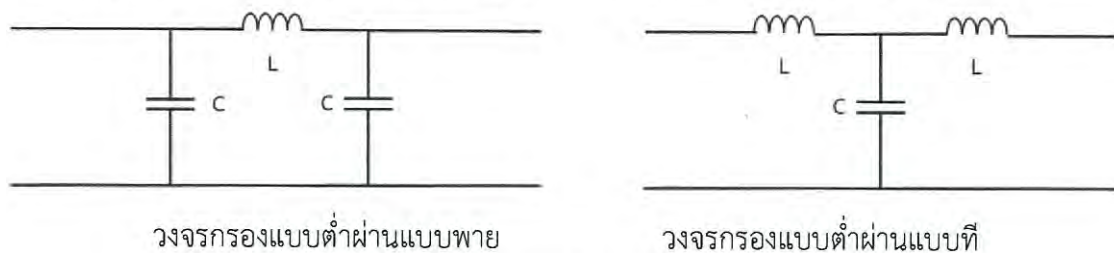
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.12)$$

โดย f_c คือ ความถี่ตัด มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

L คือ ความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

C คือ ค่าการเก็บประจุ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

นอกจากโครงสร้างของวงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) ตามรูปที่ 2.18 แล้วนั้น ยังมีวงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบอื่นอีก เช่น วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบที (T Type Low-Pass Filter) และ วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบพาย (Pi Type Low-Pass Filter) ตามรูปที่ 2.19 เป็นต้น



วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบพาย

วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบที

รูปที่ 2.19 วงจรกรองแบบต่ำผ่านแบบพายและแบบที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

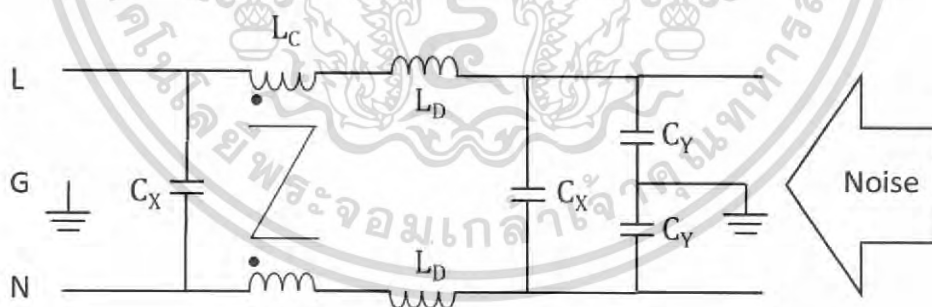
2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) นั้นมีลักษณะและคุณสมบัติจัดว่าเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน โดยเน้นในการกรองในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวงจรกรองแบบต่ำผ่านที่มีลักษณะพิเศษ กล่าวคือ จะต้องกรองสัญญาณทั้งสัญญาณโหมดผลรวมและสัญญาณโหมดผลต่าง ซึ่งวงจรกรองสัญญาณนี้มีหลายประเภท ได้แก่ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ (Passive EMI Filter) [26,34,36-38] วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแอคทีฟ (Active EMI Filter) [43-44] และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไฮบริด (Hybrid EMI Filter) [45] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ ซึ่งวงจรกรองสัญญาณทุกชนิดก่อนจะวางจำหน่ายเชิงพาณิชย์นั้นจะต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60939 [46]

2.4.1 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ คือ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.20 โดยมีอุปกรณ์ ได้แก่

- ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Differential Mode Capacitor: C_X)
- ตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Common Mode Capacitor: C_Y)
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke: L_D)
- ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (Common Mode Choke: CM Choke: L_C)



รูปที่ 2.20 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Differential mode capacitor: C_Y)

ตัวเก็บประจุโหมดผลต่างมีหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ซึ่งส่วนมากใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม (Metallized Polypropylene Film Capacitor) โดยตัวเก็บประจุโหมดผลต่างที่จะนำมาใช้นี้จะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60384-14 (Fixed capacitors for use in electronic equipment – Part 14: Sectional specification – Fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains) โดยมาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (Capacitor of Class X) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ X1 และ X2 ตามตารางที่ 2.9 [46]

ตารางที่ 2.9 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			
ตัวเก็บประจุ X2 อาจถูกแทนที่ได้โดย ตัวเก็บประจุ X1 หรือ Y2 หรือ Y1 ที่มี U_R เท่ากันหรือสูงกว่า			
<u>หมายเหตุ 1</u> The factor used for the reduction of U_p for capacitance values above $1.0 \mu\text{F}$ maintains $0.5 \times C_N U_p^2$ constant for these capacitance values; C_N is in F.			
<u>หมายเหตุ 2</u> Overvoltage categories in association with rated impulse voltage and rated mains voltage are found in IEC 60664-1.			

ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Common mode capacitor: C_Y)

ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมมีหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม ซึ่งส่วนมากใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่สูง 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) โดยมาตรฐานนี้ได้แบ่งระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (Capacitor of Class Y) เป็นระดับย่อย (Subclass) ได้แก่ Y1, Y2 และ Y4 ตามตารางที่ 2.10 [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 ระดับของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม (Capacitor of Class Y)

Subclass	Type of insulation bridged	Range of rated voltages	Peak impulse voltage U_P applied before endurance test
Y1	Double insulation or reinforced insulation	≤ 500 V	$U_P = 8,0$ kV
Y2	Basic insulation or supplementary insulation	≥ 150 V ≤ 500 V	When $C_N \leq 1,0$ μ F $U_P = 5$ kV When $C_N > 1,0$ μ F $U_P = \frac{5}{\sqrt{\frac{C_N}{10^{-6} \text{ F}}}}$ in kV
Y4	Basic insulation or supplementary insulation	< 150 V	$U_P = 2,5$ kV

ตัวเก็บประจุ Y2 อาจถูกแทนที่ได้โดย ตัวเก็บประจุ Y1 ที่มี U_R เท่ากันหรือสูงกว่า

หมายเหตุ 1 For definitions of basic, supplementary, double and reinforced insulation, see IEC 61140.

หมายเหตุ 2 The factor used for the reduction of U_P for capacitance values above $1,0$ μ F maintains $0,5 \times C_N U_P^2$ constant for these capacitance values; C_N is in F.

หมายเหตุ 3 Overvoltage categories in association with rated impulse voltage and rated mains voltage are found in IEC 60664-1.

ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟจำเป็นต้องตัดขาของตัวเก็บประจุให้สั้นที่สุด เนื่องจากขาของตัวเก็บประจุจะมีคุณลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Lead Inductance) ซึ่งส่งผลให้ค่าความเก็บประจุเสียไปในช่วงความถี่สูงได้เร็วขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้การเลือกค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลรวมซึ่งต่อลงสายดินนั้นจะต้องคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านลงสายดินเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายด้วย ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 380 กระแสต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 mA ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหาค่า C_Y สูงสุดได้ตามสมการที่ (2.13-2.15) [27]

$$C_Y = \frac{I_g}{U_m \times 2\pi f_m} \times 10^6 \quad (2.13)$$

$$C_Y = \frac{3.5}{220\sqrt{2} \times 2\pi \times 50} \times 10^6 \quad (2.14)$$

$$C_Y = 35.81 \text{ nF} \quad (2.15)$$

C_Y คือ ค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลรวม

I_g คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสายดิน

U_m คือ ค่าแรงดันของระบบที่ใช้งาน

f_m คือ ค่าความถี่ของระบบที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

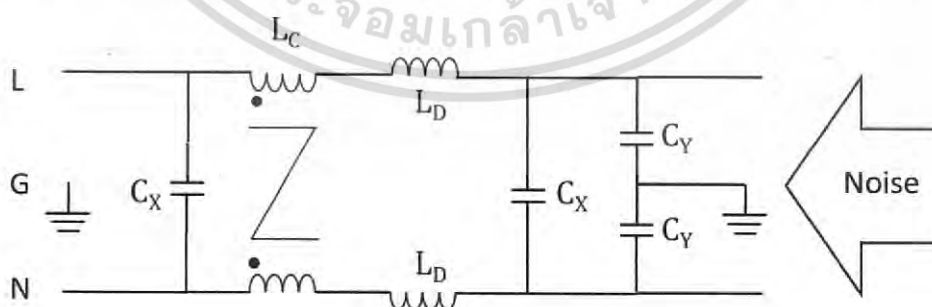
ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ ช่วยลดทอนขนาดของสัญญาณรบกวน โดยตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณโหมดผลต่าง เรียกว่า ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode Choke: DM Choke) และตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณโหมดผลร่วม เรียกว่า ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke) ซึ่งตัวเหนี่ยวนำที่มีหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมจะมีลักษณะการพันขดลวดไม่เหมือนทั่วไป ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Common Mode Choke: CM Choke)

ส่วนด้านวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำนิยมใช้เป็นแกนเฟอร์ไรต์ เนื่องจากมีค่าความซาบซึมได้ (Permeability) สูง ซึ่งทำให้ใช้จำนวนรอบของลวดทองแดงน้อยกว่าแกนชนิดอื่นนี้เป็นข้อดีของการใช้งานด้านความถี่สูง เนื่องจากระหว่างขดลวดแต่ละขดนั้นจะมีค่าตัวเก็บประจุเกิดขึ้น (Stray Capacitance) ดังนั้นการที่เลือกใช้แกนที่ทำจากวัสดุชนิดนี้จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในย่านความถี่สูงดีขึ้นนั่นเอง ในด้านรูปทรงนั้นส่วนใหญ่จะเลือกเป็นแกนทอรอยด์ เนื่องจากการพันแกนชนิดนี้มีการพันโดยลวดทองแดงด้านเข้าและด้านออกอยู่ฝั่งตรงข้ามกันต่างจากแกนชนิดอื่นที่ลวดด้านเข้าและออกกลับมาอยู่ใกล้กัน ซึ่งทำให้เกิดค่าความเก็บประจุระหว่างขดลวดนั่นเอง [26,34]

2.4.2 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

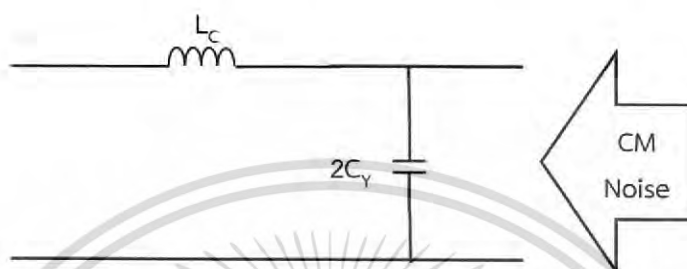


รูปที่ 2.22 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชนิด ได้แก่ สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

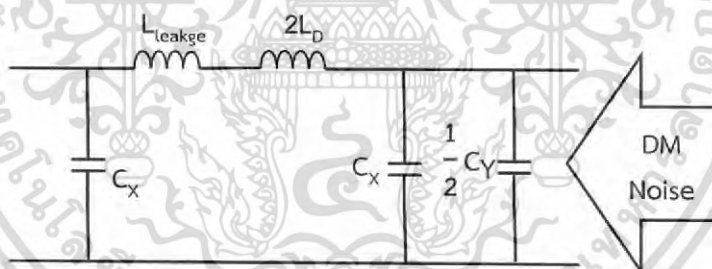
จากรูปวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟดังรูปที่ 2.22 นั้น ในวงจรหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนได้ทั้งสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างและสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมโดยวิเคราะห์การกรองสัญญาณทั้ง 2 โหมด

ในวงจรกรองนั้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณโหมดผลร่วม ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (L_C) ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (C_Y) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วมในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วม

ในวงจรกรองนั้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณโหมดผลต่าง ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) ตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (L_{leakge}) ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (C_Y) ตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_X) ดังวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วมในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลต่าง

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่จัดทำขึ้น โดยประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (L_C), ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D), ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วม (C_Y) และตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง (C_X) ตามวงจรในรูป 2.22 การคำนวณออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟจะออกแบบจากความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.16)

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM} C_{DM}}} \quad (2.16)$$

โดยที่ $F_{R,DM}$ คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

L_{DM} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวมของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

C_{DM} คือ ค่าความเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.23 C_{DM} และ L_{DM} มีค่าดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)

$$C_{DM} = 2C_x + \frac{C_Y}{2} \quad (2.17)$$

$$L_{DM} = 2L_D + L_{leakage} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.16) ถึง (2.18) จะสามารถคำนวณหาความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างได้ตามสมการที่ (2.19)

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{((2L_D) + L_{leakage}) \times (2C_x + \frac{C_Y}{2})}} \quad (2.19)$$

ถัดมานั้นคือค่าความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.20)

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{CM} C_{CM}}} \quad (2.20)$$

โดยที่ $f_{R,CM}$ คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม

L_{CM} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวมของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม

C_{CM} คือ ค่าความเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม

จากรูปที่ 2.32 L_{CM} และ C_{CM} มีค่าดังสมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22)

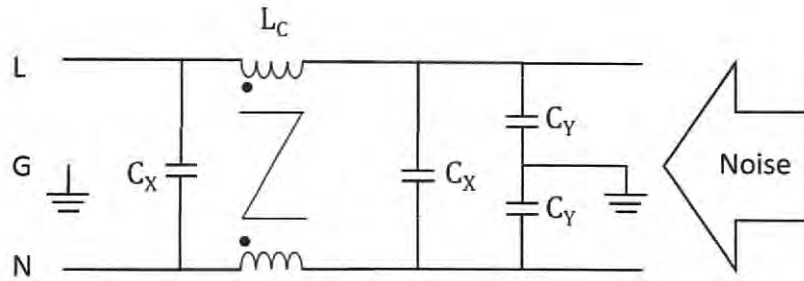
$$L_{CM} = L_C \quad (2.21)$$

$$C_{CM} = 2C_Y \quad (2.22)$$

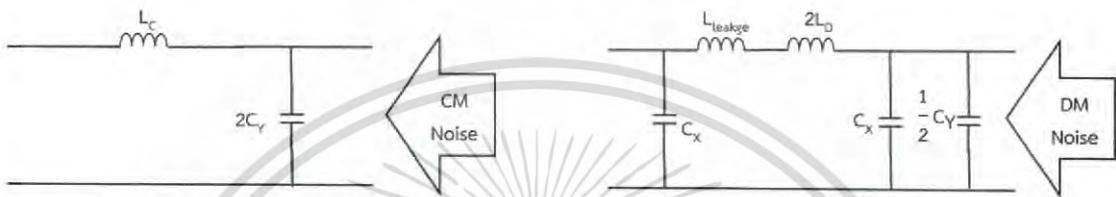
จากสมการที่ (2.20) ถึง (2.22) จะสามารถคำนวณหาความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมได้ตามสมการที่ 2.23

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{2C_Y L_C}} \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.24 นั้น ตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม ($L_{leakage}$) สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้ ในบางครั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟก็ไม่จำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (L_D) ได้ ดังรูปที่ 2.25 และมีวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ โดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (LD)



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง โดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (LD)

ซึ่งในกรณีที่ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง ($L_{DM} = 0$) สามารถคำนวณความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.24) และ (2.25)

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_C C_Y}} \tag{2.24}$$

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{leakage}) \times (2C_x + \frac{C_Y}{2})}} \tag{2.25}$$

2.4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) [37-38]

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละตัวมีคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาประกอบ รวมทั้งชนิดของอุปกรณ์และรูปแบบการประกอบด้วย ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss) เป็นค่าคุณลักษณะที่สามารถบอกได้ว่าการลดทอนสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ของวงจรกรองสัญญาณนั้นมีลักษณะเป็นเช่นไร

ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก เป็นค่าที่เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณและหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณหาได้จากสมการที่ (2.26) มีหน่วยเป็น เดซิเบล แต่เพื่อให้การวัดผลง่ายขึ้นจึงใช้ค่าแรงดันเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ (2.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{L,wo}}{P_{L,w}} \right) \quad (2.26)$$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}^2 / R_L}{V_{L,w}^2 / R_L} \right) \quad (2.27)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{L,wo}}{V_{L,w}} \right) \quad (2.28)$$

โดยที่ IL_{dB} คือ ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

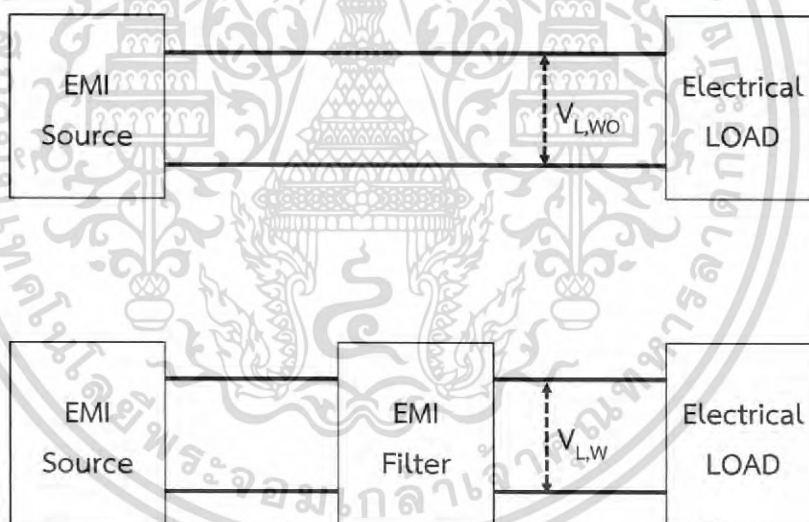
$P_{L,wo}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

$P_{L,w}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

$V_{L,wo}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

$V_{L,w}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ

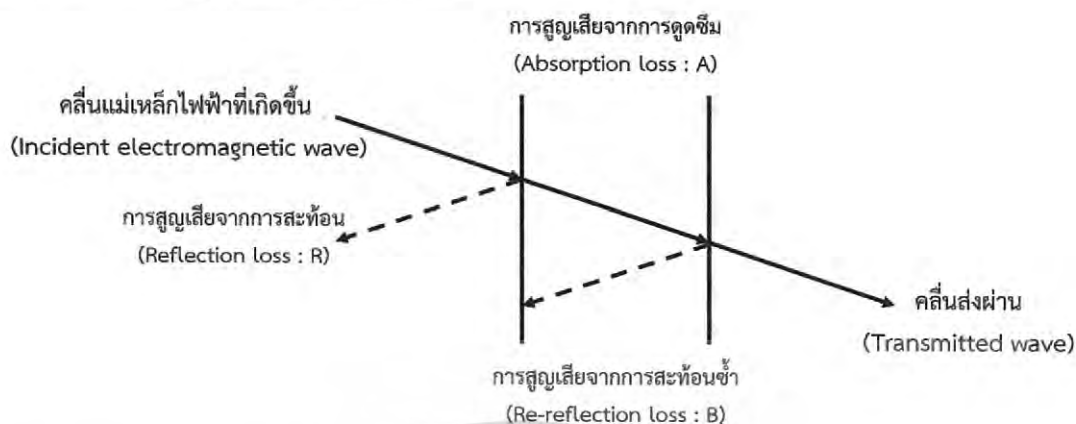
จากรูปที่ 2.27 เป็นตัวอย่างการวัดสัญญาณแรงดันก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ($V_{L,wo}$) และสัญญาณแรงดันหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ($V_{L,w}$) เพื่อทำการหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ (2.28)



รูปที่ 2.27 การวัดสัญญาณเพื่อหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ



รูปที่ 2.28 รูปแบบการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Transmission line model) [34]

การลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การสะท้อน (Reflection) การดูดซึม (Absorption) และการสะท้อนซ้ำในวัสดุปิดกั้น (Re-reflection) จากรูปที่ 2.28 แสดงรูปแบบการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Incident Electromagnetic Wave) กระทบกับวัสดุปิดกั้นแล้วมีการสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection Loss: R) ซึ่งคลื่นบางส่วนสามารถผ่านเข้าไปในวัสดุปิดกั้นได้ สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนจะถูกดูดซึมภายในวัสดุเรียกว่าการสูญเสียจากการดูดซึม (Absorption Loss: A) และในขณะที่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจะผ่านออกจากภายในของวัสดุจะเกิดการสะท้อนอีกครั้งและเกิดการสูญเสียจากการสะท้อนซ้ำ (Re-reflection Loss : B) โดยสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านจากวัสดุปิดกั้นออกมาจะเรียกว่าคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ประสิทธิภาพของการชิลด์ (Shielding Effectiveness) ของวัสดุปิดกั้นหาได้จากสมการที่ (2.29) [34]

$$SE(\text{dB}) = R(\text{dB}) + A(\text{dB}) + B(\text{dB}) \quad (2.29)$$

ค่าการสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection Loss: R) หาได้จากสมการที่ (2.30) ถึง (2.32)

$$\text{คลื่นระนาบ (Plane wave)} \quad R = 168 - 10\text{Log}_{10} \left(\left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \right) \times F \right) \quad (2.30)$$

$$\text{สนามไฟฟ้า (Electric Field)} \quad R_E = 322 - 10\text{Log}_{10} \left(\left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \right) \times F^3 \times r^2 \right) \quad (2.31)$$

$$\text{สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)} \quad R_H = 14.6 - 10\text{Log}_{10} \left(\left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \right) \times F^{-1} \times r^2 \right) \quad (2.32)$$

โดยที่ μ_r คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability: H/m)

σ_r คือ สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)

F คือ ค่าความถี่ของสัญญาณ (Frequency: Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสูญเสียจากการดูดซึม (Absorption Loss: A) หาได้จากสมการที่ (2.33)

$$A = 8.69 \times \frac{t}{\delta} \quad (2.33)$$

ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนซ้ำ (Re-reflection Loss: B) หาได้จากสมการที่ 2.34

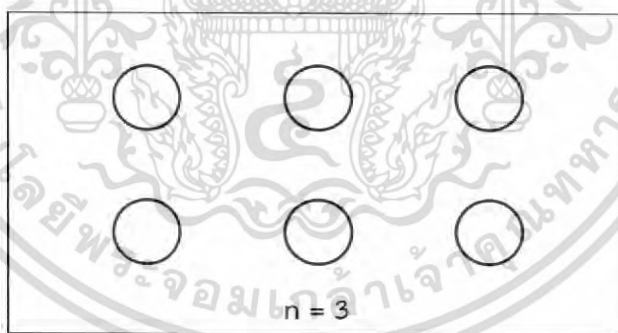
$$B = 20 \text{Log}_{10} \left(1 - e^{-2\sqrt{\frac{t}{\delta}}} \right) \quad (2.34)$$

โดยค่าความลึกผิว (Skin Depth: δ) หาได้จากสมการที่ 2.35 และ t คือ ค่าความหนาของวัสดุ

$$\delta = (\pi \times F \times \mu \times \sigma)^{-0.5} \quad (2.35)$$

จากที่ได้กล่าวข้างต้นมาทั้งหมดนั้น เป็นการคำนวณหาการลดทอนของวัสดุที่เป็นแผ่นทึบ แต่ในความเป็นจริงนั้นการใช้งานบางประเภทจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีรูเพื่อประโยชน์ในการระบายความร้อน ในกรณีนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนลดลงเช่นกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนรูของวัสดุนั้น ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.36) ในกรณีที่จำนวนรูแนวตั้งมี 2 รู และจำนวนรูแนวนอนมี 3 รู ตามรูปที่ 2.29 จำนวนรูที่นำมาคำนวณคือ 3 รู เป็นต้น [36-38]

$$s = -10 \log(n) \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างวัสดุซิลด์ที่มีรูระบายอากาศ

2.6 องค์ประกอบแฝง

ตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติร่วมกัน กล่าวคือ ตัวต้านทานก็ไม่ได้มีเพียงแต่ค่าความต้านทานเท่านั้น แต่หากจะมีค่าความเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำด้วย ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็เช่นกันที่ความถี่สูงคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งเคยใช้งานในความถี่ต่ำ ทั้งหมดล้วนเกิดขึ้นจากองค์ประกอบแฝงที่อยู่ในอุปกรณ์นั้น ส่วนที่ทำให้เกิดองค์ประกอบแฝงได้ชัดเจน เช่น ขาของอุปกรณ์ซึ่งมีความต้านทานอยู่ และเมื่อสัญญาณความถี่สูงไหลผ่านจะมีคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

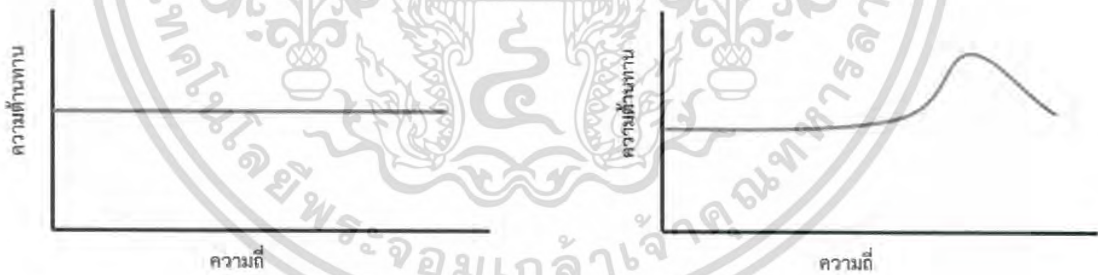
ตัวต้านทานเมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance: L_p) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) ขึ้น ดังรูปที่ 2.30 โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝงนี้เกิดจากการขางของตัวต้านทานจะส่งผลเป็นตัวเหนี่ยวนำ และเกิดการถ่ายเทพลังงานที่สูญเสียที่ขาสองของตัวต้านทานเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ ยิ่งขางของตัวต้านทานยาว ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำแฝงและค่าความจุไฟฟ้าแฝงก็ยิ่งมากตามไปด้วย ในรูปที่ 2.31 นั้น แสดงขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่างๆ ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.37) และตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.38) และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวต้านทานในทางอุดมคติเปรียบเทียบกับกรณีมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติแล้วจะได้ดังรูปที่ 2.31

ตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = R$ (2.37)

ตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R + j2\pi fL_s} + j2\pi fC_p}$ (2.38)



รูปที่ 2.30 ตัวต้านทานไฟฟ้าในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า

2.6.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

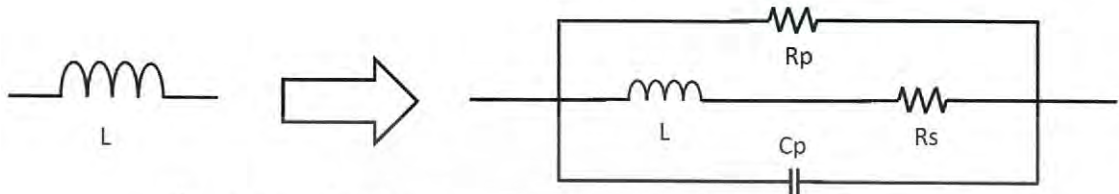
เมื่อนำตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาใช้ที่ความถี่สูงองค์ประกอบแฝงจะเริ่มส่งผลมากขึ้น ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) โดยเกิดจากช่องว่างระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ จึงทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงมีเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำมากมายเพื่อลดองค์ประกอบแฝง โดยวงจรสมมูลจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.32 และใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.33 แสดงอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่างๆ ตามสมการที่ (2.39) และสมการที่ (2.40)

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL$ (2.39)

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_s + j2\pi fL} + \frac{1}{R_p} + j2\pi fC_p}$ (2.40)



รูปที่ 2.32 ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



ก. ในอุดมคติ

ข. เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

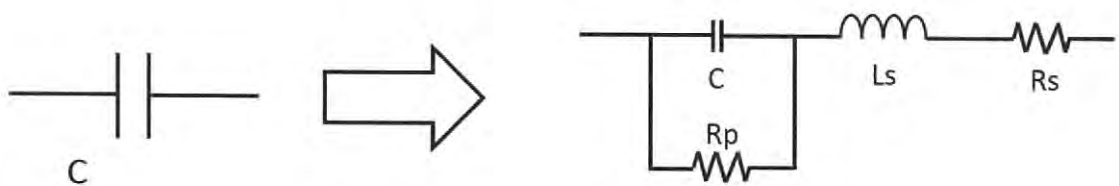
รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.6.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

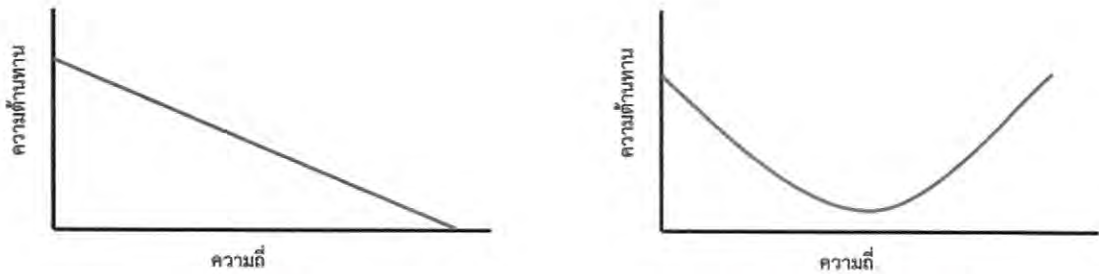
ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีลักษณะเป็นลวดเส้นตรงซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) และมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance: L_p) เมื่อความถี่สูงขึ้น โดยมีวงจรสมมูลเมื่อมีองค์ประกอบแฝงดังรูปที่ 2.34 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.35 ซึ่งเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่างๆ ตามสมการที่ (2.41) และสมการที่ (2.42)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC}$ (2.41)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง $Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC + \frac{1}{R_p}} + j2\pi fL_s + R_s$ (2.42)



รูปที่ 2.34 ตัวเก็บประจุในทางอุดมคติและเมื่อมีองค์ประกอบแฝงในทางปฏิบัติ



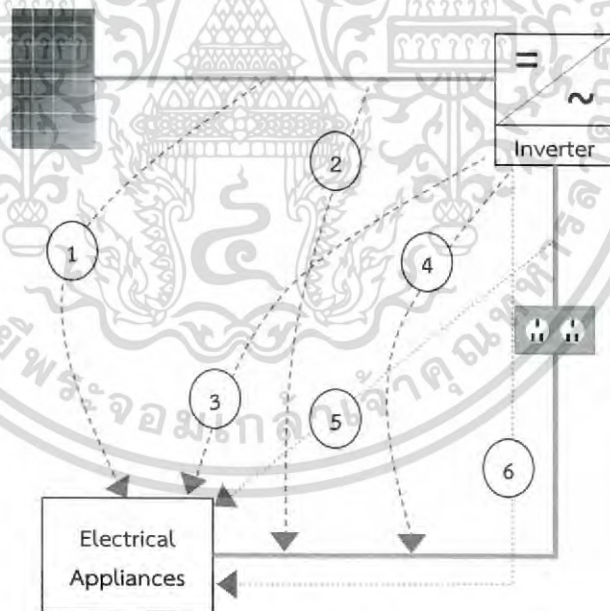
ก. ในอุดมคติ

ข. เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ

2.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันนิยมนำมาใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในหัวข้อนี้จึงยกตัวอย่างการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยใช้หลักการสวิตช์ ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นและส่งผลถึงระบบที่เชื่อมต่อด้วย จากรูปที่ 2.36 แสดงรูปแบบที่สามารถเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และแสดงสรุปการแก้ไขตามรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.36 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.36 แสดงรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าไว้ 6 รูปแบบ ซึ่งสามารถจัดประเภทการแผ่กระจายได้ดังนี้

เส้นทางแผ่กระจายที่ 1 Indirect-radiated Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 1 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI)

ที่เกิดจากด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์เดินมายังสายตัวนำแล้วเกิดการแผ่กระจายทางอากาศ

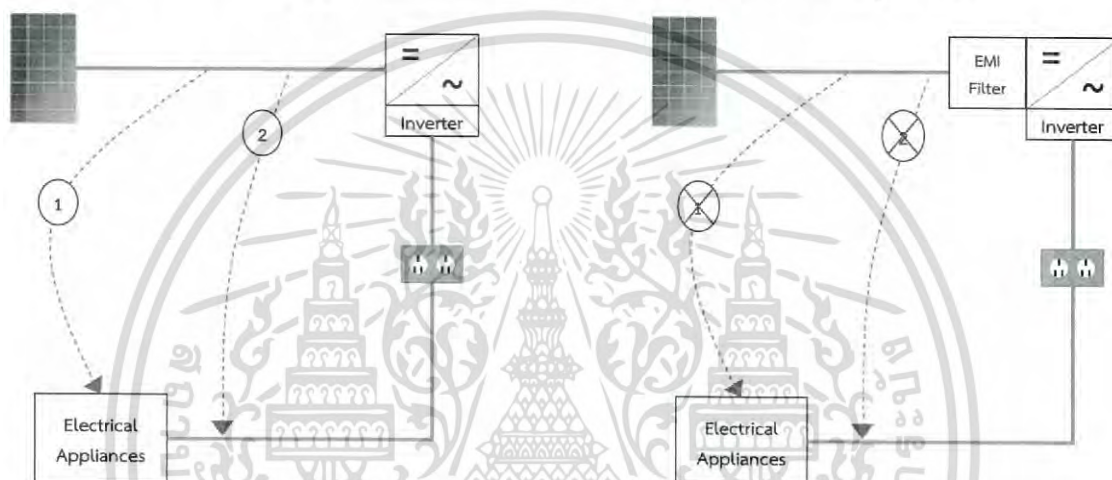
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณกุญชร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Radiated EMI) จากนั้นเกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.37

เส้นทางแผ่กระจายที่ 2 Semi-conducted Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 2 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่เกิดจากด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์เดินมายังสายตัวนำแล้วเกิดการแผ่กระจายทางอากาศ (Radiated EMI) จากนั้นสัญญาณรบกวนดังกล่าวเข้ามาอยู่ในสายตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ (Conducted EMI) นั้นเกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.37



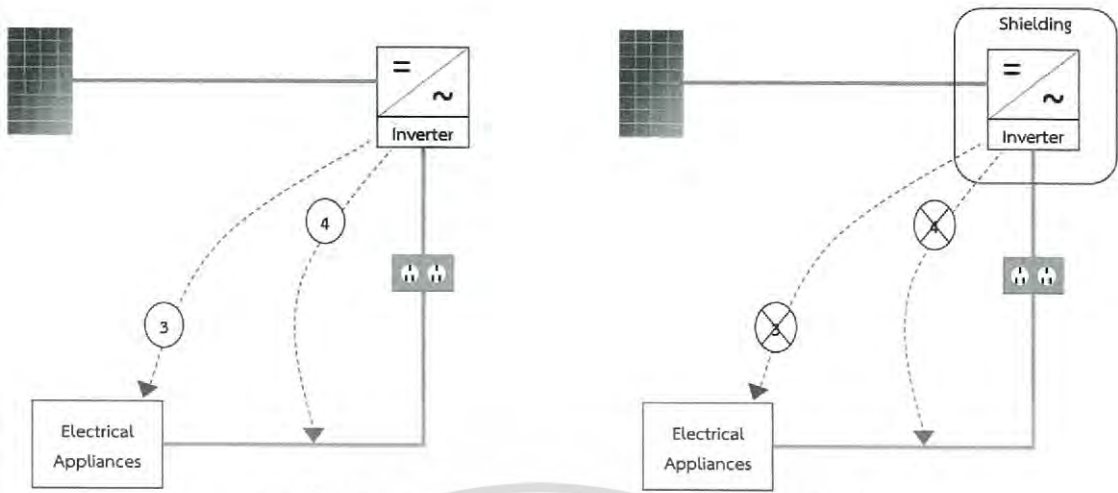
รูปที่ 2.37 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

เส้นทางแผ่กระจายที่ 3 Radiated Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 3 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แผ่กระจายทางอากาศ (Radiated EMI) แล้วเกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศตามรูปที่ 2.38

เส้นทางแผ่กระจายที่ 4 Indirect-conducted Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 4 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แผ่กระจายทางอากาศ (Radiated EMI) จากนั้นสัญญาณรบกวนดังกล่าวเข้ามาอยู่ในสายตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ (Conducted EMI) นั้น เกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้การชิลด์แม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศตามรูปที่ 2.38



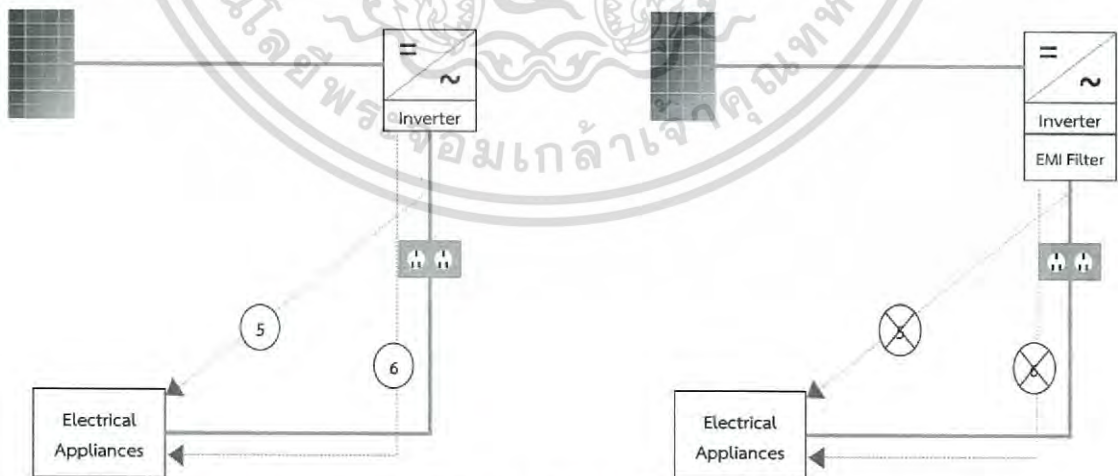
รูปที่ 2.38 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและการชิลด์

เส้นทางแผ่กระจายที่ 5 Indirect-radiated Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 5 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่เกิดจากด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เดินทางมายังสายตัวนำแล้วเกิดการแผ่กระจายทางอากาศ (Radiated EMI) จากนั้นเกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.39

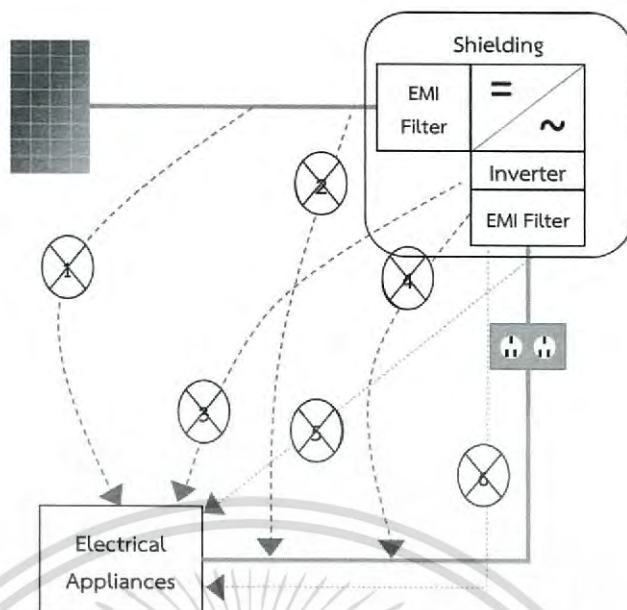
เส้นทางแผ่กระจายที่ 6 Conducted Emission

เส้นทางแผ่กระจายที่ 6 เกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) ที่เกิดจากด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เดินทางผ่านสายตัวนำที่เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับเครื่องใช้ไฟฟ้าจากนั้นเกิดการรบกวนที่เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 การป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

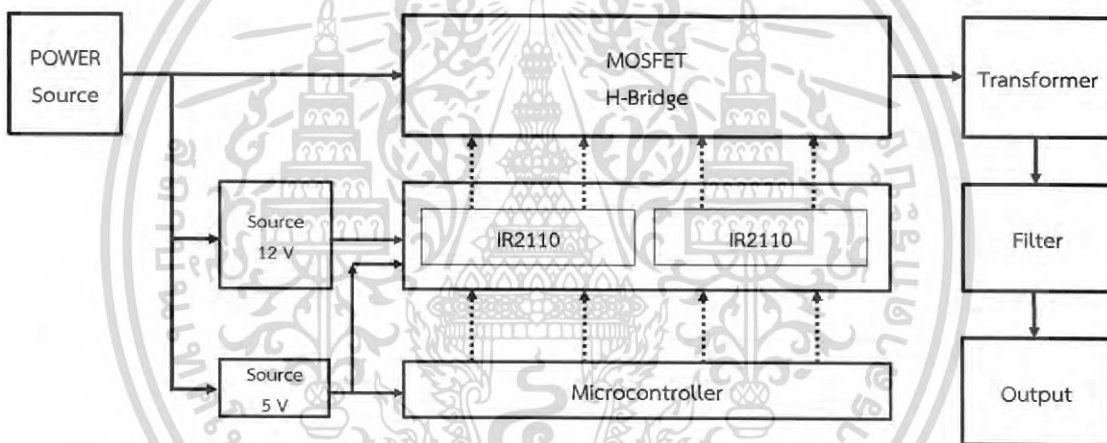
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบ ฟูลบริดจ์ 1 เฟส

3.1 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีส่วนประกอบหลักตามรูปที่ 3.1 ได้แก่ ส่วนแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะใช้มอสเฟตกำลัง ส่วนประมวลผลสั่งการควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนวงจรขับเกททำหน้าที่ขยายสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปควบคุมมอสเฟต ส่วนไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ และแรงดัน 12 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายให้ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขับเกท ส่วนขยายแรงดันจะใช้หม้อแปลงและใช้อุปกรณ์พาสซีฟกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์เพื่อใช้สัญญาณขาออกเป็นรูปคลื่นไซน์

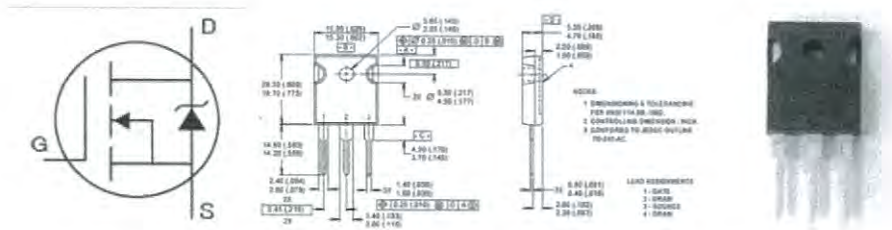


รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของอินเวอร์เตอร์

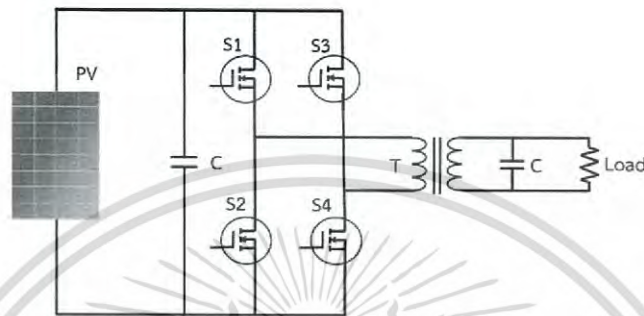
อุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP3710PbF [48] ซึ่งมีไดโอดภายในหรือที่เรียกว่าบอดีไดโอด มีสัญลักษณ์และโครงสร้างดังรูปที่ 3.2 โดยการใช้งานจะใช้จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดฟูลบริดจ์ตามรูปที่ 3.3 ซึ่งมีลักษณะคล้ายตัวเฮช (H) จึงสามารถเรียกว่า เฮช-บริดจ์ (H-Bridge) ได้เช่นกัน ซึ่งลักษณะการทำงานของวงจรนี้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.4.2



รูปที่ 3.2 มอสเฟตกำลัง IRFP3710PbF [44]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ทางกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

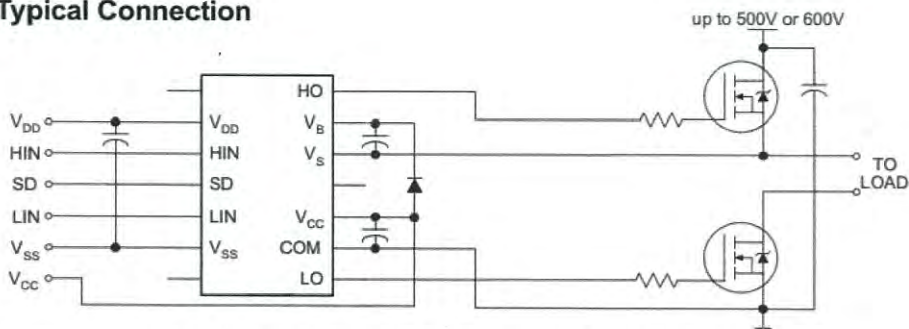
วงจรถับเกต (Gate Driver)

วงจรถับเกตจะต้องขยายสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้มอสเฟตทำงานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นรูปแบบวงจรรวม (C Integrated – Circuit: IC) โดยใช้ไอซีเบอร์ IR2110 [49] ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งไอซีนี้สามารถขับอุปกรณ์สวิตช์ได้ด้วยแรงดันสูงสุด 20 โวลต์ กระแสสูงสุด 2 แอมป์ นอกจากนี้สามารถควบคุมมอดเฟสได้พร้อมกัน 2 ตัว โดยควบคุมมอดเฟสด้านบนและด้านล่างในกึ่งเดียวกัน (High and Low Side Driver) ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสที่ใช้งานมีมอสเฟต 4 ตัว ในวงจรจึงประกอบด้วยไอซี IR2110 จำนวน 2 ตัว



รูปที่ 3.4 ไอซีขับเกตมอสเฟต IR2110

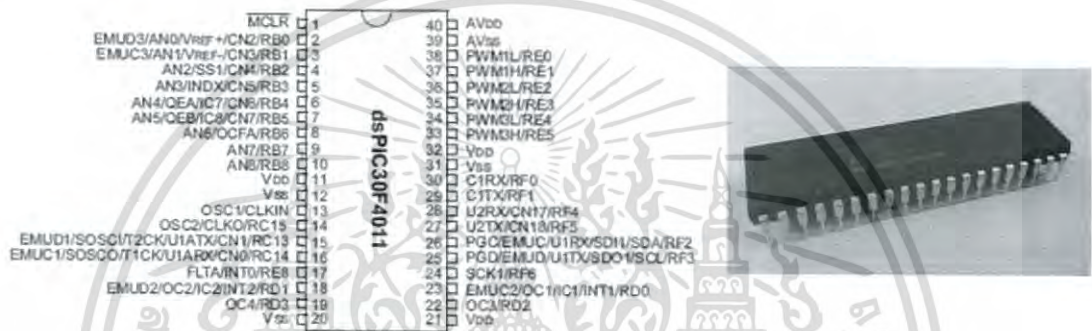
Typical Connection



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.5 วงจรถับเกตมอสเฟตโดยใช้ไอซี IR2110 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการควบคุมการทำงานของวงจร เป็นหน่วยประมวลผลและส่งออกคำสั่งให้มอเตอร์สวิตช์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 [450] ซึ่งมีขนาด 16 บิต และสามารถสร้างสัญญาณพัลส์มอดูเลต (Pulse Width Modulation: PWM) ได้สูงสุด 6 ช่องทาง ได้แก่ PWM1L, PWM1H, PWM2L, PWM2H, PWM3L และ PWM3H ตามรูปที่ 3.6 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส จึงใช้งานสัญญาณ PWM 4 ช่องทาง เพื่อควบคุมมอเตอร์ 4 ตัว ในส่วนการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมได้โดยใช้ C Compiler เช่น MPLAB C30



รูปที่ 3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F4011

หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ยกระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 24 โวลต์ เป็นแรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ตัวนี้สามารถแปลงไฟฟ้าได้ 300 วัตต์ รวมทั้งยังมีส่วนช่วยในการกรองสัญญาณพหุที่ใช้ในการมอดูเลตเพื่อใช้ในการสวิตซ์ซึ่งออกได้อีกด้วย การกรองสัญญาณพหุออกจะใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานด้านแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เปรียบเสมือนเป็นวงจรกรองสัญญาณต่ำผ่าน โดยค่าตัวเก็บประจุที่เลือกใช้จะทำการทดสอบหาค่าความเก็บประจุขนาดเล็กที่สุดที่ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีค่า THD_V มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 ของความถี่หลักมูล

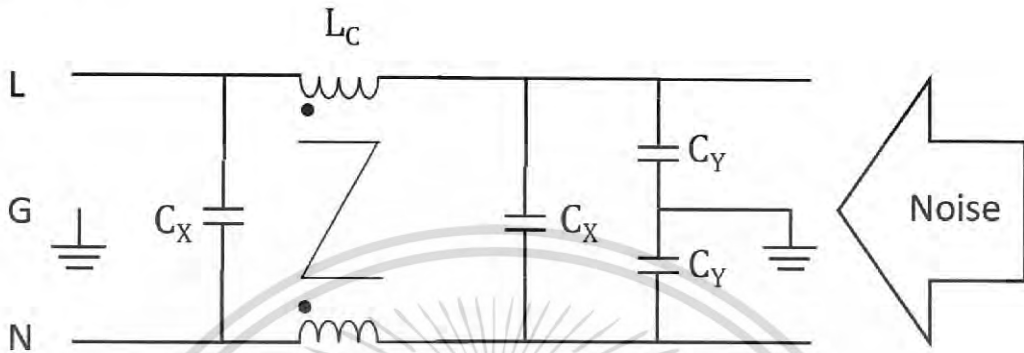
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- พิกัดแรงดันกระแสตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ 24 โวลต์
- พิกัดแรงดันกระแสสลับด้านออกเข้าของอินเวอร์เตอร์ 220 โวลต์
- พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์
- ความถี่สัญญาณแรงดันกระแสสลับด้านออกเข้าของอินเวอร์เตอร์ 50 เฮิรตซ์
- ความถี่ในการสวิตซ์ 20000 เฮิรตซ์
- ค่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (mf) $20000/50 = 400$
- ค่าอัตราการมอดูเลตด้านแรงดัน (ma) ปรับตามภาระทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้แรงดัน 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นอุปกรณ์หลักในการศึกษาและวิจัยการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการทดลองมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน เนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายตัวนำนั้นประกอบด้วยสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง วงจรกรองสัญญาณจึงต้องทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณได้ทั้งสองโหมด ขั้นตอนการออกแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 โดยเริ่มต้นจากการวัดสัญญาณรบกวนรวมทั้งที่เกิดขึ้นทั้งหมดเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งหากสัญญาณผ่านมาตรฐานแล้วก็ไม่จำเป็นต้องติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอีก แต่หากยังไม่ผ่านมาตรฐานก็จำเป็นต้องเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบถัดไปคือ การวัดค่าสัญญาณรบกวนแบบแยกโหมดกันทั้งโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง จากนั้นคำนวณหาค่าความถี่คutoffที่ต้องการในการลดทอนสัญญาณรบกวนแต่ละโหมด ในส่วนการเลือกตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมโดยการพิจารณาจากมาตรฐาน IEC 380 กระแสต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 มิลลิแอมป์ ดังนั้น ตามบทที่ 2 ในระบบแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมที่มีค่าน้อยกว่า 35.81 ไมโครฟารัด เมื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลร่วมได้แล้วจึงออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม การออกแบบในส่วนของการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมก็เสร็จสิ้นเมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้ว ถัดมาในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างจะเริ่มจากตัวเหนี่ยวนำก่อนเนื่องจากวงจรกรองสัญญาณที่เลือกใช้ได้ออกแบบให้ใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลจากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมให้ทำหน้าที่แทนตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงต้องทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลจากตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม หลังจากได้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลแล้วจึงทำการเลือกค่าตัวเก็บประจุโหมดผลต่างจากความถี่คutoffที่เลือกไว้ และในท้ายที่สุดเพื่อให้ตัวเก็บประจุโหมดผลต่างคายประจุได้และทำงานได้ดีขึ้นวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เป็นข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบางตัวจึงได้ติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง โดยค่าตัวต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$R = \frac{1}{2.21C} \tag{3.1}$$

โดย R คือ ค่าของตัวต้านทานที่ติดตั้งขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง

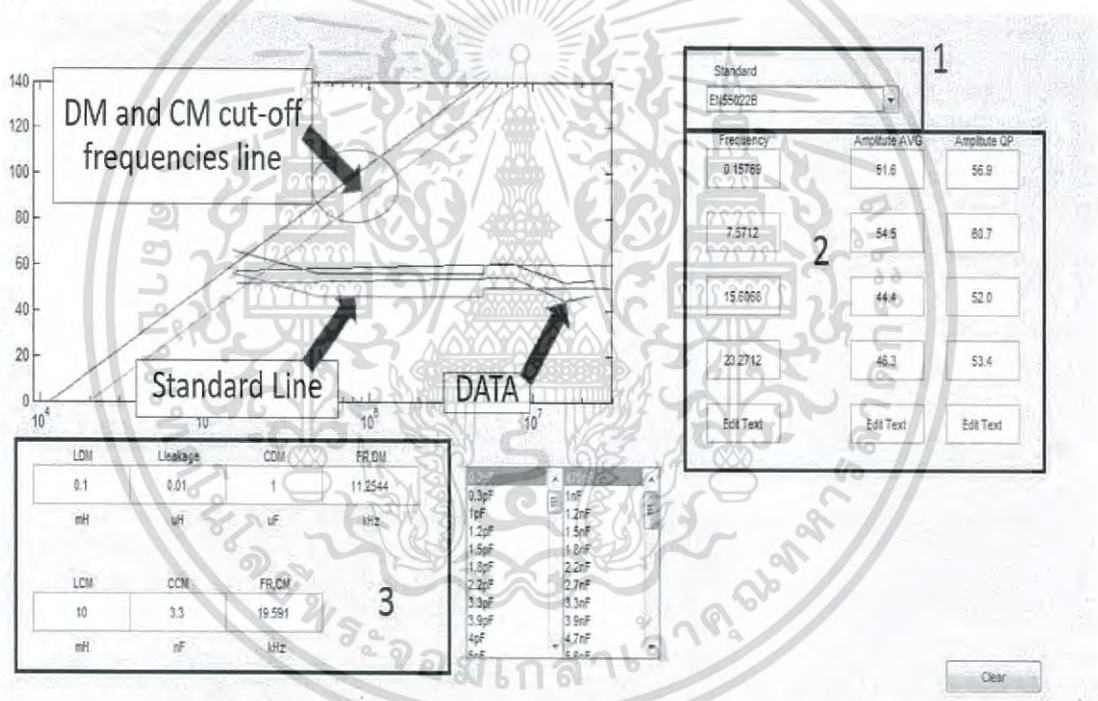
C คือ ค่าของตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เพื่อให้การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานขึ้นสามารถออกแบบ GUI ในโปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการออกแบบตามรูปที่ 3.9 และผังการทำงานตามรูป 3.10 ในการออกแบบโปรแกรมจะช่วยให้หาค่าความถี่ตัดได้ง่ายขึ้น เริ่มจากการนำค่าสัญญาณรบกวนเข้าในโปรแกรมซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลสัญญาณที่ดึงค่ามาจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมหรือในบางครั้งไม่สามารถดึงค่าสัญญาณรบกวนออกมาได้โดยตรง มีข้อมูลเฉพาะค่าสเปกตรัมที่เกินมาตรฐานก็สามารถนำข้อมูลบางจุดมาใส่ในโปรแกรมตามรูปที่ 3.9 ส่วนที่ 2 ได้เพื่อสร้างกราฟได้ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกเส้นมาตรฐานเพื่อประกอบการตัดสินใจได้ตามรูปที่ 3.9 ส่วนที่ 1 ถัดมาในส่วนการออกแบบตัวกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟจะทำการใส่ค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำตามรูปที่ 3.9 ส่วนที่ 3 จากนั้นโปรแกรมจะแสดงค่าความถี่ตัดและสร้างกราฟการลดทอนตามความถี่ตัดนั้นขึ้นมา ซึ่งหากการลดทอนไม่มากพอก็สามารถเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำได้และเพื่อความถูกต้องของการสร้างจริงในโปรแกรมได้ใส่ค่าตัวเก็บประจุที่มีขายจริงตามท้องตลาดไว้เพื่อให้เลือกใช้ในการออกแบบไว้



รูปที่ 3.9 GUI ที่ช่วยในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผังการทำงานของโปรแกรมช่วยในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักที่ถูกใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ดังนั้นเพื่อการศึกษาการลดทอนได้ผลลัพธ์และสามารถนำผลลัพธ์นั้นมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณจำนวน 4 แบบ โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ได้แก่ ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมตผลรวม ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมตผลต่าง ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ประมาณที่ได้จากตัวเหนี่ยวนำโหมตผลรวม ค่าตัวเก็บประจุโหมตผลรวมและโหมตผลต่าง ค่าตัวต้านทาน และค่าความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่คำนวณตามหัวข้อ 2.7.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ

	L_{CM} mH	$L_{DM}/leakege$ uH	C_x uF	C_y nF	R k.ohm	FCM	FDM
1	5.49	42.54	2.2	22	-	10240	11619
2	11.76	86.15	1	10	-	10338	12110
3	8.84	71.59	0.47 Class X2	4.7 Class X1/Y1	680	17459	19377
4	21.55	93.47	0.22 Class X2	2.2 Class X1/Y1	1000	16344	24787

จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบ ที่จัดทำขึ้นเพื่อทำการทดลอง โดยแบบที่ 1 และ 2 คุณสมบัติที่คล้ายกันคือมีค่าความถี่ตัดทั้งโหมตผลรวมและโหมตต่างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 2 แบบใกล้เคียงกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกัน คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณในแบบที่ 1 ได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กค่าแบบที่ 2 แต่เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้งแบบที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน

ในส่วนวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแบบที่ 3 และแบบที่ 4 นั้นถูกออกแบบภายหลังจากการนำวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2 ไปทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนในห้องทดสอบแล้ว ซึ่งปรากฏว่ามีบางช่วงความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไม่ผ่านมาตรฐานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 จึงถูกออกแบบขึ้นโดยใช้ค่าความเก็บประจุเล็กลงเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านลงดินมีค่าน้อยลงทำให้ปลอดภัยมากขึ้น ในส่วนตัวเก็บประจุโหมตผลต่างใช้ตัวเก็บประจุคลาส X2 ตัวเก็บประจุโหมตผลรวมใช้ตัวเก็บประจุคลาส X1/Y1 ตามมาตรฐานไออีซี 60384-14 นอกจากนี้ยังติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมตผลต่าง เพื่อให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุได้ดีขึ้น

3.3 การออกแบบตัวขีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

การออกแบบตัวขีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศเพื่อใช้ในการขีลด์นั้น จะต้องหาค่าการสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection Loss: R) ค่าการสูญเสียจากการดูดซึม (Absorption Loss: A) และค่าการสูญเสียจากการสะท้อนซ้ำ (Re-reflection Loss: B) ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกใช้วัสดุที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด ได้แก่ อลูมิเนียม และสแตนเลส ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวัสดุและค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณตามหัวข้อที่ 2.8 ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ในการทดลองการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะทดสอบหลายกรณี เพื่อเป็นการศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ และวัสดุโลหะเป็นอุปกรณ์สำคัญของการทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะแสดงรูปแบบการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบในระบบปิดไว้ในบทถัดไป

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าการลดทอนสัญญาณของวัสดุอลูมิเนียมและสแตนเลส

วัสดุ/ค่าพารามิเตอร์	อลูมิเนียม			สแตนเลส		
	30MHz	100MHz	1GHz	30MHz	100MHz	1GHz
Relative Permeability	1			1.4		
Relative Conductivity	0.61			0.025		
ความหนาวัสดุ	0.7 มม.			0.4 มม.		
ความลึกผิว	0.1319 มม.	0.0722 มม.	0.0228 มม.	0.5506 มม.	0.3016 มม.	0.0954 มม.
การสูญเสียจากการสะท้อน จากคลื่นระนาบ : R	91.08 dB	85.85 dB	75.85 dB	75.75	70.52	60.52
การสูญเสียจากการสะท้อน จากสนามไฟฟ้า : RE	121.56 dB	105.87 dB	75.87 dB	106.23	90.54	60.54
การสูญเสียจากการสะท้อน จากสนามแม่เหล็ก : RH	113.24 dB	118.47 dB	128.47 dB	97.91	103.14	113.14
การสูญเสียจากการดูดซึม : A	46.12 dB	84.25 dB	266.79 dB	6.31	11.53	36.44
การสูญเสียจากการสะท้อน ซ้ำ : B	0	0	0	-0.82	-0.34	-0.026

*กำหนดให้แหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ห่างตัวขีลด์ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

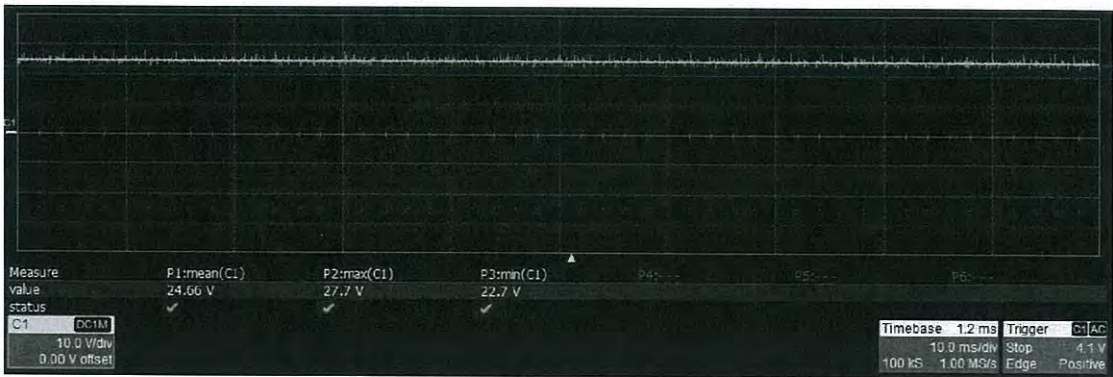
4.1 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.1 ในบทที่ 3 นั้น อินเวอร์เตอร์ถูกออกแบบให้มอสเฟตทั้ง 4 ตัวรับสัญญาณควบคุมการทำงานจากวงจรขับเกทของไอซี IR2110 ซึ่งได้รับสัญญาณควบคุมการทำงานมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั้ง 4 สัญญาณนี้มีลักษณะแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 จากรูปประกอบไปด้วยสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ จำนวน 4 สัญญาณ ได้แก่ PWM1H, PWM1L, PWM2H และ PWM2L ตามลำดับจากบนลงล่างเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.3 แล้วจะเห็นว่าสัญญาณ PWM1H, PWM1L, PWM2H และ PWM2L นั้นควบคุมมอสเฟต S1, S2, S3 และ S4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สัญญาณควบคุมมอสเฟตจากไมโครคอนโทรลเลอร์

อินเวอร์เตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบแรงดันกระแสตรง 24 โวลต์ ดังนั้นในการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในห้องทดสอบจึงใช้แบตเตอรี่สร้างแรงดัน 24 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันขาเข้าขณะที่ยินเวอร์เตอร์ทำงานจากการใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ประมาณ 24 โวลต์ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสัญญาณนี้จะถูกวัดในห้องทดสอบเพื่อหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

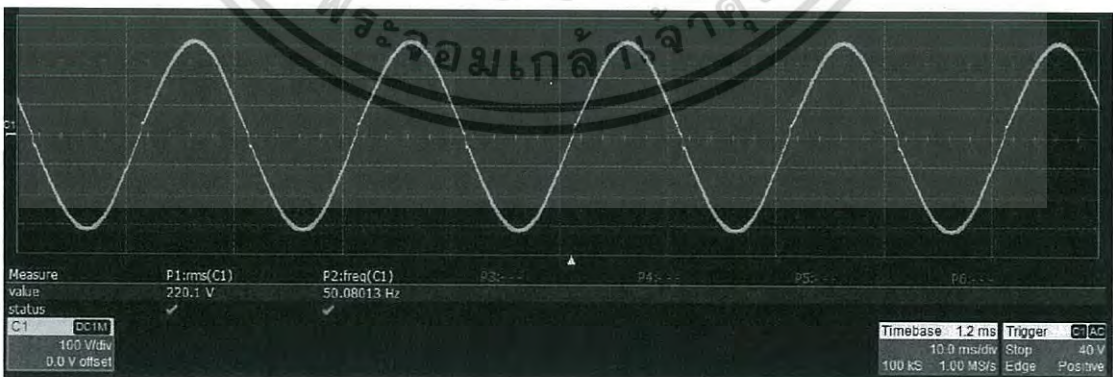


รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.3 สัญญาณจะถูกวัดจากด้านขาออกของมอสเฟตทั้ง 4 ตัว ก่อนเข้าหม้อแปลงโดยสัญญาณที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นพีคดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation : PWM) ขึ้นลงจาก 0 โวลต์ ถึง 24 โวลต์ และจาก 0 โวลต์ ถึง -24 โวลต์ ซึ่งเมื่อวัดความถี่ของสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม จะได้ประมาณ 50 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.3 โดยในสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วยสัญญาณไซน์ความถี่ 50 เฮิรตซ์ และสัญญาณพาหะ (Carrier Signals) ตามความถี่สวิตชิงของมอสเฟต



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ก่อนกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์

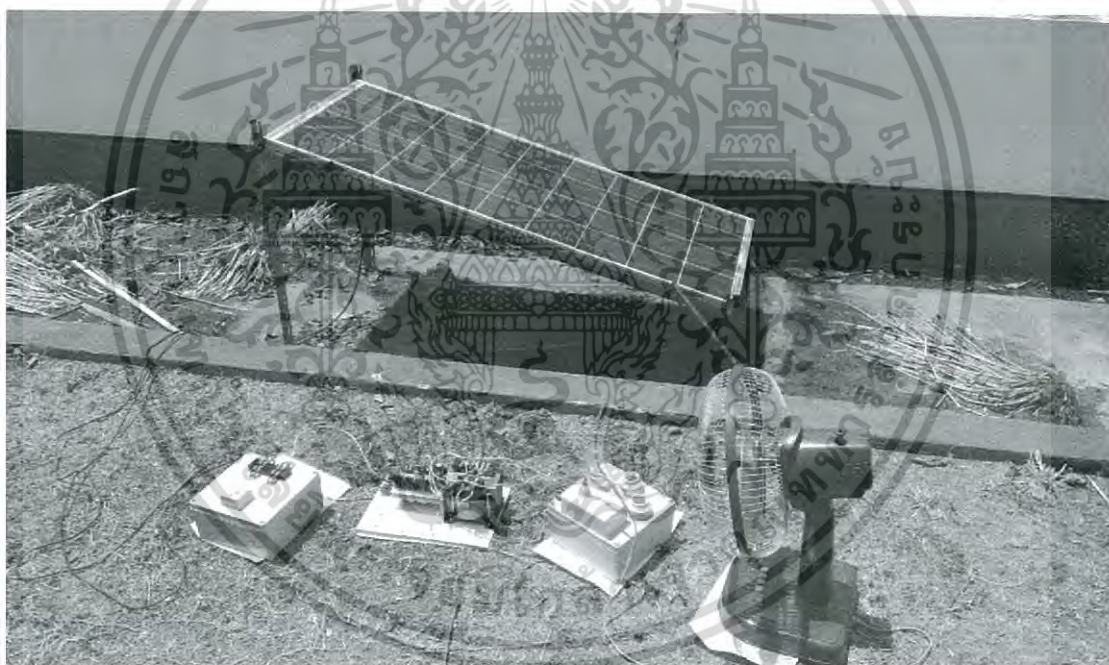


รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลังกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนถัดมาตามรูปที่ 4.4 คือสัญญาณไซน์แรงดันค่าเฉลี่ยกำลังสอง 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งเกิดจากการยกระดับแรงดันของสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มในรูปที่ 4.3 โดยใช้หม้อแปลงและวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้า เพื่อกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์ออกไปให้เหลือไว้เพียงสัญญาณความถี่มูลฐานที่ 50 เฮิรตซ์ เพื่อใช้งานต่อไป ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปใช้ในระบบไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.5 ต่อไป โดยพิกัดของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 4.5 สรุปได้ดังนี้

- พิกัดแรงดันกระแสตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ 24 โวลต์
- พิกัดแรงดันกระแสสลับด้านออกเข้าของอินเวอร์เตอร์ 220 โวลต์
- พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 300 วัตต์
- ความถี่สัญญาณแรงดันกระแสสลับด้านออกเข้าของอินเวอร์เตอร์ 50 เฮิรตซ์
- ความถี่ในการสวิตชิง 20000 เฮิรตซ์
- ค่าอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (mf) $20000/50 = 400$

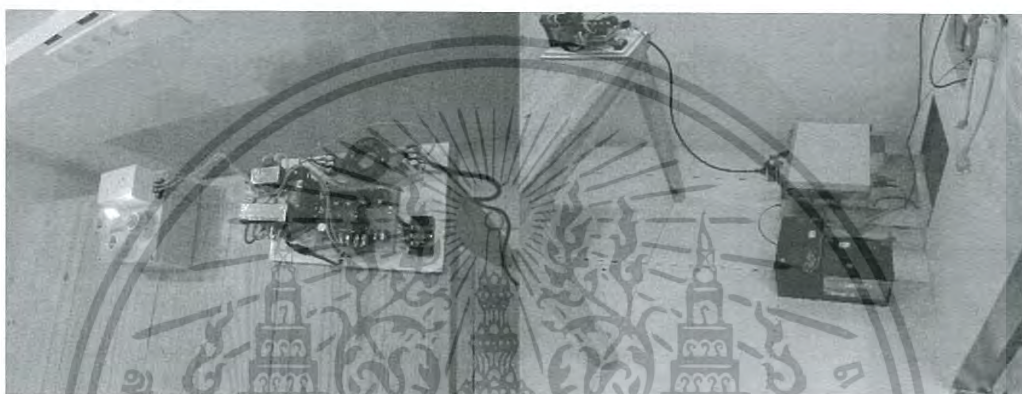


รูปที่ 4.5 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นในประเทศไทยใช้ระบบแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ไม่เพียงเท่านั้นยังมีข้อกำหนดอื่นอีก เช่น ฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจากรูปที่ 4.6 แสดงค่าสัญญาณไซน์จากรูปที่ 4.4 ออกมาในโดเมนของความถี่แยกออกเป็นค่าแรงดันกระแสตรงสัญญาณความถี่มูลฐาน และฮาร์มอนิกส์ถึงลำดับที่ 50 โดยฮาร์มอนิกส์ลำดับที่หนึ่งหรือสัญญาณที่ความถี่มูลฐานมีค่าความถี่ 50 เฮิรตซ์ และสัญญาณฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2, 3, 4 มีค่า 100, 150, 200 เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานไปเรื่อยๆ โดยค่าของฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์เทียบกับสัญญาณแรงดันความถี่มูลฐาน ซึ่งจะเห็นว่ามีความแอกสสารนี้เป็นแอกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปซะประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

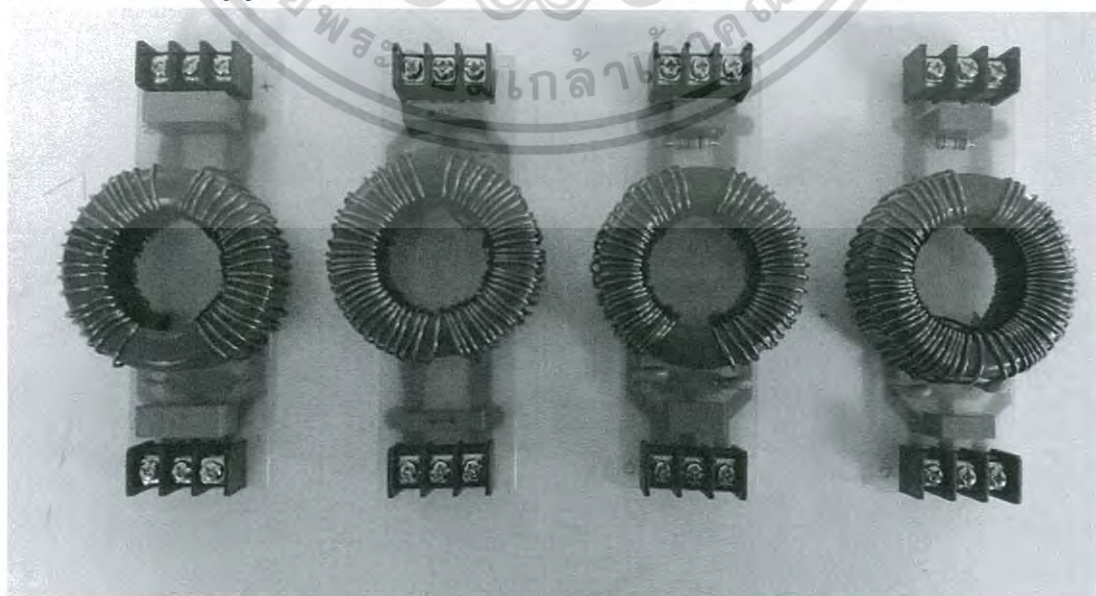
4.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยในการวัดสัญญาณรบกวนจะทดสอบในระบบปิดภายในห้องทดสอบเฉพาะดังรูปที่ 4.7 ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้แบตเตอรี่เพื่อให้ชัดเจนว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว ในการทดสอบนี้จะทำการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์จำนวน 2 จุด ได้แก่ ตำแหน่งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นจุดที่มีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ อันจะทำให้สุ่มเสี่ยงที่สัญญาณรบกวนจากอินเวอร์เตอร์จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.7 การวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในห้องทดสอบ

หลังจากทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์แล้วได้ทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนให้อยู่ในมาตรฐาน โดยในการทดลองนี้ได้ทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำกับวงจรกรองสัญญาณจำนวน 4 แบบ ตามรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรกรองสัญญาณตามตารางที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 4.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟที่ใช้ในการทดสอบจริง

	L_{CM} mH	$L_{DM}/leakege$ uH	C_x uF	C_y nF	R k.ohm
1	5.49	42.54	2.2	22	-
2	11.76	86.15	1	10	-
3	8.84	71.59	0.47 Class X2	4.7 Class X1/Y1	680
4	21.55	93.47	0.22 Class X2	2.2 Class X1/Y1	1000

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นวงจรกรองสัญญาณชุดแรกที่ถูกนำไปทดสอบ โดยทั้งคู่มีค่าความถี่ตัดในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและมีค่าความถี่ตัดในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดต่างใกล้เคียงกันมากตามตารางที่ 4.2 แต่ว่าขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าต่างกัน โดยวงจรกรองสัญญาณแบบที่ 1 ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่กว่าวงจรกรองสัญญาณแบบที่ 2 ซึ่งทำให้ใช้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กกว่าโดยผลการทดลองที่ได้จะถูกนำเสนอต่อไป

ถัดไปคือวงจรกรองชนิดที่ 3 และ 4 โดยวงจรกรองชนิดนี้ถูกปรับปรุงขึ้นจากวงจรกรองสัญญาณแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เนื่องจากผลการทดสอบก่อนหน้านี้ยังไม่ผ่านมาตรฐาน CISPR14 แต่ก็ถือว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลดลงมาก และแสดงให้เห็นถึงการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรกรองสัญญาณแบบต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้นมากแล้ว

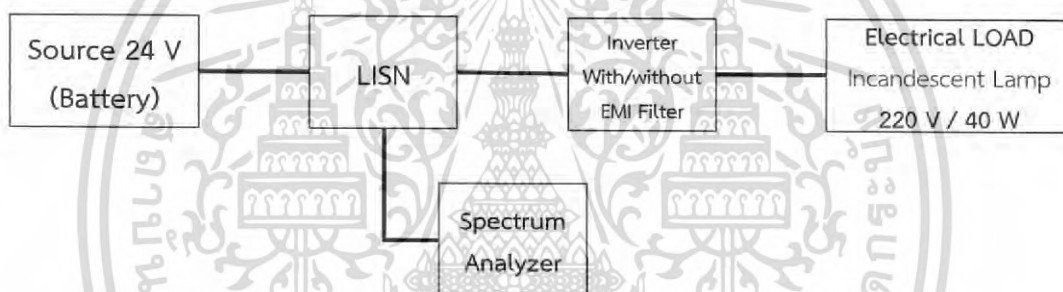
ในการปรับปรุงวงจรกรองสัญญาณแบบที่ 3 และ 4 นั้น มีสิ่งที่ถูกปรับปรุง ได้แก่ ขนาดของตัวเก็บประจุที่ถูกเลือกใช้เพื่อให้ทำงานอย่างปลอดภัยมากขึ้น กล่าวคือตัวเก็บประจุที่ใช้งานมีค่าความเก็บประจุลดลงเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านลงดินมีค่าน้อยลง รวมทั้งเลือกชนิดของตัวเก็บประจุ จากเดิมนั้นวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแบบที่ 1 และ 2 ได้ใช้ตัวเก็บประจุชนิดทั่วไป ภายหลังได้ปรับมาใช้เป็นตัวเก็บประจุคลาส X2 สำหรับใช้เป็นตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง และใช้ตัวเก็บประจุคลาส X1/Y1 สำหรับใช้เป็นตัวเก็บประจุโหมดผลรวมตามมาตรฐานไออีซี 60384-14 นอกจากนี้ยังติดตั้งตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุโหมดผลต่าง ดังรูปที่ 4.8 เพื่อให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุได้ดีขึ้น

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั้ง 4 แบบ จะถูกนำมาทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบจะถูกนำเสนอโดยละเอียดต่อไป ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

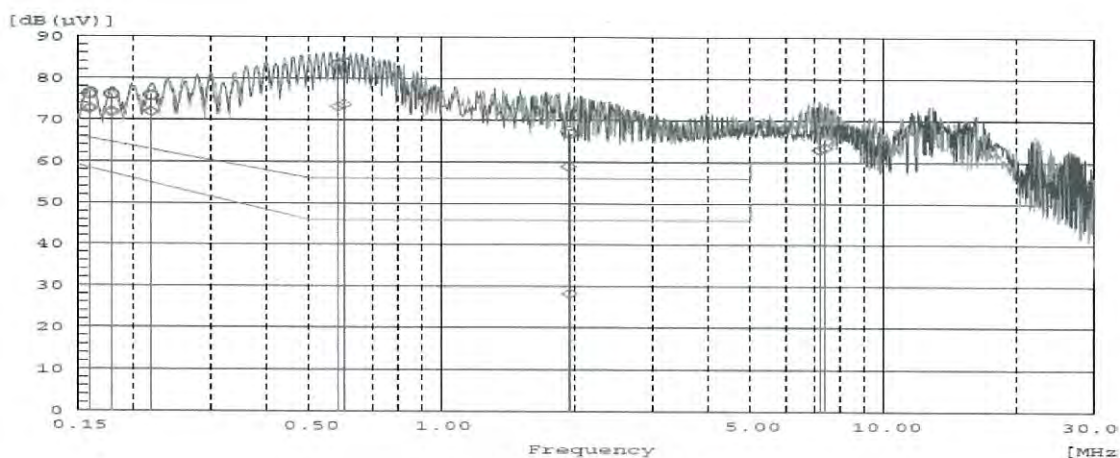
ในหัวข้อนี้แสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.9 โดยใช้แบตเตอรี่แรงดัน 24 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อเข้ากับโครงข่ายเสถียรภาพทางระบบไฟฟ้า (Line Impedance Stabilization Network : LISN) ตามด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จะถูกวัดระหว่างโครงข่ายเสถียรภาพทางระบบไฟฟ้าและอินเวอร์เตอร์ ในการทดสอบทั้งหมดจะวัดขนาดของสัญญาณรบกวนในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ไม่จ่ายและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้า โดยใช้หลอดไฟขนาด 40 วัตต์เป็นภาระทางไฟฟ้า รวมทั้งวัดสัญญาณรบกวนที่ถูกลดทอนโดยวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำทั้ง 4 แบบตามที่เคยได้กล่าวไปแล้ว โดยการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบ จะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ระบบไฟฟ้าไม่ได้เชื่อมต่อสายดิน และกรณีที่ระบบไฟฟ้าเชื่อมต่อสายดิน เพื่อแสดงความแตกต่างของการลดทอนให้เห็น เนื่องจากการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิดมีปลั๊กเพียง 2 ขั้วไม่มีสายดิน หรือระบบไฟฟ้าบางสถานที่ไม่ได้ติดตั้งสายดิน



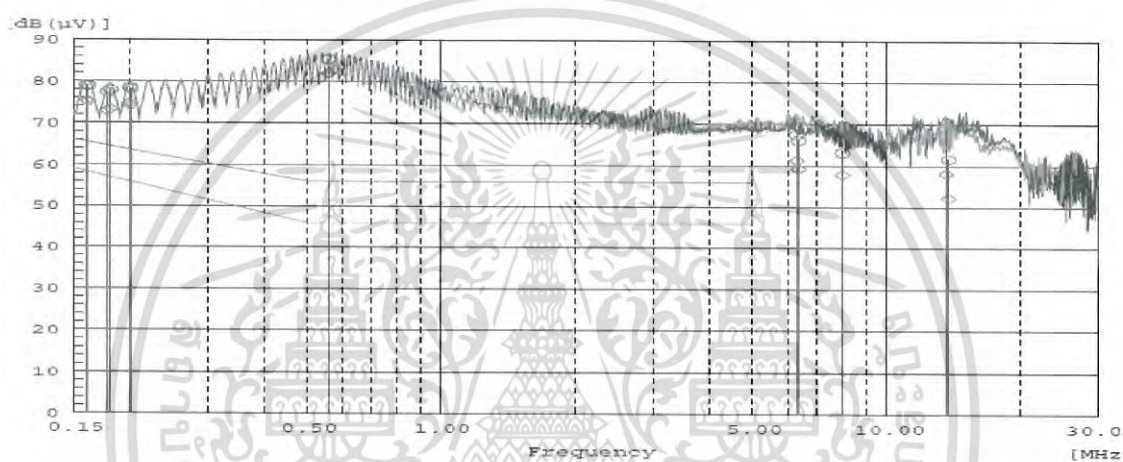
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

ขั้นแรกเพื่อศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดขึ้นด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีสภาพพร้อมใช้งานขณะที่ยังไม่มีภาระจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าจึงทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในห้องทดสอบได้ผลดังรูปที่ 4.10 ก. และวัดสัญญาณรบกวนขณะอินเวอร์เตอร์จ่ายภาระทางไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองนี้ใช้หลอดไฟ 40 วัตต์ เป็นภาระทางไฟฟ้า ซึ่งการวัดผลได้ค่าของสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.10 ข. โดยค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่สนใจถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งจะพบว่าหลังจากอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าแล้วค่าของสัญญาณรบกวนมีขนาดเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้เองการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนถัดไปจะทำการทดสอบขณะที่อินเวอร์เตอร์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระทางไฟฟ้าทุกกรณี จากรูปที่ 4.10 นั้น แสดงสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนและแสดงเส้นขีดมาตรฐาน EN55014 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้อุปกรณ์อื่นโดยเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า



ข. ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(µV)]	AV [dB(µV)]	QP [dB]	AV [dB]	
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า						
1	0.22037	75.6	71.7	-12.8	-16.9	EN55014
2	0.58271	83.2	73.2	-27.2	-27.2	EN55014
3	1.94016	67.3	58.8	-11.3	-12.8	EN55014
4	7.1741	67.3	63.0	-7.3	-13.0	EN55014
5	0.15925	76.0	72.4	-10.5	-14.0	EN55014
6	0.17952	75.9	71.6	-11.4	-14.5	EN55014
1	0.21927	75.9	71.9	-13.1	-17.0	EN55014

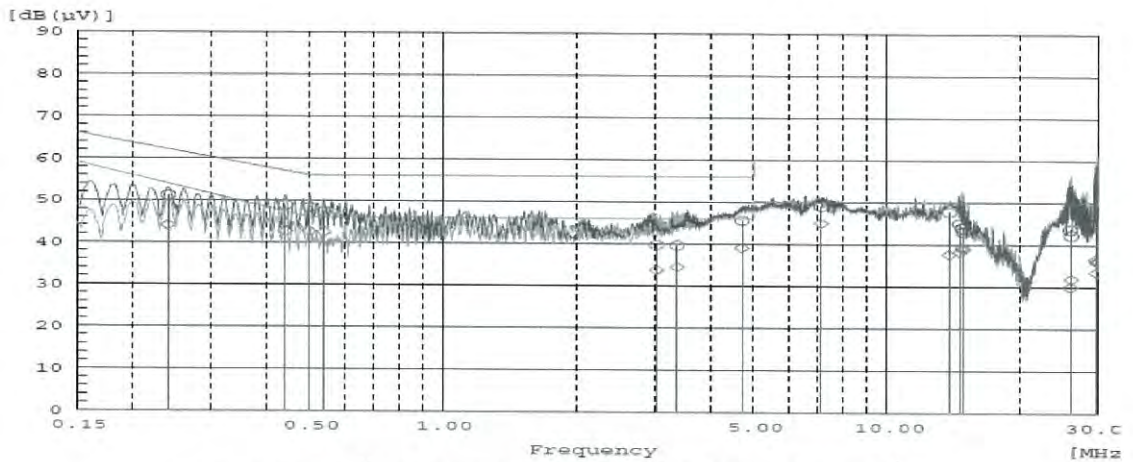
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

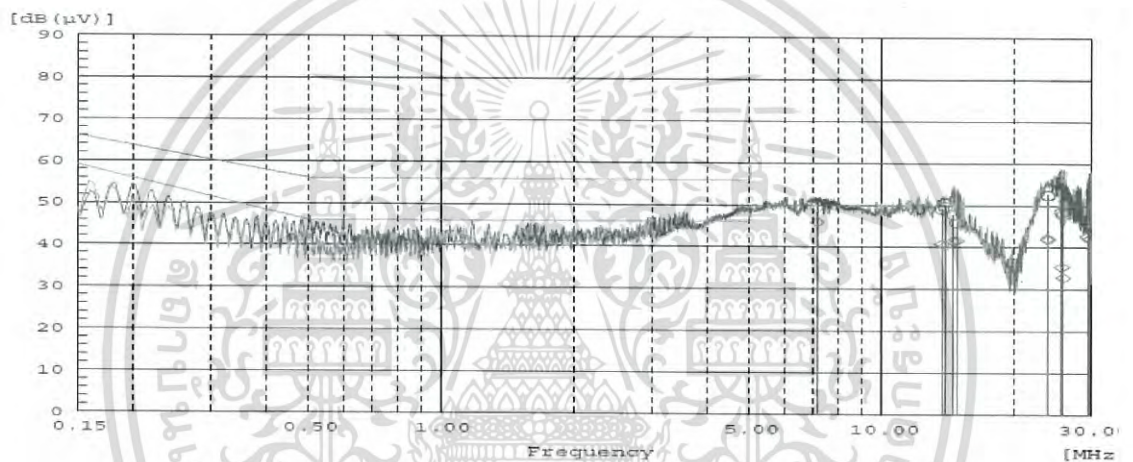
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
2	0.60169	83.7	73.7	-27.7	-27.7	EN55014
3	1.95144	66.7	28.3	-10.7	17.7	EN55014
4	7.3731	65.2	63.4	-5.2	-13.4	EN55014
5	0.17925	76.1	72.0	-11.6	-14.9	EN55014
6	0.15982	76.4	72.8	-10.9	-14.5	EN55014
มีภาระทางไฟฟ้า						
1	0.15989	79	75.2	-13.5	-16.9	EN55014
2	0.17865	77.3	72.7	-12.8	-15.6	EN55014
3	0.20124	78	74.1	-14.4	-18.3	EN55014
4	0.56125	85.4	82	-29.4	-36.0	EN55014
5	6.2985	67.5	61.3	-7.5	-11.3	EN55014
6	13.8064	61.7	52.3	-1.7	-2.3	EN55014
1	0.16147	78.8	75	-13.4	-16.8	EN55014
2	0.18162	77.8	73.2	-13.4	-16.3	EN55014
3	0.20059	78.5	74.6	-14.9	-18.7	EN55014
4	0.56004	85.2	81.8	-29.2	-35.8	EN55014
5	6.3586	66.1	59.2	-6.1	-9.2	EN55014
6	7.9749	63.1	57.9	-3.1	-7.9	EN55014
7	13.6408	69	58.2	-9	-8.2	EN55014

หลังจากทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แล้วได้ทำการทดสอบการลดทอน โดยใช้วงจรรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ โดยในการทดสอบครั้งนี้ไม่ได้ต่อสายดินเข้าในระบบแล้วทำการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนกับวงจรรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบ ด้วยกัน ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.11 และค่าสเปคตรัมของสัญญาณรบกวนบางความถี่ที่สนใจแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ในการทดสอบโดยใช้วงจรรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบนั้นผ่านมาตรฐาน EN55014 ทุกกรณี

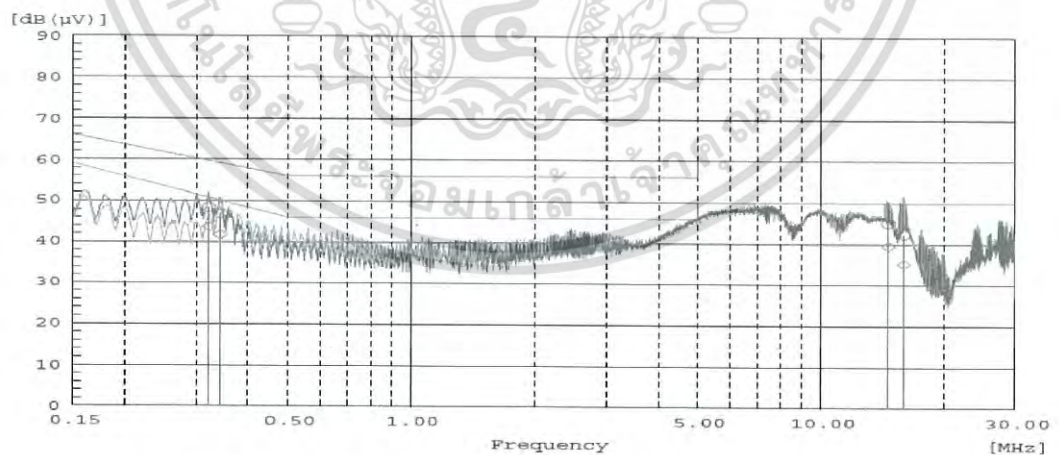
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1

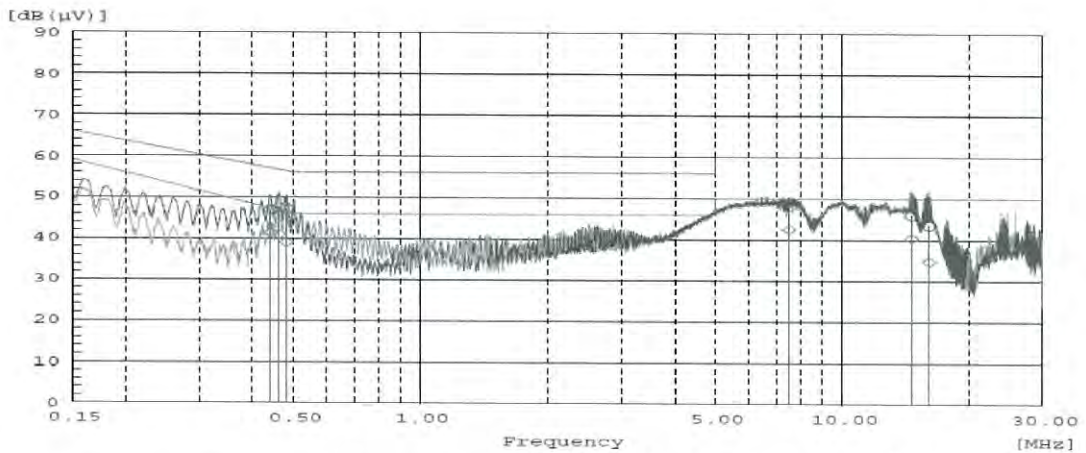


ข. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2



ค. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4
รูปที่ 4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

ในการทดสอบจะทำการตรวจสอบค่าสัญญาณรบกวนบางความถี่ที่มีโอกาสเกินค่าขีดจำกัดของมาตรฐาน เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนบางช่วงความถี่ตามรูปที่ 4.11 สูงกว่าเส้นมาตรฐาน แต่เมื่อวิเคราะห์หาค่ายอดเสมือน (Quasi-Peak: QP) และค่าเฉลี่ย (Average: AV) แล้ว ยังคงผ่านมาตรฐาน ดังค่าสัญญาณรบกวนตามตารางที่ 4.4 ซึ่งจะแสดงค่าส่วนต่างมาตรฐาน หากค่านี้เป็นบวกจะผ่านมาตรฐาน หากค่านี้เป็นลบจะไม่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งจะต้องผ่านมาตรฐานทั้งค่ายอดเสมือนและค่าเฉลี่ย ยังมีค่าส่วนต่างเป็นบวกมากจะยิ่งดีเนื่องจากมีส่วนเผื่อมากขึ้นนั่นเอง

จากการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กทางสายตัวนำโดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบ จะเห็นได้ว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 มีประสิทธิภาพการลดทอนดีกว่าแบบที่ 1 และ 2 โดยเฉพาะในช่วงท้ายที่ย่านความถี่ประมาณ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(µV)]	AV [dB(µV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1						
1	3.02776	39.8	33.8	16.2	12.2	EN55014
2	3.3616	39.7	34.5	16.3	11.5	EN55014
3	7.1105	49.0	45.0	11.0	5.0	EN55014
4	14.6068	45.0	38.2	15.0	11.8	EN55014
5	14.8056	43.9	39	16.1	11.0	EN55014
6	26.1436	42.3	31.9	17.7	18.1	EN55014

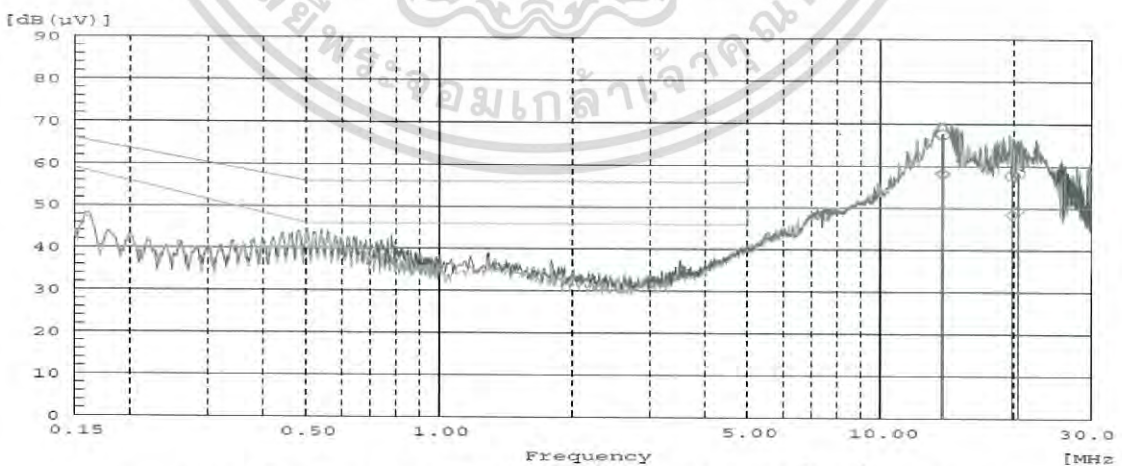
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
7	29.6788	44.6	36.7	15.4	13.3	EN55014
8	29.8728	45.1	36.3	14.9	13.7	EN55014
1	0.24043	51.1	43.9	11.0	10.0	EN55014
2	0.44169	48.8	42.7	8.2	4.6	EN55014
3	0.49939	48.3	42.7	7.7	3.3	EN55014
4	0.54013	47.2	42.6	8.8	3.4	EN55014
5	4.70944	45.6	39.1	10.4	6.9	EN55014
6	13.8628	47.7	37.8	12.3	12.2	EN55014
7	14.806	44.0	39.5	16.0	10.5	EN55014
8	14.9052	43.1	38.9	16.9	11.1	EN55014
9	26.0196	43.7	30	16.3	20.0	EN55014
10	29.7548	46.8	33.5	13.2	16.5	EN55014
11	29.9072	47.7	36	12.3	14.0	EN55014
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2						
1	7.1305	49.7	46.0	10.3	4.0	EN55014
2	13.716	49.2	40.7	10.8	9.3	EN55014
3	14.8656	45.8	41.6	14.2	8.4	EN55014
4	23.9496	52.4	41.9	7.6	8.1	EN55014
5	25.742	48.5	35.3	11.5	14.7	EN55014
6	29.4916	44.7	42.6	15.3	7.4	EN55014
1	13.942	49.7	40.3	10.3	9.7	EN55014
2	14.5652	47.8	41.5	12.2	8.5	EN55014
3	23.9156	52.5	42.1	7.5	7.9	EN55014
4	25.954	47.9	32.9	12.1	17.1	EN55014
5	29.8396	47.0	42.0	13.0	8.0	EN55014
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3						
1	0.32092	48.4	43.7	11.3	7.1	EN55014
2	0.34155	46.9	41.7	12.3	8.4	EN55014
3	14.68446	45.1	39.5	14.9	10.5	EN55014
4	16.01699	42.4	35.2	17.6	14.8	EN55014
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4						
1	0.44249	46.9	41.3	10.1	6.0	EN55014
2	0.4622	47.4	41.0	9.3	5.8	EN55014
3	0.48163	47.1	39.0	9.2	7.4	EN55014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
4	7.49094	48.1	42.5	11.9	7.5	EN55014
5	14.68653	45.9	40.4	14.1	9.6	EN55014
6	16.16266	43.5	34.8	16.5	15.2	EN55014

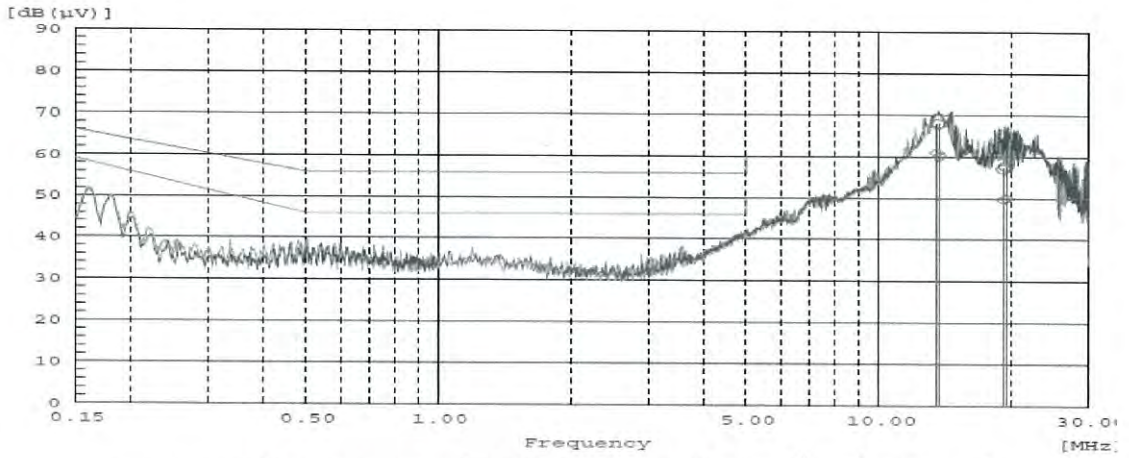
ในส่วนถัดมาจะทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบ แต่แตกต่างจากการทดสอบที่ผ่านมา คือ ในการทดสอบครั้งนี้จะติดตั้งสายดินในระบบไฟฟ้า ซึ่งผลการวัดสัญญาณรบกวนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และค่าสเปคตรัมของสัญญาณรบกวนบางความถี่ที่สนใจแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยผลลัพธ์ที่ได้ในครั้งนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้เชื่อมต่อสายดินตามรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ชัดเจนว่าในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์นั้น เมื่อติดตั้งสายดินแล้วประสิทธิภาพการลดทอนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนดีขึ้นมาก โดยสัญญาณรบกวนในย่านความถี่นี้ลดลงเห็นได้อย่างชัดเจน แต่จากผลทดสอบที่ได้จะพบว่าสัญญาณรบกวนในระบบที่ใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2 มีค่ามากขึ้นในย่านความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ จนเกินมาตรฐานตามตารางที่ 4.5

ในการใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 13 เมกะเฮิร์ตซ์ เกินขีดจำกัดมาตรฐานประมาณ 8 เดซิเบล และการใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 13 เมกะเฮิร์ตซ์ เกินขีดจำกัดมาตรฐานประมาณ 8 เดซิเบล จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้เองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 ซึ่งออกแบบตามมาตรฐานทั้งค่าพารามิเตอร์และตัวเก็บประจุที่ใช้จะช่วยให้การลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำผ่านมาตรฐานในทุกย่านความถี่

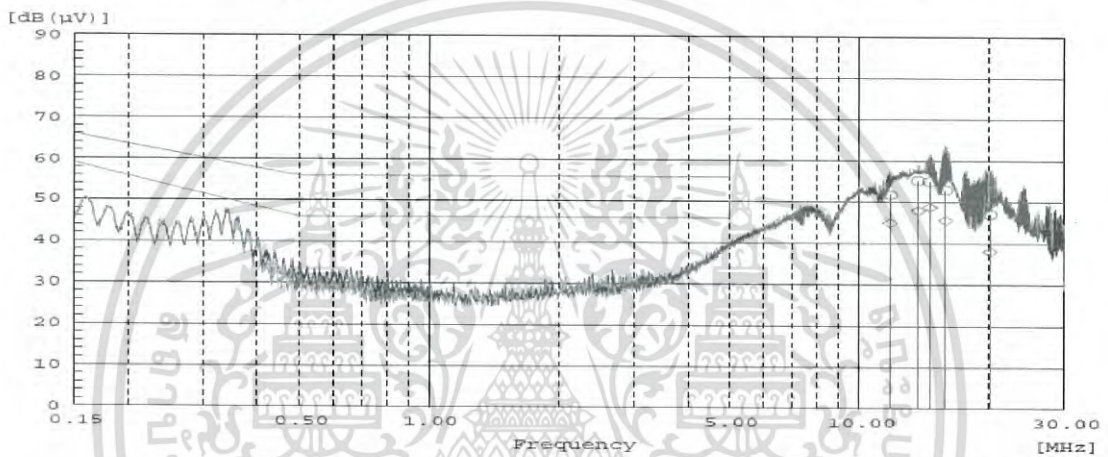


ก. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1 เชื่อมต่อสายดิน

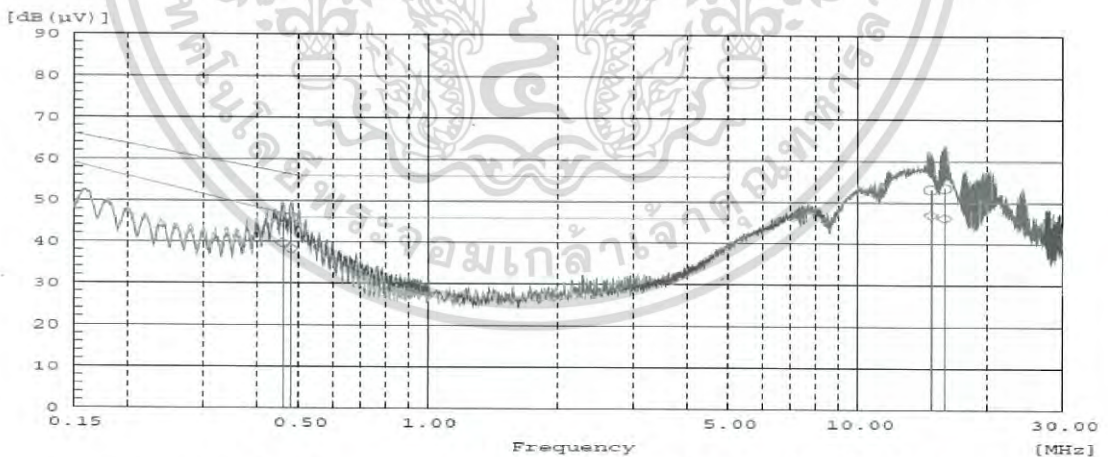
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2 เชื่อมต่อสายดิน



ค. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน



ง. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4 เชื่อมต่อสายดิน

รูปที่ 4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

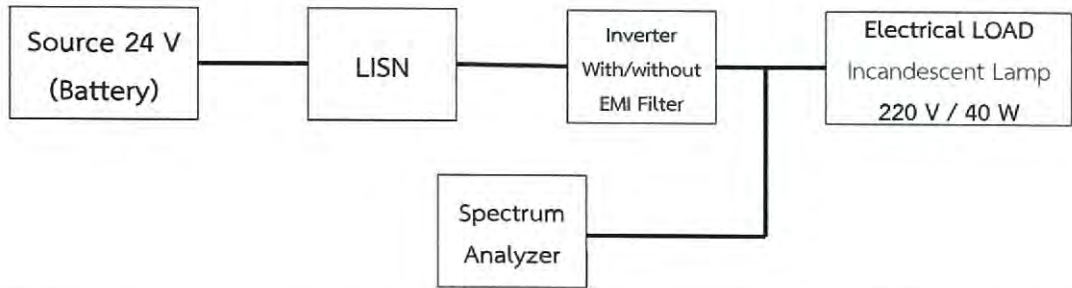
ตารางที่ 4.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1 เชื่อมต่อสายดิน						
1	13.866	67.7	58.1	-7.7	-8.1	EN55014
2	19.8712	57.7	48.5	2.3	1.5	EN55014
1	13.8112	67.5	58.4	-7.5	-8.4	EN55014
2	20.4544	58.3	49.5	1.7	0.5	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2 เชื่อมต่อสายดิน						
1	13.7452	68.1	60.1	-8.1	-10.1	EN55014
2	19.512	57.8	50.1	2.2	-0.1	EN55014
1	13.5724	68	61.1	-8	-11.1	EN55014
2	19.2544	57.2	49.8	2.8	0.2	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน						
1	11.83125	51.8	44.9	8.2	5.1	EN55014
2	13.75368	55.3	47.9	4.7	2.1	EN55014
3	14.64744	55.1	48.7	4.9	1.3	EN55014
4	15.93382	53	45.6	7	4.4	EN55014
5	20.22083	47	38	13	12	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4 เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.46055	46	39.8	10.7	7.1	EN55014
2	0.4799	45.9	38.3	10.4	8.1	EN55014
3	14.829	53.1	47	6.9	3	EN55014
4	15.91459	53.4	46.3	6.6	3.7	EN55014

4.2.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

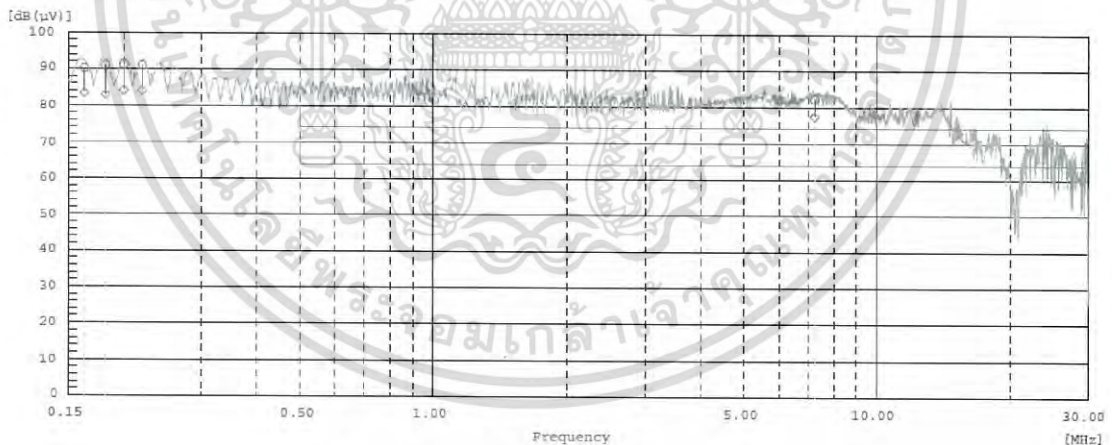
ในหัวข้อนี้จะวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามบล็อกไดอะแกรมในรูป 4.13 โดยมีการออกแบบการทดสอบเหมือนกับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อ 4.2.1 คือ วัดสัญญาณรบกวน ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ไม่จ่ายและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้า และการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั้ง 4 แบบ ลดทอนสัญญาณรบกวนที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ในระบบที่ไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดิน โดยในการทดสอบในหัวข้อนี้จะเทียบกับมาตรฐาน EN55014 ทั้งหมดทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



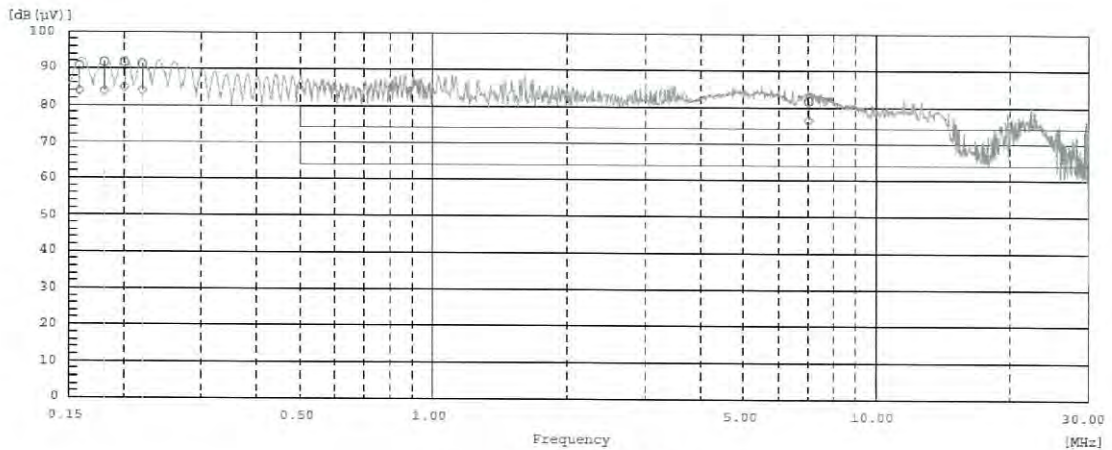
รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ
ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

ขั้นแรกเริ่มจากการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออก ในขณะที่อินเวอร์เตอร์พร้อมใช้งานแต่ยังไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.14 ก. และเพื่อเปรียบเทียบกันจึงให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าจากนั้นทำการวัดสัญญาณรบกวนได้ดังรูปที่ 4.14 ข. จากการทดสอบทั้ง 2 กรณี พบว่าค่าของสัญญาณรบกวนตามตารางที่ 4.6 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในย่านความถี่ช่วงท้ายของมาตรฐานประมาณ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นในการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะทำการทดสอบในขณะที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าทุกกรณี



ก. ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

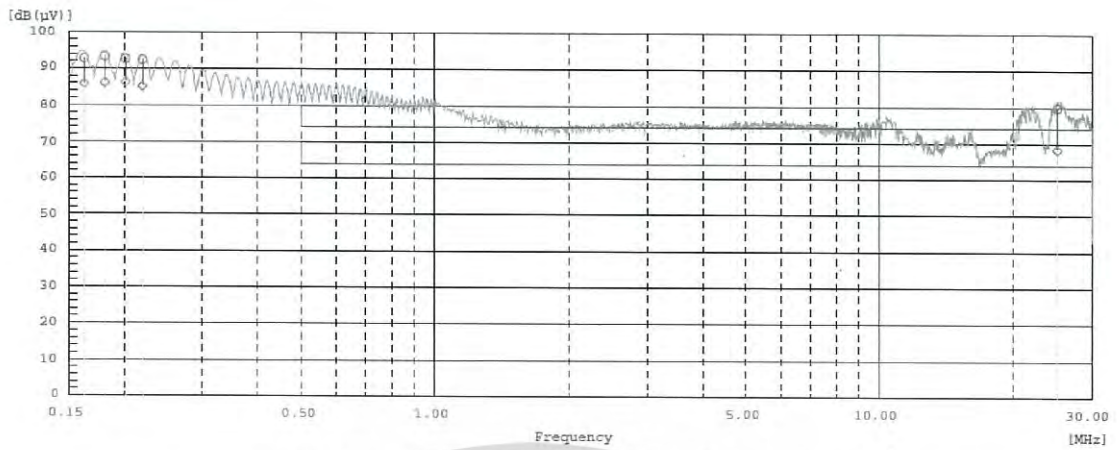
รูปที่ 4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า

ตารางที่ 4.6 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า

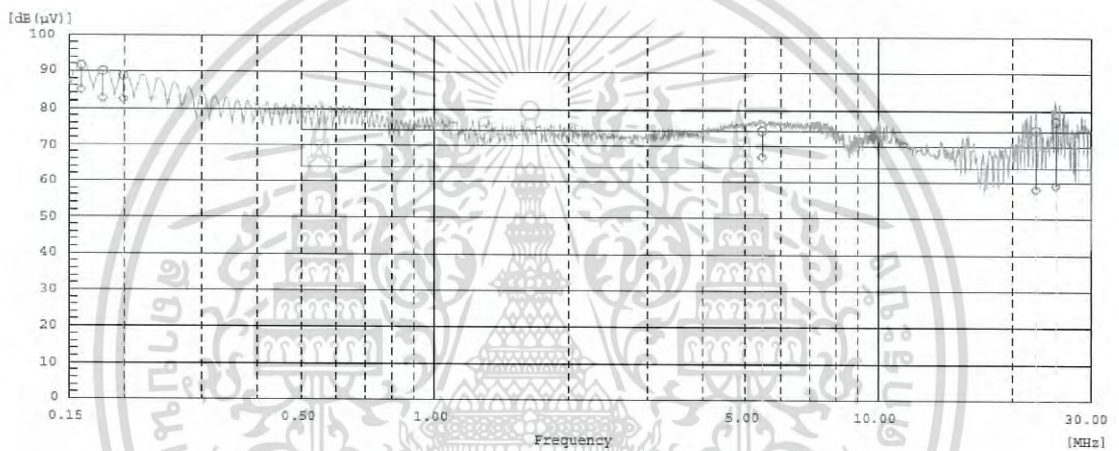
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า						
1	0.16299	90.2	83.3	-10.2	-13.3	EN55014
2	0.18207	90.9	82.9	-10.9	-12.9	EN55014
3	0.20026	91.3	84.1	-11.3	-14.1	EN55014
4	0.22045	91	84	-11	-14	EN55014
5	7.232	82.3	77.4	-8.3	-13.4	EN55014
มีภาระทางไฟฟ้า						
1	0.1582	90.7	84	-10.7	-14	EN55014
2	0.18063	91.7	83.9	-11.7	-13.9	EN55014
3	0.20111	91.7	84.9	-11.7	-14.9	EN55014
4	0.22025	91.2	84.1	-11.2	-14.1	EN55014
5	7.0295	81.7	76.4	-7.7	-12.4	EN55014

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกโดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน 4 แบบ ซึ่งเหมือนกับการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าในหัวข้อ 4.2.1 โดยค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนบางความถี่ที่สนใจถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนไม่ได้ช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนมากนัก

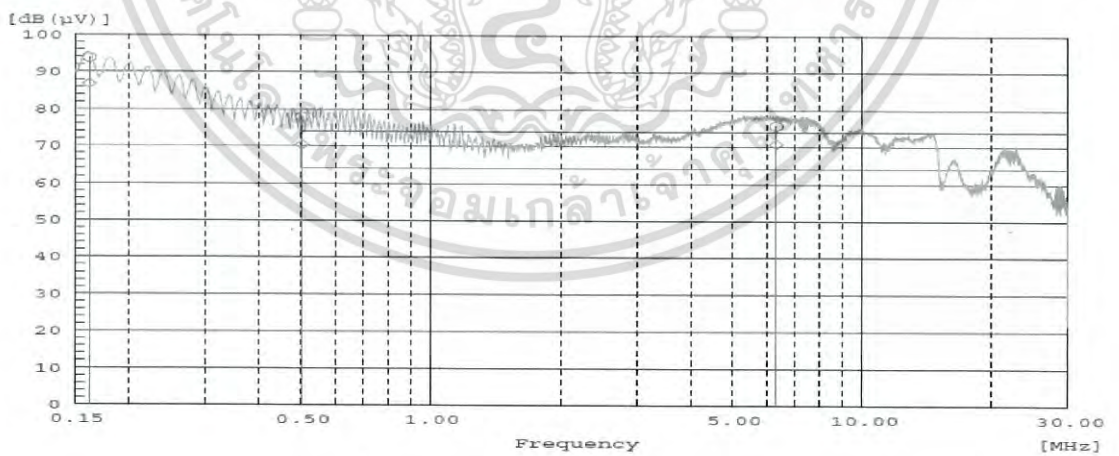
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1

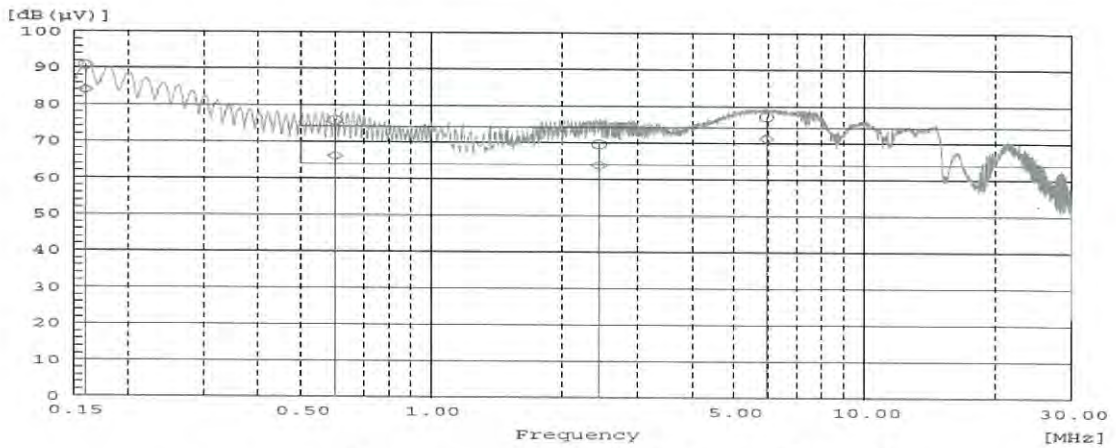


ข. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2



ค. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4
รูปที่ 4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ถึงสัญญาณรบกวนที่ได้ตามรูปที่ 4.15 ก. และ ข. ซึ่งเปรียบเทียบผลจากการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2 จะพบว่าสัญญาณรบกวนเมื่อใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กกว่าแบบที่ 2 มีค่าสัญญาณรบกวนสูงกว่าเล็กน้อยเช่นที่ความถี่ประมาณ 160 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณรบกวนที่วัดได้หลังการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 มีค่าค้ายอดเสมือน 92.8 เดซิเบลและค่าเฉลี่ย 85.8 เดซิเบล ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนสัญญาณรบกวนที่วัดได้หลังการใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 ซึ่งมีค่าค้ายอดเสมือน 91.7 เดซิเบลและค่าเฉลี่ย 85 เดซิเบล

และเพื่อยืนยันผลที่ได้จึงทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 ซึ่งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 ใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กกว่าแบบที่ 4 และผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้นออกมาเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการเปรียบเทียบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

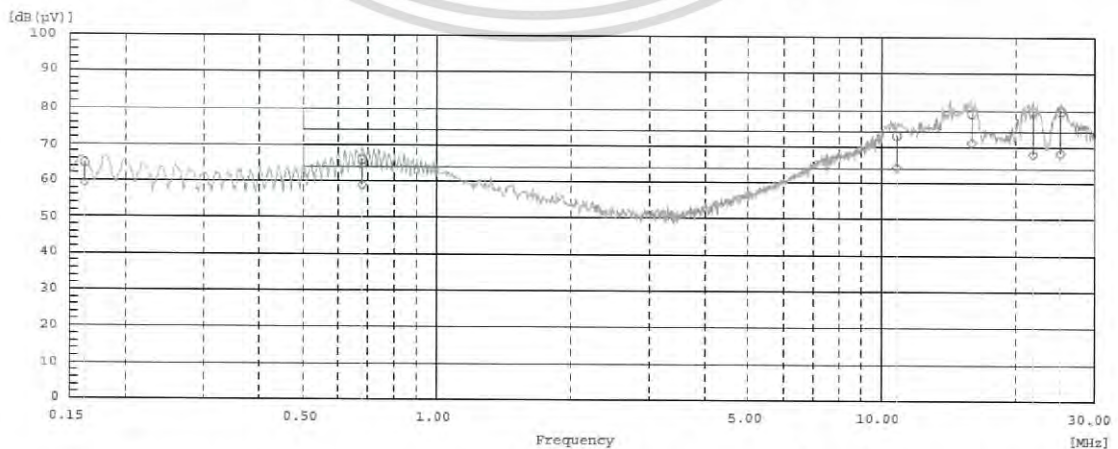
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(µV)]	AV [dB(µV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1						
1	0.16224	92.8	85.8	-12.8	-15.8	EN55022
2	0.18101	93.3	86.1	-13.3	-16.1	EN55022
3	0.20162	92.6	86.3	-12.6	-16.3	EN55022
4	25.1644	79.8	68.3	-5.8	-4.3	EN55022
5	0.22015	92.4	85.1	-12.4	-15.1	EN55022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

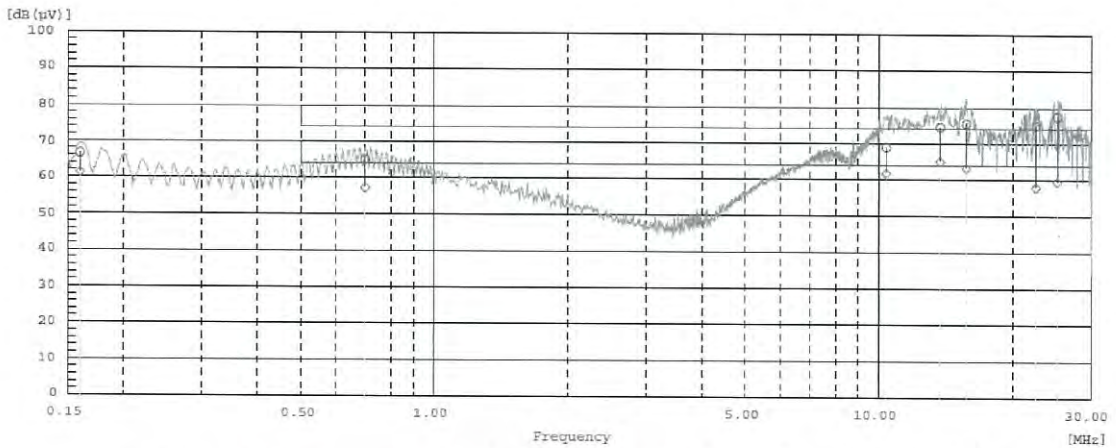
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2						
1	0.15972	91.7	85	-11.7	-15	EN55022
2	0.1792	90.1	82.6	-10.1	-12.6	EN55022
3	0.19915	88.8	82.4	-8.8	-12.4	EN55022
4	5.4486	74.1	66.9	-0.1	-2.9	EN55022
5	22.62	74.5	58.2	-0.5	5.8	EN55022
6	25.0468	76.9	59.1	-2.9	4.9	EN55022
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3						
1	0.16189	93.8	86.8	-13.8	-16.8	EN55014
2	0.50266	77.9	70.3	-3.9	-6.3	EN55014
3	6.32188	75.8	70.8	-1.8	-6.8	EN55014
วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4						
1	0.15927	90.8	84	-10.8	-14	EN55014
2	0.59964	75.8	66	-1.8	-2	EN55014
3	2.44378	69.5	63.7	4.5	0.3	EN55014
4	5.95978	77.1	71.1	-3.1	-7.1	EN55014

ในการทดลองรอบถัดมาจะทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้วงจรรองสัญญาณรบกวนทั้ง 4 แบบเหมือนเดิม ซึ่งการทดสอบรอบนี้จะทำการต่อสายดินเข้าไปในระบบ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 และค่าสเปคตรัมของสัญญาณรบกวนบางความถี่ที่สนใจถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเชื่อมต่อสายดินแล้ววงจรรองสัญญาณรบกวนทุกแบบสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบในรูป 4.15

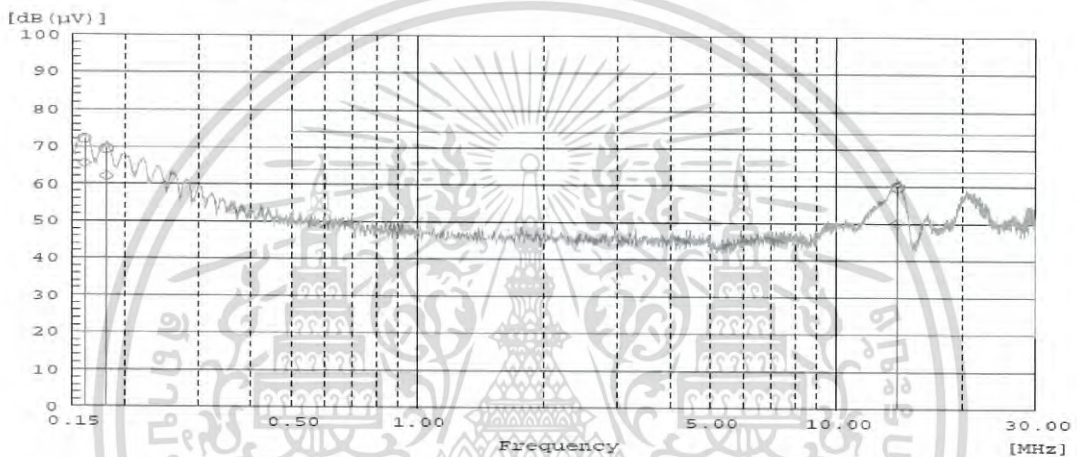


ก. วงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1 เชื่อมต่อสายดิน

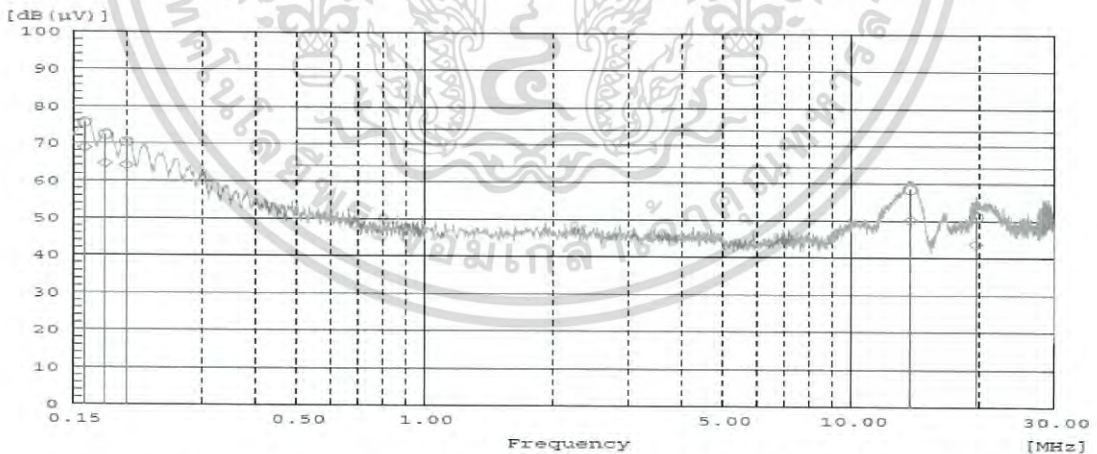
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2 เชื่อมต่อสายดิน



ค. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน



ง. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4 เชื่อมต่อสายดิน

รูปที่ 4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน

และเมื่อวิเคราะห์ดูผลของการลดทอนสัญญาณรบกวนแล้วจะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบ
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าค่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้ในช่วงแรกย่าน
เอกซาร์ตความถี่ประมาณ 160 กิโลเฮิร์ตซ์ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กกว่าค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่กว่าแบบที่ 2 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า แต่ในกรณีที่ช่วงท้ายของการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้น้อยกว่าแบบที่ 2 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 ก็ได้ผลลัพธ์ออกมาในแนวทางเดียวกัน คือ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กกว่าและใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่กว่าแบบที่ 4 สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ 160 กิโลเฮิรตซ์ได้ดีกว่า

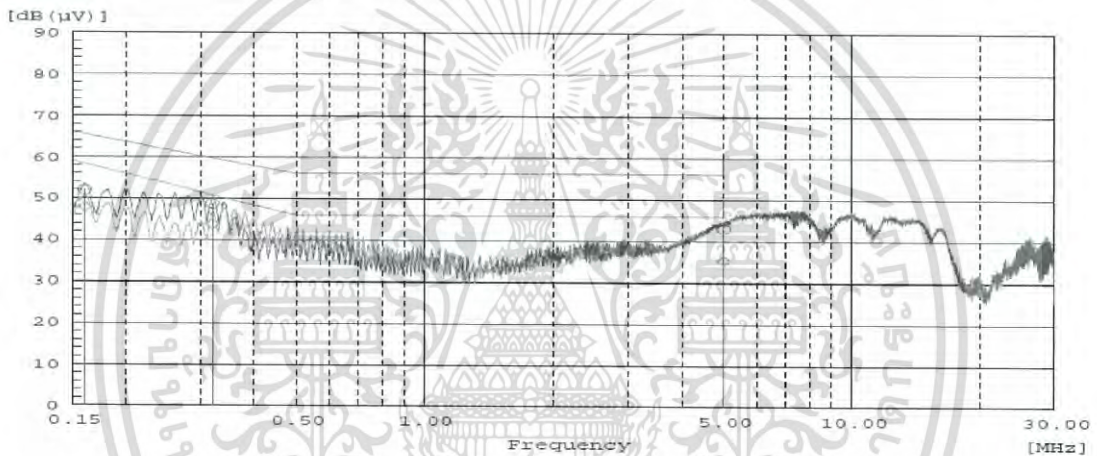
ตารางที่ 4.8 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟเชื่อมต่อสายดิน

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 1 เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.162	64.8	59.3	15.2	10.7	EN55022
2	0.67942	65.9	58.8	8.1	5.2	EN55022
3	10.796	72.9	64.2	1.1	-0.2	EN55022
4	15.9492	79.2	71.1	-5.2	-7.1	EN55022
5	21.9184	79.8	67.9	-5.8	-3.9	EN55022
6	25.2452	79.7	68.2	-5.7	-4.2	EN55022
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 2 เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.1596	66.6	61.3	13.4	8.7	EN55022
2	0.69944	64.9	57.2	9.1	6.8	EN55022
3	10.3828	68.9	61.7	5.1	2.3	EN55022
4	13.748	74.5	65	-0.5	-1	EN55022
5	15.7508	75.5	63.1	-1.5	0.9	EN55022
6	22.5824	75	57.9	-1	6.1	EN55022
7	25.2248	77.5	59.5	-3.5	4.5	EN55022
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.16052	72	65.4	8	4.6	EN55014
2	0.18129	69.4	61.9	10.6	8.1	EN55014
3	14.04295	59.8	50.1	14.2	13.9	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 4 เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.15964	75.5	68.8	4.5	1.2	EN55014
2	0.17857	72.3	64.6	7.7	5.4	EN55014
3	0.19982	70.3	64.1	9.7	5.9	EN55014
4	13.79583	58.3	50.1	15.7	13.9	EN55014
5	19.67436	51.1	43.8	22.9	20.2	EN55014

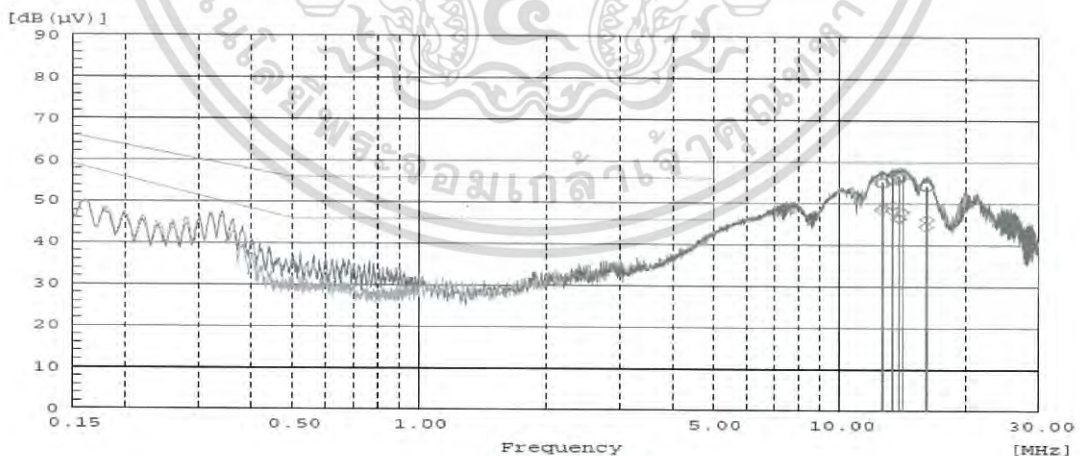
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5 สำหรับใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเมื่อติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้เป็นการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาของอินเวอร์เตอร์เข้าเหมือนในหัวข้อ 4.2.1 และด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เหมือนในหัวข้อ 4.2.2 แต่มีการเพิ่มการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟเข้าไปทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์พร้อมกัน ในขณะที่วัดสัญญาณรบกวนทั้งขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ กล่าวคือ จะแตกต่างจากการทดสอบในหัวข้อ 4.2.1 ที่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าเพียงตัวเดียวในการทดสอบสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ และแตกต่างจากหัวข้อ 4.2.2 ที่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนด้านขาออกเพียงตัวเดียว เมื่อวัดสัญญาณรบกวนด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยในการทดลองนี้ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จะติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 4 ไว้ที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์



ก. ไม่เชื่อมต่อสายดิน



ข. เชื่อมต่อสายดิน

รูปที่ 4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนแรก เริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ในระบบที่ไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดิน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17 และดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผ่านมาตรฐานในทุกย่านความถี่ เมื่อเทียบผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีแล้วพบว่าเมื่อเชื่อมต่อสายดินสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่แรกจะลดลง แต่ในช่วงท้ายของย่านความถี่ที่ทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น

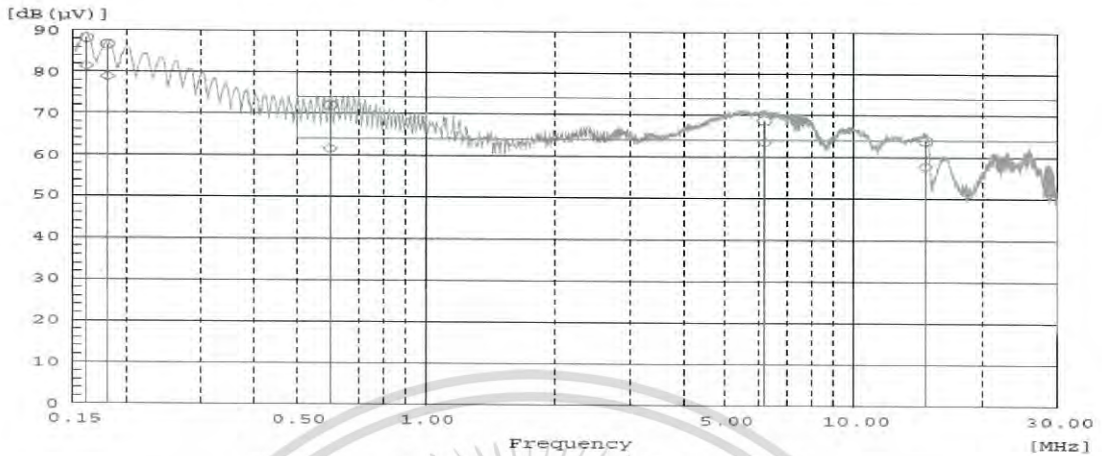
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณรบกวน โดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 ในระบบที่ไม่เชื่อมต่อสายดินกับรูปที่ 4.11 ค. และตารางที่ 4.4 ในหัวข้อ 4.2.1 แล้วพบว่าการทดสอบครั้งนี้ ซึ่งติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระบบที่ติดตั้งสายดินระหว่างการทดสอบครั้งนี้ ซึ่งติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์กับผลการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนกับภาพที่ 4.12 ค. และตารางที่ 4.5 ในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าเพียงด้านเดียวจะเห็นว่าการทดสอบในครั้งนี้ลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากกว่าอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.9 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก

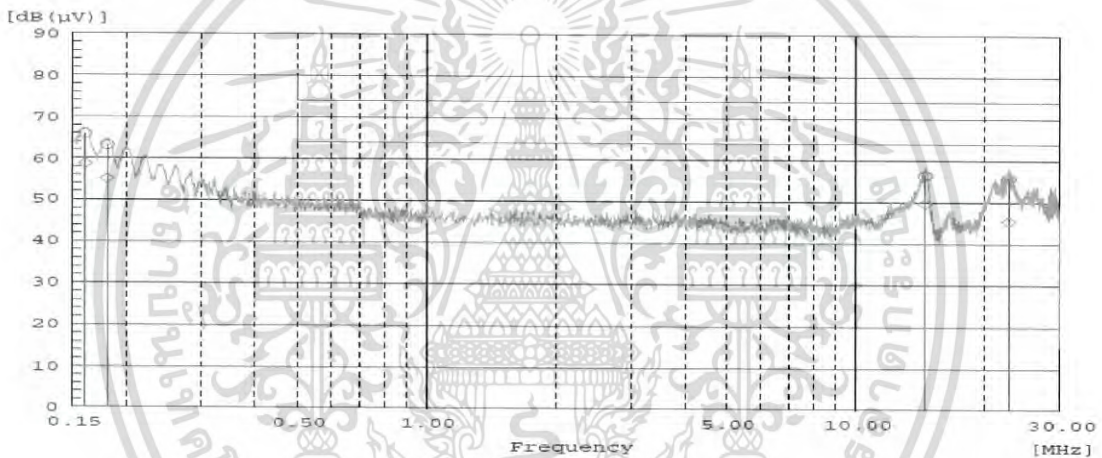
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
ไม่เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.15993	51.9	47.9	13.6	10.4	EN55014
2	0.31929	48.8	43.8	10.9	7	EN55014
3	5.00814	42.9	35.3	17.1	14.7	EN55014
เชื่อมต่อสายดิน						
1	12.60465	55.2	48.6	4.8	1.4	EN55014
2	13.45561	56.1	49.5	3.9	0.5	EN55014
3	13.87932	56.2	46.5	3.8	3.5	EN55014
4	13.95016	56.8	46.3	3.2	3.7	EN55014
5	16.13077	54.2	44.4	5.8	5.6	EN55014
1	12.74215	55	49	5	1	EN55014
2	13.43734	55.5	48.3	4.5	1.7	EN55014
3	13.86939	56.6	46.5	3.4	3.5	EN55014
4	14.18574	56.8	47.9	3.2	2.1	EN55014
5	16.21651	54.3	46.2	5.7	3.8	EN55014

ในส่วนถัดมาจะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 ไว้ด้านขาเข้า และติดตั้งวงจรกรองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนแบบที่ 4 ไว้ที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์พร้อมกัน โดยทำการทดสอบกับระบบที่ไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดิน ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.10



ก. ไม่เชื่อมต่อสายดิน



ข. เชื่อมต่อสายดิน

รูปที่ 4.18 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ จะเห็นว่าระบบที่ไม่เชื่อมต่อสายดินจะมีสัญญาณรบกวนเกินมาตรฐาน และเมื่อทำการเชื่อมต่อสายดินแล้ววงจรกรองสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนได้ดี นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบในครั้งนี้กับทดสอบในหัวข้อ 4.2.2 จะพบว่าสัญญาณรบกวนในการทดสอบครั้งนี้มีค่าน้อยกว่าทั้งในกรณีที่ไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดิน โดยเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 4.18 ก. และภาพที่ 4.15 ง. และ เปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 4.18 ข. และภาพที่ 4.16 ง. โดยค่าความแตกต่างของการลดทอนสัญญาณรบกวนของทั้ง 2 การทดลองสามารถนำค่าจากตารางที่ 4.7 และ 4.8 มาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟทางด้านขาเข้าและขาออก

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
ไม่เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.1611	88.2	81.3	-8.2	-11.3	EN55014
2	0.18055	86.6	78.9	-6.6	-8.9	EN55014
3	0.59924	71.9	61.6	2.1	2.4	EN55014
4	6.20088	68.7	63.5	5.3	0.5	EN55014
5	14.80368	63.9	57.8	10.1	6.2	EN55014
เชื่อมต่อสายดิน						
1	0.16012	65.9	58.7	14.1	11.3	EN55014
2	0.18061	63.1	55	16.9	15	EN55014
3	14.58317	56.4	49.7	17.6	14.3	EN55014
4	22.85801	55.9	45.5	18.1	18.5	EN55014

4.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ

ในหัวข้อนี้เป็นการวัดสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศซึ่งเกิดจากสายตัวนำไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในการติดตั้งสายตัวนำนี้อาจถูกจัดวางไว้ใกล้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นและเกิดการรบกวนขึ้นได้ โดยการทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวัดการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN55014 ซึ่งมีข้อกำหนดช่วงการวัดในย่านความถี่ 30 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 300 เมกะเฮิรตซ์ ในการทดสอบนั้นสายตัวนำจะถูกวางไว้บนรางและตัววัดสัญญาณจะเคลื่อนที่ผ่านสายตัวนำทั้งเส้นเพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.19

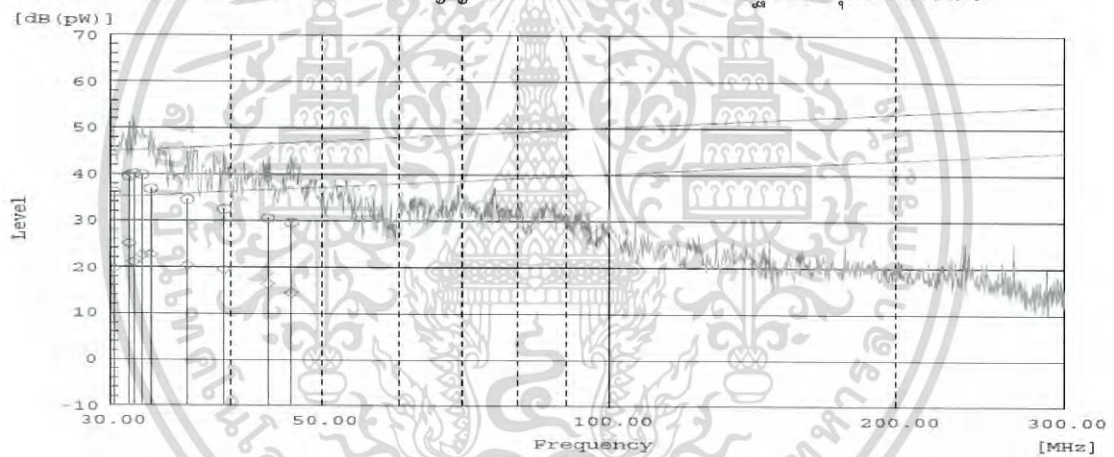


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.19 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศจากสายตัวนำ การดำเนินการคว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

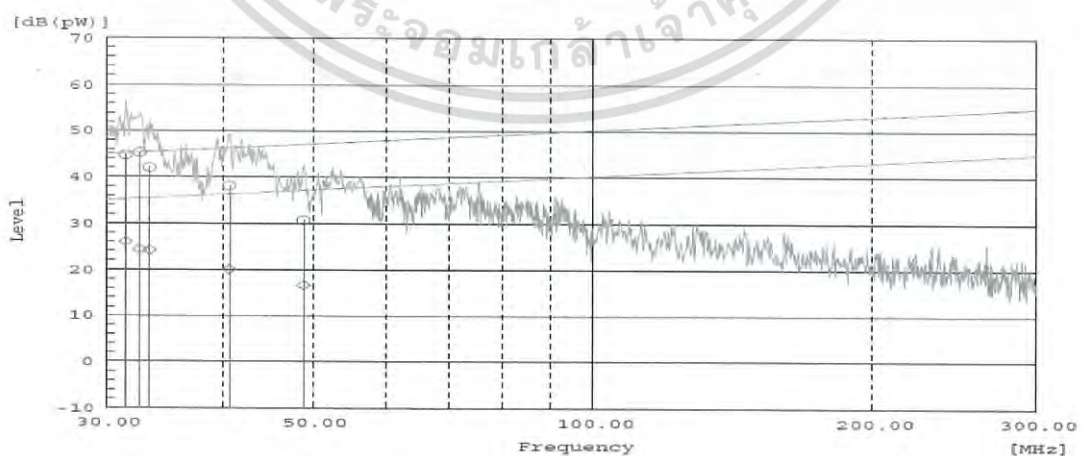
โดยการทดสอบในหัวข้อนี้จะทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากสายตัวนำทั้ง 2 ด้านมีโอกาสจัดวางไว้ใกล้เคียงอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นและเกิดการรบกวนขึ้นได้

4.3.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศซึ่งเกิดจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ โดยเริ่มต้นจากการวัดสายตัวนำในขณะที่อินเวอร์เตอร์พร้อมใช้งาน แต่ยังไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้า ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.20 ก. และตามตารางที่ 4.11 ต่อมาให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระทางไฟฟ้า แล้วทำการวัดสัญญาณรบกวน ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.20 ข. และตามตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจะเห็นว่า เมื่อมีภาระทางไฟฟ้าแล้วสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างที่ความถี่ประมาณ 31 เมกะเฮิร์ตซ์ ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าค่ายอดเสมือนมีค่า 39.6 เดซิเบล และค่าเฉลี่ยมีค่า 25 เดซิเบล แต่เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าแล้วค่ายอดเสมือนเพิ่มเป็น 44.8 เดซิเบล และค่าเฉลี่ยเพิ่มเป็น 26 เดซิเบล รวมทั้งที่ความถี่อื่นเพิ่มขึ้นด้วยดังตารางที่ 4.11 แต่อย่างไรก็ตามค่าสัญญาณรบกวนยังคงผ่านมาตรฐานในทุกย่านความถี่



ก. ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า



ข. ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.20 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีการะทางไฟฟ้าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

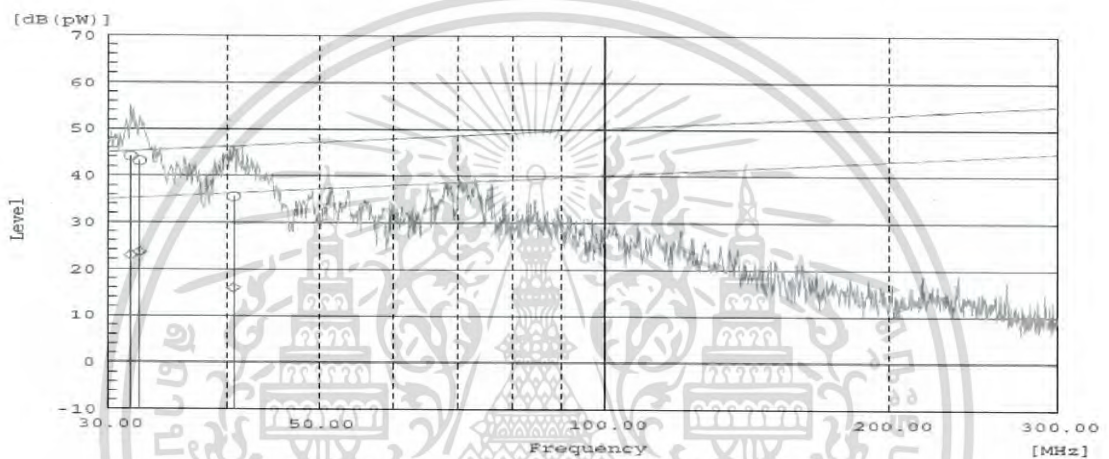
ตารางที่ 4.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ
ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีและมีการะทางไฟฟ้า

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า						
1	30.224	36	19.6	9	15.4	EN55014
2	31.346	39.6	25	5.6	10.2	EN55014
3	31.682	40.1	21	5.1	14.2	EN55014
4	32.355	39.9	22.5	5.4	12.8	EN55014
5	33.029	36.8	22.6	8.6	12.8	EN55014
6	36.057	34.5	20.3	11.3	15.5	EN55014
7	39.422	32.4	19.4	13.8	16.8	EN55014
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	CAV [dB(uV)]	QP [dB]	CAV [dB]	
8	43.798	30.5	16.4	16.1	20.2	EN55014
9	46.37	29.5	14.4	17.4	22.5	EN55014
มีการะทางไฟฟ้า						
1	31.458	44.8	26	0.4	9.2	EN55014
2	32.58	45.3	24.3	0.1	11.1	EN55014
3	33.365	42	24.1	3.5	11.4	EN55014
4	40.657	38.1	20	8.2	16.3	EN55014
5	48.846	30.7	16.6	16.4	20.5	EN55014

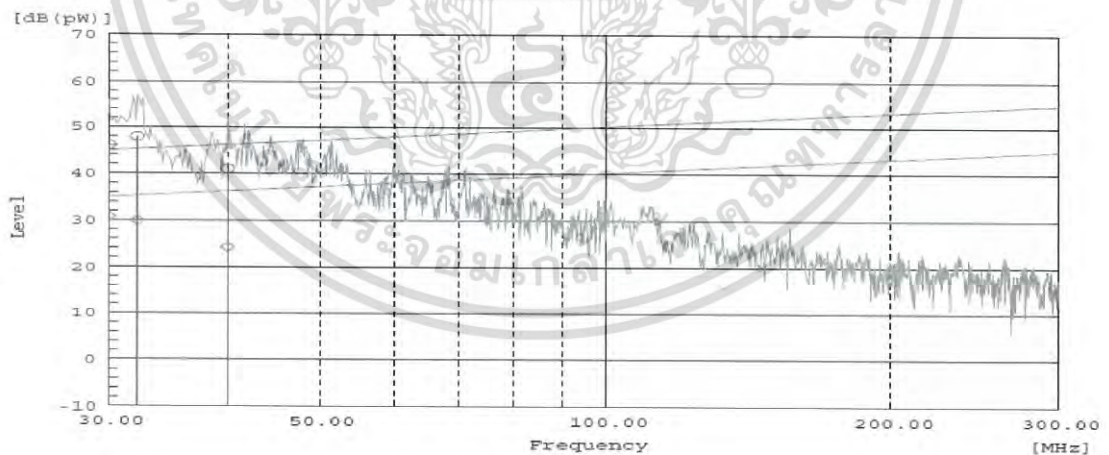
ในส่วนถัดไปจะทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแบบที่ 3 ที่ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระทางไฟฟ้า แล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21 ก. และตารางที่ 4.12 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับขณะที่ยังไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.20 ข. และตารางที่ 4.11 นั้น จะพบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ยกตัวอย่างในความถี่ประมาณ 31 เมกกะเฮิร์ตซ์ หลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแล้วค่ายอดเสมือนมีค่า 44.1 เดซิเบล และค่าเฉลี่ยมีค่า 22.8 เดซิเบล ซึ่งลดลงจากเดิมที่ค่ายอดเสมือนมีค่า 44.8 เดซิเบล และค่าเฉลี่ยมีค่า 26 เดซิเบล ซึ่งสอดคล้องกับย่านความถี่อื่นๆ ตามตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจึงทดสอบเพิ่มเติมโดยการเชื่อมต่อสายดินแล้วทำการวัดค่าสัญญาณรบกวน ซึ่งได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังรูปที่ 4.21 ข. และดังตารางที่ 4.12 จากผลการทดสอบที่ได้ ค่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของสัญญาณรบกวนนี้สอดคล้องกับการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ของระบบในหัวข้อ 4.2.1 กล่าวคือ เมื่อต่อสายดินแล้วค่าสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ประมาณ 10 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในช่วงความถี่ดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายในอากาศจากสายตัวนำจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยนั่นเอง



ก. ไม่เชื่อมต่อสายดิน



ข. เชื่อมต่อสายดิน

รูปที่ 4.21 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟแบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน

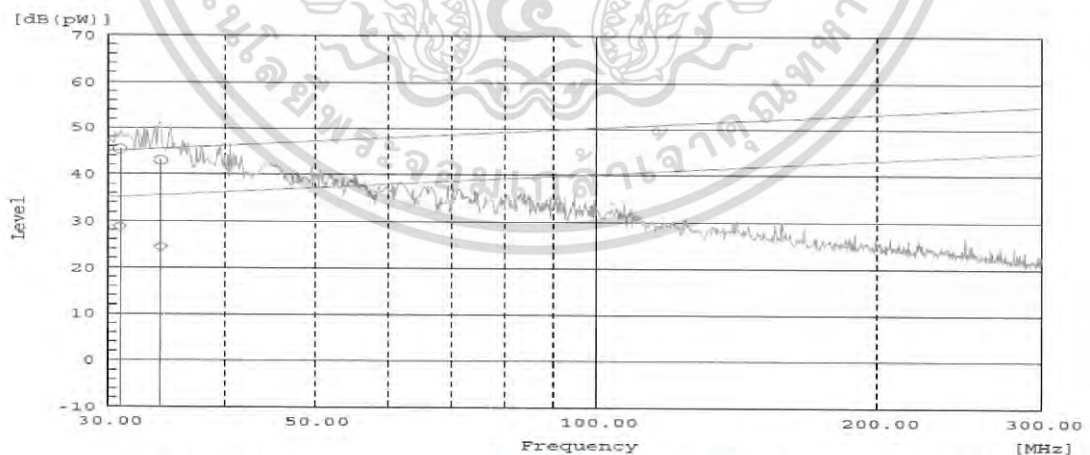
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3						
1	31.683	44.1	22.8	1.1	12.4	EN55014
2	32.356	43.1	23.5	2.2	11.8	EN55014
3	40.657	35.5	15.9	10.8	20.4	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน						
1	30	46.1	30.8	-1.1	4.2	EN55014
2	32.131	47.9	29.9	-2.6	5.4	EN55014
3	39.983	41	24.2	5.2	12	EN55014

4.3.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะแสดงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศซึ่งเกิดจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยเริ่มต้นจากการวัดสายตัวนำในขณะที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้า ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.22 และตามตารางที่ 4.13 ซึ่งมีช่วงที่ไม่ผ่านมาตรฐาน EN55014 ด้วย



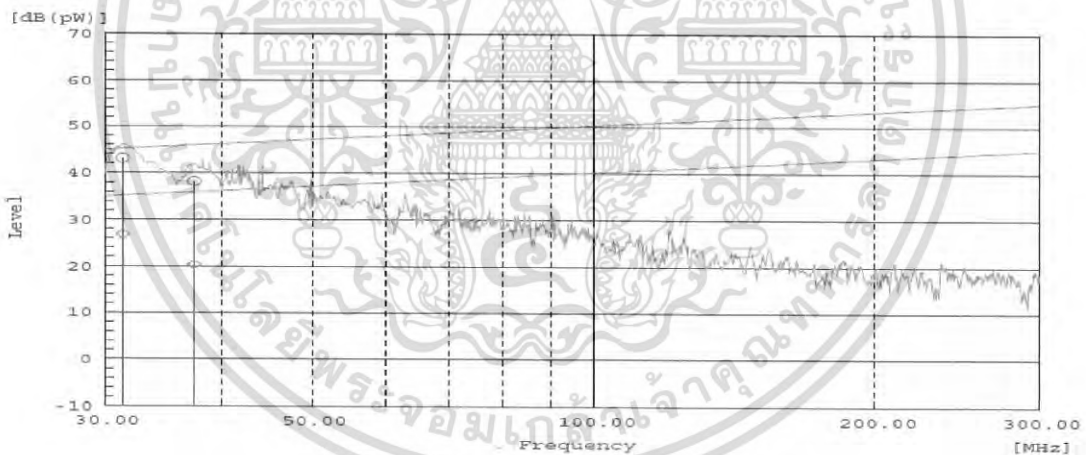
รูปที่ 4.22 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำ
ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

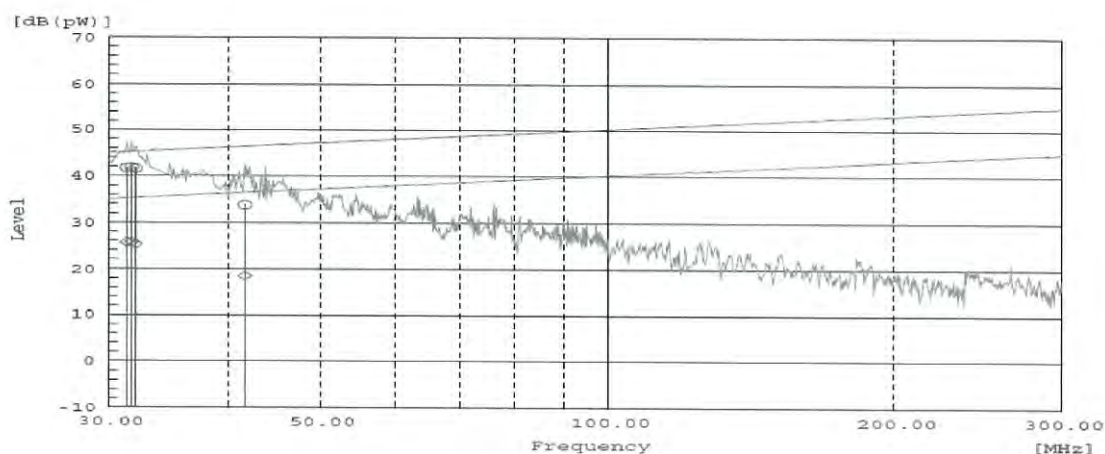
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	CAV [dB(uV)]	QP [dB]	CAV [dB]	
1	30.897	45.4	28.8	-0.3	6.3	EN55014
2	34.15	43	24.4	2.6	11.2	EN55014

ในส่วนถัดไปจะทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแบบที่ 3 ที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระทางไฟฟ้า แล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 ก. และตารางที่ 4.14 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับขณะที่ยังไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.13 นั้น จะพบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงและผ่านมาตรฐานในทุกย่านความถี่ หลังจากนั้นจึงทดสอบเพิ่มเติมโดยการเชื่อมต่อสายดินแล้วทำการวัดค่าสัญญาณรบกวน ซึ่งได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังรูปที่ 4.23 ข. และดังตารางที่ 4.14 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนมีประสิทธิภาพดีขึ้น และค่าสัญญาณรบกวนที่วัดมีค่าลดลงจากเดิม



ก. ไม่เชื่อมต่อสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. เชื่อมต่อสายดิน

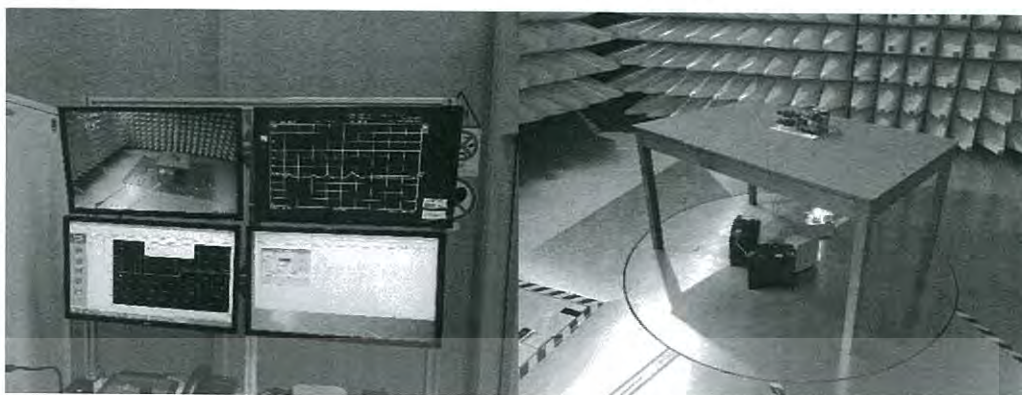
รูปที่ 4.23 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟแบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน

ตารางที่ 4.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่แผ่กระจายจากสายตัวนำด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ขณะมีภาระทางไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟแบบที่ 3 ไม่เชื่อมและเชื่อมต่อสายดิน

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	ผล		ส่วนต่างมาตรฐาน		มาตรฐาน
		QP [dB(uV)]	AV [dB(uV)]	QP [dB]	AV [dB]	
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3						
1	31.346	43.1	26.8	2.1	8.4	EN55014
2	37.404	38.2	20.3	7.8	15.7	EN55014
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ แบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน						
1	31.346	41.7	25.6	3.5	9.6	EN55014
2	31.683	41.8	25.7	3.4	9.5	EN55014
3	32.019	41.6	25.2	3.7	10.1	EN55014
4	41.667	33.7	18.4	12.7	18	EN55014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบ



รูปที่ 4.24 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการวัดสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศ ซึ่งเกิดจากระบบการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจากอินเวอร์เตอร์ อันที่จริงการทดสอบสัญญาณรบกวนทางอากาศที่เกิดจากสายตัวนำในย่านความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถือว่าผ่านมาตรฐาน EN55014 และสามารถใช้งานได้แล้ว แต่เพื่อให้การทดลองในงานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นจึงได้ทำการทดสอบในหัวข้อนี้ ซึ่งทำการวัดสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศรวมทั้งระบบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน EN55022 ในย่านความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 4.24

การทดสอบในหัวข้อนี้จะแสดงสัญญาณรบกวนทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์ จากนั้นใส่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ทำการทดสอบการชิลด์สัญญาณรบกวนทางอากาศ โดยการใช้กล่องโลหะชนิดต่างๆ ตามรูปที่ 4.25

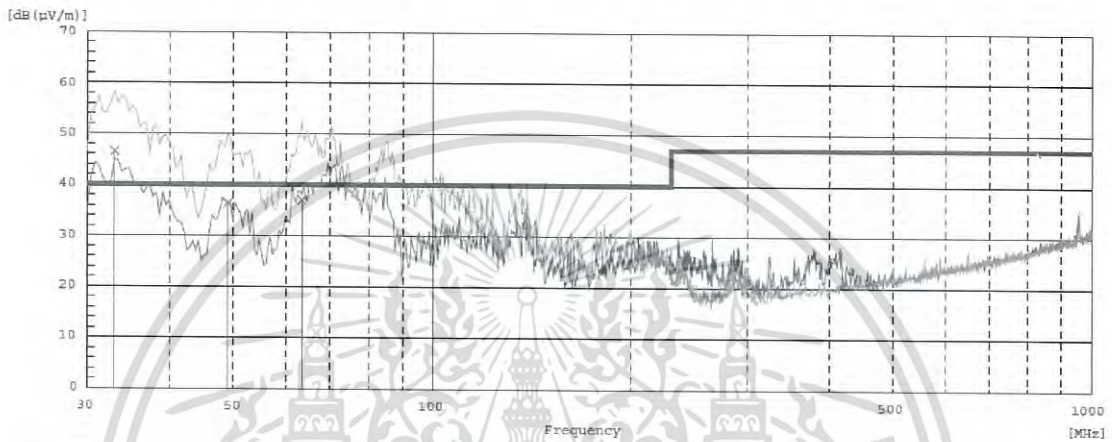


รูปที่ 4.25 วัสดุโลหะที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ

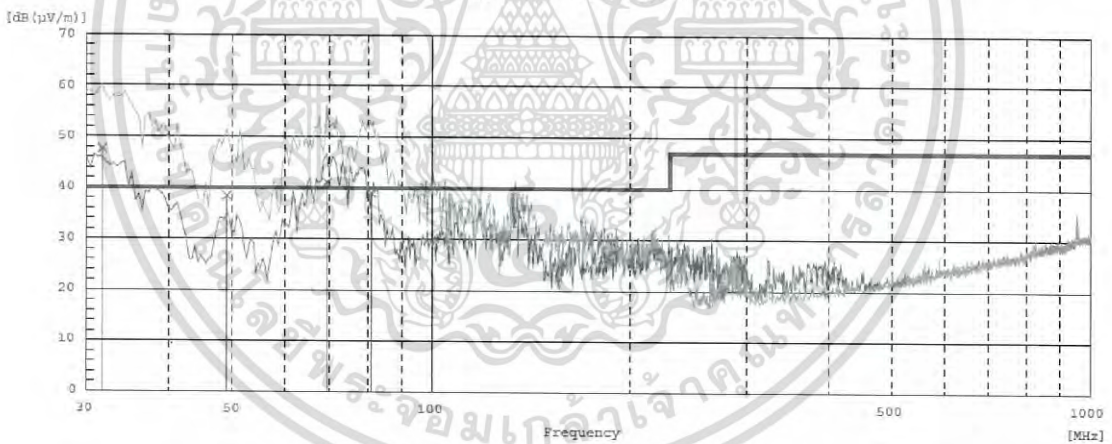
ในขั้นแรกนั้นเริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26 ก. และดังตารางที่ 4.15 แม้ว่าผลทดสอบที่เทียบกับมาตรฐาน EN55022 ไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขการรับรองอุปกรณ์สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบ แต่จัดทำทดสอบขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่างๆ ให้ละเอียดครบถ้วนมากขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้เสมือนการทดสอบของผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบตามมาตรฐาน EN55022 จริง ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบมีค่าสูงเกินมาตรฐานในช่วงต้นของย่านความถี่ที่ทำการทดสอบ จากนั้นให้อินเวอร์เตอร์ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26 ข. และดังตารางที่ 4.15 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จะพบว่าสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นในการทดสอบการลดทอนสัญญาณรบกวนในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบขณะที่อินเวอร์เตอร์มีภาระทางไฟฟ้าทุกกรณี



ก. ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า



ข. ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

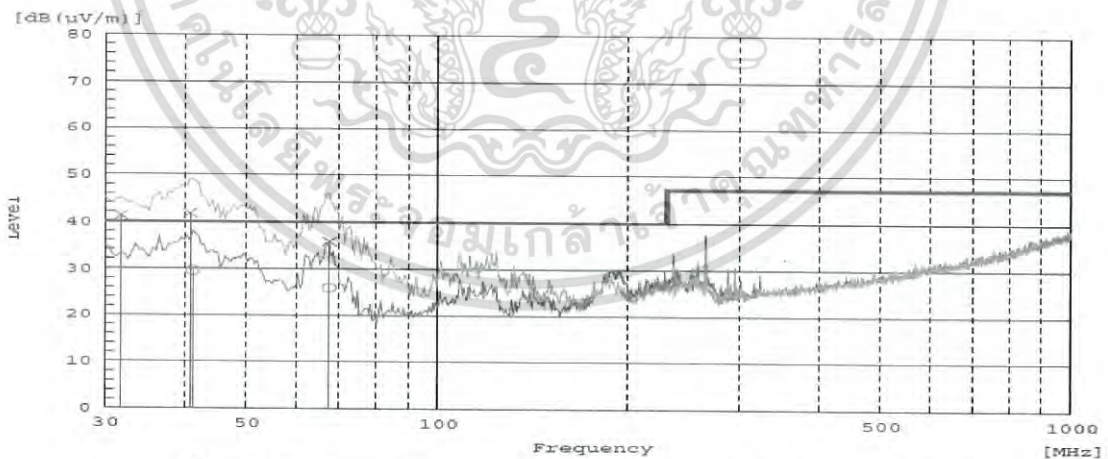
รูปที่ 4.26 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะไม่มีและมภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะไม่มีและมีภาระทางไฟฟ้า

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	แกน	ผล	ส่วนต่างมาตรฐาน	มาตรฐาน
			QP [dB(uV)/m]	QP [dB]	
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า					
1	33.029	Vertical	46.5	-6.5	EN55022
2	49.038	Vertical	36.4	3.6	EN55022
3	63.317	Vertical	37	3	EN55022
มีภาระทางไฟฟ้า					
1	31.737	Vertical	47.6	-7.6	EN55022
2	49.035	Vertical	38.4	1.6	EN55022
3	69.375	Vertical	41.1	-1.1	EN55022
4	81.025	Vertical	39	1	EN55022

ถัดมาได้ทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ 3 ไว้ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ 4 ไว้ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ แล้วทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจึงพบว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อตั้งรูป ที่ 4.27 และตั้งตารางที่ 4.16 การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟมีส่วนช่วยลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบได้เป็นอย่างดี



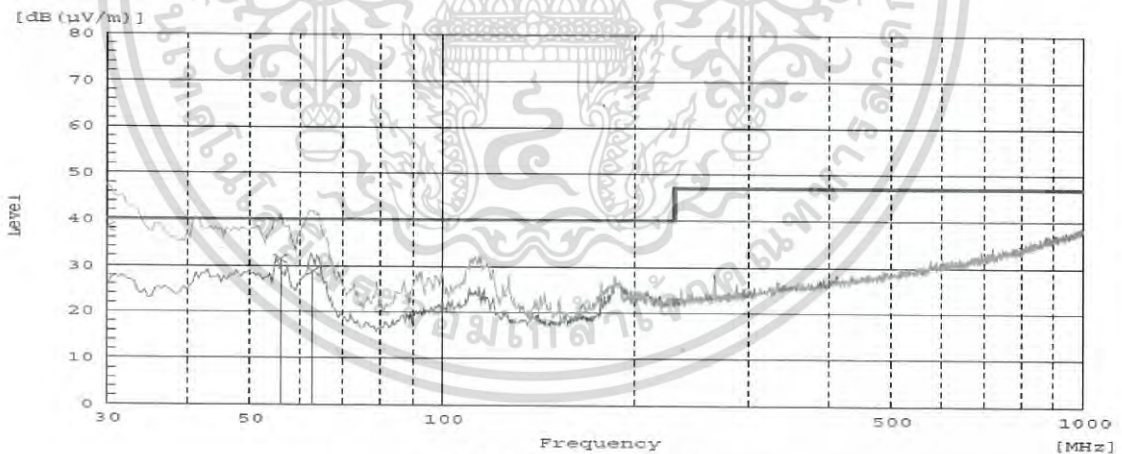
รูปที่ 4.27 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า
และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟ

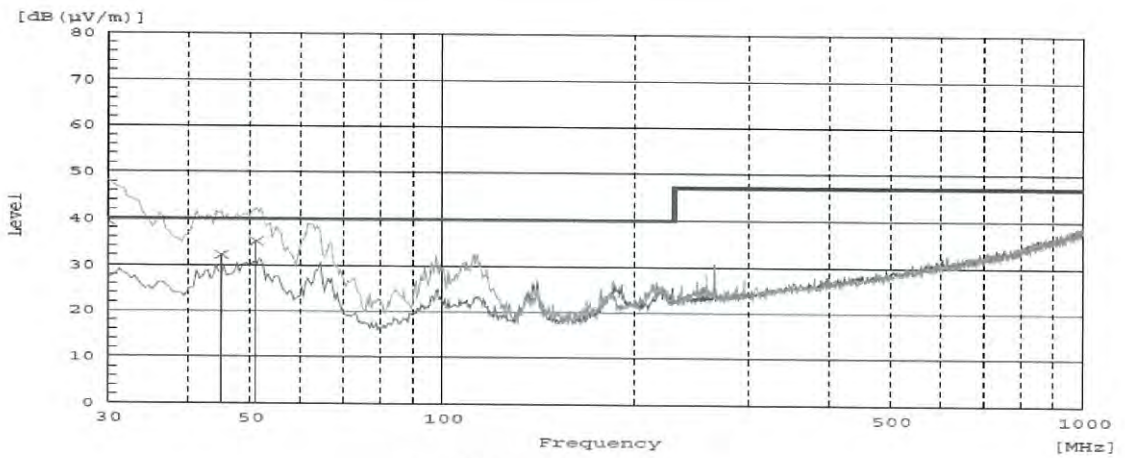
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	แกน	ผล	ส่วนต่างมาตรฐาน	มาตรฐาน
			QP [dB(uV)/m]	QP [dB]	
1	67.644	Vertical	35.8	4.2	EN55022
2	40.817	Vertical	41.7	-1.7	EN55022
3	31.731	Vertical	41.2	-1.2	EN55022
4	67.644	Horizontal	25.9	14.1	EN55022
5	41.25	Horizontal	29.5	10.5	EN55022

ภายหลังจากการนำวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบพาสซีฟมาติดตั้งในระบบทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์แล้ว การทดสอบในส่วนถัดมาได้นำกล่องโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม สแตนเลส และสแตนเลสมีรู มาครอบปิดเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนที่อินเวอร์เตอร์ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.28 และดังตารางที่ 4.17 โดยจะเห็นว่าเมื่อนำกล่องโลหะทั้ง 3 ชนิดมาครอบทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งการใช้วัสดุสแตนเลสมีรูเป็นวงจรกรองทำให้สัญญาณรบกวนลดลงแต่ยังไม่ผ่านมาตรฐาน แต่การใช้วัสดุอลูมิเนียมและสแตนเลสเป็นตัวชีลด์ทำให้สัญญาณรบกวนถูกลดทอนจนผ่านมาตรฐาน

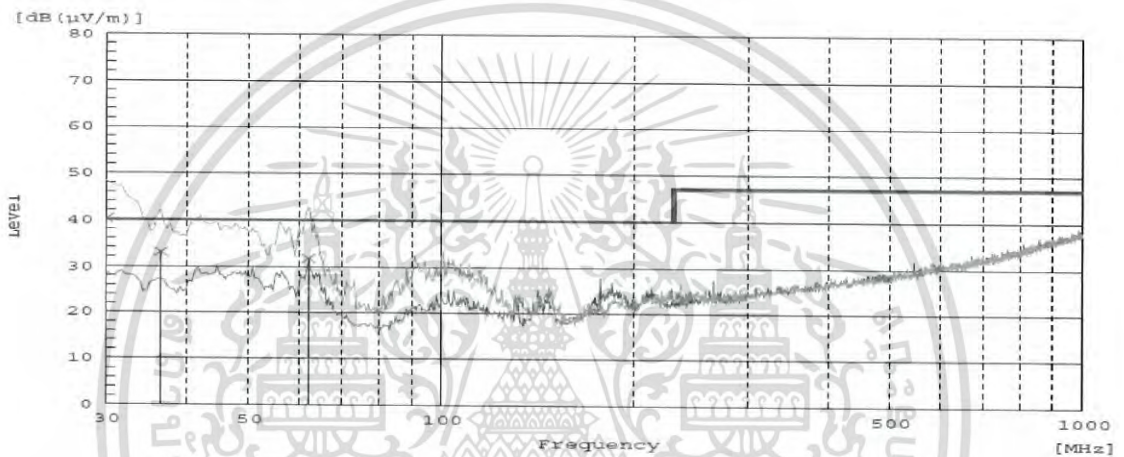


ก. หลังปิดหุ้มด้วยอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. หลังปิดหุ้มด้วยสแตนเลส



ค. หลังปิดหุ้มด้วยสแตนเลสมีรู

รูปที่ 4.28 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟหลังปิดหุ้มด้วยโลหะ

ตารางที่ 4.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศขณะมีภาระทางไฟฟ้า และติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดพาสซีฟหลังปิดหุ้มด้วยโลหะ

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	แกน	ผล	ส่วนต่างมาตรฐาน	มาตรฐาน
			QP [dB(µV)/m]	QP [dB]	
หลังปิดหุ้มด้วยอลูมิเนียม					
1	30	Vertical	38.2	1.8	EN55022
2	55.961	Vertical	31.4	8.6	EN55022
3	62.884	Vertical	28.8	11.2	EN55022
หลังปิดหุ้มด้วยสแตนเลส					
1	30	Vertical	39.4	0.6	EN55022
2	51.202	Vertical	35.1	4.9	EN55022
3	45.144	Vertical	32.1	7.9	EN55022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	แกน	ผล	ส่วนต่างมาตรฐาน	มาตรฐาน
			QP [dB(uV)/m]	QP [dB]	
หลังปิดหุ้มด้วยสแตนเลสมีรู					
1	30	Vertical	40.2	-0.2	EN55022
2	36.49	Vertical	33	7	EN55022
3	62.019	Vertical	31.7	8.3	EN55022

4.5 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างในสายตัวนำ

จากผลการทดสอบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำข้างต้นพบว่าการติดตั้งวงจรกรองและการเชื่อมต่อสายดินเข้าระบบไฟฟ้าด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงแสดงผลการวัดสัญญาณโหมตผลร่วมและสัญญาณโหมตผลต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ และวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างภายหลังจากการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ซึ่งในหัวข้อนี้ได้ยกตัวอย่างกรณีติดตั้งวงจรกรองแบบที่ 3

ในการวัดสัญญาณตามปกติค่าที่ได้จะเป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณโหมตผลร่วมและสัญญาณโหมตผลต่าง ดังนั้นในการวัดผลในหัวข้อนี้จึงทำการวัดสัญญาณด้วยโพรบกระแส การวัดสัญญาณโหมตผลร่วมทำได้โดยการใช้โพรบกระแสคล้องสายเส้นใดเส้นหนึ่งแล้วตามรูปที่ 4.29 ด้านซ้าย แล้ววัดสัญญาณ ในส่วนการวัดสัญญาณโหมตผลต่างสามารถวัดได้ตามรูปที่ 4.29 ด้านขวา

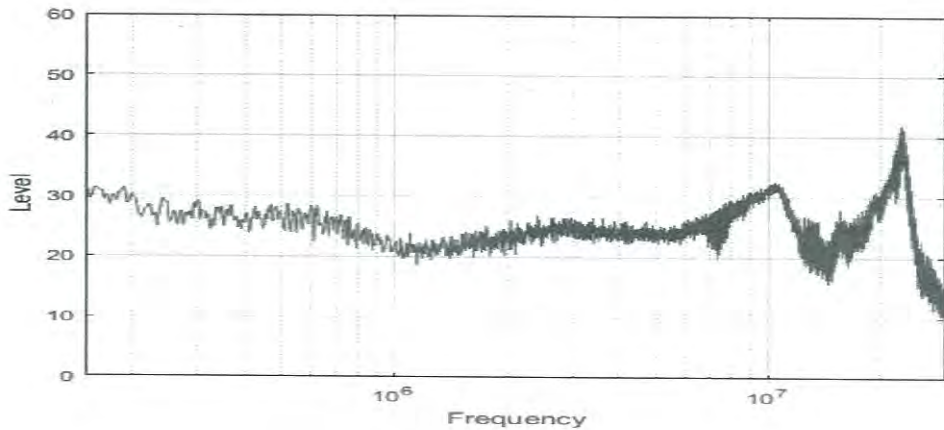


รูปที่ 4.29 การวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง

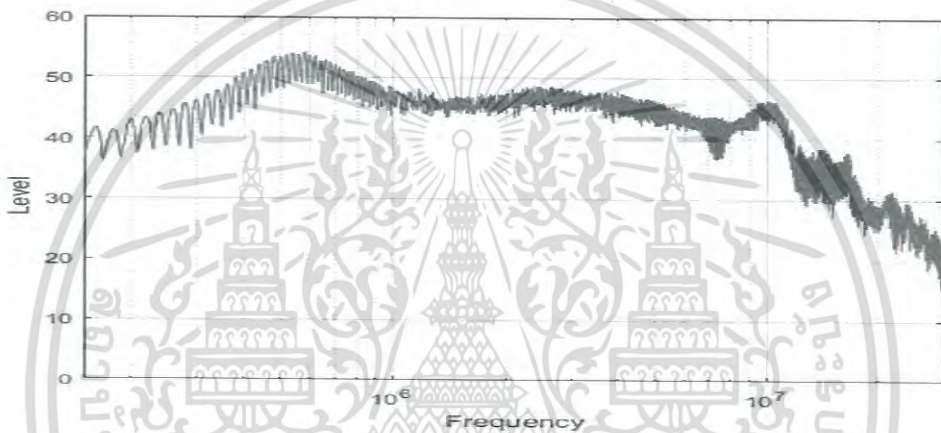
4.5.1 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

ก่อนอื่นเริ่มต้นจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากภาพที่ 4.30 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วม และจากภาพที่ 4.30 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทั้ง 2 โหมตที่เกิดขึ้นที่ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แล้ว พบว่ามีลักษณะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างมีค่าสูงกว่าสัญญาณโหมตผลร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



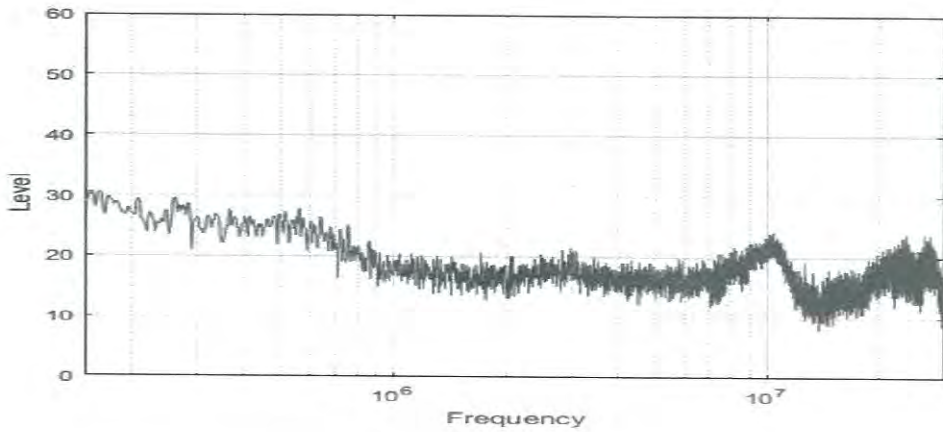
ก. สัญญาณโหมตผลรวม



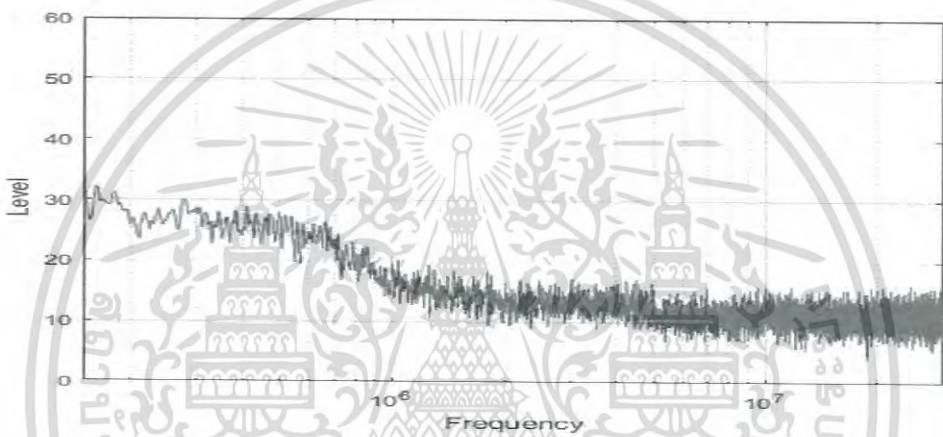
ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

รูปที่ 4.30 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

ถัดมาจึงทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนทั้ง 2 โหมตเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแต่ละโหมต จากภาพที่ 4.31 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลรวม และภาพที่ 4.31 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผลที่ได้พบว่าสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ยังไม่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณ โดยเฉพาะสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างที่ถูกลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสัญญาณโหมตผลรวม



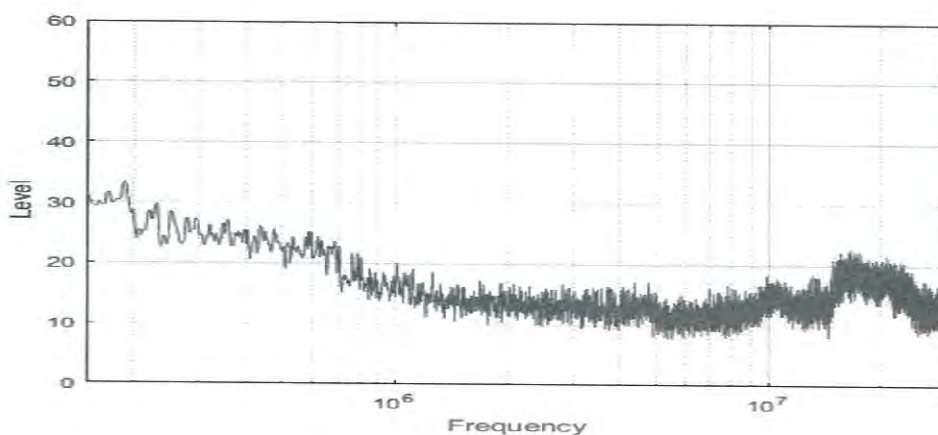
ก. สัญญาณโหมตผลรวม



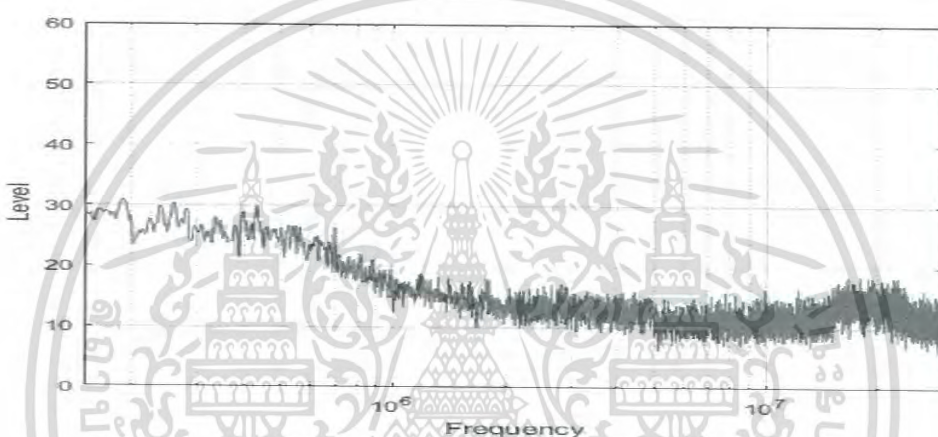
ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

รูปที่ 4.31 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3

ในขั้นสุดท้ายของการวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จะวัดผลหลังจากการเชื่อมต่อสายดิน ในระบบของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งตัวกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปแล้ว ภาพที่ 4.32 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลรวม และภาพที่ 4.32 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างหลังจากเชื่อมต่อสายดินแล้ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมบางช่วงมีค่าลดลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากตัวเก็บประจุโหมตผลรวมมีการต่อลงดิน



ก. สัญญาณโหมตผลรวม



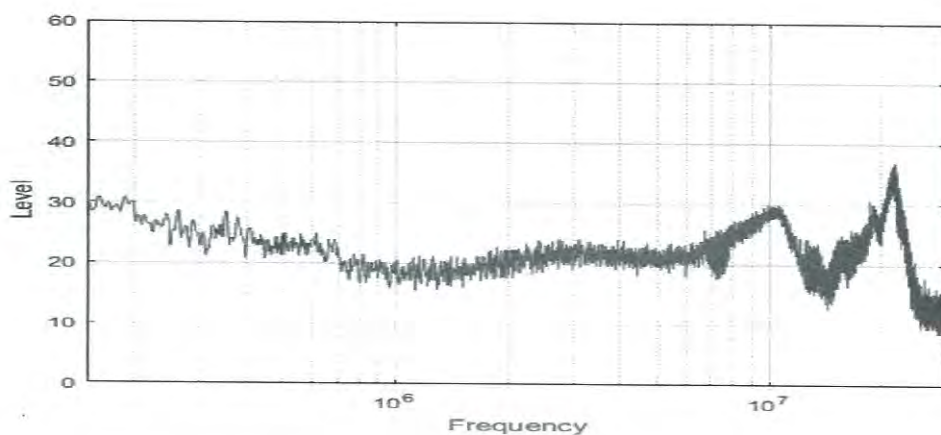
ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

รูปที่ 4.32 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน

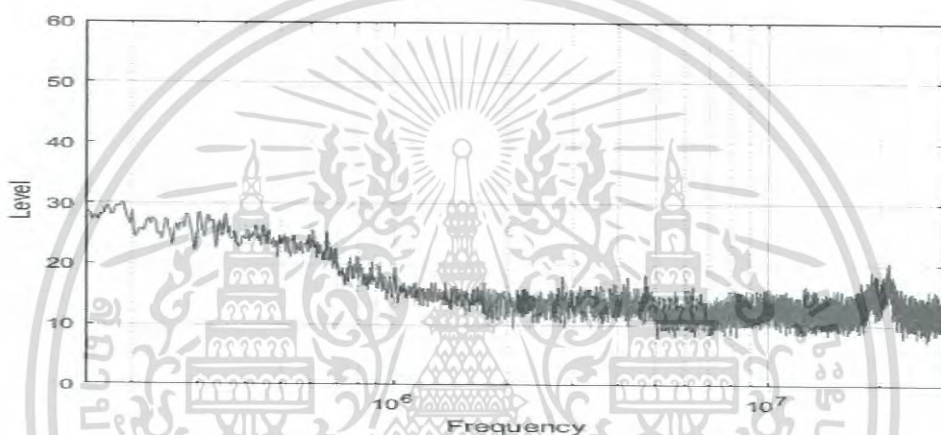
4.5.2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

ต่อมาคือการวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะทำการวัดผลเหมือนด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ คือวัดสัญญาณก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นจะวัดสัญญาณภายหลังเชื่อมต่อสายดินไปแล้ว ก่อนอื่นเริ่มต้นจากภาพที่ 4.33 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลรวม และภาพที่ 4.33 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างของสายตัวนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยจะพบว่าสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมมีค่าสูงกว่าสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. สัญญาณโหมตผลรวม

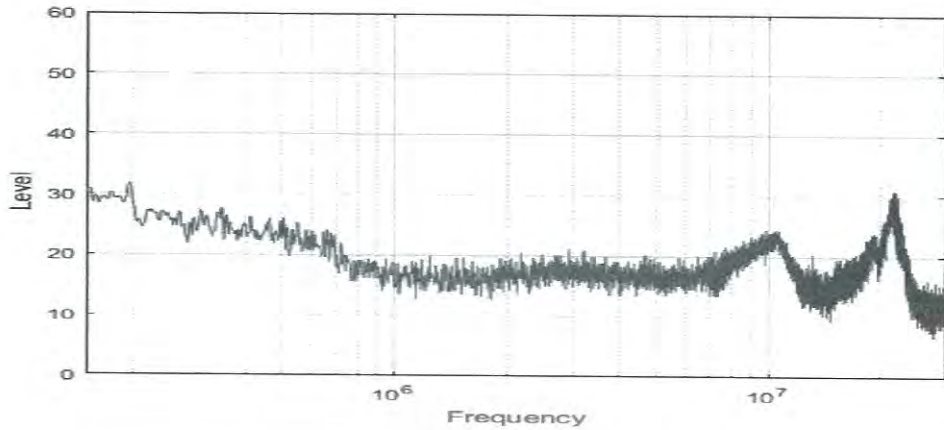


ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

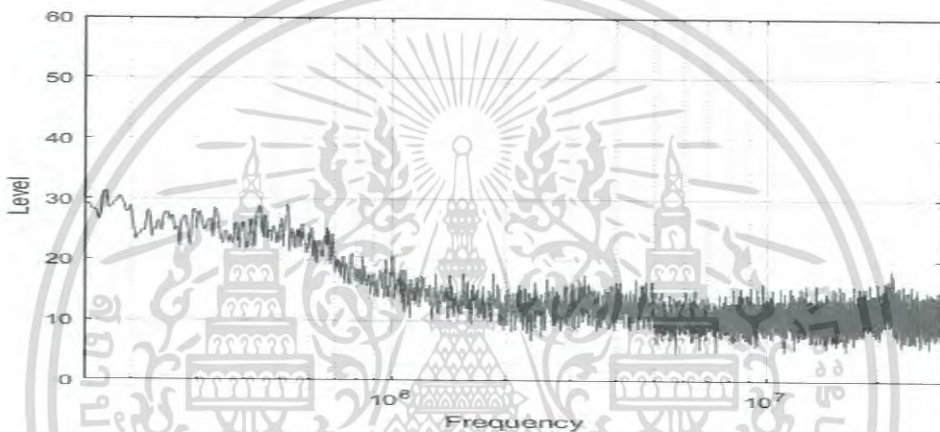
รูปที่ 4.33 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้า

ถัดมาจึงทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 แล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างอีกครั้งหนึ่ง ตามรูป 4.34 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมและรูปที่ 4.34 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแล้ว ผลปรากฏว่าสัญญาณทั้ง 2 โหมตมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



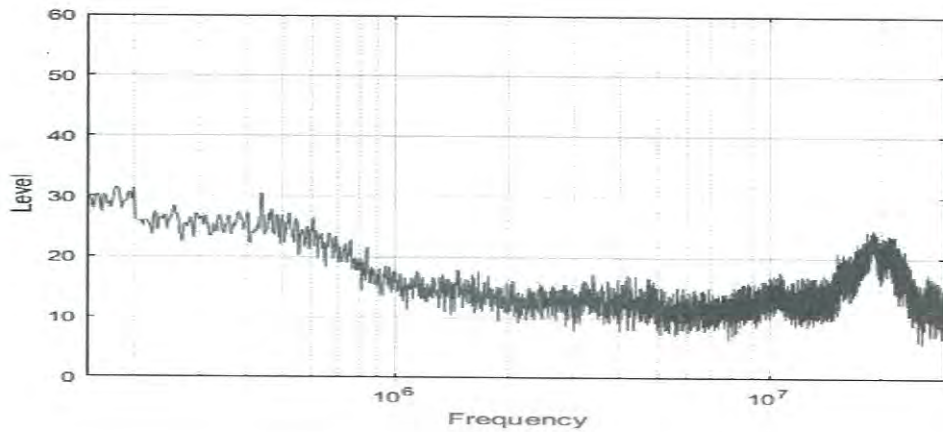
ก. สัญญาณโหมตผลรวม



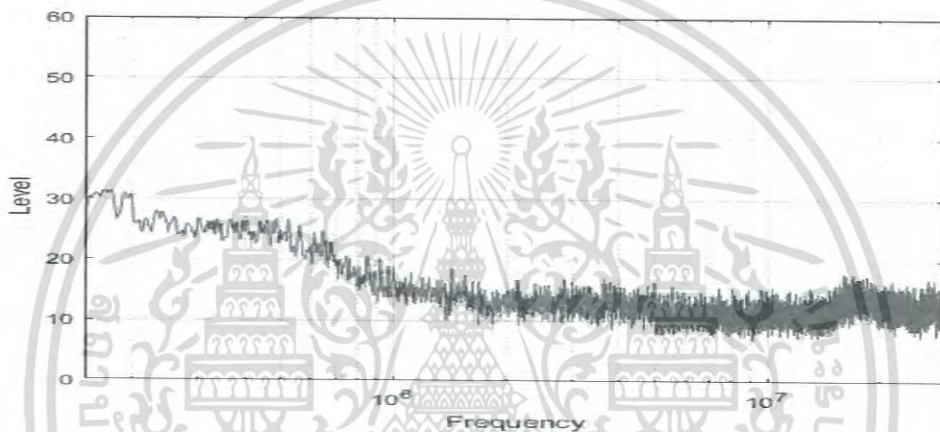
ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

รูปที่ 4.34 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3

ในขั้นสุดท้ายของการวัดสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่าง
ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะวัดผลหลังจากการเชื่อมต่อสายดิน ในระบบของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้ง
ตัวกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปแล้ว ภาพที่ 4.35 ก. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลรวม และภาพที่
4.35 ข. คือสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างหลังจากเชื่อมต่อสายดินแล้ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ
รบกวนโหมตผลรวมลดลงไปอย่างชัดเจนเนื่องจากการต่อสายดินเข้าไปในระบบทำให้วงจรกรอง
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานได้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง



ก. สัญญาณโหมตผลรวม



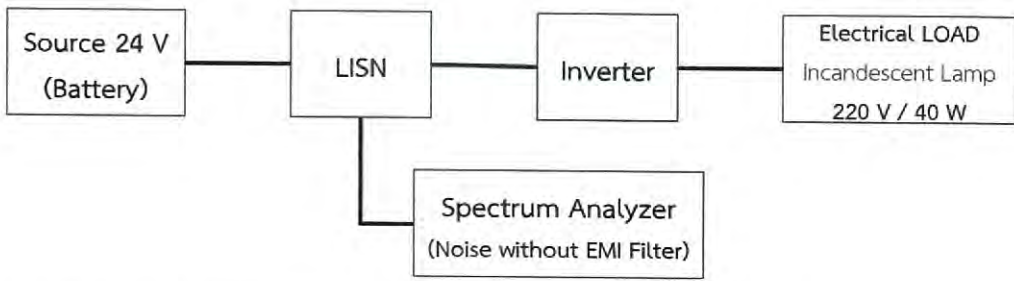
ข. สัญญาณโหมตผลต่าง

รูปที่ 4.35 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมตผลรวมและโหมตผลต่างด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะมีภาระทางไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวกรองสัญญาณแบบที่ 3 เชื่อมต่อสายดิน

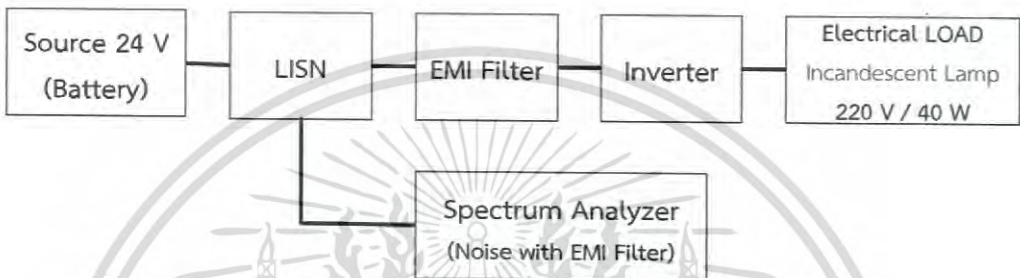
4.6 ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion loss)

การหาค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss) เริ่มต้นจากการวัดสัญญาณแรงดันก่อนติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (V_{Lwo}) ตามภาพที่ 4.36 และวัดสัญญาณแรงดันหลังติดตั้งวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (V_{Lw}) ตามภาพที่ 4.37 เพื่อทำการหาความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกตามสมการที่ (2.28) โดยในการพล็อตกราฟค่าสูญเสียจากการใส่แทรกจะนำข้อมูลจากที่ทำการวัดทั้ง 2 กรณีข้างต้นมาคำนวณในโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขณะไม่ติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

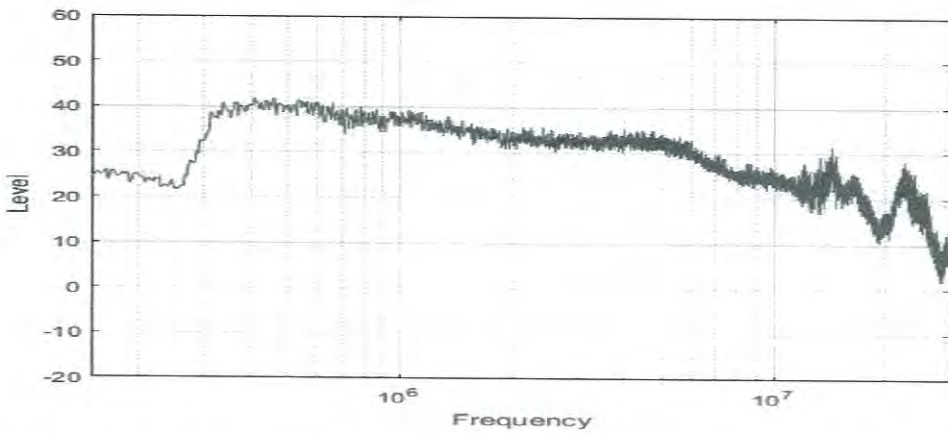


รูปที่ 4.37 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขณะติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

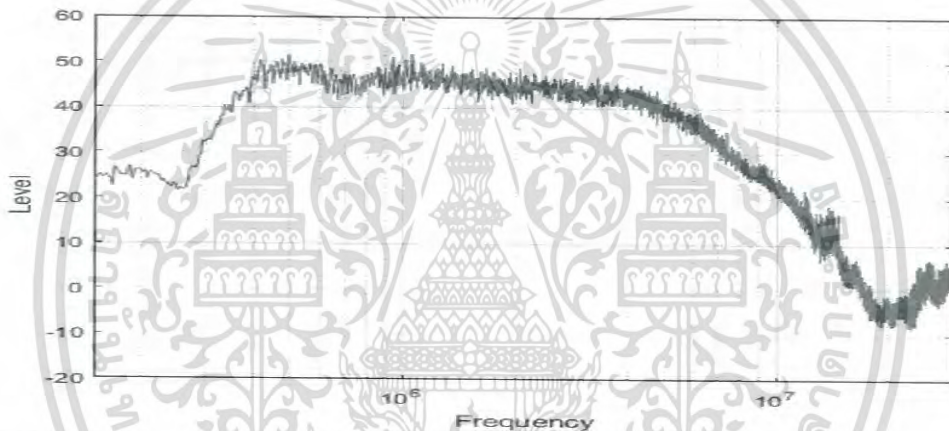
ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ 3 ในกรณีที่ติดตั้งไว้ที่ด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงกรณีไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อสายดินซึ่งในการติดตั้งแต่ละกรณีค่าสูญเสียจากการใส่แทรกก็มีค่าไม่เท่ากัน

เริ่มต้นจากรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงค่าสูญเสียจากการใส่แทรกเมื่อวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ในรูปถัดมาคือรูปที่ 4.39 แสดงค่าสูญเสียจากการใส่แทรกหลังจากเชื่อมต่อสายดินเข้าไปในระบบแล้ว เมื่อเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการใส่แทรกทั้งสองกรณีซึ่งเป็นวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตัวเดียวกันจะพบว่าการต่อสายดินทำให้ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีนี้เมื่อเชื่อมต่อสายดินแล้วค่าสูญเสียจากการใส่แทรกในย่านความถี่ต้นของมาตรฐานมีค่ามากขึ้นแต่ในช่วงท้ายของมาตรฐานค่าสูญเสียจากการใส่แทรกมีค่าน้อยลง หรือสรุปง่าย ๆ ว่าเมื่อเชื่อมต่อสายดินแล้ววงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดทอนสัญญาณได้ดียิ่งขึ้นในช่วงความถี่ต้นของมาตรฐานแต่สามารถลดทอนสัญญาณได้น้อยลงในช่วงความถี่ท้ายของมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

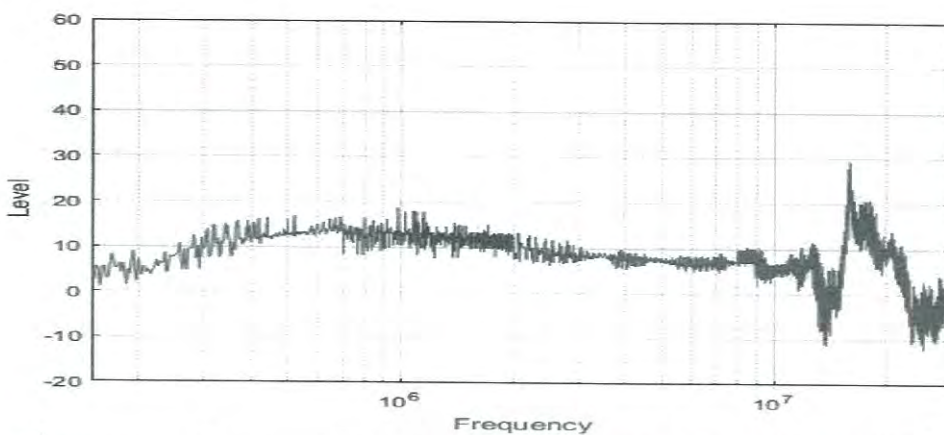


รูปที่ 4.38 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

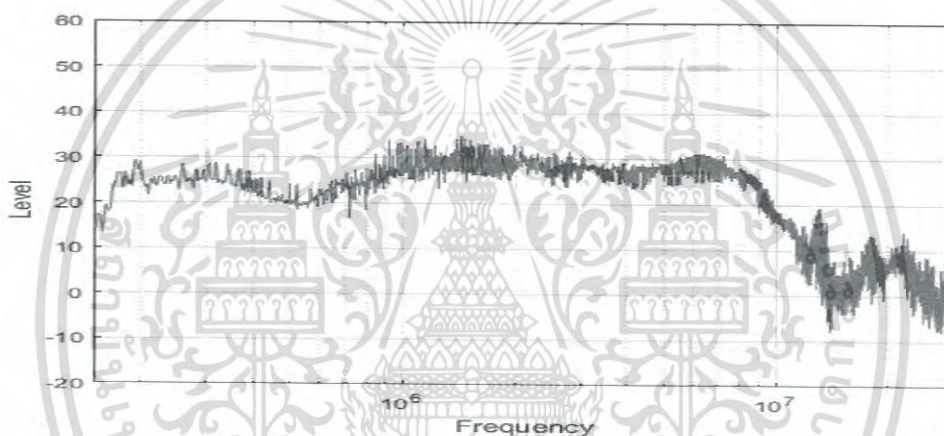


รูปที่ 4.39 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายดิน

ถัดมาเป็นการหาค่าสูญเสียจากการใส่แทรกเมื่อวงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.40 ซึ่งพบว่ามีค่าสูญเสียจากการใส่แทรกน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อติดตั้งวงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ ถัดมาในรูป 4.41 แสดงค่าสูญเสียจากการใส่แทรกหลังจากเชื่อมต่อสายดินเข้าไปในระบบแล้ว เมื่อเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการใส่แทรกทั้งสองกรณีแล้วพบว่าเมื่อเชื่อมต่อสายดินแล้ววงจรรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดทอนสัญญาณได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมซึ่งเกิดมากที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้นั่นเอง



รูปที่ 4.40 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.41 ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อติดตั้งด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบในบทที่ 4 ที่ผ่านมาได้ทำการทดลองโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากสายตัวนำ รวมทั้งเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศทั้งระบบ ซึ่งได้ทำการทดสอบหลากหลายกรณี ดังนั้นในบทนี้จะทำการสรุปผลที่ดำเนินการทดลองในบทที่ 4 รวมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่ออย่างงานวิจัยนี้ด้วย

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในบทที่ 4 ไม่ว่าจะเป็นการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากสายตัวนำทั้งด้านขาเข้าและขาออกจากอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบ ได้ผลการทดลองตรงกันว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้าแล้วนั้นจะทำให้สัญญาณรบกวนทุกแบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองการทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์แปรผันกำลังไฟฟ้าจะต้องทดสอบขณะมีภาระทางไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการใช้งานจริง

ถัดมาการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยการใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทั้ง 4 แบบ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55014 จะพบว่าการติดตั้งสายดินช่วยให้การลดทอนสัญญาณรบกวนมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการลดทอนสัญญาณรบกวนด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องติดตั้งสายดินเพื่อให้สัญญาณรบกวนต่ำลงจนผ่านมาตรฐาน แต่การเชื่อมต่อสายดินนั้นจะส่งผลให้ค่าสัญญาณรบกวนในช่วง 10 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและทำให้สัญญาณรบกวนไม่ผ่านมาตรฐานในการใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งค่าของอุปกรณ์และชนิดของตัวเก็บประจุไม่ได้ถูกออกแบบและเลือกใช้โดยอ้างอิงมาตรฐาน แต่เมื่อเปลี่ยนไปใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 และ 4 ซึ่งออกแบบตามมาตรฐานโดยคำนึงถึงกระแสรั่วไหลเพื่อความปลอดภัยและชนิดของตัวเก็บประจุโดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุ Class X และ Class Y ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้สร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะตามมาตรฐานการผลิต ทำให้สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ดังกล่าวผ่านมาตรฐานในที่สุด

การที่เชื่อมต่อสายดินแล้วทำให้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟทำงานมีประสิทธิภาพสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ดีเมื่อเทียบกับการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ โดยสามารถวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมและสัญญาณรบกวนโหมตผลต่างของทั้งสองด้านของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งด้านขาเข้านั้นมีสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนโหมตผลร่วมด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการเชื่อมต่อสายดินซึ่งเป็นการลดทอนสัญญาณโหมตผลร่วมโดยตรงจึงเห็นผลชัดเจนมากในด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

ถัดมาในส่วนของการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากสายตัวนำซึ่งทดสอบเทียบกับมาตรฐาน EN55014 จะพบว่าในด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าผ่านมาตรฐานอยู่แล้ว จากนั้นเมื่อทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟแล้วสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเชื่อมต่อสายดินแล้วส่งผลให้สัญญาณรบกวนทางอากาศในช่วงความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ เพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง เมื่อพิจารณาด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะพบว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากสายตัวนำมีค่าสูงเกินมาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งภายหลังการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแล้วสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนให้ลดลงจนผ่านมาตรฐาน จากนั้นเมื่อทำการเชื่อมต่อสายดินพบว่าสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงอีก

ในส่วนสุดท้ายคือการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศรวมทั้งระบบ ซึ่งเป็นการทดสอบเพิ่มเติมโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 จะพบว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระทางไฟฟ้าแล้ว ทำให้สัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้นเหมือนกับการทดสอบในกรณีที่ผ่านมา และที่น่าสนใจคือเมื่อทำการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่ด้านขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์แล้วทำให้สัญญาณรบกวนรวมทั้งระบบมีค่าลดลงอย่างมาก จากการทดสอบในส่วนนี้ทำให้เห็นถึงความสำคัญของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเท่านั้นแต่ยังช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศได้อีกด้วย นอกจากนี้การใช้กล่องวัสดุโลหะชิลด์อินเวอร์เตอร์ช่วยให้สัญญาณรบกวนมีค่าลดลงจนผ่านมาตรฐาน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบการลดทอนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัดจริงแล้ว จะเห็นว่าจากการทดสอบนั้นวัสดุโลหะลดทอนสัญญาณรบกวนได้ไม่มาก เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นยังคงมีอยู่ในสายตัวนำ แต่วัสดุโลหะที่ใช้ชิลด์ปิดครอบไว้เพียงอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ควรเลือกค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย และเลือกตัวเก็บประจุที่ผ่านมาตรฐานสำหรับการใช้สร้างวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะ
2. ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าควรทำการทดสอบขณะที่อุปกรณ์ทำงานจริงทั้งการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและทางอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบอินเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์ที่มีการรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระทางไฟฟ้า จะต้องทำการทดสอบสัญญาณรบกวนและลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ด้าน เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่น

4. เนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนเส้นทางเดินได้ทั้งจากการที่ไหลในสายตัวนำแล้วเปลี่ยนเส้นทางการแผ่กระจายเป็นทางอากาศ หรือการที่สัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศจะเปลี่ยนเข้ามาแผ่กระจายทางสายตัวนำก็ได้ ด้วยเหตุนี้การป้องกันการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบจึงเป็นสิ่งสำคัญ

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

ในงานวิจัยนี้ได้จัดทำวงจรกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์จนมามาตรฐานแล้วนั้น ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อได้อย่างมากมาย ทั้งการทำให้วงจรกรองสัญญาณมีขนาดเล็กลงหรือใช้ความรู้ที่ได้นี้ปรับปรุงวงจรกรองเพื่อให้สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากยิ่งขึ้นเพื่อให้มีส่วนต่างมาตรฐานเผื่อไว้เพิ่มขึ้น รวมทั้งอาจจะทดสอบเชิงประสิทธิผลกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปที่วงจรกรองสัญญาณแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถจัดทำวงจรกรองสัญญาณชนิดอื่น เช่น วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแอคทีฟหรือแบบไฮบริด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตัวการสัญญาณรบกวนแบบพาสซีฟในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้การทดสอบอุปกรณ์ในมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้มีเพียงแต่การทดสอบการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าเท่านั้น หากแต่ยังมีการทดสอบในหัวข้ออื่นๆ อีก เช่น การทดสอบภูมิคุ้มกันแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเป็นหัวข้อที่สามารถต่อยอดงานวิจัยนี้ได้ทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. 2558. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015). กรุงเทพฯ : สำนักนโยบายและพลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2: พลังงานแสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEP2015). กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. เทคโนโลยีแสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ : สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [6] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg. 2002. "Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules - A Review." 782-788. in Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344). vol. 2. Pittsburgh : IEEE.
- [7] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg. 2005. "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules." 1292-1306. in IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 41. no. 5. n.p. : IEEE.
- [8] Q. Li and P. Wolfs. 2008. "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC Link Configurations." 1320-1333. in IEEE Transactions on Power Electronics. vol. 23. no. 3. n.p. : IEEE.
- [9] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] 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.
- [11] T. Sai, A. Kitamura, B. G. Yu, X. D. Sun and M. Matsui. 2015. "Distributed MPPT PV System with Current Source Inverter." 2059-2064. in **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Yokohama : IEEE.
- [12] S. Biricik, H. Komurcugil and M. Basu. 2016. "Photovoltaic Supplied Grid-Tie Three-Phase Inverter with Active Power Injection and Reactive Harmonic Current Compensation Capability." 3087-3092. in **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Florence : IEEE.
- [13] X. Xu *et al.*. 2016. "Harmonic Emission of PV Inverters Under Different Voltage Supply Conditions and Operating Powers." 373-378. in **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. Belo Horizonte : IEEE.
- [14] กรมการกิจการพลังงาน. 2559. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 53ง ระเบียบคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ว่าด้วยมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า วิธีการตรวจสอบ และการรับรองผลการตรวจสอบอุปกรณ์ประเภทอินเวอร์เตอร์ (Grid-connected inverter) ระบบแรงดันต่ำ พ.ศ. 2559. กรุงเทพฯ : กรมการกิจการพลังงาน.
- [15] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi and S. Bertone. 2009. "EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants." 639-648. in **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. vol. 51, no. 3. n.p. : IEEE.
- [16] D. Hamza and P. Jain. 2010. "Conducted EMI in grid-tied PV system." 1-7. in **Intelec 2010**. Orlando, FL : IEEE.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] F. Luo *et al.* 2011. "On discussion of AC and DC Side EMI Filters Design for Conducted Noise Suppression in DC-fed Three Phase Motor Drive System." 667-

672. in **2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. Fort Worth, TX : IEEE.

[20] 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.

[21] X. Zhang, D. Boroyevich, P. Mattavelli, J. Xue and F. Wang. 2013. "EMI Filter Design and Optimization for Both AC and DC Side in a DC-fed Motor Drive System." 597-603. in **2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. Long Beach, CA : IEEE.

[22] 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.

[23] 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.

[24] D. Hamza and K. H. A. Hosani. 2014. "DC-link Input EMI Filter Design in a Centralized Architecture PV Inverter: Impedance Approach." 4777-4783. in **2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. Pittsburgh, PA : IEEE.

[25] 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.

[26] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์. 2554. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics**. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : วี.เจ. ปรินติ้ง.

[27] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2554. **แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง Switch-Mode Power Supplies**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.

[28] มงคล ทองสงคราม. 2551. **อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : วี.เจ. ปรินติ้ง.

[29] ประจัน พลังสันติกุล. 2551. **การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C**. กรุงเทพฯ : แอพซอพท์เทค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2559. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559. กรุงเทพฯ : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [31] การไฟฟ้านครหลวง. 2558. ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558. กรุงเทพฯ : การไฟฟ้านครหลวง.
- [32] 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.
- [33] V. Prasad Kodali. 2001. Engineering Electromagnetic Compatability: Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models. 2nd ed. n.d. : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [34] Williams, T. 2001. EMC for Product Designers. 3rd ed. Oxford : Newnes.
- [35] ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. 2549. EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ – มาตรฐานและการทดสอบ. กรุงเทพฯ : แอคทีฟ พรินท์.
- [36] ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. 2549. EMC 2: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ – มาตรฐานและการติดตั้ง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [37] Henry W. Ott. 2009. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey : John Wiley.and Sons.
- [38] Clayton R. Paul. 2006. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. New Jersey : John Wiley.and Sons.
- [39] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้าและเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน : ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [40] CISPR14-1. 2016. Electromagnetic compatibility – Requirements for Household Appliances, Electric Tools and Similar Apparatus. 6th ed. Geneva : International Electrotechnical Commission.
- [40] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในที่อยู่อาศัย เครื่องมือไฟฟ้าและเครื่องสำเร็จที่คล้ายกัน : ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. **บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ : ชิดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ**. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [42] EN55022. 2006. **Information Technology Equipment – Radio Disturbance Characteristics – Limits and Methods of Measurement**. Brussels : European Committee for Electrotechnical Standardization.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] IEC 60939-1. 2010. **Passive Filter Units for Electromagnetic Interference Suppression – Part 1: Generic Specification**. 3rd ed. Geneva : International Electrotechnical Commission.
- [47] 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.
- [48] International TOR Rectifier. 2005. **IRFP3710PbF: HEXFET Power MOSFET**. n.p. : International TOR Rectifier.
- [49] International TOR Rectifier. 2005. **IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF: High and Low Side Driver**. n.p. : International TOR Rectifier.
- [50] Microchip. 2005. **DsPIC30F4011/4012 Data Sheet: High Performance Digital Signal Controllers**. n.p. : Microchip Technology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis and Mitigation of Conducted Electromagnetic Interference in a Photovoltaic Single-Phase Inverter

Jukkrit Jiraprasertwong

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
j.jukkrit@gmail.com

Chaiyan Jettanasen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
kjchaiya@kmitl.ac.th

Abstract—This paper focuses on analysis and mitigation of conducted electromagnetic interference (EMI) in a single-phase inverter connected to photovoltaic panel. A photovoltaic inverter composed in the considered system is a main part to generate EMI. Many causes of conducted noise emission will be revealed and discussed in the paper. To overcome EMI problems, there are several methods; some mitigation approaches will be herein mentioned, such as grounding, filtering, and reducing parasitic element. In order to effectively reduce EMI in the studied system, passive EMI filter is focused. Simulation and experimental results for two configurations: without EMI filter and with EMI filter are shown and compared with an EMC standard, which is herein EN 55022 class B to reveal the effectiveness of EMI filter and confirm the Electromagnetic Compatibility (EMC) of the system.

Keywords—electromagnetic interference (EMI); EMI mitigation method; passive EMI filter; photovoltaic inverter

I. INTRODUCTION

In recent years, photovoltaic panels have been increasingly used to connect to power converter or battery for many applications. Solar energy is very popular to be converted into electric power because it is clean energy and also available without the cost of fuel. In photovoltaic system, it cannot function without switching devices even though the electrical energy is used as dc or ac currents. In this paper, ac current is aimed to be produced from photovoltaic panels; the inverter must be, thus, employed for conversion of direct current into alternative current. The use of the inverter will generate electromagnetic interference (EMI) in the system. In fact, EMI has been discussed and solved for many decades. This is an important issue in power electronic application. EMI in photovoltaic system is also studied and analyzed [1]-[3] because it is composed of power converter or power inverter used to convert solar energy into electrical energy. In addition, there is a research on new dc line impedance stabilization network (LISN) for EMC measurements on the dc side of PV systems, presented in [4]. EMI generated in the system can be conducted and/or radiated EMI. However, this paper focuses particularly on conducted EMI from the inverter flows through the photovoltaic panels.

In this paper, the conducted EMI issued from single-phase inverter is first presented and discussed. Second, conducted EMI mitigation techniques are described and some simulated results are shown. The experimental setup and results are then shown and discussed to reveal the effectiveness of the passive EMI filter and confirm the Electromagnetic Compatibility (EMC) of the photovoltaic inverter system.

II. CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE FROM SINGLE-PHASE INVERTER

EMI can occur either from nature such as lightning or from man-made devices. The inverter, which is nonlinear device and functions with high frequency switching, is a kind of man-made equipment capable of generating both conducted and radiated EMI. Due to the operating of inverter, high $\frac{dv}{dt}$ and high $\frac{di}{dt}$ are occurred; this will generate an EMI problem. Many causes of EMI generation are as follows: PWM strategy, parasitic element, couplings in system, printed circuit board (PCB) and etc.

Concerning the conducted electromagnetic interference, it is separated into 2 modes: common mode (CM) and differential mode (DM). CM and DM noises are theoretically determined using equations (1) and (2).

$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \quad (1)$$

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

Where

V_{LG} : voltage difference between line and ground

V_{NG} : voltage difference between neutral and ground

In order to investigate CM and DM noises generated in the studied system, the simulation is first carried out in PSim as shown in Fig. 1. The simulation results of CM and DM noises at the input of inverter are illustrated in Fig. 2 and Fig. 3. The both simulation results start from 9 kHz to 30 MHz and compared with EN 55022 class B standard.

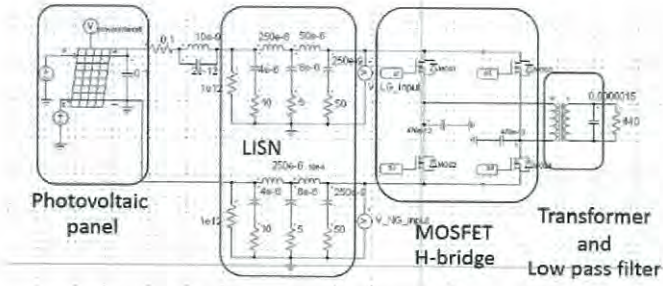


Figure 1. Photovoltaic system in simulation circuit

In EN 55022 standard, the conducted EMI frequency range is from 150 kHz to 30 MHz and this standard refers to “information technology equipment radio disturbance characteristics limits and methods of measurement”.

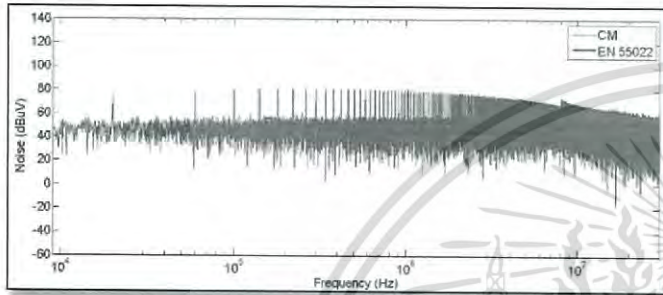


Figure 2. Common mode noise at the input of inverter, compared with EN 55022 class B standard

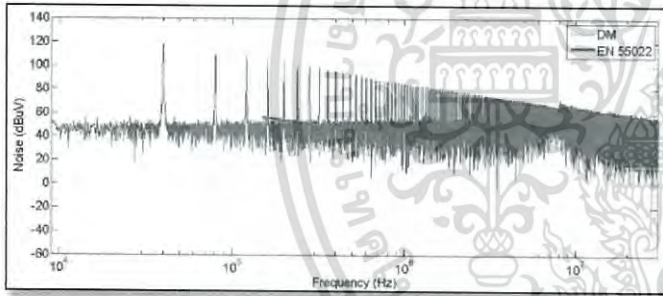


Figure 3. Differential mode noise at the input of inverter, compared with EN 55022 class B standard

The simulated CM and DM noises exceed the standard level, it requires thus an EMI mitigation technique to solve EMI problem.

III. CONDUCTED EMI MITIGATION TECHNIQUES

Electromagnetic interference (EMI) is an important issue in power electronic circuit as well as EMI mitigation technique. There are nowadays a number of classical and/or innovative approaches used to reduce EMI. Some techniques will be presented in this paper.

A. Grounding

The grounding system or ground plane is an important part in circuit. The good grounding design can reduce noise emission. Grounding issue is presented in [5-6].

B. Filtering

EMI filter is a good solution for reducing conducted noise emission. EMI filter is a tool that is widely used and popular in electronic circuit. Since the filter is a main part to control or suppress noises, so it has been increasingly developed or improved. Now, the filter has many types such as passive EMI filter, active EMI filter, and hybrid EMI filter.

1) *Passive filter*: Passive filter has a simple topology. However, it can mitigate conducted noise emission. Its structure is shown in Fig. 4.

The components in this circuit are a coupling inductor, two common mode capacitors (C_Y), and two differential mode capacitors (C_X) [7]. The coupling inductor and common mode capacitors are used to reduce common mode noise whereas the differential mode capacitors are used to reduce differential mode noise. The noise from photovoltaic system in fig.1 can be simulated and shown in Fig. 5; the magnitude is much higher than the applied standard on all the frequency range. When inserting the mentioned EMI filter at the input of the inverter, the reduced noise becomes lower than the standard as depicted in Fig.6. This shows the effectiveness of the EMI filter and the EMC of the photovoltaic system.

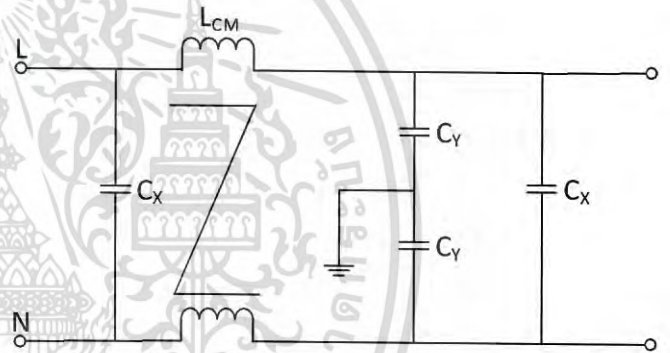


Figure 4. Structure of passive EMI filter

Several techniques or issues can be applied to design EMI filter, for example, by using high frequency model with parasitic element [8], or by using scattering parameters [9-10].

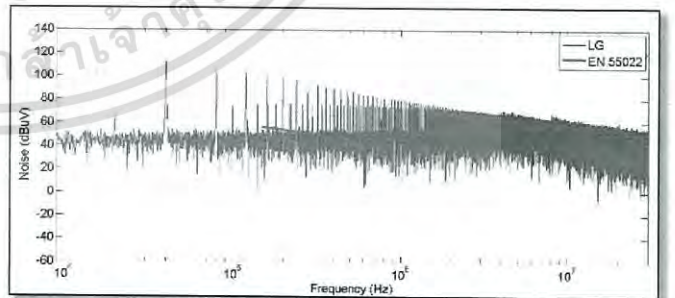


Figure 5. Electromagnetic noise at the input of the inverter without passive EMI filter, compared with EN 55022 class B standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

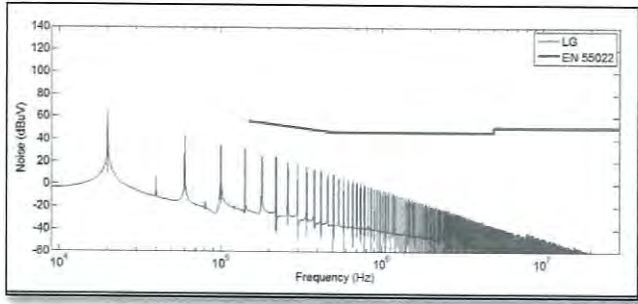


Figure 6. Electromagnetic noise at the input of the inverter with passive EMI filter, compared with EN 55022 class B standard

2) *Active filter*: Active EMI filter is widely discussed and implemented because the passive EMI filter is too large in some applications. So, this kind of filter can solve about size and weight. However, active EMI filter is complex and sometimes requires some supplementary electric sources to supply the filter circuit. Some topologies are presented in [11-12].

C. Reducing parasitic element and coupling paths

In high frequency, the passive components expose parasitic element characteristics. In an electric wire, it has equivalent series resistance (ESR), equivalent series inductance (ESL), and capacitance coupling paths to ground. In the basic real resistor model as depicted in Fig.7, series inductance (L_s) and parallel capacitance (C_p) become important at high frequency. In high frequency as shown in Fig. 8, capacitor has not only characteristics of capacitance but also the inductance characteristics when the frequency of signal is over than self-resonant frequency. The behavior of inductor also changes in high frequency, it becomes capacitance after the self-resonant frequency, as illustrated in Fig. 9.

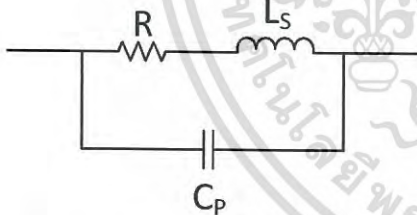


Figure 7. High frequency model of real resistor

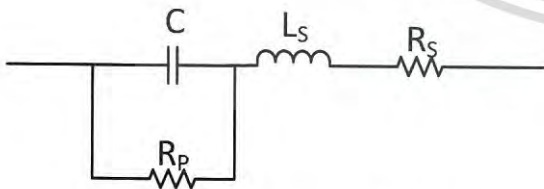


Figure 8. High frequency model of real capacitor

Parasitic element makes error in calculation of noise analysis. They can be, however, reduced by cutting conductive wire of each discrete component as short as possible. The coupling paths can be also reduced by some techniques.

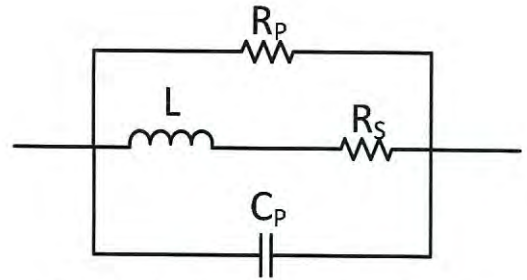


Figure 9. High frequency model of real inductor

IV. EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION AND RESULTS

The studied photovoltaic single-phase inverter system is represented by schematic in Fig. 10 and experimentally realized as depicted in Fig. 11. The inverter is controlled by unipolar SPWM gate drive signal, and the system is composed of main components as follows:

- Photovoltaic panel of 130 W
- Input capacitor (DC bus) of 4700 μ F
- MOSFET
- Transformer
- Output capacitors of 1 μ F in parallel to 0.47 μ F
- Gate drive

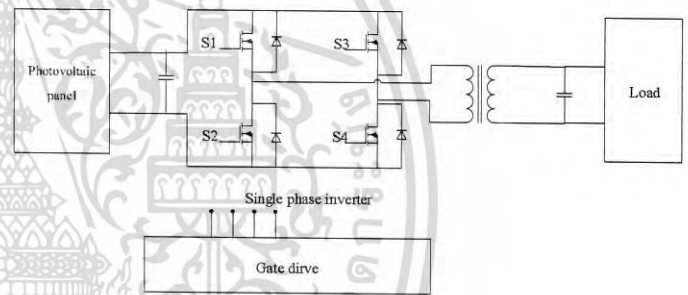


Figure 10. Schematic of studied photovoltaic system

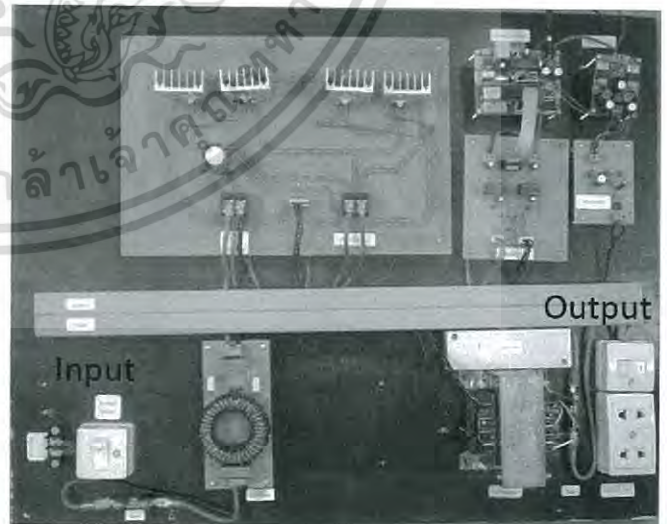


Figure 11. Realized photovoltaic single-phase inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photovoltaic panel is a DC source of the system. The signal from gate drive to control MOSFET is unipolar, the output signal is shown in Fig.12.

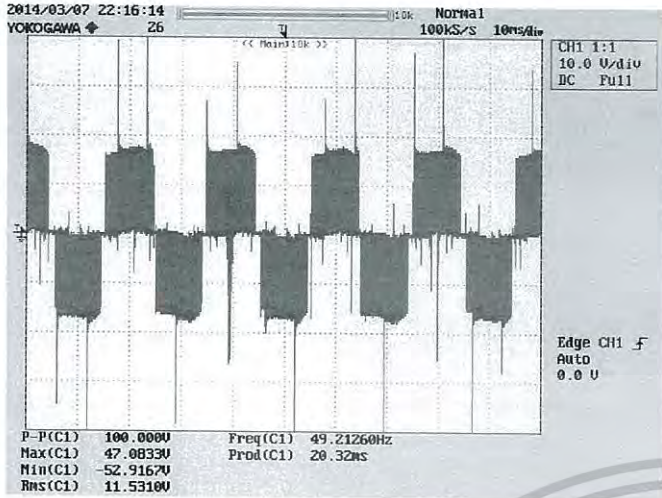


Figure 12. Output signal (PWM) of H-bridge MOSFET

The output signal from the inverter is next filtered by a low-pass filter in order to obtain a pure sinusoidal waveform to feed an ac load. The output voltage waveform and spectrum are finally shown in Fig. 13 and Fig. 14, respectively. Low-pass filter is normally composed of inductor and capacitor. But, in this system, we apply the transformer used to step up voltage to reach 220 – 230 Vac (rms) as an inductor for the low-pass filter. The inductance value of transformer is 28.9 mH and capacitance of capacitor is 1.47 μF

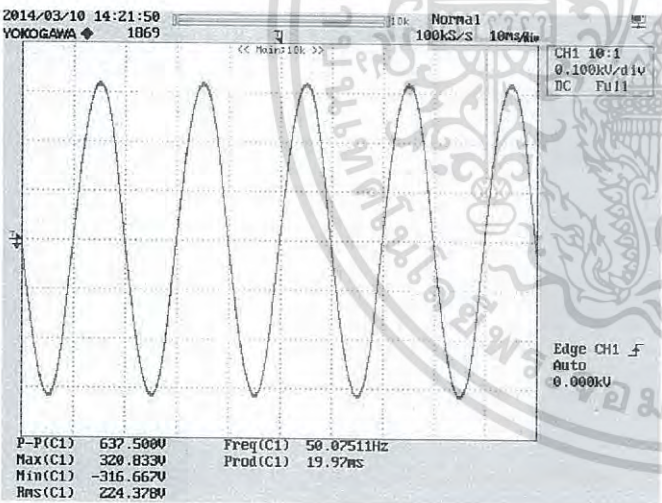


Figure 13. Output signal of inverter through low-pass filter to ac load

Regarding conducted electromagnetic interference, it is also experimentally measured by using Line Impedance Stabilization Network (LISN), and spectrum analyzer. The block diagram of this measurement is illustrated in Fig. 15. The result of noise (without passive EMI filter) measured between photovoltaic panel and single-phase inverter is shown in Fig. 16. Note that the EMI magnitude exceeds the EN 55022 class B standard level on all the considered frequency

range (150 kHz – 30 MHz). Therefore, a passive EMI filter is designed and inserted at the input of the inverter. The realized EMI filter is depicted in Fig. 17.

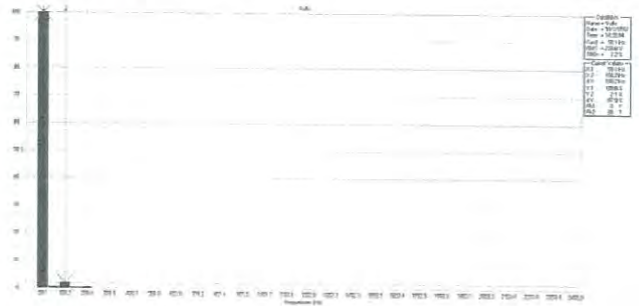


Figure 14. Spectrum of the output signal of the inverter

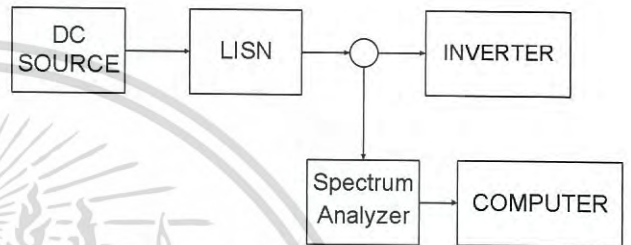


Figure 15. Block diagram of EMI measurement at the input of inverter.

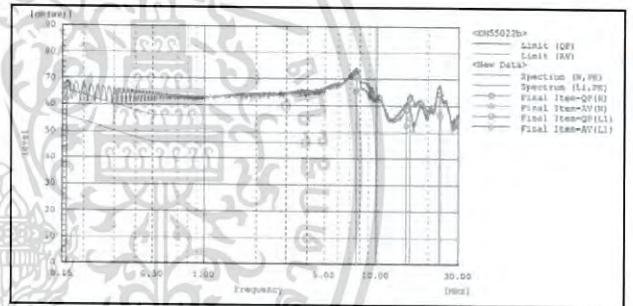


Figure 16. Electromagnetic noise at the input of the inverter without passive EMI filter, compared with EN 55022 class B standard

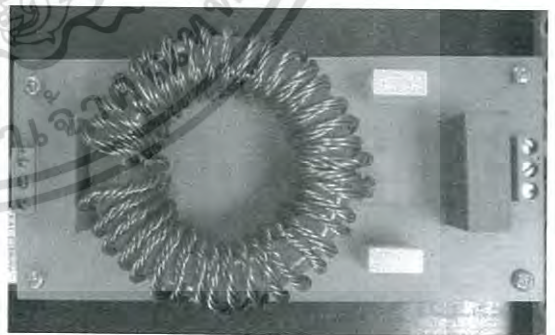


Figure 17. Passive EMI filter

The components of EMI filter have following values:

- Common mode capacitors (C_Y) : 48 nF
- Differential mode capacitors (C_X) : 2.2 μF
- Coupling inductor : 3.1 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 18 shows result after adding passive EMI filter in the system. We notice that the EMI magnitude respects to the standard level. Consequently, the passive filtering technique is effective for EMI mitigation in this system.

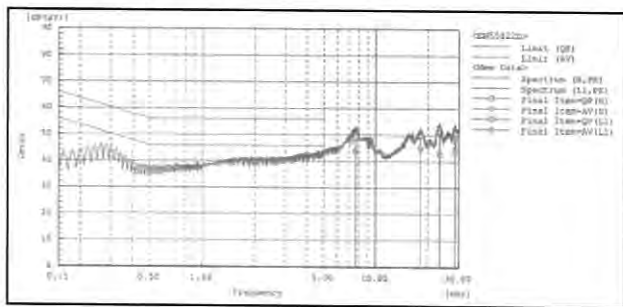


Figure 18. Electromagnetic noise at the input of the inverter with passive EMI filter, compared with EN 55022 class B standard

V. CONCLUSIONS

This paper analyzed about causes of electromagnetic interference and presented some EMI mitigation methods. The solution for reducing noise in this paper focused particularly on passive EMI filter. The passive EMI filter is a simple topology to be carried out for mitigating noise emission. Simulated results of both CM and DM noises show necessity of applying an EMI reduction approach when comparing to EN 55022 class B standard. After the passive EMI filter is added in the circuit, noise magnitude level is reduced and becomes lower than the standard. For experiment, the results have the similar trend. Finally, insertion of a passive EMI filter is effective for mitigating noise, and it confirms EMC of the photovoltaic inverter system.

ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. The measurement of conducted electromagnetic interference is supported by Electrical and Electronic Product Testing Center (PTEC), Bangkok, Thailand. The authors would like to thank for all supports.

REFERENCES

- [1] M.C. Di Piazza, C. Serporta, G. Tine and G. Vitale, "Electromagnetic compatibility characterisation of the DC side in a low power photovoltaic plant," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT'04), vol. 2, pp. 672-677, Hammamet, Tunisia, 8-10 December 2004.
- [2] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi and S. Bertone, "EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, pp. 639-648, August 2009.
- [3] D. Hamza and P. Jain, "Conducted EMI in grid-tied PV system," Proceedings of the 32nd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-7, Orlando, Florida, USA, 6-10 June 2010. R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- [4] H. Uarberlin, "New DC-LISN for EMC Measurements on the DC side of PV systems", Realization and first measurements at inverters", 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, Oct 22-26 2001.
- [5] W. H. Lewis, "The use and abuse of insulated/isolated grounding," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no.6, pp. 1093 - 1101, November/December 1989.
- [6] C. Qiang, C. Ning and L. I. Shuang, "Grounding Effect on common mode interference of under ground inverter" *Telkomnika*, vol. 11, no.9, pp.5187-5194, september 2013.
- [7] C. Jettanasen and S. Thongsuk, "Attenuation of high-frequency electromagnetic noise in a single-phase AC motor drive," Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2013), pp. 1367-1370, Busan, Korea, 26-29 October 2013.
- [8] J. L. Kotny, X. Margueron and N. Idir, "Coupling inductor models for EMI filters," Proceedings of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2009), pp. 4092-4097, Porto, Portugal, 3-5 November 2009.
- [9] S. Wang, F.C. Lee and W.G. Odendaal, "Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no.2, pp. 502-510, March 2005.
- [10] J. G. Kraemer, "S-parameter characterization for EMI filters" Proceedings of electromagnetic compatibility 2003, vol 1 pp. 361-366, 18-22 Aug. 2003.
- [11] Y. C. Son, S. K. Sul, "A Novel Active Common-mode EMI Filter for PWM Inverter," Proceedings of APEC 2002, vol. 1, pp. 545-549, March 2002.
- [12] Y. C. Son, S. K. Sul, "Generalization of active filters for EMI reduction and harmonic compensation," IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 42, pp. 545-551, April 2006.

Practical Design of a Passive EMI Filter for Reduction of EMI Generation

J. Jiraprasertwong, and C. Jettanasen

Abstract— Electromagnetic Interference (EMI) usually generated by a power converter can disturb or damage nearby sensitive electrical/electronic devices/equipment. The use of EMI filter inserted in the considered system is a classical technique for EMI reduction. In order to spend less time and have low cost, this paper proposes a user interface for practical EMI filter design. This interface is easy to use and able to rapidly find out the filter component values. The principle of this design is based on calculation from electromagnetic noises measured by spectrum analyzer, then the algorithm tries to find the cut-off frequency of the filter in order to obtain the attenuated noises respecting to an applied Electromagnetic Compatibility (EMC) standard. The performance of this practical EMI filter design is guaranteed by the real EMI emission measurement. Moreover, this user interface can be useful and used for other power converters, switching devices or EMI sources. Finally, it will reduce time consuming and cost when performing EMC testing in the real work.

Index Terms—EMC, EMI filter design, passive EMI filter, user interface

I. INTRODUCTION

TODAY, electrical/electronic devices play an important role in everyday life. The electrical/electronic equipment has required EMC standard to confirm that the device can work without disturbing each other or immune to interference. To be compatible with other devices, electromagnetic compatibility must be taken into account when designing electronic devices since initial stage. However, in case of disrespecting of EMI level to the standard, EMI filter can be used for EMI reduction. Techniques for design of the passive EMI filter has been investigated and developed in past decade [1-2], and still have to be studied and designed continually [3-7].

When designing any electrical/electronic devices in terms of EMI/EMC, they must be tested by a spectrum analyzer in order to know their EMI generation behavior. The generated EMI is mandatorily compared with an EMC standard, such as FCC, EN, CISPR, VDE, and military standards. However, the spectrum analyzer is an expensive measuring apparatus. That is why many companies cannot measure or detect EMI

emissions during design phase. The EMI generation is usually measured or determined at the testing center when the device is already completed. Certainly, the cost of the testing is expensive and charge by the time of testing. Some electronic devices do not respect EMC standards, therefore, it is required to add or modify the EMI filter to limit conducted EMI issued from the device at the testing center, and measure electromagnetic noise again. Sometimes, it is only a single tune, and sometimes, it takes several times to adjust EMI filter component values to pass the EMC standard. Consequently, this paper will present an application with GUI interface for rapid practical design of passive EMI filter. By using the EMI spectrum results from the testing center for design, the component values of passive EMI filter will be obtained based on algorithm proposed in this paper. The technique uses the basic design already well understood with GUI interface for design and calculation. The purpose is to provide a quick and easy to fit real applications to reduce the testing time and the testing cost.

II. CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

EMI is divided into two types: 1) conducted emission and 2) radiated emission. The EMI filter is designed to reduce conducted noise emission. Moreover, conducted EMI is separated into two modes; one is differential mode (DM) interference and another is common mode (CM) interference. The DM noise flows in line and returns by neutral whereas the CM noise flows in line and neutral and then, flows into ground. For specification of conducted measurement within the EMC standard, the noise is measured in the frequency range of 9 kHz to 30 MHz or 150 kHz to 30 MHz. The main equipment employed in noise measurement is LISN (Line Impedance Stabilization Network), spectrum analyzer and computer. LISN is normally placed between the electrical source and the device under test (DUT). It allows maintaining fixed input impedance in accordance with the EMC standard.

III. PASSIVE EMI FILTER

There are several types of filters, for example, passive EMI filter, active EMI filter, and hybrid EMI filter. However, the passive EMI filter is simpler than others. The main components of this filter are one common mode choke (coupled inductor: L_{CM}), two common mode capacitors (C_Y), one differential mode choke (L_{DM}), and two differential mode capacitors (C_X). The structure of the filter circuit is shown in Fig 1.

Manuscript received January 8, 2015.

J. Jiraprasertwong is presently a student in Electrical Engineering Master program at KMITL. His research interest is EMI/EMC in solar inverter and EMI filter design. (e-mail: j.jukkrit@gmail.com)

C. Jettanasen is currently an assistant professor in Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok 10520, Thailand. His research interest is EMC in power electronic systems. (e-mail: kichaiwa@kmitl.ac.th)

การศึกษานี้สนับสนุนโดย สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครกรุงเทพฯ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

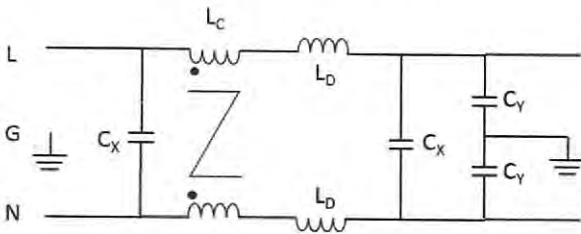


Fig. 1. Passive EMI filter equivalent circuit

A simple calculation of inductors and capacitors in the circuit can be found from (1)-(5). In (1)-(3), these equations are related to common mode noise. The $f_{R,CM}$ is the cut-off frequency of common mode filter. L_{CM} and C_{CM} are total CM inductor and CM capacitor in EMI filter. In (2), L_{CM} is represented by $L_C + \frac{1}{2}L_D$ and C_{CM} is represented by C_Y (L_C , L_D , and C_Y are shown in Fig. 1). Since L_C dominates L_D , the final equation in common mode path is simply expressed by (3).

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}} \quad (1)$$

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left(L_C + \frac{1}{2}L_D\right) \times 2C_Y}} \quad (2)$$

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C \times 2 \times C_Y}} \quad (3)$$

In (1)-(2), they are related to differential mode noise. The $f_{R,DM}$ is the cut-off frequency of differential mode filter. L_{DM} and C_{DM} are total DM inductor and DM capacitor in EMI filter. In (4), L_{DM} is represented by $((2 \times L_D) + L_{leakage})$ and C_{DM} is represented by C_X (L_D , and C_X are shown in Fig. 1). $L_{leakage}$ is leakage inductance of common mode choke. The final equation in differential mode path is expressed in (5).

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} \quad (4)$$

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left((2 \times L_D) + L_{leakage}\right) \times C_{DM}}} \quad (5)$$

Fig. 2 shows an example of the measured EMI emissions according to the EMC standard frequency range. The EMI spectrum is shown in red and green lines; red line represents EMI noise measured between Line and ground while green line represents EMI noise measured between Neutral and ground. An EMC regulation, which is herein EN55022 class B, is also presented and compared to the EMI level. The upper line is quasi peak and the lower line is average. Note that over the considered frequency range, EMI level exceeds the applied EMC standard. That is why, EMI filter is essential for EMI reduction.

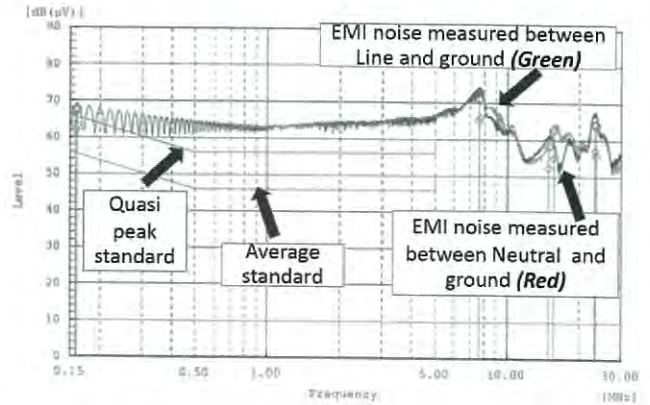


Fig. 2 EMI emissions measured from spectrum analyzer

Not only noise graph acquired, when the measurement is completed, we can extract data of critical points as marked on spectrum in fig. 2; these data are shown in Table I. These 4 points can be used to determine passive EMI filter element values using the proposed algorithm. The number of critical points is not fixed, it depends on the user. In the table, it presents data in 5 columns. The first column is frequency point that is marked in Fig. 2. The second column is quasi peak value of noise. The third column is average value of noise. The next column is margin of quasi peak value, subtracted from the standard and noise. For our data, they are all negative because the measured noises are over the standard. The final column is margin of average value between the standard and noise.

TABLE I
DATA FROM SPECTRUM ANALYZER

Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	Margin QP [dB(μV)]	Margin CAV [dB(μV)]
0.15769	56.9	51.6	-1.5	-6.2
7.5712	60.7	54.5	-11.2	-15.0
15.6068	52.0	44.4	-2.7	-5.1
23.2712	53.4	46.3	-4.2	-7.1

The filter must be able to reduce noise to be below the limit of standard. The simple calculation uses the cut-off frequency (f_c) of EMI filter. The selected f_c is determined from the measured noise. The cut-off frequency is the starting frequency of signal attenuation. With the structure in Fig. 1, EMI emissions can be attenuated approximately 40 dB per decade. The required attenuation (V_{reg}) is easily calculated by (6)-(7). $V_{reg,CM}$ and $V_{reg,DM}$ are required attenuation of CM noise and DM noise. V_{CM} and V_{DM} are the common mode noise and differential mode noise that are measured from spectrum analyzer. V_{limit} is defined as value of standard at the frequency of generated noise. Final parameter in equations is Margin; it is gap value for save when making design. Generally, the margin value is 3 dB, however, it can be higher if the user desires.

$$(V_{reg,CM})dB\mu V = (V_{CM})dB\mu V - (V_{limit})dB\mu V + (Margin)dB\mu V \quad (6)$$

$$(V_{reg,DM})dB\mu V = (V_{DM})dB\mu V - (V_{limit})dB\mu V + (Margin)dB\mu V \quad (7)$$

More details can be found in [1-7]. The calculation of the parameters mentioned in the above equations is simple calculation at low frequency range of EMI. It might not be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และที่ยังสงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย

proper for higher frequencies owing to effects of parasitic elements of EMI filter and device components. To analyze the advanced design, it must carefully consider and take into account source and noise source impedances [8-9]. Analyzing with the mentioned technique can reduce cost of component. Sometimes, the EMI filter does not need high capacitance but appropriate capacitor is good enough to be used in the system for EMI reduction [10]. However, the EMI filter that is designed by the cut-off frequency technique has limitation in high frequency range. In practice, we can reduce parasitic elements by several methods such as shortening leg of the capacitor and resistor; furthermore, some winding inductance configurations can make self resonant frequency farther [11].

IV. QUICK DESIGN WITH USER INTERFACE

As previously mentioned, the user interface (GUI) is designed to be easy to use and works rapidly. The design principles and formulas used are previously presented. This simple and consistent GUI will be practically useful in design process for companies having no tools. This allows reducing the design time, costs of measurement, and production costs.

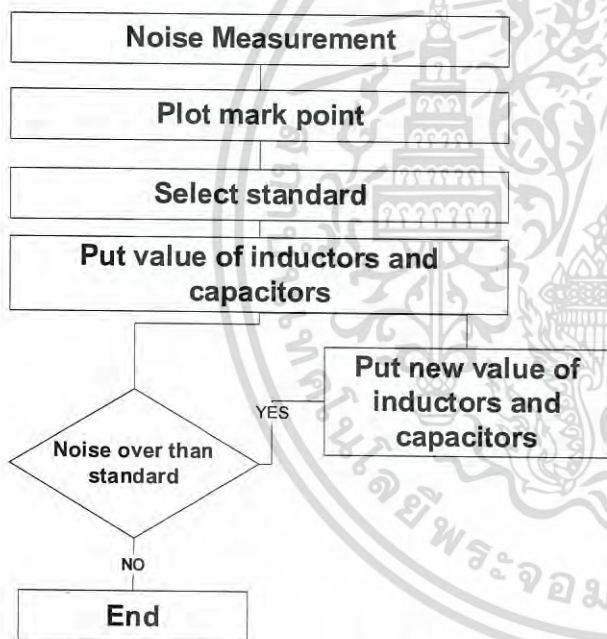


Fig. 3. Flow chart of user interface

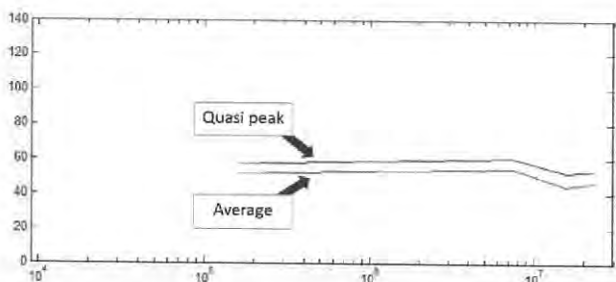


Fig. 4. Noises plotted from data

The flow chart of algorithm process is shown in Fig. 3. It starts with the noise measurement and brings value to put in user interface. The graph in Fig. 4 shows noises (4 points

presented in Table I) after putting their values in the user interface.

Then, we choose the standard and put value of capacitor and inductor. After that, the program will display the attenuation line and EMI estimated line after adding EMI filter. If margin is positive and more than minimum margin desired, the components can be used for reducing EMI noise.

The user interface contains 3 main parts as illustrated in Fig. 5. The part of standard selection is in part 1. The standard has two lines; quasi peak and average lines. The part 2 is data blank; they are blank for putting EMI data from measurement. In this part, five points can be put; it is sufficient for determining DM and CM cut-off frequencies. However, entering the minimum number of data is advantage because it is easy and fast. The main final part (part 3) is designing EMI filter part. In this section, the blank is allowed to put inductor and capacitor values. It is separated into two noise modes. Differential mode filter design must put L_D , $L_{leakage}$, and C_D . Then, algorithm will calculate DM cut-off frequency and show attenuation curve. Common mode filter design must put L_C , and C_C , then CM cut-off frequency will be calculated and show corresponding attenuation curve. In addition, user interface has list of CM and DM capacitors (C_Y , and C_X) existing in the market in order to ensure that the chosen value is able to be used for constructing real EMI filter. Finally, the reduced EMI is shown to visually compare with the standard. Moreover, for safety standard, the value of CM capacitor is recommended to not exceed 3.3 nF.

V. CONCLUSION

Passive EMI filters have been widespread use in the electromagnetic interference reduction. Filter design using cut-off frequency consideration is simple method, which is based on noises generated in the circuit. Some companies fabricating electrical/electronic devices/equipment do not have spectrum analyzer, so they must take product to testing center. The testing center will charge by the hour. Hence, this user interface can help to reduce design step, mistake in design and testing cost.

ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. The measurement of conducted electromagnetic interference is supported by the Electrical and Electronic Products Testing Center (PTEC), Bangkok, Thailand. The authors would like to thank for all supports.

REFERENCES

- [1] Shih, Fu-Yuan; Yie-Tone Chen; Yan-Pei Wu; Yie-Tone Chen, "A procedure for designing EMI filters for AC line applications," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.11, no.1, pp.170,181, Jan 1996.
- [2] Caponet, M.C.; Profumo, F.; Tenconi, A., "EMI filters design for power electronics," *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*, vol.4, no., pp.2027,2032, 2002.
- [3] Hung-I Hsieh, "A procedure including mix-mode noise for designing EMI filters for off-line applications," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, vol., no., pp.1,6, 3-5 Sept. 2008.
- [4] Raggl, K.; Nussbaumer, T.; Kolar, J.W., "Guideline for a Simplified Differential-Mode EMI Filter Design," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.57, no.3, pp.1031,1040, March 2010.

- [5] Drinovsky, J.; Zachar, J.; Kejik, Z.; Ruzek, V., "Impedance analysis of EMI filter circuitry used for estimation of the spurious components and boundings," Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2011 Proceedings of the 18th International Conference , vol., no., pp.533,536, 16-18 June 2011.
- [6] Majid, A.; Saleem, J.; Bertilsson, K., "EMI filter design for high frequency power converters," Environment and Electrical Engineering (EEEE), 2012 11th International Conference on , vol., no., pp.586,589, 18-25 May 2012.
- [7] Kotly, J.L.; Duquesne, T.; Idir, N., "Modeling and design of the EMI filter for DC-DC SiC-converter," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on , vol., no., pp.1195,1200, 18-20 June 2014.
- [8] Fang Luo; Boroyevich, D.; Mattavelli, P., "Improving EMI filter design with in circuit impedance mismatching," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE , vol., no., pp.1652,1658, 5-9 Feb. 2012.
- [9] Kejik, Z.; Dřinovský, J.; Růžek, V., "Application optimization to search values of spurious elements of EMI filters," Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2010 Proceedings of the 17th International Conference , vol., no., pp.505,509, 24-26 June 2010.
- [10] Tarateraseth, V., "Effect of extra CX on EMI filter performances," Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012 9th International Conference on , vol., no., pp.1,4, 16-18 May 2012.
- [11] Saritsiri, K.; Khan-ngern, W., "Analysis of Conducted EMI Reduction on a Boost Converter Using Progressive Inductor Winding Technique," Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS '07. 7th International Conference on , vol., no., pp.229,233, 27-30 Nov. 2007.

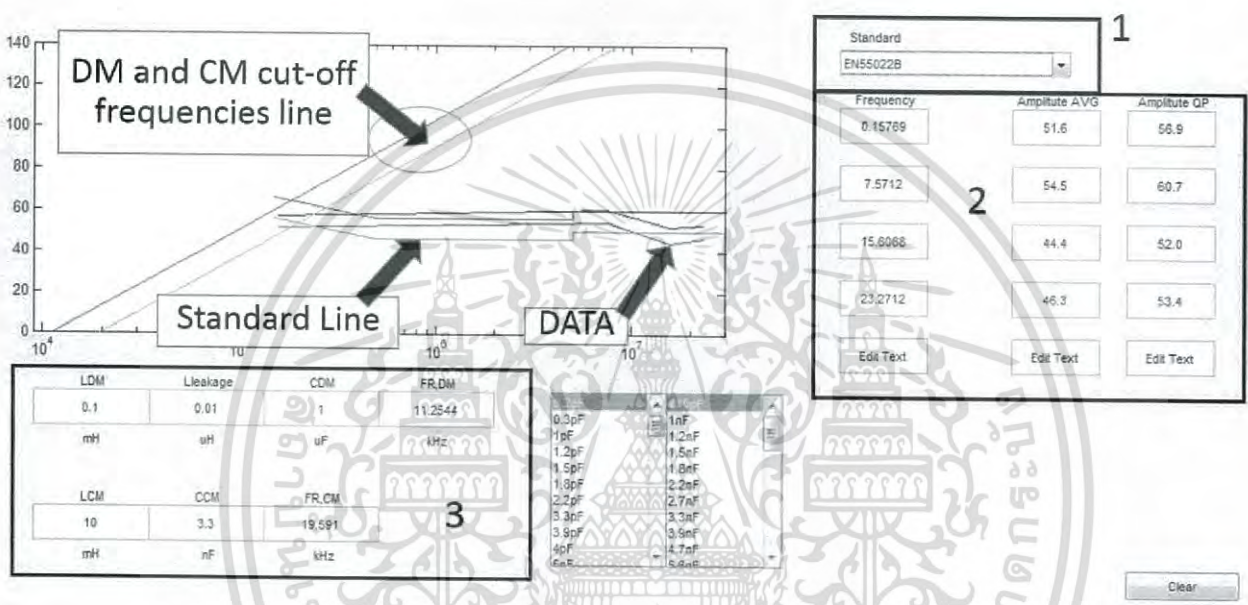


Fig. 5. User interface for passive EMI filter design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electromagnetic Interference in Photovoltaic System and Mitigation of Conducted Noise at DC Side

Jukkrit Jiraprasertwong

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
j.jukkrit@gmail.com

Chaiyan Jettanasen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
kichaiya@kmitl.ac.th

Abstract—This paper focuses on the electromagnetic interference (EMI) generated in a photovoltaic system. Noise caused by inverter has spread to the disturbance both conducted and radiated emissions. In addition, the EMI can be transferred from one mode to another mode; this means that conducted EMI can be transferred to radiated EMI and vice versa. Several emission patterns in such a system will be described to reveal the possible propagation paths of the EMI. To suppress the high-frequency disturbance, a passive EMI filter is added at the DC side of the solar inverter. The overall system is tested in various configurations: mainly with and without EMI filter, and with and without electrical load connected. Finally, the EMI testing results are compared with EMI standard to confirm the effectiveness and benefits of inserting a passive EMI filter in the studied photovoltaic system.

Keywords—electromagnetic interference (EMI); EMI mitigation; electromagnetic compatibility (EMC); passive EMI filter; photovoltaic inverter; photovoltaic system

1. INTRODUCTION

Nowadays, solar energy is popular and gets support to produce electricity in a large number of countries because the electricity produced by the photovoltaic system does not pollute and destroy the environment. Photovoltaic system can be installed from small system to large system. This is why this system is used in wide range from residential houses to large scale solar farms. In addition, the installation of photovoltaic systems is not complicated. The main components are composed of photovoltaic panels, inverters, and the electrical power protection appropriate to the size of the photovoltaic systems. The inverter is a device used to convert direct current from the photovoltaic panels into alternating current. When the inverter operates, it could affect the power quality and efficiency of electricity production. This is because the inverter functions with the switching component; it changes on and off states all the time. This leads finally to the generation of unintended electromagnetic interference (EMI) at high frequency. The EMI can have an effect on electrical system: both electric appliances outside and even the electrical protection system in the photovoltaic system itself. Thus, the electromagnetic compatibility (EMC) is an important topic that should be focused on photovoltaic systems [1].

As aforementioned, photovoltaic system should have electromagnetic compatibility in the system in order to function correctly in the electromagnetic environment. Noise emission can propagate by two main paths: (1) in a line or a conductor, also known as conducted EMI and (2) in air, also known as radiated EMI. This paper provides examples of conducted EMI attenuation on the DC side or at the input of inverter. The paths of the EMI that occurs in the photovoltaic system are presented in the next section, which shows that the input EMI filter is much required. There are numerous techniques to design EMI filters [2-3]. It may take optimization to find the component value [4] or the design on software to save costs [5-6]. The section III will show an example of calculation of all equipment for a simple EMI filter. Finally, in the last section, the results of experiment and analysis of the system will be shown and concluded.

II. ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM

EMI can be caused in the photovoltaic system due to the high switching frequency of the inverter and also the parasitic elements existing in the whole system. The high dv/dt and high di/dt will certainly generate common mode (CM) current and differential mode (DM) voltage, respectively. In fact, the noise can be produced by several ways, not only from the functioning of the inverter, as illustrated in Figure 1.

Figure 1 shows EMI that could possibly occur in the photovoltaic system. The EMI propagation path can be summarized into 6 routes as follows.

path 1. Indirect-radiated Emission

The first propagation path is on the line conductor (conducted EMI) which EMI is caused by the input of the inverter away from the conductor at DC side, then flows through the air (radiated EMI); after that, it interferes to electrical equipment.

path 2. Semi-conducted Emission

The second propagation path is on the line conductor (conducted EMI) which EMI is caused by the input of the

inverter away from the conductor at DC side, then flows through the air (radiated EMI); after that, propagates into conductor at AC side and interferes through the conductor (conducted EMI) to electrical equipment.

path 3. Radiated Emission

The third propagation path is on the inverter through the air (radiated EMI); after that, it interferes to electrical equipment.

path 4. Indirect-conducted Emission

The fourth propagation path is on the inverter through the air (radiated EMI); after that, flows into conductor at AC side and interfere through the conductor (conducted EMI) to electrical equipment.

path 5. Indirect-radiated Emission

The fifth propagation path is on the line conductor (conducted EMI) which EMI is caused by the output of the inverter away from the conductor at AC side, then flows through the air (radiated EMI); after that, it interferes to electrical equipment.

path 6. Conducted Emission

The sixth propagation path is on the line conductor which EMI is caused by the output of the inverter, and then interferes through the conductor (conducted EMI) to electrical equipment.

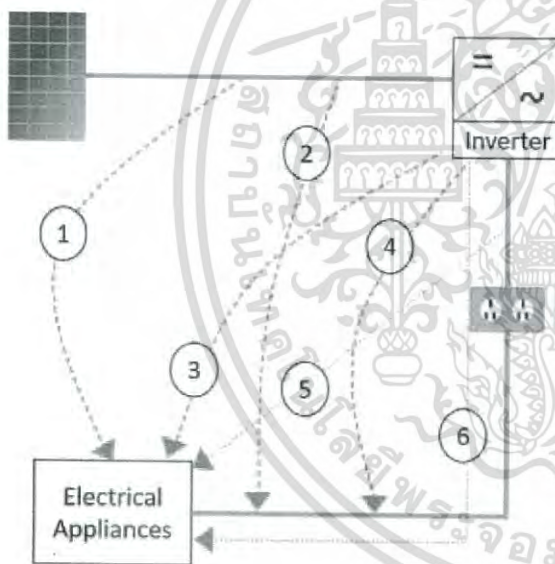


Figure 1. Possible EMI propagation paths in photovoltaic system

From analysis flow of noise, an approach to reduce conducted EMI noise is by using EMI filters, and the radiated EMI noise mitigation can be done by using shielding method.

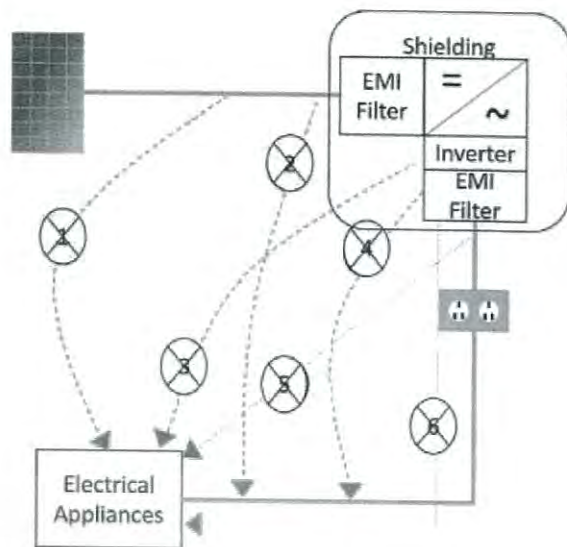


Figure 2. Mitigation of EMI by suppressing the coupling paths in photovoltaic system

When we add the shielding in the system as depicted in Figure 2, the radiate noise of path 3 and path 4 can be minimized. The EMI filter at AC side or at the output of inverter can mitigate noise of path 5 and path 6. The EMI filter at DC side or at the input of inverter will reduce noise of path 1 and path 2. Thus, as putting the EMI filter at the input of inverter, it can reduce EMI noise interference caused in the considered system.

III. MITIGATION OF CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE USING PASSIVE EMI FILTER

EMI filter is a device used to mitigate the conducted EMI in any electrical/electronic systems. There are several types, for example, passive EMI filter, active EMI filter, and hybrid EMI filter. Each model has advantages and disadvantages. In this paper, we will use passive EMI filter to solve the EMI problem. This filter is simple to design and used widely for popular applications, and there are some studies and research designing of filter [7-10] to provide all the electrical devices according to the standard.

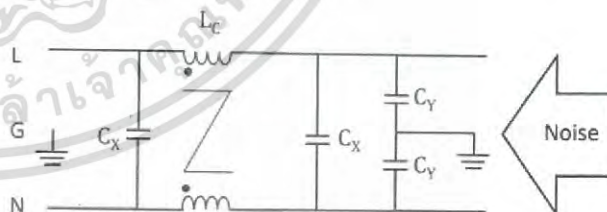


Figure 3. Structure of passive EMI filter

Figure 3 presents the structure of passive EMI filter. It contains main components which are one CM inductor (L_{CM}), two CM capacitors (C_{CM}), and two DM capacitors (C_{DM}).

- L_{CM} is represented by L_C
- C_{CM} is represented by C_Y
- C_{DM} is represented by C_X

L_C in a passive EMI filter circuit can mitigate CM noise. In addition, leakage inductance of L_C can mitigate DM noise. Thus, L_{DM} can be represented by $L_{Leakage}$ of CM inductor in this case.

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C C_Y}} \quad (1)$$

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Leakage}(2C_X + \frac{C_Y}{2})}} \quad (2)$$

The values of components in passive EMI filter can be calculated from (1) and (2). Where $f_{R,CM}$ and $f_{R,DM}$ represent cut-off frequencies of CM noise and DM noise. In addition, the design must consider component selection with internal filter, such as effect of capacitor in device [11 - 14].

IV. EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION AND RESULTS

This experiment focuses on conducted EMI on the DC side or at the input of inverter. Then, reduce the noise to a standard by using passive EMI filter as previously described. Next, insert the designed filter at this position to attenuate the noise emission in path 1 and path 2 illustrated in Figure 1.

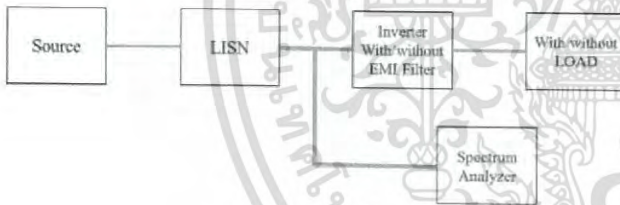


Figure 4. Block diagram of EMI measurement at the input of inverter.

Figure 4 presents the block diagram of the experiment. The first is the source, which is herein a DC power supply representing the photovoltaic panels. Next, it is the Line Impedance Stabilization Network (LISN) employed to fix the line impedance to be 50 Ohms in the range of considered frequency. In measuring, a spectrum analyzer is used for noise measurement and put between LISN and inverter. It measures the magnitude of noise versus frequency range in one time test. Noise at the input of the inverter will be tested in the case without and with passive EMI filter. In addition, they will be tested in the case without and with electrical loads. The real test example is shown in Figure 5.



Figure 5. EMI measurement at the input of inverter

In Figure 6, it is a real passive EMI filter used in the experiment. The components are CM inductor, CM capacitors and DM capacitors. Table I shows the value of components.

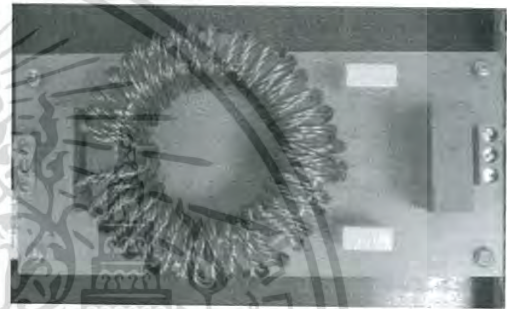


Figure 6. Real passive EMI filter

TABLE I. The component values of EMI filter

	L_{CM}	C_X	C_Y
Values	3.1 mH	2.2 μ F	48 nF
Number	1	2	2

The experiments will be tested in four cases to verify the previous assumptions.

A. EMI testing at the input of inverter without electrical load

Figure 7 shows the result of EMI noise measurement in the range of frequency of 150 kHz to 30 MHz, according to the applied EN55022 Class B standard (EMC standard). It is the noise at DC side while unfiltered and disconnected electrical load. Red and green lines are EMI spectrum. The red line represents noise signal flowing between line and ground whereas green line represents noise signal flowing between neutral and ground. The considered EMC standard has two

limit lines; quasi peak and average. Table II presents the noise values at various frequencies from the spectrum in Figure 7. Noise values are measured in quasi peak (QP) and average (CAV). In table II, it also shows margin of quasi peak value (Margin QP) and margin of average value (Margin CAV); they are differential value between the standard and noise. In this case, margin is negative because of EMI is much more than the standard level.

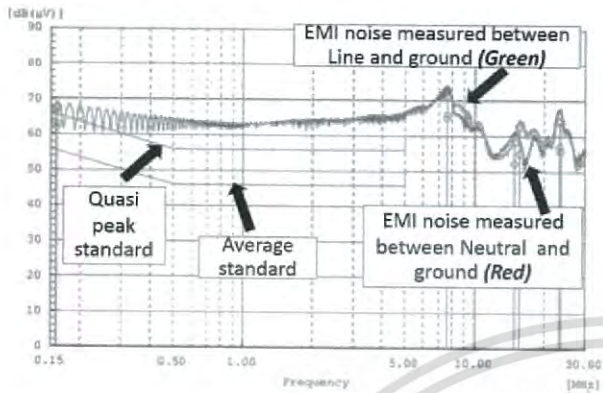


Figure 7. EMI spectrum as a function of frequency at the input of inverter, without load

TABLE II. DATA FROM SPECTRUM ANALYZER OF FIGURE 7

Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	Margin QP [dB(µV)]	Margin CAV [dB(µV)]
0.15769	56.9	51.6	-1.5	-6.2
7.5712	60.7	54.5	-11.2	-15.0
15.6068	52.0	44.4	-2.7	-5.1
23.2712	53.4	46.3	-4.2	-7.1

B. EMI testing at the input of inverter with EMI filter adding, without electrical load

Figure 8 is the result of the noise measurement at DC side while filtered and disconnected electrical load. After inserting the filter, noise is reduced in the EMC standard limit; the margin of quasi peak value and margin of average value shown in table III are positive.

TABLE III. DATA FROM SPECTRUM ANALYZER OF FIGURE 8

Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	Margin QP [dB(µV)]	Margin CAV [dB(µV)]
7.6912	38.6	32.8	10.9	6.7
18.0906	39.0	34.0	10.2	5.2
23.2496	39.9	32.7	9.3	6.5
28.3716	37.9	32.7	11.5	6.7

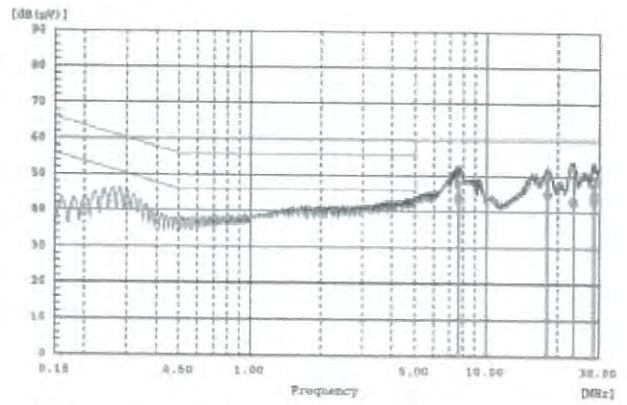


Figure 8. EMI spectrum as a function of frequency at the input of inverter when adding EMI filter, without load

C. EMI testing at the input of inverter with electrical load

Figure 9 presents electromagnetic spectrum of electrical load used in this experiment. It is also measured to ensure that noise measured at DC side does not come from this kind of electrical load; it is mostly from the functioning of inverter.

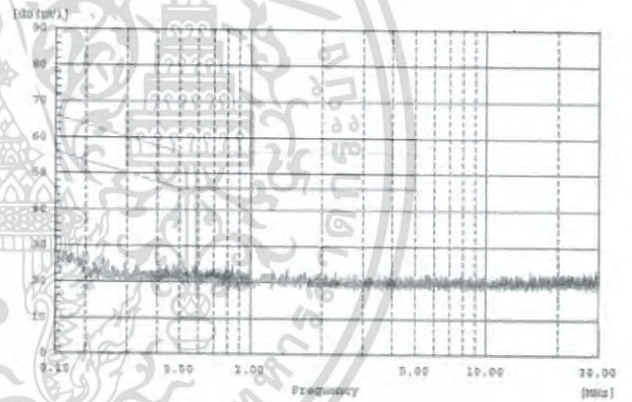


Figure 9. EMI spectrum as a function of frequency of electrical load

Figure 10 is the result of the noise measurement at DC side while unfiltered and connected electrical load. When connecting the load, then the noise is increased. This is because there is more electrical power from inverter, and inverter must adjust working to supply power to the electrical load and the characteristics of the load affect to power factor. Hence, the margin of quasi peak value and margin of average value shown in table IV are negative more than the results in Table II.

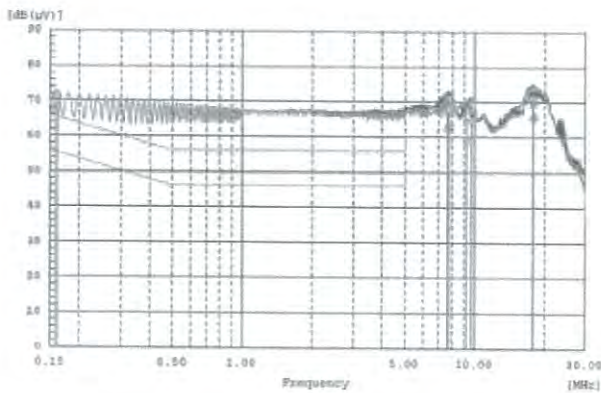


Figure 10. EMI spectrum as a function of frequency at the input of inverter with electrical load

TABLE IV. DATA FROM SPECTRUM ANALYZER OF FIGURE 10

Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	Margin QP [dB(μV)]	Margin CAV [dB(μV)]
0.15823	60.8	56.7	-5.4	-11.3
7.6319	56.7	51.6	-7.2	-12.1
9.6551	58.8	53.9	-9.4	-14.5
17.7732	59.5	54.7	-10.3	-15.5

D. EMI testing at the input of inverter with EMI filter adding, and with electrical load

Figure 11 shows the result of the noise measurement at DC side while filtered and connected electrical load. After inserting the filter, noise is reduced and the margin of quasi peak value and margin of average value shown in table V are positive. Except, at very high frequencies, the noise is over standard because of the filter effectiveness at high frequency.

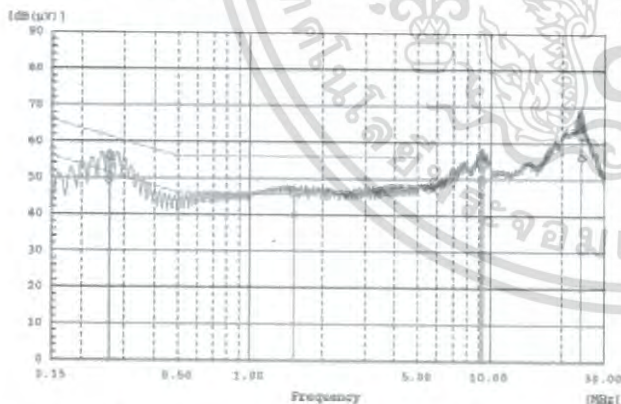


Figure 11. EMI spectrum as a function of frequency at the input of inverter when adding EMI filter, and with electrical load

TABLE V. DATA FROM SPECTRUM ANALYZER OF FIGURE 11

Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	Margin QP [dB(μV)]	Margin CAV [dB(μV)]
0.25975	45.9	40.2	5.3	1.0
9.2946	43.1	39.3	6.4	0.2
24.0004	51.8	45.5	-2.5	-6.2

V. CONCLUSIONS

The EMI generated by the inverter can be spread in several coupling paths in the photovoltaic system. Noise interferes appliances both directly and indirectly. The radiated emission can be reduced by using shielding and conducted emission can be reduced by using filtering technique. This experiment showed an example of EMI filter insertion at the input of the inverter to reduce noise in the first path and second path as aforementioned. EMI was measured from photovoltaic system without and with various load, and also without and with EMI filter. It was found that when connecting electrical load, it made increasing current and energy flowing in the circuit, then the noise in the system has been increased. Thus, in designing EMI filter, it should be compatible with a full load for the system to achieve electromagnetic compatibility and can use the system safely. Because of the connection between the EMI filter and inverter designed to make connection and disconnection easily for comparing measurement, the real assembly is out of this problem. However, this experiment can verify the performance of the designed filter, which provides a stable operation of the photovoltaic system.

ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand. The measurement of conducted electromagnetic interference is supported by Electrical and Electronic Product Testing Center (PTEC), Bangkok, Thailand. The authors would like to thank for all supports.

REFERENCES

- [1] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi and S. Bertone, "EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 3, pp. 639-648, Aug. 2009.
- [2] K. Raggl, T. Nussbaumer and J. W. Kolar, "Guideline for a Simplified Differential-Mode EMI Filter Design," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 3, pp. 1031-1040, March 2010.
- [3] F. Luo, D. Boroyevich and P. Mattavelli, "Improving EMI filter design with in circuit impedance mismatching," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, 2012, pp. 1652-1658.
- [4] Z. Kejik, J. Dřinovský and V. Růžek, "Application optimization to search values of spurious elements of EMI filters," Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2010 Proceedings of the 17th International Conference, Warsaw, 2010, pp. 505-509.

- [5] P. S. Chen and Y. S. Lai, "Effective EMI filter design method for three-phase inverter based upon software noise separation," Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, Sapporo, 2010, pp. 914-919.
- [6] P. S. Chen and Y. S. Lai, "Effective EMI Filter Design Method for Three-Phase Inverter Based Upon Software Noise Separation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 11, pp. 2797-2806, Nov. 2010.
- [7] D. Hamza and P. Jain, "Conducted EMI in grid-tied PV system," Intelec 2010, Orlando, FL, USA, 2010, pp. 1-7.
- [8] A. Majid, J. Saleem, H. B. Kotte, R. Ambatipudi and K. Bertilsson, "Design and implementation of EMI filter for high frequency (MHz) power converters," Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on, Rome, 2012, pp. 1-4.
- [9] A. Majid, J. Saleem and K. Bertilsson, "EMI filter design for high frequency power converters," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on, Venice, 2012, pp. 586-589.
- [10] J. L. Kotny, T. Duquesne and N. Idir, "EMI Filter design using high frequency models of the passive components," Signal Propagation on Interconnects (SPI), 2011 15th IEEE Workshop on, Naples, 2011, pp. 143-146.
- [11] J. L. Kotny, X. Margueron and N. Idir, "Coupling inductor models for EMI filters," Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, Porto, 2009, pp. 4092-4097.
- [12] F. Luo et al., "Analysis of CM Volt-Second Influence on CM Inductor Saturation and Design for Input EMI Filters in Three-Phase DC-Fed Motor Drive Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 7, pp. 1905-1914, July 2010.
- [13] J. Zhang, W. Chen, B. Zhang, X. Song and H. Huang, "Optimal design of EMI filters for PV system based on parasitic parameter and stability analysis," 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, 2015, pp. 2744-2751.
- [14] V. Tarateeraseth, "Effect of extra CX on EMI filter performances," Electrical Engineering/Electronics, Computer, Conference on Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012 9th International, 2012, pp. 1-4.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจักรกฤษณ์ จิระประเสริฐวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด 6 เมษายน 2534 ที่เพชรบุรี
ที่อยู่ 102/2 หมู่ 2 ตำบลธงชัย อำเภอเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี 76000
E-mail: J.Jukkrit@gmail.com
ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง (เกียรตินิยมอันดับ 2)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์
2.) การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพาสซีฟ
3.) การตั้งค่าระบบป้องกันไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก
ปัจจุบัน วิศวกร กองส่งเสริมพลังงานทดแทนและผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
ฝ่ายส่งเสริมและอนุรักษ์พลังงาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้