ประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

Performance and Electromagnetic Compatibility of a Photovoltaic Power Converter

โดย

ธนกฤช พิบูลย์

ธนพล ผลเลอน

ธนากร สุรพันธุ์

ธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์
Performance and Electromagnetic Compatibility
of a Photovoltaic Power Converter

โดย

ธนกฤช พิบูลย์

ธนพล ผึ้งเถื่อน

ธนาภา สาธุพันธุ์

ธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

Performance and Electromagnetic Compatibility of a Photovoltaic Power Converter

THANAKRICH PHIBUL
TANAPOL PONGTUON
THANAPA SATHUPAN
THANYA THANYAKITJANUKIT

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE BACHELOR IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

ปีการศึกษา 2556

ประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์
Performance and Electromagnetic Compatibility
of a Photovoltaic Power Converter

โดย

นายธนกฤช พิบูลย์

นายธนพล ผึ้งเถื่อน

นางสาวธนาภา สาธุพันธุ์

นางสาวธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่องประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ

1. นายธนกฤช พิบูลย์
2. นายธนพล ผึ้งเถื่อน
3. นางสาวธนาภา สาธุพันธุ์
4. นางสาวธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

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

ประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

นายธนกฤช พิบูลย์

นายธนพล ผึ้งเถื่อน

นางสาวธนาภา สาธุพันธุ์

นางสาวธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาคอุตสาหากรรมหันมาใช้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น แต่ก็พบปัญหาด้านประสิทธิภาพการใช้งาน เราจึงต้องเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โครงงานนี้ศึกษาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์และคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์ โดยเปรียบเทียบผลกับมาตราฐาน EN 55011 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบวงจรแปลงผันกำลัง

Performance and Electromagnetic Compatibility of a Photovoltaic Power Converter

Mr. Thanakrich	Phibul
Mr. Tanapol	Pongtuon
Miss. Thanapa	Sathupan
Miss. Thanya	Thanyakitjanukit
Asst.Prof.Dr.Chaiyan	Jettanasen
Supervisor	

Abstract

Nowadays, the industry has increasingly used renewable energy from photovoltaic, but it usually has low efficiency. So, we have to employ DC–DC converter to improve the overall performance. However, when this converter operates, electromagnetic noises can be generated. Hence, this project focuses particularly on the performance of DC–DC converter connected to photovoltaic panel and characteristics of electromagnetic noise generated in Ćuk converter. The noise level must be conformed to EN 55011 standard, which shows electromagnetic compatibility (EMC) of DC–DC converter system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน อาจารย์ผู้ควบคุมดูแลปริญญานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางรวมทั้งปรับปรุงแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำโครงงานด้วยความเอาใจใส่เสมอมาและให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์ที่จำเป็นแก่คณะผู้วิจัย ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมทำวิจัยทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา เมื่อมีปัญหาช่วยกันคิดแก้ไขปัญหาร่วมกัน

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่คอยให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญรูป

หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

สารบัญรูป (ต่อ)

สารบัญตาราง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานทางไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มสูงมาก ซึ่งพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่ผลิตจากเชื้อเพลิง โดยไม่ช้าก็เร็วเชื้อเพลิงเหล่านี้ก็จะหมดไป ดังนั้นเราจึงต้องตระหนักถึงวิกฤตพลังงานนี้ หนึ่งในวิธีการการแก้ปัญหาอย่างยั่งยืน คือ พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล เป็นต้น โดยพลังงานที่ค่อนข้างเหมาะสมกับประเทศไทยและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ให้กับสิ่งแวดล้อม คือ พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะไม่ก่อให้เกิดเสียง ฝุ่น และกลิ่นในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม ส่วนสำคัญที่สุดของเกษตรกรรม คือ น้ำที่ใช้งาน ปัจจุบันเกษตรกรใช้มอเตอร์สูบน้ำแบบใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันดีเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจากที่กล่าวมาเชื้อเพลิงน้ำมันมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งยังสร้างมลภาวะให้กลับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำมาสูบน้ำใช้ในการเกษตรกรรมในพื้นที่ที่ห่างไกลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง สืบเนื่องมาจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) มักจะให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอกับการใช้งาน เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ อยู่ที่ประมาณ 10%เท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับวงจรแปลงผันกำลังซึ่งก็คือ ชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk Converter) โดยชุกคอนเวอร์เตอร์นี้จะช่วยแปลงระดับแรงดันไปจ่ายภาระไฟฟ้าตามที่ต้องการและยังช่วยกรองสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่งอีกด้วย เพราะในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้า นอกจากจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรด้วย โดยเฉพาะเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวกับอิเล็คทรอนิกส์กำลัง ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองผลิตสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูงเนื่องจากความถี่สวิทซิ่ง โดยเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณรบกวนที่วัดได้กับมาตรฐาน EN 55011 Class a

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากวงจรแปลงผันกำลังจากกระแสตรงเป็นกระแสตรงเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์
2. ศึกษาวิธีจำลองและตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ทำแบบจำลองและออกแบบ ชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk Converter) โดยคำนึงถึงการออกแบบวงจรให้มีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

ขอบเขตในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คือทำการศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพของวงจรและทำการออกแบบวงจรเพื่อให้มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อย

ที่สุดในวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนกับมาตรฐาน EN 55011 Class a

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ทำการศึกษาคุณลักษณะการเกิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์
2. ศึกษาวิธีการจำลองและการตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ทำการศึกษาและสร้างวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์
4. ทดสอบและเก็บค่าสัญญาณรบกวนที่ได้จากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55011 Class a

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	↔	↔							
2.จำลองการเกิดสัญญาณรบกวนของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์โดยโปรแกรม Psim		↔	↔	↔					
3. ศึกษาการออกแบบแผ่น PCB ของวงจรชุกคอนเวอเตอร์เพื่อให้เกิดสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด			↔	↔					
4.สร้างวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์					↔	↔			
5.ทดสอบและเก็บค่าสัญญาณรบกวนที่ได้จากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์และเปรียบเทียบกับมาตรฐานEN 55011 Class a						↔	↔		
6.เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์							↔	↔	↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้มีความรู้ความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2. ทำให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะเทคนิคออกแบบแผ่น PCB

3. ทำให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างและออกแบบวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์

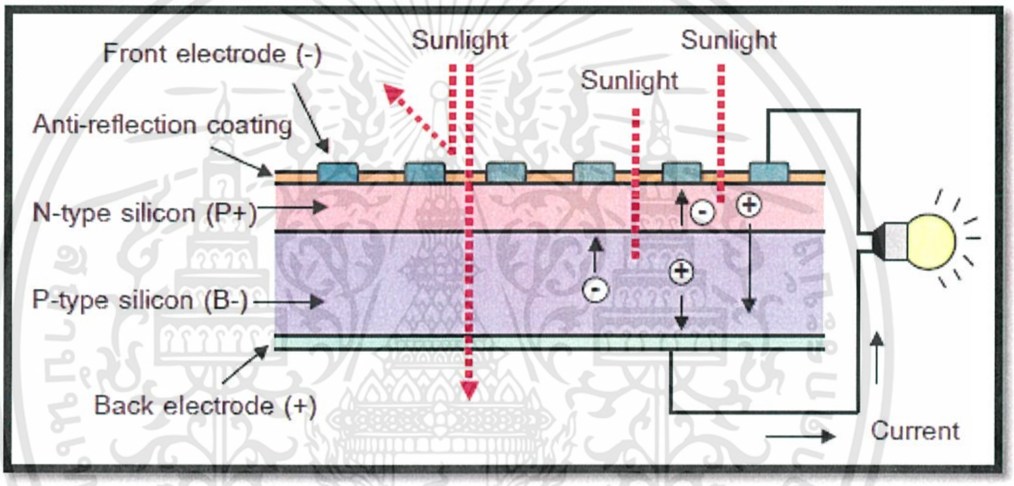
4. สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาจ่ายโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

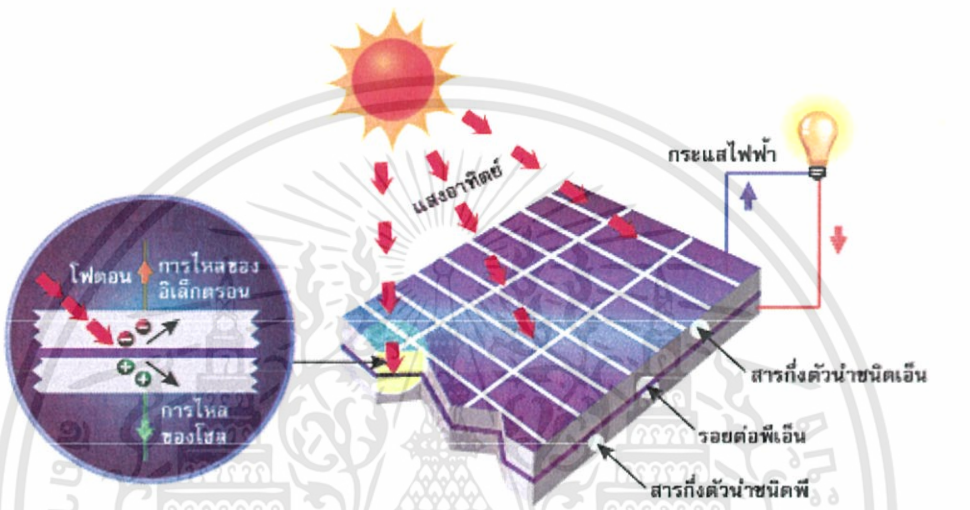
2.1.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุงและผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

n-type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์

p-type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน [6]

2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

ตัวอย่าง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามากเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็น เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่ว่าต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า

- การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
- การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น

ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือ Monocrystalline มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถลุงได้มาหลอมเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 °C แล้วดึงผลึกออกจากของเหลว โดยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนได้แท่งผลึกซิลิคอนเป็นของแข็ง แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ

2. นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแว่น มาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นภายในเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C แล้วนำไปทำชั้นต้านการสะท้อนแสงด้วยเตาออกซิเดชั่นที่มีอุณหภูมิสูง

3. ทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยการฉาบไอโลหะภายใต้สูญญากาศ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องนำไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยแสงอาทิตย์เทียม และวัดหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกรวม (Polycrystalline) มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1.นำซิลิคอนที่ถลุงและหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วมาเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อซิลิคอนแข็งตัว จะได้เป็นแท่งซิลิคอนเป็นแบบผลึกรวม แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ

2.จากนั้นนำมาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ และทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1.ทำการแยกสลายก๊าซไซเลน (Silane Gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นการผ่านก๊าซไซเลนเข้าไปในครอบแก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูง จะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมา และอะตอมของซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ในครอบแก้ว เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่เกิน 1 ไมครอน (0.001 มม.)

2.ขณะที่แยกสลายก๊าซไซเลน จะผสมก๊าซฟอสฟีนและไดโบเรนเข้าไปเป็นสารเจือปน เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

3.การทำขั้วไฟฟ้า มักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (Indium Tin Oxide)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลี่ยม อาร์เซไนด์ มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึก ใช้เครื่องมือ คือ เตาปลูกชั้นผลึกจากสถานะของเหลว (LPE; Liquid Phase Epitaxy)

2. ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกที่เป็นรอยต่อเอ็นพี ใช้เครื่องมือ คือ เครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล (MBE; Molecular Beam Epitaxy)

2.1.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจาก ธาตุ silicon ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลก รองจากออกซิเจน ทรายตามชายหาด ท้องทะเล หินต่างๆ ที่เห็นรอบตัวเรา ก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั้นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมี เทคนิคและใช้พลังงาน นั้นคือต้องมีค่าใช้จ่าย) ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว ทรานซิสเตอร์, IC และ LSI ทั้งหลายแทบทั้งหมด สร้างโดยใช้ซิลิคอน นั่นก็คือ การจะนำซิลิคอน มาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัตถุดิบ ได้มีอุตสาหกรรมรองรับอยู่แล้ว

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่า มีบางประเภทที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบ ซึ่งไม่ใช่ซิลิคอน แต่โดยรวมแล้วยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ด้วยเหตุผลทางด้านราคาและความยุ่งยากในการผลิต

ประเภทของวัสดุ	โครงสร้าง	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟัส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารประกอบอื่น	GaAs, CdTe , CuInSe2	18-30 % (GaAs) 10-15 % 10-15 %	NA

ตารางที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 แบบคือ

แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือ Monocrystalline

แบบผลึกรวม (Polycrystalline)

แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous)

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell

ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย เรานิยมใช้ธาตุซิลิกอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซี และเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะได้แก่ ในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก

2.เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี (Polycrystalline)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับ ไมโครเมตร - มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน

3.เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10% เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิกอนเช่นกัน แต่จะไม่เป็นผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิกอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบอื่น ๆ กึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น แกลเลี่ยม อาร์เซ่ไนด์ (GaAs) แคดเมียม เทลเลอไรด์ (CdTe) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (CulnSe2) เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลี่ยม อาร์เซไนต์จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25 %

2.2 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า
ความหมายของคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

- ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

ความสามารถของอุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (system) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติ ในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าโดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียหรือผลกระทบใดๆ ต่อ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบที่ทำงาน ในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน

- การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance: EMD)

ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่อาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อ อุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ(Equipment) หรือระบบ(system) ประเด็นสำคัญคือเป็นสาเหตุของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

- สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI)

การที่อุปกรณ์(Device) เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

- Emission

การปล่อยสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

- Immunity

ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

- Susceptibility

ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

- สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted Emission)

การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางตัวนำที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบ

- สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ทางอากาศ (Radiated Emission)

การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยการแผ่กระจายคลื่นทางอากาศไปยังส่วนรับผลกระทบโดยตรง

องค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า

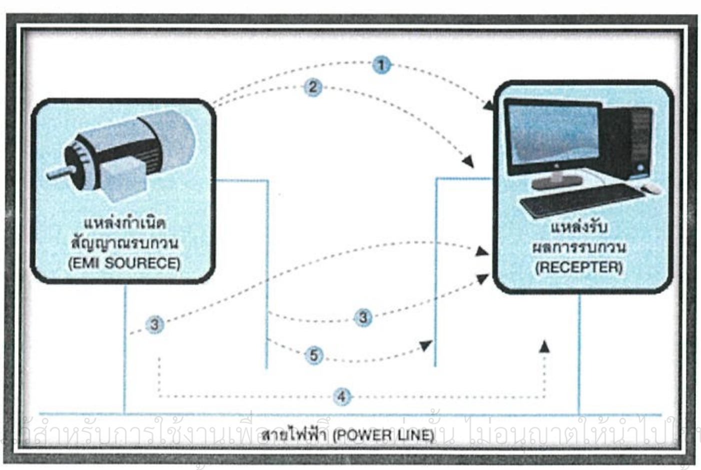
ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน [1] คือ

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) เช่น เครื่องส่งวิทยุ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า วงจรจุดระเบิด คอมพิวเตอร์และระบบต่อพ่วง ผลจากการเกิดฟ้าผ่า เป็นต้น

2. ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Receptor หรือ victim) เช่น เครื่องรับวิทยุ วงจรตรวจจับสัญญาณ คอมพิวเตอร์ สิ่งมีชีวิต เป็นต้น ส่วนนี้มักจะมีความไวต่อการรับสัญญาณ

3. ส่วนคู่ควบ (Coupling) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก เช่น โดยการแผ่กระจายไปทางอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ หรือการส่งสัญญาณผ่านไปทางตัวนำ

ทั้งหมดนี้มีรูปแบบและความสัมพันธ์กันแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนที่กำเนิดสัญญาณมักสร้างสัญญาณไปรบกวนส่วนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติส่วนที่กำเนิดสัญญาณสามารถรับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นได้เช่นกัน ดังนั้นส่วนกำเนิดสัญญาณอาจเป็นทั้งส่วนกำเนิดสัญญาณรบกวนและส่วนได้รับสัญญาณรบกวนในเวลาเดียวกัน ในรูปที่ 2.3 ส่วนที่กำเนิดสัญญาณมักจะสร้างสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบ มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน โดยสรุปได้ ดังนี้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบและรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

รูปแบบที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยผ่านทางอากาศ ไปยังส่วนรับผลกระทบโดยตรง (Radiated Emission)

รูปแบบที่ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำกำลัง สัญญาณ ควบคุมที่ควบคู่กับตัวรับผลกระทบ โดยที่สายตัวนำดังกล่าวจะเป็นส่วนนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังส่วนรับผลกระทบ (Indirect-Conducted Emission)

รูปแบบที่ 3 สายตัวนำกำลัง สัญญาณ ควบคุมที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังส่วนรับผลกระทบ (Indirect-Radiated Emission)

รูปแบบที่ 4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายตัวนำกำลัง สัญญาณ ควบคุม ที่ควบคู่ถึงกันกับส่วนรับผลกระทบ (conducted emission)

รูปแบบที่ 5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำกำลัง สัญญาณ ควบคุมที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำกำลัง สัญญาณ ควบคุม ที่ต่ออยู่กับส่วนรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไหร่ก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น (Semi-Conducted Emission)

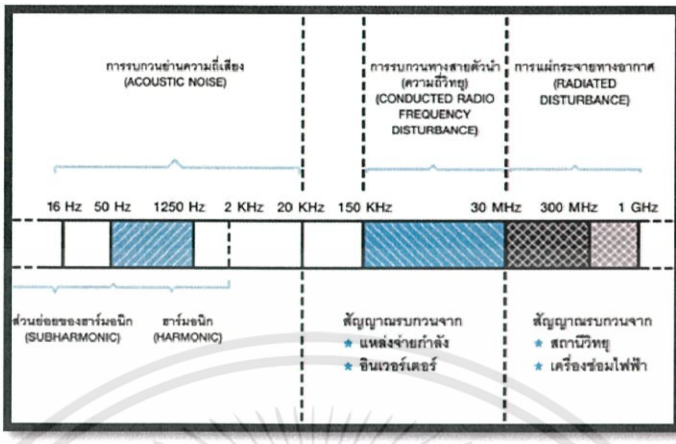
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่มีขนาดใหญ่กว่าภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field Immunity) ของตัวรับผลกระทบที่สามารถทนได้ ก่อให้ตัวรับผลกระทบนั้นเกิดความเสียหายหรือเกิดความผิดพลาดในการทำงานขึ้น ซึ่งนั่นก็หมายถึงการไม่สามารถเข้ากันได้ ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น คำว่า“ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า” ก็จะหมายถึงความสามารถ ของส่วนรับผลกระทบ (อุปกรณ์เครื่องมือระบบ) ที่สามารถทำงานได้โดยปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันส่วนรับผลกระทบดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากเกินภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทนได้ของ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบอื่นๆด้วย

สัญญาณรบกวนในรูปที่ 2.3 สามารถจำแนกตามลักษณะสัญญาณได้ เช่น หากวัดสัญญาณที่มาตามสายตัวนำจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (Volt: V) หรือกระแสไฟฟ้า (Ampere: A) หากวัดสัญญาณที่มาทางอากาศจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m) หรือระนาบคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (plane wave: W/m^2) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic disturbance) อาจจะทำให้การทำงานของ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบมีความผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เครื่องมือ หรือระบบ การรบกวนดังกล่าวจะถูกเรียกว่า สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ในย่าน “0” เฮิรตซ์ ถึงประมาณ 2,000 เฮิรตซ์ จะจัดอยู่ในย่านการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือเรียกว่า “ฮาร์มอนิก”

(Harmonics) ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลัง มีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ (sine wave)นอกจากนั้นยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังด้วย



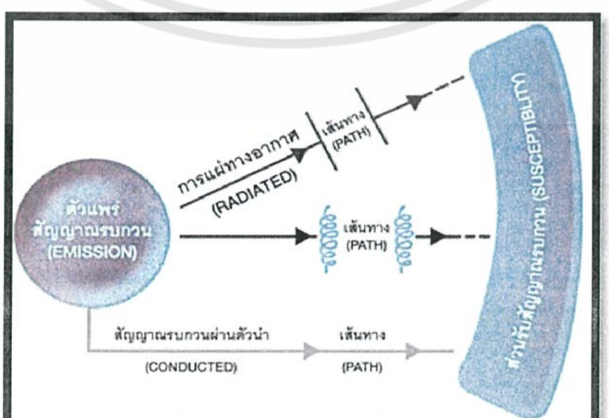
รูปที่ 2.4 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการรบกวนความถี่วิทยุ (Radio Frequency disturbance) สามารถจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1จิกะเฮิรตซ์ (GHz) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) พิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และย่านความถี่ตั้งแต่ 30 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1 จิกะเฮิรตซ์ พิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI)

2.3 หลักการการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ

1. การแผ่ทางอากาศ (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ
2. การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำ (Conduction) ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



รูปที่ 2.5 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

การเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปที่ 2.5 สามารถแทนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้า (electrically) โดยสามารถแทนในรูปตัวเก็บประจุ (capacitor) หรืออยู่ในรูปของแม่เหล็ก (magnetically) โดยแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (inductor)ได้ เช่น กรณีที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ(ตามรูปที่ 2.5)เป็นตัวเชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถส่งผ่านสัญญาณรบกวนดังกล่าวไปยังสายตัวนำอื่น

2.3.1 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Noise)

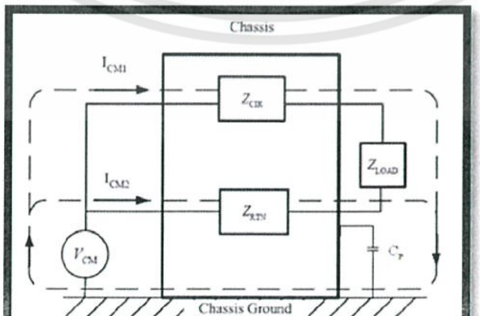
การเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำคือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ การเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม (Common Mode) และโหมดผลต่าง (Differential Mode)

- การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลร่วม (Common mode)

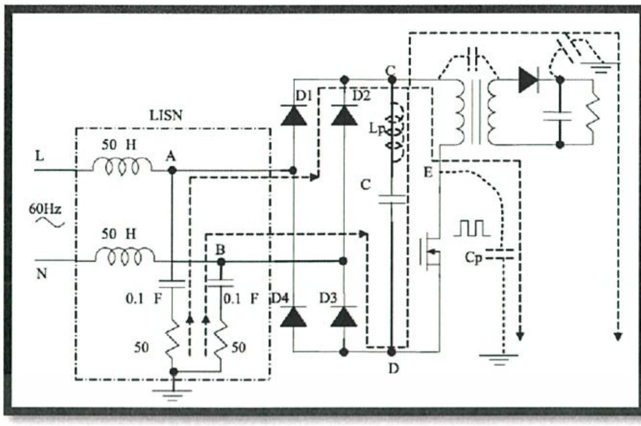
สำหรับในโหมดผลร่วมนั้น จะพิจารณาการไหลของสัญญาณระหว่างกลุ่มของตัวนำกับกราวด์ หรือกลุ่มตัวนำอื่นๆ เป็นตัวอ้างอิง สำหรับการเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมนั้นจะมีตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมคือ ตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) โดยตัวเก็บประจุแฝงนี้จะเป็นเส้นทางเดินสัญญาณไปยังกราวด์ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงในโหมดผลร่วมของทั้งสายสัญญาณ (Line) และสายป้อนกลับ (Neutral) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นถ้าปราศจากตัวเก็บประจุแฝงนี้แล้วก็จะไม่เกิดสัญญาณรบกวนในกรณีโหมดผลร่วม จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายสัญญาณ ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับ ($V_{noiseRTN}$) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเส้นทางการไหลของสัญญาณรบกวนในแต่ละสายมีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน เพราะว่าการไหลของสัญญาณในสายสัญญาณจะผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรแล้วผ่านไปยังอิมพีแดนซ์ของโหลด ในขณะที่การไหลของสัญญาณในสายป้อนกลับจะผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับเพียงอันเดียว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณการเกิดการรบกวนในโหมดผลร่วมไม่เท่ากัน โดยจะแสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) และเมื่อกระแสโหมดผลร่วมไม่เท่ากันก็จะทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลขึ้น และกระแสโหมดผลร่วมในกรณีนี้ก็จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างได้

$$V_{noiseCIR} = I_{CM} \times (Z_{CIR} + Z_{Load} + X_{Cp}) \tag{2.1}$$

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



รูปที่ 2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม [1]

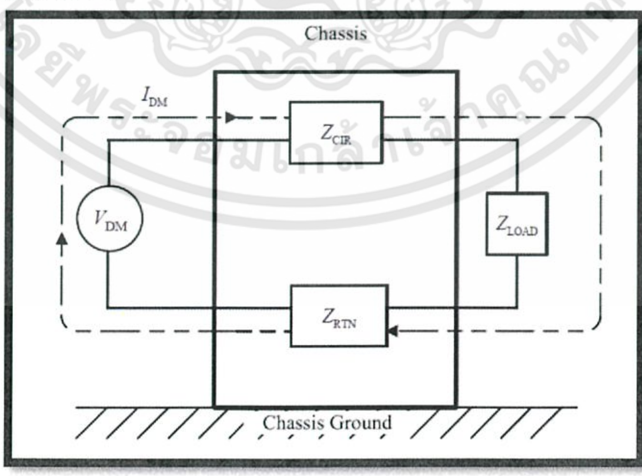


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม

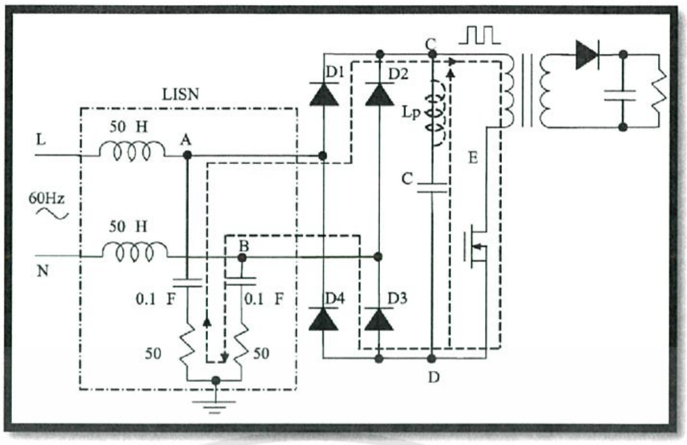
- การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่าง (Differential mode)

สัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างเกิดสัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เช่น สัญญาณนาฬิกา หรือ รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันในวงจรใดๆ โดยสัญญาณในโหมดผลต่างนี้ทางเดินของกระแสหรือแรงดันจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร (Z_{CIR}) เพื่อไปยังโหลด และจะไหลผ่านกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับดังรูปที่ 2.8 ซึ่งก็คือทางเดินหลักของสัญญาณในวงจรนั้น เช่นนั้นทางเดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรก็คือทางเดินเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำในโหมดผลต่างจะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง 2 ตัวนำในการส่งสัญญาณ คือ ตัวนำสัญญาณไป (Signal line) และตัวนำสัญญาณกลับ (Return line)ดังแสดงในรูปที่ 2.9

การทำงานของวงจรในย่านความถี่สูง ณ ย่านความถี่สูงนี้ คุณสมบัติของอุปกรณ์หรือตัวนำในวงจรอาจเปลี่ยนไป ช่น ทางเดินสัญญาณจะเกิดค่าการเหนี่ยวนำแฝงขึ้นได้ ซึ่งการป้องกันก็จะทำได้โดยการลดลูปของวงจรลง



รูปที่ 2.8 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง [1]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง

จากรูปที่ 2.10 กรณีวงจรไฟฟ้า 1 เฟสซึ่งประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common mode voltage) และค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode voltage) ดังต่อไปนี้

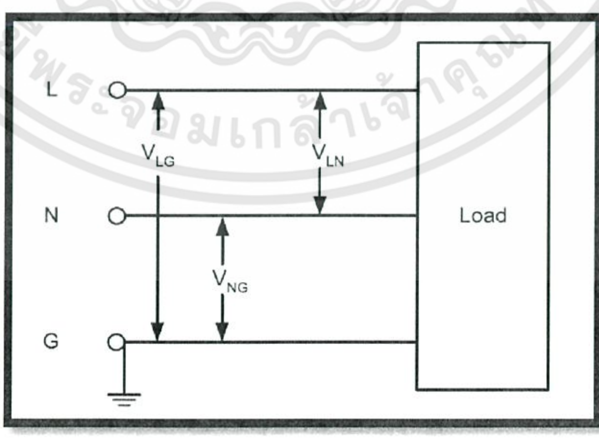
$$V_{cm} = \frac{(V_{LG} + V_{NG})}{2} \tag{2.3}$$

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

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์

V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์

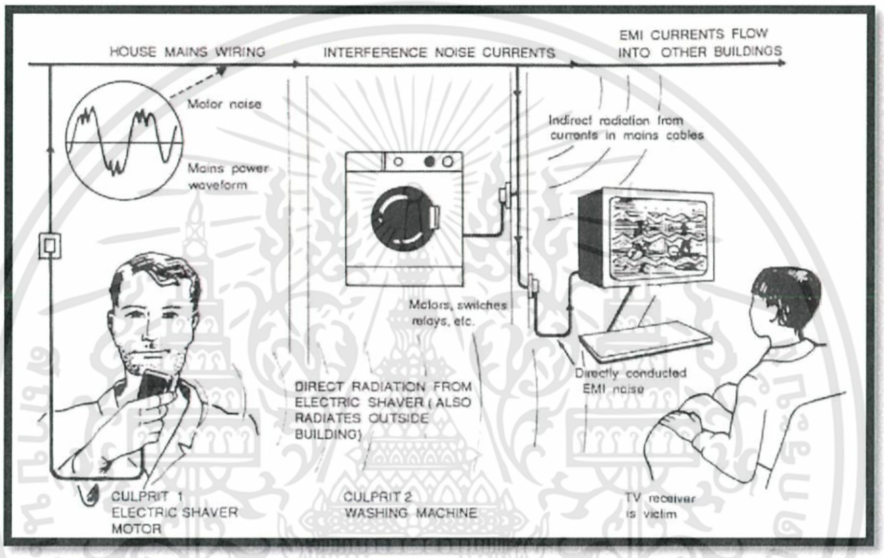
V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับนิวตรอน



รูปที่ 2.10 วงจรไฟฟ้า 1 เฟส [1]

2.3.2 สัญญาณรบกวนที่แผ่ทางอากาศ (Radiated Noise)

จากสาเหตุของการสร้างสัญญาณแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ นอกจากจะมีผลจากการแผ่กระจายกลับไปในระบบแล้ว การส่งผ่านสายตัวนำยังมีผลทำให้เกิดการแผ่กระจายในรูปสัญญาณรบกวนผ่านอากาศ โดยตัวนำหรือตัวระบายความร้อน จะมีหน้าที่เป็นเสาอากาศ ส่งสัญญาณรบกวนในรูปของแม่เหล็กไฟฟ้าในข่ายความถี่สูงตั้งแต่ 30 MHz – 1 GHz เมื่อมีตัวนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ใกล้เคียงก็จะทำหน้าที่เป็นเครื่องรับสัญญาณการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเกิดการรบกวนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.11 [10]



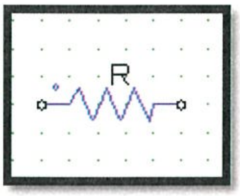
รูปที่ 2.11 การแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศ [10]

2.4 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์

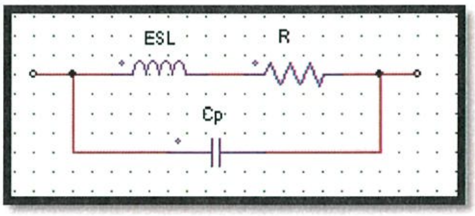
เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่ส่วนประกอบของตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่ความถี่สูงพฤติกรรมของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่สามารถรักษาคุณสมบัติของมันไว้ได้ เมื่อมีการทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดองค์ประกอบแฝงขึ้นในตัวอุปกรณ์นั้นๆได้

2.4.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดมีค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic inductance: L_p) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) เกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 ทั้งนี้เนื่องจากขาและขั้วของตัวต้านทานไฟฟ้าถ้าขาของตัวต้านทานไฟฟ้ายิ่งยาวมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากส่วนในรูปที่ 2.13 เป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.12 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า

ในกรณีที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

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

ในกรณีที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

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

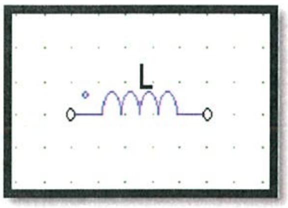
(ก) ในอุดมคติ

(ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

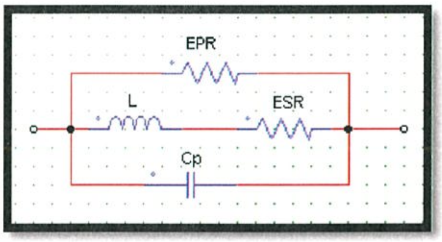
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวต้านทานไฟฟ้า

2.4.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในทางปฏิบัติในการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะแสดงพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) เกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) เกิดขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้นคุณสมบัติต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.14 และในรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

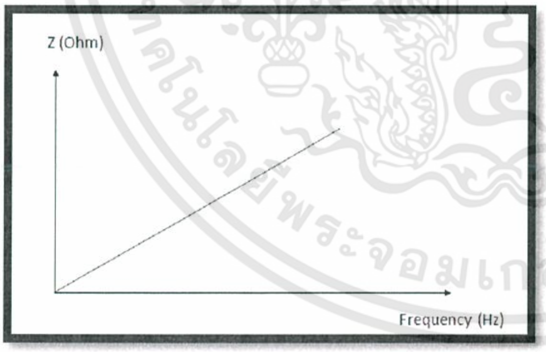
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

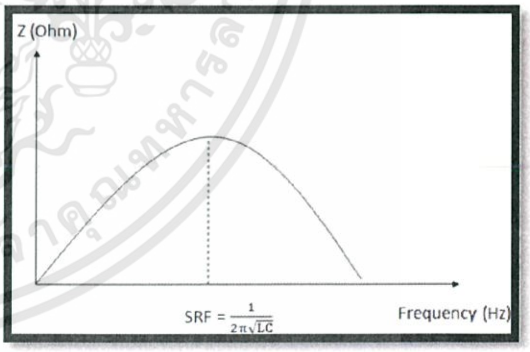
$$Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL \tag{2.7}$$

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{ESR + j2\pi fESL} + \frac{1}{EPR} + j2\pi fC_p} \tag{2.8}$$



(ก) ในอุดมคติ



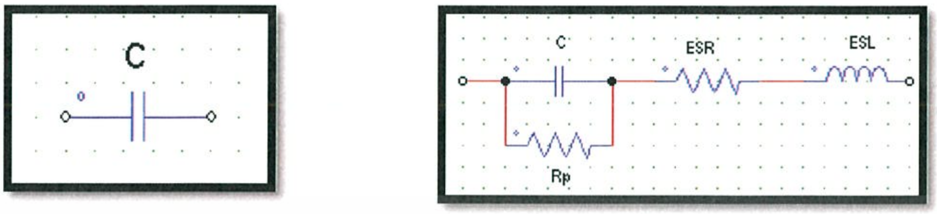
(ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ

2.4.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้า ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) และ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance:L_p) เกิดขึ้นดังรูป 2.16 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าของความต้านทานไฟฟ้า

แฝงและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.17



(ก) ในทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ

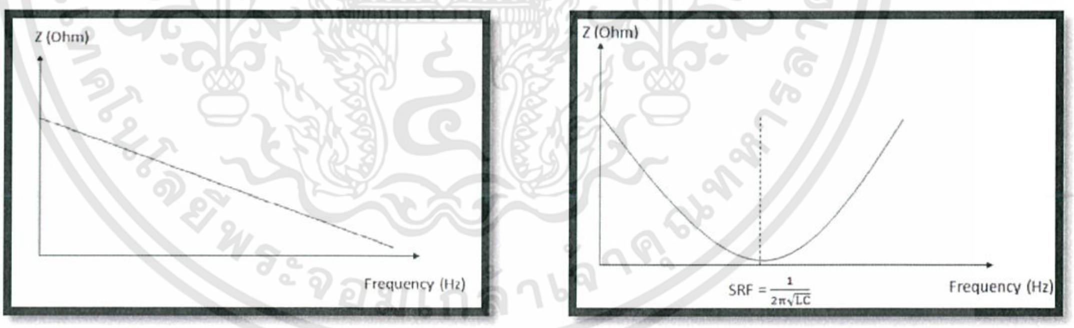
รูปที่ 2.16 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

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

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fc + \frac{1}{R_p}} + j2\pi fESL + ESR \tag{2.10}$$



ก) ในอุดมคติ (ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ

2.4.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) หรือค่า Q เป็นตัวประกอบคุณภาพ ใช้กับวงจรหรืออุปกรณ์ ที่เป็นสัญญาณไซน์โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

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

โดยค่า Q ยิ่งมีค่ามากยิ่งดี [10]

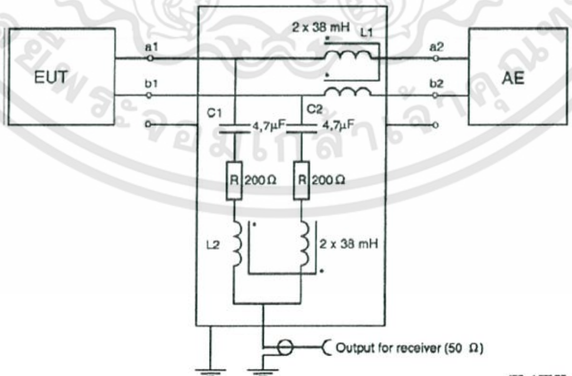
2.5 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ

การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกต้องนั้น จะต้องมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้หลายอย่าง และเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติที่กำหนด ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำในโหมดผลร่วม ซึ่งแปลและเรียบเรียงมาจากมาตรฐาน CISPR 11(EN 55011) ต่อไปจะเป็นอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

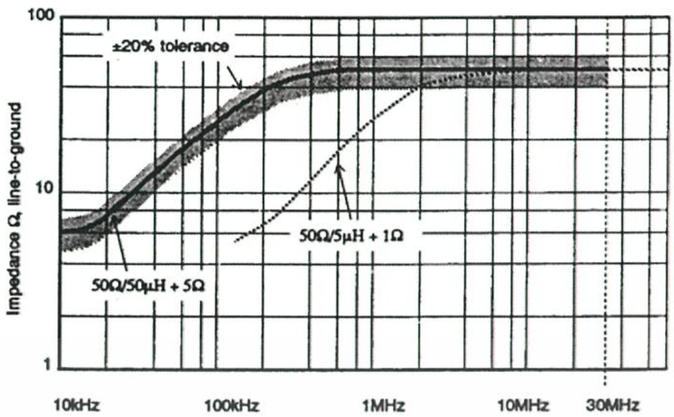
2.5.1 LISN (Line Impedance Stabilization Network)

โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network)เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถติดตั้งได้ง่าย จากรูปที่ 2.18 โดยการต่อไว้ที่ทางด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test: EUT) ซึ่งสาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟ เพราะที่ด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟ เป็นเส้นทางหลักของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์จะไปรบกวนวงจรอื่นทางตัวนำ และเพราะว่าสายที่ต่อจากแหล่งจ่าย จะทำตัวคล้ายกับเป็นสายอากาศ แผ่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลอง จากมาตรฐานEN 55011(CISPR 11) ซึ่งหน้าที่หลักๆของตัว LISN แบ่งได้เป็น 3 ข้อด้วยกันคือ

1. เสถียรภาพอิมพีแดนซ์ระหว่างสายในแต่ละสายของแหล่งจ่ายกับจุดกราวนด์อ้างอิงให้คงที่ที่ 50 Ω โดยมีตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 50 μH ต่ออยู่ด้วย สำหรับความถี่ตั้งแต่150 kHz ถึง 30 MHz ดังแสดงในรูปที่ โดยที่ 50 Ω/50 μH+5 Ω ใช้สำหรับ LISN ทั่วไป และ50 Ω/50 μH+1 Ω ใช้สำหรับ LISNที่ใช้ทดสอบในสภาวะกระแสสูงถึงแอมป์
2. แยกสัญญาณรบกวนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้การทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) เพื่อนำเข้าสู่เครื่องมือวิเคราะห์
3. ลดทอนสัญญาณรบกวนที่มากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักออกไปโดยไม่ให้เข้าสู่ระบบที่กำลังวัดอยู่ และเพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ ควรมีการต่อจุดอ้างอิงของ LISN ลงดิน



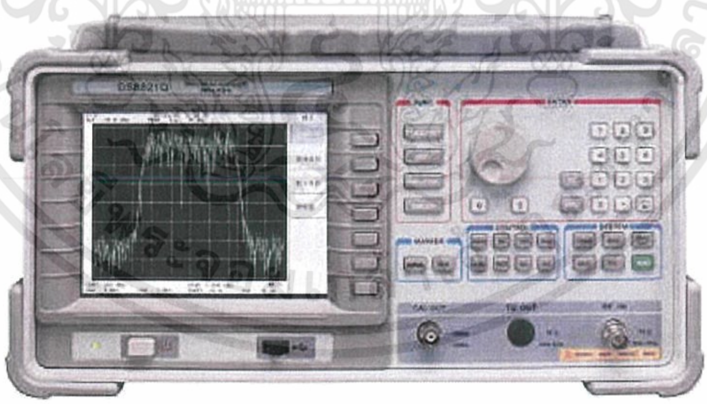
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของ Line Impedance Stabilization Network: LISN



รูปที่ 2.19 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ LISN

2.5.2 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (รูปที่ 2.20) หรือเครื่องรับสัญญาณรบกวน เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนในตัวนำ หรือจากสายอากาศต่างๆ สำหรับสัญญาณรบกวนที่มาทางสายอากาศ เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในการวัดแบบ quasi-peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 เครื่องรับสัญญาณแบบ average จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบ peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 3 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1



รูปที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม

2.5.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)

เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด หรือ EUT (Equipment Under Test) ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่

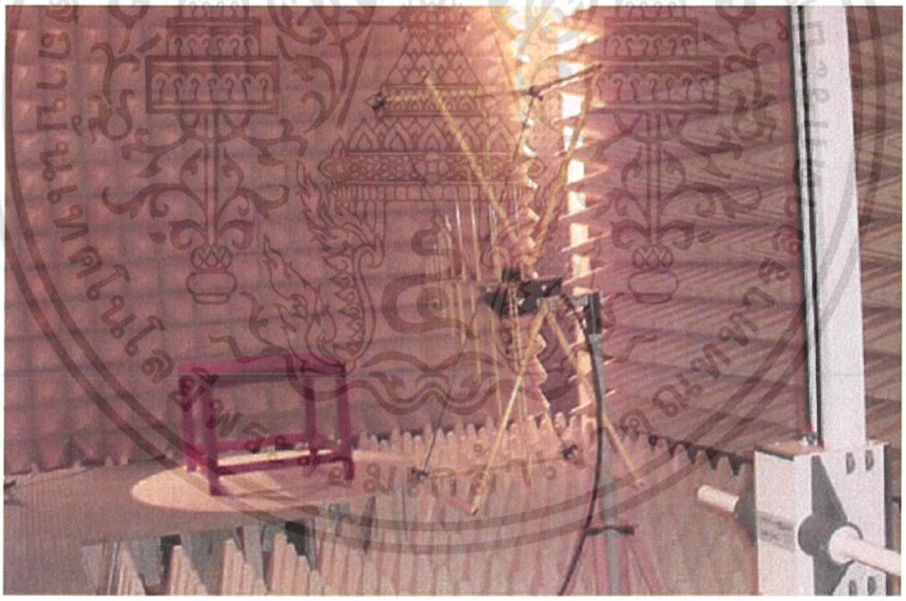
ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงวัสดุที่ใช้ทำกล่องถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร

แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบ ใต้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลองและต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคง ด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะ หรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 2x2 ตารางเมตร

จุดกราวด์อ้างอิงของ LISN และโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำโดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

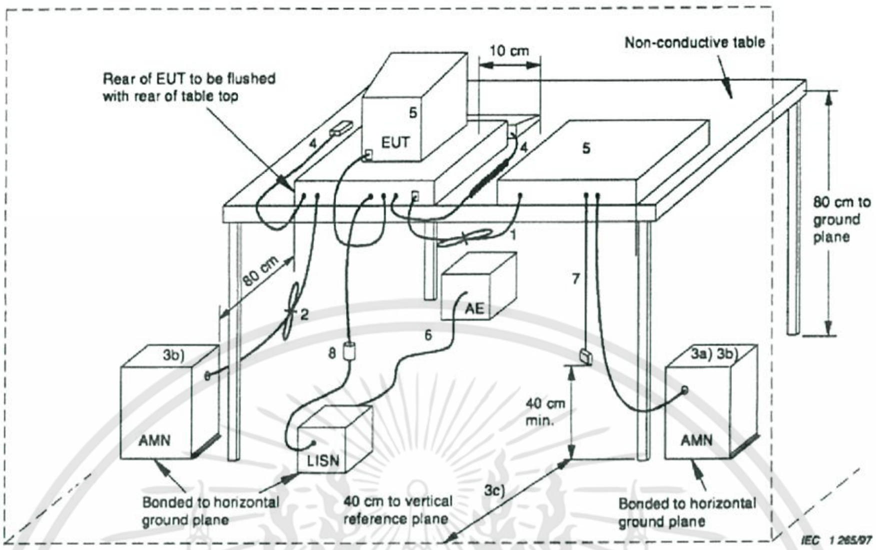
2.5.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นห้องที่ถูกปิดทั้งหกด้าน วัสดุที่ใช้ทำผนังแต่ละด้านเป็นโลหะทึบสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ระบบทดสอบ และกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบออกไปรบกวนระบบอื่นๆด้านนอก ภายนอกห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกติดตั้งตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ(EMI Filter) เพื่อใช้กรองสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกให้มีระดับต่ำ ก่อนป้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบที่ติดตั้งอยู่ภายในห้อง



รูปที่ 2.21 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

2.5.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ



AMN : Artificial mains network

AE : Associated equipment

EUT : Equipment under test

LISN : Line Impedance stabilization network

รูปที่ 2.22 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางบนอุปกรณ์บนโต๊ะ

จากรูป2.22จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางบนอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้

1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เหนือแนวระดับของแผ่นกราวด์และไม่สามารถทำให้สั้นได้ จะต้องมัดทบปลายสายให้มีความยาวระหว่าง 30 – 40 เซนติเมตร
2. สายไฟจากแหล่งจ่ายจะต้องมัดทบกันให้สายสั้นที่สุด
3. อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดต้องต่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ที่อยู่ในแนวระดับ
    a) แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องต่อมาจาก LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีปลายสายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์
    b) LISN ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด 80 เซนติเมตร และอย่างน้อย 80 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่นโลหะอื่นๆ
    c) สายไฟหลักและสายสัญญาณควรวางให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร

4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น สายคีย์บอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆให้วางเหมือนกับการใช้งานทั่วไป
5. สิ่งที่อยู่รอบๆภายนอกจะต้องอยู่ห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นข้างเคียงและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางอยู่บนตัวควบคุมได้
6. มีสายสัญญาณเข้าออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ current probe ควรวางห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร [10]

2.6 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารก่อให้เกิดทั้งผลดี และผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น เพื่อช่วยให้ผู้ผลิต และผู้ใช้เครื่องมือสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นธรรม ไม่เกิดปัญหาด้านการใช้งาน มีความปลอดภัย หน่วยงานต่างๆจึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังนี้

2.6.1 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

2.6.2 CISPR

CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (ซึ่งมาจากคำเต็มในภาษาฝรั่งเศสคือ Comité international spécial des perturbations radioélectriques เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2476 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติหลายประเทศ ได้นำมาตรฐาน CISPR มาดัดแปลงใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานบังคับใช้ สำหรับแต่ละประเทศ ประเทศไทยได้นำมาตรฐานนี้มาปรับใช้ เช่น มาตรฐานของ

บริภัณฑ์ส่องสว่าง ได้จากการนำมาตรฐาน CISPR 15 มาดัดแปลงใช้งานมาตรฐาน 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 โวลต์ เป็นต้น

2.6.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)

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

2.6.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้มีนำมาตรฐานนานาชาติ (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 มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของ IEC (International Electrotechnical Commission)

เช่นเทคนิคการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมมาใช้โดยออกเป็นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม (สมอ)

ตารางที่ 2.2 สรุปมาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนของนานาชาติและภูมิภาคที่สำคัญ

International Regulations Summary (Emissions)			
CISPR	FCC	En’s	Description
11	Part 18	EN 55011	Industrial, Scientific and Medical
12	(SAE)		Automotives
13	Part 15	EN 55013	Broadcast Receivers
14		EN 55014	Household Appliances/tools
15		EN 55015	Fluorescent lights/luminaries

16			Measurement apparatus/methods
22	Part 15	EN 55022	Information technology equipment
		EN 50081-1,2	Generic emissions standards

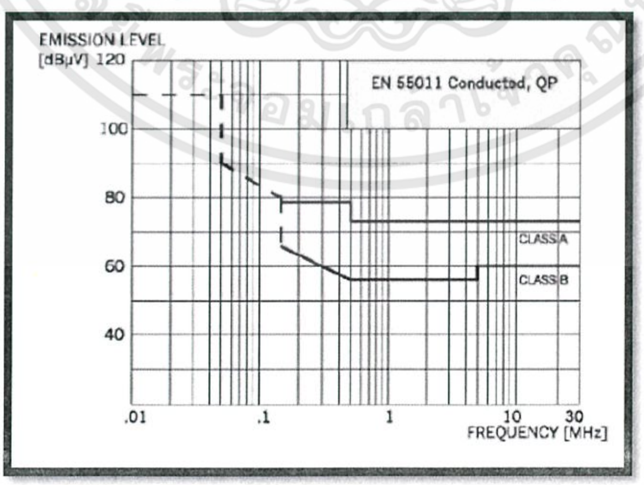
ตาราง 2.2 มาตรฐานสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดลองในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้มาตรฐาน EN 55011 class a เป็นตัวอ้างอิง เนื่องจากได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานภายในอุตสาหกรรม

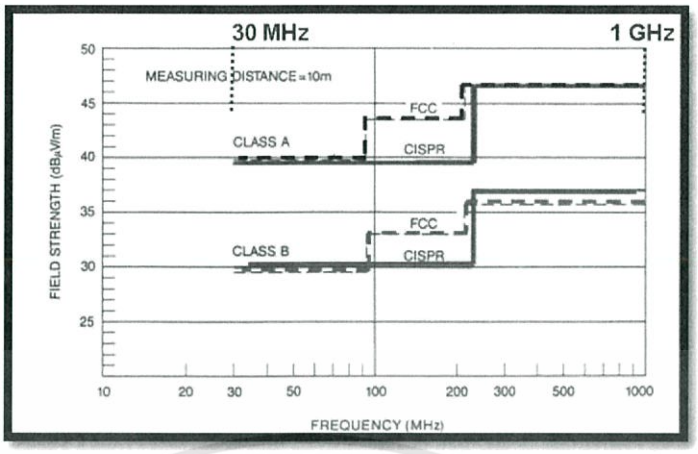
สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่า ต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านเต้ารับและจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (Antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ ซึ่งมาตรฐานที่กำหนดไว้มิได้เป็นการรับประกันว่าสินค้าที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงแต่เป็นการยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้าดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [2]

2.6.5 มาตรฐาน EN 55011 Industrial, scientific and medical (ISM)

มาตรฐานนี้จะพิจารณาในช่วงความถี่วิทยุ 9KHz ถึง 400 GHz ในกรณี conducted emission จะพิจารณาในย่านความถี่ 0.15-30 MHz โดยแบ่งออกเป็น 2 class ด้วยกันคือ Class a และ Class b Class a ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัยนอกจากนี้ยังอาจใช้ผลิตภัณฑ์Class a ภายในบ้าน/ที่พักอาศัยได้แต่อาจก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งผู้ใช้ต้องดำเนินมาตรการแก้ไขที่เพียงพอ และ Class b ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานภายในบ้าน/ที่พักอาศัย แต่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัยได้เช่นกัน [13]



รูปที่ 2.23 มาตรฐาน EN 55011 class a และclass b [13]



รูปที่ 2.24 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC [13]

จากรูปที่ 2.24 แสดงขีดจำกัด(Limit) การแผ่กระจายทางอากาศ (Radiated Emission) ตามมาตรฐาน CISPR และ FCC ซึ่งจะประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 2 Class คือ

- Class A คือ ขีดจำกัดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial use)
- Class B สำหรับใช้ในที่อยู่อาศัย (Residence use)

ขีดจำกัดกำหนดของ Class A จะกำหนดให้สัญญาณรบกวนได้สูงกว่าในที่อยู่อาศัย เนื่องจากแนวความคิดที่ว่า เครื่องจักรและคนที่อยู่ในอุตสาหกรรมเป็นคนวัยทำงานมีความแข็งแรงสูงกว่าในที่อยู่อาศัย และอีกทั้งในอุตสาหกรรมยังมีการป้องกันผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสูงกว่าที่อยู่อาศัยมาตรฐาน CISPR กำหนดเกณฑ์ให้สัญญาณรบกวนได้น้อยกว่า FCC

2.7 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk Converter)

วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเช่นเดียวกันกับ วงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แต่ปัญหาในวงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์ก็คือ มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์สูงเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสในด้านเข้า ดังนั้นวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จึงได้ถูกออกแบบ เพื่อแก้ปัญหานี้โดยเพิ่มตัวเหนี่ยวนำในด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านออกของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุ [5]

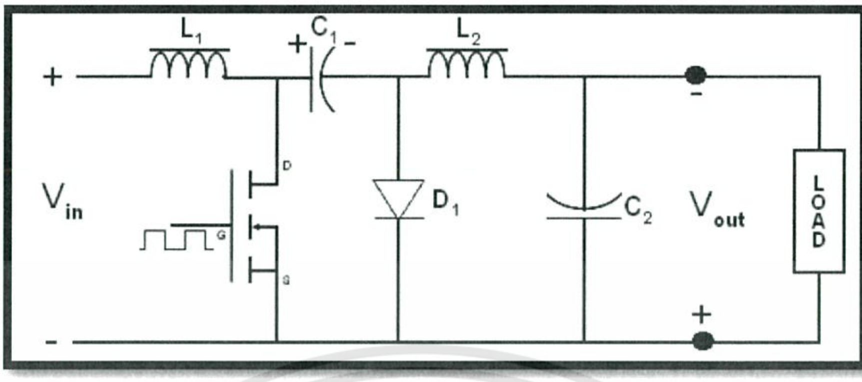
การวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์อยู่ทั้งหมด 3 สภาวะการทำงาน

1.ช่วงวงสภาวะคงตัว(Steady State)

2. ช่วงที่สวิตช์ปิดวงจร (Switch-ON)

3.ช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร(Switch-OFF)

1.ช่วงสภาวะคงตัว (Steady State)



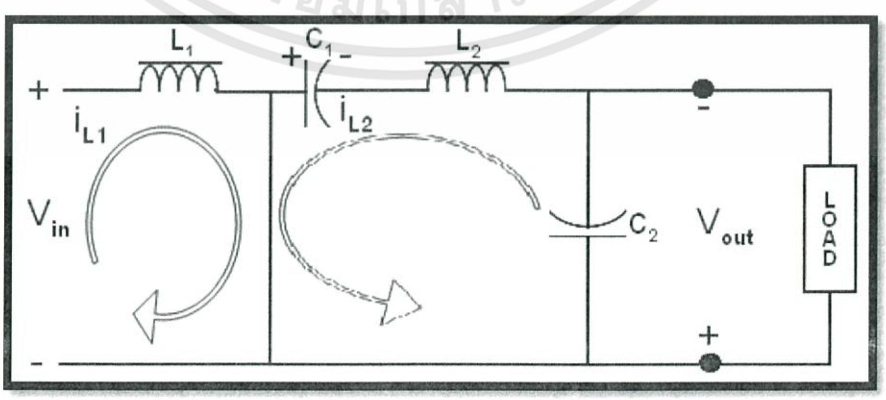
รูปที่ 2.25 วงจร ĆUK Converter เมื่อสภาวะคงตัว

$$\frac{V_o}{V_s} = -(\frac{D}{1-D}) = -(\frac{T_{on}}{T_{off}} V_s) \tag{2.12}$$

เมื่อ V_s = Input Voltage
V_o = Output Voltage
D = Duty Ratio

เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะคงตัว(Steady State)ค่าของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 นั้นมีค่าน้อยมากประมาณว่าเท่ากับศูนย์(V_{L1} ,V_{L2} = 0)อันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นค่าของแรงดันตกคร่อมที่ V_{C1} จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุต ($V_{c1} = V_{in} + V_o$) จะเห็นว่าขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าที่สูงดังนั้นขนาดของ ตัวเก็บประจุ C_1 จึงมีขนาดที่ใหญ่ ซึ่งตัวเก็บประจุ C_1 จะสะสม และ ถ่ายเทพลังงานระหว่าง Input และ Output ในช่วงสภาวะคงตัวของวงจร (Steady State)

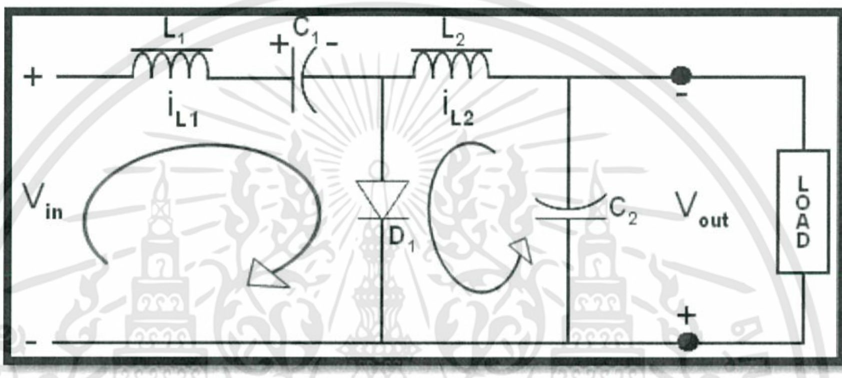
2.ช่วงที่สวิตช์ปิดวงจร (Switch-ON)



รูปที่ 2.26 วงจร ĆUK Converter ช่วงที่สวิตช์ปิด

การทำงานในช่วงที่สวิตช์ปิดนั้น แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดนั้นมีค่า เท่ากับแรงดันของตัวเก็บประจุ C_1 ($V_{d1}= -V_{c1}$) ซึ่ง แรงดันของตัวเก็บประจุจะต่ออยู่ในลักษณะต้านการไหลกระแสของไดโอด (Reverse Bias) ทำให้ไดโอดเสมือนเปิดวงจร กระแสของ I_{L1} และ I_{L2}จะไหลผ่านสวิตช์ดังภาพ ช่วงเวลาที่สวิตช์ปิดนี้ ค่าแรงดัน V_{c1}จะมีค่ามากกว่าแรงดันของ V_o จึงทำให้ตัวเก็บประจุ c เกิดการถ่ายเทพลังงานไปยัง Output และขดลวดเหนี่ยวนำ L_2 ส่งผลให้ปริมาณของกระแส I_{L2} เพิ่มขึ้น และในส่วนของทางด้านอินพุตก็จะถ่ายเทพลังงานให้แก่ L_1 ทำให้ปริมาณของกระแส I_{L1} เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

3.ช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร (Switch-OFF)



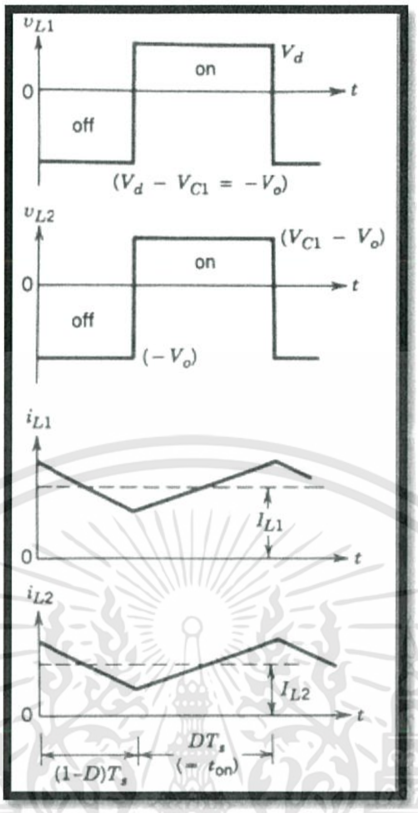
รูปที่ 2.27 วงจร ĆUK Converter ช่วงที่สวิตช์เปิด

การทำงานในช่วงที่สวิตช์เปิด (Switch-OFF) กระแสของขดลวดเหนี่ยวนำจาก L_1 และ L_2 คือ I_{L1}และ I_{L2} จะไหลผ่านตัวไดโอดหรือว่าไดโอดออน (Forward Bias) ดังภาพ ตัวเก็บประจุ C_1 จะทำการเก็บประจุและเกิดการสะสมพลังงานจากทางด้าน อินพุต และปริมาณของกระแส I_{L1} จะมีปริมาณที่น้อยลงอันเนื่องมาจากแรงดันต้านของ V_{c1} จะมากกว่าปริมาณของแรงดัน Vin และพลังงานที่สะสมอยู่ที่ L_2 ก็จะเกิดการถ่ายเทไปยังเอาต์พุต ส่งผลให้ปริมาณของ I_{L2} ลดน้อยลงด้วย ทำให้ V_o ลดลงด้วย

การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง เงื่อนไขที่ทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบได้เล็กที่สุดและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จะคำนวณหาค่า ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ที่เล็กที่สุดดังสมการต่อไปนี้ [5]

$$L_{1,\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2Df} \tag{2.13}$$

$$L_{2,\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.28 Waveform ของวงจร Ćuk Converter

2.8 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.8.1 การออกแบบแผ่น PCB เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [12]

1. ควรมี ลูป(loop)ของวงจรที่แคบเพื่อลดค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง

2. การลากลายทองแดงของวงจรควรลากให้สั้นที่สุดและมีความหนาเพื่อให้มีค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงน้อยที่สุดดังสมการต่อไปนี้

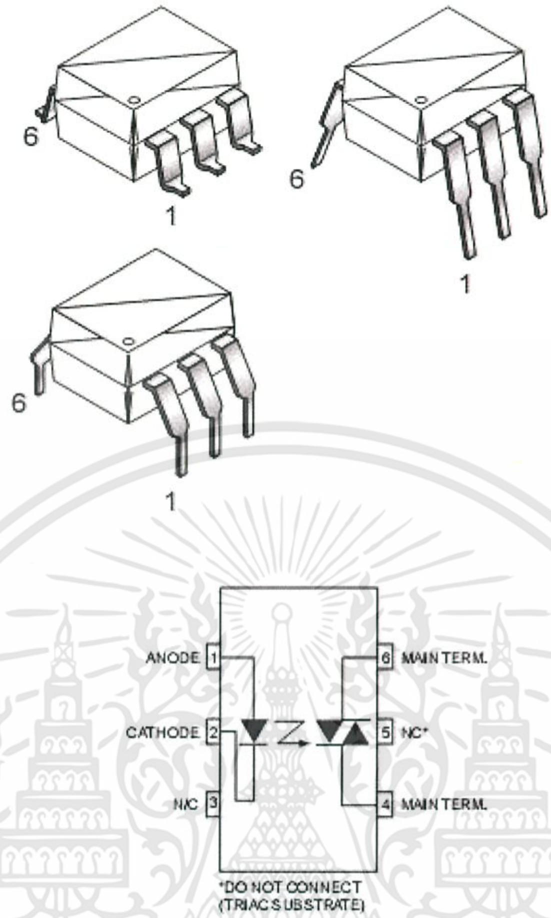
$$L = 0.005 \ln \frac{2\pi h}{w} \tag{2.15}$$

โดย L = μH ต่อนิ้ว

w = ความกว้างของสาย

h = ความสูงเหนือ ground plane

3.แก้ปัญหา ground loop โดยใช้ออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler)



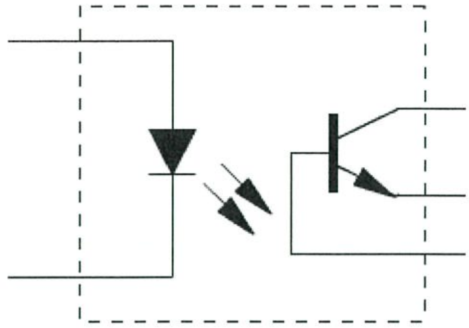
รูปที่ 2.29 ออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler)

MOC เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler)

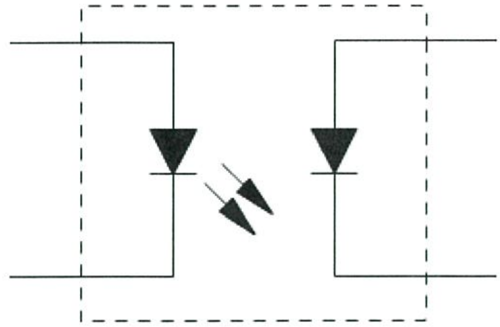
อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator) หรือที่เรียกว่าออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler)เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อทางแสงโดยใช้หลักการเปลี่ยน สัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง และเปลี่ยนกลับจากแสงเป็นไฟฟ้าตามเดิม ใช้สำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสองวงจรที่ต้องการแยกทางไฟฟ้าอย่างเด็ด ขาดเพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้า แบ่งออกเป็นหลายชนิดแต่ละชนิดจะประกอบด้วย LED ส่งแสงซึ่งปกติจะเป็นชนิดอินฟาเรดและตัวรับแสงที่เป็นโฟโต้ทรานซิสเตอร์หรือโฟโต้ไดโอด โดยจะถูกผลิตรวมอยู่ในตัวเดียวกัน

1. โครงสร้างสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง

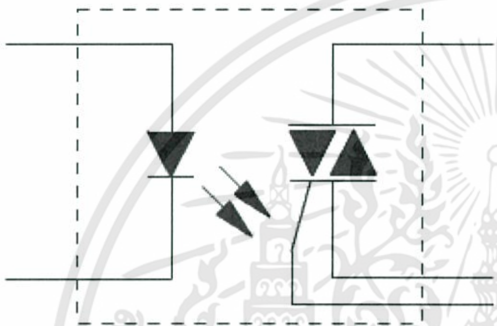
โครงสร้างสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงจะเหมือนกับอุปกรณ์ประเภทโฟ โต้ แต่จะเพิ่มอุปกรณ์ส่งแสงอินฟราเรดคือไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดเข้าไปอีกหนึ่งตัว เช่นโฟโต้ทรานซิสเตอร์จะเพิ่มไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดเข้าไปอีกหนึ่งตัวจะได้ ออปโต้ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์ออปโต้ตัวอื่นก็เช่นเดียวกัน



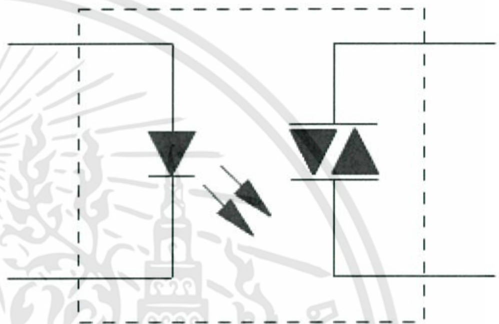
ก. สัญลักษณ์ออปโต้ทรานซิสเตอร์



ข. สัญลักษณ์ออปโต้ไดโอด



ค. สัญลักษณ์ออปโต้ไทรแอก



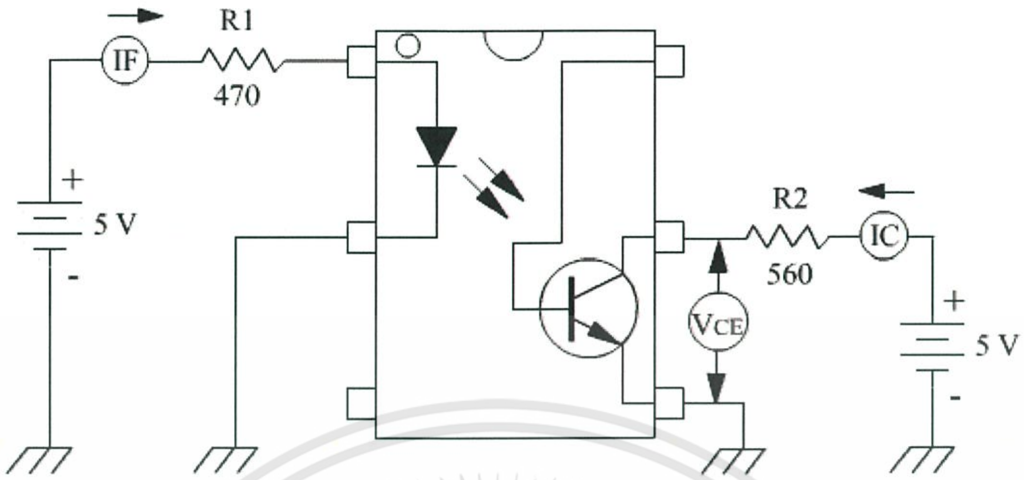
ง. สัญลักษณ์ออปโต้ไดแอก

รูปที่ 2.30 แสดงสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงชนิดต่างๆ

ปัจจุบันอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงถูกสร้างขึ้นมาในรูปของไอซี 6 ขาปิดทึบภายในด้านอินพุตจะเป็นแอลอีดีอินฟราเรด (LED Infrared) ส่วนทางด้านเอาท์พุตนั้นจะเป็นอุปกรณ์ประเภทโฟโต้ชนิดต่างๆ ซึ่งมีอยู่มากมายเช่น โฟโต้ไดโอด

2. วงจรใช้งานออปโต้คัปเปลอร์

จาก รูปที่ 2.31 เป็นวงจรใช้งานเบื้องต้นของออปโต้คัปเปลอร์ โดยมีไดโอดเปล่งแสงเป็นอินพุต และโฟโต้ทรานซิสเตอร์เป็นเอาท์พุตของวงจร เมื่อมีกระแสไหลผ่าน LED โดยมี R1 เป็นตัวจำกัดกระแส LED จะส่องแสงไปที่โฟโต้ทรานซิสเตอร์ ทำให้โฟโต้ทรานซิสเตอร์ นำกระแสมีแรงดันเอาท์พุตตกคร่อมที่ R2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอาท์พุตของวงจรจะถูกควบคุมโดยอินพุต โดยทั้งอินพุตและเอาท์พุตแยกกันทางไฟฟ้าโดยสิ้นเชิง วงจรนี้นิยมนำไปใช้ในวงจรควบคุมแรงดันแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งในเครื่องรับ โทรทัศน์ วงจรควบคุมไฟวิ่งวัตต์สูง เป็นต้น



รูปที่ 2.31 แสดงวงจรใช้งานออปโต้คัปเปลอร์เบื้องต้น

หัวใจสำคัญของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงนั้นคือ " Current Transfer Ratio" (CTR) ซึ่งก็หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสอินพุต (Iin) ต่อกระแสเอาท์พุต(Iout) ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$CTR = IIN/IOUT \tag{2.16}$$

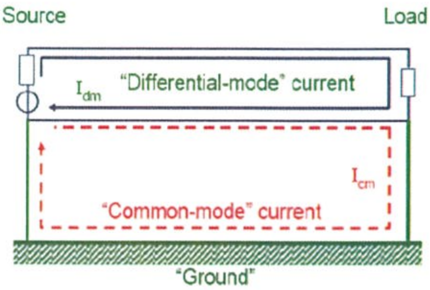
4. ลด series inductance เพื่อลด common impedance
5. แยกวงจร sensitive กับ high power
6. สายสั้นเพื่อลด common impedance
7. ตีเกลียวสายเพื่อลดพื้นที่ radiating loop สายสั้นเพื่อลด common impedance
8. แยกวงจร digital กับ analog
9. สาย main สั้นที่สุด และ socket ควรอยู่ใกล้หม้อแปลง
10 .ลด capacitive coupling
11. เพิ่มวงจร snubber circuit เพื่อช่วยลดผลการเกิด spike ที่ตัว switching device และยังช่วยลด EMI ลงได้ด้วย
12. ควรใช้สายแพ
13. ใช้ differential balance circuit
14. ใช้ balun เมื่อ impedance ด้าน input กับ output ไม่เท่ากัน
15. ใช้ optic isolator ลด common mode interference ระหว่างสองวงจร

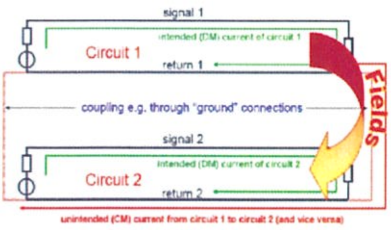
2.8.2 Ferrite bead

สายนำสัญญาณของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ๆ มักจะมีตุ้มหรือพลาสติกทรงกระบอกสีต่าง ๆ หุ้มรอบบริเวณปลายสายนำสัญญาณ ใกล้กับตัวอุปกรณ์นั้น ๆ เช่น สายจอมอนิเตอร์ คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น ซึ่งตุ้มที่กล่าวถึงนี้เราเรียกว่า Common mode coil (CMC) หรือ Ferrite bead หรือ Ferrite choke มีลักษณะเป็นโลหะกลวงประเภท ferrite ที่มีคุณสมบัติกึ่งแม่เหล็ก ทำจาก iron-oxide ผสมกับโลหะชนิดอื่น ๆ โดยนำมาประกบกับสายนำสัญญาณแล้วหุ้มพลาสติกทับอีกชั้นหนึ่ง CMC นี้มีคุณสมบัติในการกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณ โดยมันจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแพร่เข้ามาและเหนี่ยวนำให้กับลวดตัวนำในสายนำสัญญาณ ณ จุดที่มันอยู่แต่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนบน CMC เอง นอกจากนี้แหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนอาจเกิดจาก สายนำสัญญาณที่ทำตัวเสมือนกับสายอากาศ ให้กับสัญญาณที่วิ่งอยู่ในสายนำสัญญาณเอง โดยจะแพร่คลื่นออกไปรบกวนอุปกรณ์ที่รับสัญญาณได้ เช่น วิทยุและโทรทัศน์ และในขณะเดียวกัน สายนำสัญญาณก็สามารถที่จะรับสัญญาณมาจากที่อื่นได้เช่นกัน ดังนั้นเราจะมาศึกษากันว่า CMC สามารถลดการรบกวนของสัญญาณในสายนำสัญญาณได้ อย่างไร โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานพิสูจน์เป็นสมการ เพื่ออธิบายการทำงานของ CMC

กระแสไฟฟ้าทั้งหมดวิ่งเป็นลูป

จากกฎของ Kirchhoff ในข้อที่เกี่ยวกับกระแสไฟฟ้านั้น ได้นิยามไว้ว่า ผลรวมของกระแสไฟฟ้าในแต่ละโหนดของวงจรใด ๆ มีค่ารวมกันเท่ากับศูนย์ ($\Sigma I = 0$) ซึ่งเป็นจริงเสมอที่ทุกโหนดในวงจร และนิยามนี้ก็เป็นจริงกับทุก ๆ ตำแหน่งบนลวดตัวนำด้วย แต่ถ้าเราพิจารณาให้ดีแล้วจะเห็นว่า เมื่อกระแสไหลออกจากแหล่งกำเนิดและวิ่งไปบนลวดตัวนำแล้ว ก็ไม่มีจุดใดบนลวดตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดประจุขึ้นมาอีก ดังนั้นจากข้อสังเกตนี้ก็พอจะบอกให้เราทราบว่า ภายในวงจรใด ๆ ก็ตามจะต้องมีเส้นทางย้อนกลับให้แก่กระแสภายในวงจรเสมอ และด้วยเหตุนี้ ในทุกวงจรไฟฟ้าจะต้องมีลวดตัวนำอย่างน้อย 2 เส้นโดยกระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากแหล่งกำเนิดไปบนลวดตัวนำเส้นหนึ่ง และจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศตรงข้ามอีกเส้นหนึ่ง ซึ่งเราเรียกกระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า “Differential mode current (DMC) ” แต่ในความเป็นจริงแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับนี้มักจะมีมากกว่าหนึ่งเส้นทางเสมอ เนื่องจากลักษณะและการต่อเชื่อมวงจรจากส่วนต่าง ๆ ของทั้งระบบไปยังกราวด์ (Ground) นั่นเอง กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปตามเส้นทางย้อนกลับ ที่ไม่ใช่เส้นทางลวดตัวนำที่กำหนดไว้ (ตามกฎของ Kirchhoff) เช่น กระแสที่ไหลกลับผ่านลวดตัวนำเส้นอื่นหรือผ่านกราวด์ดังรูปที่ 2.32 จะทำให้ผลรวมสัมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากค่ากระแสไฟฟ้าเดิม ซึ่งกระแสไฟฟ้าส่วนเกินที่ไหลเข้ามาในลักษณะนี้ เรียกว่า “Common mode Current (CMC) ” ดังจะเห็นแล้วว่า นอกจากกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปบนลวดตัวนำทั้งสองเส้นที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเส้นทางอื่นที่กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับมาด้วย ทำให้ไม่เป็นไปตามกฎของ Kirchoff ซึ่งปัญหาที่เกี่ยวกับการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ จะเกิดจาก CMC ที่เป็นผลมาจากลักษณะการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณ และสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก CMC นี้ มักจะไหลเข้าไปในวงจรของ DMC ซึ่งปรากฏการณ์นี้ ก็คือ การรบกวนในสายนำสัญญาณของวงจร ดังรูปที่ 2.32





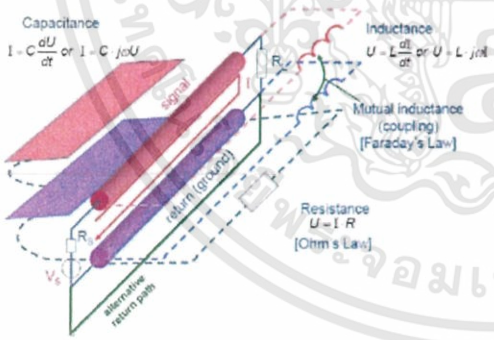
รูปที่ 2.32 เส้นทางการไหลของ Common mode current

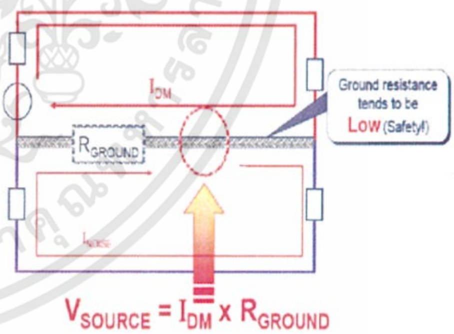
รูปที่ 2.33 เส้นทางการเกิดการรบกวนสัญญาณของ Common mode current

การรบกวนสัญญาณในรูปที่ 2.33 จะเกิดขึ้นเมื่อมีเส้นทางอื่นให้กระแสไฟฟ้า DMC ในวงจร 1 นี้ไหลไปรบกวนกับ DMC ในวงจร 2 ภายในระบบเดียวกัน ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดเมื่อ CMC ไหลผ่านจุดเชื่อมต่อตัวนำระหว่างวงจร 1 กับวงจร 2 เช่น กราวด์ที่เชื่อมต่อกัน เป็นต้น และความเป็นไปได้อีกอย่าง คือ กระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าในวงจร 1 ผลิตสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า แล้วไปเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในวงจร 2 ได้ (หรือจากวงจร 2 ไปวงจร 1) ดังนั้น การเชื่อมต่อภายในระบบมักจะเป็นปัจจัยที่สำคัญของการส่งผ่านสัญญาณรบกวนนั่นเอง

องค์ประกอบ RLC ภายในวงจร

ลักษณะการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณ จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบได้ซึ่งวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณ เราสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ได้ 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 3กล่าวคือ





รูปที่ 2.34วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อในสายนำสัญญาณ **รูปที่2.35** Resistance crosstalk

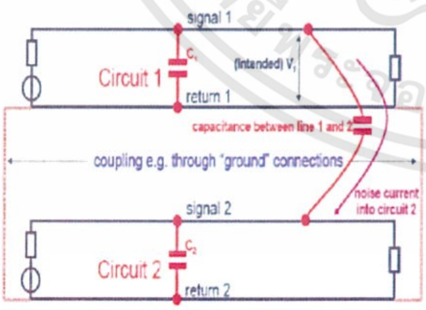
1. Resistance ทันทีที่กระแสไหลผ่านตัวนำ เราสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าตามจุดต่าง ๆ บนสายนำสัญญาณได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าจะเป็นไปตาม กฎของโอห์ม
2. Capacitance แสดงถึงผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้า โดยที่เราทราบว่า capacitor นั้นประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่น และมีความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นตัวนำนั้น แต่ในสถานการณ์ที่เรากำลังกล่าวถึงนี้หมายถึง เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเส้นหนึ่งซึ่งแทนด้วยแผ่นตัวนำแผ่นหนึ่ง และแผ่นตัวนำอีกแผ่นหนึ่ง อาจจะเป็นเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าภายนอกวงจร หรือระบบก็ได้ เช่นสายกราวด์ หรือกล่องโลหะที่บรรจุวงจรนี้อยู่ สิ่งที่เราสังเกตได้จากผลของความเป็น

capacitance นี้ก็คือเมื่อศักย์ไฟฟ้าของแผ่นตัวนำหนึ่งเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของแผ่นตัวนำอีกแผ่นหนึ่ง ทำให้เกิดความต่างศักย์ของแผ่นตัวนำทั้งสอง ยิ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์นี้มีความถี่มากเท่าใดปริมาณกระแสไฟฟ้าก็จะมากขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของcapacitor จะขึ้นอยู่กับความถี่ โดยมีสมการที่มี $j\omega$ เป็นองค์ประกอบ

3. Inductance แสดงถึงผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ส่งผลให้มีปริมาณของฟลักซ์สนามแม่เหล็กจำนวนหนึ่งเกิดขึ้นในวงจร และเส้นฟลักซ์เหล่านี้ลักษณะเป็นเส้นปิด ล้อมรอบสายนำสัญญาณ และเส้น ฟลักซ์ทุกเส้นจะไม่ตัดกัน ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ของ inductor จะขึ้นอยู่กับความถี่เช่นเดียวกัน Inductance และ Capacitance นี้เป็นผลกระทบที่เกิดในลักษณะเสริมกันและกัน นั่นคือ Mutual inductance และ Mutual capacitance ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานของการเกิดการรบกวนระหว่างวงจรสองวงจรที่แยกกันอยู่ (โดยเป็นไปตามกฎของ Faraday และ Gauss)

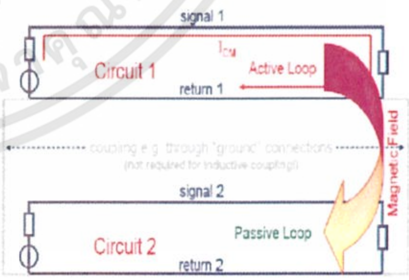
การรบกวนสัญญาณที่มีผลมาจาก Resistance

ถ้าวงจรไฟฟ้าสองวงจร มีลวดตัวนำเป็นเส้นทางไหลกลับ ของกระแสไฟฟ้าต่อเชื่อมร่วมกันอยู่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรหนึ่ง สามารถส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าอีกวงจรหนึ่งได้ เราเรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า Crosstalk ดังรูปที่ 2.35 ซึ่งแสดงถึงตัวอย่างที่เกิด crosstalk นั่นคือ เมื่อลวดตัวนำที่เป็นเส้นทางไหลกลับของกระแสไฟฟ้ามีค่าความต้านทานเกิดขึ้น ผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในแหล่งกำเนิดกับค่าความต้านทานลวดตัวนำนี้ จะมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏในวงจรทั้งสอง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในวงจรที่เป็นแหล่งกำเนิดของกระแสไฟฟ้านี้ ก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย (voltage loss) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อวงจร ในขณะที่อีกวงจรหนึ่ง ค่าศักย์ไฟฟ้านี้คือแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนค่าความต้านทานไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน จะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนแบบเชิงเส้น นั่นคือ ปริมาณของกระแสไฟฟ้ารบกวนในวงจรที่ถูกรบกวนนั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณของความต้านทานที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้ว ลวดตัวนำที่เป็นเส้นทางย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า มักจะเป็นสายกราวด์ของระบบที่มีวงจรทั้งสองนี้เชื่อมต่ออยู่



รูปที่ 2.36 Capacitive crosstalk

ผลกระทบที่เกิดจาก Capacitive EMI effect



รูปที่2.37 Inductive crosstalk

การรบกวนสัญญาณที่มีผลมาจาก capacitance นั้นจะเกิดในรูปของสนามไฟฟ้าระหว่างสายนำสัญญาณของวงจรทั้งสอง จากสมการของ Gauss's Theorem ใช้อธิบายขบวนการที่เกิดขึ้นนี้ ถ้าระดับศักย์ไฟฟ้าของสายนำ สัญญาณในวงจร 1 เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับสายนำ สัญญาณในวงจร 2 สนามไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนเช่นเดียวกัน (จากสมการ $E = V/d$)โดยจะไปเหนี่ยวนำให้ประจุ

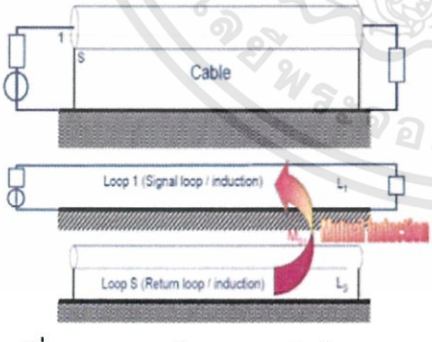
ไฟฟ้าในสายนำ สัญญาณวงจร 2 เคลื่อนที่ไป ซึ่งก็คือกระแสไฟฟ้านั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.36 เราอาจกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้ารบกวนนั้นไหลจากวงจร 1 ไปยังวงจร 2 ก็ได้ ผลที่เกิดจาก Capacitive crosstalk นี้จะเกิดในระบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ๆ แต่ถ้าในระบบที่มีค่ากระแสไฟฟ้าสูง ๆ แต่อิมพีแดนซ์ต่ำ ๆ สนามแม่เหล็กจะมีอิทธิพลมากกว่า และจะเกิด Inductive crosstalk ขึ้น

ผลกระทบที่เกิดจาก Inductive EMI effect

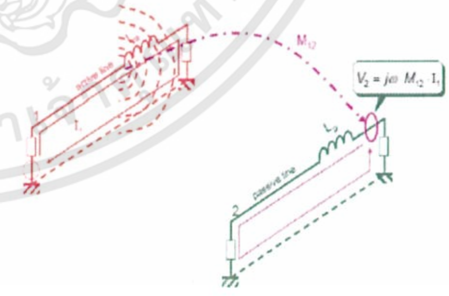
สัญญาณรบกวนที่มีผลมาจาก inductance จะเกิดขึ้นในรูปของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.37 วงจร 1 มีกระแสไฟฟ้าแบบ DMC ไหลในวงจร ถ้าลวดตัวนำที่เป็นสายนำสัญญาณและลวดตัวนำที่เป็นเส้นทางไหลกลับของกระแสไฟฟ้า มีระยะห่างกันพอสมควรแล้ว จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในวงจร 1 แพร่คลื่นแม่เหล็กออกมา โดยมีวงจร 2 เป็นตัวรับสนามแม่เหล็กนี้ แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาจากเดิม ถึงแม้ว่าวงจรทั้งสองจะไม่มีการเชื่อมต่อกราวด์ถึงกันก็ตาม เราเรียกว่า Inductive Crosstalk

ลวดตัวนำและสกรีนทำหน้าที่เป็นตัวแปลงไฟฟ้า

เราสามารถที่จะพิจารณาสายนำสัญญาณเป็นเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) ได้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.38 โดยลวดตัวนำแกนกลางและสกรีนนั้น ต่ออยู่กับเส้นทางย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายนอก ซึ่งอาจเป็นผนังของกล่องโลหะที่สายนำสัญญาณนี้เชื่อมต่ออยู่ก็ได้ โดยลวดตัวนำแกนกลาง หมายเลข 1 นั้นเป็นลวดตัวนำที่มีสัญญาณไหลผ่าน และต่ออยู่กับแหล่งกำเนิด โหลด และผนังของกล่องโลหะ ที่ประกอบกันเป็นเสมือนวงจรของสัญญาณ (วงจร 1) โดยมีค่า inductance L_1 ที่สามารถวัดได้ ส่วนสกรีนซึ่งต่ออยู่กับผนังของกล่องโลหะเช่นกัน จะก่อตัวเป็นเสมือนวงจรไหลย้อนกลับของ กระแสไฟฟ้า (วงจร S) และมีค่า inductance L_S เมื่อไรก็ตามที่กระแสไฟฟ้าในวงจร S มีการเปลี่ยนแปลง มันจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าในวงจร 1 ตามกฎของ Faraday เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า mutual inductance และสามารถแทนด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.38 แบบจำลองสายนำสัญญาณ

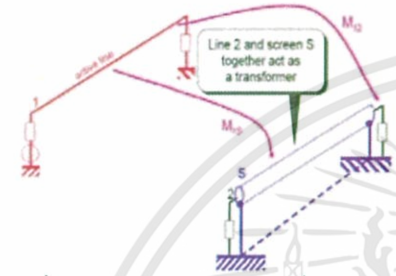


รูปที่ 2.39 crosstalk ที่เกิดระหว่างวงจร

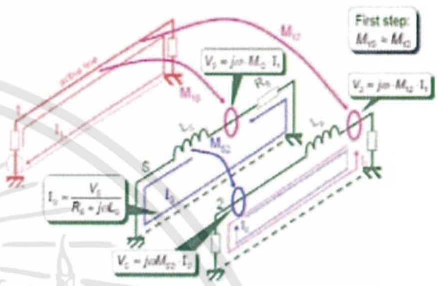
การเกิด Crosstalk ระหว่างวงจร

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป เราจะใช้สายนำสัญญาณที่ประกอบด้วยลวดตัวนำอย่างน้อยสองเส้นมัดรวมกันเป็นเกลียวเพื่อทำให้ลูปมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งจะเป็นการลดสนามรบกวนที่แพร่ออกมากจากสายนำสัญญาณได้ และผลดีอีกอย่างก็คือ ทำให้เกิดการชีลด์ในสายนำสัญญาณ โดยมีสกรีน

ตัวนำหุ้มรอบลวดตัวนำสัญญาณไว้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ สาย Coaxial นั่นเอง ถ้าสายนำสัญญาณนี้ปราศจากการชีลด์ด้วยสกรีนแล้ว สายนำสัญญาณสองเส้นที่วางอยู่ใกล้กันจะเกิดการ crosstalk ขึ้น อันเนื่องมาจาก mutual induction นั่นเอง จากรูปที่ 2.39 เป็นการจำลองให้เห็นถึงการเกิด crosstalk ระหว่างสายนำสัญญาณ 2 เส้นที่ต่อเป็น ลูปและมีกราวด์ร่วมกัน สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากวงจร 1 (active) จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวน (ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าเสมือน) ในสายนำสัญญาณวงจร 2 (passive) ตามกฎของ Faraday และแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนนี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารบกวน ที่ไหลไปยังโหลดที่ต่ออยู่



รูปที่ 2.40 สายนำสัญญาณที่มีสกรีนห่อหุ้ม



รูปที่2.41การเกิดmutualระหว่าง inductance ลวดตัวนำ

ขั้นต่อไปคือ การเพิ่มการชีลด์ (คือ สกรีนเครื่องหมาย S) ในรูปที่ 2.40 ให้แก่สายนำสัญญาณที่ต้องการปกป้อง คือสายนำสัญญาณหมายเลข 2 ถ้าสกรีนนี้ไม่ได้ต่อเข้ากับกราวด์ หรือต่อเข้ากับกราวด์เพียงข้างเดียวแล้ว การป้องกันการรบกวนจากแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนในสายนำสัญญาณหมายเลข 1ก็จะไม่ได้ผล เมื่อเราต่อสกรีนเข้ากับกราวด์ทั้งสองข้างแล้ว เราก็จะได้ลวดตัวนำรูปแบบวงจรปิด และตัวสกรีนก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนผ่านมาทาง mutual inductance และเกิดกระแสไฟฟ้ารบกวนเช่นเดียวกับสายนำสัญญาณ (หมายเลข 2) ดังนั้นทั้งสกรีนและสายนำสัญญาณ หมายเลข 2 จะประกอบกันขึ้นเป็นเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) กระแสไฟฟ้ารบกวนในสกรีนก็จะเหนี่ยวนำผ่าน mutual inductance อีกครั้งในสายนำสัญญาณหมายเลข 2 ซึ่งการเหนี่ยวนำครั้งหลังนี้ จะมีผลในทางการป้องกันการรบกวนจากสายนำสัญญาณหมายเลข 1 ที่แท้จริง

ผลกระทบที่เกิดจากการชีลด์

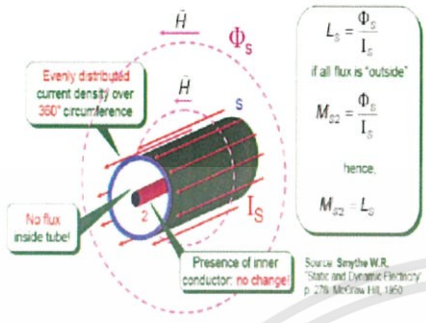
ในรูปที่ 2.41 ตัวนำที่ทำหน้าที่ชีลด์ ก็คือสกรีน S สำหรับสายนำสัญญาณทุกเส้นรวมทั้งสกรีนนี้ประกอบกันเป็นวงจรปิดและต่ออยู่กับกราวด์ ขบวนการของการเกิดการป้องกันมีดังนี้

1. สายนำสัญญาณ 1 เหนี่ยวนำให้เกิด ศักย์ไฟฟ้ารบกวนในสายนำสัญญาณ 2 แทนด้วย V_2 และในสกรีน S แทนด้วย V_s

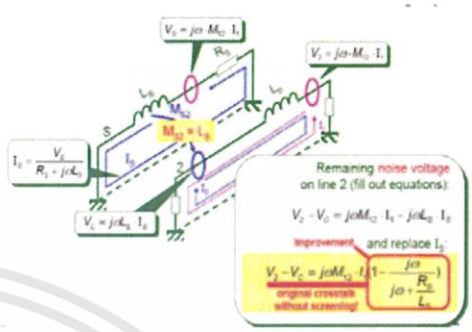
2. ในเมื่อสกรีนนี้มียาวเท่ากับสายนำสัญญาณ 2 แล้ว ดังนั้น mutual inductance ระหว่างสายนำสัญญาณ 1 และ 2 (M_{12}) จะมีค่าเท่ากับ mutual inductance ระหว่างสายนำสัญญาณ 1 และสกรีน (M_{1S})

3. ศักย์ไฟฟ้ารบกวนในสกรีน (V_S) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารบกวน (I_S) เราสามารถแสดงปริมาณศักย์ไฟฟ้ารบกวน และอิมพีแดนซ์ของสกรีน ในรูปของค่า inductance L_s และ resistance R_s (นั่นคือ $V_S=I_S(R_S+j\omega L_S)$

4. กระแสรบกวน Is ในสกรีน จะผลิตสนามแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำวงจรของสายนำสัญญาณ 2 ทำให้เกิดแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า V_c (นั่นคือ $V_c=j\omega M_{S2}I_S$) การป้องกันการรบกวนจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อ V_2 และ V_c มีค่าเท่ากัน (นั่นคือ $V2=j\omega M_{12}I_1$)



รูปที่ 2.42 mutual inductance



รูปที่ 2.43 วงจรในอุดมคติ

ภายในท่อโลหะจะไม่มีสนามใด ๆ

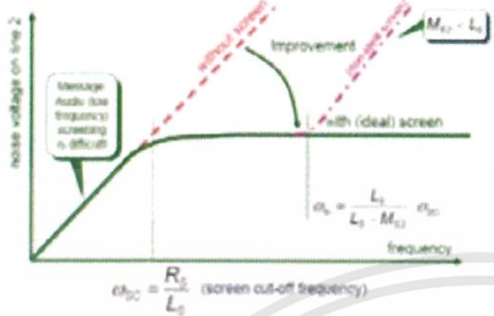
ขั้นตอนต่อไปเราจะพิจารณาถึง ค่า mutual inductance *Ms2* (ความเหนี่ยวนำร่วม) ระหว่างสกรีน S และสายนำสัญญาณ 2 ดังรูปที่ 2.42 ซึ่งก็คือ ปริมาณของฟลักซ์ในวงจรของสายนำสัญญาณ 2 ที่เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าในสกรีน S ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสกรีนทรงกระบอกนี้ จะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอไปตามเส้นรอบวงของทรงกระบอก โดยเราสามารถพิสูจน์ได้ว่าไม่มีสนามใด ๆ ปรากฏอยู่ภายในเนื้อสกรีนทรงกระบอกนี้ นั่นหมายถึง สนามทั้งหมดที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าในสกรีนนี้ จะอยู่ภายนอกผิวของสายนำสัญญาณ ฟลักซ์ที่อยู่ภายนอก Φ_s เมื่อหารด้วยกระแสไฟฟ้าของสกรีน I_s จะมีค่าเท่ากับ ค่า inductance ของสกรีน Ls และจากความสัมพันธ์ของฟลักซ์และกระแสไฟฟ้า นี้เอง เรากล่าวได้ว่า $M_{s2} = L_s$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่านี้เป็นเพียงแค่ค่าการประมาณเท่านั้น และ M_{s2} นี้ก็มีค่าน้อยกว่า L_S

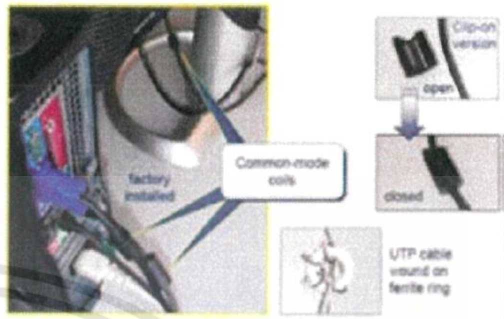
วงจรในรูปที่ 2.43 สมมติให้เป็นวงจรในอุดมคติ เราสามารถแทนที่ M_{s2} ด้วยค่า L_s จากนั้นคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้ารบกวนที่เหลือจากผลต่างของ V_2 $-V_c$ ซึ่งผลที่ได้ก็คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ารบกวนเริ่มต้นในสายนำสัญญาณที่ 2 คูณด้วย ค่า “Screen Effect” ดังแสดงในสมการ

$$V_2 - V_C = j\omega M_{12} I_1 \left(1 - \frac{j\omega}{j\omega + \frac{R_S}{L_S}}\right) \tag{2.17}$$

ทำการพล็อตค่า ศักย์ไฟฟ้ารบกวนที่ได้เทียบกับความถี่ จากสมการ (1) ดังแสดงในรูปที่ 2.44 จะเห็นว่าที่ความถี่ย่านต่ำ ๆ ตัวสกรีนนั้นไม่ได้ช่วยอะไรมาก แต่จะเริ่มมีผลที่ตั้งแต่ความถี่ cut-off ($\omega_{sc} = \frac{R_S}{L_S}$) เป็นต้นไป และศักย์ไฟฟ้ารบกวนก็จะยังคงอยู่ในระดับคงที่ แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่า M_{S2} มีค่าน้อยกว่า L_S ดังนั้น จากกราฟจะเห็นว่า ศักย์ไฟฟ้ารบกวนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความถี่ โดยเริ่มต้นที่ความถี่เท่ากับ

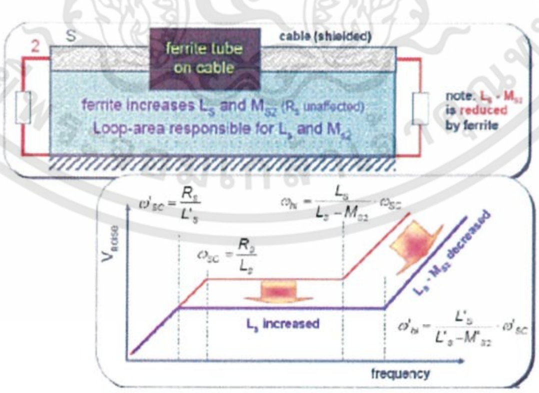
$$\omega_{ht} = \frac{L_S}{L_S - M_{S2}} \omega_{SC} \tag{2.18}$$





รูปที่ 2.44 ศักย์ไฟฟ้ารบกวนที่ได้เทียบกับความถี่ **รูปที่ 2.45** Common mode coil

จากกราฟและสมการที่ได้ข้างต้น จะเห็นได้ว่า ถ้าเราเพิ่มความกว้างของระดับสัญญาณรบกวนที่เป็นแบบเชิงเส้นมากขึ้น ก็จะเป็นผลดีต่อระบบหรือวงจรที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์ที่จะช่วยปรับปรุงระดับสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้นั้น ก็คือ Common mode coil หรือ Choke ซึ่งเป็นโลหะ ferrite ทรงกระบอกประกบอยู่รอบสายนำสัญญาณ ดังรูปที่ 2.45 เรามักจะเห็นอยู่ทั่วไปบนสายนำสัญญาณที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ CMC นี้มีลักษณะเป็นอุปกรณ์ประเภท passive ที่หน้าที่คล้ายกับ impedance ให้แก่ สัญญาณที่มีความถี่สูง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนไหลผ่านไม่ได้ หรือจำกัดให้กระแสไฟฟ้าในสายนำสัญญาณเองไหลผ่านในลวดตัวนำเท่านั้น นอกจากนี้ยังมี CMC ที่เป็นแบบประเภทหนีบ เพื่อใช้เป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนเฉพาะหน้าได้ หรืออาจทำด้วย toroid ซึ่งเราจะพันสายนำสัญญาณรอบ toroid นี้ 2 - 3 รอบเพื่อแก้ปัญหาได้เช่นกัน



รูปที่ 2.46 ferrite tube on cable

จากรูปที่ 2.46 ตัว CMC นี้ จะไปเพิ่มค่า L_s และ M_{s2} ในขณะที่ลดผลต่างระหว่างค่า L_s และ M_{s2} ได้ เมื่อค่า L_s เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ cut-off ของสกรีนลดลง และเมื่อผลต่างระหว่าง L_s และ M_{s2} ลดลงแล้วค่าของความถี่ high-pass (ωhi) ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ช่วงของระดับสัญญาณที่เป็นแบบเชิงเส้นขยายกว้างมากขึ้น นั่นหมายถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการป้องกันการรบกวนของสายนำสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ของสัญญาณถึงจุด ๆ หนึ่งที่ความถี่ high-pass (ω_{hi})ใหม่แล้ว ระดับสัญญาณรบกวนก็จะไม่เป็นแบบเชิงเส้นอีกต่อไป ทั้งนี้ค่าความถี่ใหม่นี้จะเป็นเท่าใดขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของ coil ที่นำมาใช้ [11]

2.8.3 วงจรกรองแบบพาสซีฟ

เนื่องจากภายในชุกคอนเวอเตอร์มีวงจรกรองแบบพาสซีฟซึ่งจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่จะช่วยลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [9]

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ Passive

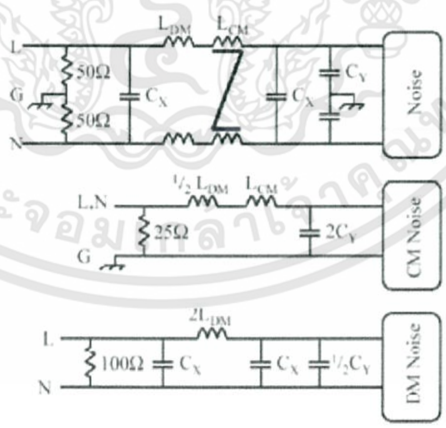
วงจรกรองความถี่หรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร

วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1.แบบ Passive คือวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำงาน ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

2.แบบ Active คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ทรานซิสเตอร์ หรือ ไอซี

Passive EMI Filter



รูปที่ 2.47 โครงสร้าง Passive EMI Filter

1. สมการการลดทอนสัญญาณรบกวน

ใช้ในการหาความสามารถ ของวงจรในการลดทอนสัญญาณรบกวนว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด โดยหาจากสมการ

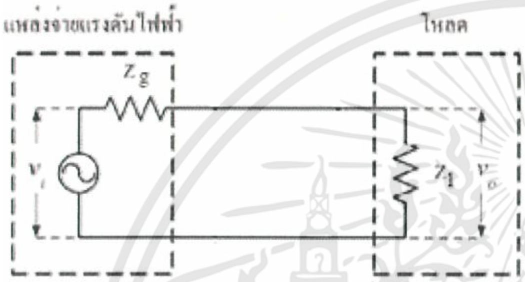
$$A_{dB} = 20\log_{10}[\frac{V_{wo}}{V_w}]$$

(2.19)

V_{wo} : แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

V_w : แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

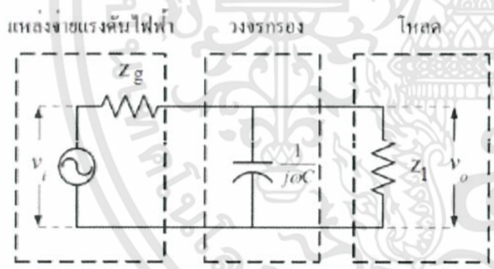
2. ใส่ตัวเก็บประจุในวงจร



แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อ**<u>ไม่ได้ใส่</u>**วงจรกรองสัญญาณรบกวนมีค่าเป็น

$$V_{WO} = (\frac{Z_l}{Z_l + Z_g})V_i \tag{2.20}$$

รูปที่ 2.48 ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



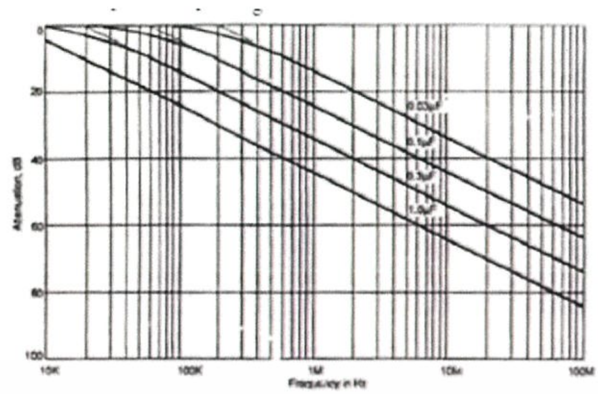
แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อ<u>ใส่</u>วงจรสัญญาณรบกวนมีค่าเป็นค่า

$$V_W = (\frac{Z_l // Z_C}{(Z_l // Z_C) + Z_g})V_i \tag{2.21}$$

รูปที่ 2.49 ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

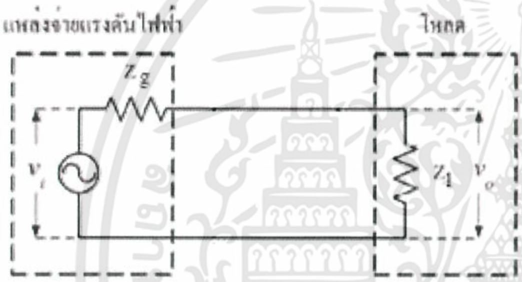
$$A_{dB} = 20\log_{10}\left[\frac{V_{WO}}{V_W}\right] = 20\log_{10}\left[1 + \frac{Z_l // Z_g}{Z_C}\right] \tag{2.22}$$

จากค่า A จะเห็นว่าได้ว่า ถ้า Z_C <<($Z_l//Z_g$) การลดทอนสัญญาณรบกวนจะทำได้ดีมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.50 การลดทอนสัญญาณรบกวน

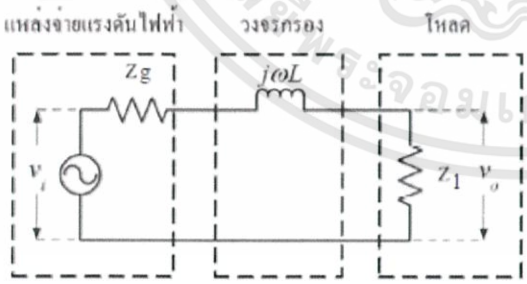
3. ใส่ตัวเหนี่ยวนำในวงจร



แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อ**<u>ไม่ได้ใส่</u>**วงจรกรองสัญญาณรบกวนมีค่าเป็นค่า

$$V_{WO} = \left(\frac{Z_l}{Z_l + Z_g}\right)V_i \tag{2.23}$$

รูปที่ **2.51** ไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



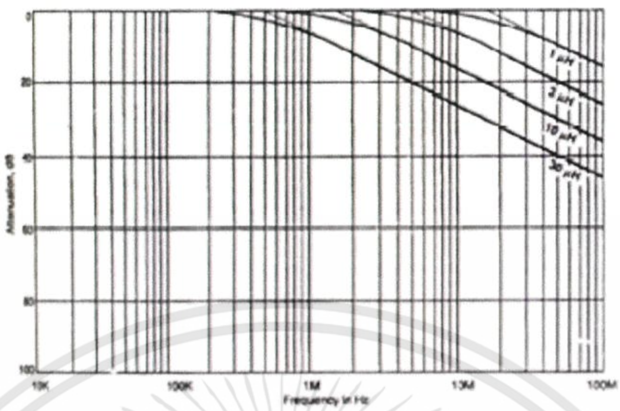
แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเมื่อ<u>ใส่</u>วงจรสัญญาณรบกวนมีค่าเป็นค่า

$$V_W = \left(\frac{Z_l}{Z_g + Z_{ind} + Z_l}\right)V_i \tag{2.24}$$

รูปที่ **2.52** ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

$$A_{dB} = 20\log_{10}\left[\frac{V_{WO}}{V_W}\right] = 20\log_{10}\left[1 + \frac{Z_{ind}}{Z_g + Z_l}\right] \tag{2.25}$$

จากค่า A จะเห็นว่าได้ว่า ถ้า $Z_{ind} >> (Z_g+Z_l)$ การลดทอนสัญญาณรบกวนจะทำได้ดีมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.53 การลดทอนสัญญาณรบกวน

จากค่า A ที่ได้ทั้ง 2 กรณี จะเห็นได้ว่า

- ประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองโดยการใช้ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่จะนำมาต่อโดยประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวน(Attenuation) สูงสุดจะเท่ากับ 20 dB/decade

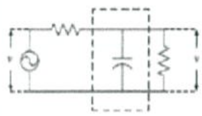
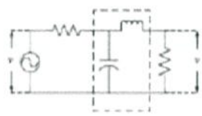
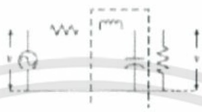
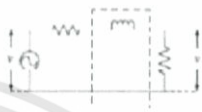
- วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ C จะเหมาะสำหรับต่อร่วมกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายและโหลดที่สูงเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของตัววงจรกรองเอง

- วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำจะเหมาะสำหรับต่อร่วมกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายและโหลดต่ำเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัววงจรกรองเอง

ถ้าต้องการประสิธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนเท่ากับ -40dB/decade เราก็สามารถใช้วงจรกรองแบบ “LC” ได้ โดยค่าอิมพีแดนซ์สูงจะต้องต่อกับด้านที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ต่ำควรจะต่ออยู่กับด้านที่ต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนั้นในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองยังสามารถทำได้โดยการต่อวงจรกรองแบบต่างๆ อนุกรมกันได้ เป็นต้น

กล่าวโดยสรุป ถ้าต้องการกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง ต้องใช้ passive EMI filter แบบ low-pass ซึ่งจะไม่ยอมให้ค่าสัญญาณที่ความถี่สูงผ่านไปได้ โครงสร้างของฟิลเตอร์ดังกล่าวได้แก่ L,π และ T

ตารางที่ 2.3 สรุปการเลือกใช้วงจรกรองที่เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและของโหลด

Z_l / Z_g	High	Low
High		
Low		

2.9 วงจรกรองแบบแอคทีฟ (active filter)

2.9.1 EMI Active Filter

Active Filter คือ วงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์, ออปแอมป์ หรือไอซีวงจรรวมต่างๆ โดยนำมาต่อร่วมกับ ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุ ข้อดีของวงจรแบบนี้ก็คือสามารถขยายสัญญาณได้ด้วย และยังสามารถทำงานในระบบอนาลอกหรือดิจิตอลก็ได้ด้วย

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแอคทีฟ

โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองแบบพาสซีฟ(LC passive filter) จะใช้เพื่อชดเชยแรงดันกระเพื่อม สำหรับการกรองที่เหมาะสม วงจรกรองแบบพาสซีฟจะต้องมีย่านความถี่ที่กว้าง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกรองฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆของพาสซีฟฟิลเตอร์ก็ได้ผลที่ไม่น่าพึงพอใจ ดังนั้นจึงกรองฮาร์มอนิกส์อันดับสูงแทน จากลักษณะดังกล่าวจะทำให้ขนาดและน้ำหนักของวงจรกรองแบบพาสซีฟเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานและการควบคุมของระบบวงรอบปิดจะลดลงในกรองฮาร์มอนิกส์อันดับสูง ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในวงจรกรองแบบพาสซีฟภายใต้เงื่อนไขของเวลาและสิ่งแวดล้อมจะทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบพาสซีฟลดลง ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย วงจรกรองแรงดันกระเพื่อมแบบแอคทีฟ (active ripple filter) วงจรกรองแรงดันกระเพื่อมแบบแอคทีฟมีความทนทานและมีการลดทอนที่ดีกว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟ วงจรกรองแบบแอคทีฟและพาสซีฟจะแตกต่างกันโดย วงจรกรองแบบพาสซีฟจะดูดซับพลังงานของแรงดันกระเพื่อมและแลกเปลี่ยนกับระบบ แต่วงจรกรองแบบแอคทีฟจะชดเชยพลังงานของแรงดันกระเพื่อม

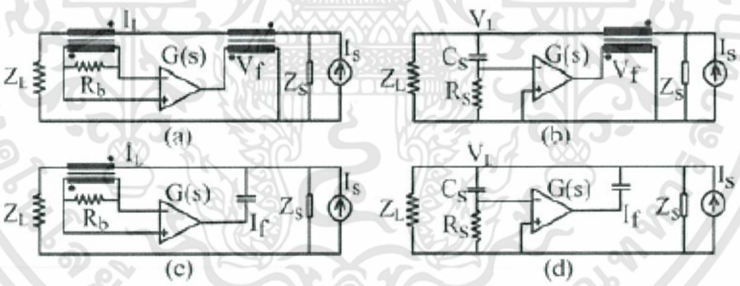
การเชื่อมต่อวงจรกรองแบบแอคทีฟเข้ากับวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรง ถ้าออปแอมป์เป็นแบบอุดมคติกระแสกระเพื่อมจะกลายเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติช่วงความถี่ของออปแอมป์จะมีการจำกัดประสิทธิภาพของวงจรกรอง ออปแอมป์ที่ใช้อัตราขยายเท่ากับ 1 จะรักษาช่วงความถี่ที่สูงที่สุด ชนิดของออปแอมป์จะขึ้นอยู่กับการใช้งานโดยจะให้ค่า phase error และความ

ผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด ช่วงความถี่ของออปแอมป์ไม่จำเป็นที่จะต้องครอบคลุมเสปคตรัมของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด เนื่องจากเสปคตรัมกระแสรบกวนมักจะลดต่ำลงในช่วงความถี่สูงด้วยอัตรา 40 dB/dec ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกอัตราขยายช่วงความถี่ให้มีค่าสูงพอที่จะให้การลดทอนสัญญาณรบกวนที่ดีต่อฮาร์มอนิกส์ในช่วงแรกๆของความถี่สวิตชิ่ง และในส่วนของฮาร์มอนิกส์ที่เหลือจะถูกกำจัดโดยวงจรกรองแบบพาสซีฟ

ซึ่งเราอาจต้องการใช้งานวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแอคทีฟ เพื่อการกำจัดฮาร์โมนิคที่ความถี่วิทยุ(RF) เนื่องมาจากการใช้งานอุปกรณ์สวิตชิ่งที่อาจจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ดังกล่าวได้ [3,4]

2.9.2 โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวน EMI แบบแอคทีฟ

วงจรกรองสัญญาณรบกวน EMI แบบแอคทีฟลดสัญญาณรบกวน EMI โดยการตรวจจับสัญญาณรบกวนและทำการชดเชย รูปที่ 2.54 แสดงโครงสร้างทั้ง 4 ชนิดของ feedback วงจรกรองแบบแอคทีฟ วงจรแปลงผันกำลังแสดงโดยแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน Is และความต้านทานทาน Z_s พารามิเตอร์ Z_L คือ ความต้านทานของ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network, LISN) ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวน EMI ในช่วงความถี่ที่สนใจ การจำแนกโครงสร้างพื้นฐานออกเป็น 4 แบบ ตามการตรวจจับ (สัญญาณรบกวนทางกระแส/แรงดัน) และชนิดของการป้อนสัญญาณรบกวนกลับ (ฉีดกระแส/แรงดัน) เพื่อชดเชย [7]



รูปที่ 2.54 โครงสร้างวงจรกรอง EMI แบบแอคทีฟ a) current-sense voltage-feedback b) voltage- ense voltage-feedback c) current-sense current-feedback d) voltage-sense current-feedback [7]

บทที่ 3 การออกแบบและการจำลอง

3.1 การออกแบบ

3.1.1 ในการออกแบบ Ćuk Converter ในโครงงานนี้ได้ทำการเลือกค่าความถี่คงที่และปรับเปลี่ยนค่า Duty Ratio แล้วทำการคำนวณหาค่าองค์ประกอบในวงจรให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยที่นี้ได้เลือกใช้ค่าความถี่ที่ 50 kHz ซึ่งเหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากเป็นความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สัญญาณขาออกมีแรงดันที่คงที่กว่าในกรณีที่เลือกความถี่ต่ำๆ

3.1.2 ในการหาค่าDuty Ratio นั้นเราจะต้องกำหนดค่า V_o ของวงจรก่อนแล้วจึงนำไปหาค่า Duty Ratio จากความสัมพันธ์ $V_o = \frac{D}{1-D}V_s$ ซึ่งค่า Duty Ratio นี้เราสามารถเปลี่ยนได้จากการควบคุมโดยวงจรสร้างสัญญาณ Saw-tooth

จากค่าพารามิเตอร์โซล่าเซลล์

กระแสลัดวงจรสูงสุด 7.45 A

แรงดันเปิดวงจรสูงสุด 21.5 V

การคำนวณหาค่า Duty Cycle

ต้องการแรงดันขาออก 12 V

จากสมการ

$$V_0 = \frac{D}{1-D}V_s$$

$$DV_s = V_o - DV_o$$

$$V_o = (V_s + V_o)D$$

จะได้

$$D = \frac{V_o}{V_S + V_O}$$

$$= \frac{12}{21.5+12}$$

$$D = 0.3582$$

3.1.3 ในการเลือกค่า Component ในวงจร ในส่วนของ Inductor (L_1 และ L_2) จะขึ้นอยู่กับค่า Ripple Current ส่วนค่า Capacitor (C_1 และ C_2) จะขึ้นอยู่กับค่า Ripple Voltage โดยจะคงค่า Ripple Current และ Ripple Voltage ที่ 1% หรือ0.01 เพื่อประสิทธิภาพที่ดีของ Ćuk Converter

คำนวณค่า L โดยใช้ความถี่ 50 kHz และ Duty ที่ 0.3582

จากสมการ

$$\Delta IL = \frac{V_s.D}{L_1}$$

จะได้ $$L = \frac{V_s.D}{\Delta I_L f}$$

$$L = \frac{21.5 \times 0.3582}{0.01 \times 50000}$$

$$L = 15.4026$$

ดังนั้นเราเลือกค่า L เป็น 15.5 mH

คำนวณค่า C_1

จากสมการ $$\Delta V_{C1} = \frac{(1-D)I_S}{fC_1}$$

จะได้

$$C_1 = \frac{(1-D)I_S}{\Delta V_{C1} f}$$

$$C_1 = \frac{(1-0.3582)7.45}{0.01 \times 50000}$$

$$C_1 = 9.5628 \text{ mF}$$

ดังนั้นเลือกใช้ C_1 เป็น 10 mF

คำนวณค่า C_2

จากสมการ

$$\Delta V_{c2} = \frac{(1-D)V_o}{8LC_2 f^2}$$

จะได้

$$C_2 = \frac{(1-D)V_o}{8\Delta V_{C2} L f^2}$$

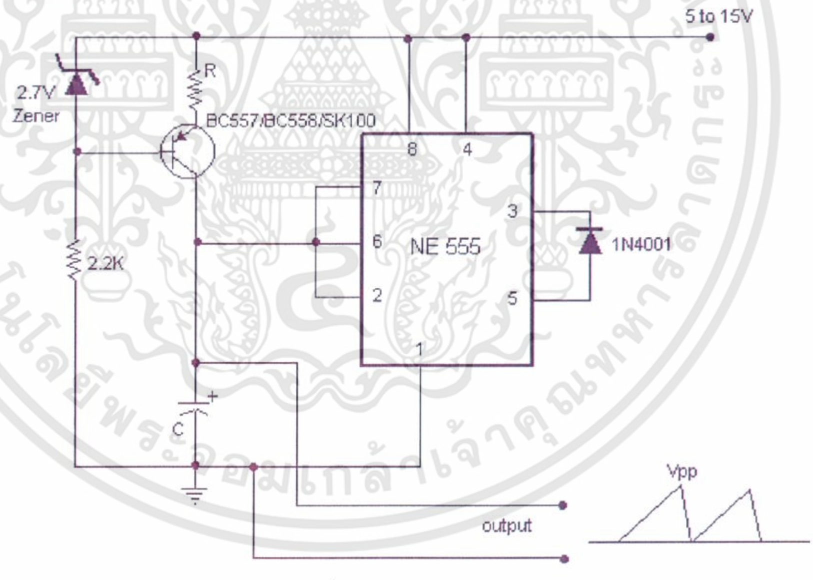
$$C_2 = \frac{(1-0.3582)12}{8\times 0.01\times 15.5\times 10^{-3}\times 50000^2}$$

$$C_2 = 2.4844\ \mu\text{F}$$

ดังนั้นเลือกใช้ C_2 เป็น 3.3 μF

3.1.4 ในการเลือกตัว Switching นั้นใช้ MOSFET ในการ Switching เนื่องจากทำงานในย่านความถี่สูง ตัวขับMOSFET ได้มาจากการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันขาออกกับสัญญาณที่ได้จากวงจร Saw-tooth

การออกแบบSaw-tooth



รูปที่ 3.1 วงจร Saw-Tooth

$$f = \frac{(V_{cc}-2.7)}{(2\times RCV_{pp})}$$

$$V_{pp} = \frac{2V_{cc}}{3}$$

เนื่องจากต้องการนำสัญญาณขาออกวงจร saw-tooth ไปเปรียบเทียบสัญญาณขาออกที่นำไปขับโหลด *12 V* ถ้ากำหนดให้ V_{PP} เป็น 12 V จะได้ค่า V_{CC} เป็น 18 V แต่ไฟเลี้ยงของไอซี 555 จะอยู่ระหว่าง 5- 15 V ดังนั้นเราจะใช้ V_{pp} เป็นค่าอยู่ในช่วง 6 – 7 V แล้วนำสัญญาณขาออก

ของ saw-tooth ไปขยายแรงดันสองเท่า เพื่อให้ได้สัญญาณขาออกอยู่ในช่วง 12 – 14 V จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเลือกค่า V_{CC} เป็น 10 V จะได้ค่า V_{PP} เป็น 6.67 V ซึ่งอยู่ในช่วงที่เราต้องการ แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยที่เราจะเลือกใช้ค่าความถี่ที่ f = 50kHz ซึ่งส่งผลให้เรากำหนดค่าขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ขนาดของตัวเก็บประจุ 6.8 nF ขนาดของตัวต้านทาน 1.5kΩ

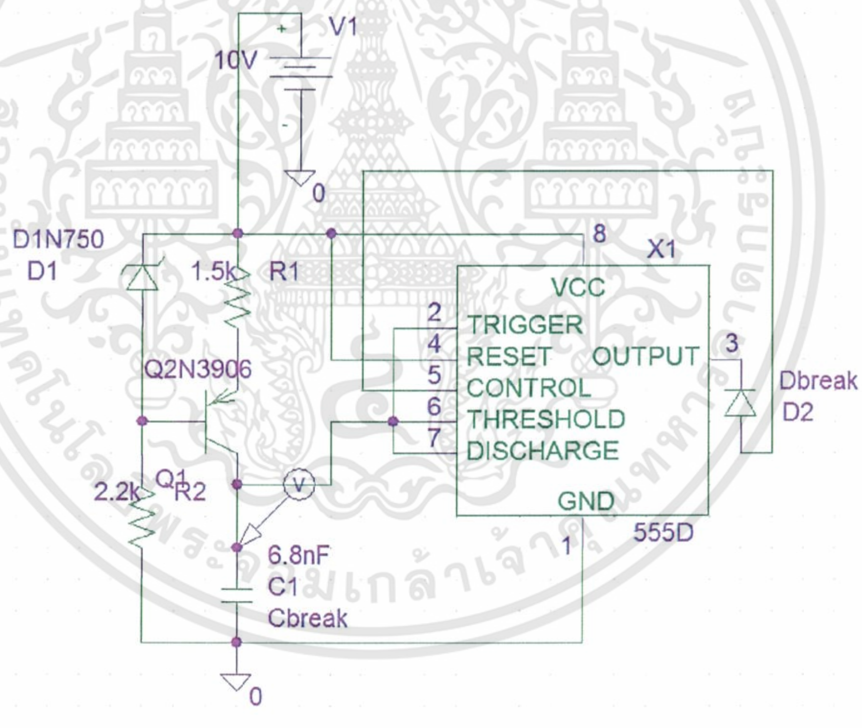
การออกแบบวงจรขยายแรงดันสองเท่า

$$Gain = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

เราต้องการขยายแรงดันสองเท่า จะได้ว่า R_1=R_2 จึงเลือกค่าความต้านทานเป็น 2,200 Ω

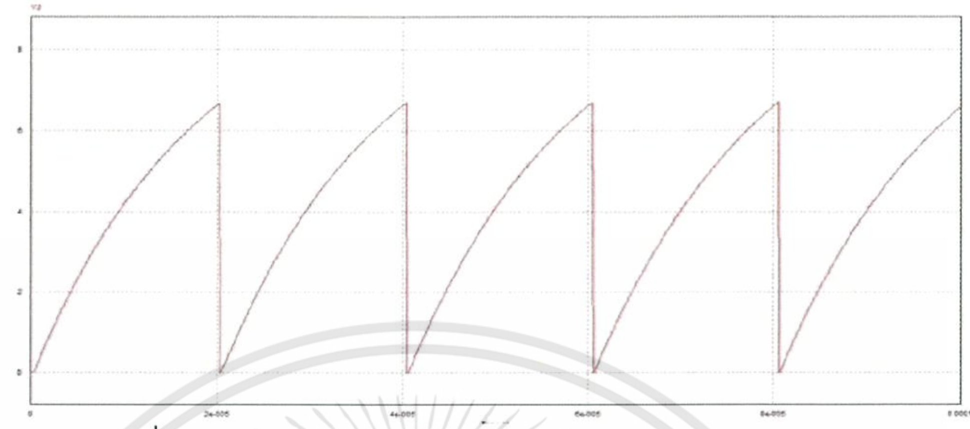
3.2.การจำลอง

3.2.1 การจำลองวงจร saw – tooth จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้คำนวณมาที่ความถี่ 50 kHz ด้วยโปรแกรม Psim



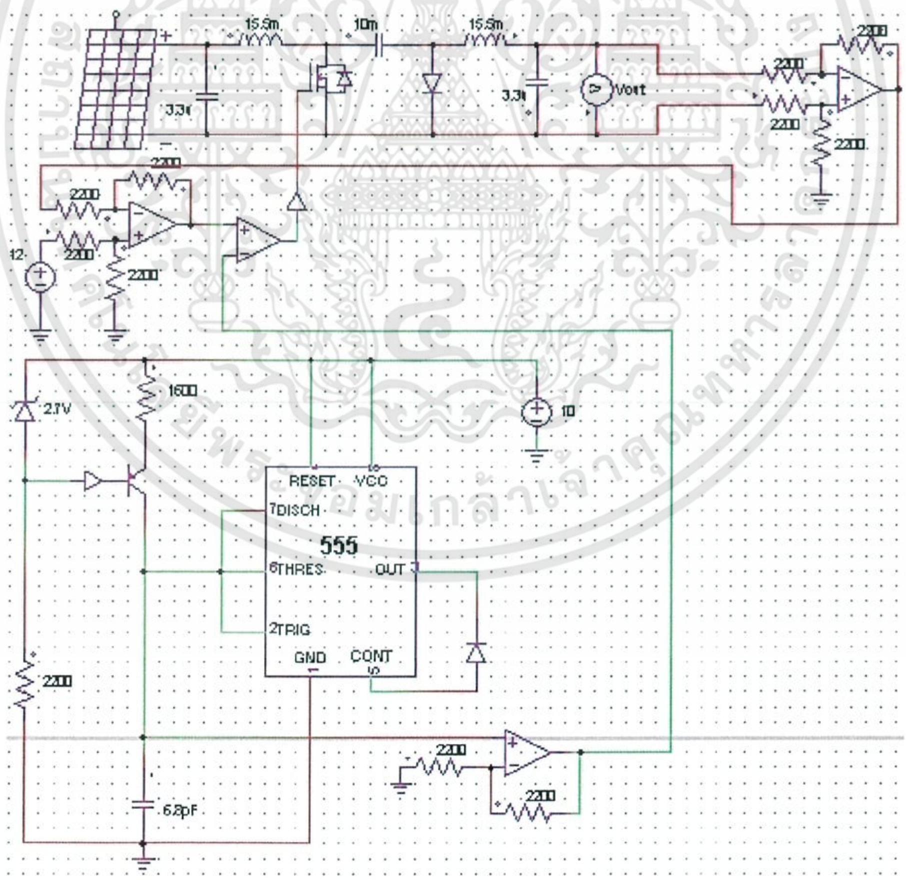
รูปที่ 3.2 วงจร saw – tooth

ผลการจำลอง



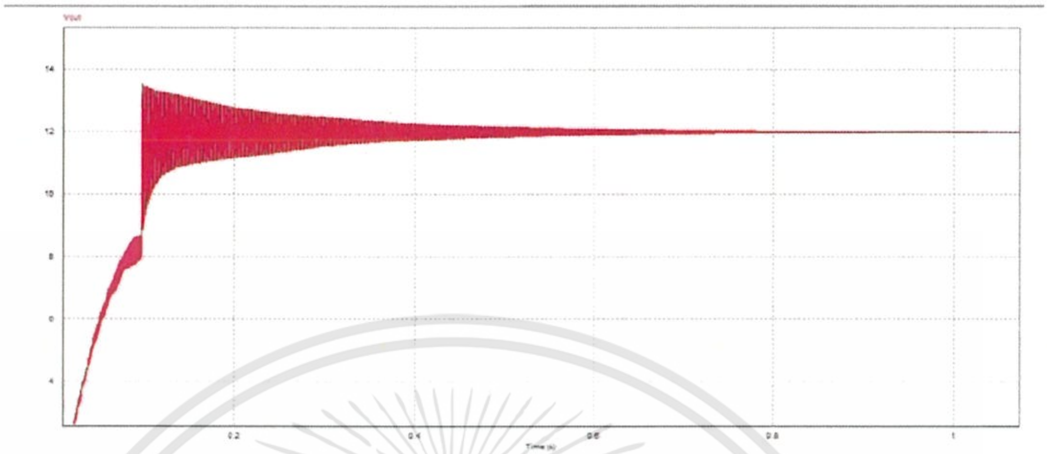
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองแรงดันขาออกของวงจร saw – tooth

3.2.2 การจำลองการทำงานของวงจร Ćuk Converter ที่มีระบบควบคุมแบบย้อนกลับด้วยโปรแกรม Psim



รูปที่ 3.4 วงจรรวมของระบบ

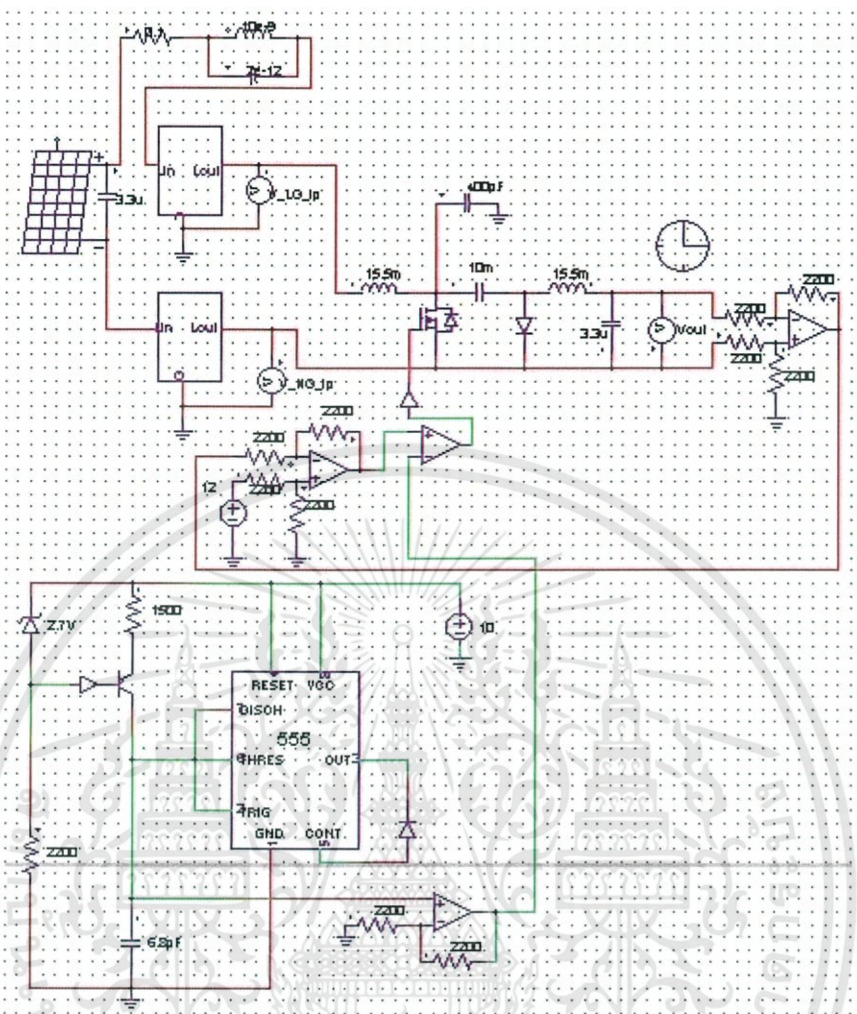
ผลการจำลอง



รูปที่ 3.5 ผลการจำลองแรงดันขาออกของ Ćuk Converter

3.2.3 การจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจร Ćuk Converter ด้วยโปรแกรม Psim

การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องมีโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.6 ต่อเข้าที่ด้านหน้าของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.4 โดยมีตัวเก็บประจุแฝงต่อที่ขาเดรนของมอสเฟตลงกับกราวด์ที่ 400 pF

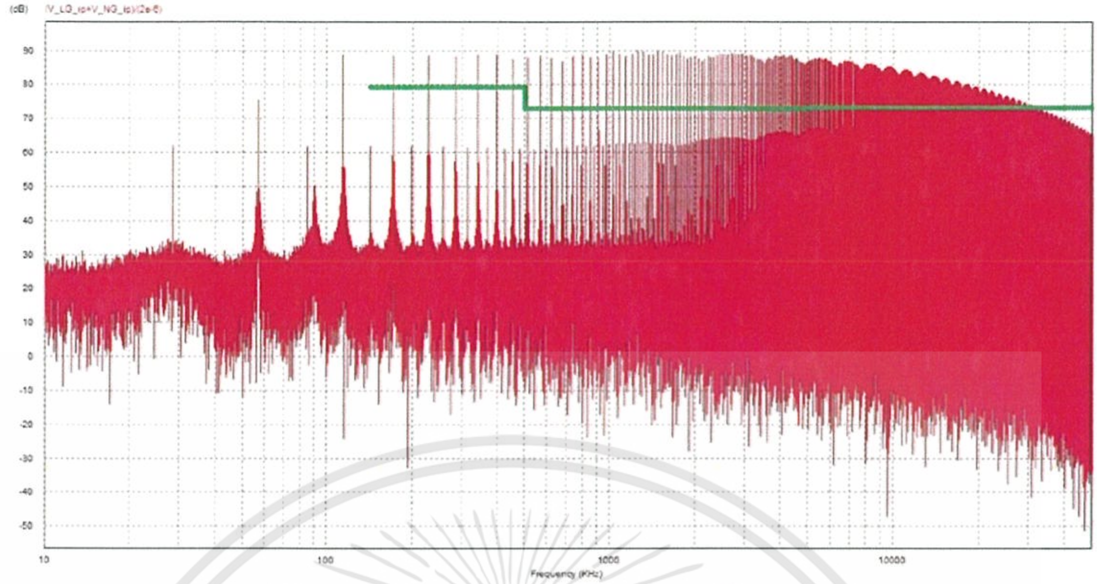


รูปที่ 3.6 การจำลองการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลการจำลองสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (Common Mode Interference : CM)

ทำการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โดยวัดแรงดันระหว่างไลน์กับกราวด์ และแรงดันระหว่างนิวทรัลกับกราวด์ ดังสมการ

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

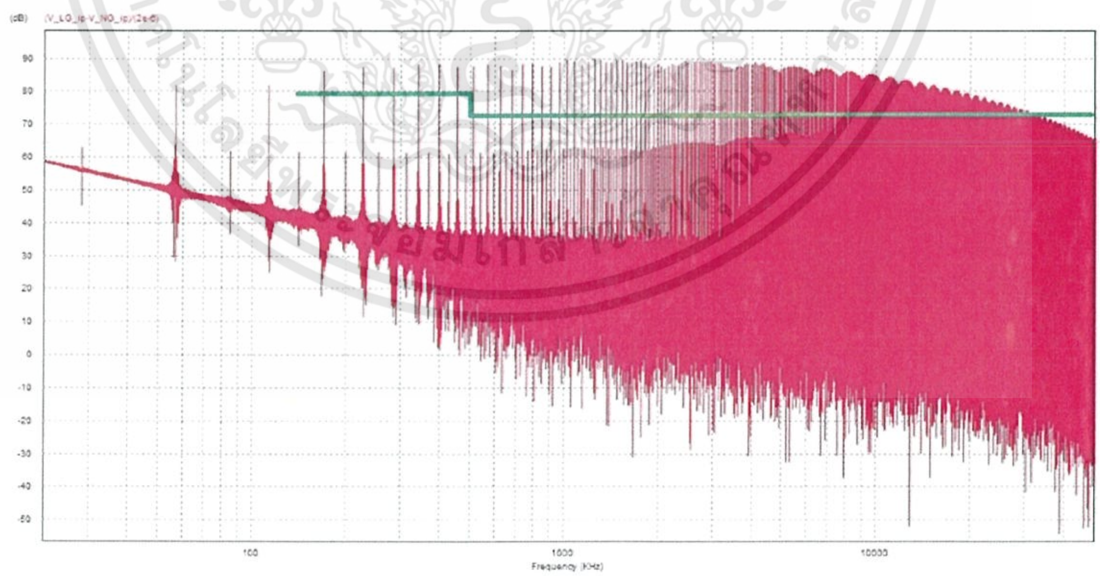


รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โดยเทียบกับมาตรฐาน EN 55011 class A

ผลการจำลองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง(Differential Mode Interference : DM)

ทำการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โดยวัดแรงดันระหว่างไลน์กับกราวด์ และแรงดันระหว่างนิวทรัลกับกราวด์ ดังสมการ

$$V_{CM} = \frac{V_{LG} - V_{NG}}{2}$$



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างโดยเทียบกับมาตรฐาน EN 55011 class A

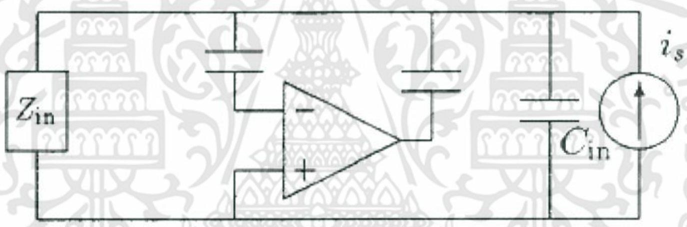
3.3 เทคนิคการออกแบบแผ่น PCB

เทคนิคการออกแบบแผ่น PCB เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI)สำหรับชิ้นงานนี้มีดังนี้

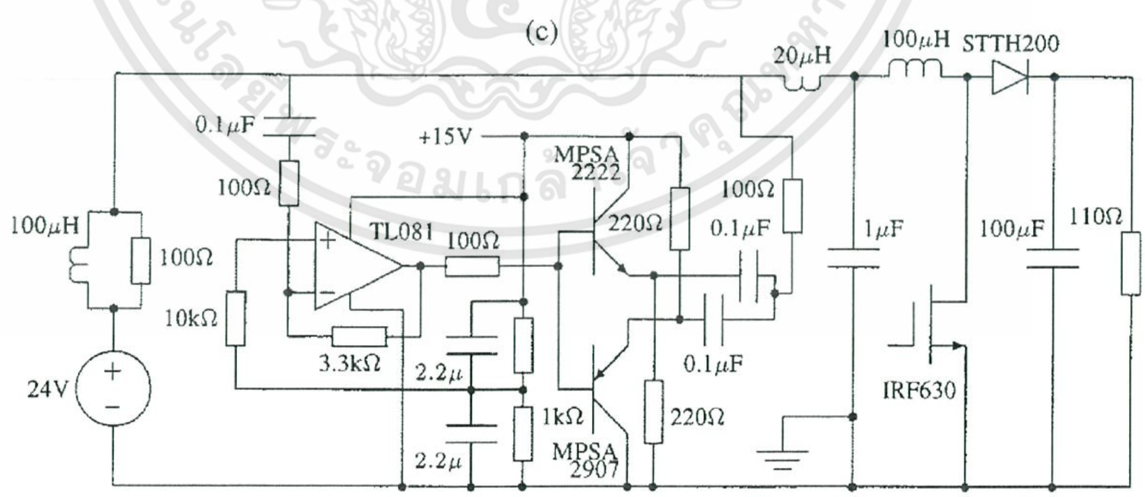
1. ออกแบบให้มี loop area เล็กที่สุด เพื่อลดค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง
2. ลดความยาวของลายทองแดงให้มีขนาดสั้นที่สุดและมีความกว้างระดับหนึ่ง เพื่อลดค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง
3. ลด series inductance เพื่อลด common impedance
4. แยกวงจร sensitive กับวงจร high power
5. แก้ปัญหา Ground Loop โดยใช้ optical coupler

3.4 วงจร Active Filter

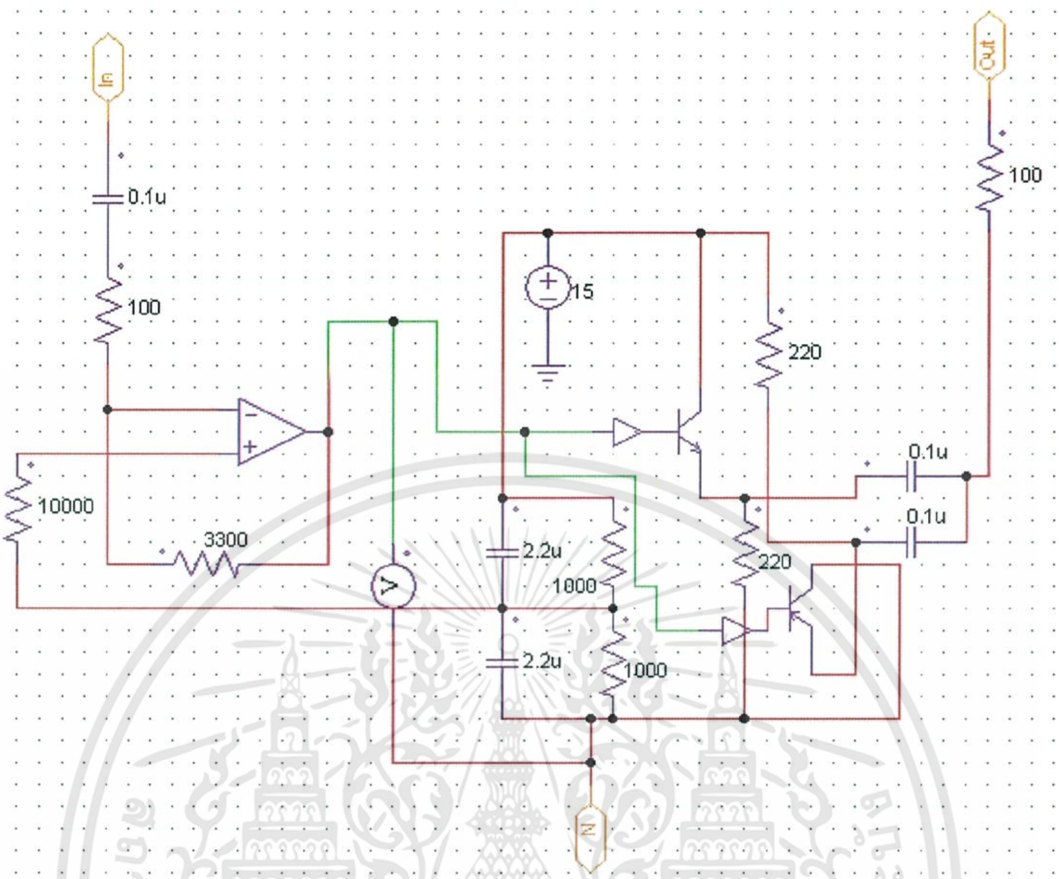
วงจร Active Filter ที่ได้เลือกใช้คือ แบบ voltage-sense current-feedback



รูปที่ 3.9 วงจร Active Filter Type IV voltage-sense current-feedback [8]

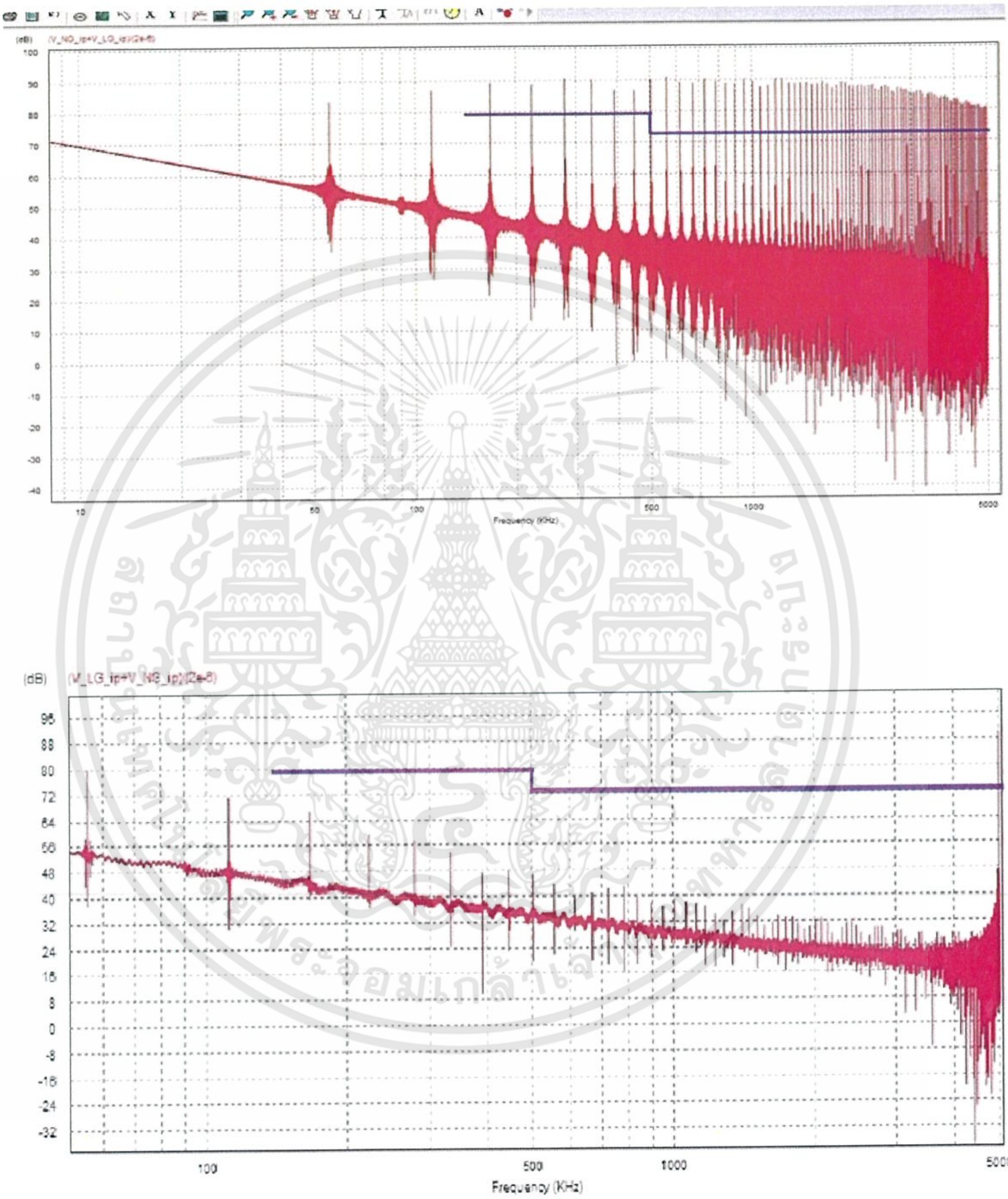


รูปที่ 3.10 แบบวงจรActive Filter ที่ได้จาก IEEE [8]



รูปที่ 3.11 วงจร Active Filter จากโปรแกรม Psim

การจำลองผลวงจร Active Filter ด้วยโปรแกรม Psim



รูปที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองวงจรก่อน(บน) และหลังจากใส่วงจร Active Filter (ล่าง) โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55011 class A

จากผลการจำลองวงจรหลังจากใส่ Active Filter พบว่าระดับสัญญาณรบกวนจะลดลง ซึ่งมีระดับอยู่ในมาตรฐาน EN 55011 class A ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบ Photovoltaic Panels(P.V.)

จุดประสงค์

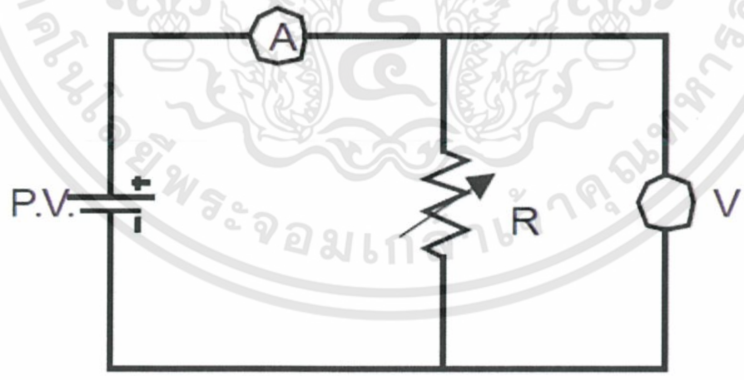
เพื่อทำการหาคุณสมบัติ การจ่ายพลังงานและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ Photovoltaic Panels (P.V.) เพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจร Ćuk converter

อุปกรณ์

1. Photovoltaic Panels (P.V.) 1 แผง
2. Volt-meter 1 เครื่อง
3. Amp-meter 1 เครื่อง
4. Resister ปรับค่าได้ 1 ตัว

วิธีการทดลอง

1. ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของแผง P.V. และศึกษาข้อควรระวัง
2. ต่อวงจรการทดลองต่อวงจรตามภาพ



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ทดลอง Photovoltaic Panels(P.V.)

3. ทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ได้แรงดันของเอาต์พุตตามตารางการทดลอง
4. ทำการบันทึกผลการทดลองลงในตารางการทดลองพร้อมพล๊อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของแผง P.V.ที่ได้จากการทดลอง

ตารางผลการทดลอง

แรงดันเอาต์พุต (V)	กระแสการทดสอบช่วงเช้า (10.00) (A)	กระแสทดสอบช่วงเที่ยง(12.00) (A)	กระแสทดสอบช่วงบ่าย(14.00) (A)
0	8.25	8.26	7.28
1	8.18	8.20	7.28
2	8.16	8.17	7.20
3	8.11	8.08	7.12
4	7.80	7.95	6.99
5	7.25	8.06	6.60
6	6.67	7.94	5.69
7	6.42	7.88	7.02
8	6.25	7.83	6.94
9	6.08	7.70	6.80
10	5.93	7.58	6.66
11	5.7	7.35	6.45
12	5.53	7.01	6.24
13	5.40	6.56	5.92
14	5.30	5.88	5.54
15	5.20	5.07	4.87
16	4.50	4.16	4.07
17	4.00	2.99	3.03
18	2.82	1.63	1.89
19	1.54	-	-

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง Isc และ Voc ของ Photovoltaic Panels(P.V.)

- การทดสอบช่วงเช้า I_{sc} = 8.25 A V_{oc} = 19.20 V
- การทดสอบช่วงเที่ยง I_{sc} = 8.26 A V_{oc} = 19.27 V
- การทดสอบช่วงบ่าย I_{sc} = 7.25 A V_{oc} = 20.86 V

จากการศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจำลองการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Psim โดยสนใจที่จะศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์เพราะมีวงจรที่ไม่ซับซ้อน และสามารถลดระดับสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่ง คณะผู้จัดทำสนใจสร้างวงจรดังกล่าวขึ้นมาดังนี้

4.2 การทดสอบวงจรป้อนกลับ

จุดประสงค์

เพื่อดูความสามารถในการคงค่าแรงดันของวงจรป้อนกลับและหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของวงจร Ćuk converter เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้าชั่วขณะ

อุปกรณ์

1. Photovoltaic Panels (P.V.) 1 แผง
2. มัลติมิเตอร์ 1 เครื่อง
3. วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

วิธีการทดลอง

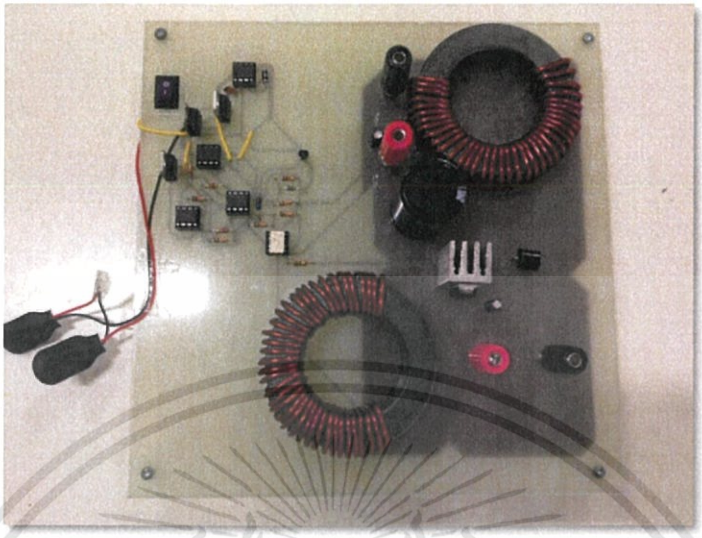
1. ต่อวงจรการทดลอง
2. วัดแรงดันขาเข้าและแรงขาออกของวงจร
3. ทำการปรับแรงดันขาเข้าและวัดแรงดันขาออก โดยปรับค่าตามตาราง
4. ทำการบันทึกผลการทดลองลงในตารางการทดลอง

ตารางผลการทดลอง

แรงดันขาเข้า (V)	แรงดันขาออก (V)
20.50	12.02
20.00	11.53
19.50	11.41
19.00	11.38
18.50	11.31
18.00	11.17

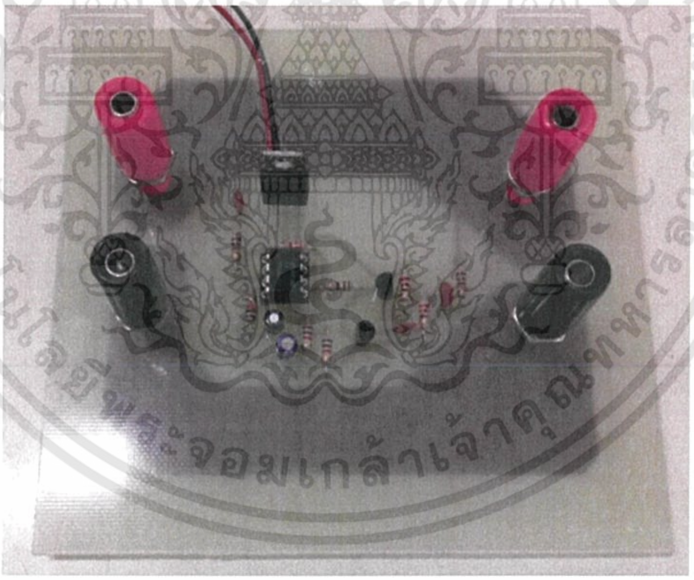
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองแรงดันขาออกของวงจร

4.3 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์และวงจรขับขาเกต



รูปที่ 4.2 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

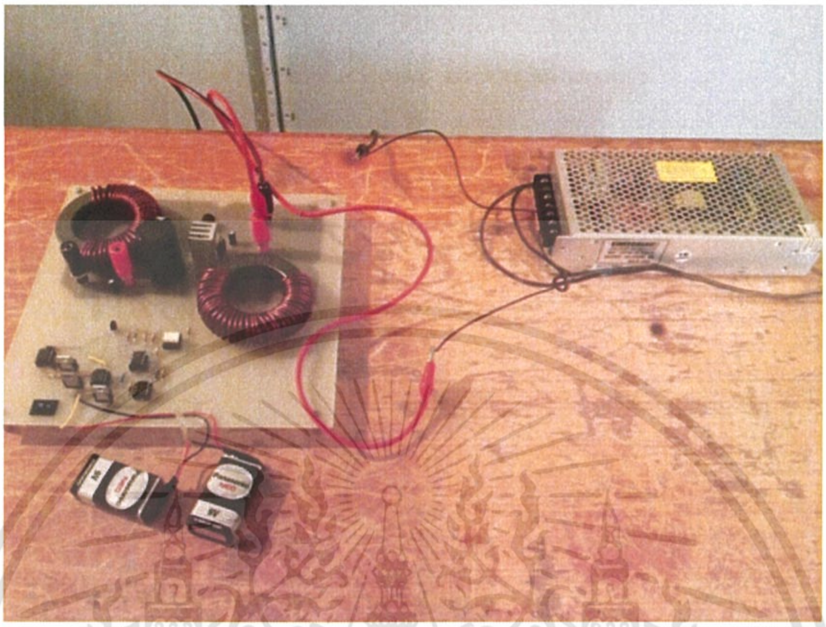
4.4 วงจรกรองแบบแอคทีฟ



รูปที่ 4.3 วงจรกรองแบบแอคทีฟ

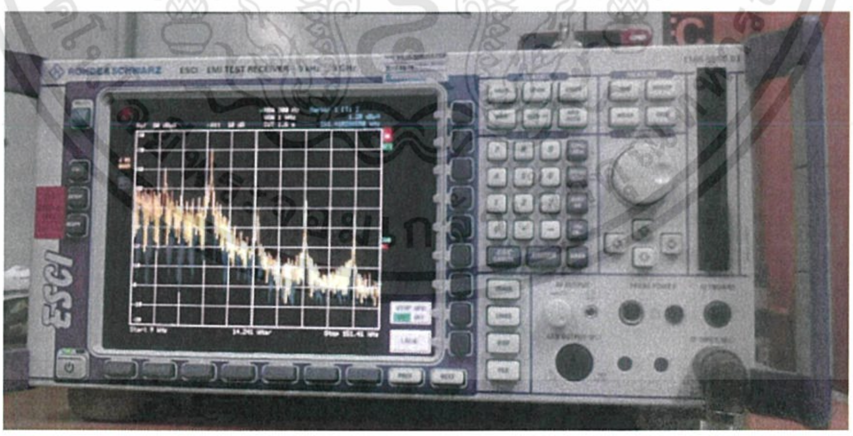
4.5 การทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ได้ทำการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)



รูปที่ 4.4 การวางชิ้นงานในห้องทดสอบ

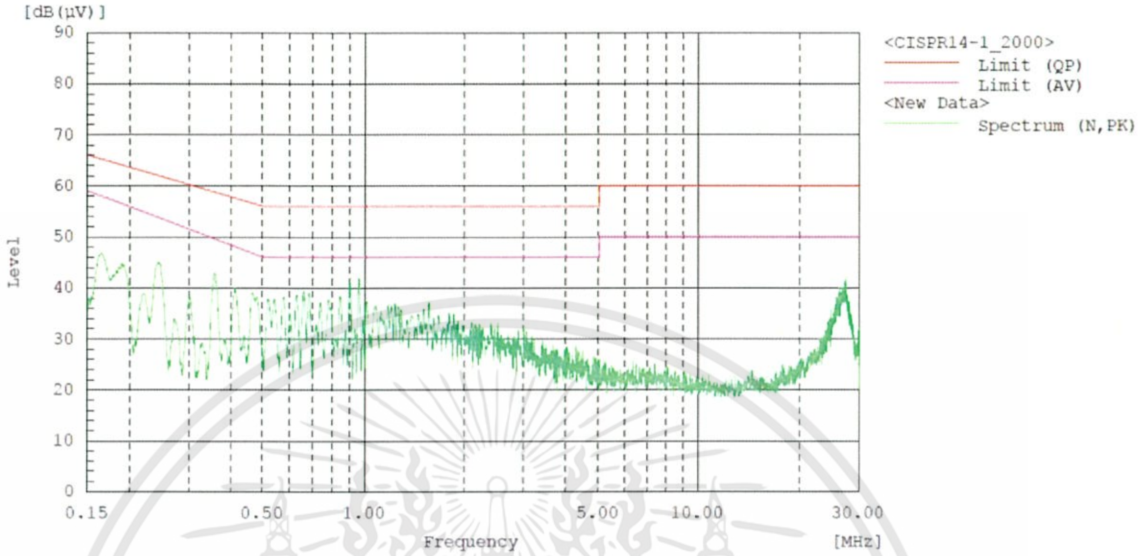
จากรูปเป็นการต่อชิ้นงานกับ LISN (Line Impedance Stabilization Network) สัญญาณที่ออก LISN จะไปสู่ เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) ดังรูป



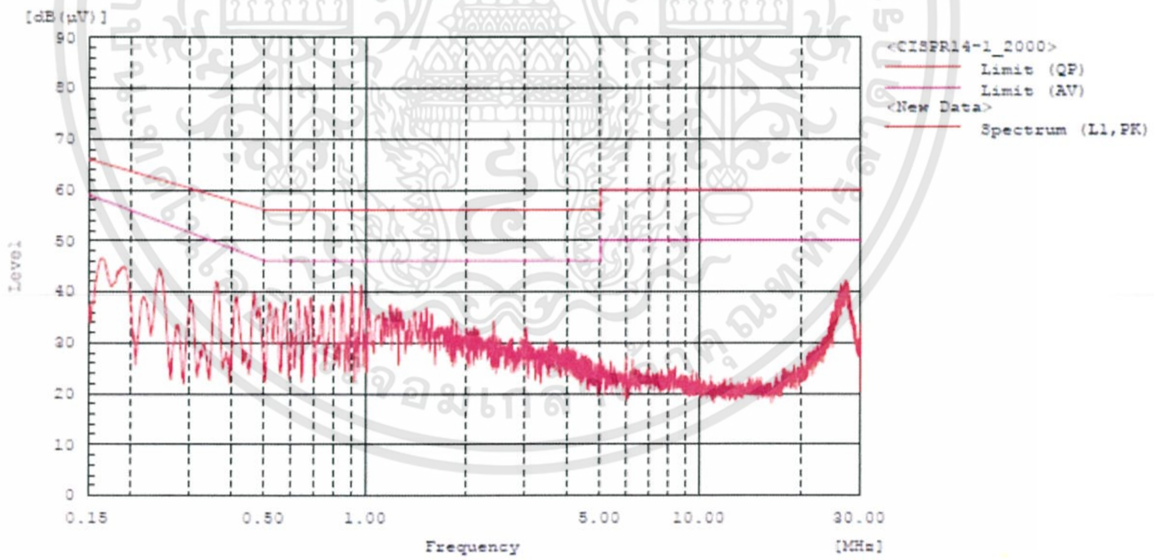
รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)

รูปสัญญาณรบกวนที่ได้จะเป็น ณ เวลานั้นๆ (real time) ซึ่งเราสามารถดูกราฟและค่าได้ที่จอมอนิเตอร์

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55011 คือ ในย่านความถี่ 150 kHz–30 MHz โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์และสายนิวทรอล



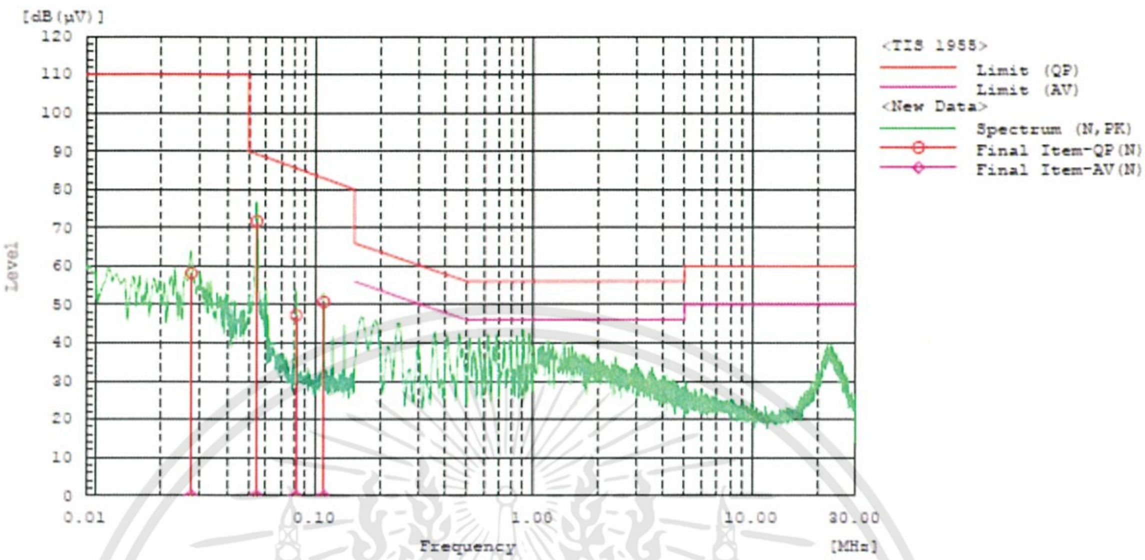
รูปที่ 4.6 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อ No load ในสายนิวทรอล



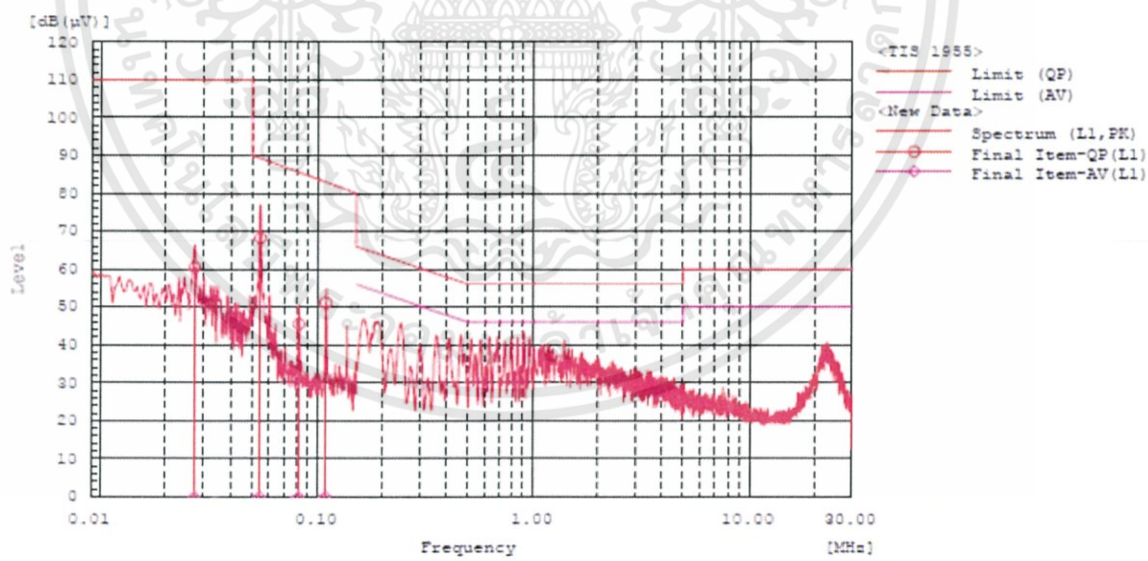
รูปที่ 4.7 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อ No load ในสายไลน์

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

พบว่า สัญญาณรบกวนอยู่ในมาตรฐาน เนื่องจากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์สามารถระดับสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่งและเป็นผลของการออกแบบแผ่น PCB



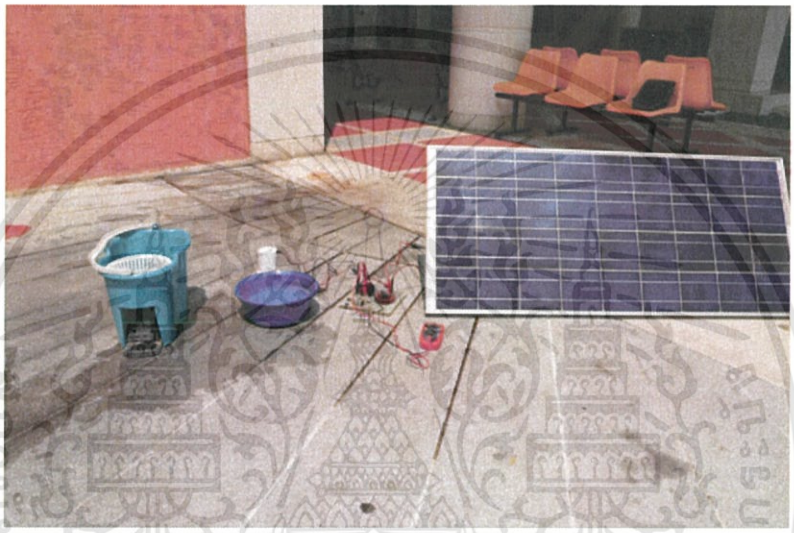
รูปที่ 4.8 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อใส่วงจรกรองแบบแอคทีฟในสายนิวทรอล



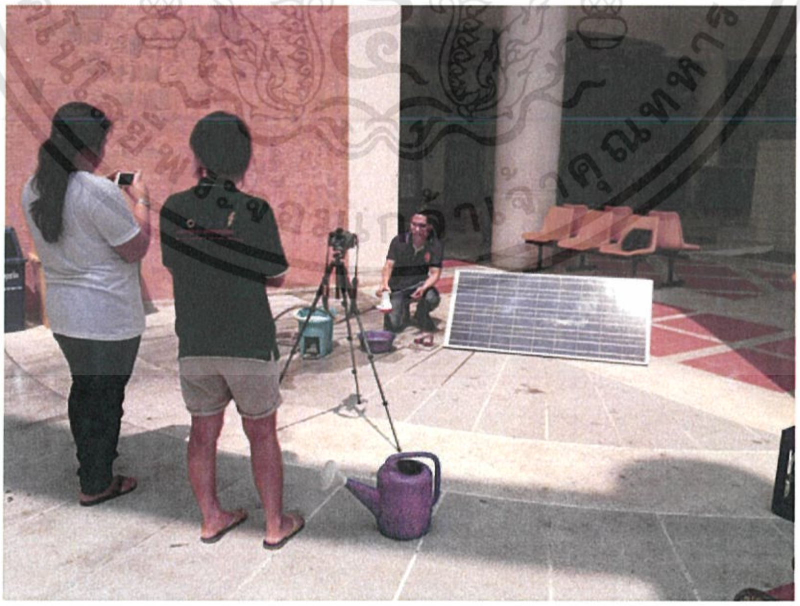
รูปที่ 4.9 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อใส่วงจรกรองแบบแอคทีฟในสายไลน์

จากการทดสอบสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม พบว่า วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ในสภาวะ No load สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐาน EN55011 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการออกแบบแผ่น PCB , ใส่ Ferrite bead เพื่อหักล้างสัญญาณ common mode และคุณสมบัติของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนได้ระดับหนึ่งในตัวเอง ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบโดยใส่วงจรกรองแบบแอคทีฟ จึงให้ผลที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าวงจรกรองแบบแอคทีฟจะทำการลดทอน

4.6 การทดลองวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.11 การทดลอง

จากการทดลองโดยการการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายโหลดซึ่งคือปั๊มน้ำ โดยผ่านวงจรแปลงผันกำลัง ชุกคอนเวอร์เตอร์ เมื่อวัดแรงดันขาเข้าพบว่าได้ค่าแรงดันเป็น 20.2 V และได้แรงดันขาออก 11.6 V ซึ่งเพียงพอที่จะจ่ายโหลดปั๊มน้ำ 12 V ให้ทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานและคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI : Electromagnetic Interference) โดยการวิเคราะห์ผลของสัญญาณสวิทชิ่งต่อการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากการศึกษาวงจรชุคคอนเวอร์ โดยนำสัญญาณรบกวนที่ได้มาเทียบกับมาตรฐาน EN 55011

วงจรขับขาเกตของมอสเฟตที่ใช้ในวงจรชุคคอนเวอร์เตอร์จะใช้สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth) ที่ได้จากวงจรรวม (IC) NE555 นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้มาจากการป้อนกลับ (Feedback) เพื่อนำไปปรับค่า Duty Ratio ให้ได้ ค่าDuty ที่จะทำให้ค่าแรงดันขาออกมีค่าเป็น 12V คงที่ ซึ่งเมื่อดูจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อปรับแรงดันขาเข้าให้มีค่าระหว่าง 18-20.5V ค่าแรงดันขาออกจะมีค่าเป็น 11.17-12.02 V ซึ่งเป็นช่วงแรงดันที่ยังสามารถนำไปใช้ขับปั๊มน้ำ 12V, 10A ได้ หลังจากนั้นนำวงจรที่ทดสอบสำเร็จแล้วไปทดสอบค่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็คทรอนิกส์ (PTEC) เพื่อทดสอบวงจรซึ่งมีการสวิทช์ที่ ความถี่ 50kHz ว่ามีค่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน EN55011 กำหนดไว้ในย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz หรือไม่ หากมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน จะทำการลดทอนสัญญาณโดยวงจรกรองแบบแอคทีฟที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม ซึ่งผลการทดสอบปรากฏว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ทดสอบนั้นมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด นั่นคือผ่านมาตรฐานที่เราต้องการนั่นเอง ซึ่งที่ผ่านมาตรฐานนั้นมีความเป็นไปได้ว่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการออกแบบที่ถูกหลักการตามทฤษฎีการออกแบบแผ่นวงจรและการออกแบบวงจรที่มีการคำนึงถึงการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปกติแล้วโซล่าเซลล์จะไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าที่พิกัดได้เนื่องจากความเข้มของแสง อุณหภูมิและตัวแปรต่างๆสำหรับโซล่าเซลล์มีค่าไม่คงที่ตลอดเวลา สังเกตได้จากการทดลองจะพบว่าเมื่อแดดที่เราต้องการนั้นมีความเข้มที่ไม่เพียงพอวงจรแปลงผันกำลังจะยังรักษาสภาพแรงดันไว้ที่แรงดันขาออกที่เราต้องการแต่กระแสขาออกที่เราต้องการนั้นจะมีค่าไม่เพียงพอเนื่องจากปัจจัยความเข้มของแสงที่ส่งผลต่อกระแส ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับภาระนั้นไม่สามารถทำงานได้ โดยเราจะมีวิธีแก้ไขโดยการเลือกกำลังไฟฟ้าของภาระที่เราต้องการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 80% ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อให้การทำงานของภาระยังคงทำงานได้แม้มีแสงไม่เพียงพอ ซึ่งขณะทดลองการใช้งานภาระทางไฟฟ้าในสภาวะที่มีแดดอ่อนนั้น ภาระไฟฟ้าจะพยายามทำงานเนื่องจากได้แรงดันที่ต้องการแต่กำลังยังไม่พอทำให้เกิดการดึงกระแสจากวงจรแปลงผันกำลังมากขึ้นจนทำให้ตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่ในส่วนของแรงดันขาออกเกิดปัญหาไม่ทำงาน ซึ่งการแก้ปัญหานี้จะใช้วิธีข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วในการแก้ปัญหา

เอกสารอ้างอิง

[1] วีระเชษฐ์ ขันเงิน, **Power Electronics**,พิมพ์ครั้งที่9.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.2553

[2] วีระเชษฐ์ ขันเงิน. **ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้านสื่อสาร**;.[หน้า 4-8] [15 ส.ค. 2556]. เข้าถึงได้ที่: http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Electromagnetic_Compatibility_on_ Telecommunications/index.php

[3] A. Nasiri "Different Topologies of Active EMI/RippleFilters for Automotive DC/DC Converters," **Vehicle Power and Propulsion,2005 IEEE Conference**

[4] Djilali Hamza and Praveen K. Jain "Conducted EMI Noise Mitigation in DC-DC Converters using Active Filtering Method," **Power Electronics Specialists Conference,2008.PESC 2008.IEEE**, pp.188-194

[5] วัชรานนท์ แสนลิ้นฟ้า, "การออกแบบและสร้างวงจรชุดคอนเวอเตอร์ ขนาด 24 v,75 w เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟดีซีแบบคงค่าแรงดัน," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549.

[6] **หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์** ;[21 ส.ค.2556]. เข้าถึงได้ที่: http://www.kanhasolar.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539481990&Ntype=4

[7] Krishna Mainali, Ramesh Oruganti, "Design of a Current-Sense Voltage-Feedback Common Mode EMI Filter for an Off-line Power Converter," **Power Electronics Specialists Conference**, 2008, pp.1632-1638.

[8] N. K. Poon, J. C. P. Liu, C. K. Tse, and M. H. Pong, "Techniques for Input Ripple Current Cancellation: Classification and Implementation," **Power Electronics Specialists Conference**, 2000 IEEE 31st Annual Volume: 2, pp.940-945.

[9] ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน, "**เอกสารประกอบการสอน การรบกวนทางไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**,"

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

[11] **การลดสัญญาณรบกวนด้วย common mode coil** ;[28 ม.ค.2557].เข้าถึงได้ที่: http://library.rtna.ac.th/web/RTNA_Journal/y.9c.3/03.pdf

[12] วีระเชษฐ์ ขันเงิน, "**เอกสารประกอบการสอน การรบกวนทางไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**,"

[13] Schurter electronic, **Introduction to EMC**;.[21 ม.ค. 2557]. เข้าถึงได้ที่: www.schurterinc.com/content/download/339606/11198618/file/EMC+for+Dummies_+Final.pdf

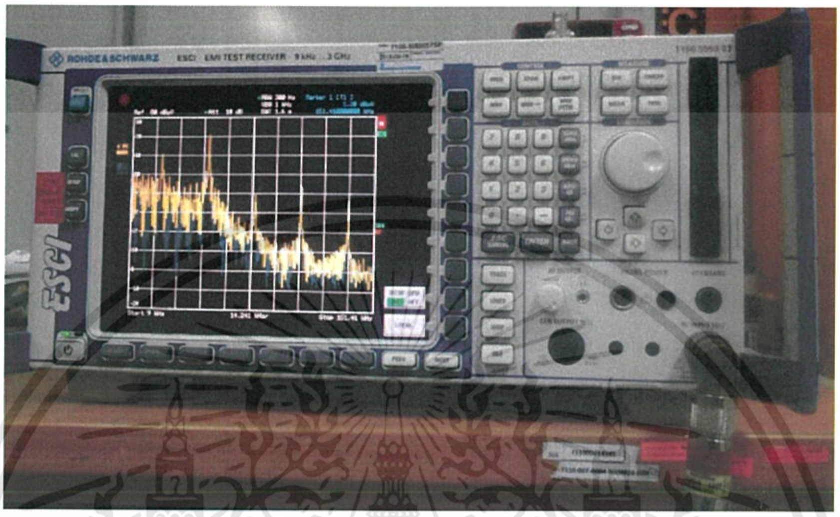
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

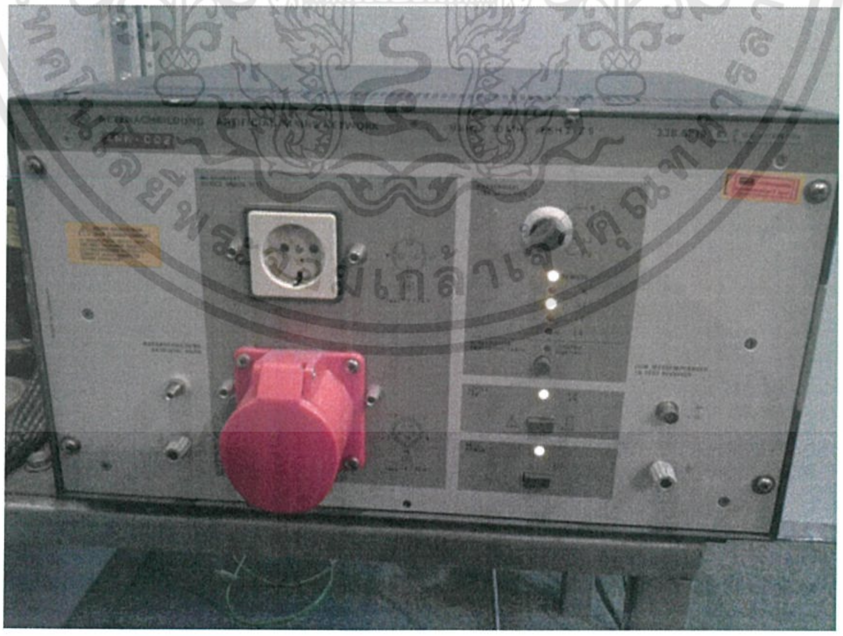
เครื่องมือวัด

ภาคผนวก ก

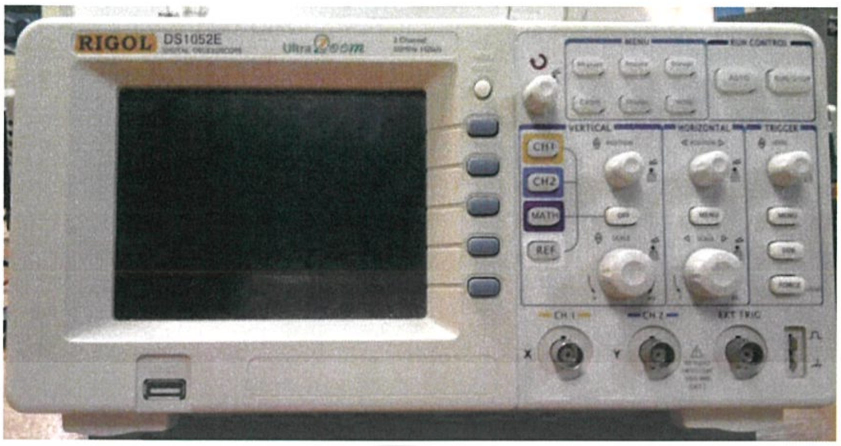
เครื่องมือวัด



รูปที่ ก-1 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer)



รูปที่ ก-2 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network)



รูปที่ ก-3 ออสซิลโลสโคปรุ่น DS1052E

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์

ES20636125 : 125 - Watts Excellent designed PV module Multi - crystalline based PV module yielding 125 Watts maximum power output

High consistency and reliability of Ekarat Solar's 125 Watts modules provide versatility for users and solar system designer to suit a needed application. A village solar system, residential roof, solar home unit, telecommunication station, and battery - charge station as well as - alone and grid connected systems are recommended and commonly used with ES20636125.

High efficiency module, more than 12%, is a result of solar cell's superior power output, which has been developed by our solar cell partnership. Moreover, other component materials are also selected to comply with international standards such as IEC and Safty Class II. These create a customer's confidence ensured with a manufacturing based 20 years limited waranty.

- Low iron tempered glass allows a high light transmission rate with a great robustness.
- EVA encapsulate sheet, Tedlar back - sheet, and clear anodized aluminum frame are technically equipped to protect the module against all weather conditions.
- Junction box with IP54 to ensure water proof and prolong lifetime operation. Special cable with connectors is offered as option for easy interconnection in grid - connected systems as well as stand - alone systems.
- Bypass diode included in promptly provided junction box is to prevent the power dropped by partial shading.

Electrical characteristics

Subclass	ES20636125
Maximum power (Pmax)	125
Power tolerance	±5%
No. of connected cells)	36
Voltage at Pmax (Vmp)	17 V
Current at Pmax (Imp)	7.36 A
Short - circuit current (Isc)	7.64 A
Open - circuit voltage (Voc)	21.5 A
Temperature Coefficient of Voc	- 0.076 V / °C
Temperature Coefficient of Isc	+ 2.3 mA / °C
Temperature Coefficient of power	- 0.43% / °C
Maximum series rating	15 A
Maximum voltage system	600 V

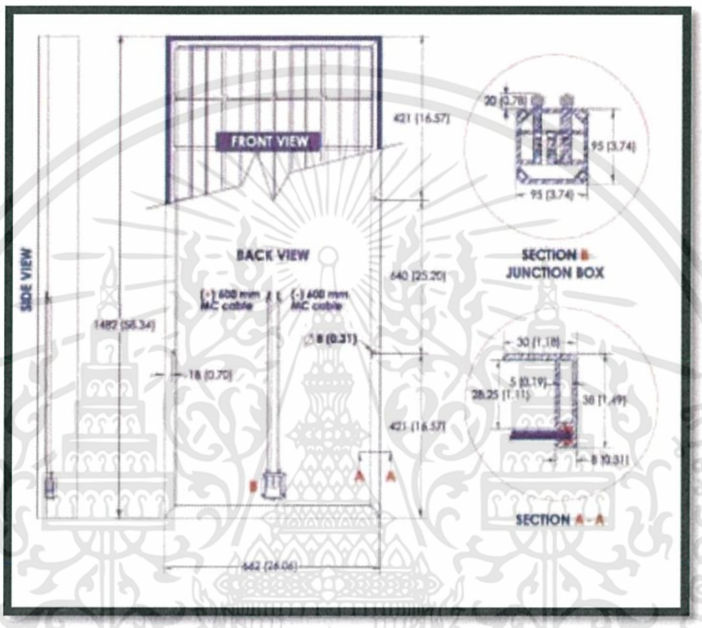
ตารางที่ ข-1 Electrical characteristics

Mechanical characteristics

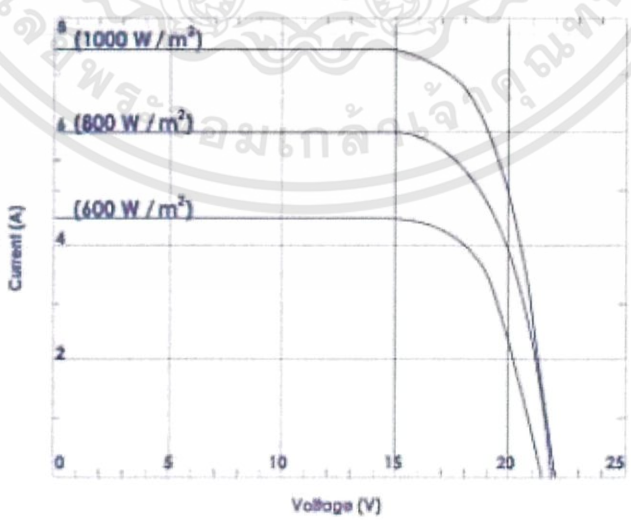
Dimension	1482 x 662 x 37 mm.
Weight	12 kg.
Dimension tolerance	+/- 3 mm.
Size of carton	1510 x 670 x 90 mm.
Junction box	Degree of protection: IP54 and compatibility with 2.5 - 4.00 mm. cross section cable size
Diode	Silicone or Schottky By - pass diode for every 18 cells connection
Frame	Anodized Aluminium
Construction structure	Front: High light transmission tempered glass with 3.00 mm. thickness; Back: Tedlar Sheet; Laminated material: EVA
Package	2 modules per carton

Qualification and testing

ISO 9001 for quality management system IEC 61215*: The designed module is complied and according to IEC standard Safty Class II*: To ensure a safety for users and installing operator of our products *The prototype modules have been submitted for testing procedures of IEC 61215 and Safety Class II approved by TUV institution.



รูปที่ ข–1 Module drawing diagram



รูปที่ ข-2 IV - curves Cell temperature data represent the performance of typical modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 - 85 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are

: illumination of kW/m2 at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 - 87 global spectral irradiance)

: cell temperature of 25°C

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการ

ประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

Performance and Electromagnetic Compatibility of a Photovoltaic Power Converter

ธนกฤช พิบูลย์ ธนพล ผึ้งเถื่อน ธนาภา สาธุพันธุ์ และ ธัญญา ธัญกิจจานุกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: hero_ano_ne@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมหันมาใช้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น แต่ก็พบปัญหาด้านประสิทธิภาพ การใช้งาน เราจึงต้องเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โครงงานนี้ศึกษาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์และคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ โดยเปรียบเทียบผลกับมาตราฐาน EN55011 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบวงจรแปลงผันกำลัง

คำสำคัญ: ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า,ชุกคอนเวอร์เตอร์,วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง, สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

Nowadays, the industry has increasingly used renewable energy from photovoltaic, but it usually has low efficiency. So, we have to employ DC–DC converter to improve the overall performance. However, when this converter operates, electromagnetic noises can be generated. Hence, this project focuses particularly on the performance of DC–DC converter connected to photovoltaic panel and characteristics of electromagnetic noise generated in Ćuk converter. The noise level must be conformed to EN 55011 standard, which shows electromagnetic compatibility (EMC) of DC–DC converter system

Keywords: Ćuk converter, DC-DC Converter, Electromagnetic compatibility ,Electromagnetic interference (EMI)

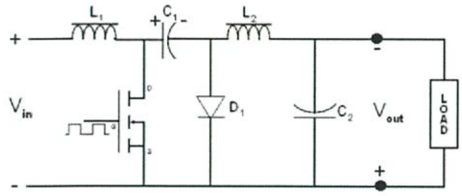
1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) มักจะให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่คงที่ในการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับวงจรแปลงผันแรงดันซึ่งก็คือ ชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk Converter) โดยชุกคอนเวอร์เตอร์นี้จะช่วยแปลงระดับแรงดันไปจ่ายโหลดตามที่ต้องการและยังช่วยกรองสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่งอีกด้วย เพราะในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้า นอกจากจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรด้วย โดยเฉพาะเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวกับอิเล็คทรอนิกส์กำลังซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองผลิตสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูงเนื่องจากความถี่สวิทชิ่งโดยเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณรบกวนที่วัดได้กับมาตรฐาน EN 55011 Class a

2. วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk Converter)

วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ถูกออกแบบ เพื่อแก้ปัญหาขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์สูง โดยเพิ่มตัวเหนี่ยวนำในด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก โดยมีอัตราขยายแรงดันดังสมการที่ (1) [3]

$$\frac{\mathrm{Vo}}{\mathrm{Vs}} = -\left(\frac{D}{1-D}\right) \tag{1}$$



รูปที่ ค-1 วงจร Ćuk Converter [3]

2.1 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Noise)

วงจรไฟฟ้า 1 เฟสซึ่งประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม (Common mode voltage:Vcm) และค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode voltage:Vdm) ดังต่อไปนี้ [1]

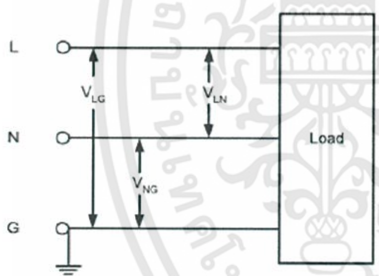
$$V_{cm} = \frac{(V_{LG}+V_{NG})}{2} \qquad (2)$$

$$V_{dm} = \frac{(V_{LG}-V_{NG})}{2} \qquad (3)$$

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์

V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์

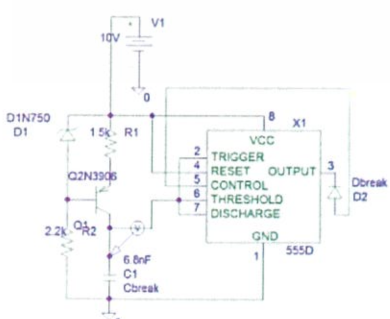
V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับนิวทรัล



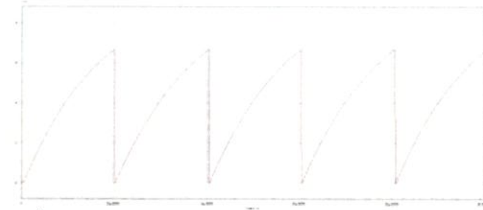
รูปที่ ค-2 วงจรไฟฟ้า 1 เฟส

3. การออกแบบและการจำลอง

3.1 วงจร Saw-tooth

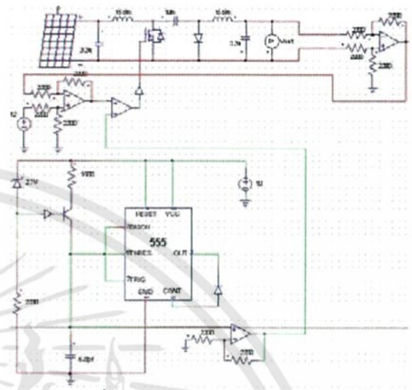


รูปที่ ค-3 วงจร saw – tooth



รูปที่ ค-4 ผลการจำลองแรงดันขาออกของวงจร saw – tooth

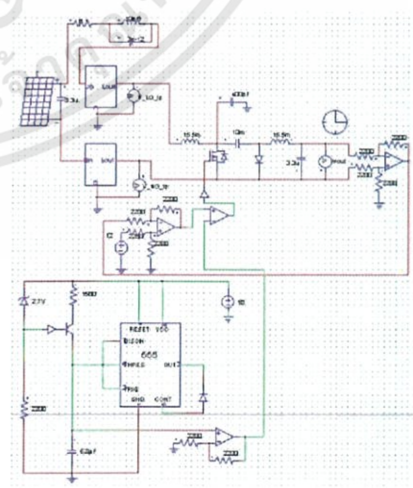
3.2 การทำงานของวงจร Ćuk Converter ที่มีระบบควบคุมแบบย้อนกลับ



รูปที่ ค-5 วงจรรวมของระบบ

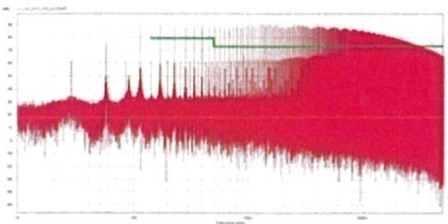
รูปที่ ค-6 ผลการจำลองแรงดันขาออกของ Ćuk Converter

3.3 การจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจร Ćuk Converter

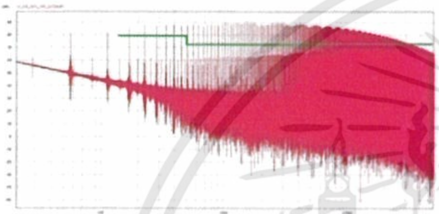


รูปที่ ค-7 วงจรชุดคอนเวอร์เตอร์พร้อม LISN

วัดค่าสัญญาณรบกวนจากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ โดยทำการวัดสัญญาณรบกวนกับความถี่เทียบกับ มาตรฐาน EN 55011 class a



รูปที่ ค-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวน โหมดผลร่วมกับความถี่ของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ [2]

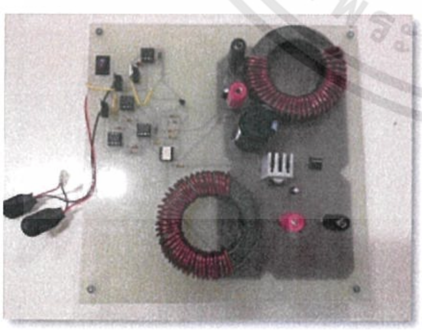


รูปที่ ค-9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวน โหมดผลต่างกับความถี่ของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ [2]

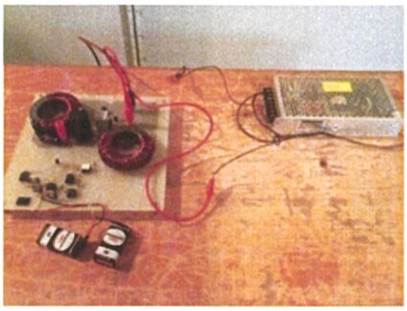
จากการทำการจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งโหมดผลร่วมและผลต่างกับความถี่ของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ พบว่ามีช่วงสัญญาณที่เกินมาตรฐาน EN 55011 class a

4. การออกแบบและทดสอบวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

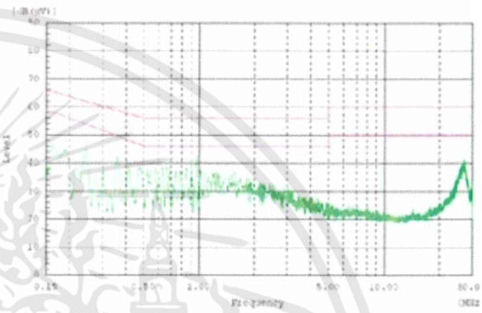
การออกแบบวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ทางผู้จัดทำได้กำหนดให้แรงดันขาเข้ามีค่าเท่ากับ 21.5V และแรงดันขาออกเท่ากับ 12V



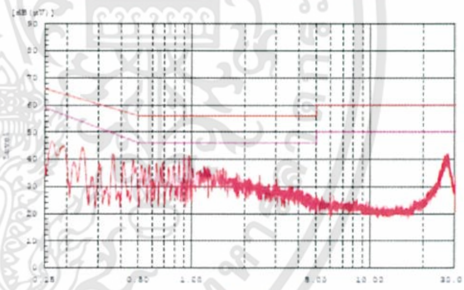
รูปที่ ค-10 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ ค-11 การทดสอบวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ ค-12 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อ No load ในสายนิวทรอล



รูปที่ ค-13 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55011 เมื่อ No load ในสายไลน์

จากการทดสอบสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมพบว่า วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ในสภาวะ No load สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐาน EN55011 class A ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการออกแบบแผ่น PCB ,การใส่ Ferrite bead เพื่อหักล้างสัญญาณ common mode และคุณสมบัติของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนได้ระดับหนึ่งในตัวเอง ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบโดยใส่วงจรกรองแบบแอกทีฟ จึงให้ผลที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าวงจรกรองแบบแอกทีฟจะทำการลดทอน

5. สรุปผลการทดลอง

โครงงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานและคุณลักษณะของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า(EMI : Electromagnetic Interference)โดยการวิเคราะห์ผลของสัญญาณสวิทชิ่งต่อการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากการศึกษาวงจรชุคคอนเวอร์ โดยนำสัญญาณรบกวนที่ได้มาเทียบกับมาตรฐาน EN 55011

วงจรขับขาเกตของมอสเฟตที่ใช้ในวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะใช้สัญญาณฟันเลื่อย (Saw-tooth) ที่ได้จากวงจรรวม (IC) NE555 นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้มาจากการป้อนกลับ (Feedback) เพื่อนำไปปรับค่า Duty Ratio ให้ได้ค่าDuty ที่จะทำให้ค่าแรงดันขาออกมีค่าเป็น 12V คงที่ ซึ่งเมื่อดูจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อปรับแรงดันขาเข้าให้มีค่าระหว่าง 18-20.5V ค่าแรงดันขาออกจะมีค่าเป็น 11.17-12.02 V ซึ่งเป็นช่วงแรงดันที่ยังสามารถนำไปใช้ขับปั๊มน้ำ 12V, 10A ได้ หลังจากนั้นนำวงจรที่ทดสอบสำเร็จแล้วไปทดสอบค่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็คทรอนิกส์ (PTEC) เพื่อทดสอบวงจรซึ่งมีการสวิทช์ที่ ความถี่ 50kHz ว่ามีค่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน EN55011 กำหนดไว้ในย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz หรือไม่ หากมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน จะทำการลดทอนสัญญาณ โดยวงจรกรองแบบแอคทีฟที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม ซึ่งผลการทดสอบปรากฏว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ทดสอบนั้นมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด นั่นคือผ่านมาตรฐานที่เราต้องการนั่นเอง ซึ่งที่ผ่านมาตรฐานนั้นมีความเป็นไปได้ว่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการออกแบบที่ถูกหลักการตามทฤษฎีการออกแบบแผ่นวงจรและการออกแบบวงจรที่มีการคำนึงถึงการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย

เอกสารอ้างอิง

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

[2] Schurter electronic, Introduction to EMC;.[21 ม.ค. 2557]. เข้าถึงได้ที่: www.schurterinc.com/content/download/339606/11198618/file/EMC+

[3] วัชรานนท์ แสนลิ้นฟ้า, "การออกแบบและสร้างวงจรชุคคอนเวอร์เตอร์ ขนาด 24 v,75 w เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟดีซีแบบคงค่าแรงดัน,"ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549.

ประวัติผู้เขียนบทความ

นาย ธนกฤช พิบูลย์
เกิดวันที่ 5 สิงหาคม 2534
15/44 ม.3 ต.ท่าวาสุกรี อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา
Email : whoami_555@hotmail.com

นาย ธนพล ผึ้งเถื่อน
เกิดวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2535
172 ซ.2 ม.13 ต.จอหอ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30310
Email : hero_ano_ne@hotmail.com

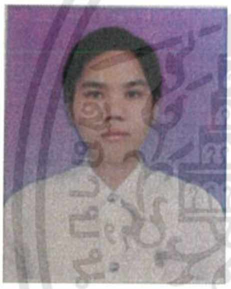
นางสาว ธนาภา สาธุพันธุ์
เกิดวันที่ 7 กันยายน 2535
100/28 ถ.นครอินทร์ ต.ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
Email : baiteay39442@hotmail.com

นางสาว ธัญญา ธัญกิจจานุกิจ
เกิดวันที่ 29 ตุลาคม 2534
359/15 ม.12 ต.หนองกลับ อ.หนองบัว จ.นครสวรรค์
Email : filmmy_ja@hotmail.com

ประวัติผู้เขียน

นาย ธนกฤช พิบูลย์ เกิดวันที่ 5 สิงหาคม 2534
15/44 ม.3 ต.ท่าวาสุกรี อ.พระนครศรีอยุธยา
จ. พระนครศรีอยุธยา
โทรศัพท์ 085-4038648 Email : whoami_555@hotmail.com

นาย ธนพล ผึ้งเถื่อน เกิดวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2535
172 ซ.2 ม.13 ต.จอหอ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30310
โทรศัพท์ 082-2510040 Email :hero_ano_ne@hotmail.com



นางสาว ธนาภา สาธุพันธุ์ เกิดวันที่ 7 กันยายน 2535
100/28 ถ.นครอินทร์ ต.ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
โทรศัพท์ 086-8986720 Email :baiteay39442@hotmail.com

นางสาว ธัญญา ธัญกิจจานุกิจ เกิดวันที่ 29 ตุลาคม 2534
359/15 ม.12 ต.หนองกลับ อ.หนองบัว จ.นครสวรรค์ 60110
โทรศัพท์ 087-3135565 Email : filmmy_ja@hotmail.com