การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์ แบบฟลูบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter

โดย

เกียรติพล พรมประราบ

คลัง คอแก้ว

จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์

จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter.

โดย

เกียรติพล พรมประราบ
คลัง คอแก้ว
จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์
จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter.

KIATTIPHOL PHOMPRARAP

KLANG KOKEAW

JUKKRIT JIRAPRASERTWONG

JAKKAPAN TANGKATITHAM

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ... โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ...

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter.

โดย

นาย เกียรติพล พรมประราบ

นาย คลัง คอแก้ว

นาย จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์

นาย จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแป... ...อ้างอิง... ...สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์
แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ

1. นาย เกียรติพล พรมประราบ
2. นาย คลัง คอแก้ว
3. นาย จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์
4. นาย จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน)

การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

นาย เกียรติพล พรมประราบ
นาย คลัง คอแก้ว
นาย จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์
นาย จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม
ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอผลการศึกษาสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานด้วยอุปกรณ์สวิตชิ่งความถี่สูงร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ศึกษาเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ 1 เฟส โดยใช้สัญญาณควบคุมแบบ SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) ซึ่งนำไปใช้จ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันและความถี่เดียวกับที่ใช้ในบ้านทั่วไป การใช้งานอุปกรณ์สวิตชิ่งมักก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในระดับที่สูงมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงจะแก้ปัญหานี้ด้วยวิธีใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI Filter) ซึ่งช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนในระบบได้ และป้องกันความเสียหายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter.

Mr. Kiattiphol	Phomprarap
Mr. Klang	Kokeaw
Mr. Jukkrit	Jiraprasertwong
Mr. Jakkapan	Tangkatitham
Asst.Prof.Dr.Chaiyan	Jettanasen Supervisor
Year 2013	

ABSTRACT

This project studies on conducted noise emissions generated by a solar inverter generally functioning using high-frequency switching devices. The inverter in this study is a single-phase full bridge inverter, which is controlled by SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), and used to supply electrical household appliances. The use of switching devices usually produces conducted noise higher than the standard level. Hence, it will be solved by using EMI filter; which will reduce high frequency noise and prevent damage occurred in the system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และสละเวลาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลปริญญานิพนธ์และกรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่างๆ และเอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์ที่จำเป็นแก่คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์พิชิต ลำยอง ที่ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะในส่วนของหม้อหม้อแปลงและอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์แก่ผู้วิจัย คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ นายวทัญญู มีศรีสุข นายกวีพจน์ วรเนตรสุขาธิกุล และนายณัฐวรรษ จำปาศรี นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการเขียนโปรแกรม

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการวัดค่าเพื่อเก็บค่าผลการทดลองเพื่อนำข้อมูลนี้ไปใช้ในปริญญานิพนธ์และนายปิยะวิทย์ ศรีโปดก เจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยทดสอบและเก็บผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมทำวิจัยทุกคนที่คอยให้กำลังใจให้คำปรึกษาและร่วมกันแก้ไขปัญหาต่างๆด้วยความสามัคคีจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่คอยให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนทำ ให้โครงงานครั้งนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	2
1.5 ตารางการดำเนินโครงงาน	3
1.6ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	6
2.2 ปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	7
2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กฟ้า	9
2.3.1 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Noise)	9
2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ทางอากาศ	12
2.4 ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)	13
2.4.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ	13
2.4.2 ประเภทของฮาร์มอนิกส์	14
2.5 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์	14
2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า	14
2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	15
2.5.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า	16
2.5.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)	17
2.6 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ	18
2.6.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)	18
2.6.2 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)	20
2.6.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)	20
2.6.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ	21
2.7 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.7.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)	22
2.7.2 CISPR	22
2.7.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)	23
2.7.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)	23
2.7.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE)	24
2.8 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์	26
2.8.1 มอสเฟตกำลัง(Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor: MOSFET)	26
2.8.2 การสูญเสียของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำขณะสวิตชิ่ง	27
2.8.3 พื้นฐานของสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์	28
2.8.4 การสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	29
2.8.5 การมอดูเลตด้านแอมพลิจูดและฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น	30
2.8.6 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	35
2.8.7 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ชนิดฟูลบริดจ์แบบยูนิโพลาร์	36
2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)	38
2.9.1 การคำนวณความถี่ตัด (cut-off frequency)	39
2.9.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที (T type low pass filter)	39
2.9.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย (Pi type low pass filter)	39
2.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI Filter)	40
2.11 การทดสอบหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	42
2.12 เซลล์แสงอาทิตย์	46
2.12.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	46
2.12.2 วงจรสมมูลและกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์	47
2.12.3 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์	49
2.12.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	51
บทที่ 3 การจำลองการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	54
3.1 ส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ ที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์	54
3.2 การจำลองวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การออกแบบวงจรขับเกต (Gate Drive) 55

3.4 การจำลองการสวิตชิ่งของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (PWM) แบบยูนิโพล่า (Unipolar) 56

3.5 การออกแบบวงจร H-Bridge 56

3.6 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) 58

3.6.1 การหาค่าความเหนี่ยวน่าที่ใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 58

3.6.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 59

3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ 60

3.8 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI filter) 64

3.9 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง 65

3.10 วงจรส่วนประกอบอื่นๆ 70

3.10.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์ 70

3.10.2 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) 70

บทที่ 4 ผลการทดลอง 71

4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงงาน 71

4.2 ผลการวัดสัญญาณของวงจรจริงที่ออกแบบ 74

4.2.1 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรหน่วงเวลาและวงจรขับเกต 74

4.2.2 รูปคลื่นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 76

4.3 ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณไซน์ 77

4.4 ผลการวัดค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ 79

4.5 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำ 82

4.5.1 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า 83

4.5.2 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า 85

4.5.3 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำหลังจากต่อวงจรกรองแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า 87

4.5.4 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำหลังจากต่อวงจรกรองแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า 89

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 91

เอกสารอ้างอิง 92

ภาคผนวก 94

ภาคผนวก ก ขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 95

ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ 99

ภาคผนวก ค อุปกรณ์วัด 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง มาตรฐาน EN 55022	107
ภาคผนวก จ ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮารมอนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม	112
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบจาก PTEC	117
ภาคผนวก ช บทความวิชาการ	127
ประวัติผู้เขียน	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.2 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.4 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม	10
2.5 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม	10
2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง	11
2.7 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง	11
2.8 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว	12
2.9 การแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ	12
2.10 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า	15
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า	15
2.12 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	16
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ	16
2.14 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	17
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ	17
2.16 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)	18
2.17 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	19
2.18 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม	19
2.19 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)	20
2.20 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางบนอุปกรณ์บนโต๊ะ	21
2.21 ขีดจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022	25
2.22 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC	25
2.23 (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟต (ข) กระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว (ค) กระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ	26
2.24 การสูญเสียที่ตัวสวิตซ์	27
2.25 พื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	28
2.26 คลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก	28
2.27 โหมดการทางานใน 4 จตุภาค	28
2.28 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง	29
2.29 การมอดูเลตด้านแอมพลิจูดในย่านเชิงเส้น	31
2.30 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulse width modulation: SPWM)	31
2.31 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชั่น	33
2.32 สเปคตราของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชั่นเมื่อ m_a = 1.25, m_f = 15	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถูกห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.33	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่า m_a	35
2.34	อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์	36
2.35	การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	37
2.36	วงจรสมมูลกรองความถี่ต่ำผ่าน	38
2.37	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที	39
2.38	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย	39
2.39	วงจรพื้นฐานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	40
2.40	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแบบพาสซีฟ	41
2.41	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวด	42
2.42	การทดสอบหาวงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้า	43
2.43	การทดสอบแบบเปิดวงจร	44
2.44	การทดสอบแบบลัดวงจร	45
2.45	ลักษณะทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์	46
2.46	หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	47
2.47	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	47
2.48	กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์	48
2.49	กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ	48
2.50	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน	49
2.51	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน	49
2.52	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน	50
2.53	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์	50
2.54	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารประกอบตระกูลทองแดงอินเดียมแกลเลียม-อาร์เซไนด์และตระกูลแคดเมียมเทลูไรด์	51
2.55	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	51
2.56	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	52
2.57	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	52
2.58	การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย	53
3.1	วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์	54
3.2	วงจรขับเกต	55
3.3	วงจรจำลองการสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	56
3.4	วงจร H-Bridge	57
3.5	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจร H-Bridge	57
3.6	การประยุกต์หม้อแปลงเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	58
3.7	วงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโครงงาน	59
3.8	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออก	60
3.9	สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโหมดผลร่วม	61

เอกสารนี้เป็น... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดผลต่าง	62
3.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์	63
3.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล	64
3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	65
3.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	66
3.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์โหมดผลต่างหลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	67
3.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์หลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	68
3.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัลหลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	69
3.18 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์	70
3.19 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	70
4.1 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์	71
4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงงาน	72
4.3 การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	73
4.4 การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์	73
4.5 สัญญาณที่แสดงการหน่วงเวลาในขอบขาขึ้น	74
4.6 สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์	75
4.7 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์	76
4.8 สัญญาณไซน์แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	77
4.9 สัญญาณไซน์แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	77
4.10 สัญญาณไซน์แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	78
4.11 สัญญาณไซน์แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	78
4.12 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv)	81
4.13 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า	82
4.14 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	82
4.15 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	83
4.16 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	83
4.17 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	85
4.19	ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	85
4.20	สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	86
4.21	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบหลังจากต่อวงจรกรองกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	87
4.22	ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูง ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	87
4.23	สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า	88
4.24	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบหลังจากต่อวงจรกรองกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	89
4.25	ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูง ในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	89
4.26	สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการ	3
2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางไฟฟ้า	5
2.2 ศัพท์และความหมายที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)	13
2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	24
2.4 สรุปคุณลักษณะของมอสเฟต	26
2.5 เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆ	26
2.6 ฮาร์มอนิกของ $(V_{Ao})_h/(V_d/2)$	32
2.7 เงื่อนไขการสวิตชิ่งแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์	36
4.1 ค่าแรงดันสัญญาณไซน์ในกรณีต่างๆ	79
4.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันในกรณีต่างๆ	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการผลิตไฟฟ้าโดยการใช้พลังงานทางเลือกนั้นสามารถผลิตโดยการเปลี่ยนพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปพลังงานหลายวิธี เช่น พลังงานลม คลื่นน้ำทะเล ความร้อนใต้พิภพ และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปพลังงานของธรรมชาติที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด เป็นพลังงานไฟฟ้าต่ำ การผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึงและมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าไม่มากนักนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นจะมีความเหมาะสมที่สุด เพราะสามารถติดตั้งได้รวดเร็ว และติดตั้งได้แทบทุกพื้นที่ เพราะเป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่เรียกว่า “อินเวอร์เตอร์ (Inverter)” เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิ่งในตัวอินเวอร์เตอร์

การผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์นั้น นิยมใช้กันมากและเป็นที่แพร่หลาย โดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงผันกำลังหรืออินเวอร์เตอร์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นจะใช้การสวิตชิ่งของอุปกรณ์สวิตชิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการสวิตชิ่งของอุปกรณ์สวิตชิ่งทำให้เกิดสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนขึ้นจะส่งผลให้อุปกรณ์อื่นในระบบทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ถ้าหากสัญญาณที่ผิดเพี้ยนนี้มีค่าเกินที่มาตรฐานกำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์สัญ ญาณในสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อวิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำและเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนด และเป็นแนวทางในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำของระบบที่อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในสายตัวนำของ อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์
2. เพื่อออกแบบ อินเวอร์เตอร์ในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ
3. จำลองและตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
4. เพื่อวัดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำของ อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ขอบเขตในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การวัดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์และลดทอนสัญญาณรบกวนให้อยู่ในมาตรฐาน

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ
2. ศึกษาวิธีการจำลองและการตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์
4. จำลองวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์โดยโปรแกรม Psim
5. ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนของสายตัวนำ
6. ทำการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์
7. นำอินเวอร์เตอร์มาเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์และวัดค่าสัญญาณในสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์และเปรียบเทียบกับมาตรฐานEN 5502 class B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ตารางการดำเนินโครงงาน

ตาราง 1.1 แผนการดำเนินการ

ขั้นตอน	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ	←→								
2.ศึกษาวิธีการจำลองและการตรวจวัดและลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า		←→							
3.ศึกษาการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์		←→							
4.ศึกษาวงจรอินเวอร์-เตอร์เฟสเดียวแบบฟูล-บริดจ์		←→							
5.จำลองวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์โดยโปรแกรม Psim		←—	———	—→					
6.ทำการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์				←—	———	———	———	—→	
7.เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์และวัดค่าสัญญาณในสายตัวนำของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสง-อาทิตย์และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55022class B								←—	—→
8.เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←—	—→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์
2. ทำให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
3. ทำให้สามารถอธิบายและแก้ไขสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำระหว่างอินเวอร์เตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์
4. ทำให้สามารถใช้โปรแกรมออกแบบ วิเคราะห์ และคาดคะเนผลที่เกิดขึ้นได้
5. ทำให้สามารถสร้างชุดระบบการเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์
6. ได้รับประสบการณ์การศึกษาและการทำงาน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางไฟฟ้า [13]

คำนิยาม	ความหมาย
Electromagnetic Compatibility : EMC ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสีย หรือผลกระทบใดๆต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน
Electromagnetic disturbance : EMD การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบซึ่งเป็นสาเหตุของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า
Electromagnetic interference : EMI การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบเกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประเด็นสำคัญคือผลที่เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา
Conducted Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทางสายตัวนำ
Radiated Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการแผ่กระจายคลื่นทางอากาศ
Immunity	-ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
Susceptibility	-ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

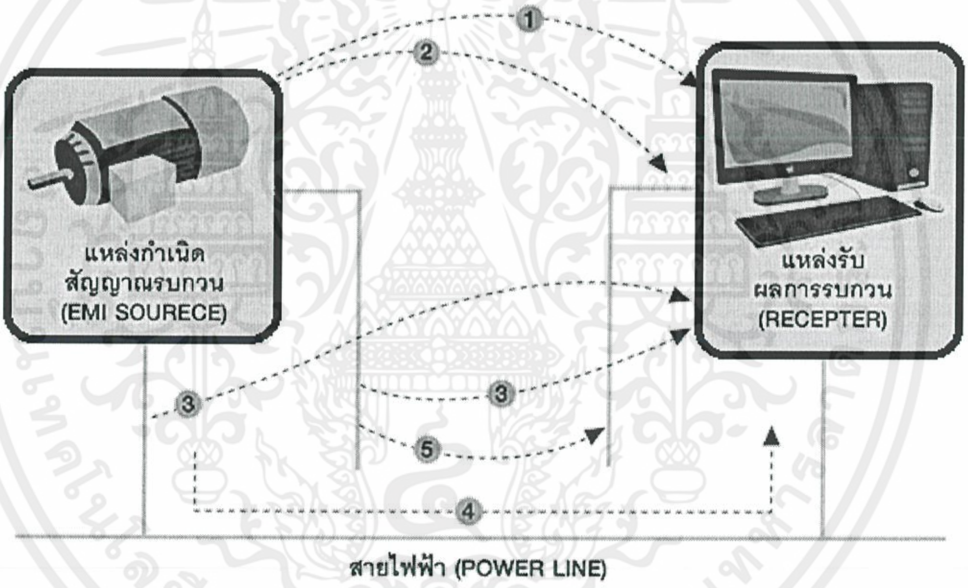
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) [1]

2.1.2.1 องค์ประกอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source)
2. ตัวรับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (receptor or victim)
3. ส่วนเชื่อมต่อหรือตัวกลาง (coupling)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (coupling path) จากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) ไปยังตัวรับผลกระทบ (receptor) ซึ่งตัวรับผลกระทบอาจจะเป็นอุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (system) โดยในทางปฏิบัติแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) อาจจะได้รับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นด้วย จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) และตัวรับผลกระทบ ในเวลาเดียวกันก็ได้สัญญาณรบกวนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบมีหลายรูปแบบดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

รูปแบบที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบโดยตรง (radiated emission)

รูปแบบที่ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยสายตัวนำดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-conducted emission)

รูปแบบที่ 3 สายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-radiated emission)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่ 4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อถึงกันกับตัวรับผลกระทบ (conducted emission)

รูปแบบที่ 5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายตัวนำดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไหร่ก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น

2.2 ปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) [13]

สัญญาณรบกวนที่เชื่อมต่อในรูปที่ 2.1 สามารถจำแนกตามลักษณะของสัญญาณออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. วัดสัญญาณที่มาตามสายตัวนำ จะวัดสัญญาณในรูปแรงดัน (Voltage: V) หรือกระแสไฟฟ้า (Current: A)
2. วัดสัญญาณที่มาทางอากาศ จะวัดสัญญาณรบกวนในรูปสนามไฟฟ้า (Electric field: V/m) หรือสนามแม่เหล็ก (Magnetic field: A/m) หรือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (plane wave: W/m^2)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ผ่านตัวกลางไปยังตัวรับผลกระทบ โดยมีขนาดมากเกินภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวรับผลกระทบที่สามารถทนได้ จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือเกิดความเสียหายแก่ อุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบได้ ดังนั้นคำว่า "ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)" หมายถึงความสามารถของตัวรับผลกระทบ (อุปกรณ์ เครื่องมือ ระบบ) ที่สามารถทำงานได้โดยปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันตัวรับผลกระทบดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากเกินภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทนได้ของอุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบอื่นด้วย

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) ที่ทำให้การทำงานของตัวรับผลกระทบ (อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ) มีความผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายการรบกวนทางแม่เหล็กนี้จะถูกเรียกว่า "สัญญาณการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI)" ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบนั้นเอง โดยทั่วไปการรบกวนทางมาเหล็ก สามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามพิสัยความถี่ โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 0 เฮิรตซ์ ถึงประมาณ 2 กิโลเฮิรตซ์จะถูกจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่ต่ำ โดยจะส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากระบบกำลังไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และทำให้เกิดความสูญเสียในระบบกำลังไฟฟ้า ซึ่งเรียกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่นี้ว่า "ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)"
2. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 1.25 กิโลเฮิรตซ์ ถึงประมาณ 150 กิโลเฮิรตซ์ ในปัจจุบันยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสาร...สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ...

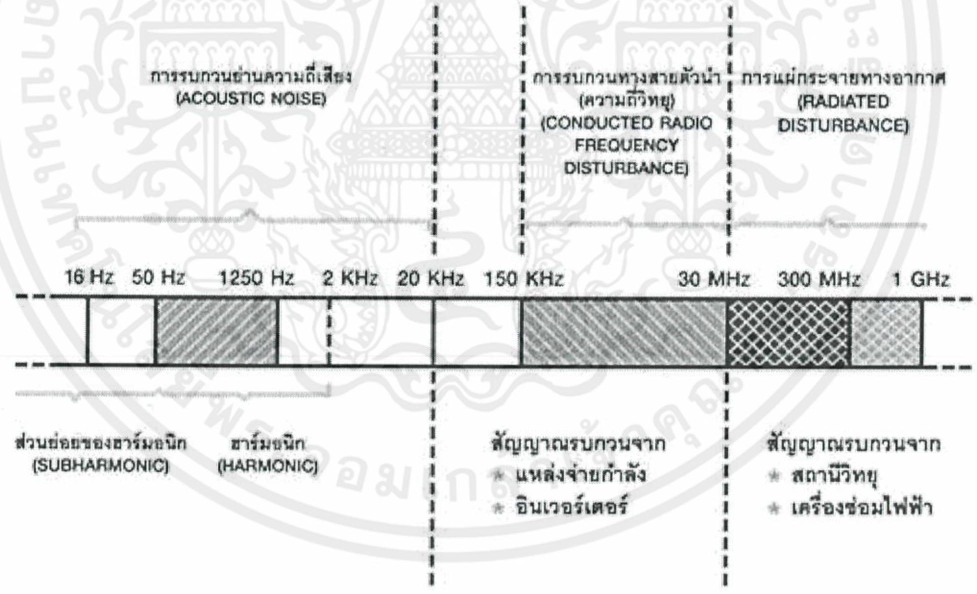
แม่เหล็กไฟฟ้า (EMC engineers) แต่มาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายพิสัยความถี่ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) ให้ครอบคลุมถึงพิสัยความถี่ดังกล่าวบ้างแล้ว

3. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงประมาณ 1 จิกกะเฮิรตซ์ จะถูกจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่สูง บางครั้งจะเรียกแทนว่า “การรบกวนความถี่วิทยุ (Radio frequency disturbance)” สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ

1. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI)

2. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิรตซ์จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI)

ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีตรวจจับสัญญาณรบกวนไม่เหมือนก้น อย่างไรก็ตามคำว่า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” กับ “การรบกวนความถี่วิทยุ” จะไม่สามารถนำมาใช้แทนกันได้เพราะการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเพียงส่วนหนึ่งในพิสัยความถี่วิทยุเท่านั้น สำหรับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) หรือการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของระบบหรือวงจรใดๆก็ตามไม่ได้หมายความว่า จะเป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแต่อย่างใด



รูปที่ 2.2 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

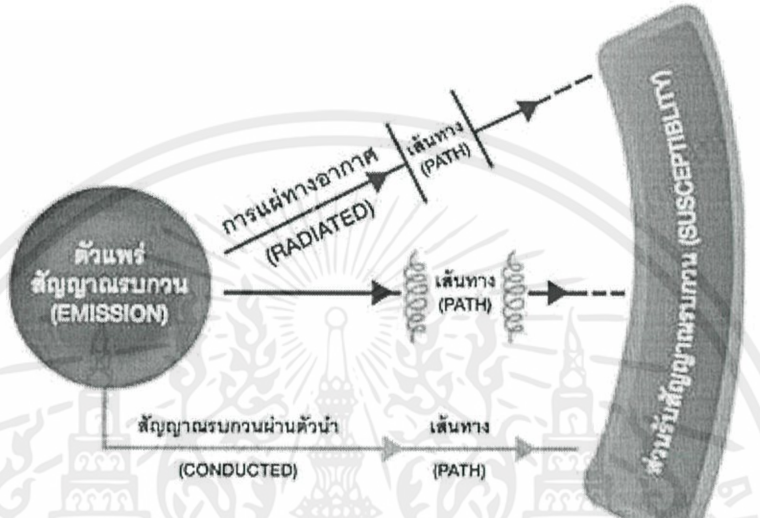
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [13]

เส้นทางการเดินของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้สองรูปแบบ คือ

1. การแผ่กระจาย (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ

2. การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน



รูปที่ 2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

ซึ่งหลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.4 สามารถแทนรูปแบบทางไฟฟ้า (electrically) ให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (capacitor) หรือแทนรูปแบบทางแม่เหล็ก (magnetically) ให้อยู่ในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ได้ เช่น กรณีที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้เป็นตัวเชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถส่งสัญญาณรบกวนดังกล่าวไปยังสายตัวนำตัวอื่นได้

2.3.1 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Noise)

การเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำออกเป็น 2 ชนิดคือ การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำโหมดผลร่วม (Common Mode) และการเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode)

- การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลร่วม (Common Mode)

โดยนิยามของโหมดผลร่วมคือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ (หรือกลุ่มตัวนำ) เทียบกับกราวด์ หรือกลุ่มตัวนำอื่นๆเป็นตัวอ้างอิง โดยตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสัญญาณไปยังกราวด์ซึ่งเป็นตัวอ้างอิง จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลร่วมขึ้นจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันของ

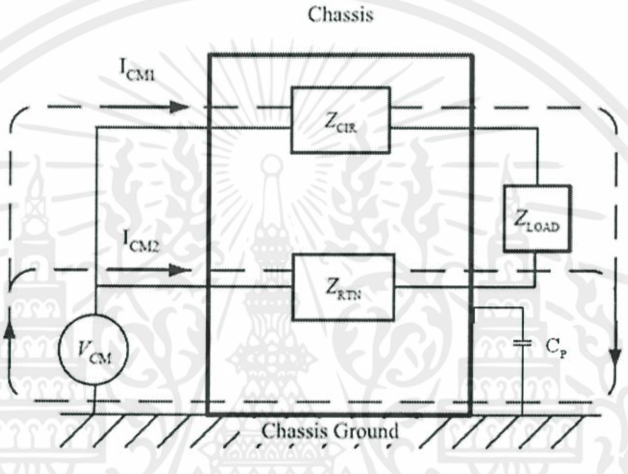
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนของสายสัญญาณ ($V_{noiseCIR}$) ไม่เท่ากับสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับ ($V_{noiseRTN}$) ดังแสดงสมการ (2.1) และ (2.2) ได้ดังนี้ เนื่องจากเส้นทางการไหลของสัญญาณรบกวนในแต่ละสายมีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน

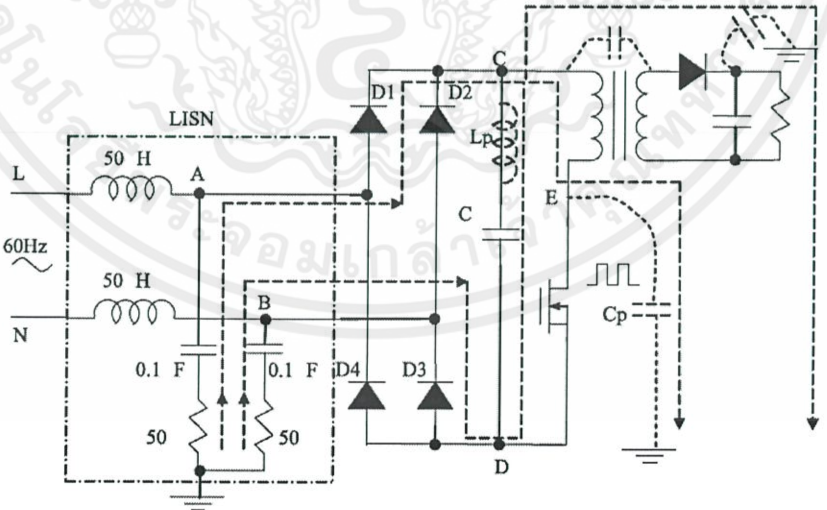
$$V_{noiseCIR} = I_{CM1}x(Z_{CIR} + Z_{LOAD} + X_{Cp}) \quad (2.1)$$

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

จากสมการ (2.1) จะได้ว่าสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายสัญญาณจะผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรแล้วผ่านไปยังอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้า ในขณะที่สัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับจะผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับเพียงอันเดียว ถ้ากระแสโหมดผลร่วมไม่เท่ากันทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นส่งผลให้เกิดกระแสโหมดผลร่วมนี้กลายเป็นโหมดผลต่างได้



รูปที่ 2.4 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม [1]

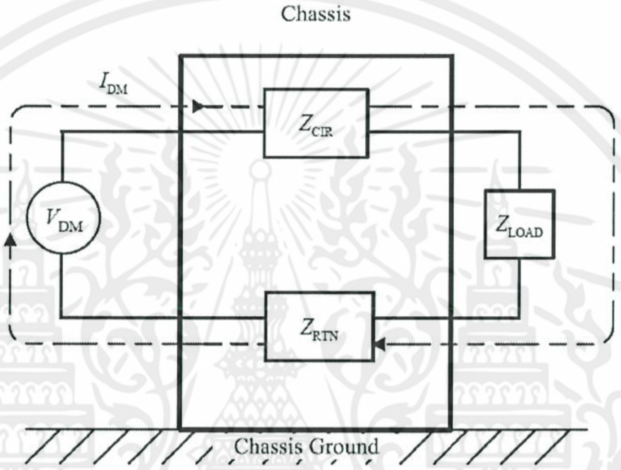


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม [1]

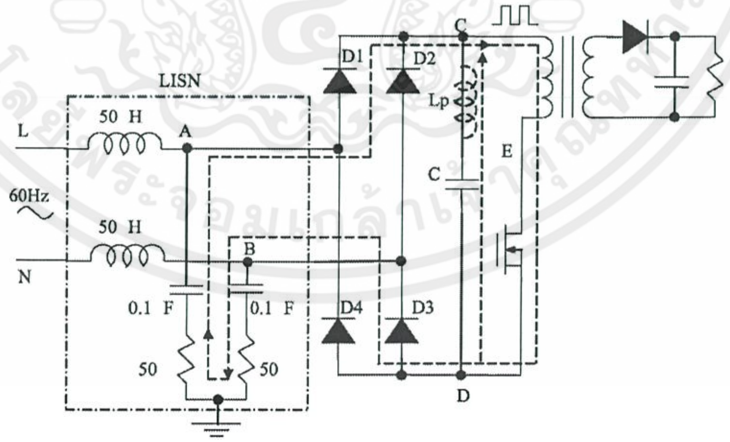
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่าง (Differential Mode)

สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระว่างสองสายตัวนำ คือตัวนำสัญญาณไป (Signal line) และตัวสัญญาณกลับ (Return line) ซึ่งสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างนี้จะเกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สัญญาณนาฬิกา หรือ รูปคลื่นสัญญาณแรงดันในวงจรใดๆ โดยสัญญาณในโหมดผลต่างนี้จะมีทางเดินของกระแสหรือแรงดันไหลจากแหล่งจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร (Z_{CIR}) เพื่อไปยังภาระทางไฟฟ้า และไหลกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ ดังรูปที่ 2.7 คือทางเดินหลักของสัญญาณในวงจรนั้น ดังนั้นทางเดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรและทางเดินของสัญญาณของวงจรก็คือทางเดินเดียวกัน



รูปที่ 2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง [1]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง [1]

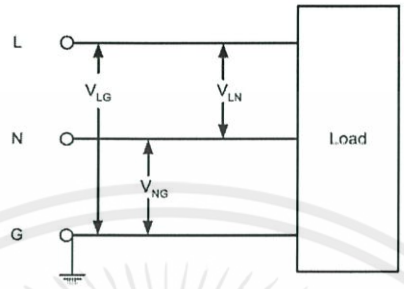
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 แสดงวงจรไฟฟ้าหนึ่งเฟส ประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะสามารถหาแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common mode voltage) และแรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode voltage) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

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

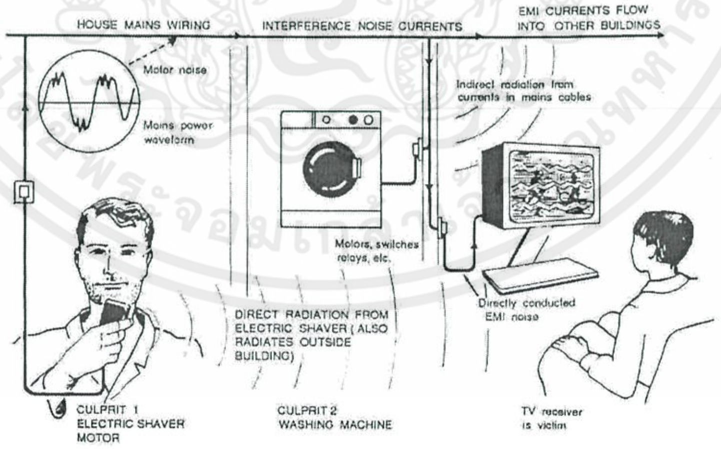
โดย V_{cm}: แรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม V_{LG}: แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์
V_{dm}:แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง V_{NG}: แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์



รูปที่ 2.8 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว [1]

2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ทางอากาศ

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ที่แผ่กระจายผ่านสายตัวนำ นอกจากจะมีผลต่อการแผ่กระกระจายกลับไปในระบบแล้ว ยังมีผลให้เกิดการแผ่กระจายในรูปสัญญาณรบกวนผ่านอากาศได้ โดยตัวนำหรือตัวระบายความร้อนของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ จะทำหน้าที่เสาอากาศที่ส่งสัญญาณรบกวนในรูปของแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิรตซ์ เมื่อมีตัวนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ใกล้เคียง สายตัวนำก็จะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณการแผ่กระจาย ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเกิดการรบกวนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าว ตัวอย่างการแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) [13]

2.4.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ศัพท์และความหมายที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)

ศัพท์	ความหมาย
Harmonics (ฮาร์มอนิกส์)	-สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลเช่น ความถี่หลักมูล 50 เฮิรตซ์ดังนั้นฮาร์มอนิกส์ที่ 2,3 คือสัญญาณที่มีความถี่ 100, 150 เฮิรตซ์ตามลำดับ
Harmonics Current (กระแสฮาร์มอนิกส์)	-ฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าในไลน์ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Device) อาจจะเป็นภาระทางไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิด
Harmonics Voltage (แรงดันฮาร์มอนิกส์)	-ฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าในไลน์ ซึ่งเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์ไหลผ่านความต้านทาน ของสายส่งหรือความต้านทานของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานเข้ากับระบบเพื่อปรับตัวประกอบกำลัง และแรงดันให้ดีขึ้นทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปแรงดันเนื่องจากความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามความถี่ สามารถคำนวณได้จากสมการ $V_h = I_h \times Z_h$
Distortion factor : DF หรือ (ตัวประกอบความเพี้ยน) Harmonic Factor : HF หรือ (ตัวประกอบฮาร์มอนิกส์) Total Harmonics Distortion : THD (ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ทั้งหมด)	-ความหมายทั้งสามคำเหมือนกันคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล
Harmonics Order (ลำดับฮาร์มอนิกส์)	-อัตราส่วนของความถี่ฮาร์มอนิกส์ และความถี่หลักมูล เช่น ความถี่หลักมูล 50 เฮิรตซ์ความถี่ฮาร์มอนิกส์ 150 เฮิรตซ์ลำดับฮาร์มอนิกส์คือ 3 (150/3)

โดย V_hคือ แรงดันฮาร์มอนิกส์

I_hคือ กระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ

Z_hคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

การวัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion : THD) ที่ความถี่ฮาร์มอ-นิกส์ต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูล และเครื่องมือ-วัดฮาร์มอนิกส์ทั้งหลายจะแสดงผลของการวัดฮาร์มอนิกส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน มีภาระทางไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันที่ความถี่หลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของ

ระบบทำให้รูปร่างกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ โดยความผิดเพี้ยนของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่าย เมื่อเพิ่มอิมพีแดนซ์ของระบบเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสทำให้แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีความผิดเพี้ยนไปด้วย ด้วยเหตุนี้ภาระทางไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกเรียกว่าตัวผลิตฮาร์มอนิกส์ และจะถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสม

2.4.2 ประเภทของฮาร์มอนิกส์

- ฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic) คือ ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยลำดับฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$n = (k \times p) = \pm 1 \tag{2.5}$$

p = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อหนึ่งคาบ

k= เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1, 2, 3, ...)

ตัวอย่างของภาระทางไฟฟ้าที่เกิดฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะ คือคอนเวอร์เตอร์, อินเวอร์เตอร์ และยูพีเอส

- ฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonic) คือ ฮาร์มอนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าโดยอันดับของฮาร์มอนิกส์ไม่เป็นไปตามสมการข้างต้น เช่น เครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีอันดับฮาร์มอนิกส์เป็น 11 , 13 , 23 , 25 , ... แต่ถ้ามีฮาร์มอนิกส์อันดับอื่นปนเข้ามาจะถือว่าเป็น Non-characteristic Harmonic

- ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic) คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่หารด้วยสามลงตัว ได้แก่ 3,6,9,... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (Sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่มีการต่อวงจรแบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวทรัลร้อน ฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

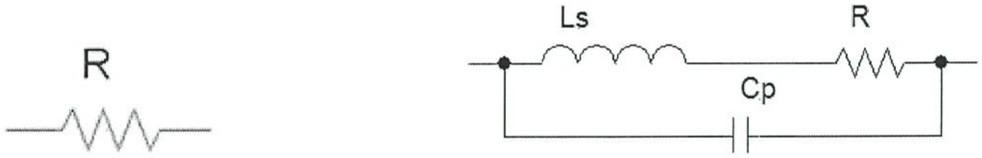
2.5 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์ [13]

ในการทำงานของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่ความถี่สูงพฤติกรรมของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่สามารถรักษาคุณสมบัติเอาไว้ได้ โดยจะมีองค์ประกอบแฝงเมื่อทำงานที่ความถี่สูง

2.5.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic inductance:L_p) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance:C_p) ขึ้น ดังรูปที่ 2.10 โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝงนี้เกิดจากการที่ตัวต้านทานมีขายาว ถ้าหากยิ่งยาวค่าความเหนี่ยวนำแฝงก็ยิ่งมากตามไปด้วย ส่วนในรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงขนาดอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.10 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า [8]

ในกรณีที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = R \tag{2.5}$$

ในกรณีที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R+j2\pi fL_s}+j2\pi fC_p} \tag{2.6}$$

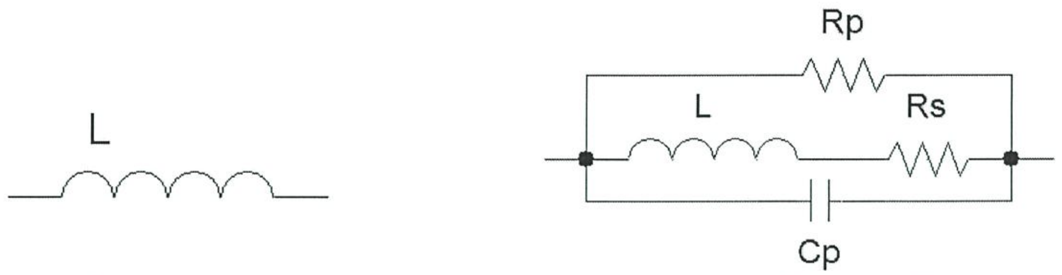
(ก) ในอุดมคติ (ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า [8]

2.5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในทางปฏิบัติการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะมีองค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น คือค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) โดยเกิดจากช่องว่างระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่จึงทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในขณะเดียวกันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) เกิดขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้น คุณสมบัติต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.12 และในรูปที่ 2.13 เป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ

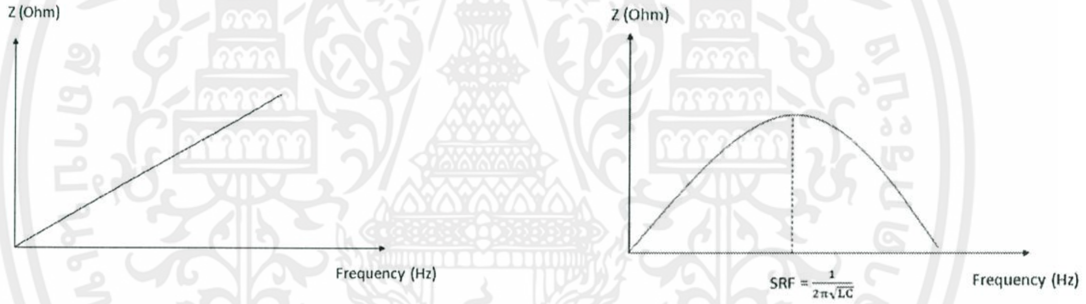
รูปที่ 2.12 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า [8]

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL \tag{2.7}$$

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_S + j2\pi fL} + \frac{1}{R_P} + j2\pi fC_p} \tag{2.8}$$



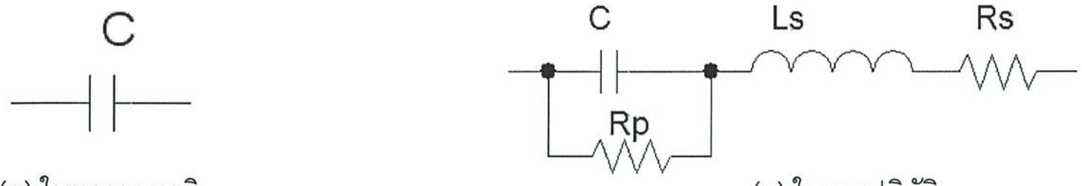
(ก) ในอุดมคติ (ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ [8]

2.5.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้า ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) และ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance: L_p) เกิดขึ้นดังรูป 2.14 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าแฝงและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ

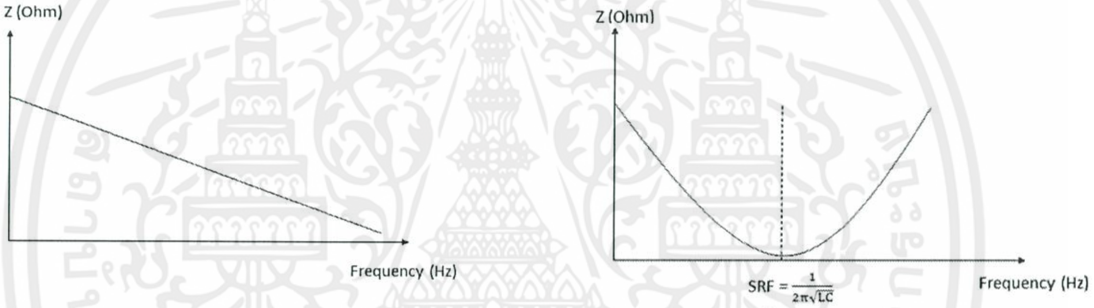
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [8]

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fc} \tag{2.9}$$

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC + \frac{1}{R_P}} + j2\pi f L_S + R_S \tag{2.10}$$



(ก) ในอุดมคติ (ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ [8]

2.5.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)

หรือค่า Q เป็นตัวประกอบคุณภาพ ใช้กับวงจรหรืออุปกรณ์ ที่เป็นสัญญาณไซน์ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Q = 2\pi \frac{\text{Peak Stored energy}}{\text{Energy dissipated per cycle}} \tag{2.11}$$

โดยค่า ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ยิ่งมีค่ามากยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

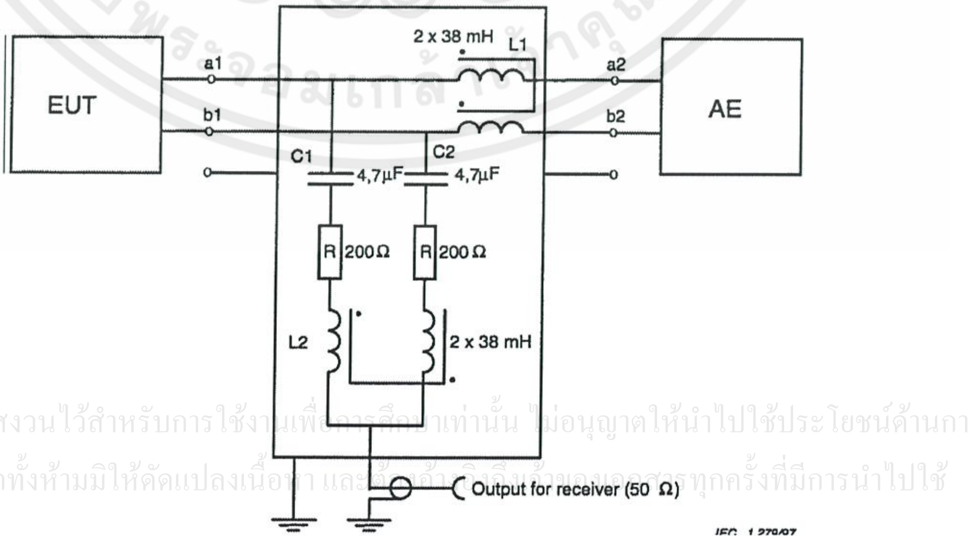
2.6 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ [13]

อุปกรณ์ที่ใช้นั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติที่กำหนด เพื่อให้การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022) โดยอุปกรณ์ต่างๆมีดังนี้

2.6.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

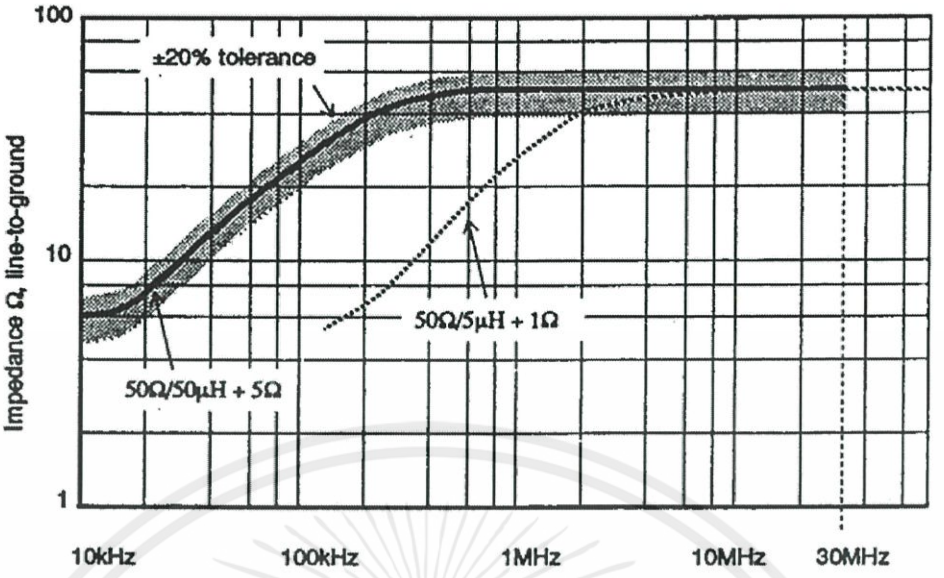
ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องมีโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) หรืออาจจะเรียกว่า Artificial Mains Network (AMN) ซึ่งโดยทั่วไปจะต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและตัวทดสอบ (Equipment Under Test: EUT)สาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟ เพราะที่ด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟ เป็นเส้นทางหลังของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ที่จะไปรบกวนวงจรอื่นทางสายตัวนำ และสายที่ต่อจากแหล่งจ่าย จะทำตัวคล้ายกับสายอากาศ แผ่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลอง หน้าที่หลักๆของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022) แบ่งได้เป็น 3 ข้อด้วยกันคือ

1. รักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ระหว่างสายในแต่ละสายของแหล่งจ่ายกับจุดกราวด์อ้างอิงให้คงที่ ที่ 50 โอห์มโดยมีตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 50 ไมโครเฮนรี่ต่ออยู่ด้วย สำหรับความถี่ตั้งแต่ 150 กิโลเฮิรตซ์ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์โดยที่ 50 โอห์มต่อ50 ไมโครเฮนรี่ +5 โอห์มใช้สำหรับ LISN ทั่วไป และ 50 โอห์มต่อ50 ไมโครเฮนรี่ +1โอห์มใช้สำหรับ LISN ที่ใช้ทดสอบในสภาวะกระแสสูงถึง 500 แอมแปร์
2. แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายตัวนำ ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้การทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) และส่งผ่านสัญญาณรบกวน ไปยังอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า(EMI receiver)เพื่อทำการวิเคราะห์
3. ลดทอนสัญญาณรบกวนที่มากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักออกไปได้ โดยไม่ให้เข้าสู่ระบบที่กำลังวัดอยู่ และเพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ ควรมีการต่อจุดอ้างอิงของ LISN ลงดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) [8]



รูปที่ 2.17 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ [8]

2.6.2 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม หรือเครื่องรับสัญญาณรบกวน (รูปที่ 2.19) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนในตัวนำ หรือจากสายอากาศต่างๆ และสำหรับสัญญาณรบกวนที่มาทางสายอากาศ เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในการวัดแบบค่ายอดเสมือน (quasi-peak) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 เครื่องรับสัญญาณแบบค่าเฉลี่ย (average) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 เดซิเบล ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบค่าสูงสุด (peak) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 3 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมีแบนวิดท์ 6 เดซิเบล ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม [13]

2.6.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)

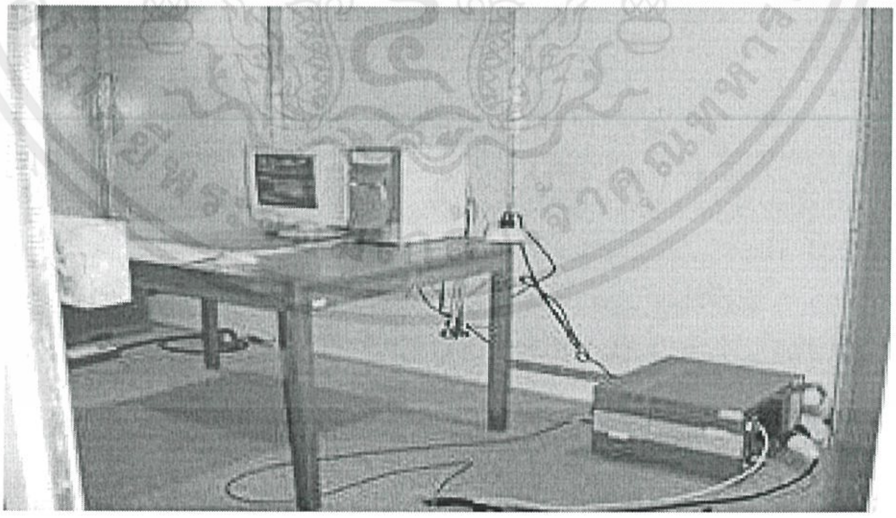
เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test:EUT) ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้วัดถึงวัสดุที่ใช้ทำกล่องถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร

แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบ ใต้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลองและต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคง ด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 2x2 ตารางเมตร

จุดกราวด์อ้างอิงของ LISN และโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำโดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.6.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

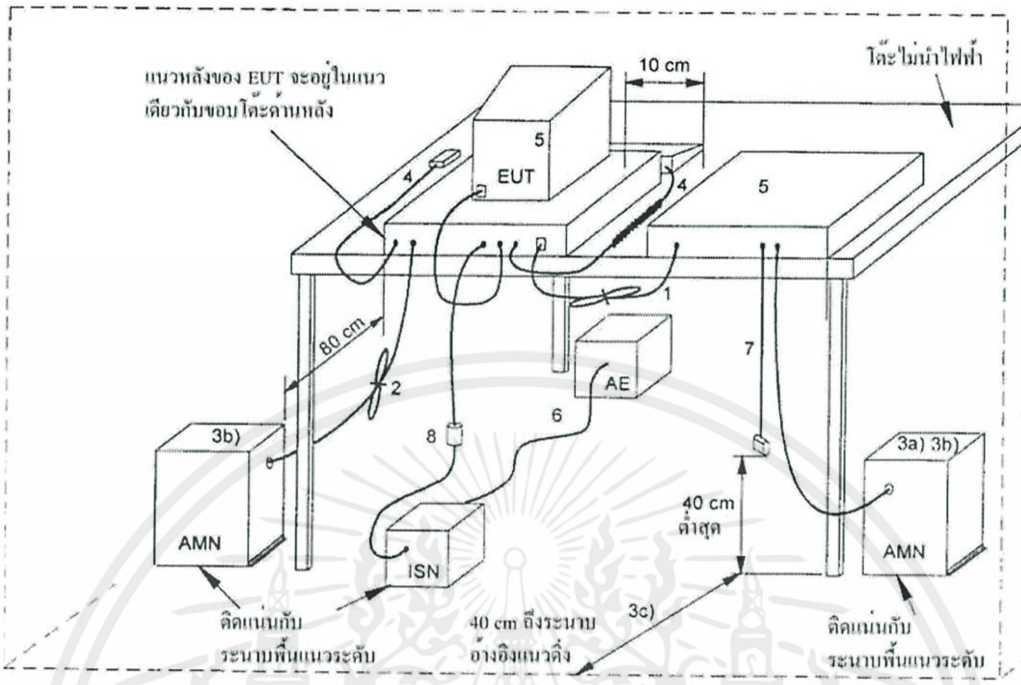
ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นห้องที่ถูกปิดทั้งหกด้าน วัสดุที่ใช้ทำผนังแต่ละด้านเป็นโลหะทึบสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ระบบทดสอบ และกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบออกไปรบกวนระบบอื่นๆภายนอก ภายนอกห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกติดตั้งตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (EMI Filter) เพื่อใช้กรองสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกให้มีระดับต่ำ ก่อนป้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบที่ติดตั้งอยู่ภายในห้อง



รูปที่ 2.19 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Shielded Room) [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ



AMN:โครงข่ายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานเทียม

AE:บริภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง

EUT:บริภัณฑ์ที่ทดสอบ

LISN:โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

รูปที่ 2.20 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางบนอุปกรณ์บนโต๊ะ [13]

ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1956-2548

1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้นโลหะแนวระดับมากกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินจะต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่ความยาว 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟหลักที่ยาวเกินต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่กลางสาย หรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสม
3. ให้ต่อ EUT เข้ากับ AMN เครื่องหนึ่งAMNและLISN ทุกเครื่องจะต้องติดตั้งเข้ากับระนาบอ้างอิงแนวดิ่งหรือผนังโลหะ
    3a. หน่วยอื่นทั้งหมดของระบบได้รับกำลังไฟฟ้าจาก AMN เครื่องที่ 2 อาจติดตั้งเต้ารับสำหรับการใช้หลายอุปกรณ์
    3b. AMN และ LISN ห่างจาก EUT 80 เซนติเมตร และห่างจากอุปกรณ์อื่นๆและแผ่นโลหะอื่นอย่างน้อย 80 เซนติเมตร
    3c. ต้องจัดตำแหน่งสายไฟหลักและสายสัญญาณให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และต้องอยู่สูงจากระนาบอ้างอิงแนวดิ่ง 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส...ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

4. สายของอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น คีย์บอร์ด เมาส์ และอื่นๆ ให้วางในลักษณะการใช้งานทั่วไป
5. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพที่ต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางบนตัวควบคุมได้
6. มีสายสัญญาณเข้า/ออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้
8. ถ้าใช้โพรบกระแส ต้องวางอยู่ห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 1 เมตร

2.7 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารก่อให้เกิดทั้งผลดี และผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตและผู้ใช้เครื่องมือสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นธรรม ไม่เกิดปัญหาด้านการใช้งาน มีความปลอดภัย หน่วยงานต่างๆจึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังนี้

2.7.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)

FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission เป็นองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (wire and radio communications) ก่อตั้งในปี พ.ศ. 2470 สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (radio-frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (telephone network) สำหรับ Part 15 จะแบ่งมาตรฐานออกเป็นสี่ฉบับ และนิยามความหมายของอุปกรณ์ความถี่วิทยุว่าหมายถึงอุปกรณ์ใดๆก็ตามที่การทำงานก่อให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ (radio-frequency energy) ได้ทั้งทางสาย(conduction) หรือทางอากาศ (radiation)

FCC ได้นิยามพลังงานความถี่วิทยุ (Energy in the radio frequency range) ว่าเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ (9 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 3000 จิกะเฮิรตซ์) โดยมีจุดประสงค์ ในการออกมาตรฐาน เพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้รับใบอนุญาตในการติดตั้ง (radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อการติดต่อสื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (radio communications) อุปกรณ์ดิจิตอล (digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดนี้

2.7.2 CISPR

CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2476 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ หลายๆประเทศได้นำมาตรฐาน CISPR มาดัดแปลงใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานบังคับใช้สำหรับแต่ละประเทศ ประเทศไทยได้นำมาตรฐานนี้มาปรับใช้ เช่นมาตรฐานของบริภัณฑ์ส่องสว่างได้จากการนำมาตรฐาน CISPR 15 มาดัดแปลงใช้งาน

มาตรฐาน CISPR หลัก เช่น CISPR Publication 22 ถูกกำหนดขึ้นเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องกับบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2528 หลังจากนั้นหลายๆประเทศได้นำมาตรฐานดังกล่าวมาปรับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติ (national standard) อาทิ ประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI (Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment) โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

2.7.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)

MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออก โดยหน่วยทางการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ มาตรฐานดังกล่าว จะมีรายละเอียดและเข้มข้นกว่า FCC เพราะมาตรฐานดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) และย่านความถี่ที่พิจารณายังกว้างกว่าด้วย (30 เฮิรตซ์– 40 จิกกะเฮิรตซ์)

2.7.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้มีการนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 โดยได้มีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้วได้แก่ มอก. 1955-2542 (บริภัณฑ์ส่องสว่างและบริภัณฑ์ที่คล้ายกัน: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และ มอก. 1956-2542 (บริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ)

มาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้าน ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของ IEC (International Electrotechnical Commission) เช่นเทคนิคการทดสอบ ด้านสิ่งแวดล้อม มาใช้โดยออกเป็นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม (สมอ) ตารางที่ 2.3 แสดงถึงตารางสรุปมาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนของนานาชาติและภูมิภาคที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

International	USA	European	หัวข้อ/รายการ
CISPR 11	FCC Part 18	EN 55011	งานอุตสาหกรรม การทดลองวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (Industrial, Scientific and Medical)
CISPR 12	(SAE)		งานยานยนต์ (Automotives)
CISPR 13	Part 15	EN 55013	ภาครับการกระจายเสียง หรือภาพ (Broadcast Receivers)
CISPR 14		EN 55014	อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน (Household Appliances/tools)
CISPR 15		EN 55015	ความส่องสว่าง หรือแสงฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lights/luminaries)
CISPR 16			อุปกรณ์การวัด (Measurement apparatus/methods)
CISPR 22	Part 15	EN 55022	บริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information technology equipment)
		EN 55081-1,2	มาตรฐานการแพร่สัญญาณทั่วไป (Generic emissions standards)

การทดลองในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มาตรฐาน EN 55022 Class b เป็นตัวอ้างอิง

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่า ต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านเต้ารับและจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (Antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ ซึ่งการผ่านการทดสอบมาตรฐานที่กำหนด ไม่ได้เป็นการรับประกันว่าสินค้าที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เป็นเพียงแค่การยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้าดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

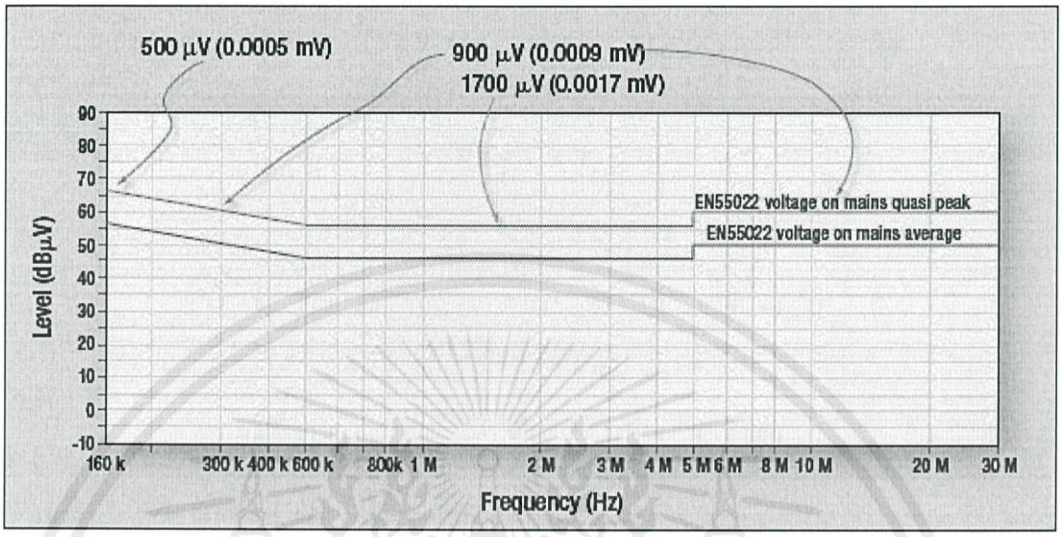
2.7.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE)

มาตรฐานนี้จะพิจารณาในช่วงความถี่วิทยุ 9กิโลเฮิรตซ์ถึง 400 จิกะเฮิรตซ์ โดยแบ่งออกเป็น 2 class ด้วยกันคือ

- ClassB ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานภายในบ้าน/ที่พักอาศัย แต่อาจถูกใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัยได้เช่นกัน โดยสภาพแวดล้อมภายในบ้าน/ที่พักอาศัยเป็นสภาพแวดล้อมที่มีการใช้เครื่องรับสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ในระยะห่าง 10 เมตรจากตำแหน่งที่ผลิตภัณฑ์นี้ถูกใช้งาน

ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

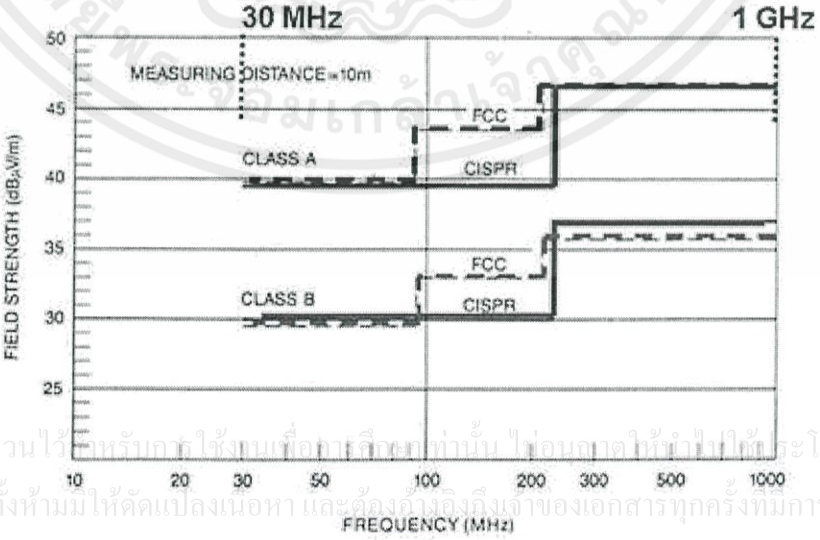
- ClassA ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัย นอกจากนี้ยังอาจใช้ผลิตภัณฑ์ Class A ภายในบ้าน/ที่พักอาศัยได้ แต่อาจก่อให้เกิดการรบกวนและผู้ใช้ต้องดำเนินมาตรการแก้ไขที่เพียงพอ



รูปที่ 2.21 ขีดจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022 [7]

ขีดจำกัด (Limit) การแผ่กระจายทางอากาศ (Radiated Emission) ตามมาตรฐาน CISPR และ FCC แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งจะประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 2 Class คือ
- Class A คือ ขีดจำกัดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial use)
- Class B สำหรับใช้ในที่อยู่อาศัย (Residence use)

ขีดจำกัดกำหนดของ Class A จะกำหนดให้สัญญาณรบกวนได้สูงกว่าในที่อยู่อาศัย เนื่องจากแนวความคิดที่ว่า เครื่องจักรและคนที่อยู่ในอุตสาหกรรมเป็นคนวัยทำงานมีความแข็งแรงสูงกว่าในที่อยู่อาศัยและผลิตภัณฑ์ คนในที่อยู่อาศัยและมาตรฐาน CISPR กำหนดเกณฑ์ให้สัญญาณรบกวนได้น้อยกว่า FCC



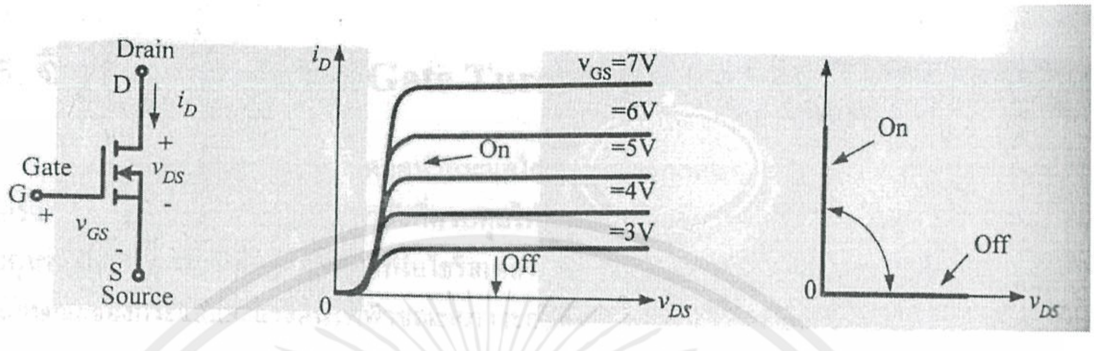
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC [13]

2.8 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์

2.8.1 มอสเฟตกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor : MOSFET)

มี2ชนิดคือ P-channel และ N-channel ซึ่งกรณี N-channel จะแสดงสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัวและในอุดมคติดังรูปที่ 2.23



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.23 (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟต (ข) กระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว (ค) กระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ [1]

การควบคุมมอสเฟตจะควบคุมจากขาเกต โดยการป้อนแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอส (V_{GS}) ช่วงเวลาการสวิตชิ่งของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาทีถึงหลักร้อยของนาโนวินาทีขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง ในการใช้งานมอสเฟตขณะนำกระแสจะมีการสูญเสียเกิดขึ้น (conduction losses) ความสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอส ($R_{DS(on)}$) ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทนแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟท ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับซอสของมอสเฟตมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก เมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็จะมากขึ้นด้วยคุณลักษณะของมอสเฟตแสดงในตารางที่ 2.4 และการเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณลักษณะของมอสเฟต

คุณลักษณะของมอสเฟต
เป็นอุปกรณ์สวิตชิ่งที่เร็ว
ควบคุมด้วยแรงดัน
มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก
เมื่อพิกัดทนแรงดันสูงความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอสจะสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆ [14]

อุปกรณ์	ความสามารถส่งผ่านกำลัง	ความเร็วในการสวิตชิ่ง	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การสูญเสียของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำขณะสวิตชิ่ง

การสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์เป็นเรื่องสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเนื่องจากเป็นการสูญเสียหลักในระบบซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นการทำความเข้าใจความสูญเสียอันเนื่องจากการทำงานของสวิตช์จึงเป็นสิ่งจำเป็น

การทำงานของสวิตช์มีสองสถานะของการทำงาน คือสถานะนำกระแสและไม่นำกระแส โดยจะมีช่วงเปลี่ยนสถานของการทำงานของสวิตช์จากนำกระแสไปเป็นไม่นำกระแส และจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส ซึ่งเรียกว่า ช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

$t_{s,on}$ คือ เริ่มนำกระแส (turn on)

$t_{conduct}$ คือ นำกระแส (on)

$t_{s,off}$ คือ เริ่มหยุดนำกระแส (turn off)

t_{off} คือ ไม่นำกระแส (off)

การสูญเสียที่ตัวสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น

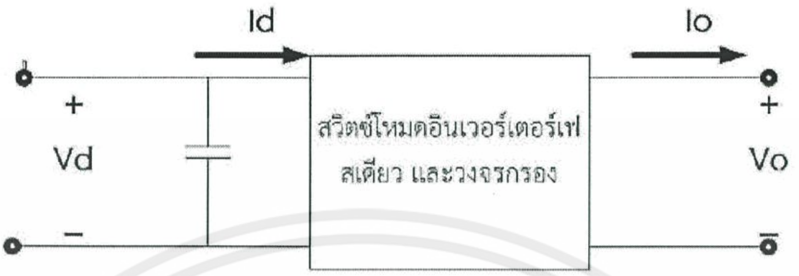
- การสูญเสียขณะนำกระแส (Conduction loss: $W_{con,loss}$)
- การสูญเสียขณะสวิตชิ่ง (Switching loss: $W_{s,loss}$)
  - สูญเสียช่วงเวลาขณะเริ่มนำกระแส (turn-on loss: $W_{s_on,loss}$)
  - สูญเสียช่วงเวลาขณะเริ่มหยุดนำกระแส (turn-off loss: $W_{s_off,loss}$)

รูปที่ 2.24 การสูญเสียที่ตัวสวิตช์

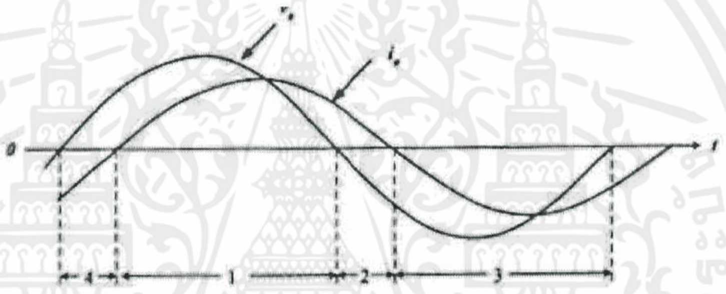
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 พื้นฐานของสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 2.25 ในส่วนด้านออกของอินเวอร์เตอร์นั้นเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปจะเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นสัญญาณด้านออกจะได้เป็นรูปไซน์ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 พื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ [11]



รูปที่ 2.26 คลื่นแรงดันและกระแสด้านออก [1]

การพิจารณากำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านออกดังรูปที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.27 โหมดการทางานใน 4 จตุภาค [11]

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_oเป็นบวก, i_oเป็นบวก,p_oเป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 2 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นลบ,i_o เป็นบวก , p_o เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_d)

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

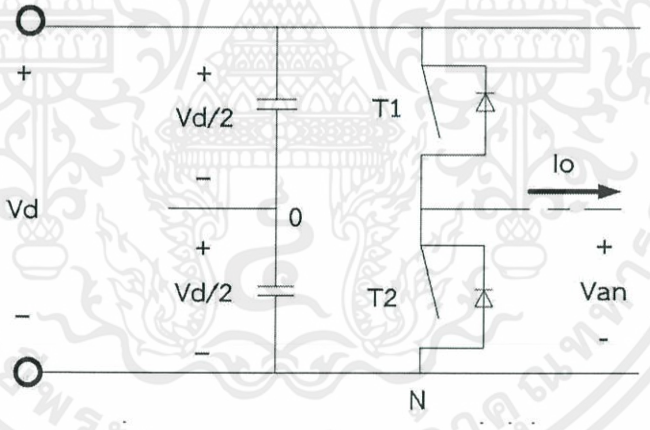
v_o เป็นลบ,i_o เป็นลบ , p_o เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นบวก , I_o เป็นลบ , p_o เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_d)

2.8.4 การสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.28 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์คือกิ่ง A หรือเฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็มดังรูป 2.28



รูปที่ 2.28 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง [11]

ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้ควบคุมรูปไซน์ (Sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ความถี่ของการสวิตชิ่ง (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มมีดังต่อไปนี้

$v_{control}$ คือ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

v_{tri} คือ สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิ่ง

f_1 คือ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

f_s คือ ความถี่ของการสวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ...ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m_a คือ อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

m_f คือ อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f จะนิยามจากสมการที่และตามลำดับ

$$m_a = v_{control} / v_{tri}$$

$$m_f = f_s / f_1$$

เมื่อ $v_{control}$ คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

v_{tri} คือค่ายอดของแรงดันรูปสามเหลี่ยม

2.8.5 การมอดูเลตด้านแอมพลิจูดและฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น

เงื่อนไขของการสร้างสัญญาณสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มคือ

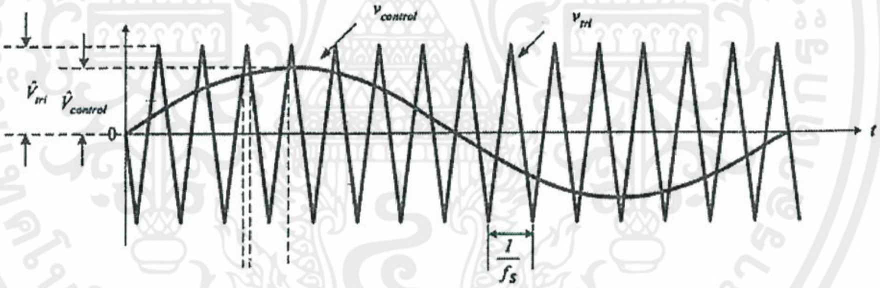
$v_{control} > v_{tri}$, T_{A+} จะนำกระแส $V_{Ao} = 0.5\ V_d$

$v_{control} < v_{tri}$, T_{A-} จะนำกระแส $V_{Ao} = -0.5\ V_d$

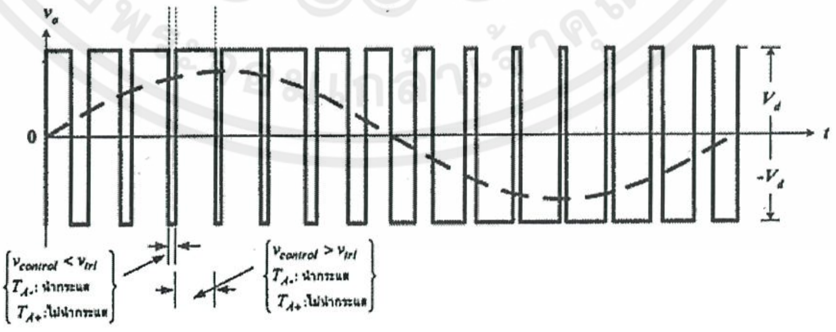
การมอดูเลตด้านแอมพลิจูด มี 2 แบบ

2.8.5.1 การมอดูเลตเชิงเส้น

จะอยู่ในช่วง $0 \le m_a \le 1$ ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (fundamental-frequency component of the output voltage) จะแปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a

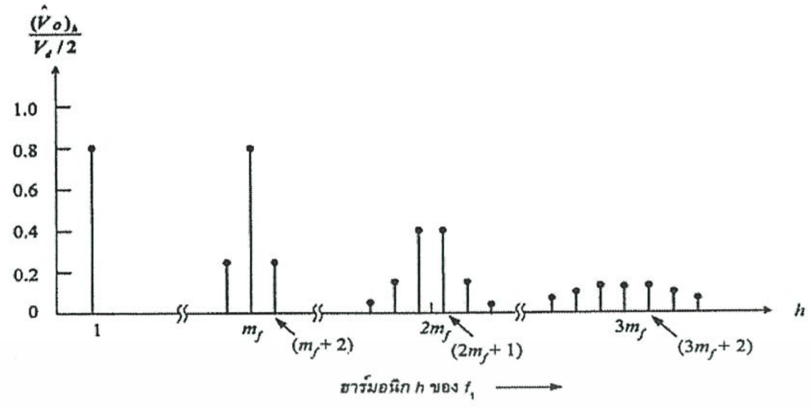


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 2.29 การมอดูเลตด้านแอมพลิจูดในย่านเชิงเส้น [1]

จากรูปที่ 2.29 ค. แสดงถึงฮาร์มอนิกสเปคตรา (harmonic spectrum) ของ v_{Ao} โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(V_{Ao})_h/(V_d/2)$ โดยมีสามส่วนที่สำคัญคือ

1. ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล $(V_{Ao})_1 = m_a(V_d/2)$

โดยมีความสัมพันธ์จาก

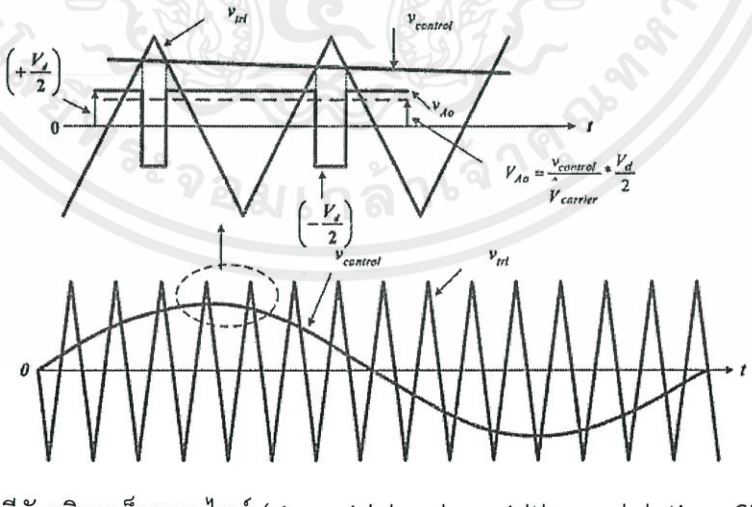
$$V_{Ao} = (v_{control}/V_{tri})(V_d/2) \qquad v_{control} \le V_{tri} \qquad (2.8)$$

$$v_{control} = V_{control}\ \sin\omega_1 t \qquad v_{control} \le V_{tri}$$

$$(V_{Ao})_1 = (v_{control}/vtri)*(V_d/2)\sin\omega_1 t \qquad m_a \le 1.0$$

$$(V_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d/2)\sin\omega_1 t \qquad m_a \le 1.0 \qquad (2.9)$$

สมการที่ (2.9) พิจารณาร่วมกันกับรูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับค่า m_a ซึ่ง m_a จะมีค่าประมาณ 0 ถึง 1



รูปที่ 2.30 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulse width modulation: SPWM) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิก (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ $1m_f$, $2m_f$, $3m_f$, ... ดังแสดงในสมการที่ (2.10) หรือ (2.11)

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \tag{2.10}$$

$$h = j\,(m_f) \pm k \tag{2.11}$$

เมื่อ h = 1 คือความถี่หลักมูล (fundamental frequency)

ถ้าค่า j เป็นเลขคี่ค่าฮาร์มอนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคู่

ถ้าค่า j เป็นเลขคู่ค่าฮาร์มอนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคี่

เช่นตัวอย่างไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกในรูปที่ 2.29 (ค)

3. ค่า m_fฮาร์มอนิกส์ควรจะเป็นเลขคี่เพราะถ้ากำหนดให้ค่าm_f เป็นเลขคี่ก็จะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่ซึ่งแสดงได้จากสมการ f (-t) = -f (t) ผลที่ได้คือจะมีเพียงฮาร์มอนิกส์เลขคี่เท่านั้นที่ปรากฏอยู่ใน v_{Ao} ส่วนฮาร์มอนิกส์เลขคู่จะหักล้างกันโดยที่ช่วง $m_f > 21$ จะถือว่า m_fมีค่ามากโดยที่ขนาดของฮาร์มอนิกส์ย่อย (sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า m_f

ตารางที่ 2.6 ฮาร์มอนิกส์ของ $(V_{Ao})_h$ /$(V_d/2)$ [1]

h \ m	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
องค์ประกอบความถี่หลักมูล	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Mf	1.242	1.150	1.006	0.818	0.601
mf ± 2	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
mf ± 4					0.018
2mf ± 1	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
2mf ± 3		0.024	0.071	0.139	0.212
2mf ± 5				0.013	0.033
3mf	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
3mf ± 2	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
3mf ± 4		0.012	0.047	0.104	0.157
3mf ± 6				0.016	0.440
4mf ± 1	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
4mf ± 3	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
4mf ± 5			0.034	0.084	0.119
4mf ± 7				0.017	0.050
หมายเหตุ: $(V_{Ao})_h$ /$(V_d/2)$ [=$(V_{AN})_h$ /$(V_d/2)$] เป็นฟังก์ชันของ m_a					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

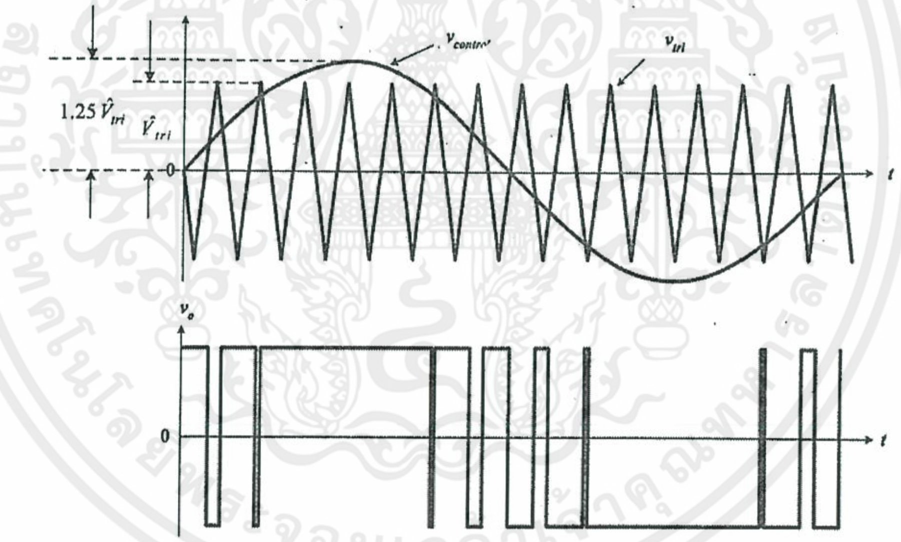
2.8.5.2 โอเวอร์มอดูเลต

จะอยู่ในช่วง ma › 1 ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์สูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นจะเกิดขึ้นเมื่อ $V_{control} > V_{tr\,l}$ โดยค่ารูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มจะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตชิ่งแสดงดังในรูปที่ 2.31 โอเวอร์มอดูเลชั่นมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าในกรณี ma ≤1 แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งและช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง $V_d/2$ ถึง $4V_d/2\pi$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$12\ V_d < (v_{Ao})_1 < 4\pi \cdot 12\ V_d \quad (2.12)$$

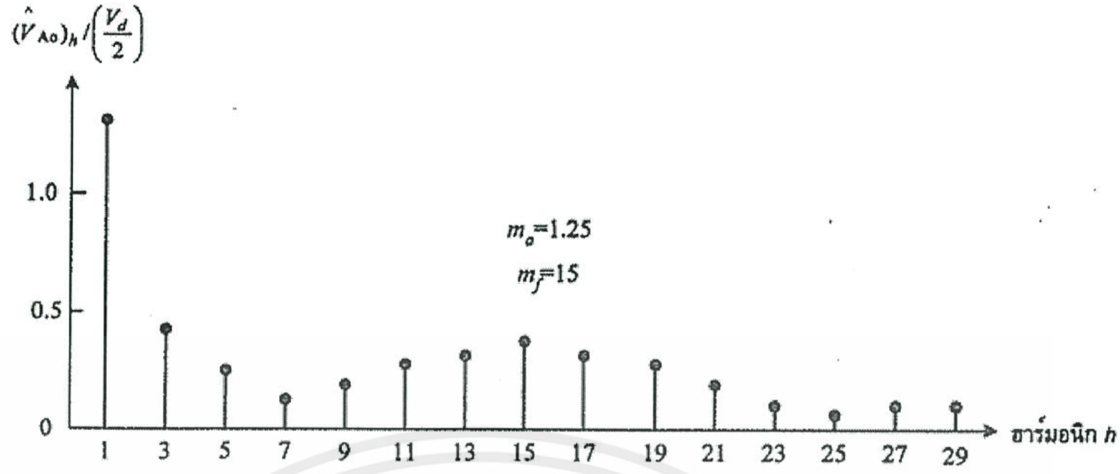
จากสมการที่ (2.12) ค่า $(v_{Ao})_1$ จะอยู่ระ หว่างค่าที่ทำงานในโหมดเชิงเส้นและโหมดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กรณีโหมดสี่เหลี่ยมจะเกิดจากการที่ $m_a >> 1$ และต้องมีค่ามากพอการที่จะบอกว่ามากพอเท่าใดจะขึ้นอยู่กับค่า m_f ด้วยหาก m_f มีค่ามากกว่า m_a ก็จะต้องมีค่ามากไปด้วยที่ทำให้ $v_{control}$ ไม่ตัดยอดของปลายสามเหลี่ยมของสัญญาณอ้างอิงเลยผลการเปรียบเทียบก็จะได้แรงดันเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อย่างไรก็ตามข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชั่นก็คือทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกส์อันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูลเช่นฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้นเช่นในรูปที่ 2.32 ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.31 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชั่น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

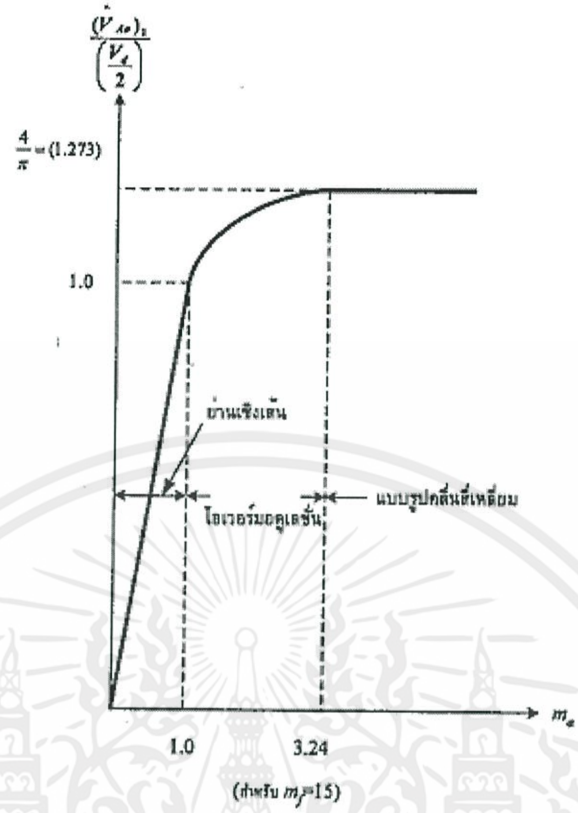


รูปที่ 2.32 สเปคตราของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชั่นเมื่อ m_a = 1.25, m_f = 15 [1]

การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณในเงื่อนไขหาก $v_{control} > v_{tri}$ จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวกในทำนองเดียวกันหาก $v_{control} < v_{tri}$ จะได้พัลส์เป็นลบกรณีโอเวอร์มอดูเลชั่นในรูปที่ 2.31 ไซเคิลบวกของ $v_{control}$ จะมีช่วงยอดที่ $v_{control}$ มากกว่า v_{tri} จนถือได้ว่าจะได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตชิ่งเช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไซเคิลลบของ $v_{control}$ ช่วง peak ล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตชิ่ง

ผลเสียที่จะเกิดเช่นในรูปที่ 2.32 คือเกิดฮาร์มอนิกส์ที่ใกล้ๆกับความถี่หลักมูลหรือฮาร์มอนิกส์อันดับหนึ่งและเกิดฮาร์มอนิกส์รอบๆความถี่ f_s นอกจากนี้เมื่อโอเวอร์มอดูเลชั่นจะทำให้แรงดันไม่เป็นเชิงเส้นในย่านนี้ดังรูปที่ 2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



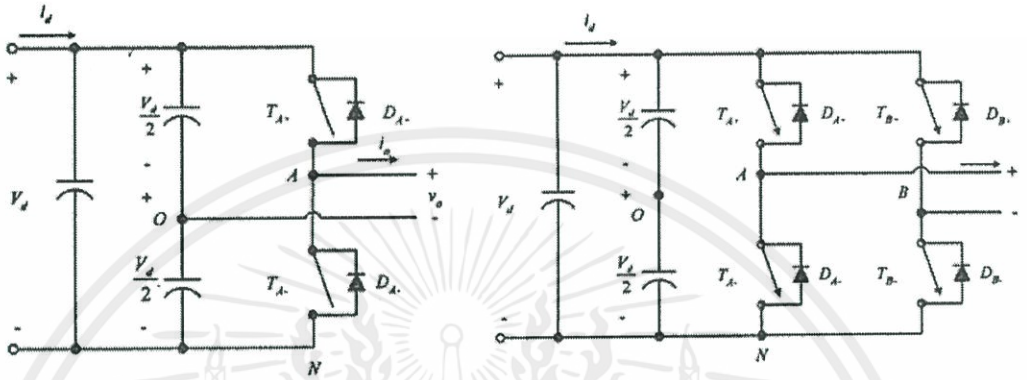
รูปที่ 2.33 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่า m_a [1]

2.8.6 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิดคือแบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full-bridge) ในแบบฮาล์ฟบริดจ์จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อลำดับกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากันจะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันคือ $V_d/2$ จุดกึ่งกลางแรงดันไฟฟ้า (จุด o ในรูปที่ 2.34 (ก)) จะมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกิ่งคือกิ่ง A และกิ่ง B ในรูปที่ 2.34 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์สองเท่าจึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขสำคัญที่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์คือการทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลามิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบในอุดมคติเวลาการสวิตชิ่งของ T_{A+} และ T_{A-} จะตรงข้ามกันแต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลาที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแสซึ่งจะเรียกว่าเดดไทม์ (deadtime) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนจะเปลี่ยนสถานการณ์สวิตช์จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแสหรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส



(ก) แบบฮาล์ฟบริดจ์ (ข) แบบฟูลบริดจ์

รูปที่ 2.34 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว [1]

2.8.7 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดฟูลบริดจ์แบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) ก็คือในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตช์ในกิ่ง A กับกิ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกันคือสวิตช์ในกิ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $v_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) ขณะที่สวิตช์ในกิ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $-v_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) การสวิตชิ่งจะมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ $v_{control} > v_{tri}$: สวิตช์ T_{A+} จะนำกระแส $v_{AN} = V_d$
เมื่อ $v_{control} < v_{tri}$: สวิตช์ T_{A-} จะนำกระแส $v_{AN} = 0$
เมื่อ $-(v_{control}) > v_{tri}$: สวิตช์ T_{B+} จะนำกระแส $v_{BN} = V_d$
เมื่อ $-(v_{control}) < v_{tri}$: สวิตช์ T_{B-} จะนำกระแส $v_{BN} = 0$

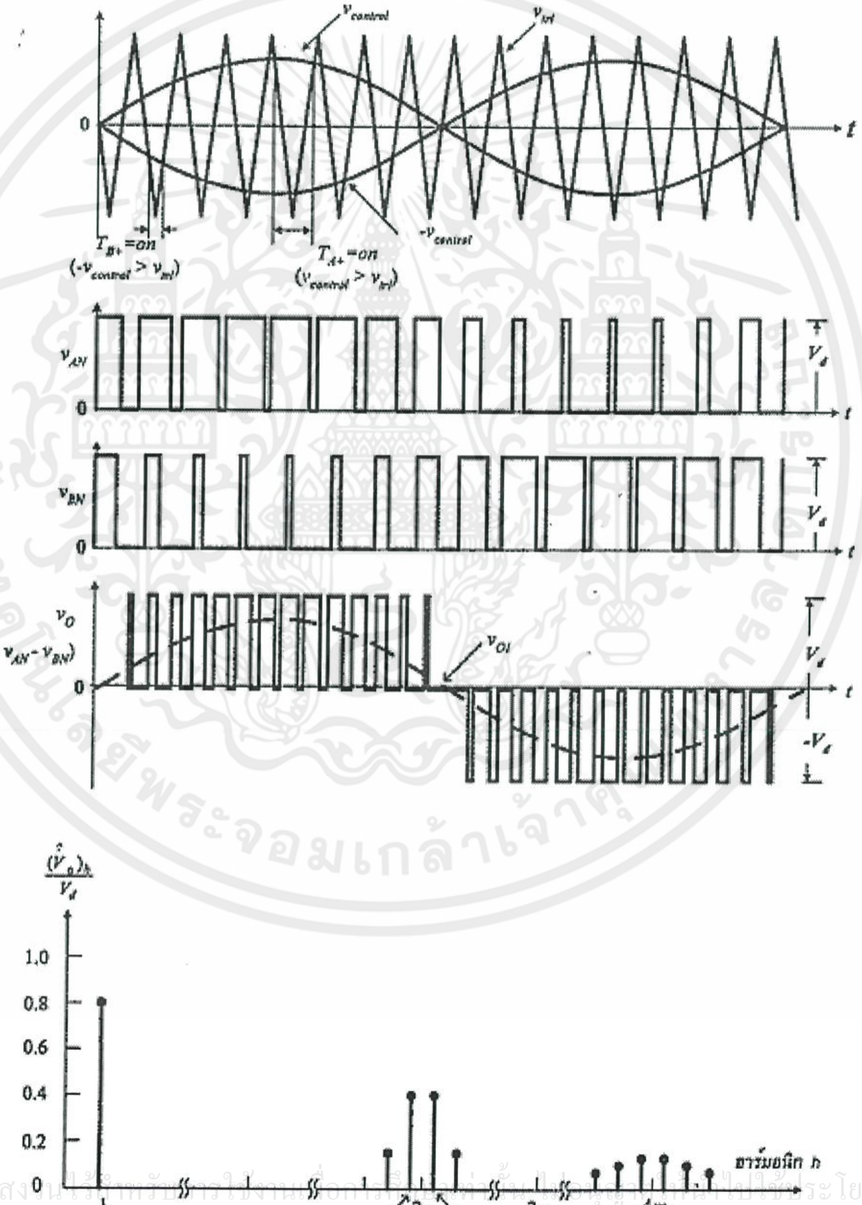
ตารางที่ 2.7 เงื่อนไขการสวิตชิ่งแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ [1]

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	V_{AN}	V_{BN}	V_0
1	T_{A+}	T_{B-}	V_d	0	V_d
2	T_{A-}	T_{B+}	0	V_d	$-V_d$
3	T_{A+}	T_{B+}	V_d	V_d	0
4	T_{A-}	T_{B-}	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (v_0 หรือ v_{ab}) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตชิ่งสูงเช่นกรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์คือการเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตชิ่งของแต่ละเฟสเช่นความถี่สวิตชิ่งของอุปกรณ์ปีน 10 กิโลเฮิรตซ์หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ 2 เท่าของแบบไบโพลาร์ที่ 20 กิโลเฮิรตซ์โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้างผลของความถี่ที่โหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าสอดคล้องกับสเปคตราของรูปที่ 2.35 ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่เล็กง่ายและประหยัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ... ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

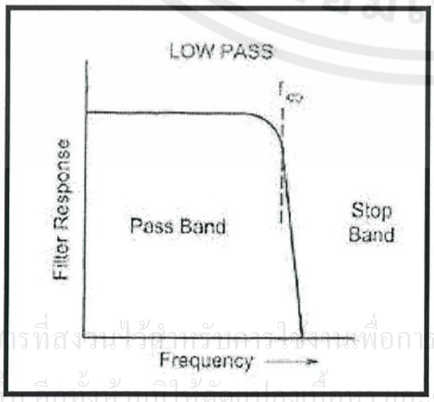
รูปที่ 2.35 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [1]

เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกตกคร่อมโหลด (v_0) แสดงในตารางที่ 2.7 ผลที่ได้จากเงื่อนไขการทำงานในตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.35 คือแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังบวกในครึ่งคาบส่วนอีกครึ่งคาบจะมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์และจากศูนย์ไปยังลบซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงเรียกวิธีการสวิตชิ่งนี้ว่ายูนิโพลาร์ส่วนขนาดแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะเท่ากันกับแบบไบโพลาร์

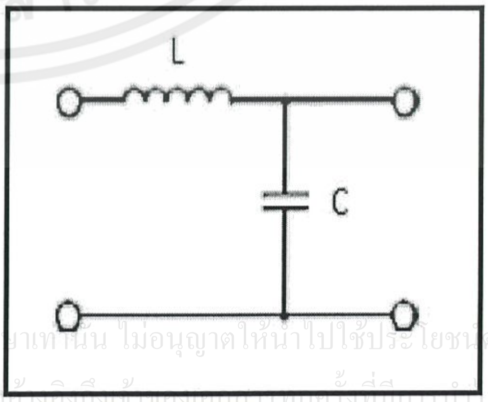
2.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) [14]

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่ที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกอาจจะเป็นเฉพาะช่วงใดช่วงหนึ่งหรือช่วงกว้างๆก็ได้การใช้งานวงจรกรองความถี่สามารถใช้กรองสัญญาณรบกวนหรือกรองเอาสัญญาณข่าวสารออกมาจากคลื่นพาหะในระบบซึ่งวงจรจะประกอบด้วย R (resistor), L (inductor) และ C (capacitor) โดยเอาคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์แต่ละชนิดคือ L จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่านได้ง่ายความถี่สูงผ่านยาก C ความถี่ต่ำผ่านยากความถี่สูงผ่านง่ายส่วน R จะมีความต้านทานทุกความถี่ให้มีระดับสัญญาณลดลงวงจรกรองความถี่จะมีทั้งแบบพาสซีฟและแอคทีฟคำว่าพาสซีฟนั้นหมายถึงวงจรกรองที่ไม่ต้องการไฟฟ้าไม่มีการขยาย (Unpowered Components (R,L,C)) มีแต่การลดทอนผลตอบสนองต่อความถี่ สัญญาณลงการลดทอนนี้จะเรียกว่า insertion loss ส่วนวงจรแบบแอคทีฟนั้นจะมีวงจรขยายสัญญาณอยู่ภายในจะเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเช่นในวงจรเครื่องขยายเสียงส่วนในวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟมักจะใช้กันที่ความถี่ต่ำๆจะใช้ตัวต้านทานตัวเก็บประจุร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณ

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ (Low Pass Filter) เป็นวงจรกรองที่ความถี่ต่ำกว่าสามารถผ่านได้มีลักษณะการต่อคือใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าอนุกรมกับวงจรและตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนานกับวงจรคุณสมบัติของวงจรก็คือเมื่อป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจรตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีค่า X_L ต่ำตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่า Xc สูงทำให้ความถี่ต่ำผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้สะดวกระดับสัญญาณเอาต์พุตจึงผ่านได้มากแต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนดค่า X_L จะมากขึ้นค่า Xc จะลดลงทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลงบางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูกตัวเก็บประจุไฟฟ้าดึงลงกราวด์โดยรูปที่ 2.36 แสดงถึงผลตอบสนองต่อความถี่ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ก) ผลตอบสนองต่อความถี่



(ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 2.36 วงจรสมมูลกรองความถี่ต่ำผ่าน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 การคำนวณความถี่ตัด (cut-off frequency)

ในการคำนวณนั้นเราจำเป็นจะต้องกำหนดความถี่ตัดเสียก่อนโดยมีสูตรการคำนวณ ดังสมการ (2.13)

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.13}$$

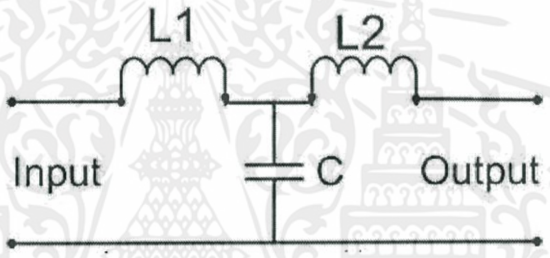
โดย f_c คือ ความถี่ตัดมีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

L คือ ความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี่

C คือ ค่าการเก็บประจุ มีหน่อยเป็น ฟารัด

2.9.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที (T type low pass filter)

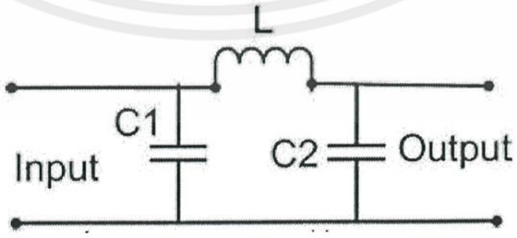
การใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพียงตัวเดียวไม่สามารถการจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมดตรงจุดความถี่ตัด (Cut off Frequency) ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้จึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเข้าไปในวงจรอีกชุดเมื่อต่อแล้วลักษณะวงจรคล้ายตัว T เรียกว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบทีการกรองความถี่ถ้าต้องการประสิทธิภาพอาจจะใช้วงจรนี้หลายชุดโดยวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบทีแสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที [14]

2.9.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย (Pi type low pass filter)

วงจรนี้จะใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้า 2 ตัวและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า 1 ตัวต่อกันดังรูปคล้ายตัวพาย (Pi) เรียกว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพายวงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟและวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Regulator) โดยวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบทีแสดงดังรูปที่ 2.38

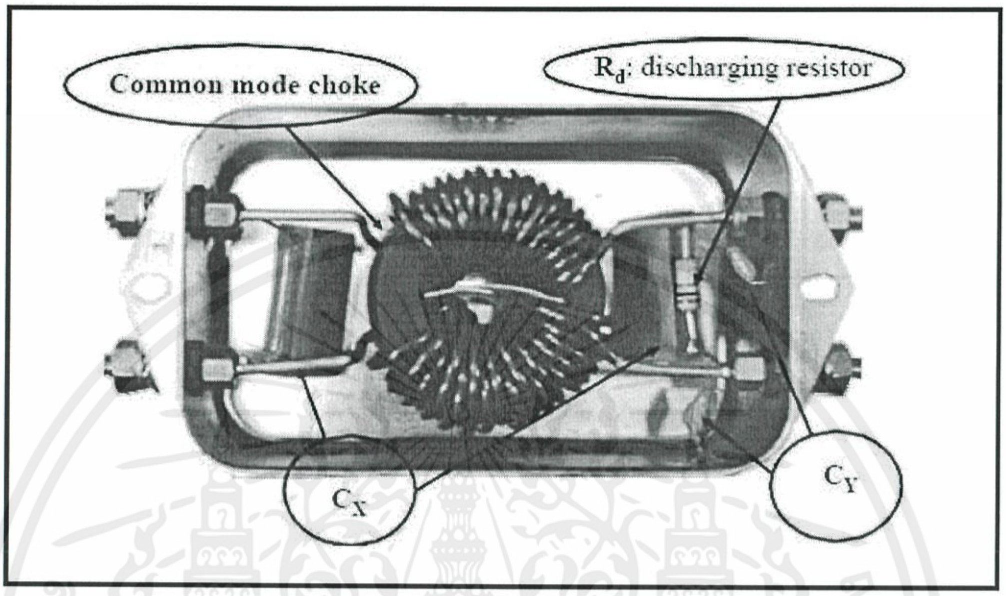


รูปที่ 2.38 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย [14]

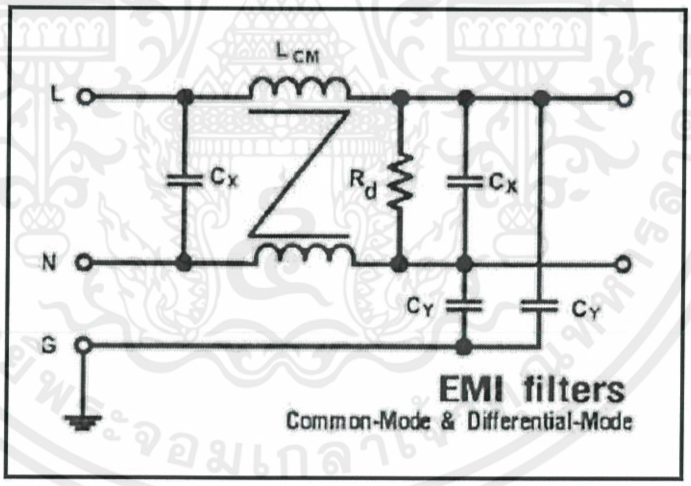
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI Filter)

เป็นวงจรที่ใช้ในการลดสัญญาณรบแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูงซึ่งมีวงจรสมมูลเป็นวงจรความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) โดยที่มีความถี่ตัดที่ความถี่สูง ส่วนประกอบและวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 2.39



(ก) ส่วนประกอบ



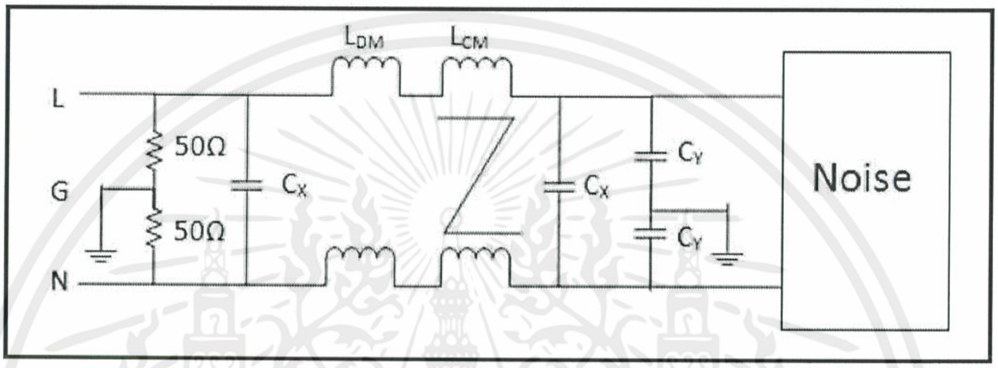
(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.39 วงจรพื้นฐานวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง [14]

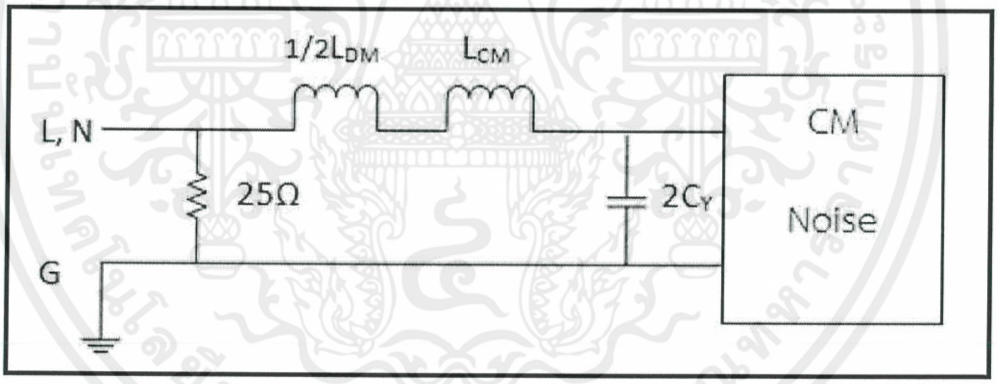
องค์ประกอบของตัวกรองแต่ละส่วนมีผลต่อสัญญาณรบกวนต่างกันตัวเก็บประจุ C_y มีขนาดอยู่ในช่วงนาโนฟารัดตามทฤษฎีแล้วตัวเก็บประจุ C_y สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ทั้งโหมดผลร่วม (CM) และโหมดผลต่าง (DM) แต่อย่างไรก็ตามขนาดของ C_y มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของ C_x ที่มีขนาดอยู่ในช่วงไมโครฟารัดฉะนั้นตัวเก็บประจุมีผลต่อสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (DM) น้อยมากอาจกล่าวได้ว่าตัวเก็บประจุ C_x มีผลต่อสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างเพียงตัวเดียวเท่านั้น ส่วนประกอบสำคัญของตัวกรองคือโช้กโหมดผลร่วม (L_{cm}) คือส่วนประกอบที่มีสามารถลดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

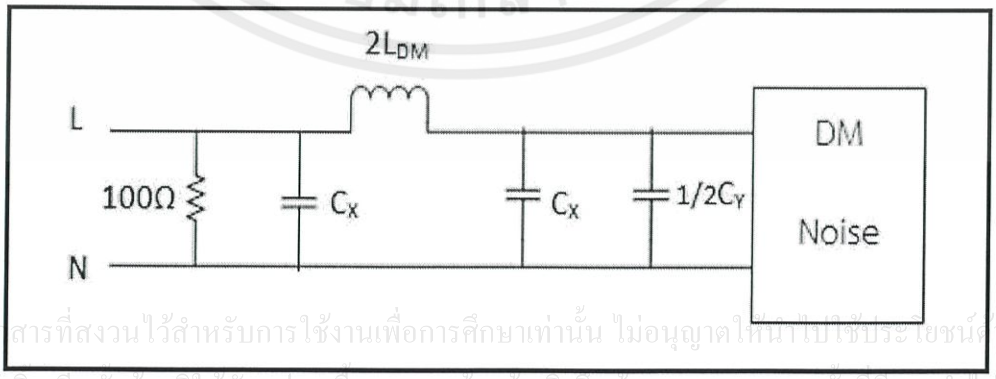
สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (CM) และตัวเหนี่ยวนารั่วไหล (Lleakage) ระหว่างขดลวดมีผลต่อการลดสัญญาณโหมดผลต่าง (DM) ในบางกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำพิเศษอนุกรมกับโช้กเพื่อช่วยในการลดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (DM) วงจรกรองโหมดผลร่วมเป็น LC Filter ซึ่งมีวงจรสมมูลดังรูป 2.40 (ข) ส่วนวงจรกรองโหมดผลต่างเป็นลักษณะแบบ π ดังรูปที่ 2.40 (ค) โดยมีการต่อโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Networks: LISN) มีค่า 50 โอห์ม และมีค่าประมาณ 25 โอห์มและ 100 โอห์มในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างตามลำดับโดยกำหนดไว้ในมาตรฐาน EN55022 Class B สำหรับทดสอบสัญญาณรบกวน



(ก) โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแบบพาสซีฟ



(ข) วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโหมดผมร่วม (CM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโหมดผลต่าง (DM)

รูปที่ 2.40 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแบบพาสซีฟ [14]

ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กความถี่สูง สามารถคำนวณความถี่-ตัด ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจะได้ดังนี้

-ความถี่ตัดของโหมดผลร่วม (Cut-off frequency of common mode)

Cut-off frequency:

$$X_{L\,total} = -X_{C\,total}$$

$$2\pi f L_{total} = \frac{1}{2\pi f C_{total}}$$

$$4\pi^2 f^2 L_{total} = 1$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{2LC_Y}} \tag{2.14}$$

- ความถี่ตัดของโหมดผลต่าง (Cut-off frequency of differential mode)

Cut-off frequency: (กำหนดให้ L_{DM} เป็น 0)

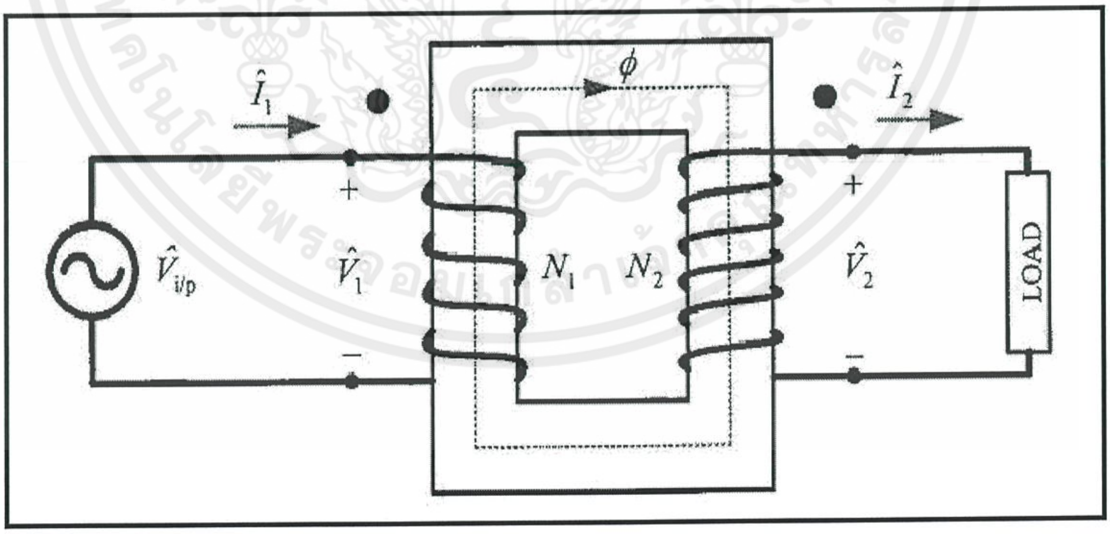
$$C_{total} = 2C_x + \frac{C_Y}{2}$$

$$2\pi f = \frac{1}{C_{total}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi(2C_x + \frac{C_Y}{2})} \tag{2.15}$$

2.11 การทดสอบหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

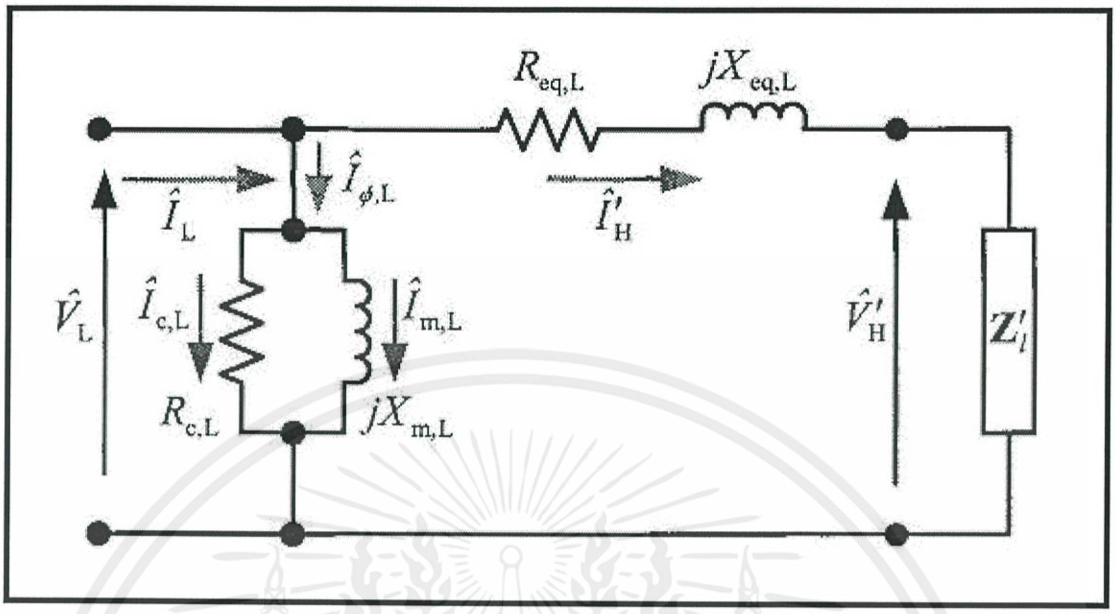
เป็นการทดสอบเพื่อหาวงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวด การทดสอบจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสป้อนเข้าที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่าพิกัดคูณด้วย 1.2 โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวดมีลักษณะดังรูปที่ 2.41



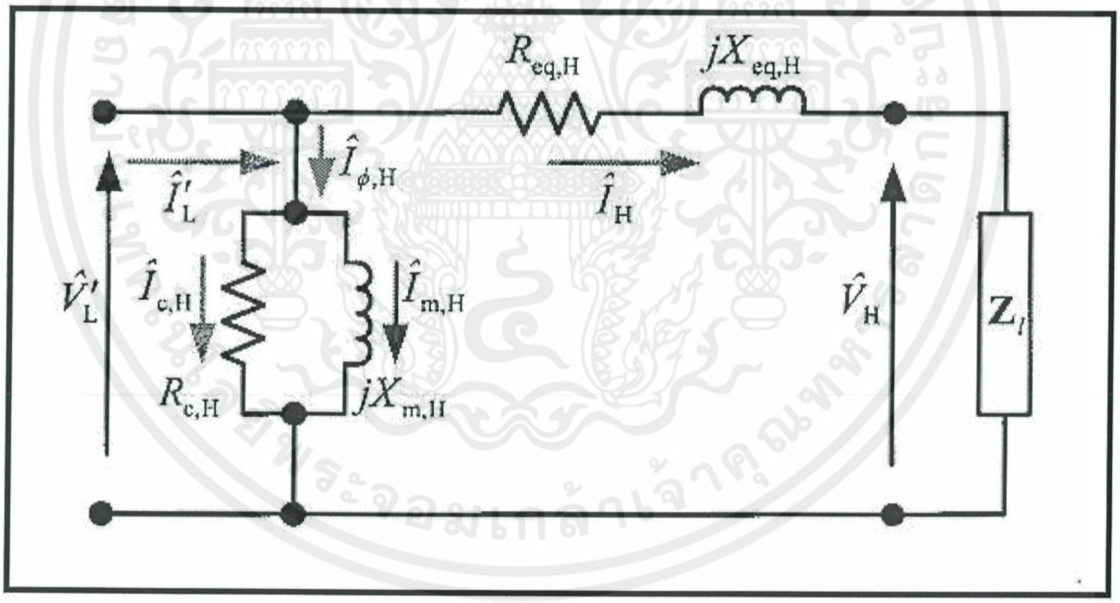
รูปที่ 2.41 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวด [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลเมื่อหาค่าพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.42



(ก) วงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ



(ข) วงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปด้านแรงดันไฟฟ้าสูง

รูปที่ 2.42 การทดสอบหาวงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้า [12]

กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V_1) เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Low voltage side) หรือ V_L และกำหนดให้ด้านทุติยภูมิ (V_2) เป็นแรงดันไฟฟ้าสูง (High voltage side) หรือ V_H โดยอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ (2.16)

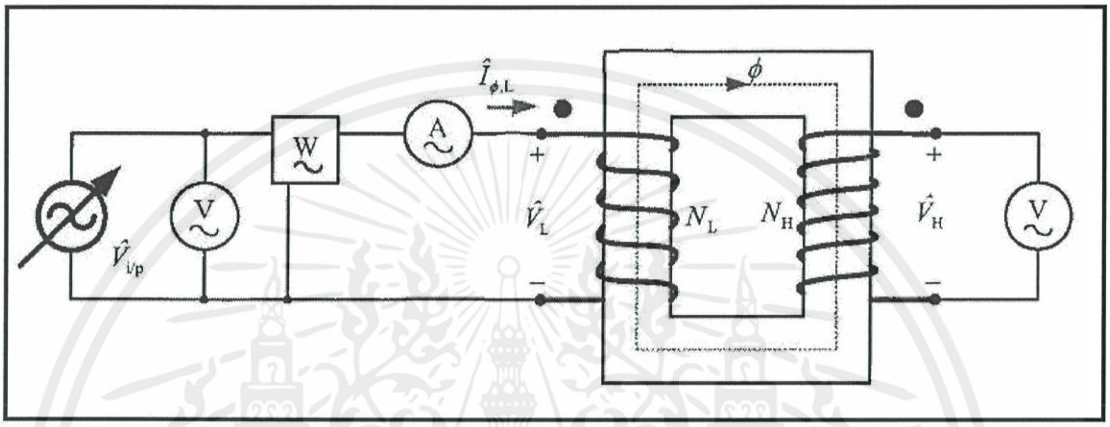
$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_L}{V_H} \qquad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็นการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวด

1. การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ในการทดสอบนิยมเปิดวงจรด้านแรงสูงและเครื่องมือวัดอยู่ด้านแรงต่ำ ต่อวงจรตามรูปที่ 2.43 ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าพิกัด บันทึกข้อมูล V_{OC}, I_{OC}, P_{OC} และค่ามุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (θ_{OC}) หรือค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos\theta_{OC}$) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาหาค่า R_C และ jX_m ตามสมการ (2.17) ถึง (2.24)



รูปที่ 2.43 การทดสอบแบบเปิดวงจร [13]

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{V_{OC}I_{OC}}\right) \quad (2.17)$$

$$I_{c,L} = I_{OC}\cos\theta_{OC} \quad (2.18)$$

$$I_{m,L} = I_{OC}\sin\theta_{OC} \quad (2.19)$$

$$R_{c,L} = \frac{V_{OC}}{I_{c,L}} \quad (2.20)$$

$$X_{m,L} = \frac{V_{OC}}{I_{m,L}} \quad (2.22)$$

เมื่อโอนย้ายค่ามาอยู่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง

$$R_{c,H} = \frac{1}{a^2}R_{c,L} \quad (2.23)$$

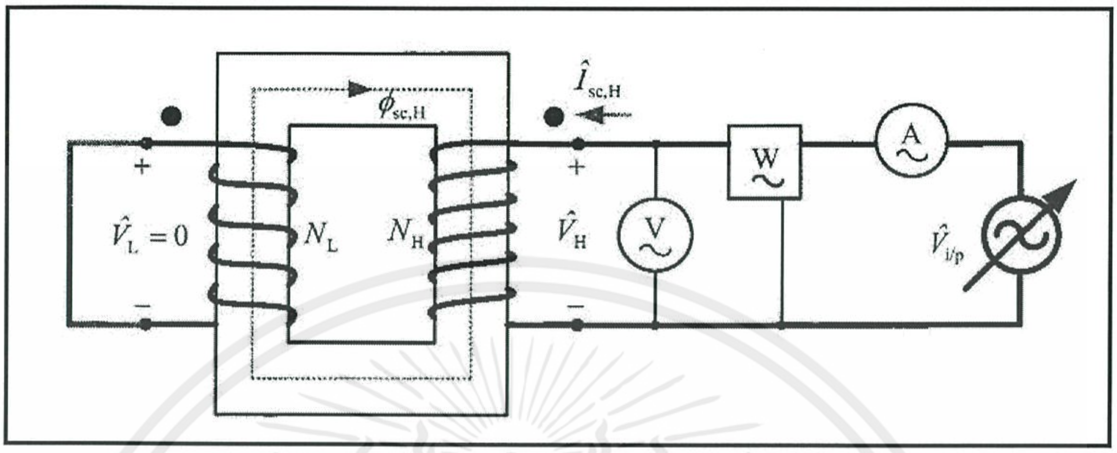
$$X_{m,H} = \frac{1}{a^2}X_{m,L} \quad (2.24)$$

2. การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบลัดวงจรนิยมลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Low voltage side) และเครื่องมือวัดอยู่ด้านแรงสูง (High voltage side) ดังรูปที่ 2.44 ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าป้านเข้าจนกระแสป้อนเข้าเป็นค่าที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกข้อมูล V_{SC}, I_{SC}, W_{SC} ที่พิกัดกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า และวัดค่ามุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (θ_{SC}) หรือค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos\theta_{SC}$) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาหาค่า R_{eq} และ jX_{eq} ตามสมการ (2.25) ถึง (2.34)



รูปที่ 2.44 การทดสอบแบบลัดวงจร [14]

$$\theta_{SC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{SC}}{V_{SC}I_{SC}}\right) \tag{2.25}$$

$$\mathbf{Z}_{SC} = \frac{V_{SC}\angle 0°}{I_{SC}\angle -\theta°} \tag{2.26}$$

$$\mathbf{Z}_{SC} = \frac{V_{SC}\angle\theta°}{I_{SC}} \tag{2.27}$$

$$\mathbf{Z}_{SC} = Z_{SC}\angle\theta_{SC} \tag{2.28}$$

$$R_{SC} = Z_{SC}\cos\theta_{SC} \tag{2.29}$$

$$X_{SC} = Z_{SC}\sin\theta_{SC} \tag{2.30}$$

สรุปได้ว่า

$$R_{eq,H} = R_H + R'_L = R_{sc} \tag{2.31}$$

$$X_{eq,H} = X_H + X'_L = X_{sc} \tag{2.32}$$

เมื่อโอนย้ายค่ามาอยู่ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ

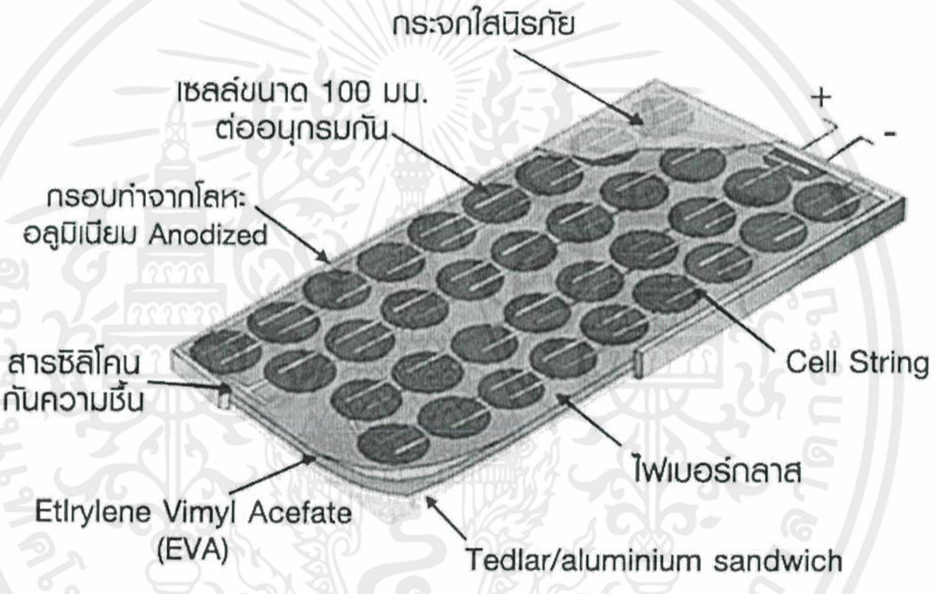
$$R_{eq,L} = a^2 R_{eq,H} \tag{2.33}$$

$$X_{eq,L} = a^2 X_{eq,H} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 เซลล์แสงอาทิตย์

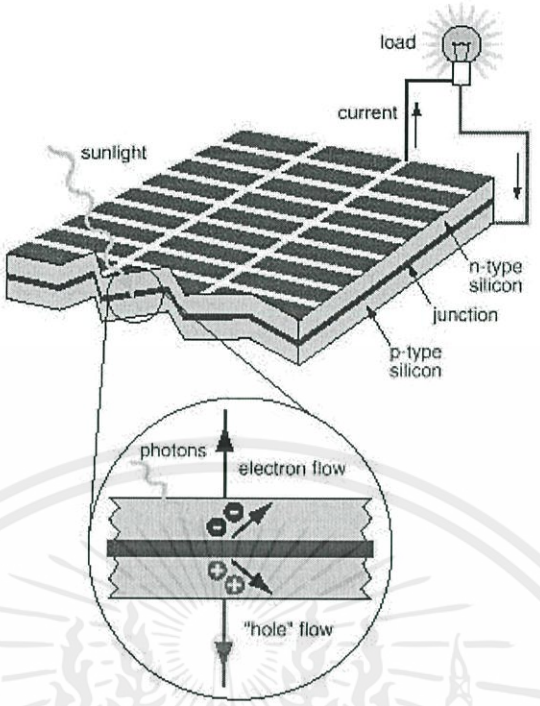
เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วยอนุภาคโฟตอน (Photon) โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์จนอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากโฟตอนที่มากพอให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่อิเล็กตรอนมารวมกันและเคลื่อนที่ผ่านเรียกว่า "ขั้วลบ" และขั้วที่อยู่ตรงข้ามจะเรียกว่า "ขั้วบวก" และเมื่อต่อวงจรเข้าไปที่ขั้วทั้งสองก็จะเกิดการไหลของไฟฟ้าขึ้น โดยไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยลักษณะทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 ลักษณะทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

2.12.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

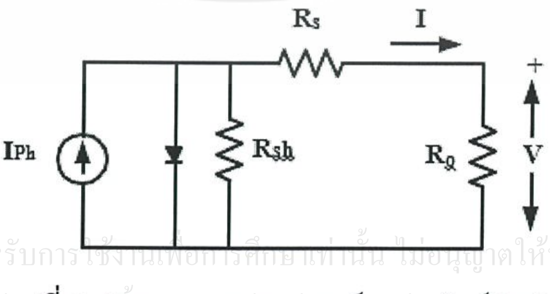
เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์ สารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์จะดูดกลืนคลื่นพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในทางฟิสิกส์คลื่นสามารถประพฤติตัวเหมือนอนุภาค ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง อนุภาคในแสงอาทิตย์นั้นเรียกว่าโฟตอน อนุภาคโฟตอนในแสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของสารกึ่งตัวนำและเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ขึ้นที่ ชั้น N-type Silicon และการเคลื่อนของอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งช่องว่างดังกล่าวเรียกว่า “โฮล (Hole)” ซึ่งโฮลจะเกิดขึ้นที่ชั้นของ P-type Silicon เมื่อพลังงานสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน แต่ไม่ผ่านทางรอยต่อพีและเอ็น แต่ผ่านทางวงจรไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นโดยหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.46



รูปที่2.46 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

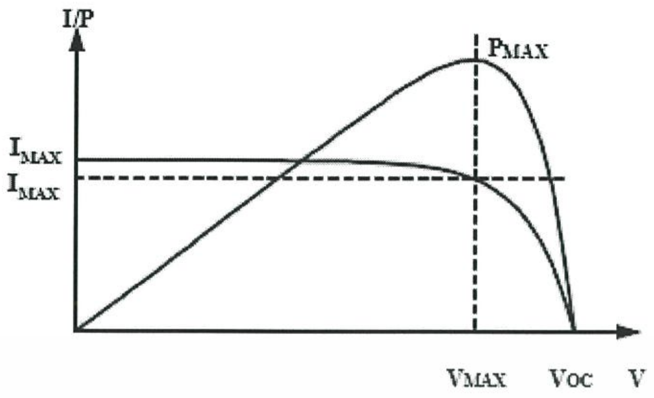
2.12.2 วงจรสมมูลและกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปข้างล่าง ซึ่งเป็นอยู่ในรูปของแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับไดโอด และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จากกราฟมีแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) และกระแสลัดวงจร (I_{sc}) โดยขณะที่เกิดการลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์กระแสที่สร้างขึ้นได้จะไหลผ่านวงจรภายนอก และขณะเปิดวงจรของแสงอาทิตย์กระแสที่สร้างขึ้นจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานภายในเซลล์ ซึ่งพบว่าคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ปริมาณแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์และโหลดที่ต่ออยู่ในวงจร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันที่จ่ายออกมาของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงจะมีผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ถ้าต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกัน และถ้าต้องการเพิ่มปริมาณกระแสก็สามารถทำไห้โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกัน

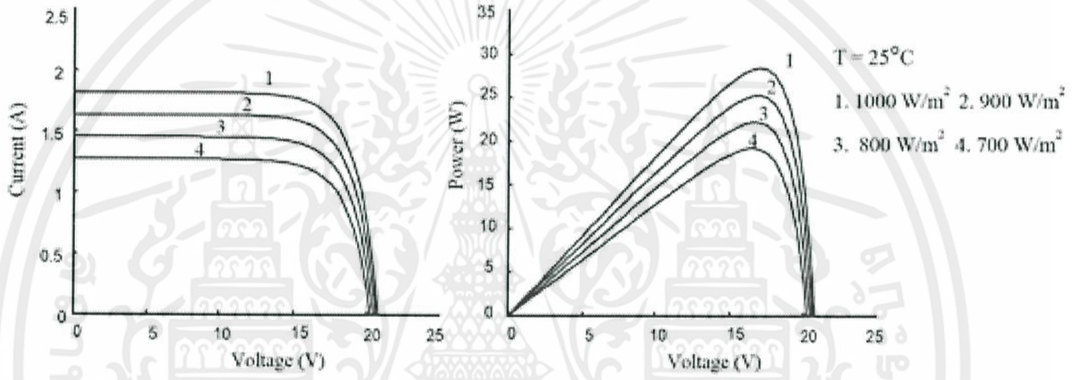


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ ... ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

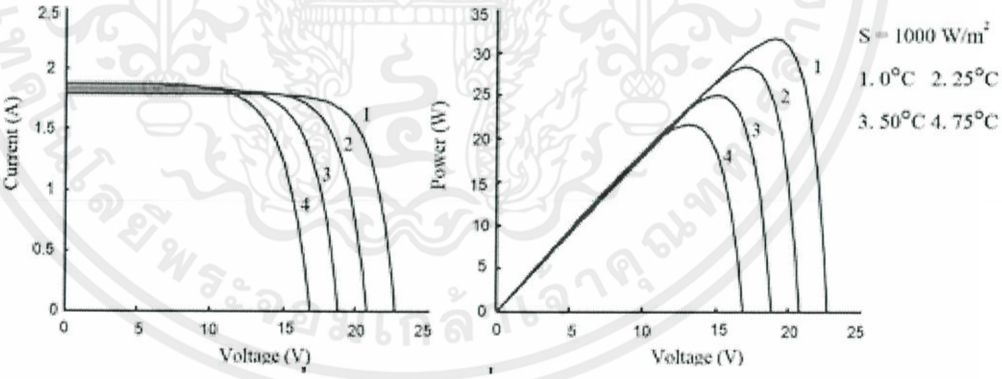
รูปที่ 2.47 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [10]



รูปที่ 2.48 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ [10]



(ก) เมื่อปริมาณแสงเปลี่ยนในขณะที่อุณหภูมิคงที่



(ข) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนในขณะที่ปริมาณกระแสคงที่

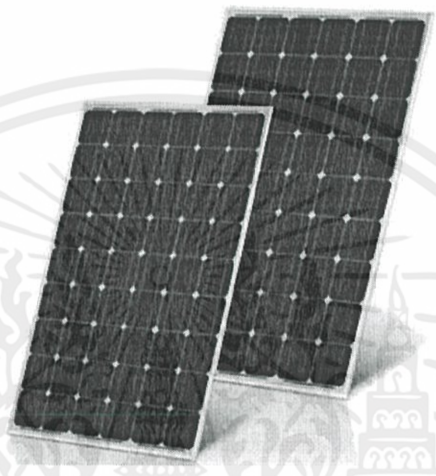
รูปที่ 2.49 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์

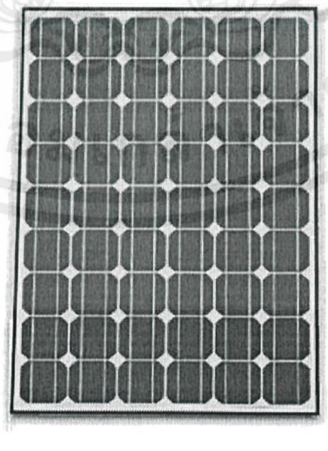
เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานใน ปัจจุบันมีประมาณ 5 ชนิด ดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell, Mono-Crystalline) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ได้รับการพัฒนามานาน ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกเดี่ยวของซิลิคอน โดยจะมีความหนาประมาณ 200-300 ไมครอน มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ ร้อยละ 15 -17



รูปที่ 2.50 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน [9]

2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Multi-crystalline Silicon Solar Cell, Polycrystalline Silicon Solar Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน มีความหนาประมาณ 180-220 ไมครอนมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 12 -15



รูปที่ 2.51 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน [9]

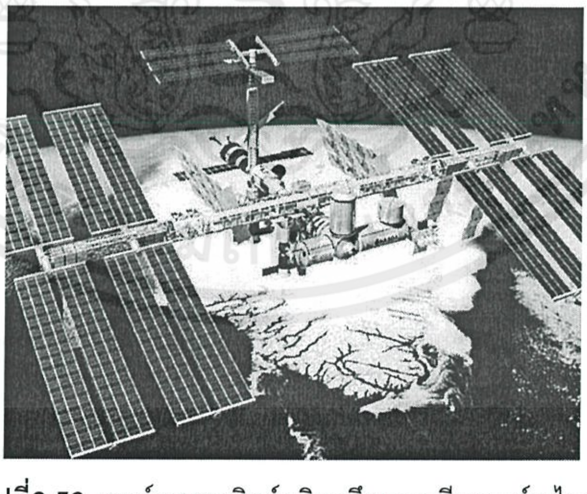
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ [illegible] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

มีลักษณะเป็นฟิล์มบางหนาประมาณ 0.5-1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลขซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 6 – 8

รูปที่2.52 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน [9]

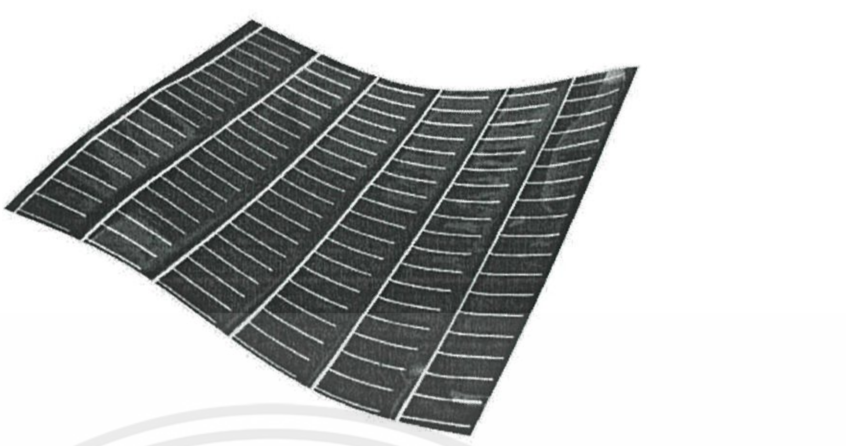
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar Cell)
เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงระดับร้อยละ 25 ขึ้นไป มีราคาแพงมาก ไม่นิยมนำมาใช้งานบนพื้นโลก ปัจจุบันมีการใช้งานสำหรับดาวเทียม



รูปที่2.53 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

5. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารประกอบตระกูลทองแดงอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และตระกูลแคดเมียมเทลูไรด์เป็นเทคโนโลยีใหม่ของชนิดฟิล์มบางสามารถดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ได้มากขึ้นแม้ในสภาวะแสงน้อย เช่น ช่วงรุ่งเช้า หัวค่ำและช่วงที่มีเมฆมาก ปัจจุบันยังมีการใช้งานน้อย

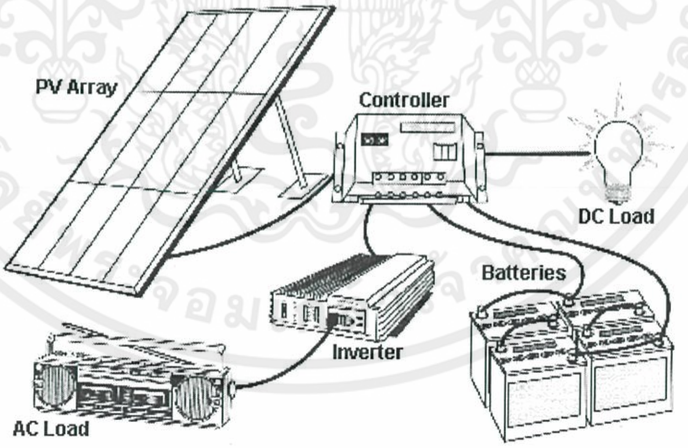


รูปที่ 2.54 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารประกอบตระกูลทองแดงอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และตระกูลแคดเมียมเทลูไรด์

2.12.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

ในการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตได้ 3 รูปแบบ

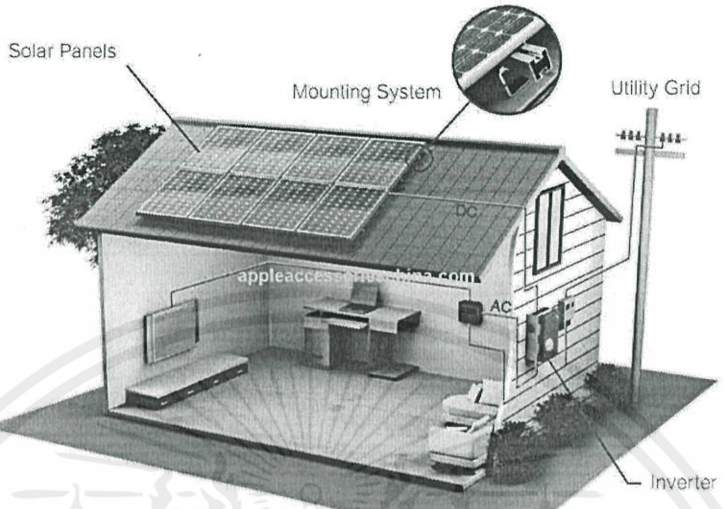
1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) ออกแบบเพื่อใช้สำหรับงานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าไม่ถึงโดยการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในตอนกลางวันพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อมๆกัน เพื่อเก็บไฟฟ้าใช้ในช่วงเวลากลางคืน ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.55



รูปที่ 2.55 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

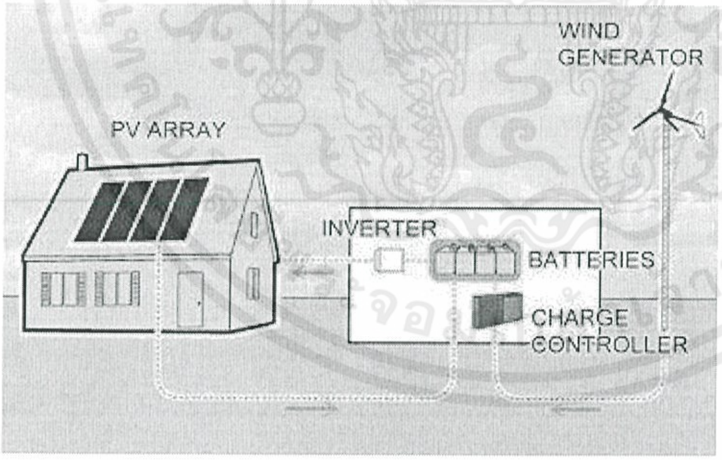
2. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System) ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยจะแบ่ง เป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลากลางจะใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนเกิน พลังงานส่วนเกินนั้นจะจ่ายเช้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า

ส่วนช่วงเวลากลางคืนจะใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแทนเซลล์แสงอาทิตย์ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.56



รูปที่ 2.56 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ไฟฟ้าพลังน้ำเป็นต้นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.57

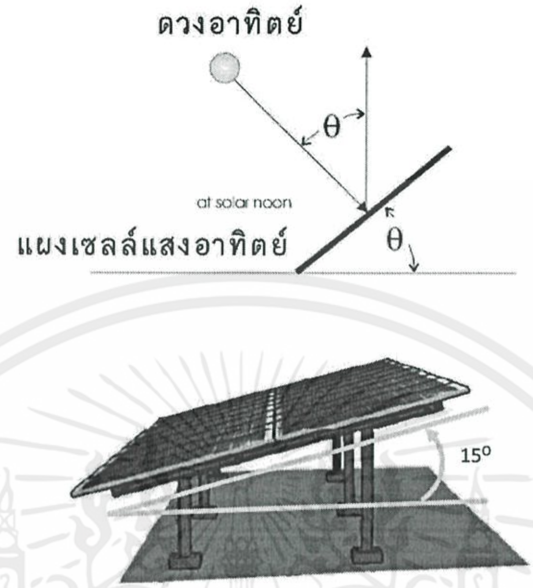


รูปที่ 2.57 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

ในการติดตั้งวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับประเทศไทยนั้น ควรติดตั้งให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตซีกโลกเหนือ แนวเส้นทางของดวงอาทิตย์ที่ขึ้นจากทิศตะวันออกและไปตกในทิศตะวันตกจะเป็นแนวอ้อมใต้นอกจากนั้นควรวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทางมุมประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 องศา ถึง 20 องศา กับพื้นดินตามแนวองศาละติจูดของพื้นที่ เพื่อให้แสงตกกระทบตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในเวลาเที่ยงตรงมากที่สุดโดยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.58



รูปที่ 2.58 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

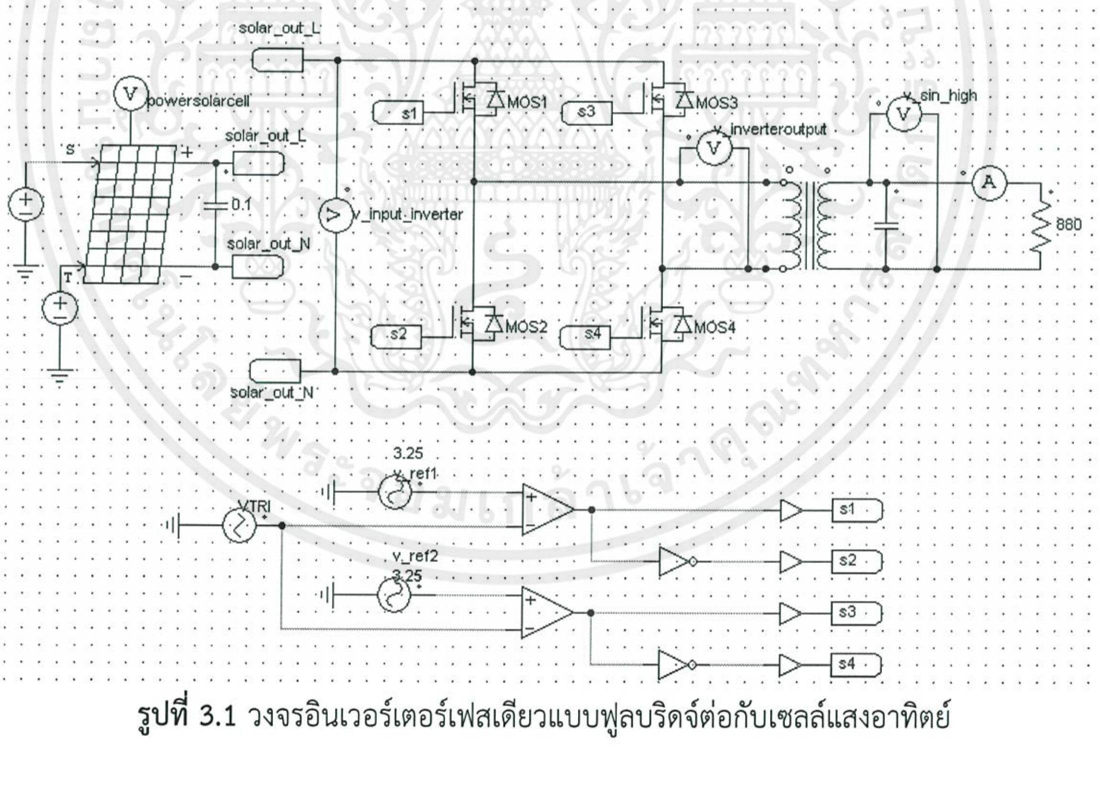
3.1 ส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ที่เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนประกอบที่ใช้ในโครงงานมีดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์
2. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
3. วงจรขับสวิตซ์
4. วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์
5. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI filter)
6. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)
7. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

3.2 การจำลองวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

จำลองโดยใช้โปรแกรม Psim โดยใช้มอสเฟต (Mosfet) เป็นอุปกรณ์สวิตชิ่งที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) วงจรที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

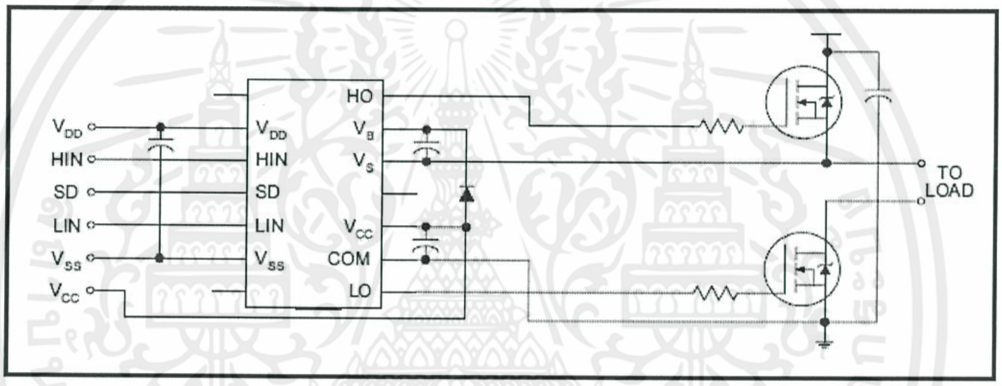
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรขับเกต (Gate Drive)

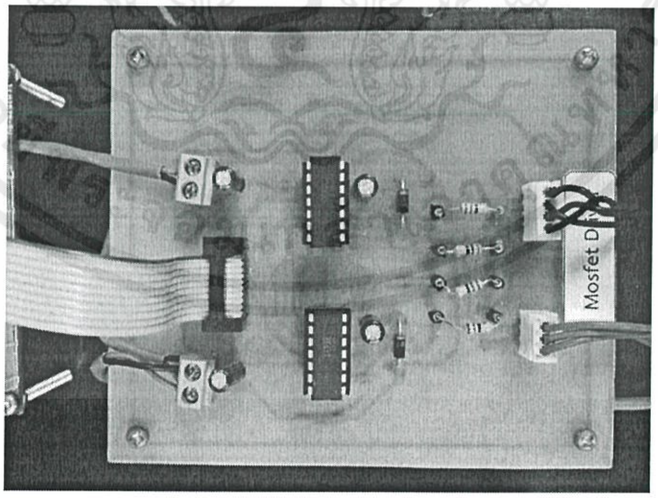
อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเกตของมอสเฟต (Mosfet) เบอร์ IRF3710 คือ IR2110 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ขับเกตของมอสเฟตหรือไอจีบีทีโดยเฉพาะโดยตัวขับเกต IR2110 ต้องการแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 2 ตัว คือ 1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์ และ 2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 10-20 โวลต์ ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

การต่อวงจรเพื่อใช้ขับเกตมอสเฟตสามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยส่วนประกอบของวงจรมีดังนี้

1. IR2110 2 ตัว เนื่องจากวงจร H-Bridge มีมอสเฟต 4 ตัว แต่ IR2110 สามารถขับเกตของมอสเฟตได้สูงสุด 2 ตัว
2. ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ 33 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดันไฟฟ้า 50 โวลต์ 4 ตัว
3. ไดโอด IN4001 2 ตัว
4. ตัวต้านทาน 27 โอห์ม ขนาด ¼ วัตต์



(ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี

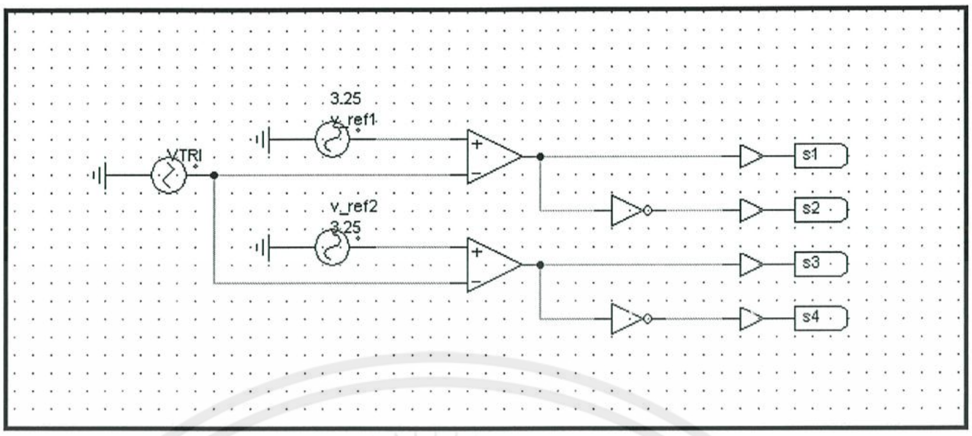


(ข) วงจรขับเกตจริง

รูปที่ 3.2 วงจรขับเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

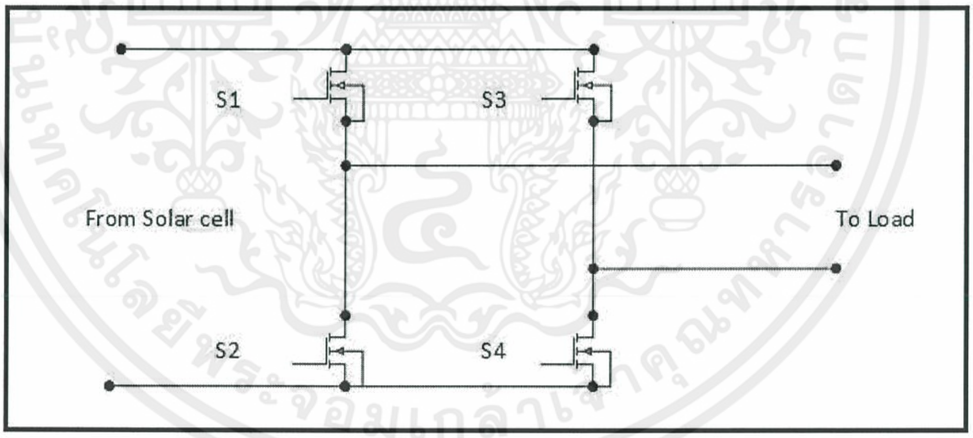
3.4 การจำลองการสวิตชิ่งของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (PWM) แบบยูนิโพล่า (Unipolar)



รูปที่ 3.3 วงจรจำลองการสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

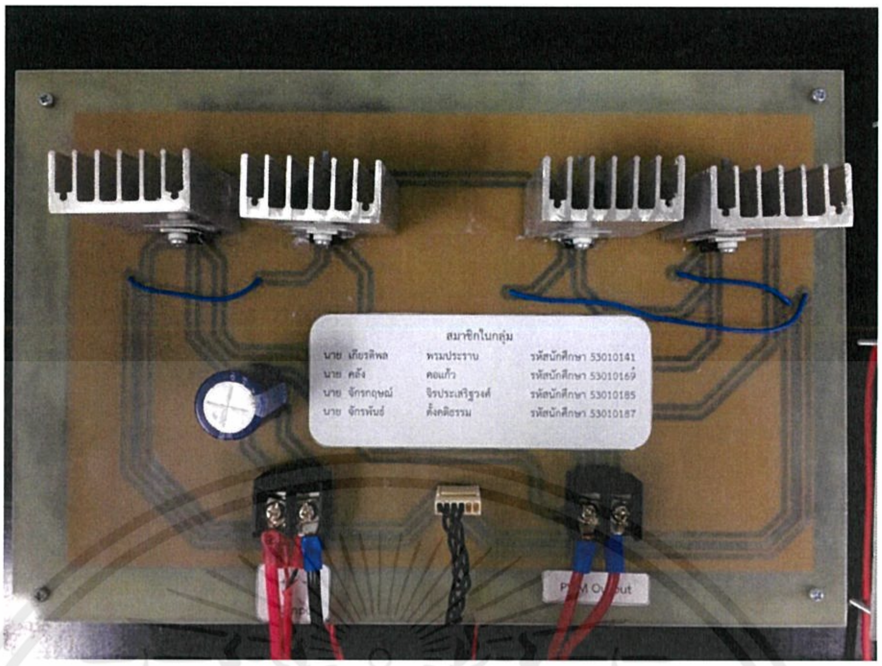
3.5 การออกแบบวงจร H-Bridge

เป็นวงจรที่ประกอบด้วยมอสเฟต 4 ตัว แสดงดังรูป 3.4 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้กำลังไฟฟ้าที่พิกัด 130 วัตต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 17.4 โวลต์ พิกัดกระแส 7.48 แอมแปร์ จึงใช้มอส-เฟตเบอร์ IRF3710 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สวิตชิ่งความถี่สูง มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้า 57 แอมแปร์เป็นอุปกรณ์สวิตชิ่งในการแปลงผันไฟฟ้ากระตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



(ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี

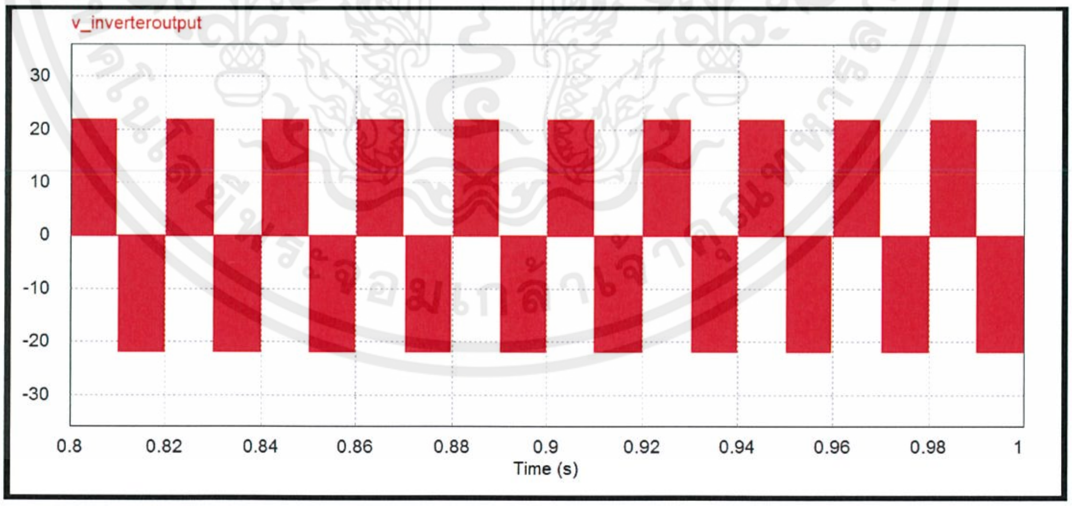
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรจริง

รูปที่ 3.4 วงจร H-Bridge

เมื่อนำสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (PWM) แบบยูนิโพล่า (Unipolar) ไปขับเกตของมอสเฟต จะสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจร H-Bridge ได้ดังรูปที่ 3.5 (เนื่องการการใช้งานจริงมอสเฟตจะเกิดความร้อนที่ตัวถังจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนออกจากตัวถังของมอสเฟตด้วยการติดตัวระบายความร้อน (Heat sink))

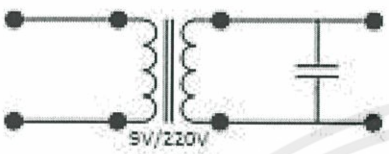


รูปที่ 3.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจร H-Bridge

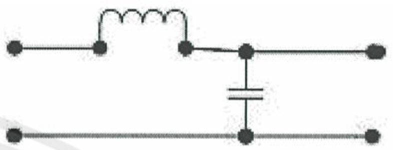
จากรูปที่ 3.5 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ออกจากวงจร H-Bridge คือ 22 โวลต์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์

3.6 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

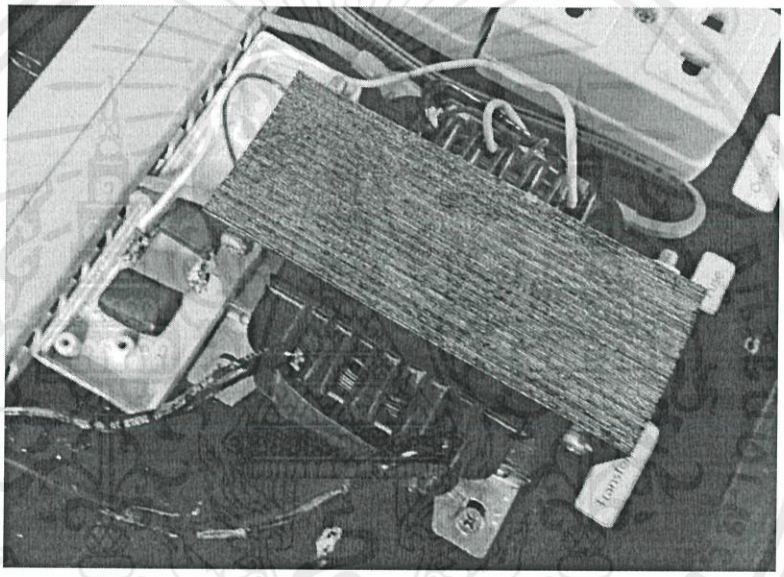
เนื่องจากหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีความเหนี่ยวนำอยู่ภายในซึ่งจะสามารถใช้ประโยชน์จากส่วนนี้ในการสร้างวงจรความถี่ต่ำผ่านได้ โดยต่อตัวเก็บประจุขนานหลังหม้อแปลง หลักการคือวัดค่าความเหนี่ยวนำฝั่งปฐมภูมิ และทุติยภูมิ จากนั้นย้ายความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิไปฝั่งทุติยภูมิ ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่จะใช้ในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน การประยุกต์ใช้ความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังรูปที่ 3.6



(ก) หม้อแปลง



(ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ค) หม้อแปลงต่อขนานกับตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.6 การประยุกต์หม้อแปลงเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.6.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะใช้การทดสอบหาวงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปด้านแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อนำค่าความเหนี่ยวนำมาออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งวิธีการทดสอบสามารถหาด้วยวิธีในหัวข้อ 2.11 การทดสอบหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในบทที่ 2 หม้อแปลงที่ใช้ในโครงงานจะมีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 9 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 220 โวลต์ ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ (2.16) ซึ่งมีค่า $a = 0.0409$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทดสอบแบบเปิดวงจร บันทึกค่าตัวแปรจากการทดสอบได้ดังนี้

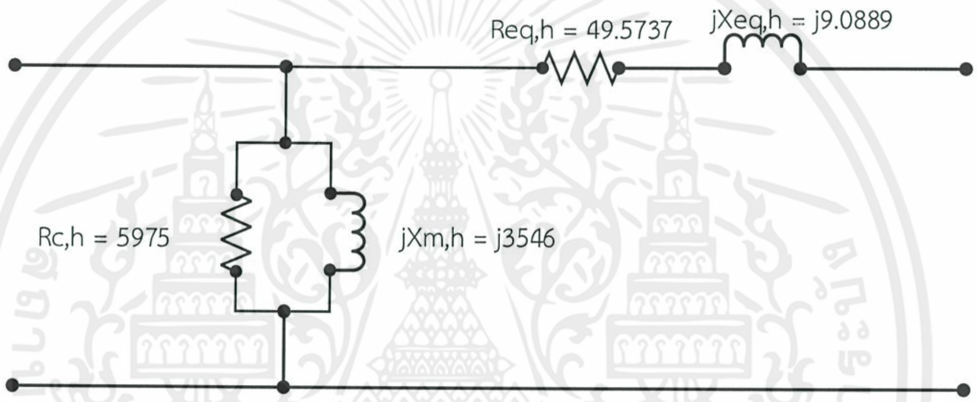
V_{OC} = 9 โวลต์, I_{OC} = 1.725 แอมแปร์, P_{OC} = 7.4 วัตต์

หาค่า θ_{OC}, $R_{C,L}$ และ $jX_{m,L}$ ตามสมการ (2.17) ถึง (2.24) ซึ่งมีค่า 61.53°, 10.9449 โอห์ม, 5.9351 ตามลำดับ ทำการย้ายค่า $R_{C,L}$ และ $jX_{m,L}$ มาอยู่ทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูง โดยใช้สมการ (2.23) และ (2.24) จะได้ค่า $R_{C,H}$ และ $jX_{m,H}$ เท่ากับ 5,975 โอห์ม, 3,546 โอห์ม ตามลำดับ

2. ทดสอบแบบลัดวงจร บันทึกค่าตัวแปรจากการทดสอบได้ดังนี้

V_{SC} = 12.3 โวลต์, I_{SC} = 0.246 แอมแปร์, P_{SC} = 7.4 วัตต์

หาค่า θ_{SC}, Z_{SC}, R_{SC} และ X_{SC} ตามสมการ (2.25) ถึง (2.30) ซึ่งมีค่า 10.4298°, 50.4 โอห์ม, 49.5737 โอห์ม, 9.0889 โอห์ม ตามลำดับ จากการคำนวณหาค่าตัวแปรของวงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโครงงาน

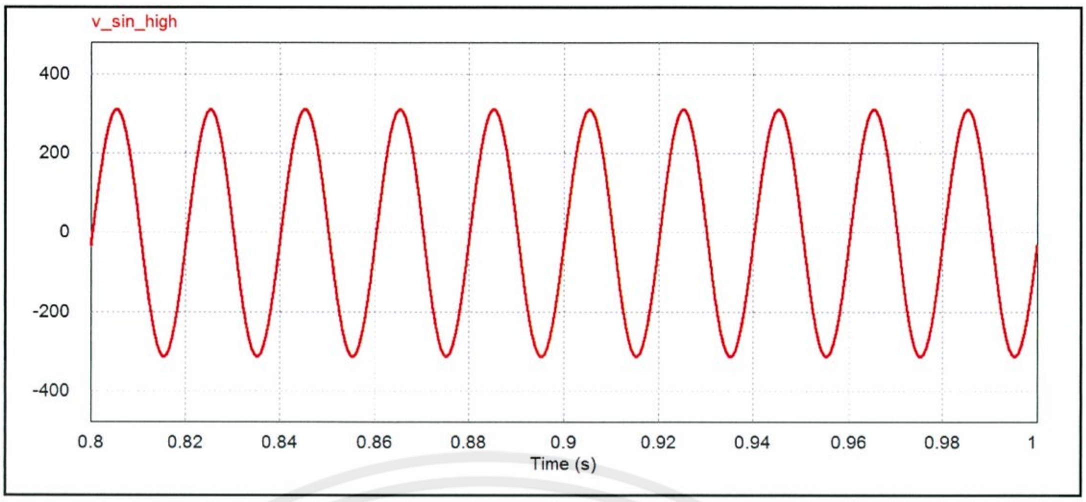
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.7 แล้วต่อไปจะเป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิดค่าอิมพีแดนซ์แค่ $jX_{eq,H}$ = j9.0889 โอห์มแปลงเป็นค่าความเหนี่ยวนำได้จาก $X_L = 2\pi fL$ โดยที่ใช้ความถี่ (f) 50 เฮิรตซ์ ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงมีค่าเท่ากับ 28.9 มิลลิเฮนรี่

3.6.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

กำหนดให้ความถี่ตัด (f_C) เป็น 770 เฮิรตซ์ สามารถคำนวณหาค่าการเก็บประจุได้จากสมการ (2.13) จะมีค่าการเก็บประจุประมาณ 1.47 ไมโครฟารัด โดยที่วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังรูปที่ 3.6 (ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อสัญญาณที่ออกจากวงจร H-Bridge เข้าสู่หม้อแปลง ซึ่งมีหน้าที่เป็นทั้งหม้อแปลงและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกดังรูปที่ 3.8 โดยหม้อแปลงจะยกระดับแรงดันจาก 9 โวลต์ เป็น 220 โวลต์ (รากที่สองของค่าเฉลี่ย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

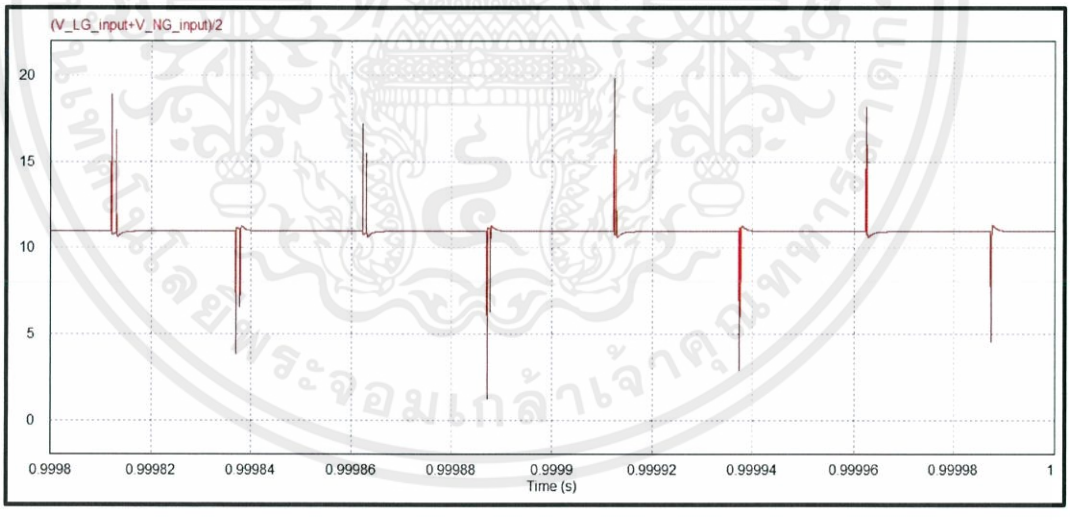


รูปที่ 3.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออก

3.7 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ

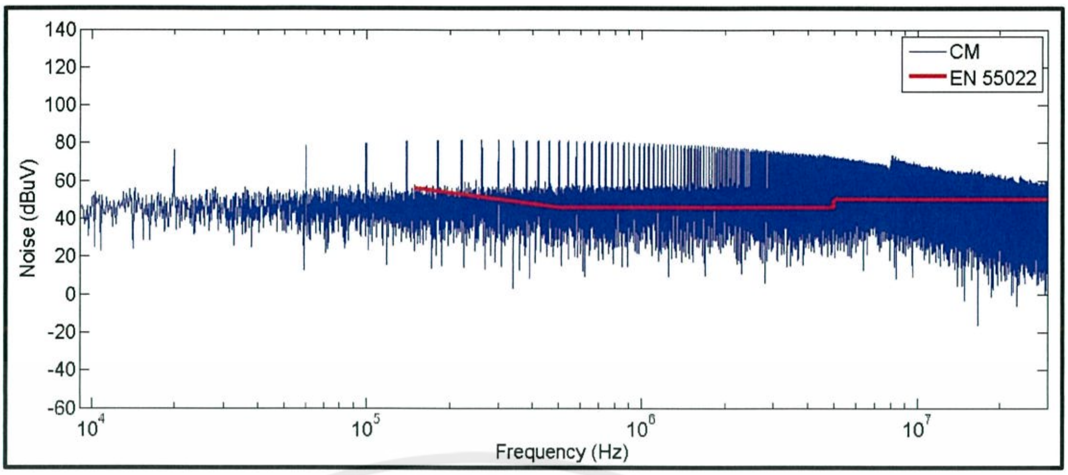
ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำนั้นจะวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม, โหมดผลต่าง ในสายไลน์และในสายนิวทรัล

ทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนโดยใช้โปรแกรม Psim ร่วมกับ Matlab เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างกับมาตรฐาน EN55022 class B แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



(ก) ในโดเมนเวลา

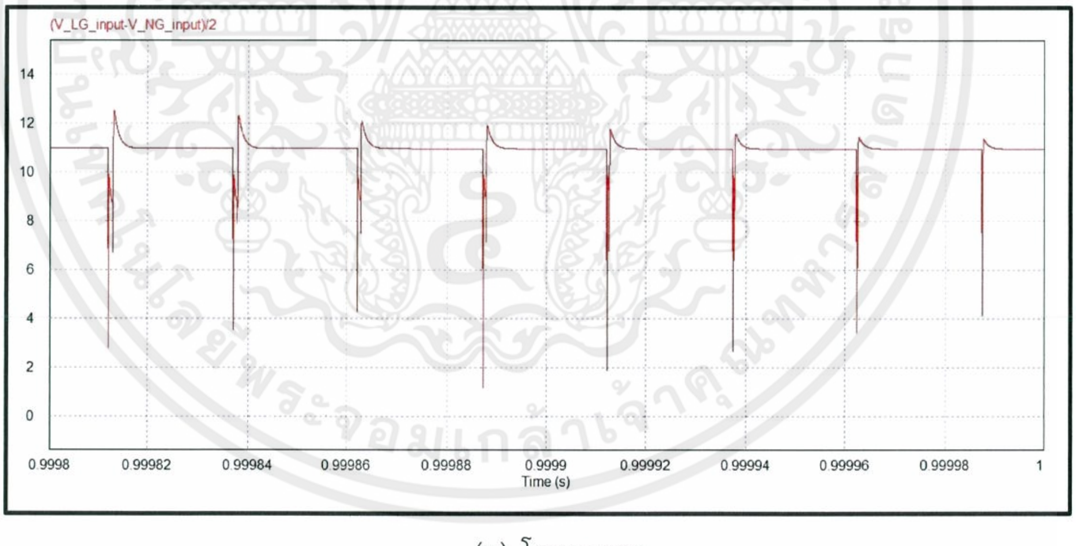
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ในโดเมนความถี่

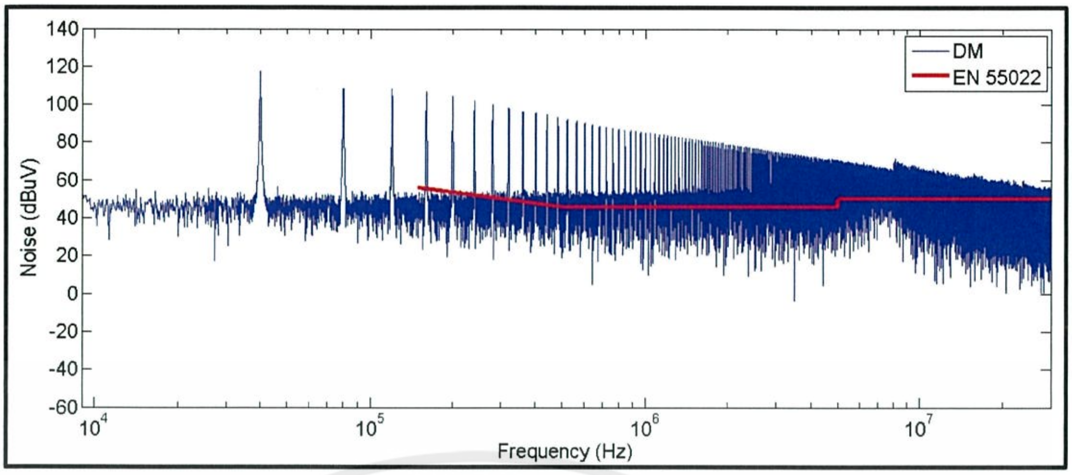
รูปที่ 3.9 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดผลร่วม

จากรูปที่ 3.9(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงที่ความถี่ 20, 60, 100, 140 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 75 ถึง 80 เดซิเบลไมโครโวลต์ ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์จะพบว่ามีค่าที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด ซึ่งมีค่าประมาณ 60 ถึง 80 เดซิเบลไมโครโวลต์



(ก) โดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

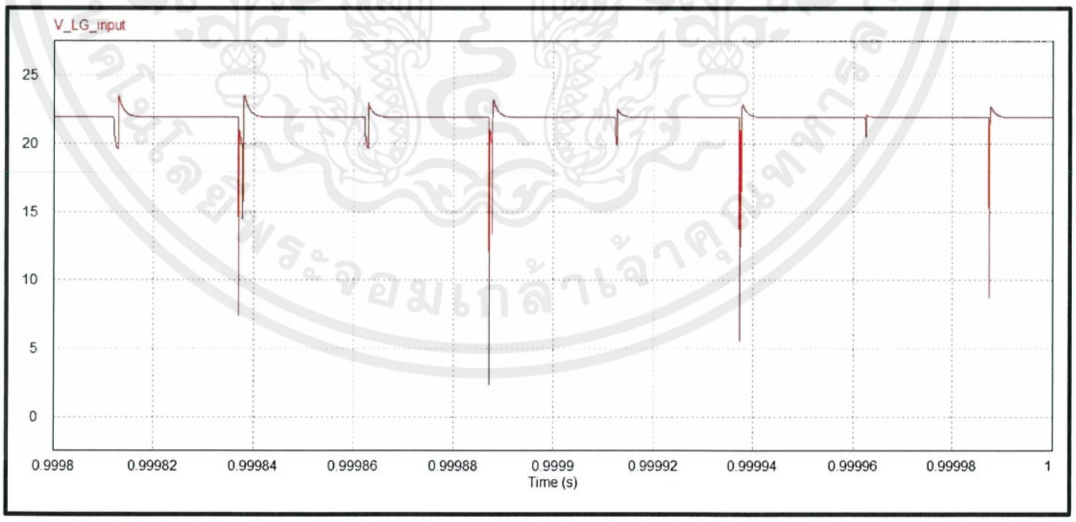


(ข) โดเมนความถี่

รูปที่ 3.10 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดผลต่าง

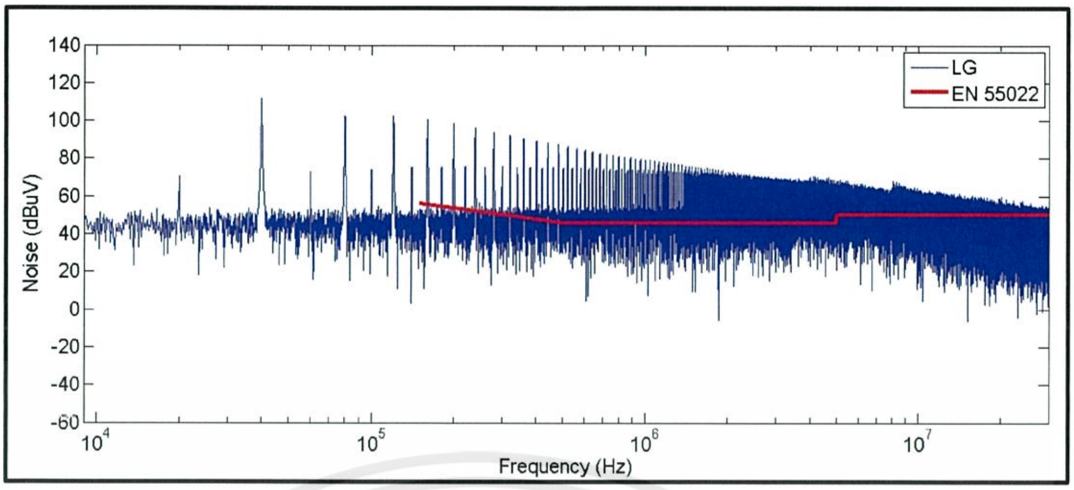
จากรูปที่ 3.10(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงที่ความถี่ 40, 80, 120 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 110 ถึง 120 เดซิเบลไมโครโวลต์ ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่ามีค่าที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด ซึ่งมีค่าประมาณ 55 ถึง 105 เดซิเบลไมโครโวลต์

ในทางปฏิบัตินั้นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำไม่สามารถวัดโหมดผลร่วมแยกกับโหมดผลต่างได้ ดังนั้นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ในสายไลน์แสดงดังรูปที่ 3.11 และสายนิวทรัล แสดงดังรูปที่ 3.12



(ก) โดเมนเวลา

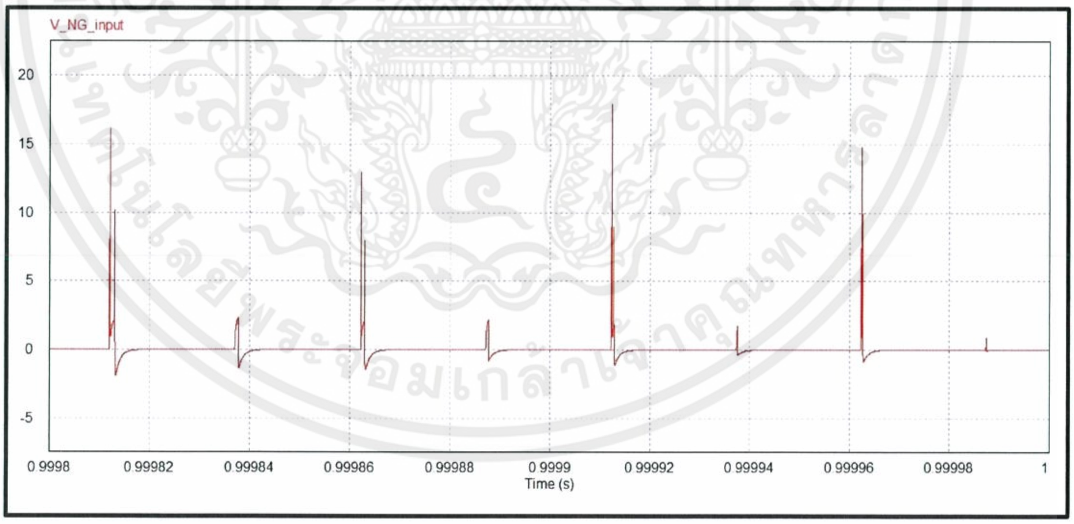
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โดเมนความถี่

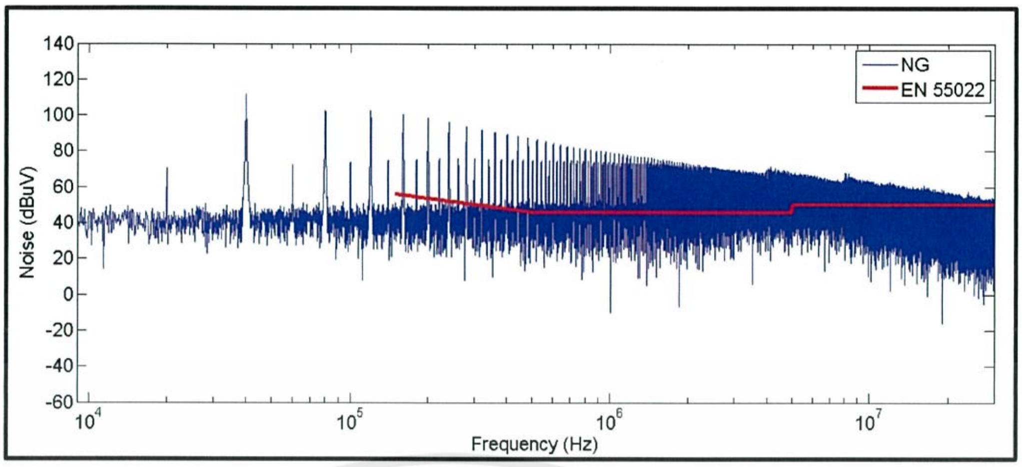
รูปที่ 3.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์

จากรูปที่ 3.11(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงที่ความถี่ 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 75 ถึง 120 เดซิเบลไมโครโวลต์ ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่ามีค่าที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด ซึ่งมีค่าประมาณ 55 ถึง 100 เดซิเบลไมโครโวลต์



(ก) โดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โดเมนความถี่

รูปที่ 3.12 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

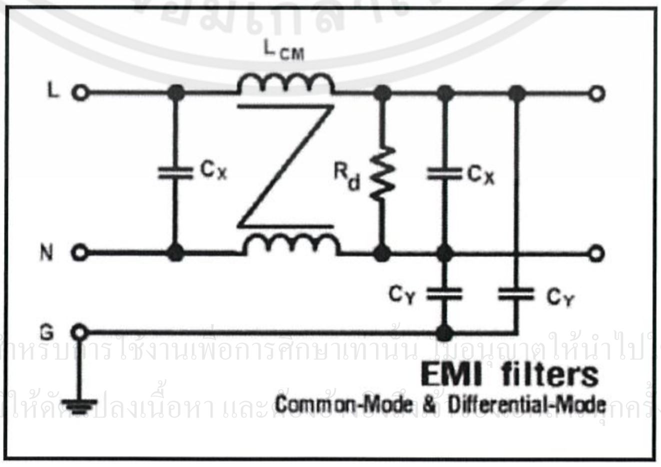
จากรูปที่ 3.12(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงที่ความถี่ 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 75 ถึง 120 เดซิเบลไมโครโวลต์ ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์จะพบว่ามีค่าที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด ซึ่งมีค่าประมาณ 55 ถึง 100 เดซิเบลไมโครโวลต์

จากผลการจำลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำทั้งสายไลน์และนิวทรัลนั้นพบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลรวมของโหมดผลร่วมกับโหมดผลต่าง และเกิดขึ้นที่ความถี่ $K(f_s)$ เมื่อ

K คือ 1, 2, 3, ... f_s คือ ความถี่สวิตซิ่ง (20 กิโลเฮิรตซ์)

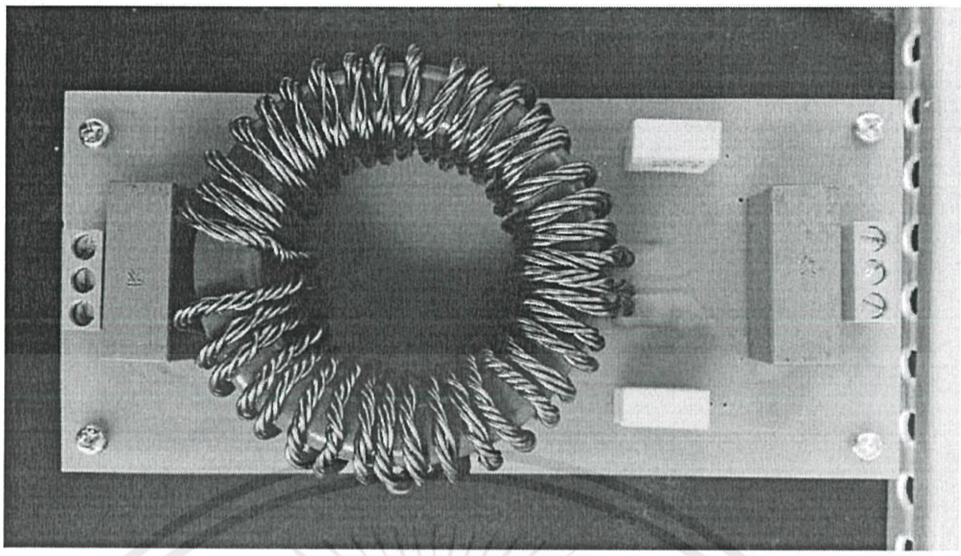
3.8 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI filter)

ในการออกแบบวงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงนั้นจะมีวงจรสมมูลและวงจรจริงดังรูป 3.15



(ก) วงจรตามทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรจริง

รูปที่ 3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

- ความถี่ตัดของโหมดผลร่วม (Cut-off frequency of common mode)

กำหนดให้ความถี่ตัด (cut-off frequency: f_c) ของโหมดผลร่วมเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ และกำหนดให้ C_Y เท่ากับ 48 นาโนฟารัด สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการ (2.14) ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 3.1 มิลลิเฮนรี่

-ความถี่ตัดของโหมดผลต่าง (Cut-off frequency of differential mode)

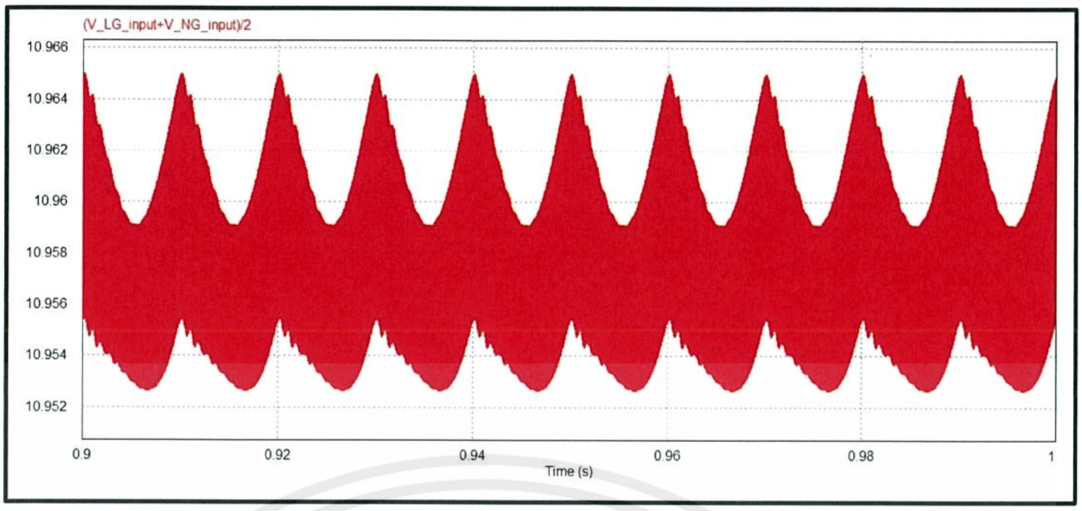
กำหนดให้ความเหนี่ยวนำในโหมดผลต่าง (L_{DM}) มีค่าเป็น 0 เฮนรี่ และ C_X, C_Y มีค่าเท่ากับ 2.2 ไมโครฟารัด และ 48 นาโนฟารัด ตามลำดับสามารถหาความถี่ตัดตามสมการ (2.15) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36 กิโลเฮิรตซ์

3.9 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

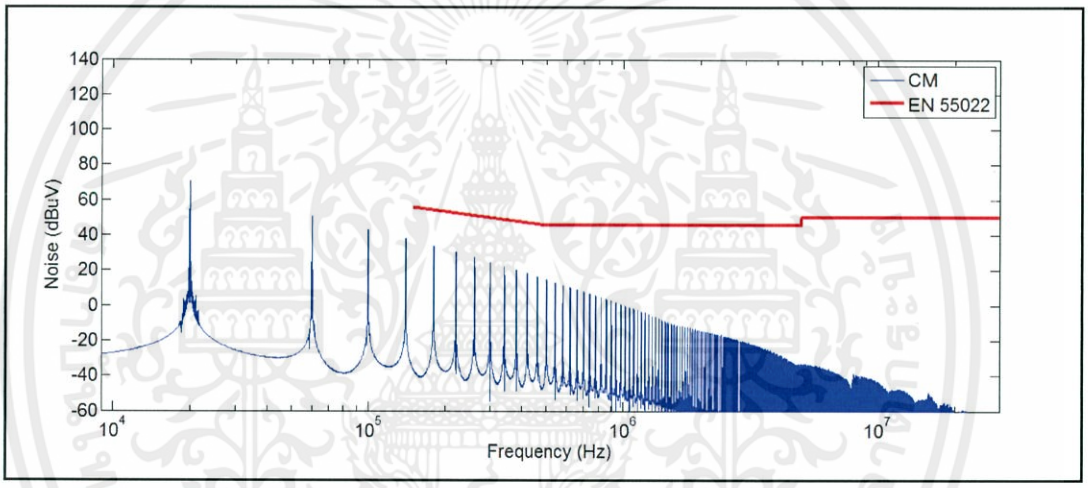
เมื่อทำการใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่ออกแบบเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ ผลจากการใส่วงจรดังกล่าว แสดงดังนี้

ทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนโดยใช้โปรแกรม Psim ร่วมกับ Matlab เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างกับมาตรฐาน EN55022 class B แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โดเมนเวลา

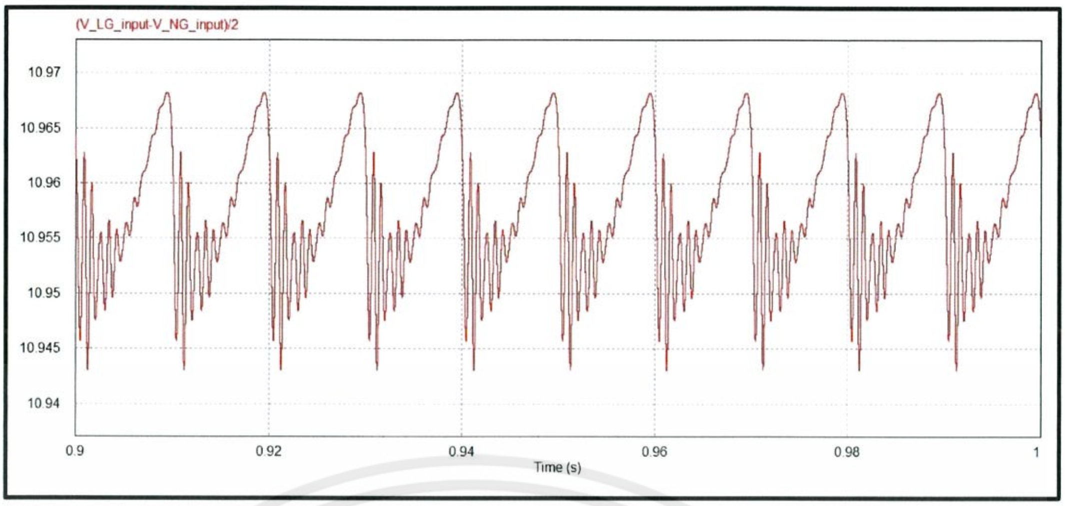


(ข) โดเมนความถี่

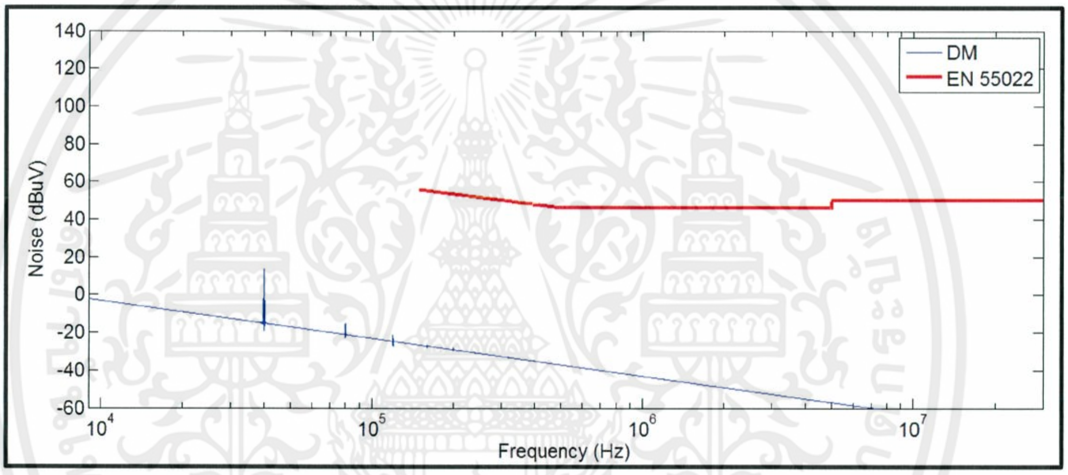
รูปที่ 3.14 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลร่วมหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

จากรูปที่ 3.14(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ 20, 60, 100, 140 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าลดลง ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำลงและอยู่ในมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โดเมนเวลา



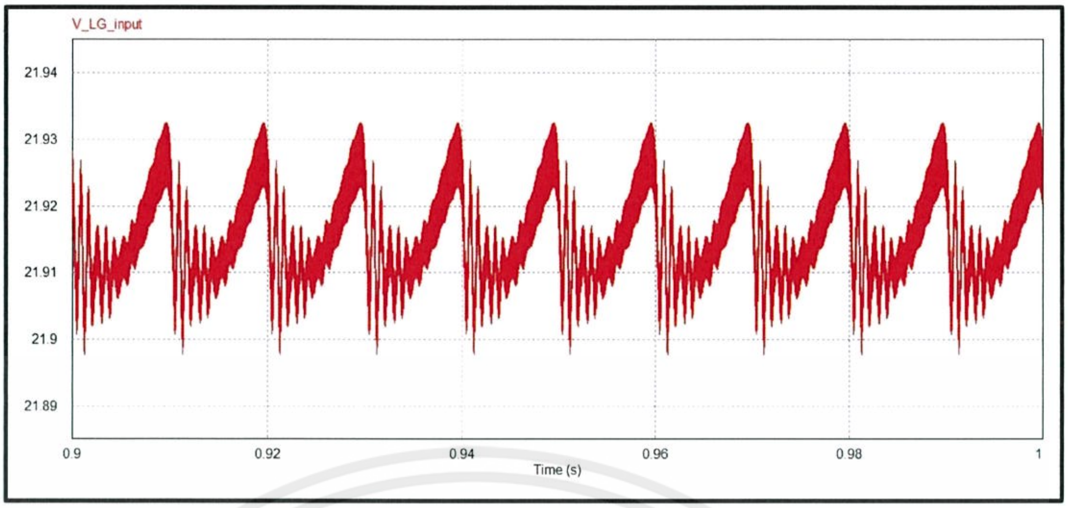
(ข) โดเมนความถี่

รูปที่ 3.15 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลต่างหลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

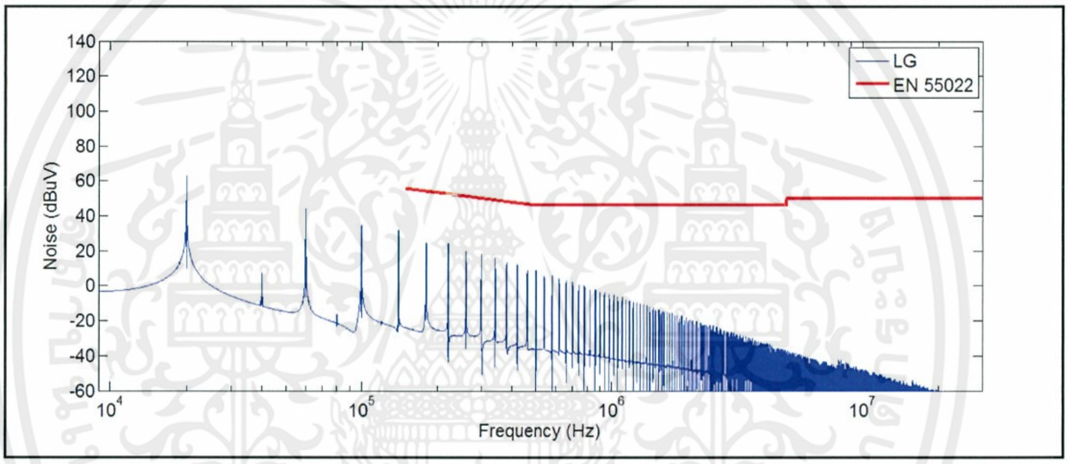
จากรูปที่ 3.15(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ 40, 80, 120 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าลดลง ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำลงและอยู่ในมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด

ในทางปฏิบัตินั้นการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำไม่สามารถวัดโหมดผลร่วมแยกกับโหมดผลต่างได้ ดังนั้นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ในสายไลน์แสดงดังรูปที่ 3.16 และสายนิวทรัล แสดงดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โดเมนเวลา

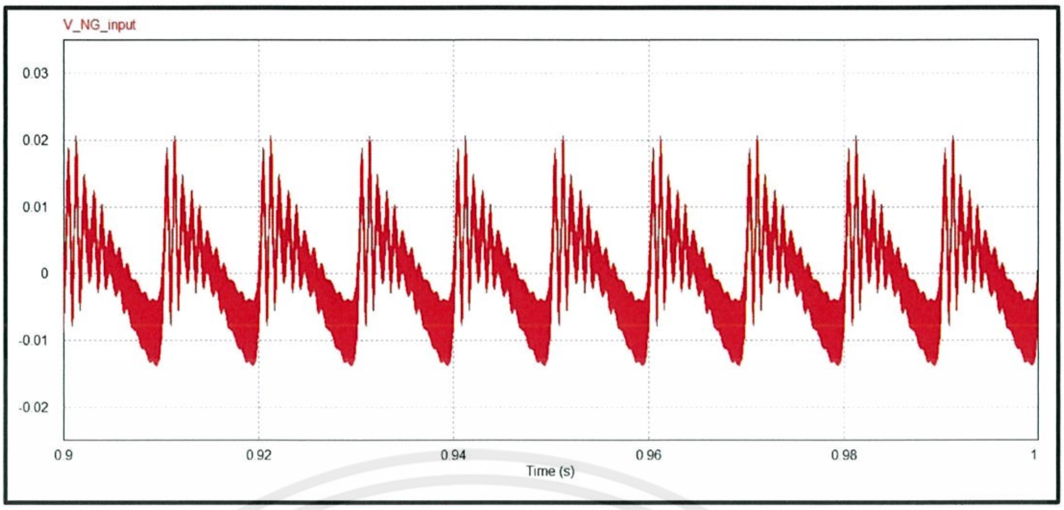


(ข) โดเมนความถี่

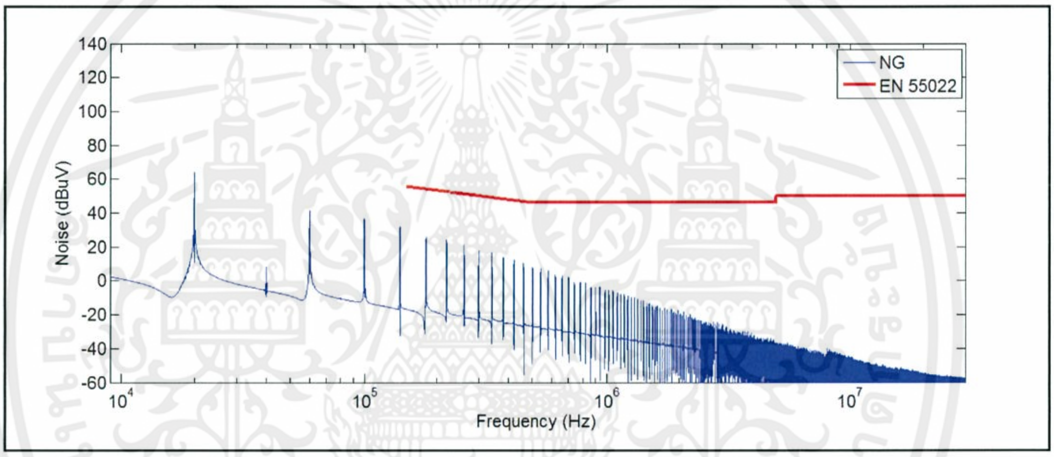
รูปที่ 3.16 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์หลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

จากรูปที่ 3.16(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอยู่ในมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โดเมนเวลา



(ข) โดเมนความถี่

รูปที่ 3.17 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัลหลังจากใส่วงจรกรองกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

จากรูปที่ 3.17(ข) เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ตั้งแต่ความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าที่ช่วงความถี่ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 150 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนความถี่ช่วง 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์ จะพบว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอยู่ในมาตรฐาน EN 55022 class B กำหนด

จากผลการจำลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำทั้งสายไลน์และนิวทรัลนั้นพบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลรวมของโหมดผลร่วมกับโหมดผลต่าง และเกิดขึ้นที่ความถี่ $K(f_s)$ เมื่อ

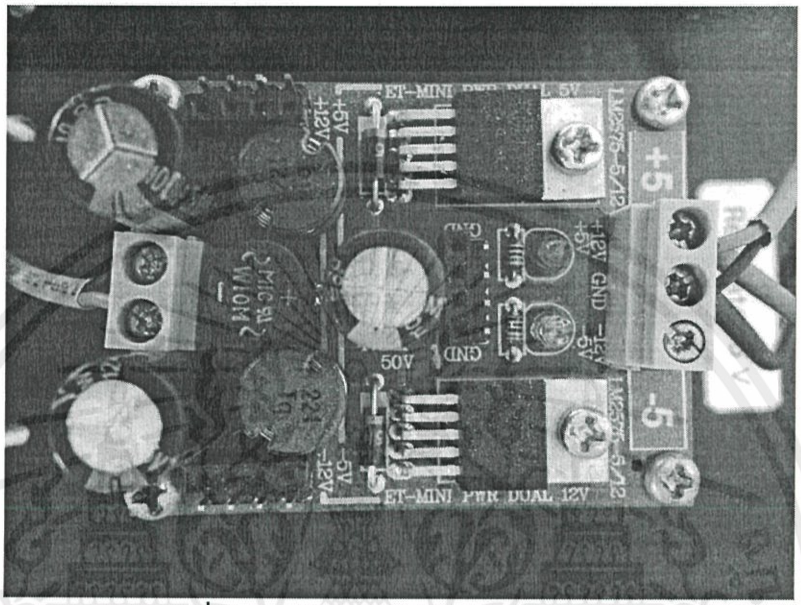
K คือ 1, 2, 3, ... f_s คือ ความถี่สวิตชิ่ง (20 กิโลเฮิรตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 วงจรส่วนประกอบอื่นๆ

3.10.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์

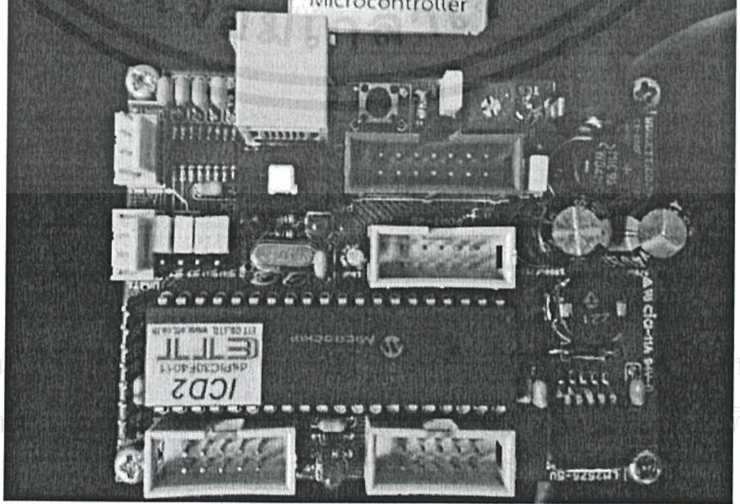
เป็นวงจรลดระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหลือระดับแรงดัน 5 โวลต์ เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขับเกตแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์

3.10.2 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ในโครงงานนี้จะใช้ dsPIC30F4011 เป็นชุดควบคุมดิจิตอล ซึ่งเป็นตัวประมวลผลดิจิตอลขนาด 16 บิต ในโครงงานนี้จะใช้ฟังก์ชั่นของ dsPIC30F4011 ในการควบคุมค่ามอดูเลชั่นอินเด็ก ตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ซึ่งฟังก์ชั่นดังกล่าวสำคัญมากในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 3.19



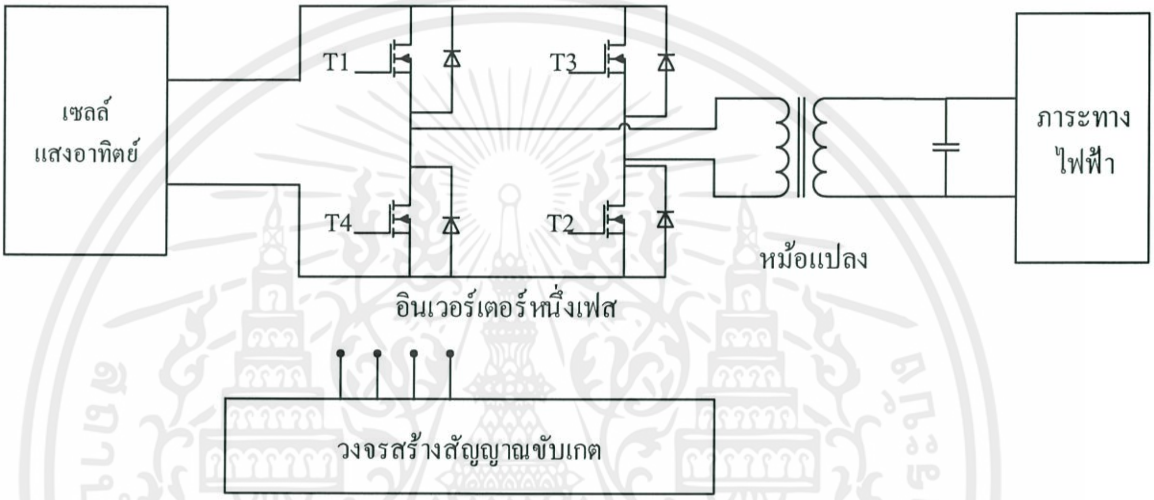
รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง ... ที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงงาน

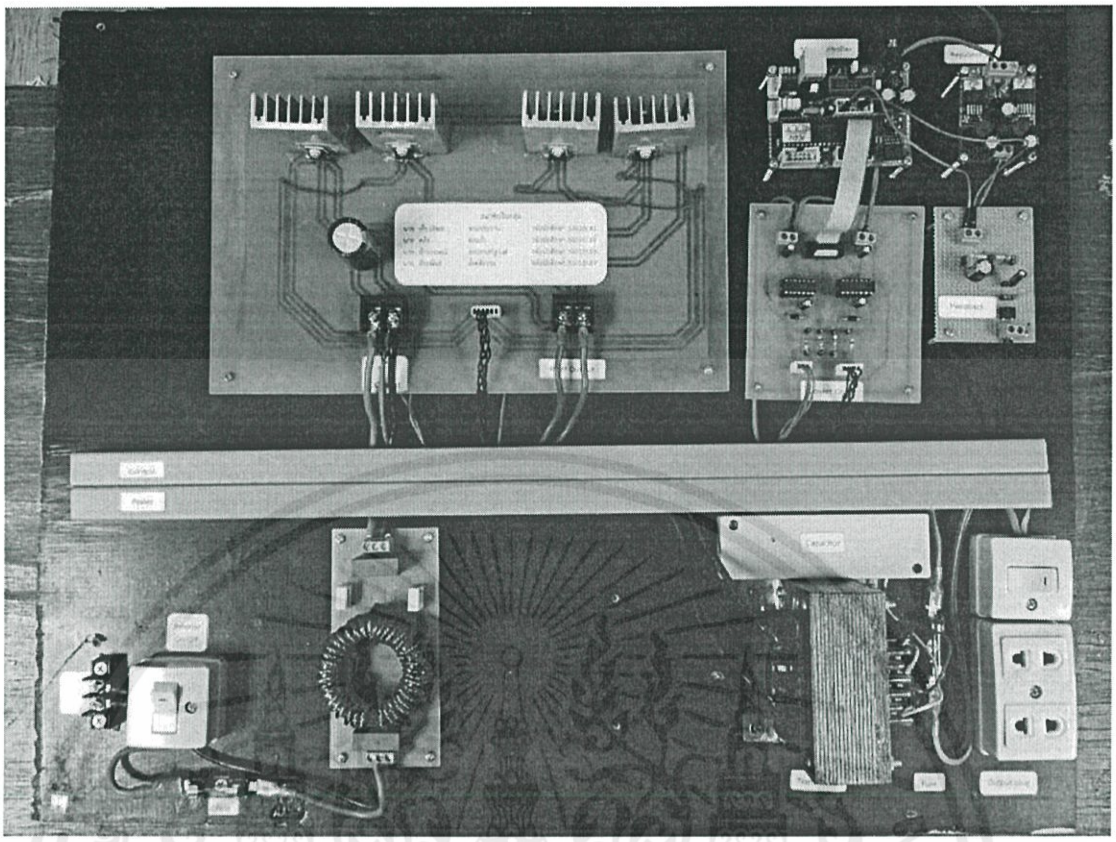
ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนวงจรควบคุม (Controlcircuit) และส่วนของวงจรหลัก (Main circuit) โดยรูปวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนวงจรควบคุม และส่วนวงจรหลัก



รูปที่ 4.1 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์รับไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรับสัญญาณขับแบบพีดับเบิลยูเอ็มจากชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้าสู่ขาเกตโดยตั้งค่าหน่วงเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้สวิตซ์มอสเฟตทำงานพร้อมกันและแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงเพื่อยกระดับแรงดันเข้ามาที่ภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

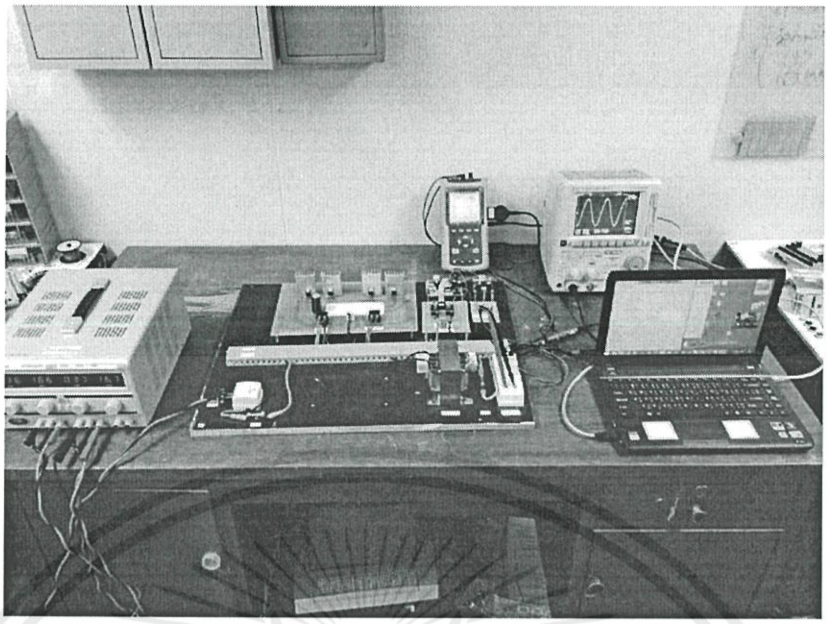


รูปที่ 4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ในโครงงาน

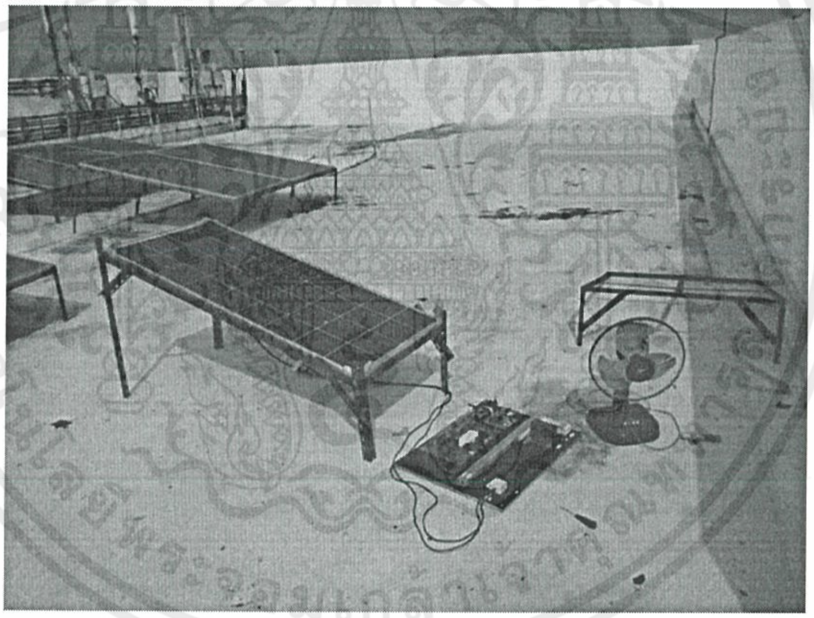
ในรูปที่ 4.2 แสดงวงจรจริงที่ทำขึ้นมาโดยแยกแผงวงจรออกเป็นส่วนต่างๆเพื่อง่ายต่อการวัดค่าสัญญาณต่างๆในวงจรซึ่งแยกเป็น ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ชุดไฟเลี้ยง ชุดวงจรขับเกต ชุดมอสเฟต และอุปกรณ์อื่นๆ

จะทำการศึกษาการใช้งานอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเปรียบเทียบกับ การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



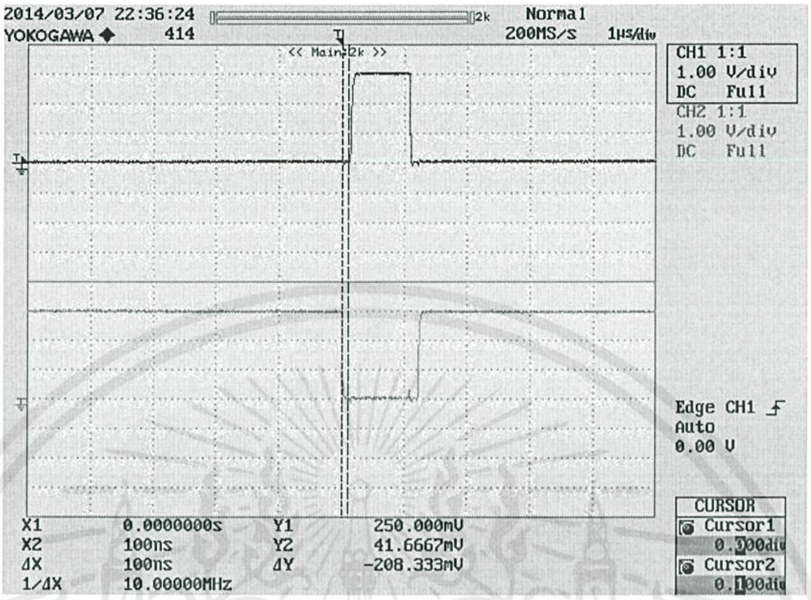
รูปที่ 4.4 การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดสอบวงจรจะเริ่มทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงก่อนดังรูปที่ 4.3 จากนั้นจึงทดสอบจริงกับเซลล์แสงอาทิตย์ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4

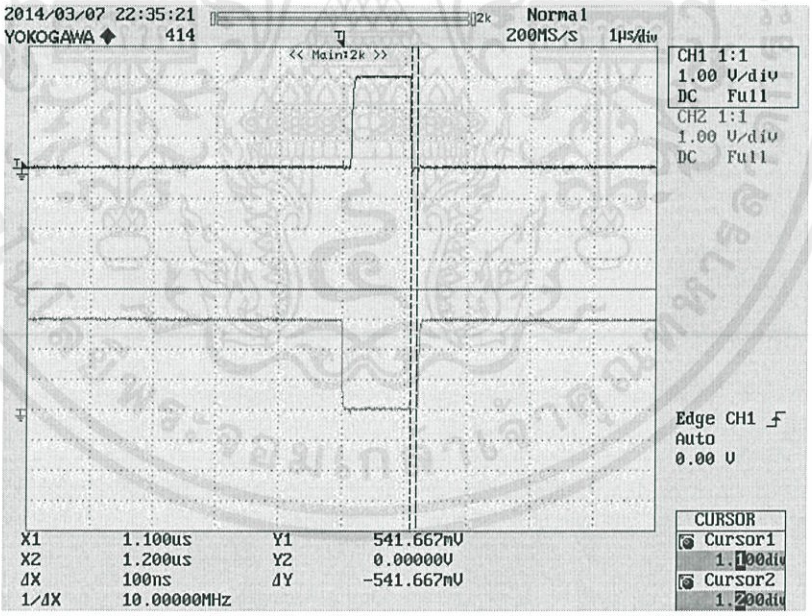
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดสัญญาณของวงจรจริงที่ออกแบบ

4.2.1 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรหน่วงเวลาและวงจรขับเกต



(ก) ระยะเวลาการหน่วงระหว่างขอบขาขึ้นของมอสเฟตตัวที่หนึ่ง



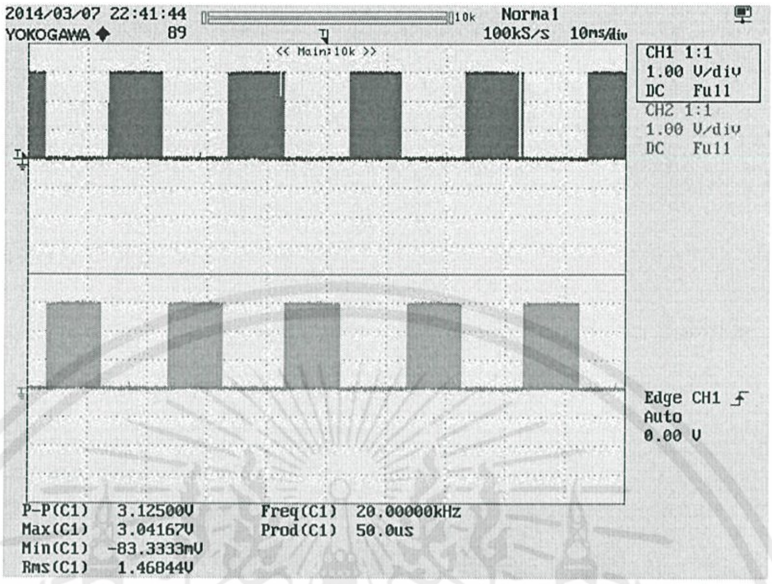
(ข) ระยะเวลาการหน่วงระหว่างขอบขาขึ้นของมอสเฟตตัวที่สอง

รูปที่ 4.5 สัญญาณที่แสดงการหน่วงเวลาในขอบขาขึ้น

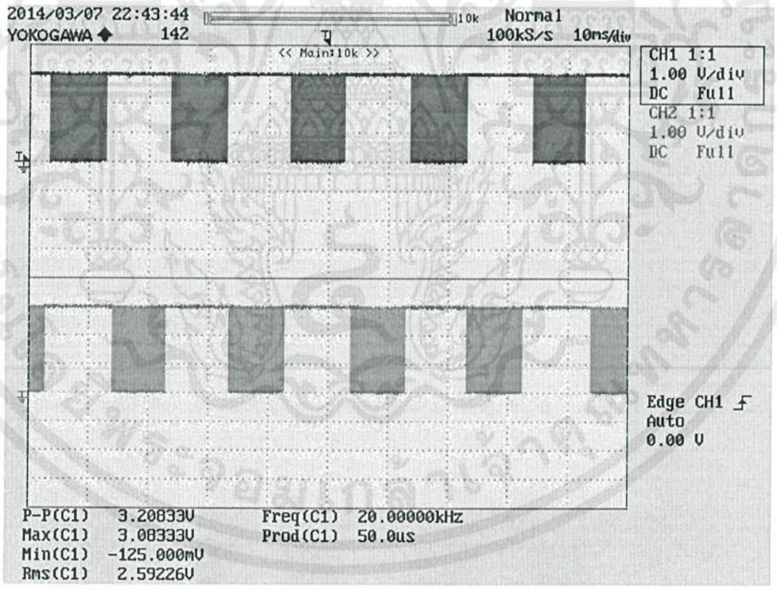
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงสัญญาณที่แสดงการหน่วงเวลาในขอบขาขึ้นโดยมีระยะเวลาการหน่วงระหว่างขอบขาขึ้นของมอสเฟตตัวที่หนึ่ง 100 นาโนวินาที และ ระยะเวลาการหน่วงระหว่างขอบขาขึ้นของมอสเฟตตัวที่สอง 100 นาโนวินาที จากการหน่วงเวลานี้เป็นการปรับตั้งค่าใน

ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อป้องกันไม่ให้มอสเฟตทำงานพร้อมกัน เนื่องจากการที่มอสเฟตทำงานพร้อมกันจะทำให้เกิดการลัดวงจร



(ก) สัญญาณควบคุมมอสเฟตตัวที่ 1 กับ 3



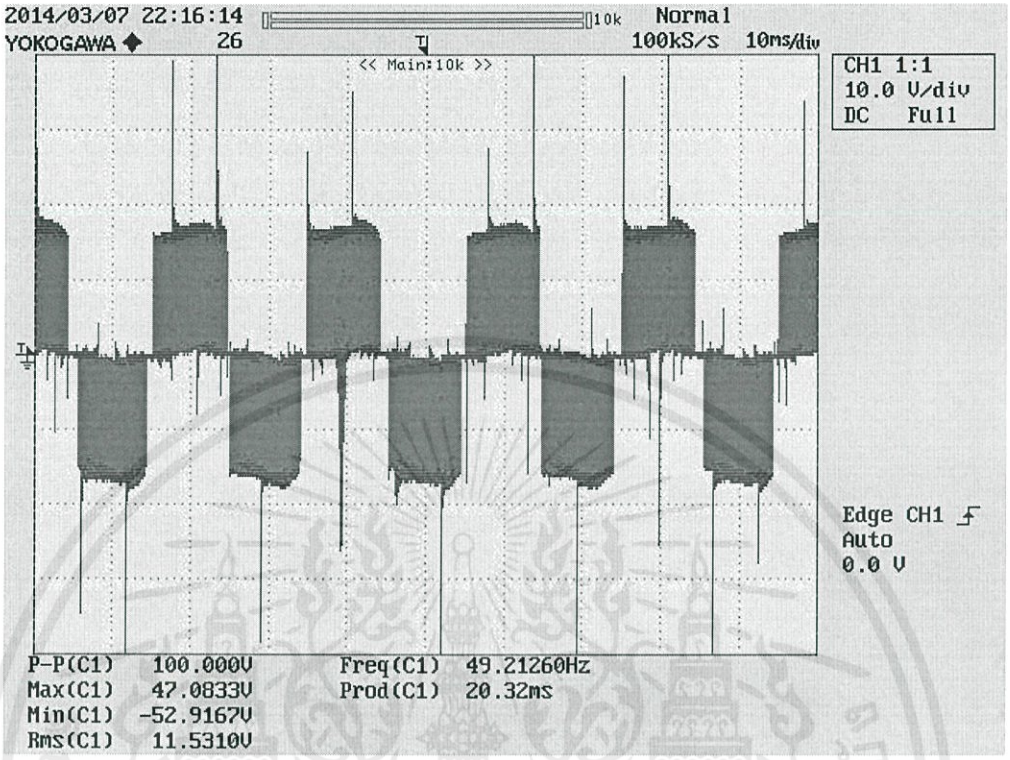
(ข) สัญญาณควบคุมมอสเฟตตัวที่ 2 กับ 4

รูปที่ 4.6 สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยที่สัญญาณควบคุมมอสเฟตตัวที่ 1 กับ 4 ทำงานคู่กันส่วนสัญญาณควบคุมมอสเฟตตัวที่ 2 กับ 3 ทำงานคู่กัน ซึ่งสัญญาณควบคุมสองคู่นี้ทำงานไม่พร้อมกันและจะนำไปขับมอสเฟตต่อไปโดยมีแรงดันประมาณ 3 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 รูปคลื่นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม



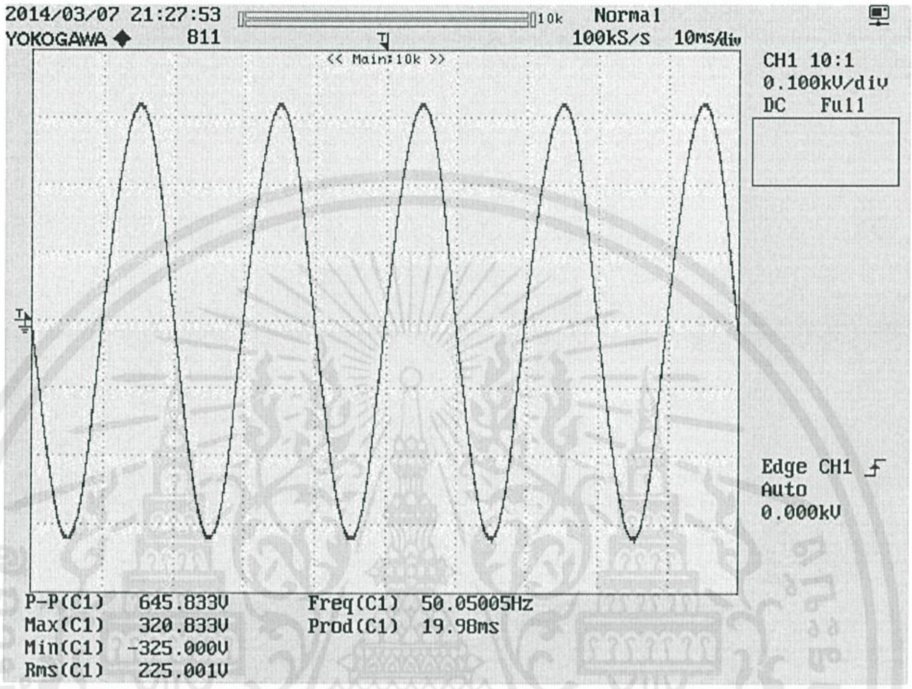
รูปที่ 4.7 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์

สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันประมาณ 17 โวลต์ ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปกรองเพื่อให้ได้สัญญาณไซน์ต่อไปโดยที่ความถี่สวิตชิ่งเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ และความถี่มูลฐาน 50 เฮิรตซ์

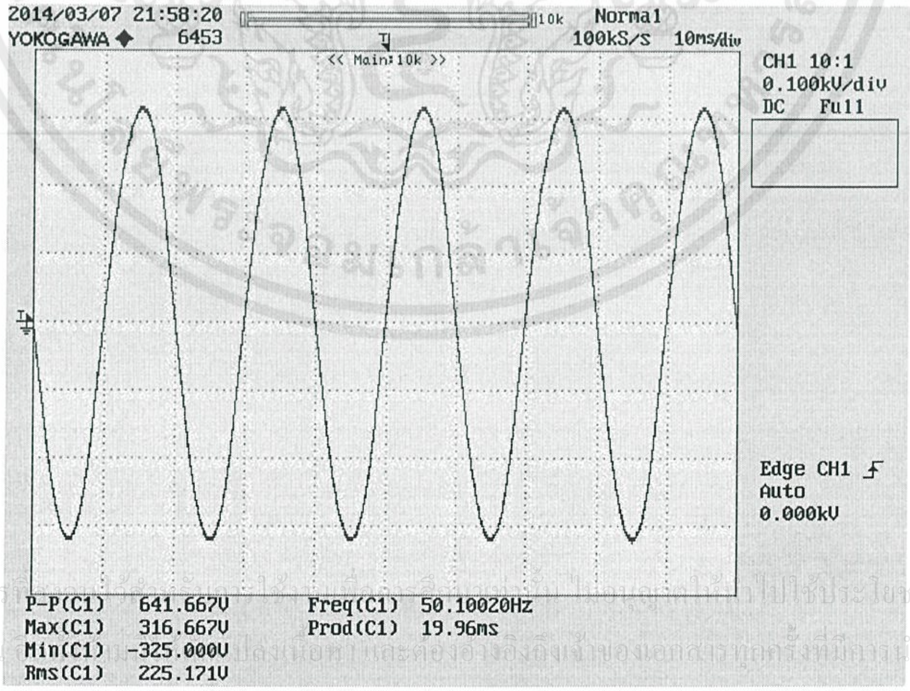
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณไซน์

ทำการวัดสัญญาณแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้แหล่งจ่าย 2 ชนิดคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า และมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

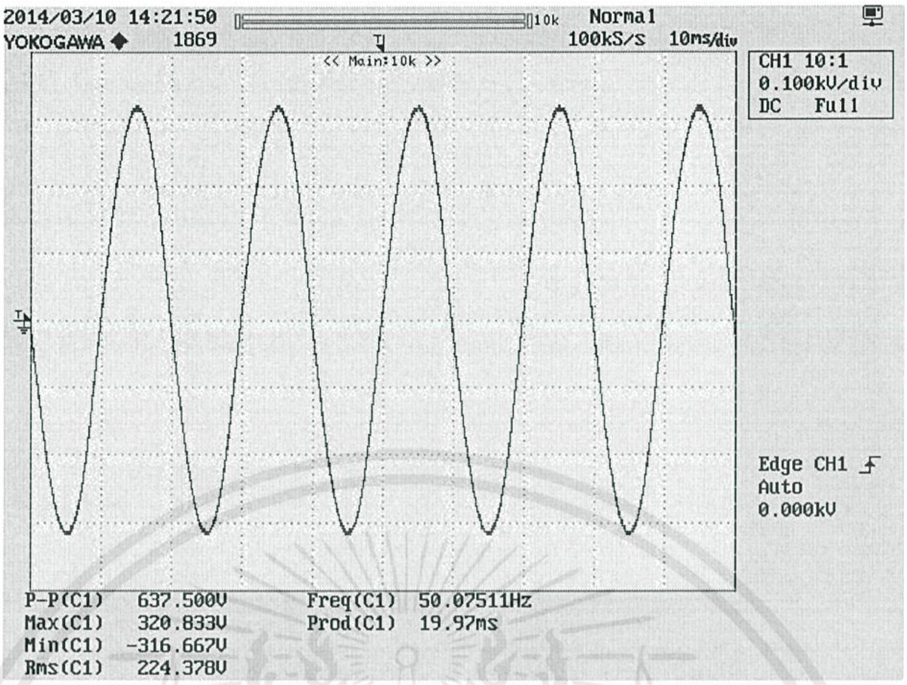


รูปที่ 4.8 สัญญาณไซน์แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

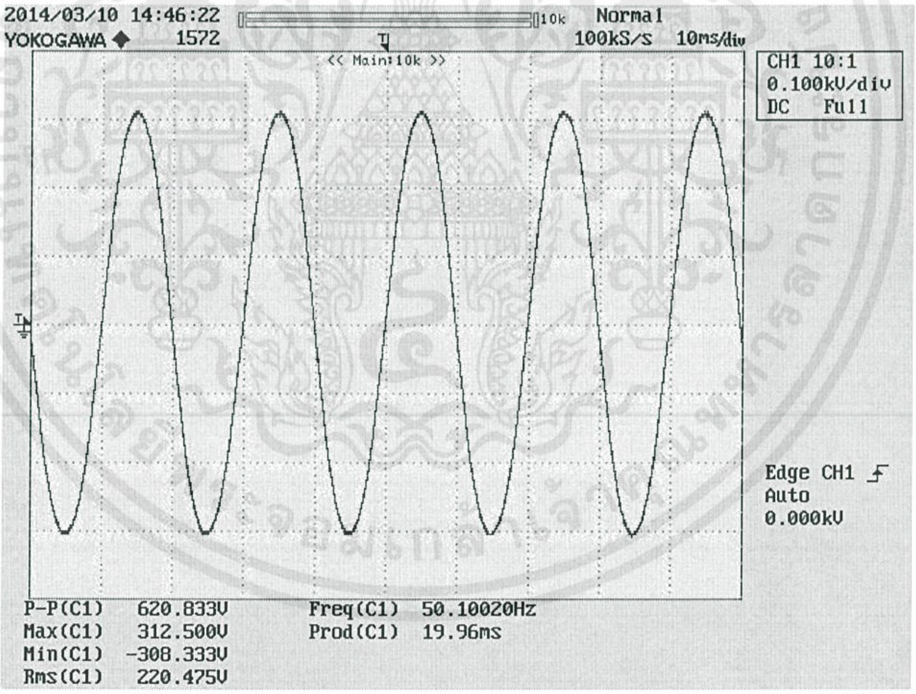


เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ... ปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 สัญญาณไซน์แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.10 สัญญาณไซน์แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.11 สัญญาณไซน์แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองจะได้ว่า การใช้งานอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กับการใช้งานอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์มีรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่เหมือนกัน และมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันใกล้เคียงกัน โดยมีค่าดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

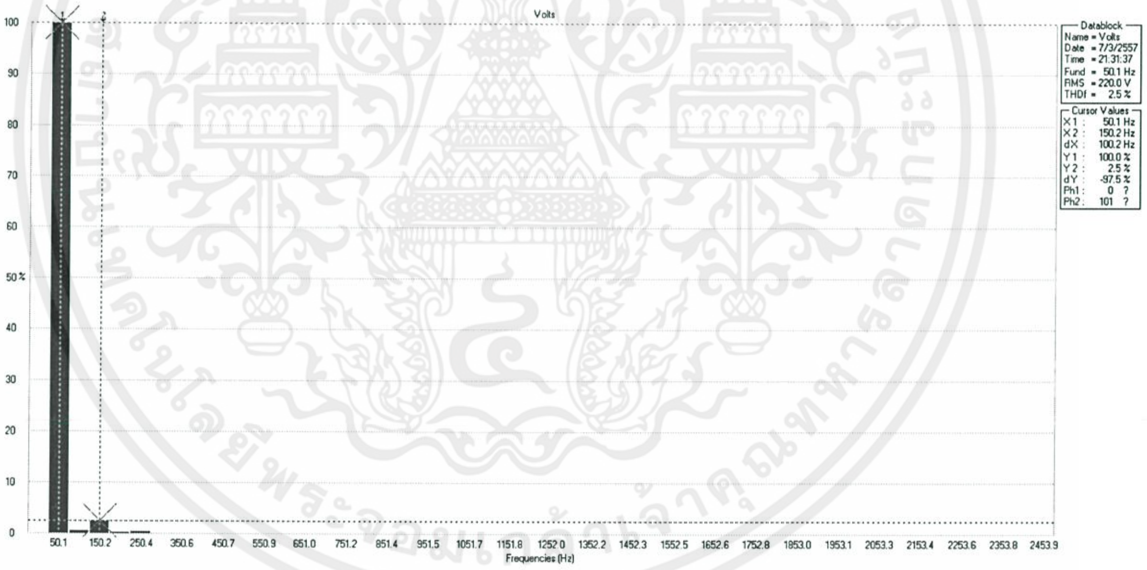
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันสัญญาณไซน์ในกรณีต่างๆ

การทดสอบในกรณีต่างๆ	Vrms(Volt)
แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	225.001
แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	225.171
แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	224.378
แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	220.475

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า จากการใช้งานอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและการใช้งานอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์มีรูปคลื่นไซน์และขนาด 220 โวลต์ ตามที่ต้องการ

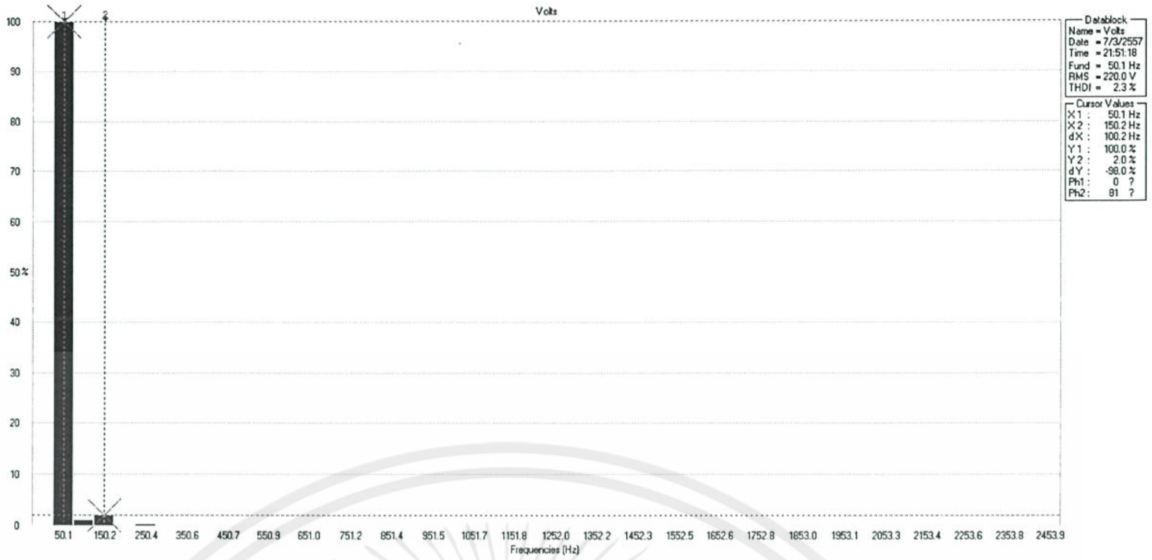
4.4 ผลการวัดค่าผลรวมความเพี้ยนฮารมอนิกส์

ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของระดับแรงดันไฟฟ้า กำหนดมาตรฐานค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันไว้ไม่เกิน 5%

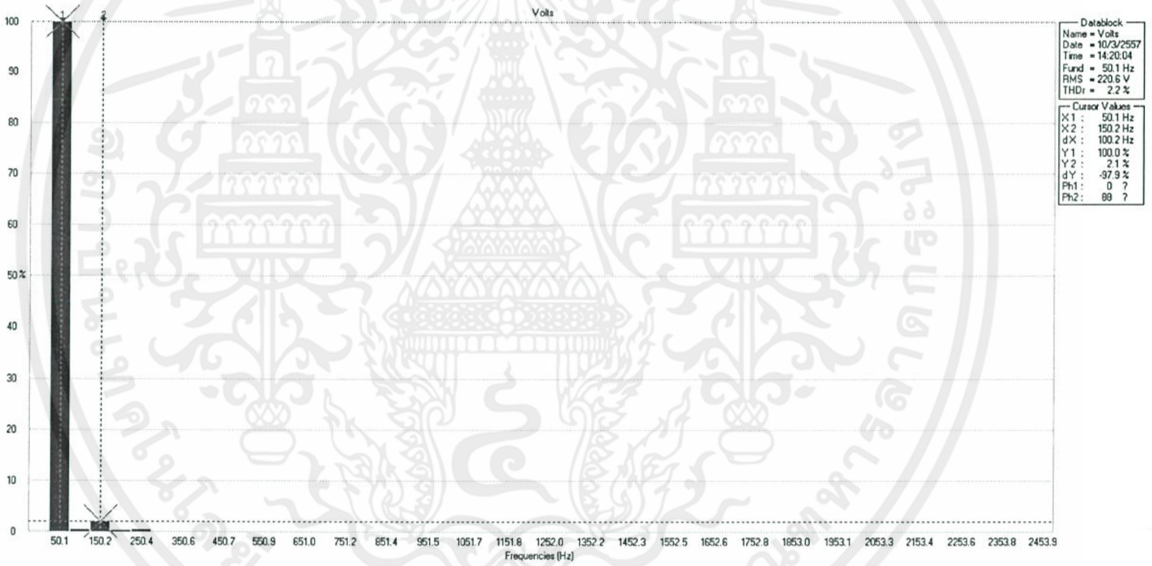


(ก) แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

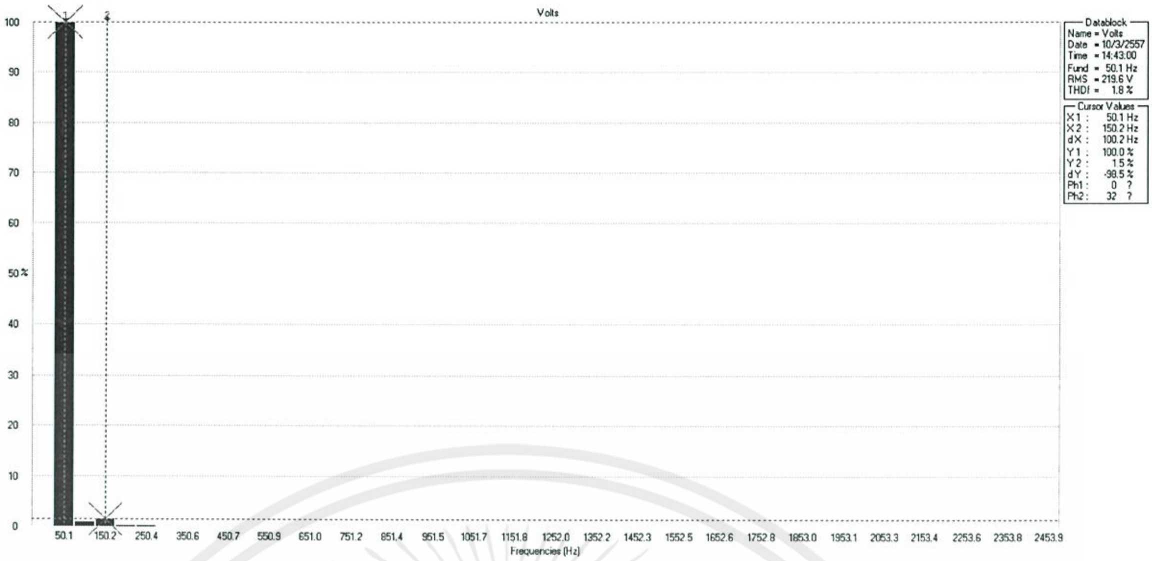


(ข) แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



(ค) แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 4.12 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv)

ตารางที่ 4.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันในกรณีต่างๆ

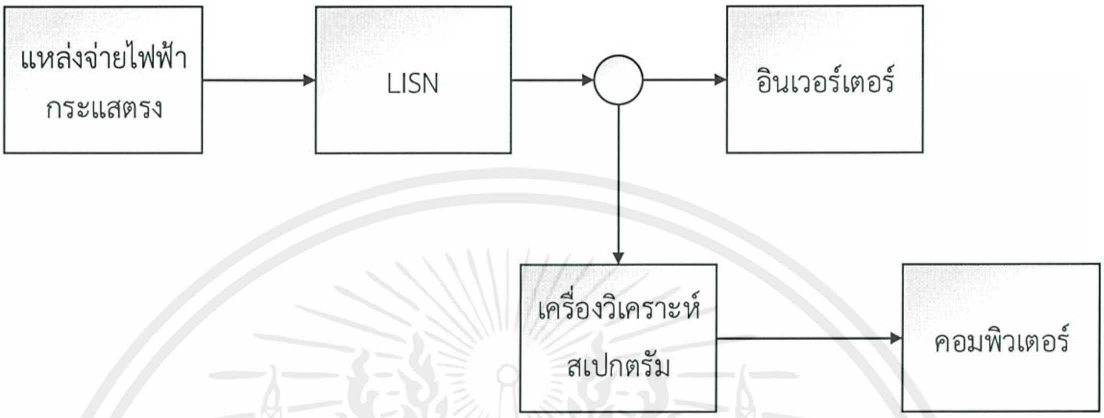
การทดสอบในกรณีต่างๆ	THDv(%)
แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	2.5
แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	2.3
แบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	2.2
แบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเมื่อทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์	1.8

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าการทดสอบในทั้ง4กรณีมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เกินขีดจำกัดคือ 5% สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อระบบ

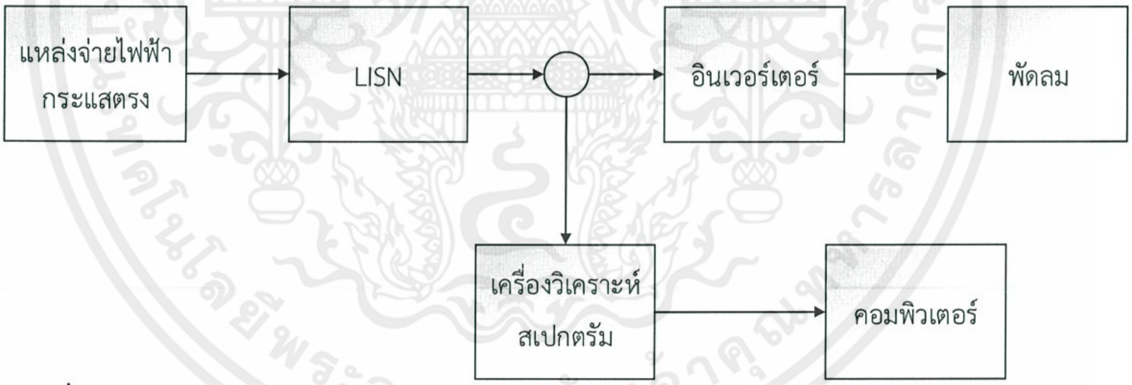
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำ

เนื่องจากไม่สามารถทดสอบชิ้นงานโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ได้จึงต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทน โดยทำการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า

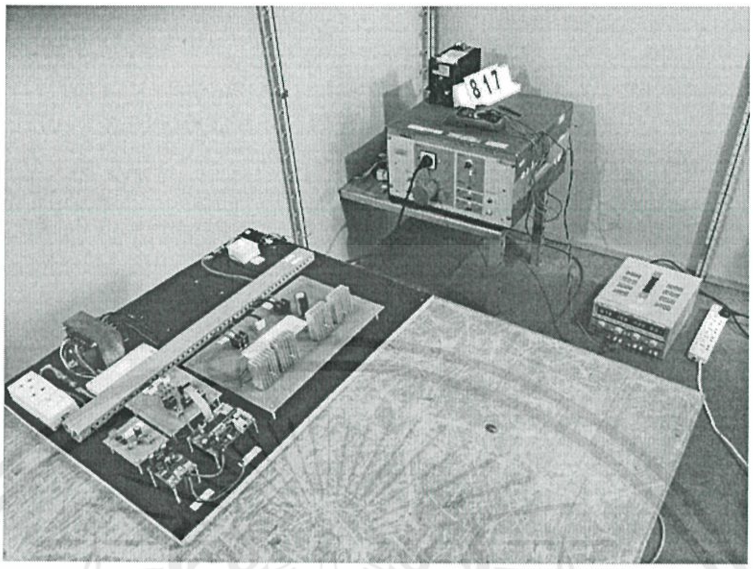


รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 ทำการทดสอบโดยการป้อนไฟจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) เข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งสัญญาณที่ออกจาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) เพื่อวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวน แล้วส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นฉบับ ... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.15 เป็นการต่อชิ้นงานกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้าเข้ากับ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network) โดยสัญญาณที่ออกจาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.15769	56.9	51.6	10.2	67.1	61.8	65.6	55.6	-1.5	-6.2
2	7.5712	60.7	54.5	10.5	71.2	65.0	60.0	50.0	-11.2	-15.0
3	15.6068	52.0	44.4	10.7	62.7	55.1	60.0	50.0	-2.7	-5.1
4	23.2712	53.4	46.3	10.8	64.2	57.1	60.0	50.0	-4.2	-7.1

--- L1 Phase ---

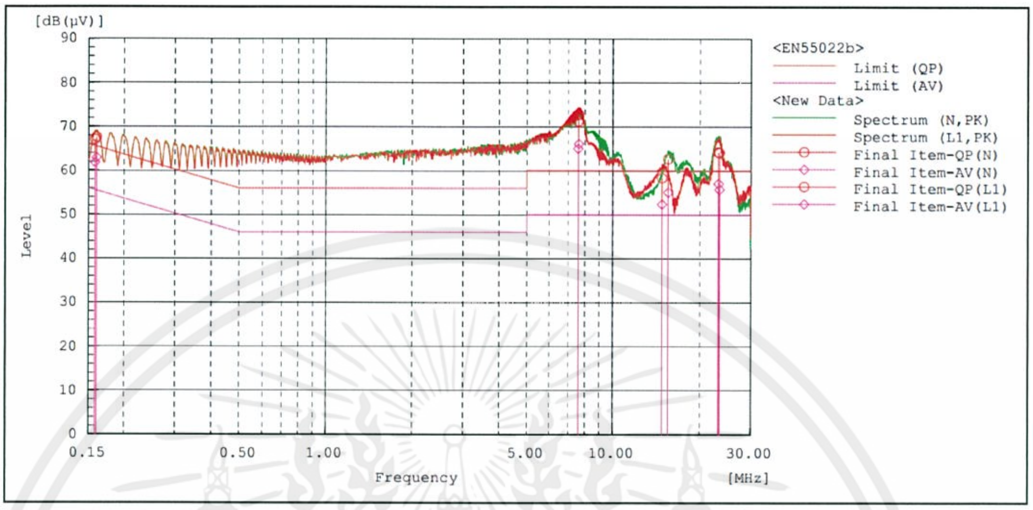
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.15968	57.3	52.7	10.2	67.5	62.9	65.5	55.5	-2.0	-7.4
2	7.6131	62.3	55.6	10.5	72.8	66.1	60.0	50.0	-12.8	-16.1
3	14.8442	47.6	41.6	10.8	58.4	52.4	60.0	50.0	1.6	-2.4
4	23.456	53.1	44.7	11.0	64.1	55.7	60.0	50.0	-4.1	-5.7

รูปที่ 4.16 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากข้อมูลในรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทรัล เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ส่วนใหญ่ของทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัลมีค่าติดลบ ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class Bคือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และสายนิวทรัล



รูปที่ 4.17 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากกราฟพบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัลโดยมีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.18 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.18 เป็นการต่อชิ้นงานกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเข้ากับ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network) โดยสัญญาณที่ออกจาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.15823	60.8	56.7	10.2	71.0	66.9	65.6	55.6	-5.4	-11.3
2	7.6319	56.7	51.6	10.5	67.2	62.1	60.0	50.0	-7.2	-12.1
3	9.6551	58.8	53.9	10.6	69.4	64.5	60.0	50.0	-9.4	-14.5
4	17.7732	59.5	54.7	10.8	70.3	65.5	60.0	50.0	-10.3	-15.5

--- L1 Phase ---

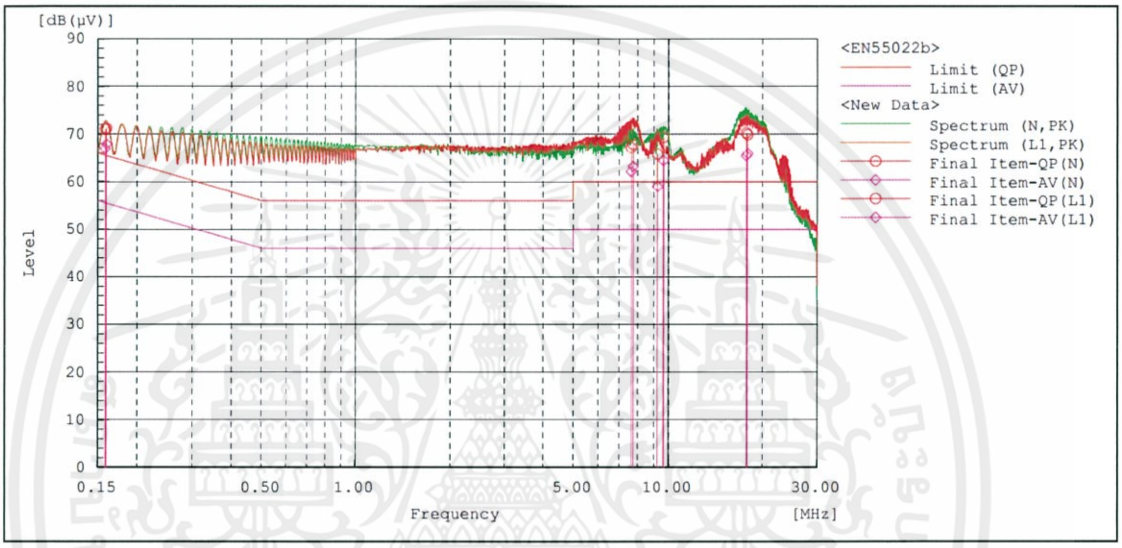
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.15994	61.0	57.7	10.2	71.2	67.9	65.5	55.5	-5.7	-12.4
2	7.7328	57.3	52.7	10.5	67.8	63.2	60.0	50.0	-7.8	-13.2
3	9.234	55.3	48.5	10.5	65.8	59.0	60.0	50.0	-5.8	-9.0
4	17.9704	58.9	54.9	11.0	69.9	65.9	60.0	50.0	-9.9	-15.9

รูปที่ 4.19 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในรูปที่ 4.19 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทรัลเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ ที่ชื่อว่า Margin QP [dB] ส่วนใหญ่มีค่าติดลบ ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์ โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัล



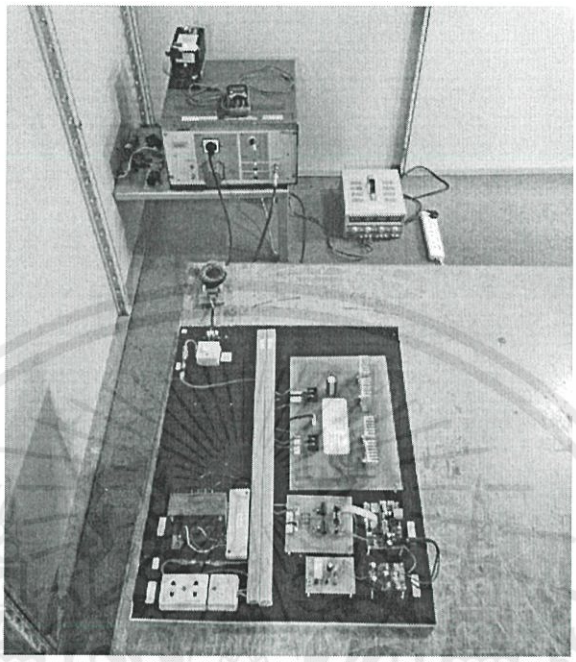
รูปที่ 4.20 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

จากกราฟพบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานในกรณีที่มีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัลโดยมีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำหลังจากต่อวงจรกรองแบบไม่มีภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบหลังจากต่อวงจรกรองกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.21 เป็นการต่อชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้าเข้ากับ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network) โดยสัญญาณที่ออกจาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	7.6912	38.6	32.8	10.5	49.1	43.3	60.0	50.0	10.9	6.7
2	18.0906	39.0	34.0	10.8	49.8	44.8	60.0	50.0	10.2	5.2
3	23.2496	39.9	32.7	10.8	50.7	43.5	60.0	50.0	9.3	6.5
4	28.3716	37.9	32.7	10.6	48.5	43.3	60.0	50.0	11.5	6.7

--- L1 Phase ---

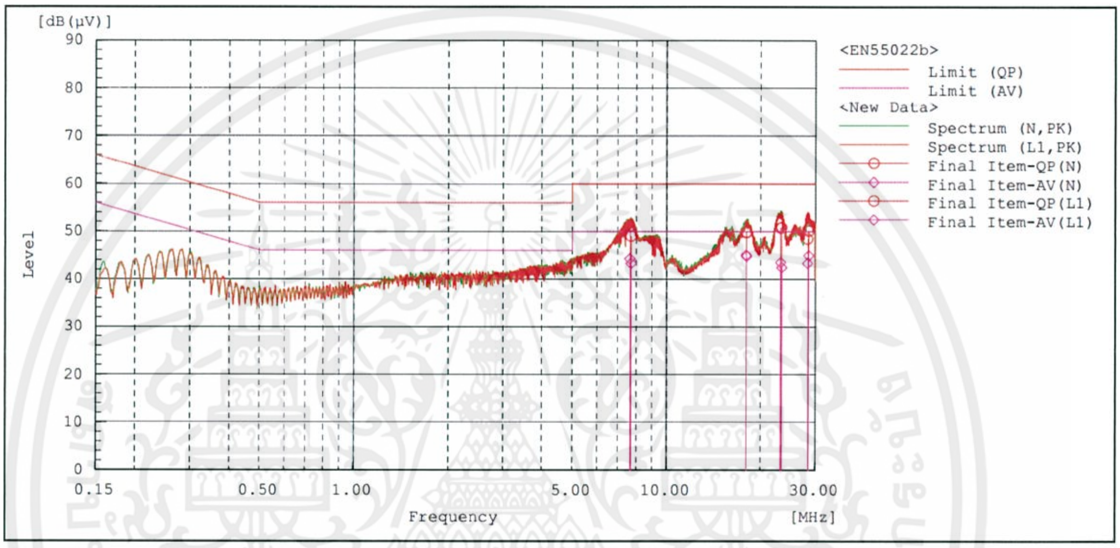
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	7.6339	40.5	33.8	10.5	51.0	44.3	60.0	50.0	9.0	5.7
2	18.0318	38.8	34.0	11.0	49.8	45.0	60.0	50.0	10.2	5.0
3	23.4364	39.8	31.5	11.0	50.8	42.5	60.0	50.0	9.2	7.5
4	28.6098	39.0	33.8	11.1	50.1	44.9	60.0	50.0	9.9	5.1

รูปที่ 4.22 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในรูปที่ 4.22 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทรัล เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ของทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัลมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และสายนิวทรัล



รูปที่ 4.23 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากกราฟพบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัลโดยจากกราฟในช่วงความถี่ประมาณ 7เมกะเฮิรตซ์ จะเห็นว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกินเส้นมาตรฐานเล็กน้อยเนื่องจากเป็นการวัดในช่วงสภาวะชั่วขณะเท่านั้น เมื่อสังเกตค่า Margin QP [dB] ช่วงความถี่นี้ พบว่ามีค่าเป็นบวก จึงถือได้ว่าการแพร่กระจายไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนผ่านทางสายตัวนำหลังจากต่อวงจรกรองแบบมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.24 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบหลังจากต่อวงจรกรองกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.24 เป็นการต่อชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้าเข้ากับ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network) โดยสัญญาณที่ออกจาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.25975	45.9	40.2	10.2	56.1	50.4	61.4	51.4	5.3	1.0
2	9.2946	43.1	39.3	10.5	53.6	49.8	60.0	50.0	6.4	0.2
3	24.0004	51.8	45.5	10.7	62.5	56.2	60.0	50.0	-2.5	-6.2

--- L1 Phase ---

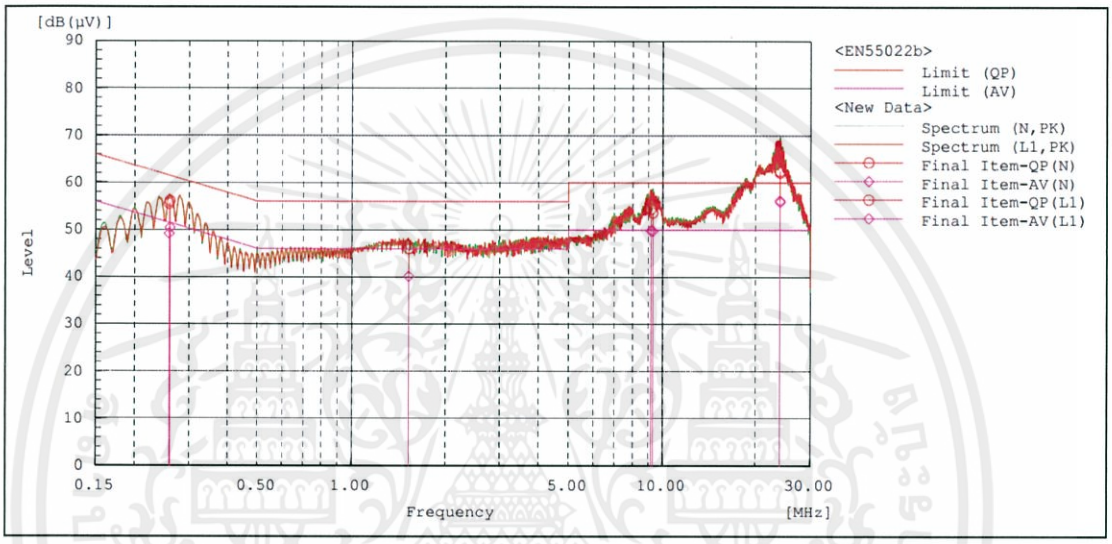
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.25805	45.3	39.0	10.2	55.5	49.2	61.5	51.5	6.0	2.3
2	1.52336	35.7	29.8	10.3	46.0	40.1	56.0	46.0	10.0	5.9
3	9.1565	43.9	39.4	10.5	54.4	49.9	60.0	50.0	5.6	0.1
4	24.0408	51.1	44.9	11.0	62.1	55.9	60.0	50.0	-2.1	-5.9

รูปที่ 4.25 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในรูปที่ 4.25 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทรัล เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ของทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัลส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวกแต่จะมีอยู่ค่าหนึ่งที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัล



รูปที่ 4.26 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class Bหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

จากกราฟพบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีที่มีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า พบว่ากราฟในช่วงความถี่ประมาณ 200 กิโลเฮิรตซ์ และ 7 เมกะเฮิรตซ์ มีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกินเส้นมาตรฐานเล็กน้อยเนื่องจากเป็นการวัดในช่วงสภาวะชั่วขณะเท่านั้น เมื่อสังเกตค่า Margin QP [dB] ช่วงความถี่นี้ พบว่ามีค่าเป็นบวก แต่ในช่วงความถี่ประมาณ 20 เมกะเฮิรตซ์ มีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงถือได้ว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งการวัดสัญญาณรบกวนจะใช้มาตรฐาน EN55022 class B เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการทดลอง การใช้งานเป็นระบบแยกเดี่ยวประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และภาระทางไฟฟ้า ในส่วนภาระทางไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นในโครงงานนี้ใช้งานพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

การทดลองเริ่มจากการทดสอบการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์โดยทดลองใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจึงทดสอบสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรเลอร์ สัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม และสัญญาณไซน์ด้านขาออก ซึ่งการทำงานเป็นปกติและค่าฮาร์มอนิกส์ของแรงดันนั้นอยู่ภายในมาตรฐาน หลังจากทดสอบชุดอินเวอร์เตอร์จึงต่อภาระทางไฟฟ้าต่างๆโดยโครงงานนี้ได้แสดงผลการทดสอบกับพัดลม ผลลัพธ์คือชุดอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ปกติ ขั้นต่อไปคือการทดสอบโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน จากผลการทดลองสามารถใช้งานได้ปกติในภาระทางไฟฟ้าต่างๆในโครงงานนี้แสดงผลการใช้พัดลม และค่าฮาร์มอนิกส์ของแรงดันนั้นอยู่ภายในมาตรฐาน

ในการทดสอบสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นไม่สามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปในห้องทดสอบได้จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานแทน จากผลการทดลองได้ทดสอบการทำงานในกรณีการใช้งานแบบไม่มีและมีตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง รวมถึงการทดสอบโดยไม่มีภาระทางไฟฟ้าและมีภาระทางไฟฟ้า โครงงานนี้แสดงผลการทดสอบโดยใช้พัดลม ผลการทดลองแสดงให้เห็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำซึ่งไม่มีการใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนค่าสัญญาณรบกวนมีค่ามากเกินมาตรฐาน ซึ่งหลังจากใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนลงให้อยู่ในมาตรฐานได้ นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจ่ายพลังงานให้ภาระทางไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเกินมาตรฐานในช่วง 20 ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในเมื่อมีการใช้จ่ายพลังงานให้ภาระทางไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์และออกแบบเผื่อในส่วนนี้ด้วย โดยสัญญาณรบกวนเกิดจากปัจจัยหลายอย่างเช่นผลจากการออกแบบลายวงจร จำนวนของจุดต่อเชื่อม และความยาวสายตัวนำ ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการลดลูปของลายวงจร ลดจุดต่อเชื่อม และลดความยาวสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] วีระเชษฐ์ ขันเงิน, **Power Electronics**, พิมพ์ครั้งที่ 9.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.2553

[2] **Information technology equipment Radio disturbance characteristics Limitsand methods of measurement**, The European Standard EN 55022:1998

[3] ชุติพนธ์ อู่ยายโสม, “The EMI effect of snubber circuit on the power mosfet,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, วิศวกรรมไฟฟ้า,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

[4] Farhadi and A. Jalilian, “Modeling, Simulation and Reduction Techniques of Electromagnetic Conducted Emission Due to Operation of Power Electronic Converters,” **International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'07)**, Sevilla, Spain, March 2007.W.-K. Chen, Linear Networks and Systems (Book style). Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123–135.

[5] Masahito Shoyama and Tamotsu Ninomiya, “Common-Mode Noise Reduction by Current Cancellation in Switching Power Supplies,” **Proceedings of The 7th International Joint Symposium between Chungnam National University and Kyushu University**, 2005, pp.67-70.

[6] Feng Lin, Dan Y.Chen “Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation,” IEEE transaction on power electronic vol 9, 1994, pp.132-137.

[7] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, **Switch-mode Power Supplies**, พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.2553

[8] ธีรศักดิ์ สมภารจันทร์, “EMI self-learning toolkit for engineers,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

[9] สัณห์ชนก ธนาสนะ, “EMI and switching loss reduction of a full-bridge PWM converter for DC motor drive,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, วิศวกรรมระบบควบคุม,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.

[10] วีระเชษฐ์ ขันเงิน. **ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้านสื่อสาร**;.[หน้า 4-8] [13 ก.ย. 2555]. **เข้าถึงได้ที่:** http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Electromagnetic_Compatibility_on_ Telecommunications/index.php#f

เอกสารนี้เป็นเอกส... ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

[11] นนทิวัฒน์ เจริญบุญญาฤทธิ์, “Attenuation of Parasitic Current in Power Converter Using Passive EMI Filter,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

[12] พิชิต ลำยอง, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า**, พิมพ์ครั้งที่2.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ มีน เซอร์วิส ซัพพลาย. 2554

[13] กานต์ บำรุงศิริ, “Study and Analysis of PWM Signal Effects on Generating Electromagnetic Interference in Power Converter,”**ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

[14] วลัยลักษณ์ พนัสเพ็ญเจริญ, “Electrical Power Quality Improvement in Single Phase AC Motor Drive,”**ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

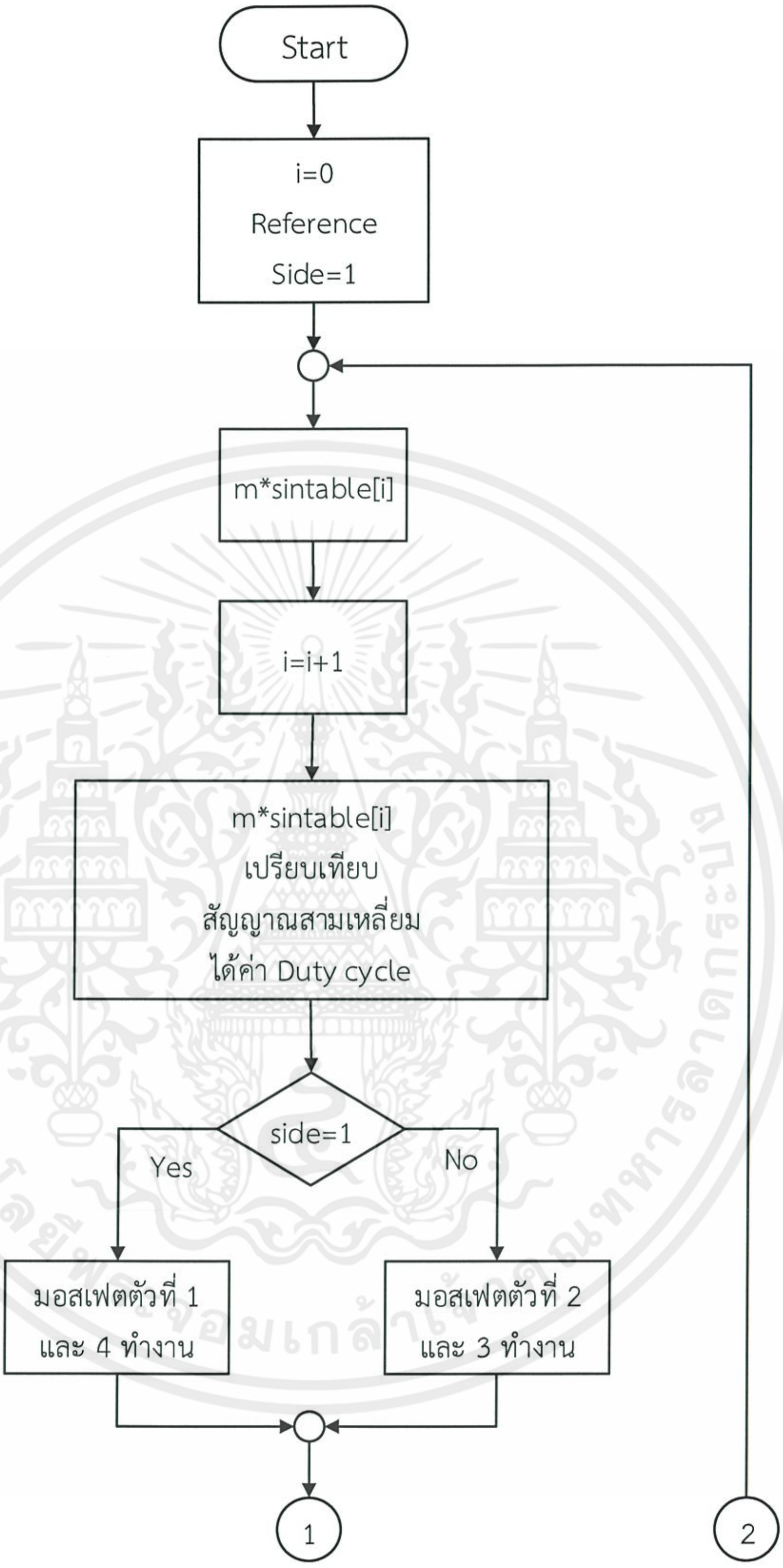
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

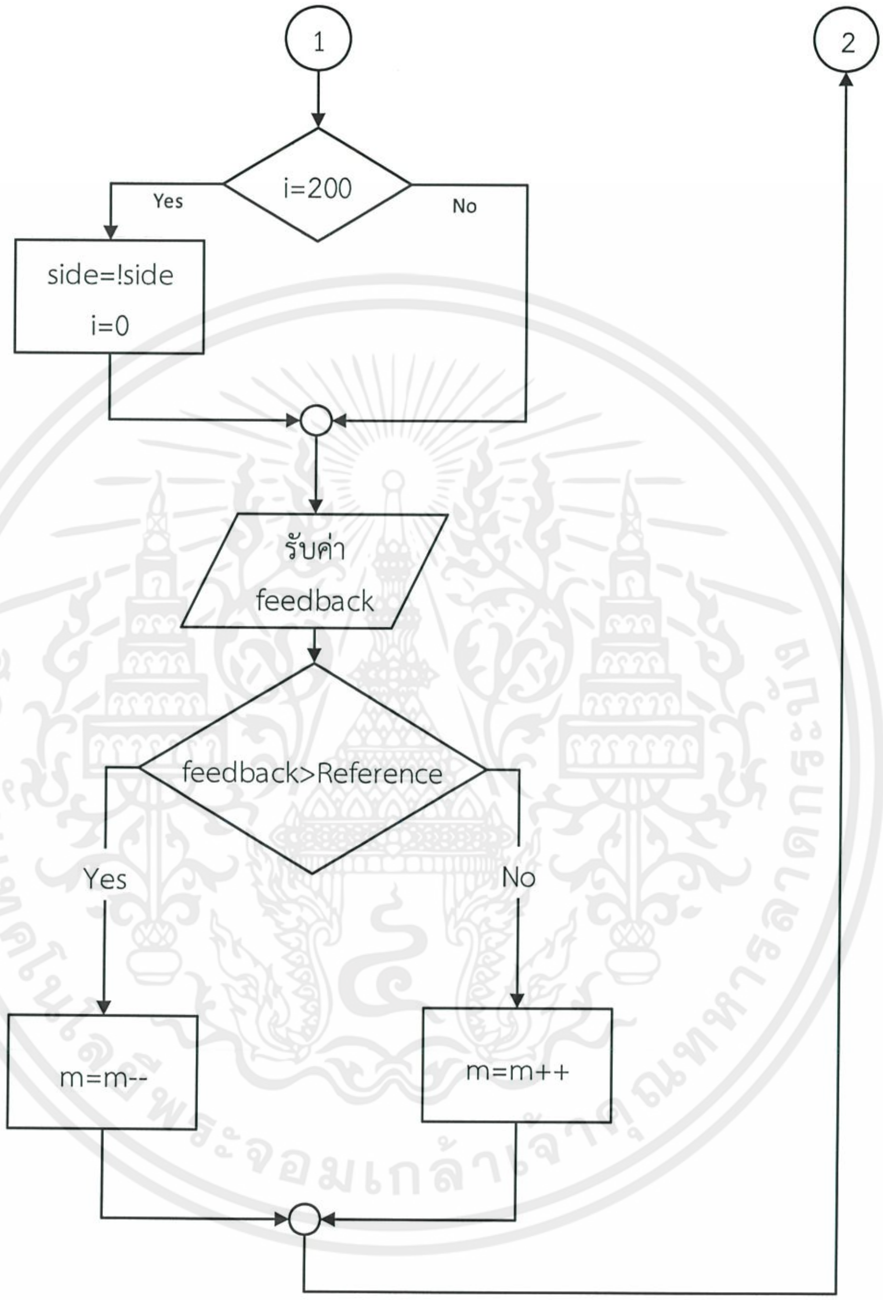
ขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรนเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-1 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรนเลอร์



รูปที่ ก-2 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรนเลอร์ ต่อจากรูป ก-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงาน

1. กำหนดตัวแปร I = 0, Reference, Side = 1
2. กำหนดค่าตารางข้อมูลการสร้างสัญญาณไซน์
3. เพิ่มค่า i ขึ้นหนึ่ง
4. นำค่า m*sintable[i] เปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อหาค่า Duty cycle
5. ถ้าค่าตัวแปร side = 1 ทำตามข้อ5 ถ้าค่าตัวแปร side =1 ทำตามข้อ7
6. นำค่า duty cycle ที่ได้ไปควบคุมมอสเฟตตัวที่ 1 และ 4 ให้ทำงาน
7. นำค่า duty cycle ที่ได้ไปควบคุมมอสเฟตตัวที่ 2 และ 3 ให้ทำงาน
8. ตรวจสอบค่า i ถ้าค่า i ไม่เท่ากับ 200 ให้ข้ามไปข้อ 10
9. เปลี่ยนค่าตัวแปร side ให้เป็นตรงกันข้าม จาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 เปลี่ยนค่า i เป็น 0
10. รับค่า feedback
11. ถ้าค่า feedback มากกว่าค่า reference ให้ทำข้อ 12 ถ้าค่า feedback น้อยกว่าค่า reference ให้ทำข้อ 13
12. ลดค่า m
13. เพิ่มค่า m
14. กลับไปทำข้อ 2 ใหม่

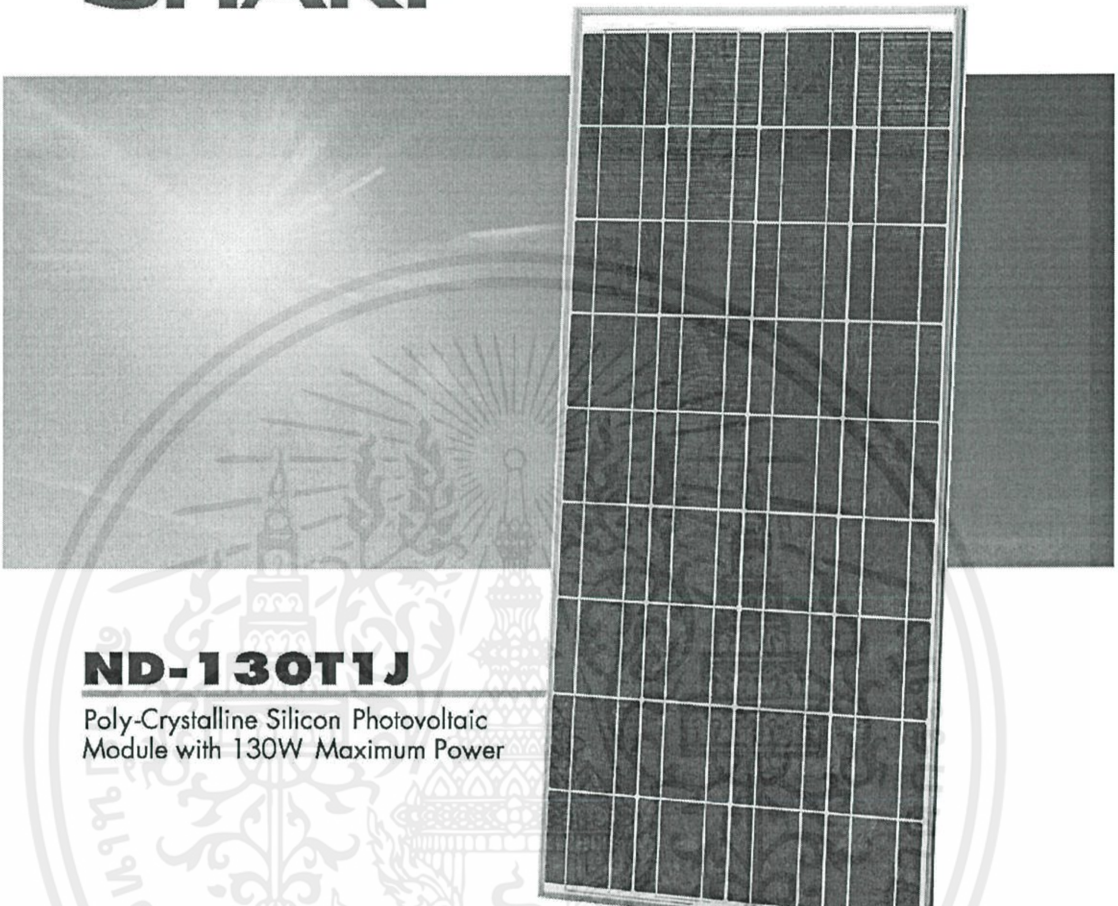
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHARP



ND-130T1J

Poly-Crystalline Silicon Photovoltaic Module with 130W Maximum Power

GENERAL DESCRIPTION

SHARP's ND-130T1J photovoltaic module is designed for large electrical power requirements. Based on the technology of crystal silicon solar cells cultivated for over 40 years, this module has superb durability to withstand rigorous operating conditions and is suitable for grid connected systems.

FEATURES

1. High-power module (130W) using 156.5 mm square poly-crystalline silicon solar cells with 12.99 % module conversion efficiency.
2. Photovoltaic module with bypass diode minimizes the power drop caused by shade. Anti Reflection Corting and BSF (Back Surface Field) structure to improve cell conversion efficiency.
3. Using white tempered glass, EVA resin, and a weatherproof film along with an aluminum frame for extended outdoor use.
4. DC 12V system
5. Output terminal: Lead wire with waterproof connector
6. Qualified IEC 61215, JET certificate number PV08-53102-1054
7. Qualified IEC 61730 (PV module Safety qualification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

Cell	Poly-crystalline silicon solar cells, 156.5mm square
No. of cells and connections	36 in series
Application	DC 12V system
Maximum system voltage	DC 600V
Series fuse rating	15A
Maximum power	130W
Dimensions	1491 × 671 × 46mm
Weight	14.5 kg

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameters	Rating	Unit
Operating temperature	-40 to +90	°C
Storage temperature	-40 to +90	°C

OUTPUT TERMINAL

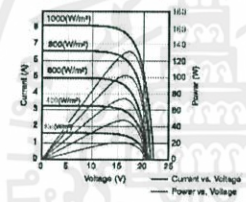
Type of output terminal	Lead wire with connector

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS

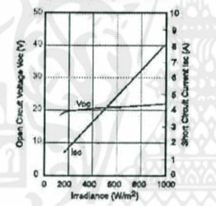
Model		ND-130T1J			
Parameters	Symbol	Min.	Typ.	Unit	Condition
Open circuit voltage	Voc	—	22.0	V	
Maximum power voltage	Vpm	—	17.4	V	Irradiance: 1000 W/m²
Short circuit current	Isc	—	8.09	A	
Maximum power current	Ipm	—	7.48	A	Module temperature: 25°C
Maximum power	Pm	123.5	130	W	
Module efficiency	ηm	—	12.99	%	
Normal Operation Cell Temperature	(NOCT)	—	47.5	°C	

CHARACTERISTICS

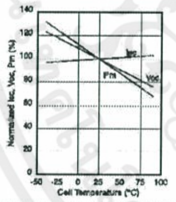
Current, Power vs. Voltage Characteristics (Cell temperature: 25°C)



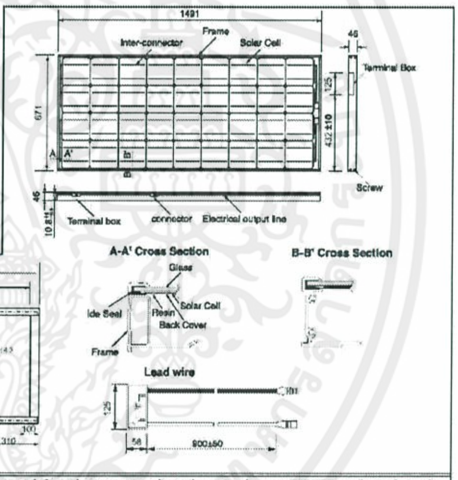
Open Circuit Voltage, Short Circuit Current vs. Irradiance Characteristics (Cell temperature: 25°C)

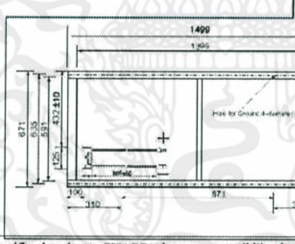


Normalized Isc, Voc, Pm vs. Module Temperature Characteristics



OUTLINE DIMENSIONS





In the absence of confirmation by specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP products shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest specification sheets before using any SHARP products.

• Specifications are subject to change without notice.

APPLICATIONS

- Grid connected residential systems
- Office buildings
- Solar power stations
- Solar villages
- Villas, mountain cottages
- Pumps
- Lighting equipment
- Traffic signs
- Radio relay stations
- Beacons
- Telemeter systems
- Telecommunication systems (Terminal)

SHARP

SHARP THAI CO.,LTD.
952 RAMALAND BUILDING.12th FLOOR, RAMA IV ROAD. SURIYAWONG, BANGRAK. BANGKOK 10500
TEL. 0 2638 3970-72 FAX. 0 2638 3777 www.sharpthai.co.th
e-mail : [JP] awazu.k@stcl.sharp-world.com [TH] [EN] koapong.s@stcl.sharp-world.com, burin.c@stcl.sharp-world.com

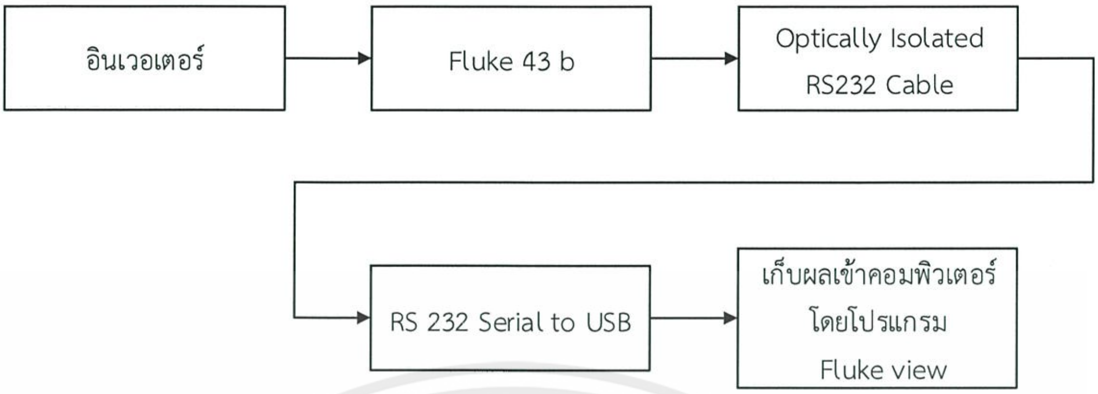
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

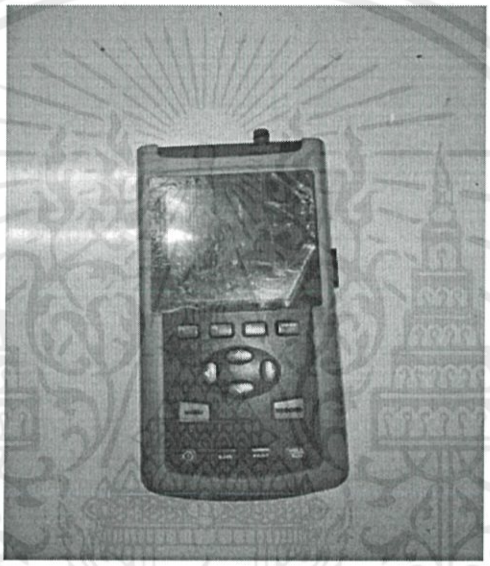
ภาคผนวก ค

อุปกรณ์วัด

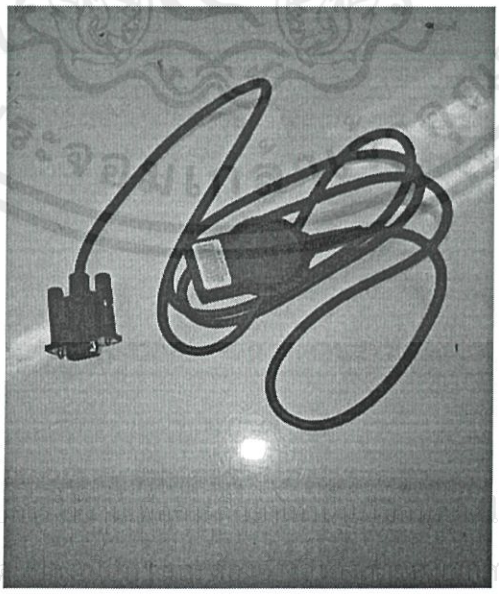
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์วัด



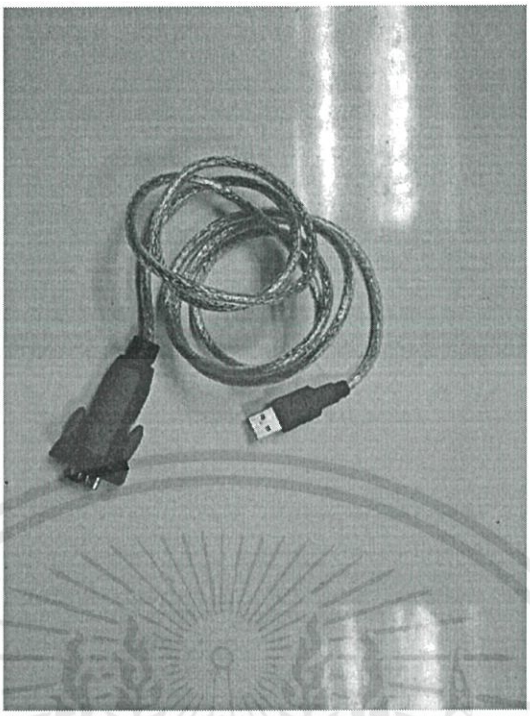


รูปที่ ค-1 Fluke 43B

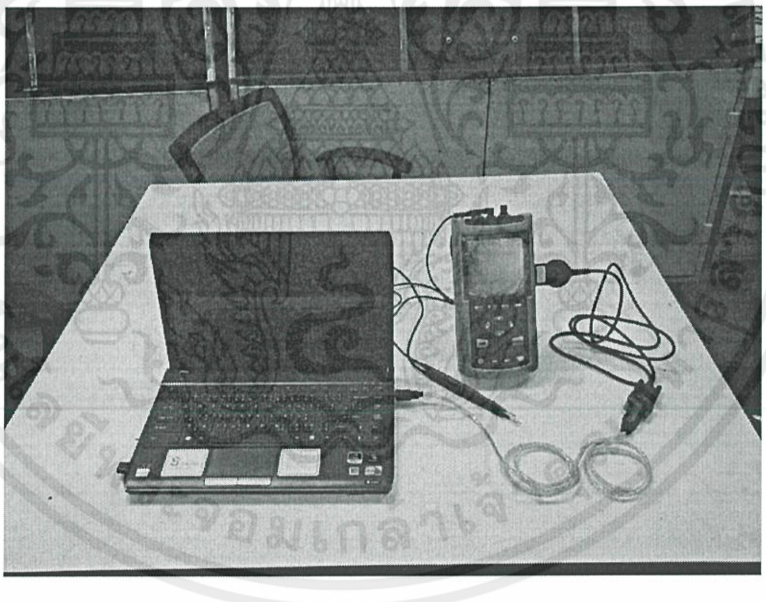


รูปที่ ค-2 Optically Isolated RS232 Cable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดั ... ารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

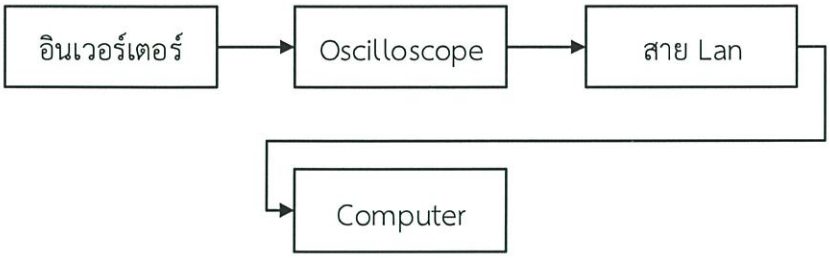


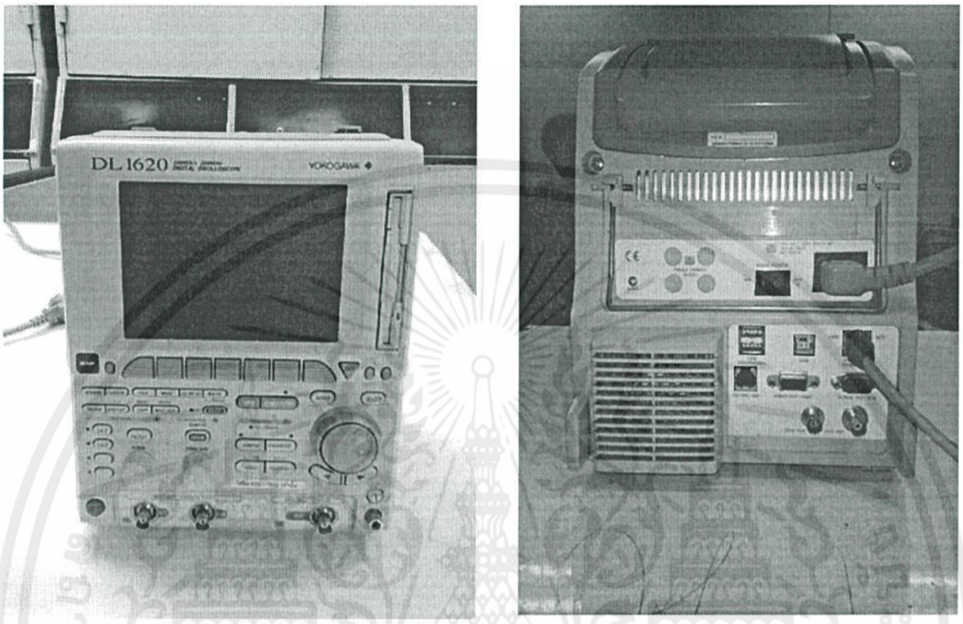
รูปที่ ค-3 RS 232 Serial to USB



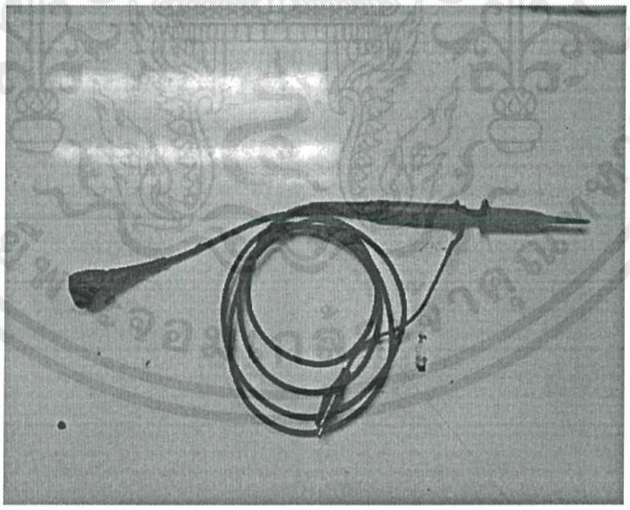
รูปที่ ค-4 เก็บผลเข้าคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม Fluke view

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



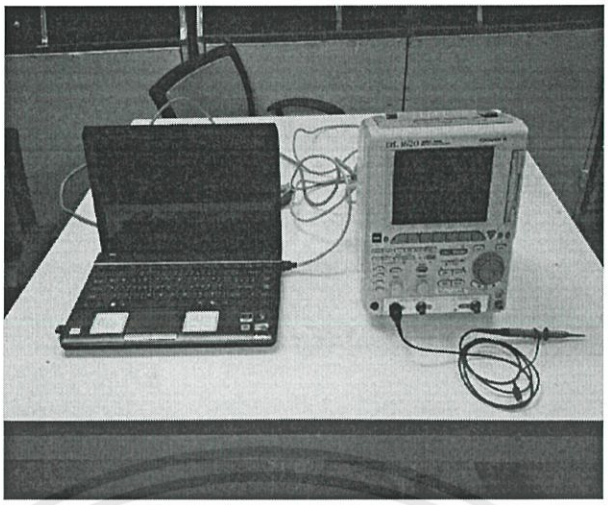


รูปที่ ค-5 Oscilloscope



รูปที่ ค-6 สายวัด (Probe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-7 Oscilloscope เชื่อมต่อกับ Computer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน EN 55022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BRITISH STANDARD EN 55022

Information technology equipment

Radio disturbance characteristics

Limits and methods of measurement

1. Introduction

The scope is extended to the whole radio-frequency range from 9 kHz to 400 GHz, but limits are formulated only in restricted frequency bands, which is considered sufficient to reach adequate emission levels to protect radio broadcast and telecommunication services, and to allow other apparatus to operate as intended at reasonable distance.

2. Scope and object

Procedures are given for the measurement of the levels of spurious signals generated by the ITE and limits are specified for the frequency range 9 kHz to 400 GHz for both class A and class B equipment. No measurements need be performed at frequencies where no limits are specified. The intention of this publication is to establish uniform requirements for the radio disturbance level of the equipment contained in the scope, to fix limits of disturbance, to describe methods of measurement and to standardize operating conditions and interpretation of results

3. Definitions

For the purposes of this document the following definitions apply;

3.1 information technology equipment (ITE)

Any equipment

a) which has a primary function of either (or a combination of) entry, storage, display, retrieval, transmission , processing, switching , or control ,of data and of telecommunication messages and which may be equipped with one or more terminal ports typically operated for information transfer;

b) With a rated supply voltage not exceeding 600 V.

It includes, for example, data processing equipment, office machines, and electronic business equipment for telecommunication equipment.

Any equipment (or part of the ITE equipment) which has a primary function of radio transmission and/or reception according to the ITU Radio Regulations are excluded from the scope of this publication.

Equipment, for which all disturbance requirement in the frequency range aer explicitly formulated in other IEC or CISPR publications, are excluded from the scope of this publication.

เอกสารนี้เป็น...เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.2 equipment under test (EUT)

Representative ITE or functionally interactive group of ITE (system) which includes one or more host unit(s) and is used for evaluation purposes

4. Classification of ITE

ITE is subdivided into two categories denoted class A ITE and class B ITE.

Class B ITE range are explicitly formulated in other IEC or CISPR publications, are excluded from the scope of this publication.

Class B ITE is a category of apparatus which satisfies the class B ITE disturbance limits. Class B ITE is intended primarily for use in the domestic environment and may include:

- Equipment with no fixed place of use; for example, portable equipment powered by built-in batteries;
- Telecommunication terminal equipment powered by a telecommunication network;
- Personal computers and auxiliary connected equipment.

NOTE: The domestic environment is an environment where the use of broadcast radio and television receivers may be expected within a distance of 10 m of the apparatus concerned.

Class A ITE

Class A ITE is a category of all other ITE which satisfies the class A ITE limits but not the class B ITE limits. Such equipment should not be restricted in its sale but the following warning shall be included in the instructions for use

5. Limits for conducted disturbance at mains terminals and telecommunication ports

The equipment under test (EUT) shall meet the limits in Table 1 and Table 3 or Table 2 and Table 4, as applicable, including the average limit and the quasi-peak limit when using, respectively, an average detector receiver and quasi-peak detector receiver and measured in accordance with the methods described in Clause **9**. Either the voltage limits or the current limits in Table 3 or Table 4, as applicable, shall be met except for the measurement method of **C.1.3** where both limits shall be met. If the average limit is met when using a quasi-peak detector receiver, the EUT shall be deemed to meet both limits and measurement with the average detector receiver is unnecessary. If the reading of the measuring receiver shows fluctuations close to the limit, the reading shall be observed for at least 15 s at each measurement frequency; the higher reading shall be recorded with the exception of any brief isolated high reading which shall be ignored.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 Limits of mains terminal disturbance voltage

Table 1 - Limits for conducted disturbance at the mains ports of class A ITE

Frequency range (MHz)	Limits dB(μV)	
	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,50	79	66
0,50 to 30	73	60
NOTE: The lower limit shall apply at the transition frequency.		

Table 2 - Limits for conducted disturbance at the mains ports of class B ITE

Frequency range (MHz)	Limits dB(μV)	
	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,50	66 to 56	56 to 46
0,50 to 5	56	46
5 to 30	60	50
NOTE 1: The lower limit shall apply at the transition frequencies. NOTE 2: The limit decreases linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,50 MHz.		

4.2 Limits of conducted common mode (asymmetric mode) disturbance at telecommunication ports1)

Table 3 - Limits of conducted common mode (asymmetric mode) disturbance at Telecommunication ports in the frequency range 0,15 MHz to 30 MHz for class A equipment

Frequency range (MHz)	Voltage limits dB(μV)		Current limits dB(μA)	
	Quasi-peak	Average	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,5	97 to 87	84 to 74	53 to 43	40 to 30
0,5 to 30	87	74	43	30
NOTE 1 The limits decrease linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,5 MHz. NOTE 2 The current and voltage disturbance limits are derived for use with an impedance stabilization network (ISN) which presents a common mode (asymmetric mode) impedance of 150 7 to the telecommunication port under test (conversion factor is 20 log10 150 / l = 44 dB)				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 - Limits of conducted common mode (asymmetric mode) disturbance at Telecommunication ports in the frequency range 0,15 MHz to 30 MHz for class B equipment

Frequency range (MHz)	Voltage limits dB(μV)		Current limits dB(μA)	
	Quasi-peak	Average	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,5	84 to 74	74 to 64	40 to 30	30 to 20
0,5 to 30	74	64	30	20

NOTE 1 The limits decrease linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,5 MHz.
NOTE 2 The current and voltage disturbance limits are derived for use with an impedance stabilization network (ISN) which presents a common mode (asymmetric mode) impedance of 150 7 to the telecommunication port under test (conversion factor is 20 log10 150/l = 44 dB).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์

เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขอบเขต

ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีขอบเขตดังนี้

1.1 เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัดและวิธีการตรวจสอบฮารมอนิกส์ (Harmonics) สำหรับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

1.2 เพื่อกำหนดมาตรการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮารมอนิกส์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

1.3 ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไมเป็น เชิงเสน (Non-Linear Load) ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับระบบไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ ชนิดเฟสเดียวและสามเฟส

2. วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับไดของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮารมอ-นิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

3. มาตรฐานอ้างอิง

- Engineering Recommendation G.5/3

  September 1976 The Electricity Council Chief Engineer' Conference

  "Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System"

- The State Energy Commission of Western Australia (SECWA)

  Part 2 : Technical Requirement

- IEC 1000 Electromagnetic Compatibility (EMC)

  Part 4 : Testing and Measurement Techniques

  Section 7 : General Guide for Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected thereto

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นิยาม

4.1 ฮารมอนิก (Harmonic) - สวนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเทาของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ตัวอย่างเช่น สวนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เทาของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า ฮาร-มอนิกที่ 2 (Second Harmonic)

4.2 ความเพี้ยนฮารมอนิก (Harmonic Distortion) – การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮารมอนิกอื่นๆเข้าด้วยกัน

4.3 สวนประกอบฮารมอนิก (Harmonic Component) - สวนประกอบของอันดับฮารมอนิก ที่มากกว่าหนึ่ง ของปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งแสดงในรูปของอันดับ (Order) และค่า RMS ของอันดับนั้น

4.4 ปริมาณรวมฮารมอนิก (Harmonic Content) - ปริมาณที่ไดจากการหักค่า DC และส่วนประกอบความถี่หลักมูลจากปริมาณเป็นคาบที่ไมอยู่ในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave)

4.5 ค่าความเพี้ยนฮารมอนิกเฉพาะ (Individual Harmonic Distortion ,IHD) หรือ อัตราส่วนฮารมอนิก (Harmonic Ratio) - อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮารมอนิก (Harmonic Component) ตอคา RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

4.6 ค่าความเพี้ยนฮารมอนิกรวม (Total Harmonic Distortion ,THD) – คืออัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮารมอนิก (Harmonic Component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการ (1) และ (2)

$$THD\ (Voltage) \quad = \quad \frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+\dots\dots\dots}}{V_1} \tag{1}$$

$$THD\ (Current) \quad = \quad \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+\dots\dots\dots}}{I_1} \tag{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag or Voltage Dip) – แรงดันลดลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ครึ่งไซเกิลจนถึงไมกี่วินาที โดยเกิดเนื่องจากการเดินเครื่องของมอเตอรหรือโหลดขนาดใหญ่ หรือเกิดความผิดพรอง (Fault) ในระบบไฟฟ้า

4.8 จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling , PCC) - ตำแหน่งในระบบของการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่สุด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นอาจต่อร่วมได้

4.9 เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable Tool) - อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถยกหรือจับถือไดในช่วงเวลาการทำงานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น (2-3 นาที)

4.10 อุปกรณ์สามเฟสสมดุล (Balanced Three-Phase Equipment) - อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสในสายเส้นไฟ (Line) ของแต่ละเฟสต่างกันไม่เกินร้อยละ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ขีดจำกัดกระแสและแรงดันฮารมอนิกส์

ตารางที่ 5-1 ขีดจำกัดกระแสฮารมอนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่ขุดต่อร่วม*

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22 , 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (คาที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับไดไมเกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 5-2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮารมอนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11 , 12 , 22 and 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

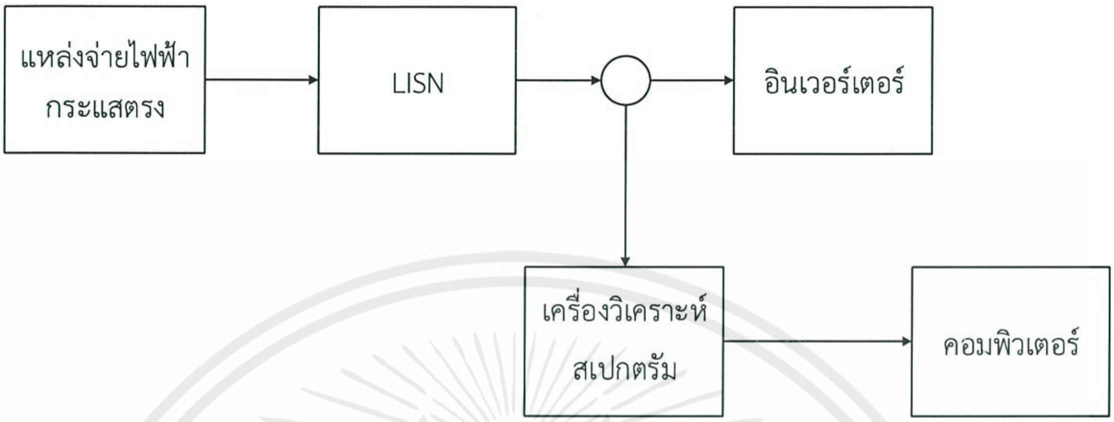
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

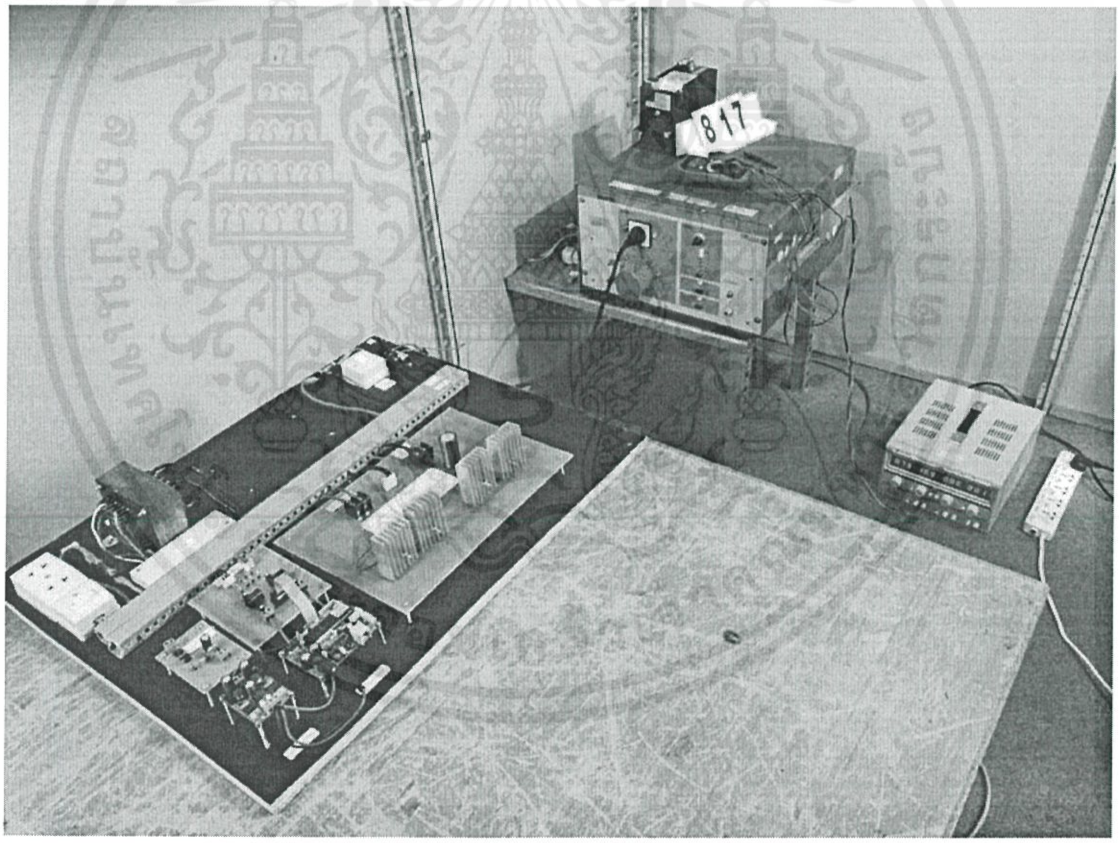
ภาคผนวก ฉ

ผลการทดสอบจาก PTEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำโดยไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและไม่มีภาระทางไฟฟ้า





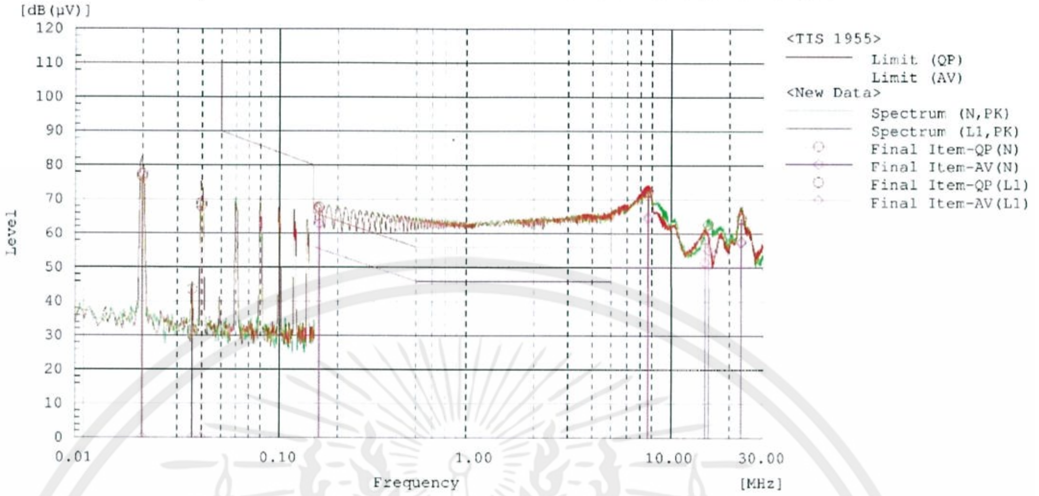
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PTEC
EMC Testing

<<Conducted Emission>>

13 ??????,2557 19:24

EUT No.	: DC_9K_NO		Standerd	:
EUT Name	:		Mode	:
Model	:		Test System	: TRM-001/ESMI
Serial No.	:		Operator	:
AC power	: 220V,50Hz		Environment	: Temp. 25 Hum.60%



Final Result

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.01991	66.4		10.3	76.7		110.0	0.0	33.3		
2	0.03563	33.3		10.3	43.6		110.0	0.0	66.4		
3	0.0397	58.6		10.3	68.9		110.0	0.0	41.1		
4	0.15951	57.5	52.7	10.2	67.7	62.9	65.5	55.5	-2.2	-7.4	
5	7.6744	61.8	54.5	10.5	72.3	65.0	60.0	50.0	12.3	15.0	
6	15.588	52.0	44.4	10.7	62.7	55.1	60.0	50.0	2.7	5.1	
7	23.1898	53.7	46.9	10.8	64.5	57.7	60.0	50.0	-4.5	-7.7	

--- L1 Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.01993	67.1		10.3	77.4		110.0	0.0	32.6		
2	0.03563	33.3		10.3	43.6		110.0	0.0	66.4		
3	0.03967	57.8		10.3	68.1		110.0	0.0	41.9		
4	0.16009	57.3	52.6	10.2	67.5	62.8	65.5	55.5	-2.0	-7.3	
5	7.656	61.7	53.9	10.5	72.2	64.4	60.0	50.0	12.2	14.4	
6	15.0048	47.7	40.8	10.8	58.5	51.6	60.0	50.0	1.5	1.6	
7	23.1296	53.2	46.4	11.0	64.2	57.4	60.0	50.0	-4.2	-7.4	

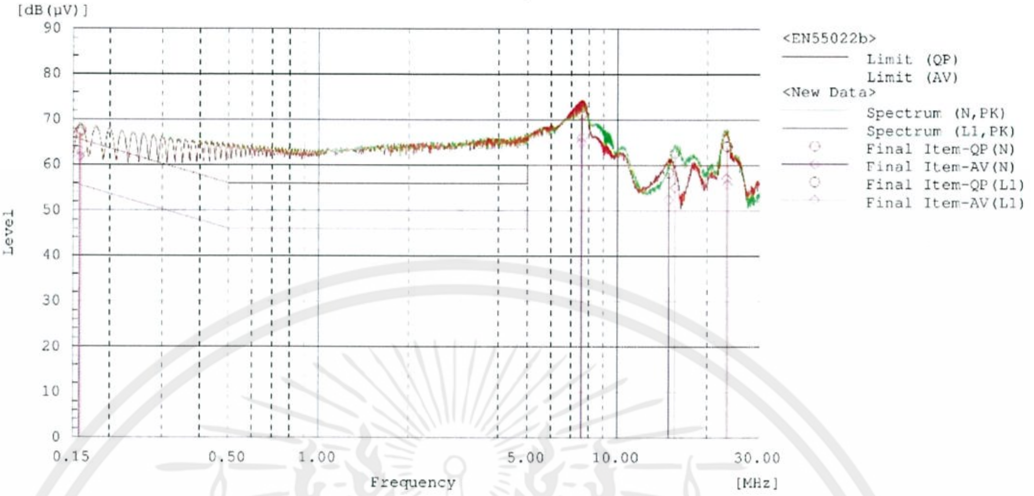
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PTEC
EMC Testing

<<Conducted Emission>>

13 ??????,2557 19:45

EUT No.	:	Standerd	: EN 55022/87 (ITE) Class B
EUT Name	: DC_150K_NO	Mode	:
Model	:	Environment	: Temp.23, Hum.47%
Serial No.	:	Test System	: TRM-001/ESMI
AC Power	:	Operator	:



Final Result

--- N Phase ---

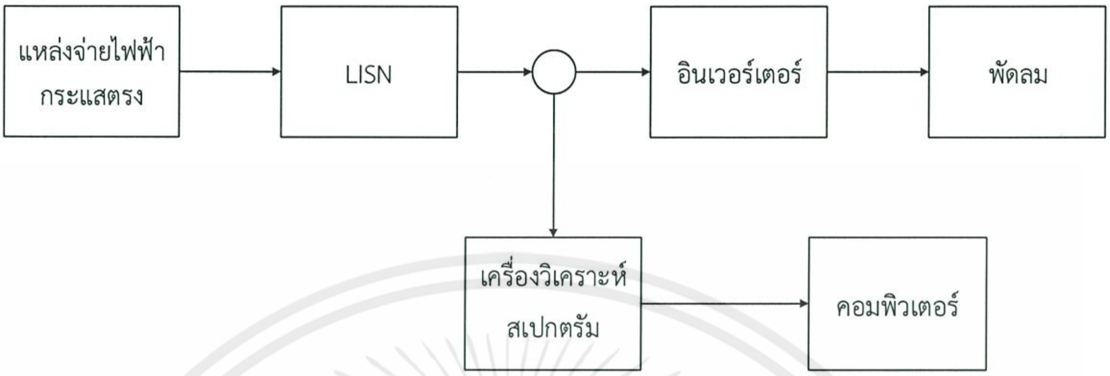
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.15769	56.9	51.6	10.2	67.1	61.8	65.6	55.6	-1.5	-6.2	
2	7.5712	60.7	54.5	10.5	71.2	65.0	60.0	50.0	-11.2	-15.0	
3	15.6068	52.0	44.4	10.7	62.7	55.1	60.0	50.0	-2.7	-5.1	
4	23.2712	53.4	46.3	10.8	64.2	57.1	60.0	50.0	-4.2	-7.1	

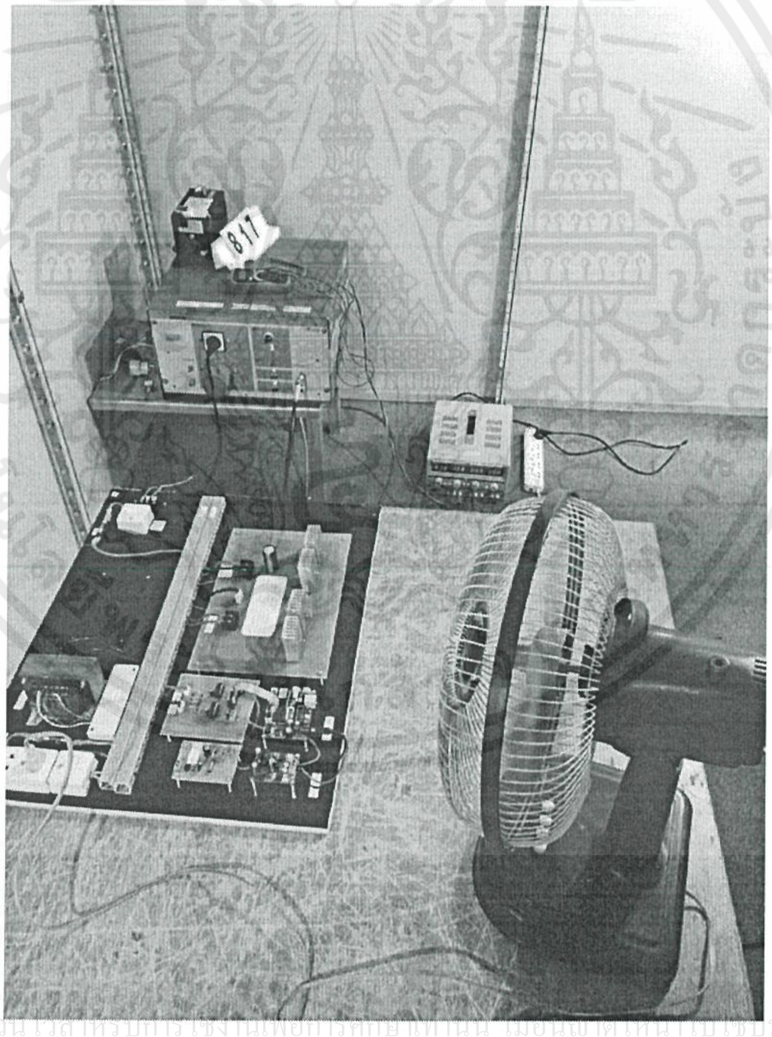
--- L1 Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.15968	57.3	52.7	10.2	67.5	62.9	65.5	55.5	-2.0	-7.4	
2	7.6131	62.3	55.6	10.5	72.8	66.1	60.0	50.0	-12.8	-16.1	
3	14.8442	47.6	41.6	10.8	58.4	52.4	60.0	50.0	1.6	2.4	
4	23.456	53.1	44.7	11.0	64.1	55.7	60.0	50.0	-4.1	-5.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำโดยไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า





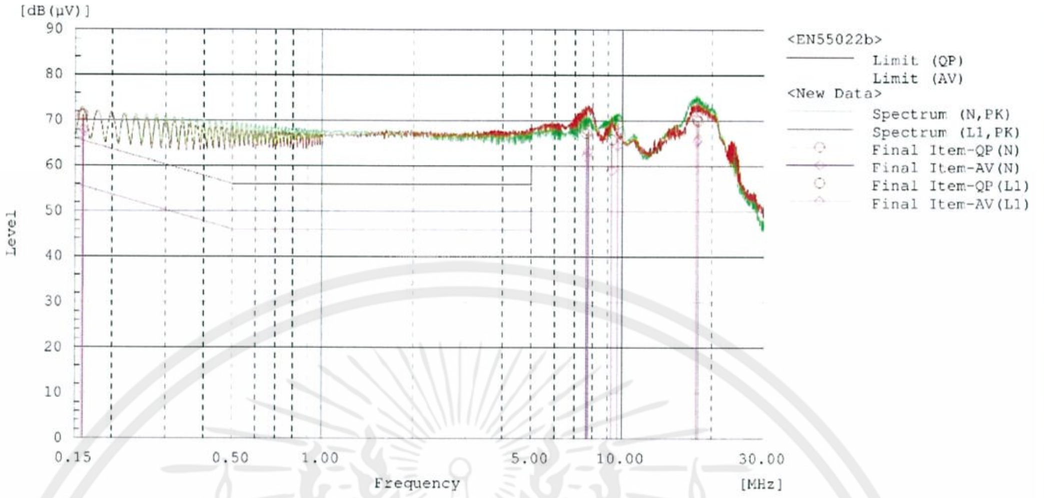
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PTEC
EMC Testing

<<Conducted Emission>>

13 ??????,2557 19:58

EUT No.	:	Standerd	: EN 55022/87 (ITE) Class B
EUT Name	: DC_150K_FAN	Mode	:
Model	:	Environment	: Temp.23, Hum.47%
Serial No.	:	Test System	: TRM-001/ESMI
AC Power	:	Operator	:



Final Result

--- N Phase ---

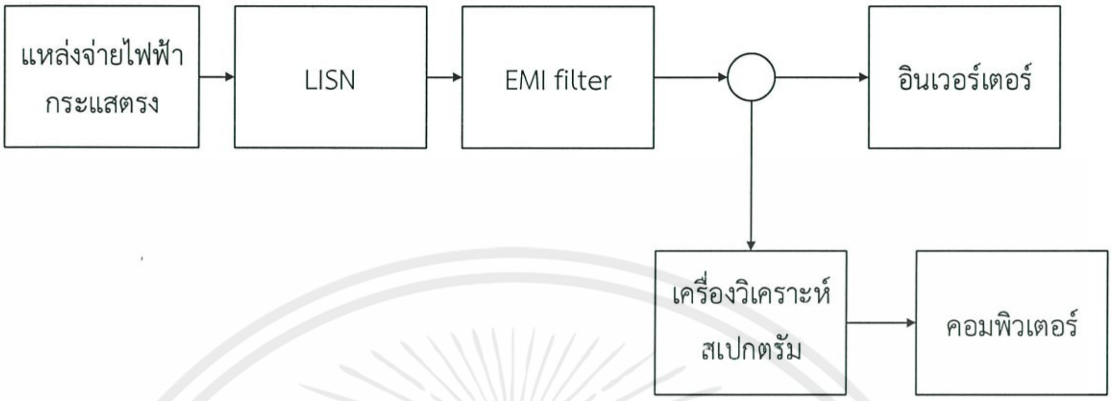
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.15823	60.8	56.7	10.2	71.0	66.9	65.6	55.6	-5.4	-11.3	
2	7.6319	56.7	51.6	10.5	67.2	62.1	60.0	50.0	-7.2	-12.1	
3	9.6551	58.8	53.9	10.6	69.4	64.5	60.0	50.0	-9.4	-14.5	
4	17.7732	59.5	54.7	10.8	70.3	65.5	60.0	50.0	-10.3	-15.5	

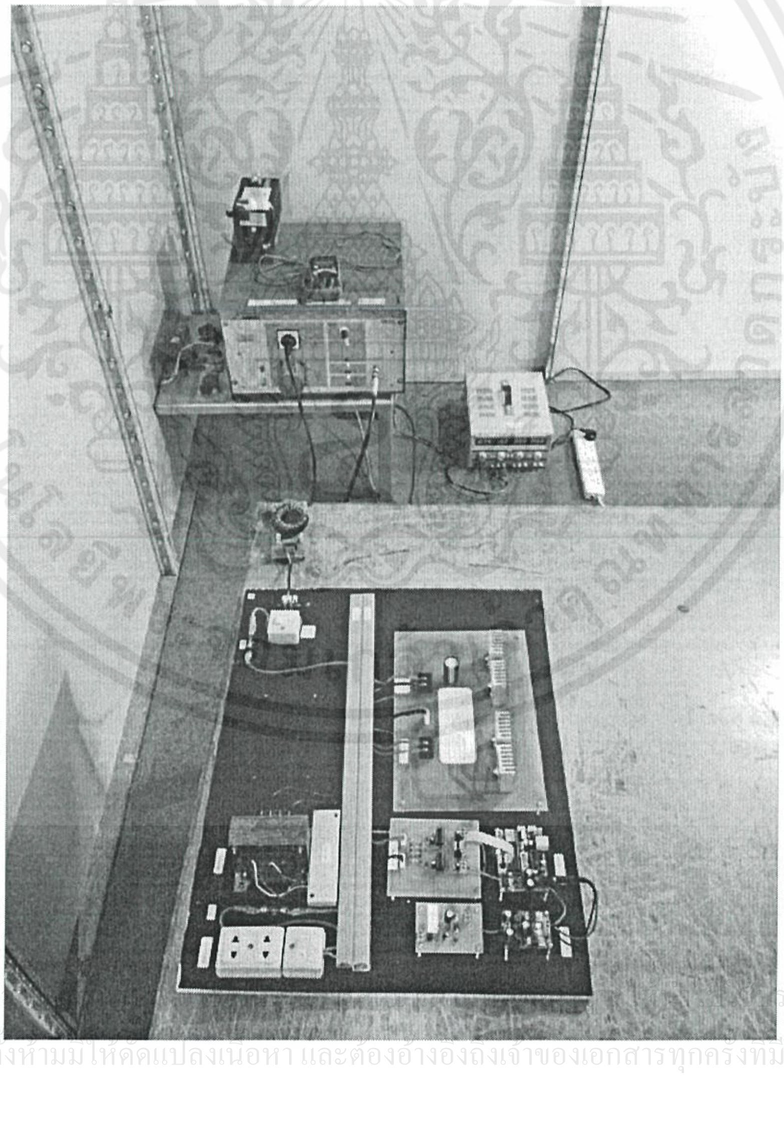
--- L1 Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.15994	61.0	57.7	10.2	71.2	67.9	65.5	55.5	-5.7	-12.4	
2	7.7328	57.3	52.7	10.5	67.8	63.2	60.0	50.0	-7.8	-13.2	
3	9.234	55.3	48.5	10.5	65.8	59.0	60.0	50.0	-5.8	9.0	
4	17.9704	58.9	54.9	11.0	69.9	65.9	60.0	50.0	-9.9	-15.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำโดยมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและไม่มีภาระทางไฟฟ้า





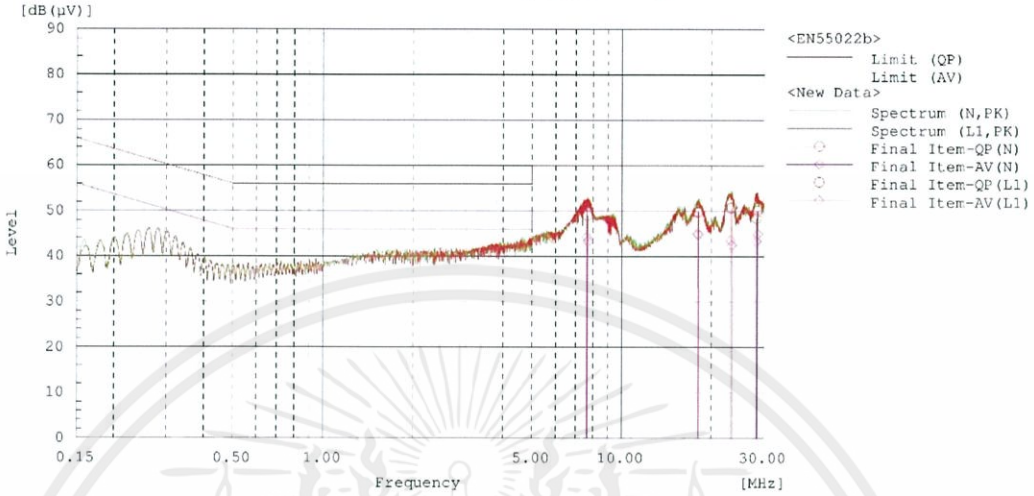
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง ... ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PTEC
EMC Testing

<<Conducted Emission>>

14 ??????,2557 20:09

EUT No.	:		Standerd	: EN 55022/87 (ITE) Class B
EUT Name	: DC-FILTER_NOLOAD		Mode	:
Model	:		Environment	: Temp.23, Hum.47%
Serial No.	:		Test System	: TRM-001/ESMI
AC Power	:		Operator	:



Final Result

N Phase

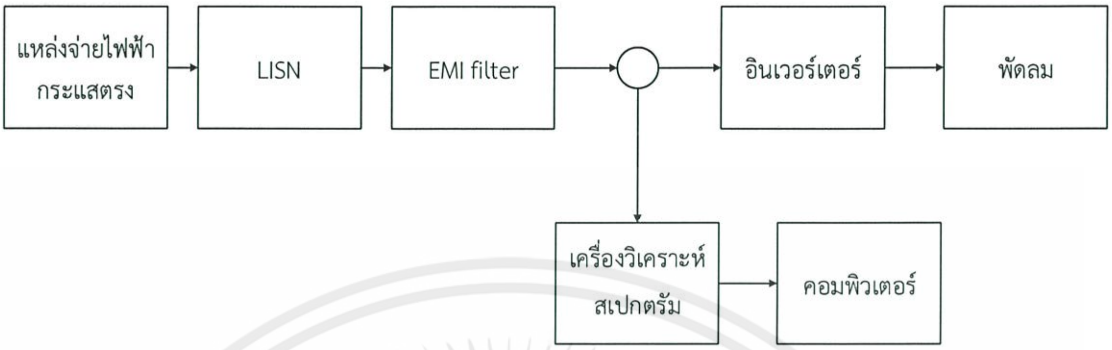
No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	7.6912	38.6	32.8	10.5	49.1	43.3	60.0	50.0	10.9	6.7	
2	18.0906	39.0	34.0	10.8	49.8	44.8	60.0	50.0	10.2	5.2	
3	23.2496	39.9	32.7	10.8	50.7	43.5	60.0	50.0	9.3	6.5	
4	28.3716	37.9	32.7	10.6	48.5	43.3	60.0	50.0	11.5	6.7	

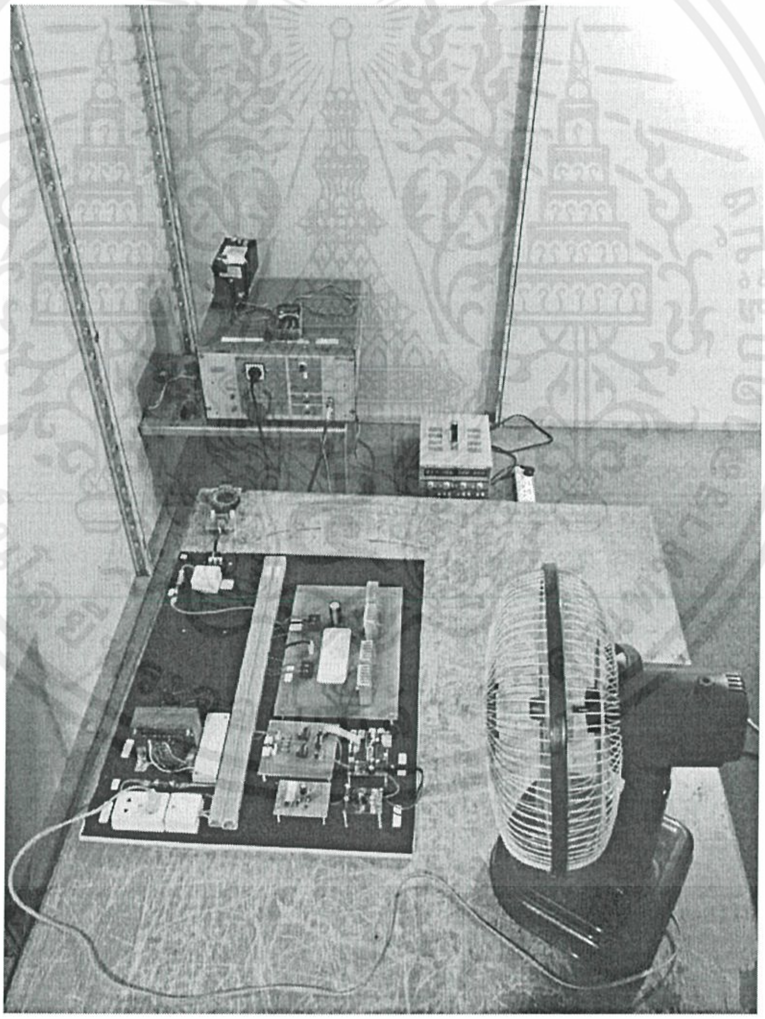
L1 Phase

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	7.6339	40.5	33.8	10.5	51.0	44.3	60.0	50.0	9.0	5.7	
2	18.0318	38.8	34.0	11.0	49.8	45.0	60.0	50.0	10.2	5.0	
3	23.4364	39.8	31.5	11.0	50.8	42.5	60.0	50.0	9.2	7.5	
4	28.6098	39.0	33.8	11.1	50.1	44.9	60.0	50.0	9.9	5.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำโดยมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า





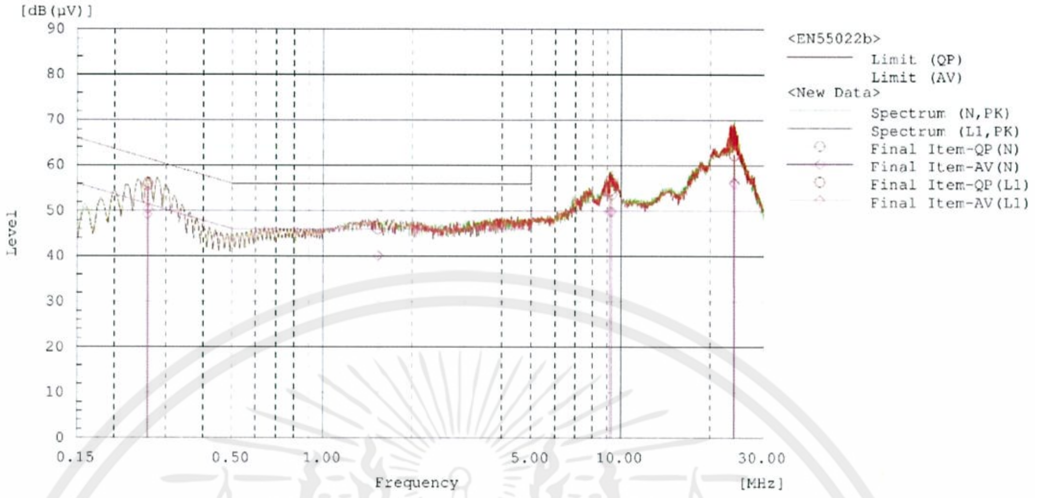
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PTEC
EMC Testing

<<Conducted Emission>>

14 ??????,2557 20:20

EUT No.	:		Standerd	: EN 55022/87 (ITE) Class B
EUT Name	: DC-FILTER_FAN		Mode	:
Model	:		Environment	: Temp.23, Hum.47%
Serial No.	:		Test System	: TRM-001/ESMI
AC Power	:		Operator	:



Final Result

N Phase

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.25975	45.9	40.2	10.2	56.1	50.4	61.4	51.4	5.3	1.0	
2	9.2946	43.1	39.3	10.5	53.6	49.8	60.0	50.0	6.4	0.2	
3	24.0004	51.8	45.5	10.7	62.5	56.2	60.0	50.0	-2.5	-6.2	

L1 Phase

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(μV)]	Reading CAV [dB(μV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(μV)]	Result CAV [dB(μV)]	Limit QP [dB(μV)]	Limit AV [dB(μV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]	Remark
1	0.25805	45.3	39.0	10.2	55.5	49.2	61.5	51.5	6.0	2.3	
2	1.52336	35.7	29.8	10.3	46.0	40.1	56.0	46.0	10.0	5.9	
3	9.1365	43.9	39.4	10.5	54.4	49.9	60.0	50.0	5.6	0.1	
4	24.0408	51.1	44.9	11.0	62.1	55.9	60.0	50.0	2.1	5.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

บทความวิชาการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

Study and Analysis on Conducted Noise Emitted from Photovoltaic Connected Single-Phase Full Bridge Inverter

นายเกียรติพล พรมประราบ นายคลัง คอแก้ว นายจักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์ นายจักรพันธ์ ตั้งคติธรรม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 8099

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอผลการศึกษาสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่เกิดจากการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานด้วยอุปกรณ์สวิตชิ่งความถี่สูงร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ศึกษาเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ 1 เฟส โดยใช้สัญญาณควบคุมแบบ SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) การใช้งานอุปกรณ์สวิตชิ่งมักก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในระดับที่สูงมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงทำการลดทอนด้วยตัวกรองสัญญาณความถี่สูง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ระบบ

คำสำคัญ: สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า, สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม, สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง, เซลล์แสงอาทิตย์, อินเวอร์เตอร์

Abstract

This project studies on conducted noise emissions generated by a solar inverter generally functioning using high-frequency switching devices. The inverter in this study is a single-phase full bridge inverter, which is controlled by SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), and used to supply electrical household appliances. The use of switching devices usually produces conducted noise higher than the standard level. Hence, it will be solved by using EMI filter; which will this can reduce high frequency noise and prevent damage occurred in the system.

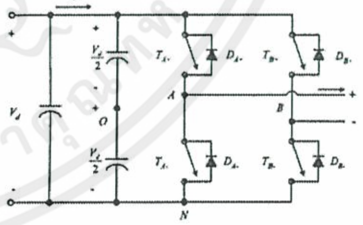
Keywords: Electromagnetic interference, Common-mode noise, Differential-mode noise, Solar Cell, inverter

1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์นั้น นิยมใช้กันมากและเป็นที่แพร่หลาย โดยเซลล์แสงอาทิตย์ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้นใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานโดยใช้การสวิตช์ของอุปกรณ์ โดยการสวิตชิ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสัญญาณดังกล่าวอาจมีค่าเกินมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณในสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อวิเคราะห์สัญญาณรบกวนและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน เพื่อเป็นแนวทางในการลดทอนสัญญาณรบกวนในสายตัวนำของระบบที่อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดฟูลบริดจ์แบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดฟูลบริดจ์แบบยูนิโพลาร์ [1]

การควบคุมสวิตช์ในกิ่ง A ควบคุมจากสัญญาณไซน์ 0 องศา เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และสวิตช์ในกิ่ง B ควบคุมจากสัญญาณไซน์ 180 องศา เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันและ การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงจะมีผลต่อกระแสที่จ่ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

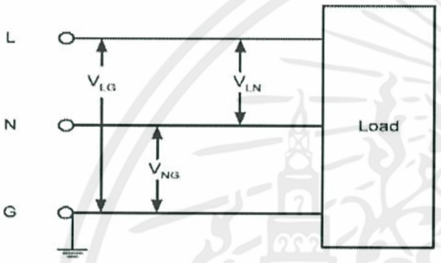
2.3 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ

วงจรไฟฟ้า 1 เฟสสามารถวัดและคำนวณค่าแรงดันโหมดผลร่วม (Common mode voltage : V_{cm}) และโหมดผลต่าง (Differential mode voltage : V_{dm}) ได้ดังนี้

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

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

โดย V_{LG}: แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับกราวด์
V_{NG}: แรงดันไฟฟ้าระหว่างนิวทรัลกับกราวด์
V_{LN}: แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวทรัล

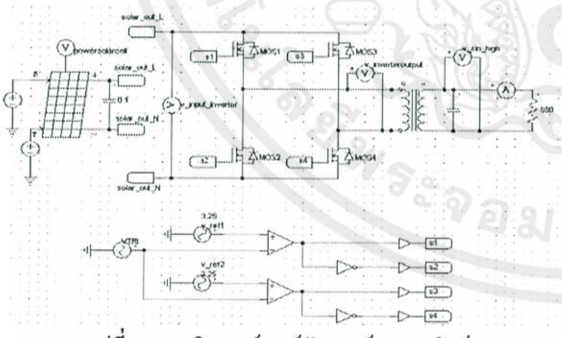


รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้า 1 เฟส [1]

3. การออกแบบ

3.1 การจำลองวงจรของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์

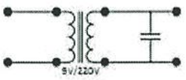
จำลองโดยใช้โปรแกรม Psim โดยความถี่สวิตชิ่งที่ 20 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) วงจรที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่3



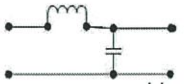
รูปที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีความเหนี่ยวนำอยู่ภายในซึ่งจะสามารถใช้ประโยชน์จากส่วนนี้ในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยต่อตัวเก็บประจุขนานหลังหม้อแปลง ดังรูปที่ 4



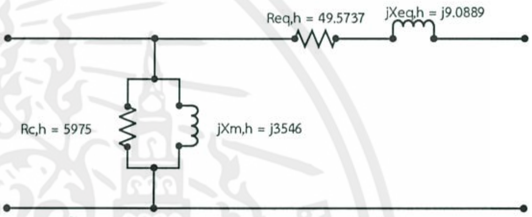
(ก) หม้อแปลง



(ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 4 การประยุกต์หม้อแปลงเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

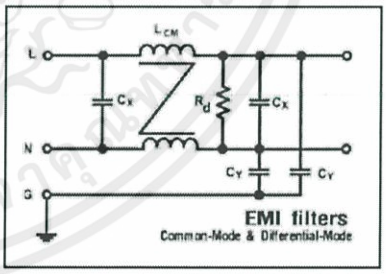
โดยรูปที่ 5 แสดงวงจรสมมูลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรโดย แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 9 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 220 โวลต์ และค่าตัวเก็บประจุที่ใช้มีค่า 1.47 ไมโครฟารัด จึงได้ความถี่ตัด (f_c) เป็น 770 เฮิรตซ์



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโครงงาน

3.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

วงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (EMI filter) นั้นมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 6 C_X, C_Y มีค่าเท่ากับ 2.2 ไมโครฟารัด และ 48 นาโนฟารัด ค่าความเหนี่ยวนำ 3.1 มิลลิเฮนรี่

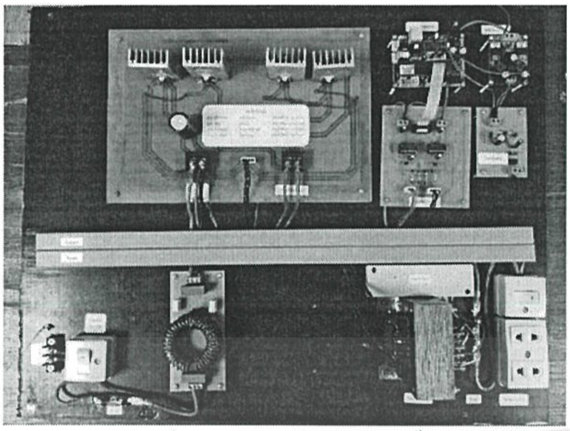


รูปที่ 6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

3.4 วงจรจริง

รูปที่ 7 เป็นวงจริงที่สร้างขึ้นจากการออกแบบโดยด้านเข้าของวงจรใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้มอสเฟตในการสวิตช์ ใช้ IR2110 ขับมอสเฟต ความถี่สวิตชิ่งที่ใช้ 20 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) แรงดันไฟฟ้าด้านออก 220 โวลต์ และนำวงจรนี้ไปใช้ทดสอบสัญญาณรบกวน

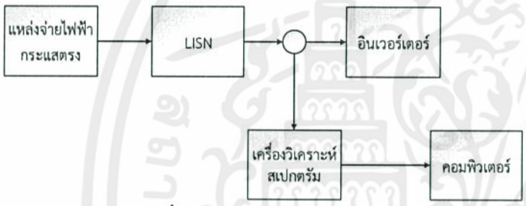
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



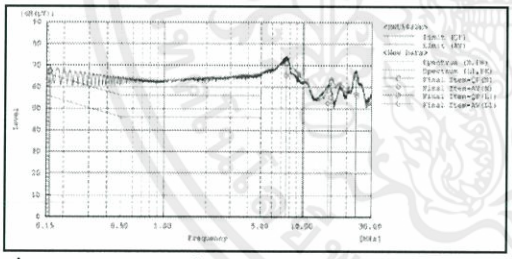
รูปที่ 7 แสดงรูปวงจรจริงที่สร้างขึ้น

4. ผลการทดลอง

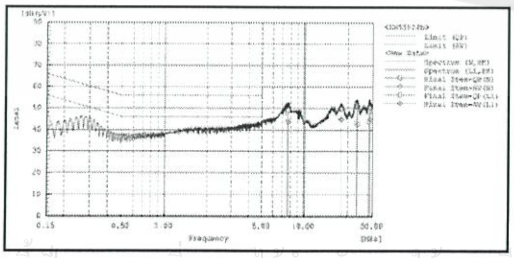
เนื่องจากไม่สามารถทดสอบชิ้นงานโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ได้จึงต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทนซึ่งการวัดแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การวัดสัญญาณรบกวน



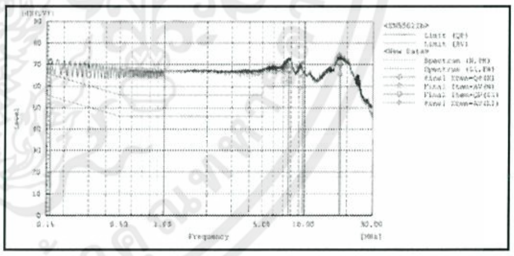
รูปที่ 9 สัญญาณรบกวนเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า



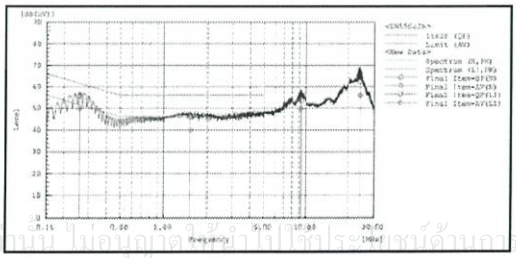
รูปที่ 10 สัญญาณรบกวนเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้า

จากกราฟมีเส้นมาตรฐานสองเส้น เส้นสีแดงคือเส้นพิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟผลการทดสอบมี กราฟสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า (รูป 9) และกรณีที่มีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า (รูปที่ 11) พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัลโดยมีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงความถี่30MHz เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า (รูป 10) พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล โดยเมื่อสังเกตค่าMargin QP [dB] พบว่ามีค่าเป็นบวกทั้งหมด จึงถือได้ว่าการแพร่กระจายไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด และเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานหลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีที่มีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า (รูปที่ 12) พบว่า Margin QP [dB] ช่วงความถี่ประมาณ 25 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) มีค่าเป็นลบ แต่ในช่วงอื่นพบว่า Margin QP [dB] มีค่าเป็นบวก เพราะฉะนั้นมีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้แค่ในช่วงความถี่ประมาณ 25 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz)



รูปที่ 11 สัญญาณรบกวนเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 12 สัญญาณรบกวนเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูงในกรณีมีพัดลมเป็นภาระทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บทสรุป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำซึ่งไม่มีการใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนค่าสัญญาณรบกวนมีค่ามากเกินมาตรฐาน ซึ่งหลังจากใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนลงให้อยู่ในมาตรฐานได้ และเมื่อมีการใช้ภาระทางไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1]. วีระเชษฐ์ ขันเงิน, Power Electronics, พิมพ์ครั้งที่ 9.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.2553

[2]. วลัยลักษณ์ พนัสเพ็ญเจริญ, “Electrical Power Quality Improvement in Single Phase AC Motor Drive,”ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

ประวัติผู้เขียนบทความ

นายเกียรติพล พรมประราบ
เกิดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 79 ม.7 ต.บ้านดุง อ.บ้านดุง
จ.อุดรธานี 41190
โทรศัพท์ 0801607927
Email : fam.smiling-vip@hotmail.com

นาย คลัง คอแก้ว
เกิดวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 45 ม. 5 ต.สวนขัน อ.ช้างกลาง
จ.นครศรีธรรมราช 80250
โทรศัพท์ 088-0999324
Email : klang_ngean@hotmail.com

นาย จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์
เกิดวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 102/2 ม.2 ต.ธงชัย อ.เมือง
จ.เพชรบุรี 76000
โทรศัพท์ 0870600327 `
Email : J.Jukkrit@gmail.com

นาย จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม
เกิดวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 4/38 หมู่บ้านเอื้ออารีย์ ถ.ประชาตาคลี
ต.ตาคลี อ.ตาคลี จ.นครสวรรค์ 60140
โทรศัพท์ 090-9262675
Email : zengnarax21@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย เกียรติพล พรมประราบ เกิดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 79 ม.7 ต.บ้านดุง อ.บ้านดุง จ.อุดรธานี 41190
โทรศัพท์ 0801607927 Email : fam.smiling-vip@hotmail.com

นาย คลัง คอแก้ว เกิดวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 45 ม. 5 ต.สวนขัน อ.ช้างกลาง จ.นครศรีธรรมราช 80250
โทรศัพท์ 088-0999324 Email : klang_ngean@hotmail.com

นาย จักรกฤษณ์ จิรประเสริฐวงศ์ เกิดวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 102/2 ม.2 ต.ธงชัย อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000
โทรศัพท์ 0870600327 `Email : J.Jukkrit@gmail.com

นาย จักรพันธ์ ตั้งคติธรรม เกิดวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ 4/38 หมู่บ้านเอื้ออารีย์ ถ.ประชาตาคลี ต.ตาคลี อ.ตาคลี
จ.นครสวรรค์ 60140
โทรศัพท์ 090-9262675 Email : zengnarax21@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้