

การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ด้วยเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

Cancellation of Common Mode Electromagnetic Noise in a Power
Electronic Circuit Using Noise Balancing technique

โดย

นายกชิตศ	สุดกลับ
นายกันท์อเนก	เฟื่องฟูพงศ์
นายพรภพ	อนิวัตกุลชัย

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ด้วยเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

Cancellation of Common Mode Electromagnetic Noise in a Power
Electronic Circuit Using Noise Balancing technique

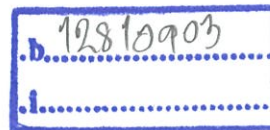


T143914

โดย

นายกษิตศ สูดกลับ
นายกัณฑ์เอนก เฟื่องฟูพงศ์
นายพรภพ อนิวัตกุลชัย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....143914
วัน.เดือน.ปี.....04 ต.ค. 2559



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

Cancellation of Common Mode Electromagnetic Noise in a Power
Electronic Circuit Using Noise Balancing technique

KASIDIT

GUNANEK

PORNPOB

SUDKLUB

FUEANGFUPHONG

ANIWATKULCHAI

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

2015

ปีการศึกษา 2558

การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ด้วยเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

Cancellation of Common Mode Electronic Noise in a Power Electronic
Circuit Using Noise Balancing technique

โดย

นาย กษิตศ	สุดกลับ
นาย กัณฑ์เอนก	เฟื่องฟูพงศ์
นาย พรภาพ	อนิวัตกุลชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
กำลังด้วยเทคนิคการสมมูลสัญญาณรบกวน

ผู้จัดทำ

- | | |
|-----------------|--------------|
| 1. นายกษิติศ | สุดกลับ |
| 2. นายกัณฑ์เอนก | เฟื่องฟูพงศ์ |
| 3. นายพรภพ | อนิวัตกุลชัย |


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

การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย
เทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

นาย กษิตศ	สุดกลับ
นาย กัญท์เอนก	เฟื่องฟูพงศ์
นาย พรภพ	อนิวัตกุลชัย
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558	

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยในปัจจุบันนั้นได้มีแนวโน้มการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการทำงานด้วยอุปกรณ์ที่มีสวิตชิงความถี่สูง ปฏิญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) ที่ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งนำไปใช้จ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์ที่มีพิกัดและความถี่เดียวกับที่ใช้ในบ้านทั่วไป แต่ในการใช้งานอุปกรณ์สวิตชิงนั้นมักก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระดับที่สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่อการทำงานหรือส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการหักล้างสัญญาณรบกวน (Noise balancing) เพื่อให้เป็นไปตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน EN55022 Class B

Cancellation of Common Mode Electromagnetic Noise in a Power Electronic Circuit Using Noise Balancing technique

Mr. Kasidit Sudklub
Mr. Gunanek Fueangfuphong
Mr. Pornpob Aniwatkulchai
Asst.Prof.Dr.Chaiyan Jettanasen Supervisor
Year 2015

ABSTRACT

This project presents a study on cancellation of common mode electromagnetic noise in a power electronic circuit, which is herein flyback converter, functioning with high-frequency switching devices. This flyback converter is designed in discontinuous current mode, and used to supply electrical household appliances. The use of this kind of converter can generate high-frequency noise that could damage or malfunction nearby sensitive equipment. Hence EMI reduction technique is required to solve the Electromagnetic Compatibility (EMC' problem) in accordance with an applied standard by referencing to EN 55022 class B.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และสละเวลาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลปริญญาานิพนธ์และกรุณาให้ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่อง ต่างๆ และเอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์ที่จำเป็นแก่คณะผู้วิจัย คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความ กรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ นายสุวัฒน์ แซ่ตัน ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการออกแบบหม้อแปลงความถี่ สูงและการออกแบบวงจรพลาสมาแบบคอนเวอร์เตอร์

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์และเจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดสอบ ผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยทดสอบและเก็บผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมทำวิจัยทุกคนที่คอยให้กำลังใจให้คำปรึกษาและร่วมกันแก้ไข ปัญหาต่างๆด้วยความสามัคคีจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่คอยให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจและให้ความ ช่วยเหลือจนทำให้โครงการครั้งนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 ตารางการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	6
2.2 ปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	7
2.3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.3.1 สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Noise)	9
2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ทางอากาศ	9
2.3.3 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	10
2.3.4 ทางเดินของสัญญาณรบกวน	11
2.4 นิยามของสัญญาณรบกวนแบบโหมดผลรวม (Common Mode) และโหมดผลต่าง (Differential Mode)	11
2.4.1 สัญญาณรบกวนแบบดิฟเฟอเรนเชียลโหมด (Differential Mode)	11
2.4.2 สัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโหมด (Common Mode interference)	12
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์	14
2.5.1 พื้นฐานการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	15
2.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันภายในวงจร	17
2.5.3 การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง	18
2.5.4 การออกแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง	19
2.5.5 อุปกรณ์สำหรับสวิตชิงความถี่สูง	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 วงจรควบคุมสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย	24
2.6.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน	24
2.6.2 ไอซีเบอร์ TL 494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน	25
2.6.3 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน	25
2.6.4 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์	26
2.6.5 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ T_D	27
2.7 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ	29
2.7.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)	30
2.7.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)	31
2.7.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)	32
2.7.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)	32
2.7.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ	33
2.8 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	34
2.8.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)	34
2.8.2 CISPR	34
2.8.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)	35
2.8.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)	35
2.8.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE)	36
2.9 เทคนิคในการลดทอนสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้า	38
2.9.1 การบาลานซ์ (Balancing)	38
2.9.2 การป้องกันการคับปลิงจากแหล่งจ่ายไฟ (Power supply decoupling)	40
2.10 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์	42
2.10.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า	42
2.10.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	43
2.10.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า	44
2.10.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)	45
บทที่ 3 การศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	46
3.1 การออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	46
3.2 การจำลองการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Psim	48
3.3 การจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Psim	49
3.4 การบาลานซ์	51
3.4.1 วิธีการบาลานซ์ซึ่งแบบที่ 1	51
3.4.2 วิธีการบาลานซ์ซึ่งแบบที่ 2	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	58
4.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	58
4.2 ผลการวัดสัญญาณของไอซี TL 494	59
4.3 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวน	60
4.3.1 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ	60
4.3.2 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลงความถี่สูง	71
ภาคผนวก ข มาตรฐาน EN 55022	74
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	79
ประวัติผู้เขียน	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) การแพร่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ข) ความคงทนต่อการถูกรบกวนโดยสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.3 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.4 การแพร่สัญญาณรบกวนผ่านสายตัวนำ	9
2.5 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.6 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	10
2.7 บล็อกไดอะแกรมซึ่งแสดงทางเดินของสัญญาณรบกวน	11
2.8 ทางเดินของสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์	11
2.9 ทางเดินของสัญญาณรบกวนแบบโหมดผลต่าง	12
2.10 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง	12
2.11 ทางเดินของสัญญาณรบกวนแบบโหมดผลร่วม	13
2.12 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม	13
2.13 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว	14
2.14 วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	16
2.15 กระแสที่ขีดปฐมภูมิและกระแสที่ขีดทุติยภูมิขณะที่วงจรทำงาน	17
2.16 กระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในวงจรขณะทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	18
2.17 กระแสเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง	19
2.18 กำหนดเวลาเพื่อ t_D เพื่อให้ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ยังคงทำงานในโหมดกระแส ไม่ต่อเนื่องที่เวลา $t = t_{on(max)}$	20
2.19 อุปกรณ์สำหรับสวิตชิงความถี่สูง (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟต (ข) กระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว (ค) กระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ	22
2.20 การสูญเสียที่ตัวสวิตซ์	24
2.21 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดัน	24
2.22 ลักษณะของความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของ PWM ซึ่งเป็นผลมาจากการมอดูเลต สัญญาณป้อนกลับและสัญญาณฟันเลื่อย	25
2.23 การจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี (TL 494 Motorola)	26
2.24 ความสัมพันธ์ของ $R_T C_T$ ในการกำหนดความถี่	26
2.25 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494	27
2.26 ลักษณะการเลือกใช้อาท์พุตของ TL 494	28
2.27 วิธีการตรวจจับสัญญาณโดยใช้ LISN	30
2.28 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)	30
2.29 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์	31
2.30 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Shielded Room)	32
2.32 วิธีการจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจจับสัญญาณตามมาตรฐานสากล	33
2.33 ชีตจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022	37
2.34 ชีตจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC	37
2.35 แหล่งกำเนิดสมมูลเทียบกับกราวด์	39
2.36 อิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์	39
2.37 บาลานซ์แหล่งจ่าย	40
2.38 ระบบจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ	41
2.39 วงจรการวิเคราะห์ห้วงจรจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ	41
2.40 วงจรที่ทำการยุบวงจรจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ	42
2.41 องค์ประกอบแผงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	42
2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ	43
2.43 องค์ประกอบแผงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	43
2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ	44
2.45 องค์ประกอบแผงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	44
2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ	44
3.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	48
3.2 วงจรควบคุมสัญญาณเกตของมอสเฟต	49
3.3 แรงดันต้านออกของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Steady State = 0.0043s)	49
3.4 โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)	50
3.5 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พร้อมกับ LISN	50
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่	51
3.7 การหักล้างสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม	51
3.8 การหักล้างสัญญาณรบกวนในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	52
3.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ พร้อมกับ LISN และ Balancing circuit แบบที่1	53
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่ เมื่อมีการใช้เทคนิค noise balancing (แบบที่1)	54
3.11 แหล่งกำเนิดสมมูลเทียบกับกราวด์	55
3.12 อิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์	55
3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พร้อมกับ LISN และ Balancing circuit แบบที่2	56
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่ เมื่อมีการใช้เทคนิค noise balancing (แบบที่2)	57
4.1 โครงสร้างวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	58
4.2 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโรงงาน	58
4.3 การใช้งานฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กับแบตเตอรี่	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 สัญญาณแสดงรูปคลื่นพัลส์ในวงจรขับเคลื่อน	
(ก) สัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 ของไอซี	59
(ข) สัญญาณขับเคลื่อนที่ขา 9 ของไอซี	59
4.5 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ	60
4.6 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	61
4.7 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนกรณีใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน	61
4.8 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน ($C=47\mu F$)	62
4.9 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน ($C=3300\mu F$)	63
4.10 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนกรณีต่อวงจรกรองความถี่สูง	63
4.11 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายคอนเวอร์เตอร์หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูง	64
4.12 ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ลดสัญญาณรบกวน MBS-1215-22	64
4.13 วงจรไฟฟ้าของตัวกรองกระแสไฟฟ้า ลดสัญญาณรบกวน MBS-1215-22	65
4.14 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	65
4.15 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	66
4.16 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนของวงจรหลังจากชิลด์หม้อแปลง	66
4.17 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากชิลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการ	3
2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้ากันได้ทางไฟฟ้า	5
2.2 เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆ	23
2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นเรื่อยๆ มีการนำอุปกรณ์เหล่านี้มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการธุรกิจและในชีวิตประจำวัน อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีความไวต่อความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับสูงมาก ดังนั้น สิ่งที่มีมักจะเกิดขึ้นอยู่เสมอและยากที่จะหลีกเลี่ยงได้ก็คือ ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปัญหาทางไฟฟ้า เช่น การชำรุดและเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือการสูญหายของข้อมูลที่สำคัญ รวมถึงการสูญเสียเวลา ตลอดจนโอกาสทางธุรกิจ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ชัดเจนว่า ผลกระทบที่เกิดจากปัญหาทางไฟฟ้านี้ก่อให้เกิดความเสียหายได้อย่างมากมายมหาศาลเลยทีเดียว ซึ่งปัญหาทางไฟฟ้าปัญหาหนึ่งก็คือ ปัญหาจากสัญญาณรบกวน (Noise) นั่นเอง และในปัจจุบันเราจะเห็นว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กกลางจะสามารถทำงานได้ดีขึ้น ประมวลผลได้เร็วขึ้น มีความเร็วในการทำงานมากขึ้น แต่จะมีปัญหาที่ตามมาด้วย นั่นก็คือ การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราใช้งานอยู่นั้นจะสร้างสัญญาณความถี่ออกมาเมื่อมีการใช้งาน การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าส่งผลให้อุปกรณ์ที่ถูกรบกวนนั้นเกิดข้อบกพร่องในการทำงานและบางครั้งอาจจะทำให้ผู้ใช้อุปกรณ์นั้นเกิดอันตรายขึ้นได้ ดังนั้นในตลาดการค้าสากล ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ก่อนที่จะนำออกจำหน่ายได้นั้นต้องผ่านการทดสอบด้านการใช้งาน ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อผู้ใช้นั้นๆ ต้องผ่านการทดสอบมาตรฐานที่กำหนดโดยตลาดที่ส่งไปจำหน่าย จึงจะสามารถส่งออกไปขายในเขตการค้าต่างๆ ได้

จากข้อมูลดังกล่าวมา แสดงให้เห็นว่าปัญหาของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสำคัญกับชีวิตประจำวัน ทั้งเรื่องที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและอันตรายต่อทรัพย์สิน และเป็นปัญหาที่เราควรให้ความสนใจเป็นอย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการทำงานของ flyback converter
- 1.2.2 วิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.2.3 ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ
- 1.2.4 ศึกษาและทดสอบด้วยวิธี noise balancing technique เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตในการศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ คือ การหากล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โหมดผลร่วมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการจำลองและการตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.4.3 ศึกษาวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แบบทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง
- 1.4.4 จำลองการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์โดยโปรแกรม Psim
- 1.4.5 ศึกษาวิธีการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเทคนิคการบาลานซ์
- 1.4.6 ทำการออกแบบและสร้างวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์
- 1.4.7 นำวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มาทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 class B

1.5 ตารางการดำเนินโครงการ

ตาราง 1.1 แผนการดำเนินการ

ขั้นตอน	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	←→								
2.ศึกษาวิธีการจำลอง การตรวจวัด และลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า		←→							
3.ศึกษาวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์		←→							
4.จำลองวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์โดยโปรแกรมPsim		←→							
5.ศึกษาและจำลองการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการสมมูลสัญญาณรบกวน				←→					
6.ทำการออกแบบสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์และใช้เทคนิคการชิวด์ตัวนำ				←→					

ตาราง 1.1 (ต่อ) แผนการดำเนินการ

ขั้นตอน	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
7.เชื่อมต่อฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กับเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 class B								←————→	
8.เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปฏิญานินพนธ์								←————→	

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.6.1 ทำให้เข้าใจหลักการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์
- 1.6.2 ทำให้สามารถอธิบายและแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและหม้อแปลง
- 1.6.3 ทำให้สามารถใช้โปรแกรมออกแบบ วิเคราะห์ และจำลองผลที่เกิดขึ้นได้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางไฟฟ้า [1]

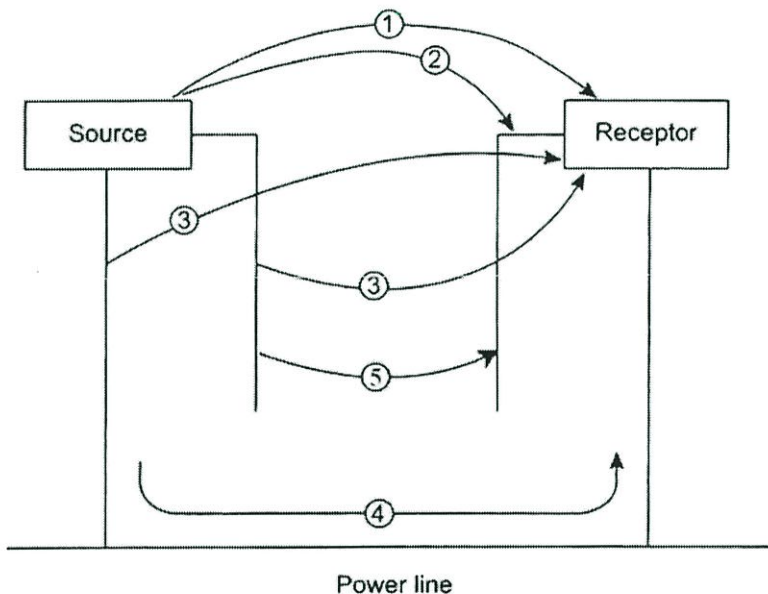
คำนิยาม	ความหมาย
Electromagnetic Compatibility : EMC ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสีย หรือผลกระทบใดๆต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน
Electromagnetic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

2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) [2]

องค์ประกอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

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

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



รูปที่ 2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

รูปแบบที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบโดยตรง (radiated emission)

รูปแบบที่ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยสายตัวนำดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-conducted emission)

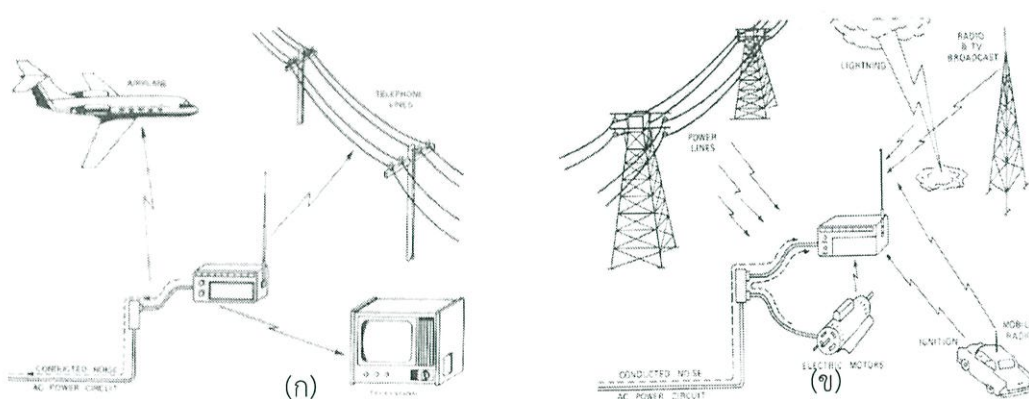
รูปแบบที่ 3 สายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่อยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-radiated emission)

รูปแบบที่ 4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบต่อตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อถึงกันกับตัวรับผลกระทบ (conducted emission)

รูปแบบที่ 5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายตัวนำดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น

2.2 ปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) [1]

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ (Electromagnetic Compatibility: EMC) คือความสามารถของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานได้ โดยไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนจากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและในขณะเดียวกันต้องสามารถทนต่อการถูกรบกวนจากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สู่ภายนอกเรียกว่า Electromagnetic Interference หรือ EMI และความสามารถในการต้านทานการรบกวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ถูกเรียกว่า Electromagnetic Susceptibility หรือ Electromagnetic Immunity หรือ EMS



รูปที่ 2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

(ก) การแพร่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

(ข) ความคงทนต่อการถูกรบกวนโดยสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 ขณะที่เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภทไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทำงาน มันจะแพร่สนามไฟฟ้าออกมาโดยไม่ตั้งใจ โดยการใช้อากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่านพลังงาน คล้ายกับเป็นเครื่องส่งความถี่วิทยุแพร่สัญญาณออกอากาศสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าดังกล่าวจะไปรบกวนการทำงานของ เครื่องรับโทรทัศน์ซึ่งใช้งานอยู่บริเวณใกล้เคียงและทำให้ สัญญาณภาพบนเครื่องรับโทรทัศน์เกิดการผิดปกติ เช่น เกิดเป็นจุด หรือเส้นบนหน้าจอ การแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานนี้ เรียกว่าการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือเรียกว่า Radiated Emission โดยปกติแล้ว ความต้านทานคลื่น (wave impedance)

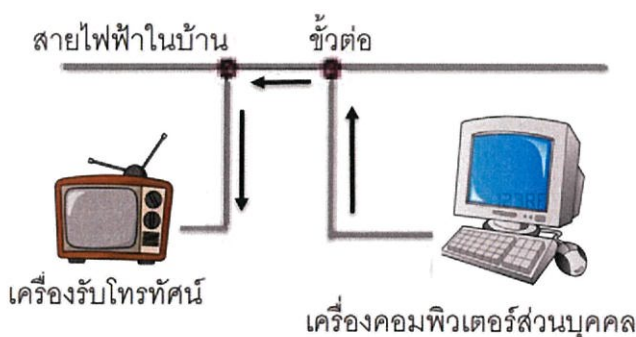
ของอากาศมีค่าประมาณ 377 โอห์มซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป สำหรับมาตรฐานในการทดสอบ การแพร่สัญญาณรบกวนผ่านอากาศนี้จะเริ่มพิจารณาทดสอบตั้งแต่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz



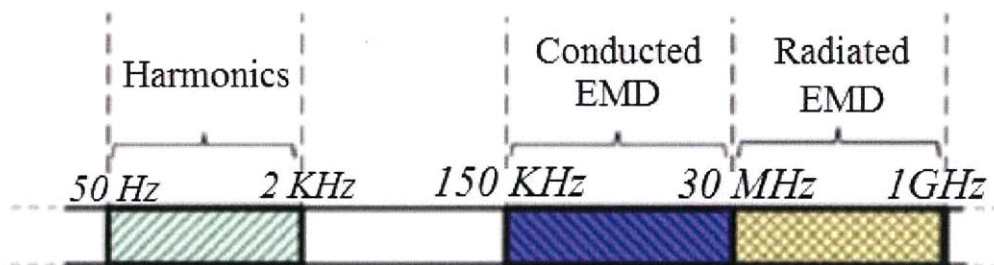
รูปที่ 2.3 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

การแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องคอมพิวเตอร์ ไปยังเครื่องรับโทรทัศน์ นอกจากจะใช้อากาศเป็นตัวส่งผ่านพลังงานแล้ว ยังสามารถใช้ตัวกลางส่งผ่านพลังงานอีกตัวหนึ่ง คือ สายไฟฟ้าที่ปลั๊กของเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องรับโทรทัศน์ที่เสียบอยู่ การแพร่สัญญาณรบกวนโดยมีสายไฟเลี้ยงหรือสายตัวนำสัญญาณเป็นตัวกลางส่งผ่านพลังงาน เรียกว่าการแพร่สัญญาณทางสายตัวนำหรือ Conducted Emission สำหรับการแพร่สัญญาณผ่านสายตัวนำนี้จะเริ่มพิจารณาที่ความถี่ 9 KHz ถึง 30 MHz

จากรูปที่ 2.4 ถ้าคิดในทางกลับกัน หากเครื่องรับโทรทัศน์มีความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ดี เครื่องรับโทรทัศน์ดังกล่าวก็จะมีอาการผิดปกติใดๆเกิดขึ้น เราเรียกความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่า ความคงทนต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic Immunity



รูปที่ 2.4 การแพร่สัญญาณรบกวนผ่านสายตัวนำ [5]



รูปที่ 2.5 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

2.3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [8]

2.3.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) คือ ผลของการรบกวนที่เกิดขึ้นในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่รังสีในพื้นที่ว่างหรือเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นตามสายไฟหรือสายสัญญาณซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบนำทางแบบคลื่นวิทยุ หรือการให้บริการด้านความปลอดภัยอื่นๆ หรือสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดในระบบนั่นเอง

2.3.2 ปัญหาการรบกวน EMC เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากหลายสาเหตุ

1. จำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
2. การทำงานของวงจรีเล็กทรอนิกส์ต่างๆมีความเร็วสูงขึ้น เช่น คอมพิวเตอร์มีสัญญาณนาฬิกา (clock) สูงขึ้น มากกว่า 2 GHz ในปัจจุบัน
3. มีการแย่งย่านความถี่มากขึ้นและใช้งานครอบคลุมเกือบทุกความถี่ เช่น ความถี่วิทยุ โทรทัศน์ ดาวเทียม การทหาร และอื่นๆ
4. การที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง และมีการออกแบบให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานที่ระดับไฟเลี้ยงตัวประจุ 5 โวลต์ ปัจจุบันลดลงเป็น 3 โวลต์และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ การลดระดับของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง กลับมีผลเสียต่อความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะแรงดันต่ำจะถูกรบกวนได้ง่าย

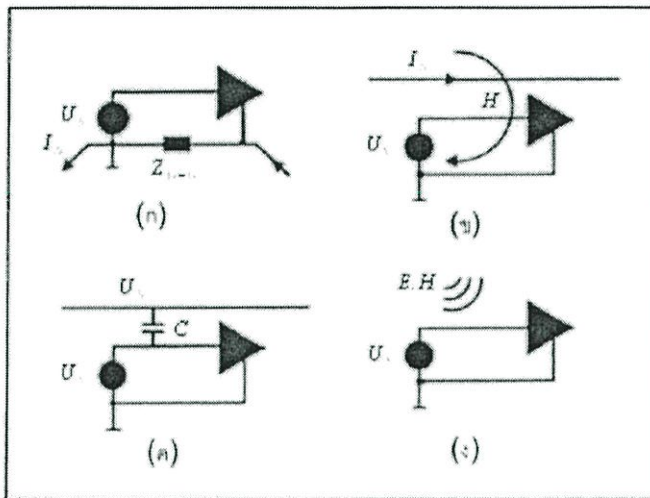
2.3.3 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งแยกออกเป็น 4 แบบใหญ่ๆคือ

1. การรบกวนซึ่งมีสาเหตุมาจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ของระบบ โดยปกติแล้วระบบไฟฟ้าหลายๆระบบที่นำมาต่อกันเพื่อทำงานร่วมกันจะใช้ระบบกราวด์ของตน ซึ่งเป็นการแยกหรือใช้งานระบบกราวด์คนละระบบ แต่ถ้านำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมระหว่างกราวด์ขึ้น ผลของความต่างศักย์ของระบบกราวด์นี้จะทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเรียกการรบกวนในโหมดนี้ว่า การคับปลิงที่เกิดจากการใช้กราวด์ร่วมกัน (Common ground impedance coupling) แสดงดังรูป 2.6 (ก)

2. การรบกวนซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสสูงๆ เมื่อกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น โดยรอบตัวนำตามแนวรัศมี ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำทำให้เกิดการไหลของกระแสบนตัวนำหรือวงจรถูกที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งเรียกการรบกวนในโหมดนี้ว่า อินดักทีฟคับปลิง (Inductive coupling) แสดงดังรูป 2.6 (ข)

3. การรบกวนซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูงๆ มาวางใกล้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อากาศซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Permeability) ซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และสามารถส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดมายังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งเรียกการรบกวนในโหมดนี้ว่า คาปาซิทีฟคัปปลิง (Capacitive coupling) แสดงดังรูป 2.6 (ค)

4. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ ซึ่งประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเรียกการรบกวนในโหมดนี้ว่า การคัปปลิงที่เกิดจากการแผ่ (Radiate field coupling) แสดงดังรูป 2.6 (ง)



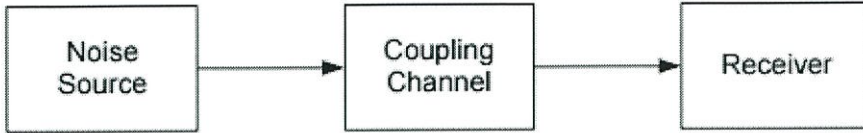
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [2]

กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นบทพิสูจน์ว่า ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสำคัญกับชีวิตประจำวันทั้งเรื่องที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและอันตรายต่อทรัพย์สิน จากปัญหาดังกล่าวในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป จีน ญี่ปุ่น ได้ออกกฎหมายเพื่อคุ้มครองผู้บริโภคขึ้นและบังคับใช้ภายในประเทศและภูมิภาค เช่น สหรัฐอเมริกาตั้งองค์กรขึ้นกำกับดูแลและออกกฎหมายเรียกว่า FCC สหภาพยุโรปก็กำหนดข้อบังคับการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากกลุ่มประเทศอื่นๆ ว่า

จะต้องได้รับการรับรอง คือได้เครื่องหมาย CE ก่อนจึงจะนำผลิตภัณฑ์ไปวางตลาดได้ ดังนั้นผู้ผลิตจึงควรให้ความสนใจเกี่ยวกับปัญหาด้าน EMC และปัญหานี้ควรจะถูกนำมาพิจารณาตั้งแต่เริ่มแรก เพื่อเป็นการลดปัญหาที่จะตามมา รวมทั้งยังเป็นการช่วยให้ต้นทุนในการผลิต ขนาดและการสูญเสียพลังงานในขณะที่ใช้งานมีค่าลดลงอีกด้วย

2.3.4 ทางเดินของสัญญาณรบกวน

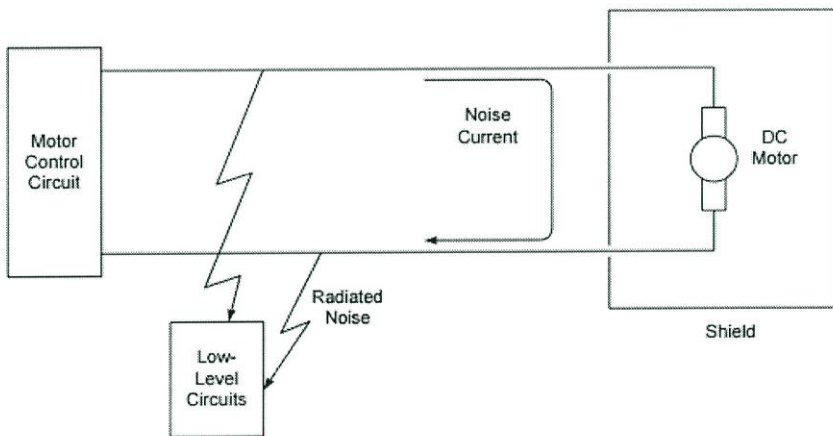
ทางเดินของสัญญาณรบกวน รูปที่ 2.7 เป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งแสดงทางเดินของสัญญาณรบกวนที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เส้นทางเชื่อมโยงสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังตัวรับ หรือการคับปลิง (Coupling) และวงจรตัวรับสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมซึ่งแสดงทางเดินของสัญญาณรบกวน [5]

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนนั้น เราจำเป็นต้องตรวจสอบว่าแหล่งกำเนิดและตัวรับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ใด และสัญญาณถูกรบกวนถูกคับปลิง ผ่านทางใด ดังนั้นจึงสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้ การป้องกันสัญญาณรบกวนสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. กั้นไม่ให้แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนออกไป
2. ทำให้ตัวรับไม่ตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน
3. ลดการส่งสัญญาณรบกวนผ่านการคับปลิงให้น้อยที่สุด



รูปที่ 2.8 ทางเดินของสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์ [4]

2.4 นิยามของสัญญาณรบกวนแบบโหมตผลร่วม (Common Mode) และแบบโหมตผลต่าง (Differential Mode) [1]

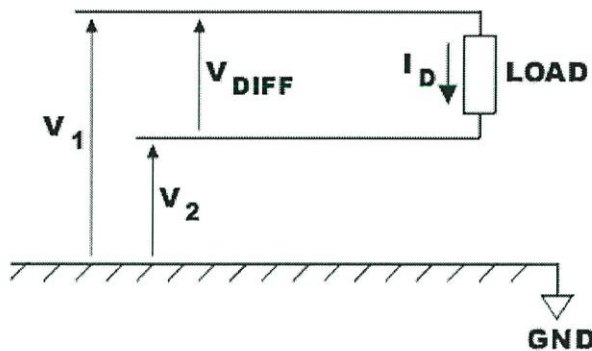
การรบกวนทางสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบ คือ

2.4.1 สัญญาณรบกวนแบบโหมตผลต่าง (Differential Mode : DM)

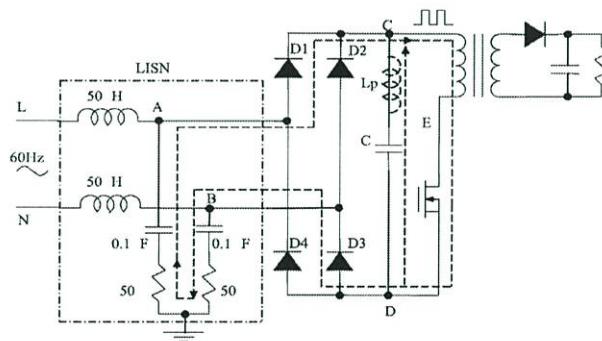
สำหรับนิยามของสัญญาณรบกวนแบบโหมตผลต่าง คือ สัญญาณรบกวนในโหมตผลต่างเกิดสัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สัญญาณนาฬิกา หรือ รูปคลื่นสัญญาณของ

แรงดันในวงจรใดๆ โดยสัญญาณในโหมดผลต่างนี้ทางเดินของกระแสหรือแรงดันจะไหลจากแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร (Z_{CIR}) เพื่อไปยังโหลด และจะไหลผ่านกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นทางเดินหลักของสัญญาณในวงจรนั้น เช่นนั้นทางเดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรคือทางเดินเดียวกัน ดังนั้นจึงกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำในโหมดผลต่างจะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง 2 ตัวนำในการส่งสัญญาณ คือ ตัวนำสัญญาณไป (Signal Line) และตัวรับสัญญาณกลับ (Return Line)

การทำงานของวงจรในย่านความถี่สูง ณ ย่านความถี่สูงนี้ คุณสมบัติของอุปกรณ์หรือตัวนำในวงจรอาจเปลี่ยนไป เช่น ทางเดินสัญญาณจะเกิดค่าการเหนี่ยวนำแฝงเกิดขึ้นได้ ซึ่งการป้องกันก็จะทำได้โดยการลดลูปของวงจร



รูปที่ 2.9 ทางเดินของสัญญาณรบกวนแบบโหมดผลต่าง [6]



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง [2]

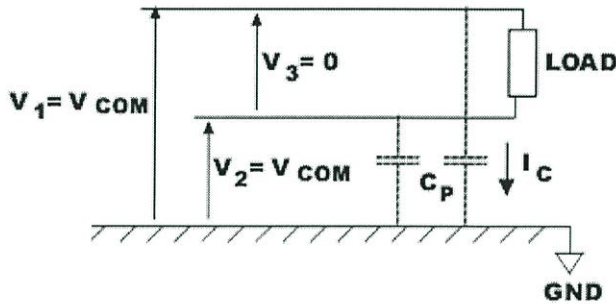
2.4.2 สัญญาณรบกวนแบบโหมดผลร่วม (Common Mode interference : CM)

สำหรับในโหมดผลร่วมนั้น จะพิจารณาการไหลของสัญญาณระหว่างกลุ่มของตัวนำกราวด์หรือกลุ่มตัวนำอื่นๆเป็นตัวอ้างอิง สำหรับการเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมนั้นจะมีตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วมคือ ตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) โดยตัวเก็บประจุแฝงนี้จะเป็นเส้นทางเดินสัญญาณไปยังกราวด์ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงในโหมดผลร่วมของทั้ง

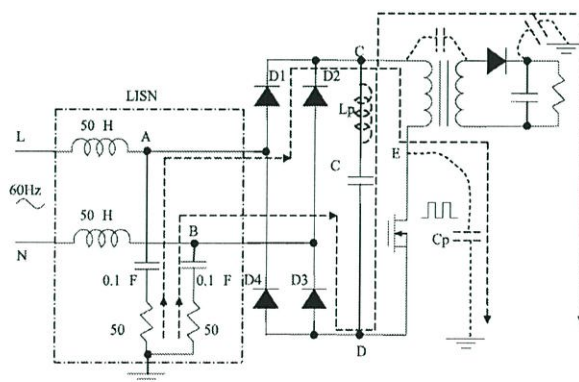
สายสัญญาณ (Line) และสายป้อนกลับ (Neutral) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นถ้าปราศจากตัวเก็บประจุแผ่นนี้แล้วก็จะไม่เกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันของสายสัญญาณ ($V_{noiseCIR}$) จะไม่เท่ากับสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับ ($V_{noiseRTN}$) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเส้นทางการไหลของสัญญาณรบกวนในแต่ละสายอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน เพราะว่าการไหลของสัญญาณในสายสัญญาณจะผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรไปยังอิมพีแดนซ์ของโหลด ในขณะที่การไหลของสัญญาณในสายป้อนกลับจะผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณการรบกวนในโหมดผลรวมไม่เท่ากัน โดยจะแสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) และเมื่อกระแสโหมดผลรวมไม่เท่ากันก็จะทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลขึ้น และโหมดผลรวมในกรณีนี้ก็จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างได้

$$V_{noiseCIR} = I_{CM1} \times (Z_{CM1} + Z_{Load} + X_{Cp}) \quad (2.1)$$

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



รูปที่ 2.11 ทางเดินของสัญญาณรบกวนแบบโหมดผลรวม [6]



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม [2]

ในกรณีวงจรไฟฟ้า 1 เฟสซึ่งประกอบไปด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม (Common mode voltage) และค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (Differential mode voltage) ดังต่อไปนี้

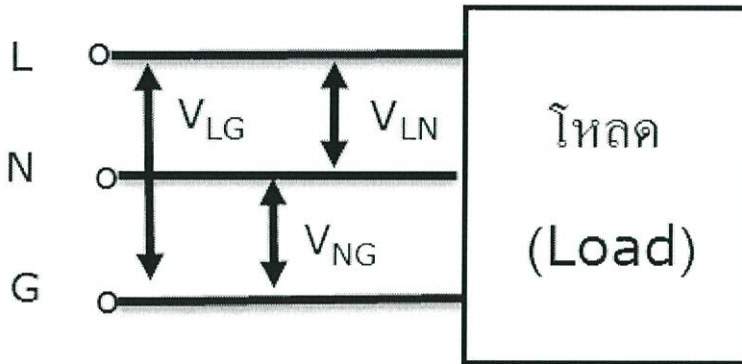
$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \quad (2.3)$$

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

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์

V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์

V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับนิวทรัล



รูปที่ 2.13 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว [2]

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ [9]

คอนเวอร์เตอร์มีหน้าที่หน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟตรงจากค่าสูงเป็นค่าต่ำหรือจากค่าต่ำเป็นค่าสูงและสามารถคงค่าแรงดันได้ คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป การจะเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดจะพิจารณาถึงลักษณะพื้นฐานดังนี้คือ

1. ลักษณะการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
2. ค่าแรงดันอินพุตที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
3. ค่าแรงดันสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
4. การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีเอาต์พุตหลายค่าแรงดัน
5. การกำเนิดสัญญาณรบกวน RF/EMI ของตัวคอนเวอร์เตอร์

โดยคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ทั่วไปในที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม ได้แก่

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)

เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 watt และให้ค่าสัญญาณรบกวน RF/EMI ค่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อยและมีราคาถูก

2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)

ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกันกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่กระแสที่ได้จะมีค่าการกระเพื่อมต่ำกว่า แต่อุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามานั้นจะทำให้คอนเวอร์เตอร์มีราคาที่สูงกว่า

3. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)

พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงตั้งแต่ 500 watt ขึ้นไป แต่มีข้อเสียคือ มักเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลงซึ่งมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่าย

4. ฮาร์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-Bridge Converter)

จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ตระกูลเดียวกับพูช-พูลคอนเวอร์เตอร์และให้กำลังงานได้ค่อนข้างสูง ข้อดีคือ มีค่าแรงดันตกคร่อมขณะไม่นำกระแสต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบ และลดการเกิดฟลักซ์ไม่สมมาตรได้

5. ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Converter)

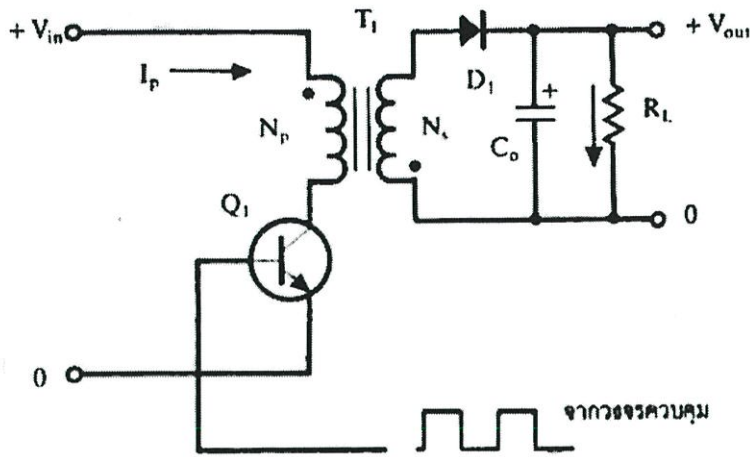
ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับฮาร์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แต่ ขณะทำงานที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันอินพุต กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจึงมีค่าต่ำกว่า ฟูล-บริดจ์จึงสามารถจ่ายกำลังงานได้สูง ตั้งแต่ 500 watt ถึง 1,000 watt

ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เพื่อศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ เพราะวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มีค่าสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างสูงเหมาะสำหรับนำมาเป็นกรณีศึกษา

2.5.1 พื้นฐานการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 การทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้ เพาเวอร์ทรานส์ซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานโดยนำกระแส (ON) และหยุดนำกระแส (OFF) สลับกันไป เมื่อ Q_1 นำกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ (I_p) แต่เนื่องจากหม้อแปลงถูกกำหนดให้ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิพันอยู่ในลักษณะกลับทิศกัน ดังนั้นในขณะที่ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะไบแอสกลับและไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด R_L พลังงานจึงถูกสะสมอยู่ที่ขดลวดปฐมภูมิ

ของหม้อแปลง เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงยุบตัว ทำให้มีการกลับขั้วของแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่ถูกสะสมไว้ที่ขดลวดปฐมภูมิจะถูกถ่ายเทไปยังขดลวดทุติยภูมิ และมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลดและตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ได้



รูปที่ 2.14 วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [7]

เมื่อวงจรทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามสมการ

$$V_{OUT} = \frac{t_{ON} \times (N_S / N_P) (V_{in} - V_{CE(sat)})}{(T - t_{ON})} \quad (2.5)$$

โดยที่ t	คือ คาบเวลาการทำงานของ Q_1 เป็นวินาที
t_{ON}	คือ ช่วงเวลาที่ Q_1 นำกระแส เป็นวินาที
N_P	คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ เป็นรอบ
N_S	คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ เป็นรอบ
V_{OUT}	คือ แรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็นโวลต์
V_{in}	คือ แรงดันที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็นโวลต์
$V_{CE(sat)}$	คือ แรงดันตกคร่อม Q_1 ขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว เป็นโวลต์
V_D	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด D_1 ขณะนำกระแส เป็นโวลต์

จะเห็นได้ว่า วงจรจะสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ด้วยการเพิ่มหรือลดช่วงเวลานำกระแส (t_{ON}) ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เท่านั้น ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดก็ตาม

สําคัญหอสุมคกลาง พระจอมเกลาลาดกระบุง

2.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันภายในวงจร

กระแสที่ไหลผ่าน Q_1 และขดลวดปฐมภูมิ ขณะที่ Q_1 นำกระแส นั้น จะเป็นลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.6)

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L} \quad (2.6)$$

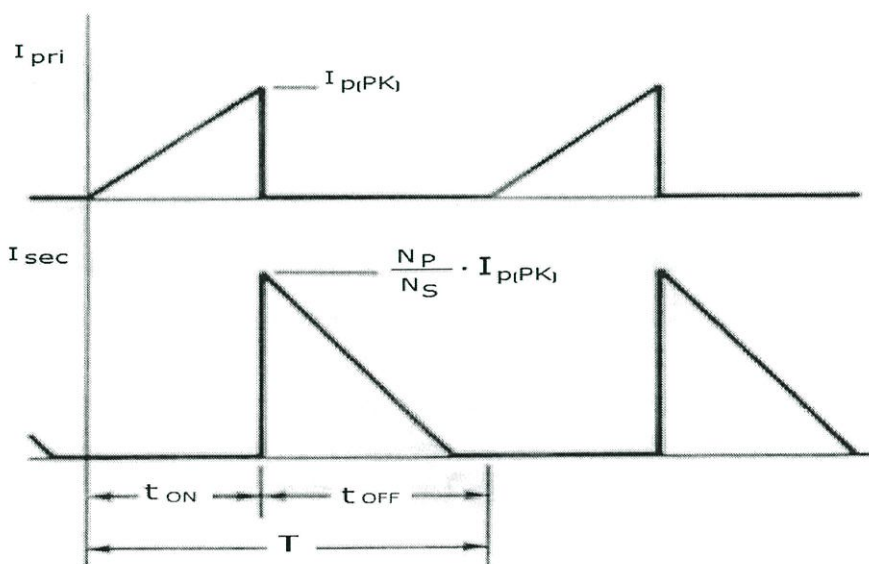
ดังนั้น กระแส I_p จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีค่าสูงสุดเมื่อ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส ที่เวลา $t = t_{ON}$ ดังนั้นกระแสสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{p(PK)} = \frac{(V_{in} - V_{CE(sat)})}{L_p} t_{ON} \quad (2.7)$$

โดยที่ $I_{p(PK)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ เป็น แอมป์

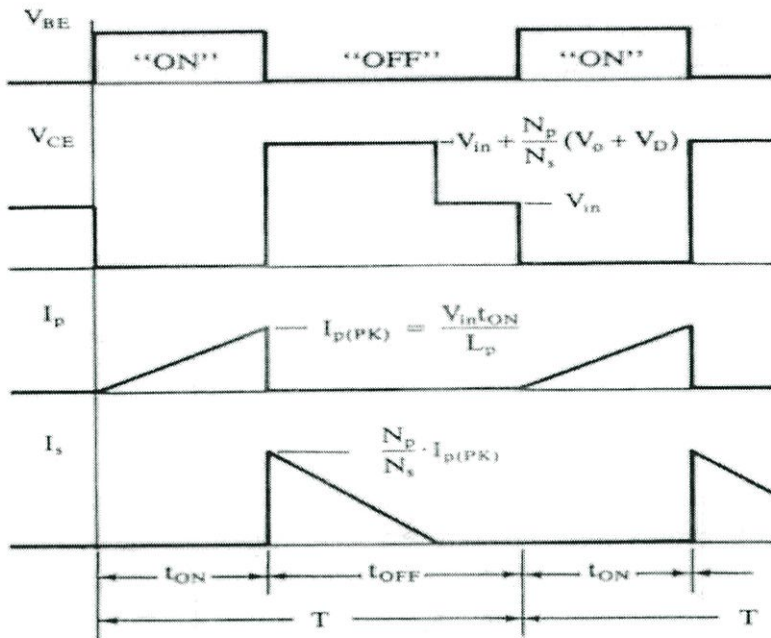
L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ เป็น เฮนรี

เมื่อ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส ขดลวดทุติยภูมิจะเริ่มมีกระแสไหล แต่เนื่องจากกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ กระแสที่ขดลวดทุติยภูมิ (I_s) จะเริ่มต้นที่ค่าสูงสุดของกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิ $I_{p(PK)}$ โดยมีค่าเป็นสัดส่วนตามอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s ดังนั้น กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิ จะมีค่าเริ่มต้นที่ $I_s = (N_p / N_s) I_{p(PK)}$ และมีค่าลดลงตามเวลา ลักษณะของกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ ตามเวลาจะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กระแสที่ขดปฐมภูมิและกระแสที่ขดทุติยภูมิขณะที่วงจรทำงาน [7]

เมื่อมีกระแสไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ ในขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแส จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ ด้วย เนื่องจากแรงดันตกคร่อมของขดลวดทุติยภูมิ มีค่าเท่ากับ $V_{OUT} + V_D$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิจึงมีค่าเท่ากับ $V_{in} + (N_p / N_s)V_{OUT} + V_D$ จนกระทั่งกระแสที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิ มีค่าลดลงเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อม Q_1 จึงลดลงมา มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต V_{in} ในรูปที่ 2.16 จะแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน



รูปที่ 2.16 กระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในวงจรขณะทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [7]

2.5.3 การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

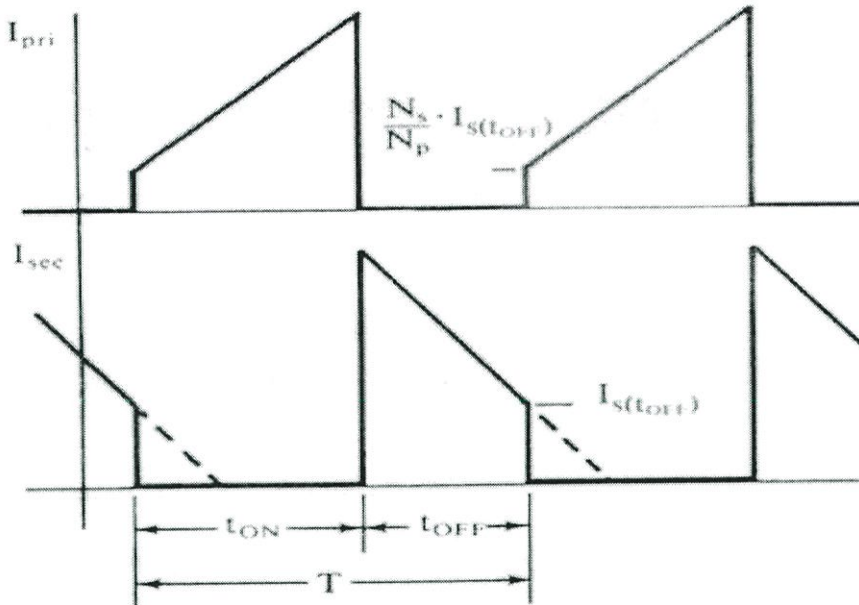
โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Mode)

เราจะกล่าวว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องก็เมื่อในขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแส พลังงานที่ถูกสะสมไว้ในขดลวดปฐมภูมิถูกถ่ายเทออกไปยังขดลวดทุติยภูมิจนหมด กล่าวคือกระแสที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ก่อนที่ Q_1 จะเริ่มนำกระแสอีกครั้ง (คือลักษณะของกระแสในรูปที่ 2.16)

โหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode)

จากรูปที่ 2.17 ถ้าคาบเวลา T มีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ของ Q_1 ให้มากขึ้น ช่วงเวลาหยุดนำกระแส t_{OFF} ก็จะมีค่าน้อยลงและกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาไปด้วย แต่เนื่องจากช่วงเวลาหยุดนำกระแส t_{OFF} มีค่าน้อย กระแสที่ขดลวดทุติยภูมิไม่สามารถลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ได้ทันทีภายในช่วงเวลา t_{OFF} จึงยังคงมีพลังงาน

บางส่วนเหลือค้างอยู่ในขดไพรมารี และเนื่องจากกระแสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด เมื่อ Q เริ่มนำกระแสอีกครั้ง กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิต้องเริ่มต้นด้วยค่าของกระแสขดลวดทุติยภูมิสุดท้ายที่ลดลงได้คูณด้วยอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ) การทำงานในลักษณะนี้เราเรียกว่า การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง



รูปที่ 2.17 กระแสเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง [7]

2.5.4 การออกแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.5.4.1 กำหนดค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s

การกำหนดอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s ของหม้อแปลง เป็นสิ่งที่ควรทำอันดับแรก เนื่องจากค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s นี้จะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมสูงสุดของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะหยุดนำกระแสโดย

$$V_{CE(max)} = V_{in(max)} + \frac{N_p}{N_s} (V_{OUT} + V_D) \quad (2.8)$$

ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้ จึงควรกำหนดอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s ดังนี้

$$\frac{N_p}{N_s} < \frac{V_{CEO} - (V_{in(max)} + V_{spike})}{(V_{OUT} + V_D)} \quad (2.9)$$

เมื่อ V_{CEO} คือค่าอัตราทนแรงดันได้สูงสุดของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ และ V_{spike} คือค่าแรงดันพุ่งหรือสไปค์ (spike) ที่เกิดขึ้นขณะเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส สไปค์นี้เกิดขึ้น

เนื่องจากฟลักซ์รั่วภายในหม้อแปลง ซึ่งทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝงขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิและมีการสะสมพลังงานเช่นเดียวกับขดไฟมารี แรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ $0.3 V_{in}$ และเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆจนกว่าพลังงานถูกสะสมในตัวเหนี่ยวนำแฝงจะถูกถ่ายเทหมดไป

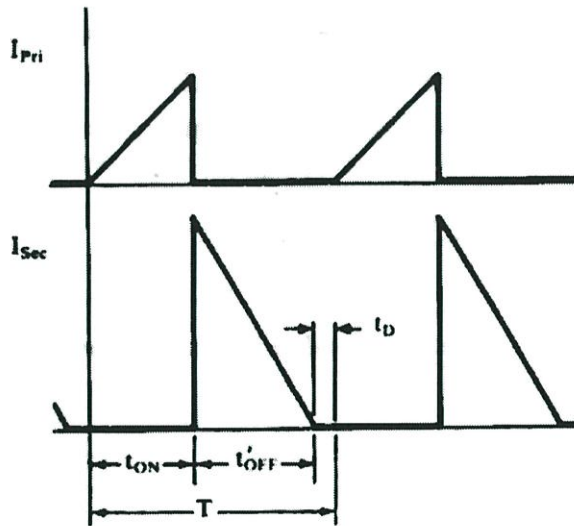
การกำหนดอัตราส่วนจำนวนรอบ N_p / N_s ที่มีค่ามากไปหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อขนาดของหม้อแปลงและกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในวงจร การพิจารณากำหนดค่า N_p / N_s นั้นจึงต้องพิจารณาผลของค่า N_p / N_s ที่มีองค์ประกอบต่างๆในวงจรอย่างเหมาะสม

2.5.4.2 ช่วงเวลานำกระแสสูงสุด $t_{on(max)}$

เพื่อให้แน่ใจว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องกำหนดให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแส t_{OFF} มีค่ามากพอ เพื่อให้กระแสที่ขดเซคันดารีลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเริ่มนำกระแสอีกครั้ง นั่นคือ จำเป็นจะต้องมีการจำกัดค่าของ t_{on} เอาไว้การจำกัดค่าของ t_{on} สามารถทำได้โดยกำหนดค่าเวลาเพื่อ (dead time) t_D ไว้ดังรูปที่ 2.14 กล่าวคือ การลดลงของกระแสที่ขดเซคันดารีจนเป็นศูนย์จะต้องใช้เวลาไม่เกิน $t_{OFF} = T - (t_{on} + t_D)$

ค่าของ t_D จะกำหนดให้เป็นเท่าใดก็ได้ โดยทั่วไปมักกำหนดไว้ที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลา T หรือเท่ากับ $0.2T$ ดังนั้น

$$t_{on(max)} + t_{OFF} = 0.8T \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.18 กำหนดเวลาเพื่อ t_D เพื่อให้ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ยังคงทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องที่เวลา $t = t_{on(max)}$ [7]

เนื่องจากกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิต้องลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์โดยใช้เวลามากที่สุดเท่ากับ t'_{OFF} นั่นคือ

$$\begin{aligned} -(0 - I_{s(pk)}) &= \frac{(V_{out} + V_D)}{L_s} t'_{OFF} \\ \frac{N_p}{N_s} I_{p(pk)} &= \frac{(V_{out} + V_D)}{L_s} t'_{OFF} \end{aligned} \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.7) แทนค่า $I_{p(pk)}$ ใน (2.11) จะได้ว่า

$$\text{เนื่องจาก } \frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \text{ และแทนค่า } t'_{OFF} = 0.8T - t_{on(max)}$$

$$\frac{N_p}{N_s} \frac{(V_{m(max)} - V_{CE(max)}) t_{on(max)}}{L_p} = \frac{(V_{out} + V_D)}{L_s} t'_{OFF} \quad (2.12)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad t_{on(max)} = \frac{(V_{out} + V_D)(N_p / N_s)(0.8T)}{(V_{m(min)} - V_{CE(sat)}) + (V_{out} + V_D)(N_p / N_s)} \quad (2.13)$$

2.5.4.3 กำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ L_p

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ทำงานด้วยการเก็บสะสมพลังงานในช่วงเวลาที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแส และส่งผ่านพลังงานออกไปในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสโดยในแต่ละช่วงเวลาที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแส พลังงานเก็บสะสมไว้ที่ขดลวดปฐมภูมิ (E) จะมีค่า

$$E = \frac{1}{2} L_p I_{p(pk)}^2 \quad (\text{จูล}) \quad (2.14)$$

และในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสตอนเวอ์เตอร์ไม่มีการสะสมพลังงาน ดังนั้นกำลังงานที่ใช้ไปในหนึ่งคาบเวลาจึงมีค่าเท่ากับ

$$P_{in} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_p I_{p(pk)}^2}{T} \right) \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.15)$$

จาก (2.7) แทนค่าลงใน (2.15) จะได้ว่า

$$P_{in} = \frac{[(V_{m(min)} - V_{CE(sat)}) t_{on(max)}]^2}{2TL_p} \quad (2.16)$$

ถ้าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ η (ประมาณ 65-80% สำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย) กำลังงานที่คอนเวอร์เตอร์จะสามารถจ่ายให้กับโหลดได้จะมีค่า

$$P_{out} = \eta P_{in} = \eta \frac{[(V_{m(min)} - V_{CE(sat)}) t_{on(max)}]^2}{2TL_p} \quad (2.17)$$

ดังนั้น เพื่อให้ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังงานได้เท่ากับกำลังงานที่ต้องการด้านเอาต์พุต P_{out} ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ L_p ต้องมีค่าอย่างต่ำเท่ากับ

$$L_p = \eta \frac{[(V_{in(min)} - V_{CE(sat)}) t_{on(max)}]^2}{2TP_{out}} \quad (2.18)$$

2.5.4.4 จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ N_p และจำนวนรอบขดเค้นดารี N_s

การกำหนดจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ N_p จะขึ้นอยู่กับขนาดแกนเฟอร์ไรต์และความหนาแน่น ฟลักซ์สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกน โดยจำนวนรอบ N_p จะมีค่าเท่ากับ

$$N_p = \frac{V_{in(max)} \times t_{ON(max)}}{\Delta B_{max} \times Ae} \times 10^8 \quad (2.19)$$

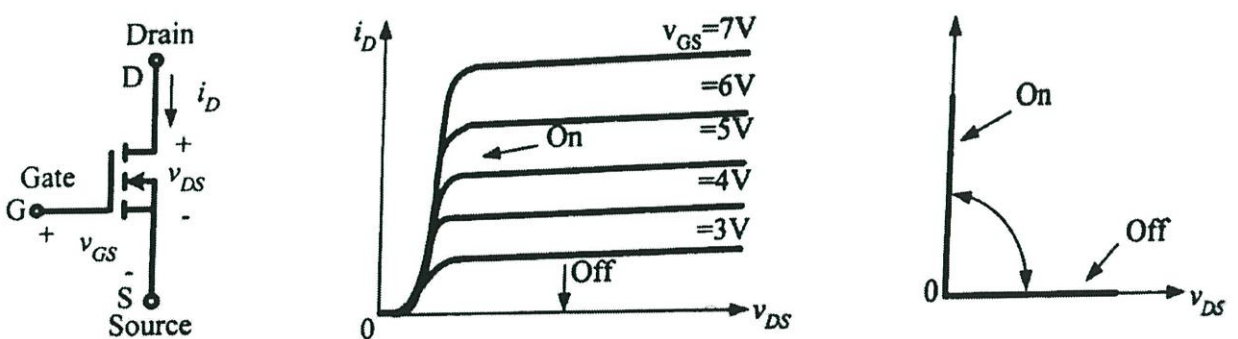
โดยที่ ΔB_{max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น เป็น เกาส์

Ae คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ เป็น ตารางเซนติเมตร

สำหรับจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ N_s นั้น สามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ $\frac{N_p}{N_s}$ และจำนวนขดลวดปฐมภูมิที่หาได้จากสมการที่ (2.19)

2.5.5 อุปกรณ์สำหรับสวิตชิงความถี่สูง

2.5.5.1 มอสเฟตกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor : MOSFET) มี 2 ชนิดคือ P-channel และ N-channel ซึ่งกรณี N-channel จะแสดงสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัวและในอุดมคติดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟต (ข) กระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว (ค) กระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ [2]

การควบคุมมอสเฟตจะควบคุมจากขาเกต โดยการป้อนแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอส (V_{GS}) ช่วงเวลาการสวิตชิงของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาทีถึงหลักร้อยของ

นาโนวินาทีขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง ในการใช้งานมอสเฟตขณะนำกระแสจะมีการสูญเสียเกิดขึ้น (conduction losses) ความสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอส ($R_{DS(on)}$) ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทนแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟต ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับซอสของมอสเฟตมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ความต้านทานก็จะมากขึ้นด้วยคุณลักษณะของมอสเฟต และการเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลังและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆ [2]

อุปกรณ์	ความสามารถ ส่งผ่านกำลัง	ความเร็วในการ สวิตช์	ความสามารถทน แรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

คุณลักษณะของมอสเฟต : เป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่เร็ว, ควบคุมด้วยแรงดัน, มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก, เมื่อพิกัดทนแรงดันสูงความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอสจะสูงขึ้นด้วย

2.5.5.2 การสูญเสียของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำขณะสวิตช์

การสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์เป็นเรื่องสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเนื่องจากการสูญเสียหลักในระบบซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นการทำความเข้าใจความสูญเสียอันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์จึงเป็นสิ่งจำเป็น

การทำงานของสวิตช์มีสองสถานะของการทำงาน คือสถานะนำกระแสและไม่นำกระแส โดยจะมีช่วงเปลี่ยนสถานะของการทำงานของสวิตช์จากนำกระแสไปเป็นไม่นำกระแส และจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส ซึ่งเรียกว่า ช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

$T_{s,ON}$ คือ เริ่มนำกระแส (turn on)

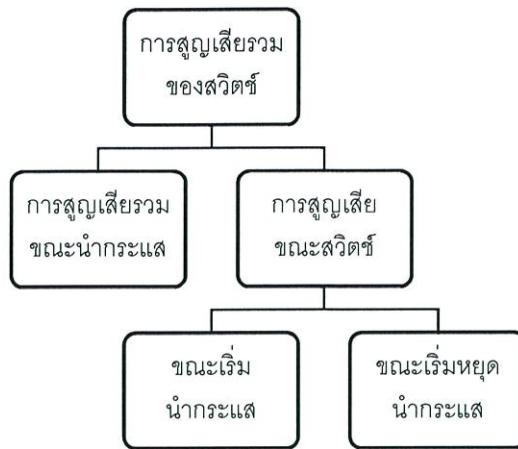
$T_{conduct}$ คือ นำกระแส (on)

$T_{s,Off}$ คือ เริ่มหยุดนำกระแส (turn off)

T_{Off} คือ ไม่นำกระแส (off)

การสูญเสียที่ตัวสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น

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



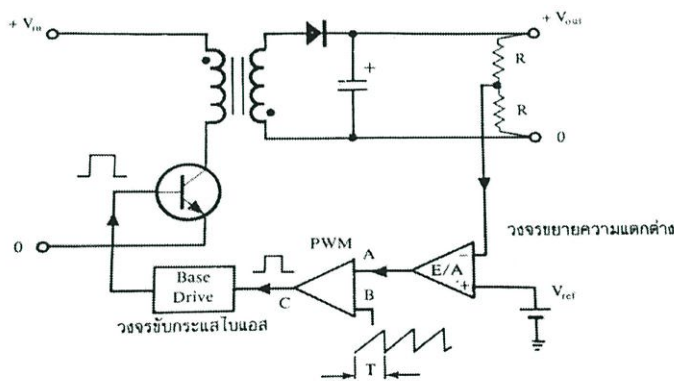
รูปที่ 2.20 การสูญเสียที่ตัวสวิตช์

2.6 วงจรควบคุมสำหรับสวิตซ์ซิงเพาเวอร์ซัพพลาย [9]

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์เกือบทุกแบบ จะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลา นำกระแส (t_{ON}) ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปจึงมักนิยมใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) หรือ PWM เป็นหลัก การใช้ PWM เมื่อควบคุมช่วงเวลา นำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้ในสองลักษณะการทำงานของวงจรควบคุมคือ โหมดควบคุมแรงดันและโหมดควบคุม กระแส ในที่นี้จะนำเสนอการควบคุมโหมดควบคุมแรงดัน

2.6.1 วงจรควบคุมโหมดควบคุมจากแรงดัน (Voltage Mode Control)

การทำงานของวงจรควบคุมโหมดนี้ จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันที่ เอาต์พุตมาช่วยควบคุมช่วงเวลา นำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อการคงค่าแรงดันเอาต์พุต เป็นหลัก วงจรพื้นฐานของวงจรควบคุมโหมดควบคุมจากแรงดันจะเป็นดังรูปที่ 2.21

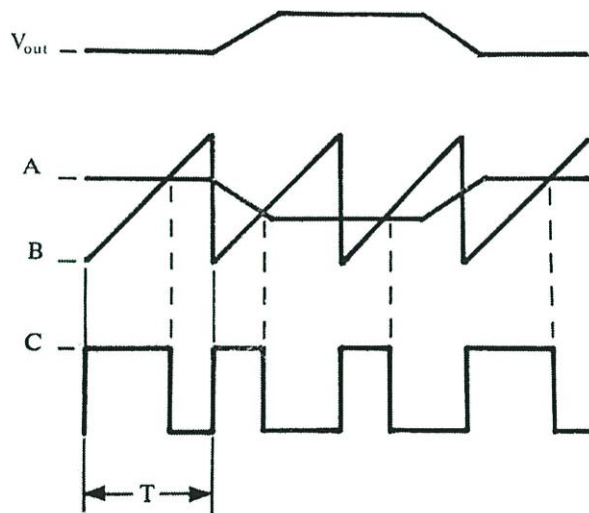


รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์โหมดควบคุมจากแรงดัน [7]

จากรูป 2.21 วงจรควบคุมจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุตและเปรียบเทียบกับ แรงดันอ้างอิง V_{ref} ของวงจรเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ค่าความแตกต่างที่

ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความแตกต่าง E/A ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดูเลชันของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์

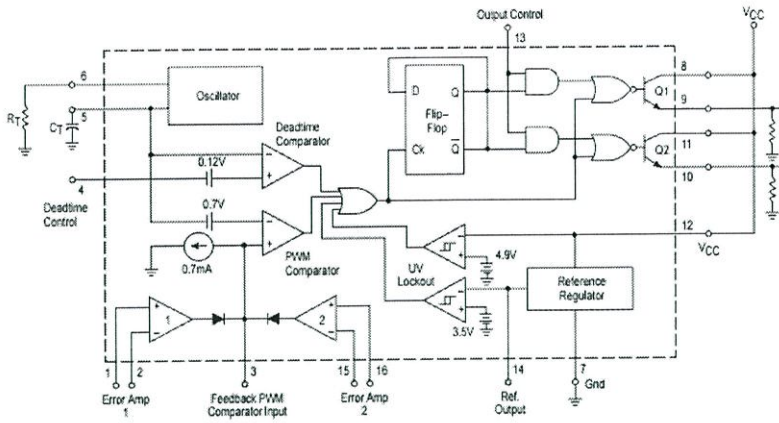
เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ขาอินเวอร์ต ดังนั้นผลต่างของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180° กล่าวคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ t_{ON} ก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น t_{ON} ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตเอาไว้ได้ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันขณะวงจรทำงานจะเป็นดังรูป ตัวอย่างไอซีที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดันได้แก่ เบอร์ MC34060, MC34166 และ TL494



รูปที่ 2.22 ลักษณะของความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของ PWM ซึ่งเป็นผลมาจากการมอดูเลตสัญญาณป้อนกลับและสัญญาณฟันเลื่อยตามรูปที่ 2.21 [7]

2.6.2 ไอซีเบอร์ TL 494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน

ไอซีเบอร์ TL 494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมดควบคุมแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นอย่างการทำงานสำหรับวงจรควบคุมด้วยวิธีจากแรงดัน โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL 494 แสดงในรูปที่ การทำงานของไอซีจะเป็นดังนี้

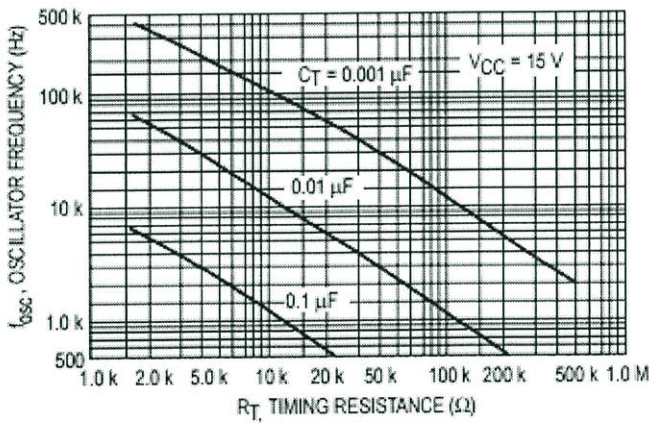


รูปที่ 2.23 การจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี (TL 494 Motorola)

2.6.3 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ TL 494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์ กำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 และ 5 ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนด

ได้จาก
$$T_L = \frac{R_T C_T}{1.1}$$



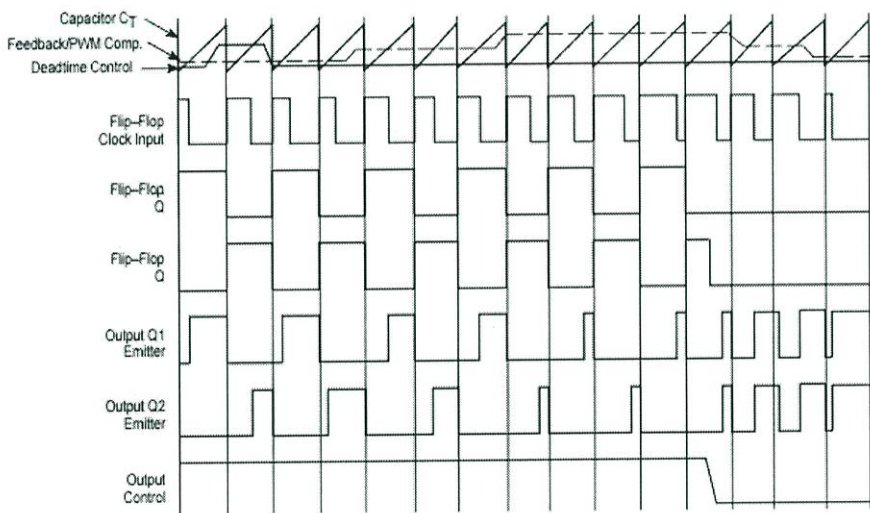
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของ $R_T C_T$ ในการกำหนดความถี่

2.6.4 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 กับแรงดันที่ได้จากวงจรรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกทที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q_1 และ Q_2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C_X ของ Flip-Flop อยู่ใน

สถานะ “Low” เท่านั้น ซึ่ง C_K จะเป็น “Low” ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่ามีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัว นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะลดลง ในทางกลับกัน แรงดันป้อนกลับหากมีค่าลดลงความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีนี้อาจกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ จนถึง 3.5 โวลต์ ส่วน Error Amp ทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมด ตั้งแต่ -0.3 ถึง $(V_{CC}-2)$ โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือ (Active High) โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซี



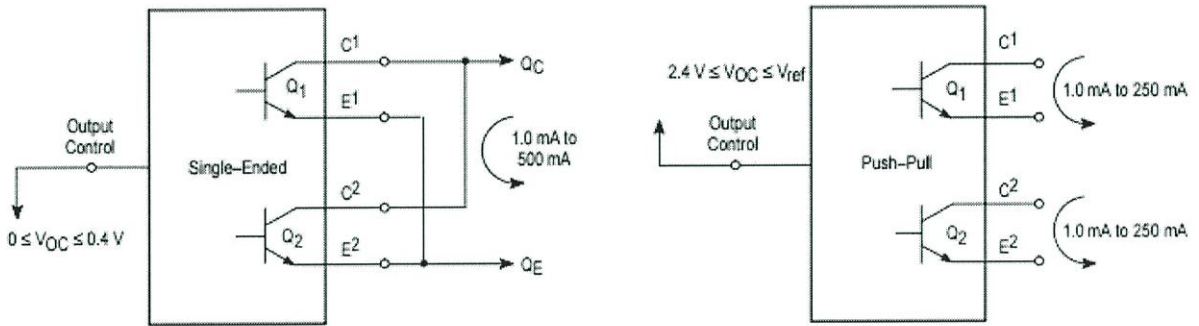
รูปที่ 2.25 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494

2.6.5 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ T_D

TL 494 สามารถกำหนดค่าเวลาเพื่อ T_D ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง -3.3 โวลต์ที่ขาที่ 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นช่วงเวลา T_{ON} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48% ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (output control) เข้ากับขา 14 (+5 V_{ref}) และมีค่าเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์

การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาท์พุทของไอซี

เอาท์พุท Q_1 และ Q_2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมดคือ ทำงานพร้อมกัน หรือสลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (Output Control) โดยขณะที่ Dead-Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา C_K จะมีสถานะเป็น “High” และหยุดการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น “High” โดยการต่อเข้ากับขา 4 (+5 V_{ref}) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ Flip-Flop เพื่อใช้ขับคอนเวอร์เตอร์แบบพุช-พูล ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของคาบเวลาสัญญาณพื้นเลื้อยของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น “Low” โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิก Flip-Flop) Q_1 และ Q_2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q_1 และ Q_2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้น้ำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณพื้นเลื้อยของไอซี (ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา)



รูปที่ 2.26 ลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุทของ TL 494

TL 494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $7 \leq V_{CC} \leq 40$ โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน $V_{ref} = 5$ โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีความถูกต้อง $\pm 1.5\%$ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70°C

2.7 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำ [13]

อุปกรณ์ที่ใช้นั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติที่กำหนด เพื่อให้การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022)

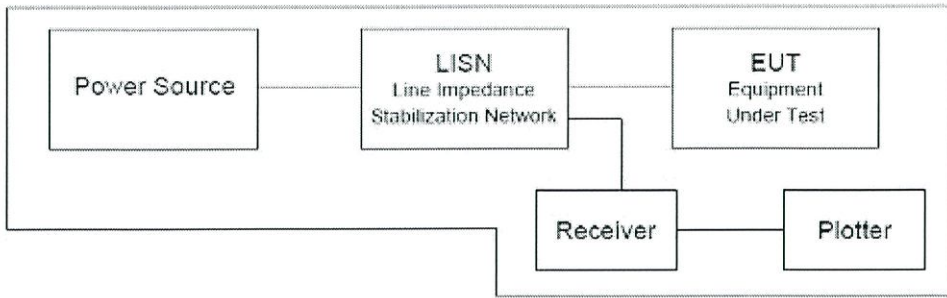
การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference Testing: EMI)

ตามมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในระดับสากลและระดับภูมิภาคต่าง ๆ นั้นได้กำหนดค่าระดับความแรงของสัญญาณรบกวนที่ยอมรับได้ไว้ ซึ่งอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าจะได้รับการรับรองตามมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนออกมาเกินขีดที่จำกัดที่มาตรฐานกำหนดไว้ มาตรฐานสากลทางแม่เหล็กไฟฟ้าเรื่องการทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission) ได้แก่ CISPR11, CISPR15, CISPR22 และ FCC เป็นต้น

โดยผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีลักษณะการใช้ที่แตกต่างกัน ดังนั้น ระดับความแรงของสัญญาณรบกวนที่แพร่มาจากอุปกรณ์ชนิดต่างๆ จึงแตกต่างกันไปด้วย มาตรฐานแต่ละหมายเลขจึงได้กำหนดเส้นจำกัดของสัญญาณ (Limit Line) ขึ้น เพื่อบังคับใช้กับอุปกรณ์แต่ละชนิด เส้นจำกัดถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาระดับความแรงของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับมาตรฐาน โดยอนุญาตให้ผลิตภัณฑ์ด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีความแรงของสัญญาณอยู่ต่ำกว่าเส้นจำกัด หากผลิตภัณฑ์ใดสร้างสัญญาณรบกวนสูงกว่าเส้นจำกัด ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จะต้องทำการแก้ไขจนมีระดับสัญญาณรบกวนต่ำกว่าเส้นจำกัดจึงจะสามารถนำไปวางตลาดได้

การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI Testing)

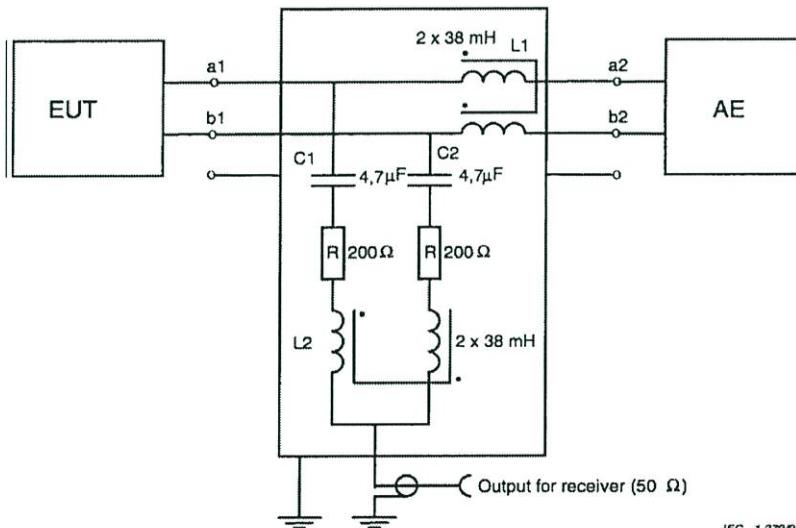
เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ย้อนกลับเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (AC main supply) โดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน (coupling path) ในการทดสอบนี้ ต้องนำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded room) แล้ววัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ โดยอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องวัดสัญญาณรบกวน (EMI receiver) ผ่านการตรวจวัดแล้วเทียบค่าที่วัดได้เทียบกับค่าขีดจำกัด (Limit Line) ของแต่ละมาตรฐาน สำหรับรูปแบบในการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนโดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแสดงในรูปที่ 2.27



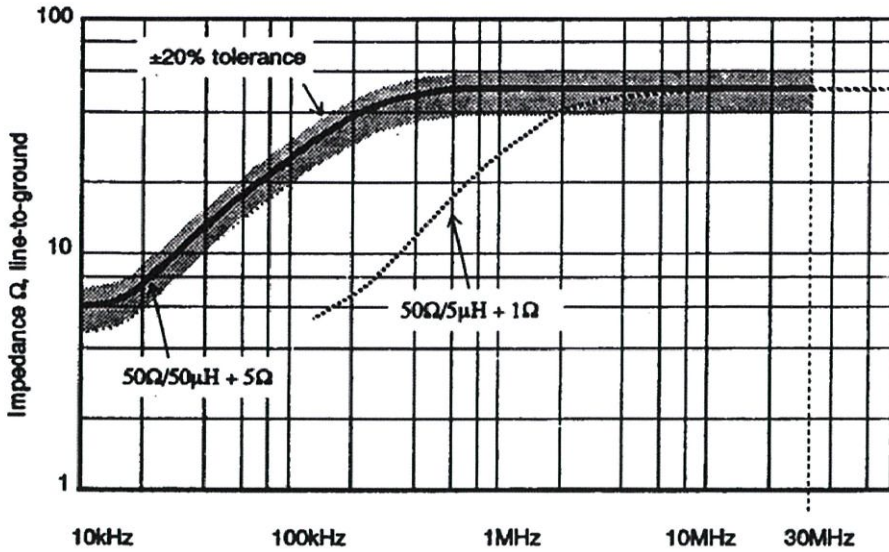
รูปที่ 2.27 วิธีการตรวจจับสัญญาณโดยใช้ LISN

2.7.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

โครงข่ายอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilize Network: LISN) โครงข่ายอิมพีแดนซ์เป็นวงจรที่ถูกออกแบบเป็นวงจรรักษาค่าความต้านทานไฟฟ้าสลับหรืออิมพีแดนซ์ของโครงข่ายให้คงที่คือ 50 โอห์ม/50 μ H และวงจรดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวตรวจวัดระดับของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่ผลิตออกมาจากผลิตภัณฑ์ โครงข่ายดังกล่าวจะทำหน้าที่กั้นสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์เข้าสู่ระบบของแหล่งจ่าย และทำหน้าที่กั้นสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกจากผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่องรับสัญญาณ (EMI receiver) โครงสร้างของ LISN ถูกแสดงดังรูปที่ 2.28 เนื่องจากมาตรฐานสากลกำหนดวิธีการวัดผลิตภัณฑ์ขึ้นชัดเจน เพื่อเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ในแต่ละห้องทดสอบ และเพื่อเป็นแนวทางให้แต่ละห้องทดสอบปฏิบัติการทดสอบเหมือนกัน วิธีการในการจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะทำการวัดสัญญาณที่แพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานสากลและการวัดจริงถูกแสดงในรูปที่ 2.28 และ 2.29 ตามลำดับ



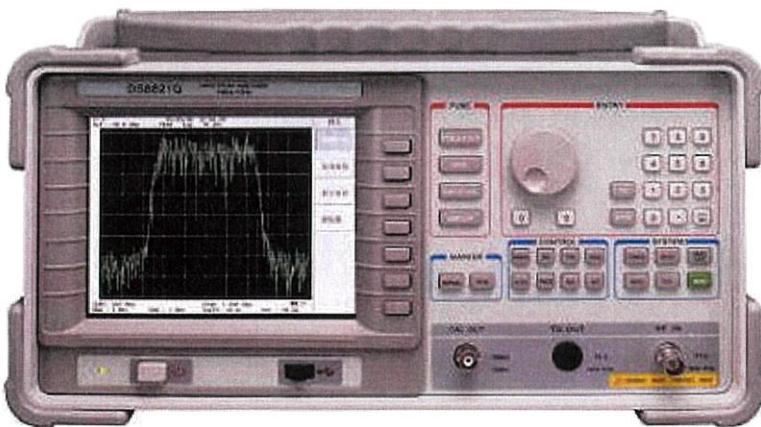
รูปที่ 2.28 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) [8]



รูปที่ 2.29 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ [8]

2.7.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)

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



รูปที่ 2.30 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม [1]

2.7.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)

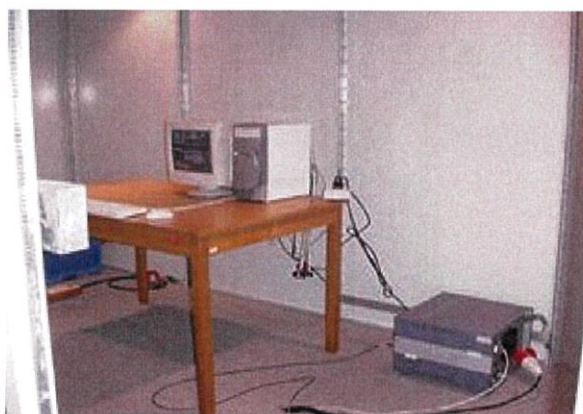
เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test : EUT) ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย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

แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบ ได้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลองและต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคง ด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้ และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 2x2 ตารางเมตร

จุดกราวด์อ้างอิงของ LISN และโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำโดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

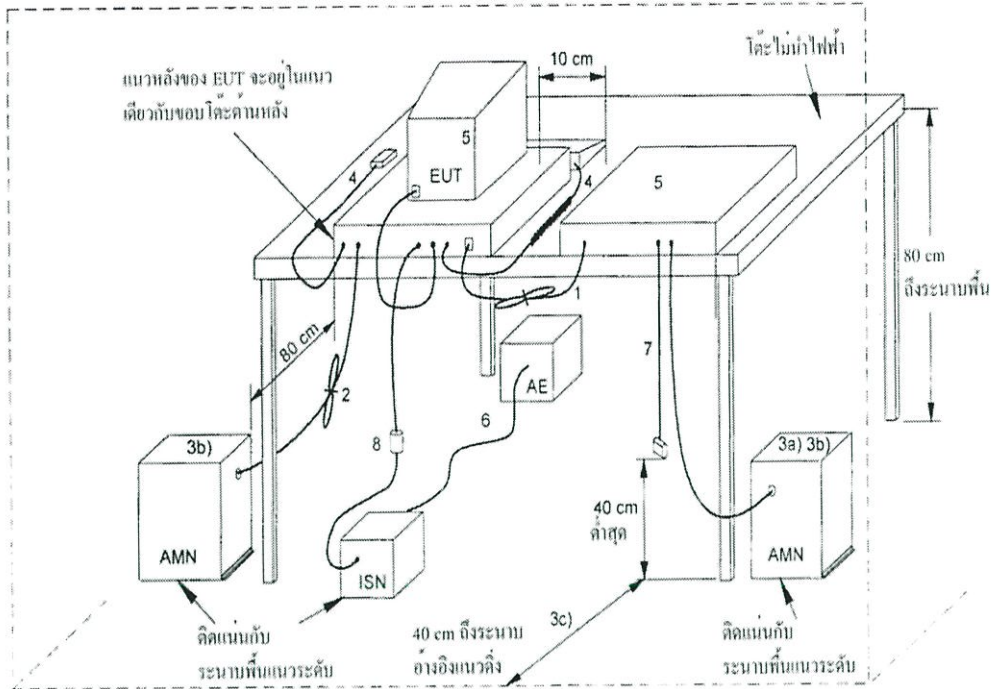
2.7.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นห้องที่ถูกปิดทั้งหกด้าน วัสดุที่ใช้ทำผนังแต่ละด้านเป็นโลหะที่บสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ระบบทดสอบ และกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบออกไปรบกวนระบบอื่นๆภายนอก ภายนอกห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกติดตั้งตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (EMI Filter) เพื่อใช้กรองสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกให้มีระดับต่ำ ก่อนป้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบที่ติดตั้งอยู่ภายในห้อง



รูปที่ 2.31 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Shielded Room) [1]

2.7.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ



รูปที่ 2.32 วิธีการจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจจับสัญญาณตามมาตรฐานสากล [1]

ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้เป็นตามมาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1956-2548

1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้นโลหะแนวระดับมากกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินจะต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่มีความยาว 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟหลักที่ยาวเกินต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่กลางสาย หรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสม
3. ให้ต่อ EUT เข้ากับ AMN เครื่องหนึ่ง AMN และ LISN ทุกเครื่องจะต้องติดตั้งเข้ากับระนาบอ้างอิงแนวตั้งหรือผนังโลหะ
 - 3a. หน่วยอื่นทั้งหมดของระบบได้รับกำลังไฟฟ้าจาก AMN เครื่องที่ 2 อาจติดตั้งได้สำหรับการใช้หลายอุปกรณ์
 - 3b. AMN และ LISN ห่างจาก EUT 80 เซนติเมตร และห่างจากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่นโลหะอื่นอย่างน้อย 80 เซนติเมตร
 - 3c. ต้องจัดตำแหน่งสายไฟหลักและสายสัญญาณให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และต้องอยู่สูงจากระนาบอ้างอิงแนวตั้ง 40 เซนติเมตร
4. สายของอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น คีย์บอร์ด เมาส์ และอื่นๆ ให้วางในลักษณะการใช้งานทั่วไป
5. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพที่ต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางบนตัวควบคุมได้
6. มีสายสัญญาณเข้า/ออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับ อิมพีแดนซ์ก็ได้
8. ถ้าใช้โพรบกระแส ต้องวางอยู่ห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 1 เมตร

2.8 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารก่อให้เกิดทั้งผลดี และผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตและผู้ใช้เครื่องมือสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นธรรม ไม่เกิดปัญหาด้านการใช้งาน มีความปลอดภัย หน่วยงานต่างๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังนี้

2.8.1 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 และ อุปกรณ์ทางการแพทย์ (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 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 3000 จิกะเฮิร์ตซ์) โดยมีจุดประสงค์ ในการออกมาตรฐาน เพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้รับใบอนุญาตในการติดตั้ง (radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อ การติดต่อสื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (radio communications) อุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดนี้

2.8.2 CISPR

CISPR ย่อมาจากภาษาฝรั่งเศสว่า Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques หรือภาษาอังกฤษใช้ว่า International Special Committee on Radio Interference เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2476 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ หลากๆ ประเทศได้นำมามาตรฐาน CISPR มาดัดแปลงใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานบังคับใช้สำหรับแต่ละประเทศ ประเทศไทยได้นำมาฐานนี้มาปรับใช้ เช่นมาตรฐานของบริษัทสองสว่าง ได้จากการนำมาตรฐาน CISPR 15 มาดัดแปลงใช้งาน

มาตรฐาน CISPR หลัก เช่น CISPR Publication 22 ถูกกำหนดขึ้นเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องกับบริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2528 หลังจากนั้น หลากๆ ประเทศได้นำมาฐานดังกล่าวมาปรับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติ (national standard)

อาทิ ประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI (Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment) โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

2.8.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)

MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออก โดยหน่วยทางการทหารของสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ มาตรฐานดังกล่าว จะมีรายละเอียดและเข้มข้นกว่า FCC เพราะมาตรฐานดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) และย่านความถี่ที่พิจารณาอย่างกว้างกว่าด้วย (30 เฮิร์ตซ์– 40 จิกกะเฮิร์ตซ์)

2.8.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

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

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

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแผ่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

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

****การทดลองในปริญญาโทฉบับนี้จะใช้มาตรฐาน EN 55022 Class b เป็นตัวอ้างอิง****

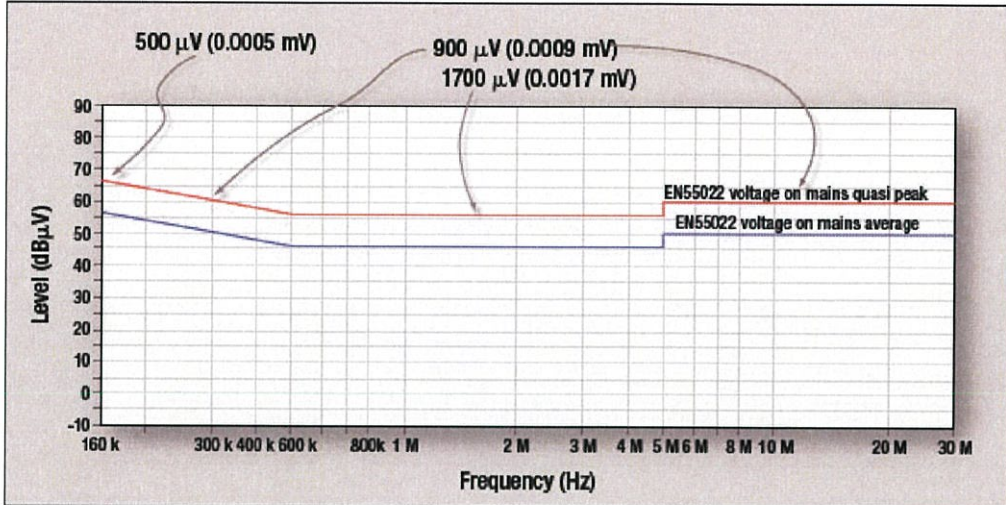
สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่า ต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านเต้ารับและจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่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

2.8.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE)

มาตรฐานนี้จะพิจารณาในช่วงความถี่วิทยุ 9 กิโลเฮิรตซ์ถึง 400 จิกะเฮิรตซ์ โดยแบ่งออกเป็น 2 class ด้วยกันคือ

- Class A ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัย นอกจากนี้ยังอาจใช้ผลิตภัณฑ์ Class A ภายในบ้าน/ที่พักอาศัยได้ แต่อาจก่อให้เกิดการรบกวนและผู้ใช้ต้องดำเนินการมาตรการแก้ไขที่เพียงพอ

- Class B ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานภายในบ้าน/ที่พักอาศัย แต่อาจถูกใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัยได้เช่นกัน โดยสภาพแวดล้อมภายในบ้าน/ที่พักอาศัยเป็นสภาพแวดล้อมที่มีการใช้เครื่องรับสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ในระยะห่าง 10 เมตรจากตำแหน่งที่ผลิตภัณฑ์นี้ถูกใช้งาน

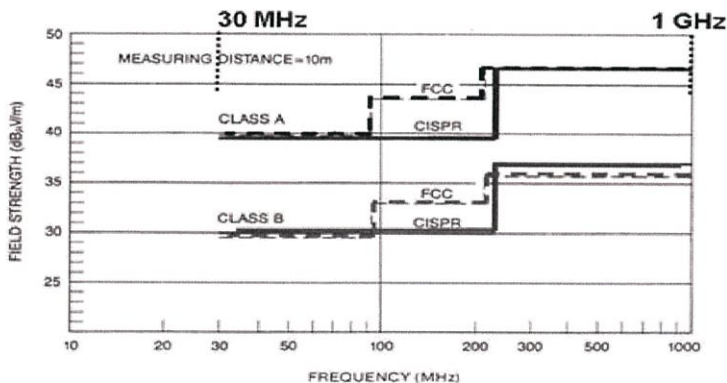


รูปที่ 2.33 ขีดจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022 [9]

ขีดจำกัด (Limit) การแผ่กระจายทางอากาศ (Radiated Emission) ตามมาตรฐาน CISPR และ FCC แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งจะประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 2 Class คือ

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

ขีดจำกัดกำหนดของ Class A จะกำหนดให้สัญญาณรบกวนได้สูงกว่าในที่อยู่อาศัยเนื่องจากแนวความคิดที่ว่า เครื่องจักรและคนที่อยู่ในอุตสาหกรรมเป็นคนวัยทำงานมีความแข็งแรงสูงกว่าในที่อยู่อาศัยและผลิตภัณฑ์ คนในที่อยู่อาศัยและมาตรฐาน CISPR กำหนดเกณฑ์ให้สัญญาณรบกวนได้น้อยกว่า FCC



รูปที่ 2.34 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC [1]

2.9 เทคนิคในการลดทอนสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้า [8]

วิธีการลดสัญญาณรบกวนที่สามารถพบเห็นได้บ่อยๆ มีดังนี้

1. การชิลด์ตัวนำ (Shielding)
2. การต่ออุปกรณ์ลงกราวด์ (Grounding)
3. การบาลานซ์ (Balancing)
4. การฟิวเตอร์ (Filtering)
5. การแยกวงจร (Isolation)
6. Separation and orientation
7. การควบคุมระดับของอิมพีแดนซ์ในวงจร
8. การออกแบบสายเคเบิล
9. เทคนิคการตัดทอน (Cancellation)

จากที่กล่าวมานี้จะต้องยอมรับว่า สัญญาณรบกวนนั้นไม่สามารถถูกกำจัดออกไปจนหมดสิ้น แต่อาจถูกลดลง ให้มีค่าต่ำพอที่วงจรจะยอมรับได้ และในบางครั้งก็จำเป็นต้องใช้เทคนิคมากกว่าหนึ่งวิธีขึ้นไป เพื่อลดสัญญาณรบกวนให้มีขนาดเล็กที่สุด ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะเทคนิคที่จะนำมาใช้เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ

2.9.1 การบาลานซ์ (Balancing)

วงจรที่สมดุล (Balancing circuit) คือ วงจรซึ่งประกอบด้วยตัวนำ 2 เส้นที่มีอิมพีแดนซ์เทียบกับกราวด์ (หรือเปรียบกับตัวนำอื่นๆ) เท่ากัน จุดประสงค์ในการบาลานซ์เพื่อที่จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนตัวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของโหมดผลรวมและจะหักล้างกันพอดีที่เอาท์พุท

การใช้วงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลหรือดิฟแอมป์ เป็นวิธีหนึ่งในการนำหลักของเรื่องการบาลานซ์ไปใช้งาน โหลดของดิฟแอมป์นั้นจะมีลักษณะสมดุลอยู่แล้ว ในขณะที่ภาคแหล่งกำเนิดสัญญาณเป็นส่วนที่ไม่สมดุลซึ่งเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิด R_s ดังรูป 2.24 ดังนั้นหากเราสามารถทำให้ภาคแหล่งกำเนิดสมดุลเทียบกับกราวด์ วงจรทั้งระบบก็เป็นวงจรที่สมดุล ดังรูป 2.25

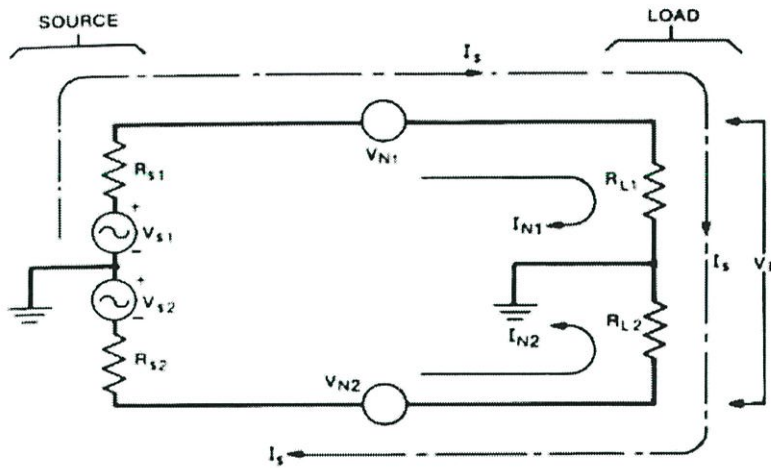
V_{n1} และ V_{n2} คือแรงดันรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวนำ ส่วนแรงดันรวมของ V_{s1} , V_{s2} จะก่อให้เกิดกระแสสัญญาณ I_s ขึ้น ดังนั้น V_L ที่ปรากฏที่โหลดคือ

$$V_L = I_{N1} R_{L1} - I_{N2} R_{L2} + I_s (R_{L1} + R_2) \quad (2.20)$$

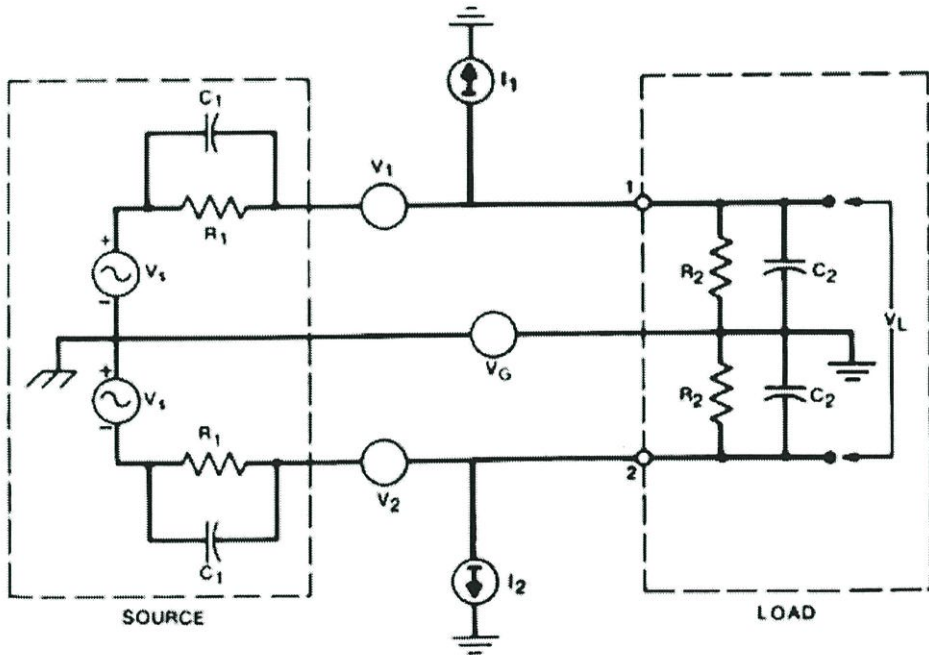
สองเทอมแรกในสมการ (2.20) คือแรงดันจากสัญญาณรบกวน และเทอมสุดท้ายคือแรงดันจากสัญญาณที่เราต้องการ ดังนั้นหาก $I_{N1} = I_{N2}$ และ $R_{L1} = R_{L2}$ แล้วจะได้

$$V_L = I_s (R_{L1} + R_2) \quad (2.21)$$

ในวงจรสมดุรูป 2.35 นั้น V_1 และ V_2 คือแรงดันรบกวนซึ่งเกิดจากการคับปลิงผ่านสนามแม่เหล็ก V_3 คือแรงดันรบกวนจากการคับปลิงของสนามไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุ C_{31} และ C_{32} V_G คือความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ แรงดันของสัญญาณรบกวนที่ขั้วที่ 1 และ 2 ซึ่งเกิดจาก V_3 หาได้จากรูป 2.36 โดยการอิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 คืออิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.35 แหล่งกำเนิดสมดุเทียบกับกราวด์ [10]

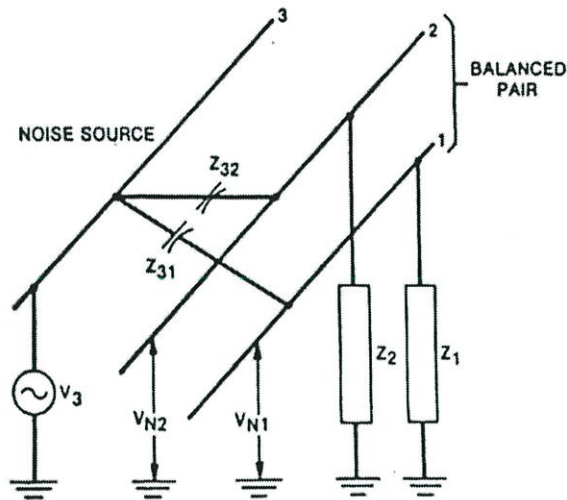


รูปที่ 2.36 อิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์ [10]

เราสามารถคำนวณแรงดันรบกวนซึ่งเกิดจาก V_3 ได้ดังนี้

$$V_{N1} = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_{31}} \right) V_3 \quad (2.22)$$

$$V_{N2} = \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_{32}} \right) V_3 \quad (2.23)$$



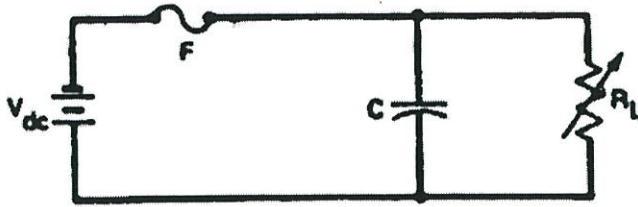
รูปที่ 2.37 บาลานซ์แหล่งจ่าย [10]

ถ้าหากวงจรเป็นชนิดสมดุลอิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 และถ้าตัวนำ 1 และ 2 เป็นชนิดคู่ตัวนำที่พันกับอิมพีแดนซ์ Z_{31} จะมีค่าใกล้เคียงกับ Z_{32} ซึ่งในกรณีเช่นนี้ V_{N1} ประมาณเท่า V_{N2} และสัญญาณรบกวนจะหักล้างกันที่โหลด และเนื่องจากคู่ตัวนำชนิดพันกันสามารถลดสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากการคับปลิงแบบอินดักทีฟได้ค่อนข้างดี ในทางปฏิบัติจึงนิยมนำคู่ตัวนำพันกันมาใช้ในวงจรสมดุลมาก ส่วนสายโคแอกเซียลนั้นมีลักษณะเป็นวงจรที่ไม่สมดุลอยู่แล้ว จึงไม่นิยมนำมาใช้ในวงจรสมดุล แต่ถ้านำสายโคแอกเซียลมาใช้ก็สามารถทำงานในวงจรสมดุลได้

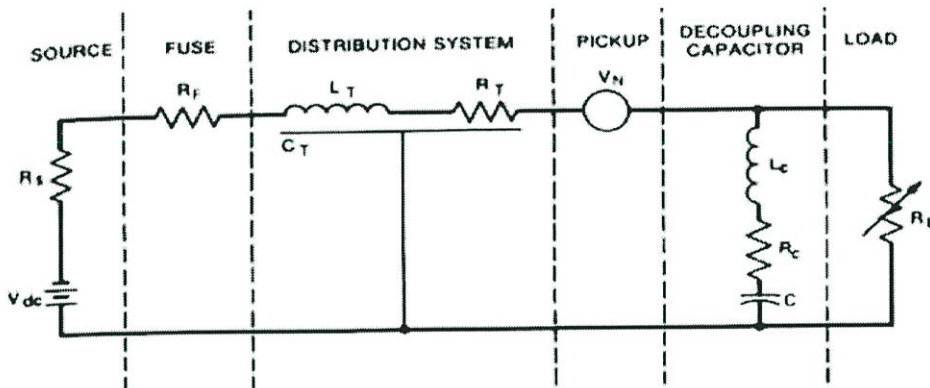
2.9.2 การป้องกันการคับปลิงจากแหล่งจ่ายไฟ (Power supply decoupling)

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) จะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้ส่วนต่างๆของวงจร ดังนั้น เพื่อป้องกันการคับปลิงสัญญาณรบกวนผ่านสายส่งซึ่งต่อจากแหล่งจ่ายไฟไปยังวงจรต่างๆ เราจึงจำเป็นต้องออกแบบแหล่งจ่ายไฟและสายส่งให้ดี และแรงดันของแหล่งจ่ายไฟที่ดีไม่ควรแปรตามกระแสที่ถูกดึงจากโหลด ในทางอุดมคติอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้น ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะเป็นตัวการในการคับปลิงสัญญาณรบกวน ดังรูป 2.27 แสดงระบบจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟซึ่ง

ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ฟิวส์ และโหลด โดยมีตัวเก็บประจุที่ใช้บายพาส (bypass capacitor) C ต่อคร่อมโหลดอยู่

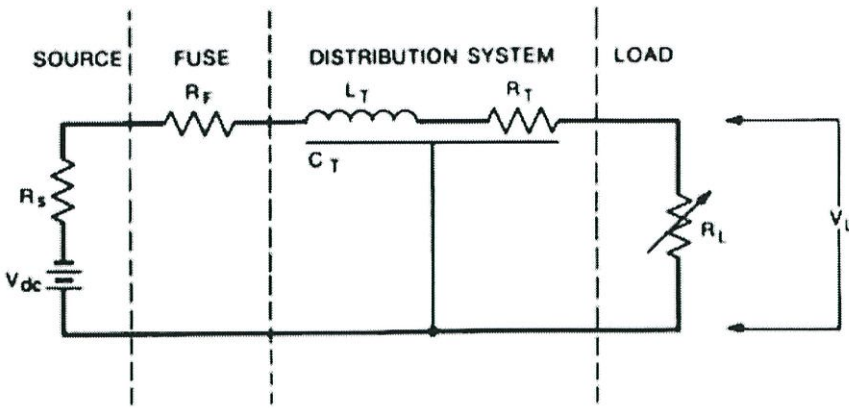


รูปที่ 2.38 ระบบจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ [10]



รูปที่ 2.39 วงจรการวิเคราะห์ห้วงจรจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ [10]

รูปที่ 2.39 แสดงการวิเคราะห์ห้วงจรในรูป 2.35 R_s คืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟและเป็นฟังก์ชันของเร็กกูเลชัน (*Regulation*) ของแหล่งจ่ายไฟ R_f คือ ความต้านทานของฟิวส์ R_T , L_T และ C_T คือ ความต้านทาน อินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์ ของสายส่งซึ่งเชื่อมแหล่งจ่ายไฟเข้ากับโหลดตามลำดับ V_N คือสัญญาณรบกวนซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากวงจรอื่น ตัวเก็บประจุที่ใช้บายพาสมีความต้านทาน R_C และตัวเหนี่ยวนำ L_C ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ C แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนที่มีผลต่อการจ่ายแรงดันเท่านั้น ดังนั้น วงจรในรูป 2.39 จึงถูกยุบลงเป็นวงจรรูป 2.40 โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ ในช่วง *DC* (สภาวะคงตัว) และในช่วงทรานเซียนท์ (*transient*)



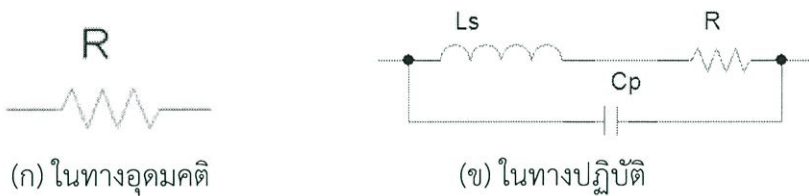
รูปที่ 2.40 วงจรที่ทำการยุบวงจรจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ [10]

2.10 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์

ในการทำงานของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่ความถี่สูงพฤติกรรมของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่สามารถรักษาคุณสมบัติเอาไว้ได้ โดยจะมีองค์ประกอบแฝงเมื่อทำงานที่ความถี่สูง

2.10.1 ตัวต้านทานไฟฟ้า

เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic inductance: L_p) และค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) ขึ้น ดังรูปที่ 2.30 โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝงนี้เกิดจากการที่ตัวต้านทานมีขายาว ถ้าหากยิ่งยาวค่าความเหนี่ยวนำแฝงก็ยิ่งมากตามไปด้วย ส่วนในรูปที่ 2.31 เป็นการแสดงขนาดอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) ในทางอุดมคติ

(ข) ในทางปฏิบัติ

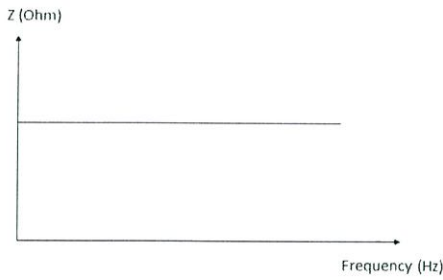
รูปที่ 2.41 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า [11]

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

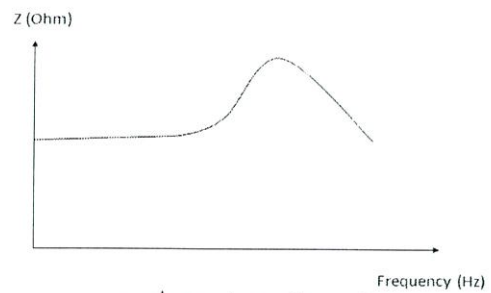
$$Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL \quad (2.24)$$

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_s + j2\pi fL} + \frac{1}{R_p} + j2\pi fC_p} \quad (2.25)$$



(ก) ในอุดมคติ



(ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

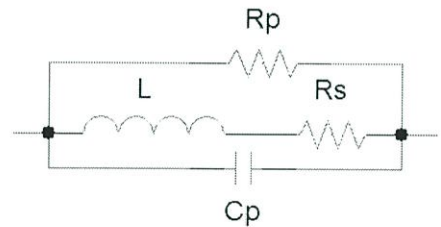
รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ [11]

2.10.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในทางปฏิบัติการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะมีองค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น คือค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance: C_p) โดยเกิดจากช่องว่างระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นแผ่นโลหะประกบกันอยู่จึงทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในขณะเดียวกันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) เกิดขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้น คุณสมบัติต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.32 และในรูปที่ 2.33 เป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

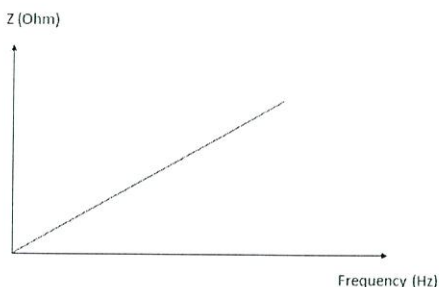
รูปที่ 2.43 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า [11]

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

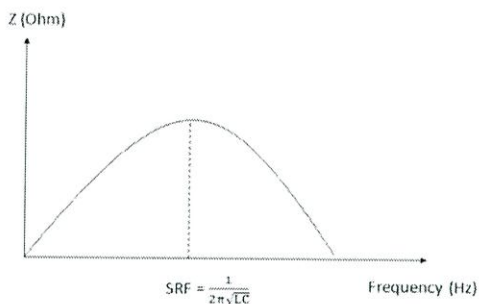
$$Z = \frac{V}{I} = j2\pi fL \quad (2.26)$$

ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_s + j2\pi fL} + \frac{1}{R_p} + j2\pi fC_p} \quad (2.27)$$



(ก) ในอุดมคติ



(ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

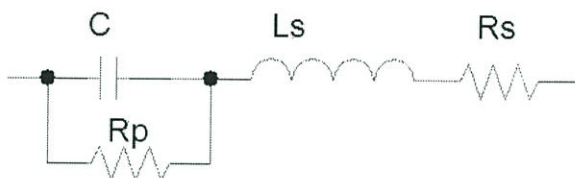
รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในอุดมคติ [11]

2.10.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้า ขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝง (Parasitic Resistance: R_p) และ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝง (Parasitic inductance: L_p) เกิดขึ้นดังรูป 2.34 และเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าแฝงและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าแฝงก็จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.35



(ก) ในทางอุดมคติ



(ข) ในทางปฏิบัติ

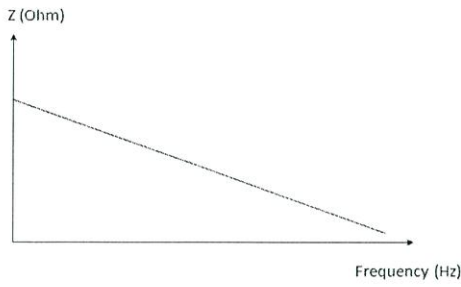
รูปที่ 2.45 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [11]

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

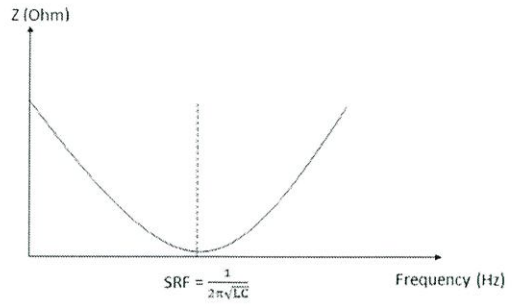
$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fc} \tag{2.28}$$

ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j2\pi fC + \frac{1}{R_p}} + j2\pi fL_s + R_s \tag{2.29}$$



(ก) ในอุดมคติ



(ข) เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์แฝง

รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุดมคติ [11]

2.10.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)

หรือค่า Q เป็นตัวประกอบคุณภาพ ใช้กับวงจรหรืออุปกรณ์ ที่เป็นสัญญาณไซน์ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Q = 2\pi \frac{\text{Peak Stored energy}}{\text{Energy dissipated per cycle}} \quad (2.30)$$

โดยค่า ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ยิ่งมีค่ามากยิ่งดี

บทที่ 3

การออกแบบวงจรและการจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 การออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์

ฟลายแบคคอนเวอเตอร์ที่ทำงานในช่วงแรงดันไฟอินพุตเท่ากับ 12 โวลต์ ให้แรงดันเอาต์พุตที่ 5 โวลต์ และกระแส 1 แอมป์ ทำงานที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ขั้นตอนการออกแบบเป็นดังนี้

1. คำนวณคาบเวลาการทำงาน

$$\begin{aligned} \text{จาก } T &= \frac{1}{f} \\ &= \frac{1}{50 \times 10^3} \\ &= 20 \times 10^{-6} \text{ s} \end{aligned}$$

2. หาค่า $\frac{N_p}{N_s}$ และค่า $t_{ON(max)}$

$$\text{จากสมการ } V_{CE(max)} = V_{in(max)} + \frac{N_p}{N_s}(V_{OUT} + V_D) + 0.3V_{in(max)}$$

ในที่นี้กำหนด $V_{CE(max)}$ ไม่เกิน 100 V

$$100 = 12 + \frac{N_p}{N_s}(5 + 1) + (0.3 \times 12)$$

$$\frac{N_p}{N_s} \leq 14.067$$

$$\begin{aligned} \text{และจากสมการ } t_{on(max)} &= \frac{(V_{out} + V_D)(N_p / N_s)(0.8T)}{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)}) + (V_{out} + V_D)(N_p / N_s)} \\ &= \frac{(5 + 1)(14.067)(0.8 \times 20 \times 10^{-6})}{(12 - 1) + (5 + 1)(14.067)} \\ &= 14.15 \times 10^{-6} \text{ s} \end{aligned}$$

เลือกใช้วงจรควบคุม (TL494) ที่จะใช้กับวงจรมีค่า $t_{ON(max)}$ ได้ 17×10^{-6} วินาที

จึงเลือก $t_{ON(max)}$ เท่ากับ 9×10^{-6} วินาที ดังนั้นจึงคำนวณ N_p / N_s ใหม่ดังนี้

$$9 \times 10^{-6} = \frac{(5+1)(N_p / N_s)(0.8 \times 20 \times 10^{-6})}{(12-1) + (5+1)(N_p / N_s)}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = 2.35$$

เลือก $\frac{N_p}{N_s} = 2$

3. คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L_p ของขดลวดปฐมภูมิจากสมการ

$$\begin{aligned} L_p &= \frac{\eta [(V_{in(min)} - V_{CE(sat)}) t_{on(max)}]^2}{2TP_{out}} \\ &= \frac{0.8 [(12-1) \times 9 \times 10^{-6}]^2}{2 \times 20 \times 10^{-6} \times 5} \\ &= 39.2 \times 10^{-6} H \end{aligned}$$

4. คำนวณค่ากระแสสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ จากสมการ

$$\begin{aligned} I_{P(PK)} &= \frac{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)})}{L_p} t_{ON(max)} \\ &= \frac{(12-1) \times 9 \times 10^{-6}}{39.2 \times 10^{-6}} \\ &= 2.525 A \end{aligned}$$

5. คำนวณจำนวนรอบ N_p จากสมการ

$$N_p = \frac{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)}) \times t_{on(max)} \times 10^8}{A_e \times \Delta B_{max}} N_p$$

หม้อแปลงสวิตซ์สำหรับวงจรตัวอย่างนี้จะใช้แกนเฟอร์ไรต์ขนาด EI 40 ซึ่งมีค่า $A_e = 1.48 \text{ cm}^2$

ในที่นี้จะกำหนด ΔB_{max} ไว้ที่ 1600 เกาส์

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad N_p &= \frac{(12-1) \times 9 \times 10^{-6} \times 10^8}{1.48 \times 1600} \\ &= 4.2 \quad (\text{เลือก } N_p = 4 \text{ รอบ}) \end{aligned}$$

6. คำนวณจำนวนรอบ N_s

$$\frac{N_p}{N_s} = 2$$

$$N_s = \frac{4}{2}$$

$$N_s = 2 \text{ รอบ}$$

7. คำนวณค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o สำหรับค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (ΔV_o) น้อยกว่า 1%

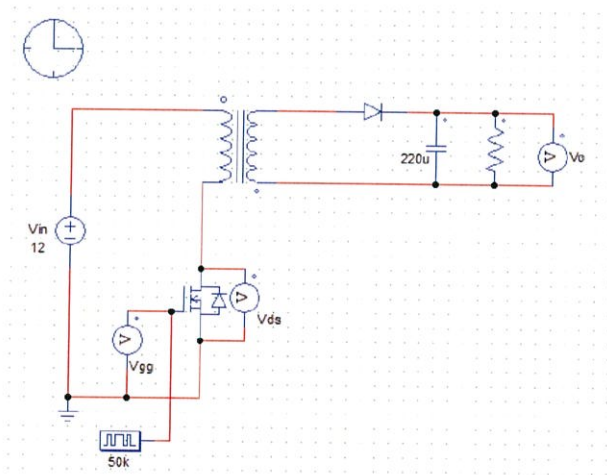
$$\text{จากสมการ } \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s} ; R = 5 \text{ Ohm}$$

$$C_o = \frac{0.45}{0.01 \times 5 \times 50 \times 10^3}$$

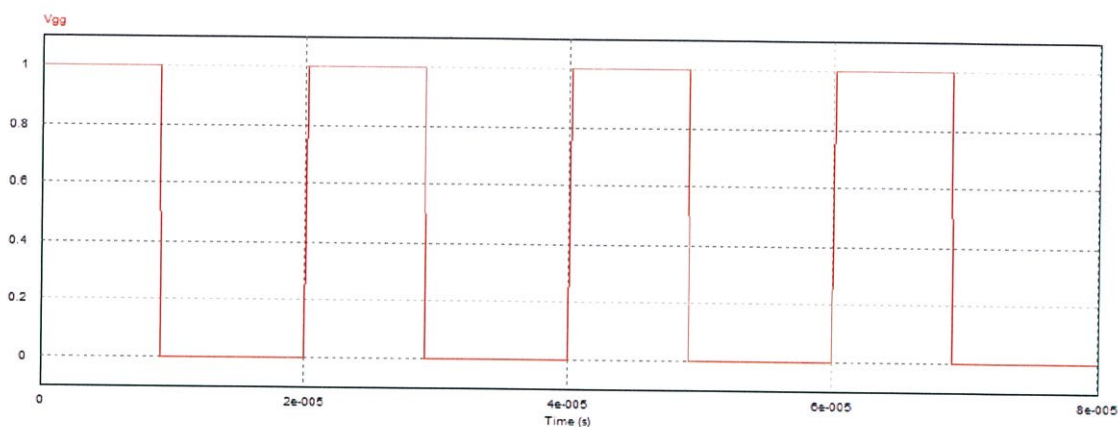
$$C_o = 180 \mu F$$

ซึ่งเลือกค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุตเท่ากับ $220 \mu F$ มีขายในท้องตลาด

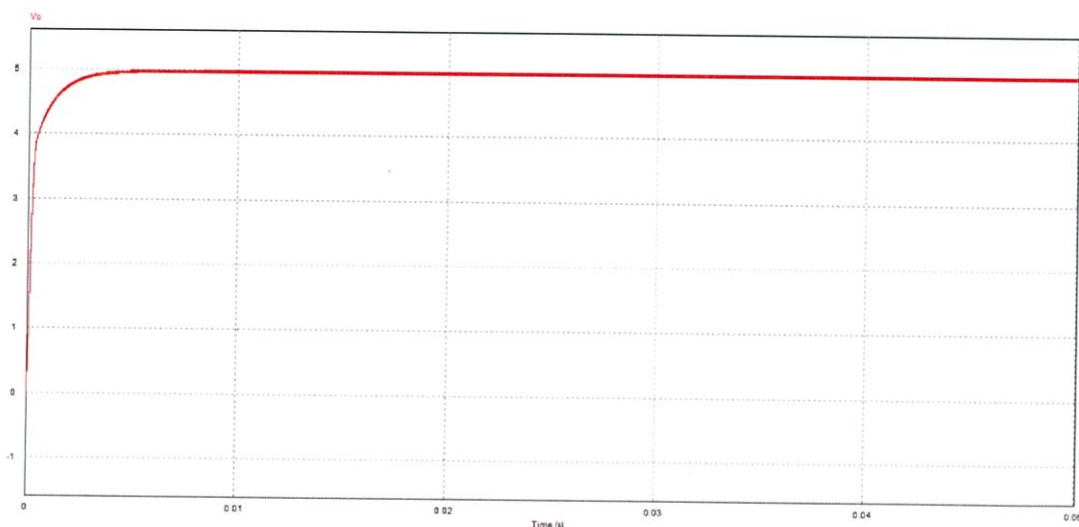
3.2 การจำลองการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์ ด้วยโปรแกรม Psim



รูปที่ 3.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์



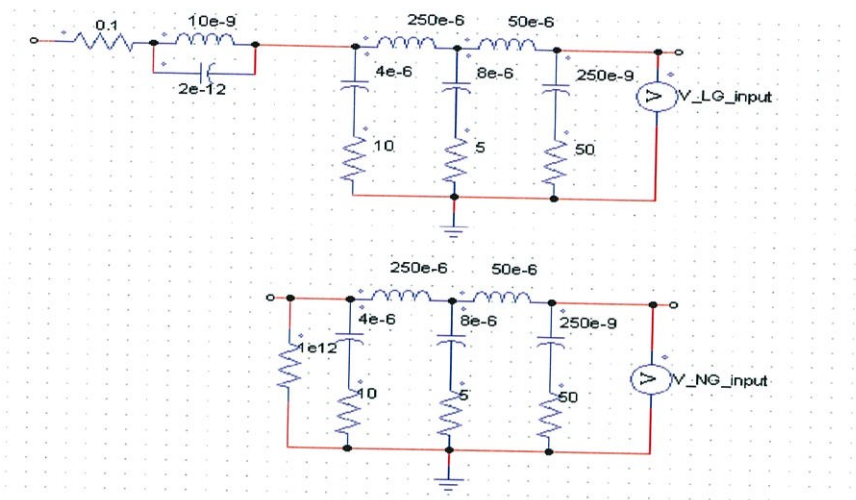
รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมสัญญาณเกิดของมอสเฟต



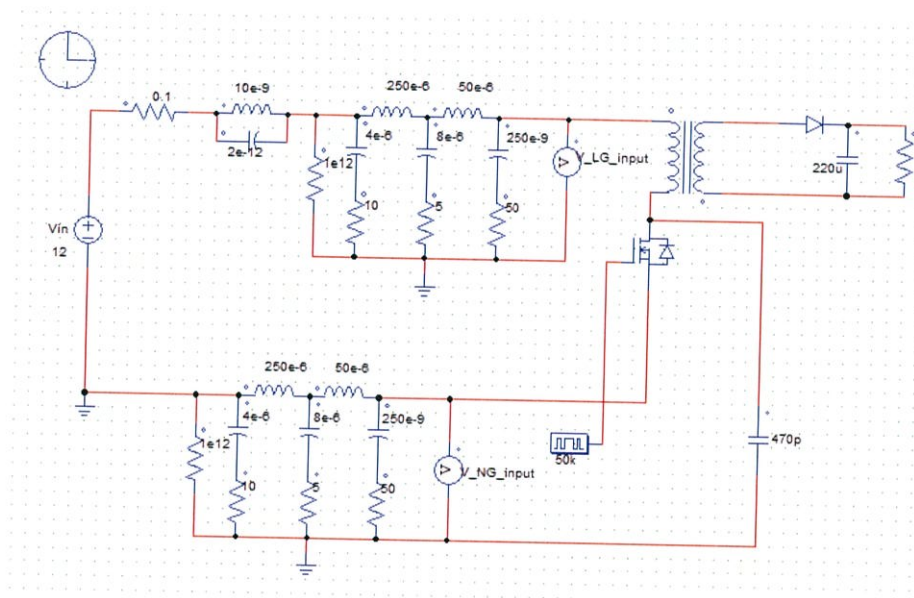
รูปที่ 3.3 แรงดันด้านออกของวงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์ (Steady State = 0.0043s)

3.3 การจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของฟลายแบคคอนเวอเตอร์ด้วยโปรแกรม Psim

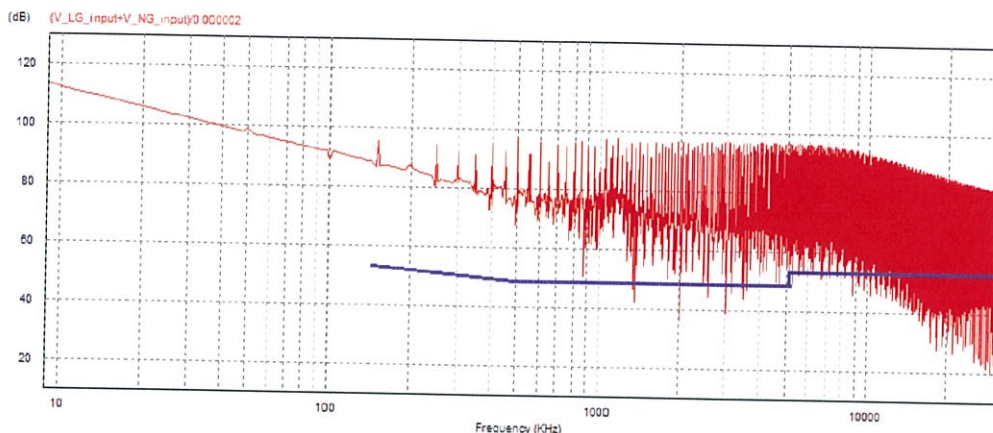
การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องมีโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.4 ต่อเข้ากับด้านหน้าของวงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์ ดังรูปที่ 3.5 โดยมีตัวเก็บประจุแฝงต่อที่ขาเดรนของมอสเฟตลงกับกราวด์ที่ 470 pF



รูปที่ 3.4 โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)



รูปที่ 3.5 วงจรพลาเยแบคคอนเวอเตอร์พร้อม LISN



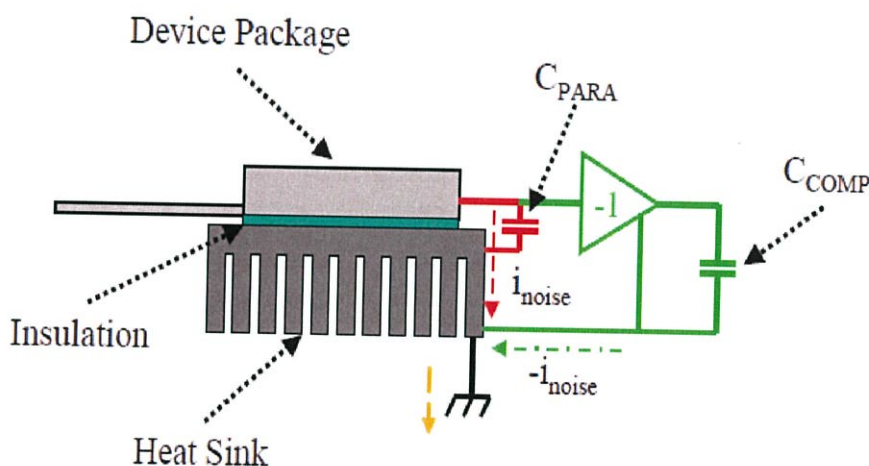
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมตผลรวมกับความถี่

3.4 การบาลานซ์ (Balancing)

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเทคนิคการหักล้างสัญญาณรบกวน 2 วิธี ดังนี้

3.4.1 วิธีการบาลานซ์ซึ่งแบบที่ 1

การหักล้างสัญญาณรบกวนในโหมตผลรวมด้วยเทคนิคการสมดุล



รูปที่ 3.7 การหักล้างสัญญาณรบกวนในโหมตผลรวม [12]

$$i_{noise} + (-i_{noise}) = 0 \quad (3.1)$$

จากรูป เราจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแฝงระหว่างกล่องอุปกรณ์และแผงระบายความร้อนทำให้เกิดกระแสรบกวนไหลลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถหักล้างกระแสรบกวนนี้ได้ด้วยการทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมนี้เป็นลบและให้ค่านี้ไหลผ่านตัวเก็บประจุชดเชยลงกราวด์ ซึ่งทำให้ผล

รวมของ 2 กระแสข้างต้นเป็นศูนย์จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และทำให้ค่าแรงดันรบกวนใน โหมดผลรวมคร่อมตัวต้านทาน 50 โอห์มของ LISN ลดลงอีกด้วย

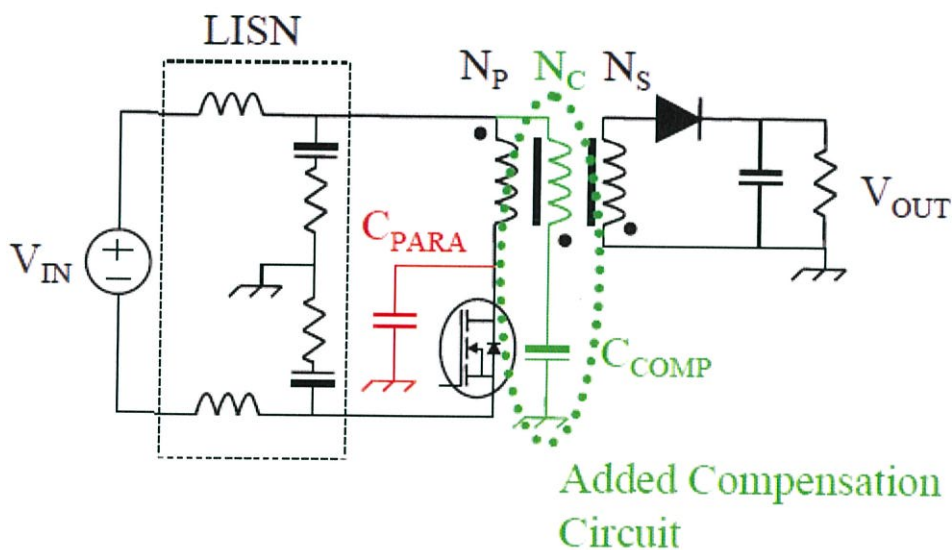
สมการทั่วไปของตัวเก็บประจุแผ่นจะเท่ากับในสมการที่ (3.1)

$$C_{\text{PARA}} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.2)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electrical permittivity)
 A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ
 D คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.2) จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่ต่อแผ่นระบายความร้อนลงกราวด์จะเปรียบเสมือนกับการทำให้ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่ามาก ซึ่งก็จะเป็นผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุแผ่นมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงการตัดเส้นทางเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้างดลง แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำได้เพราะเหตุผลด้านความปลอดภัยและเหตุผลทางความแข็งแรงโครงสร้าง

การหักล้างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.8 การหักล้างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [12]

จากการหักล้างกระแสรบกวนที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ในวงจรฟลายแบคเราสามารถทำให้กระแสรบกวนเป็นลบได้โดยการเพิ่มขดลวดชดเชย N_c เข้าที่หม้อแปลงโดยจะถูกพันเข้ากับขดลวดปฐมภูมิซึ่งให้อัตราส่วนจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 1:1 จากนั้นต่อตัวเก็บประจุชดเชย

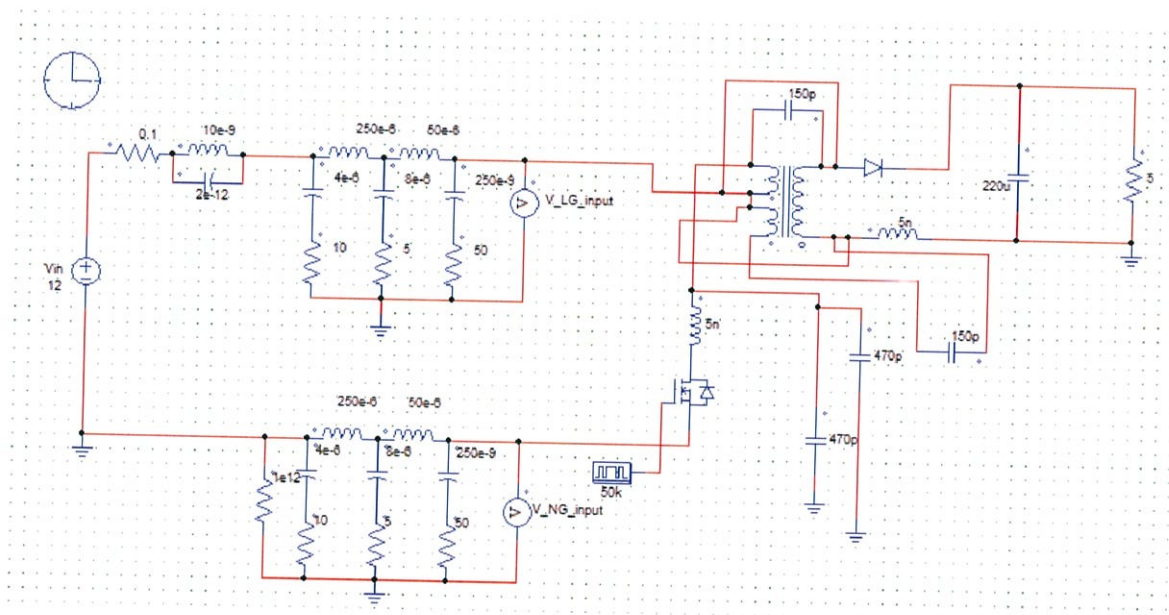
อนุกรมกับขดลวดชดเชยเพื่อที่จะสร้างกระแสบวกรวมที่เป็นลบให้มาหักล้างกับกระแสบวกรวมที่เกิดจากตัวเก็บประจุแฝง

ทำการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม (Common Mode Interference) ดังนี้

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common Mode Interference : CM)

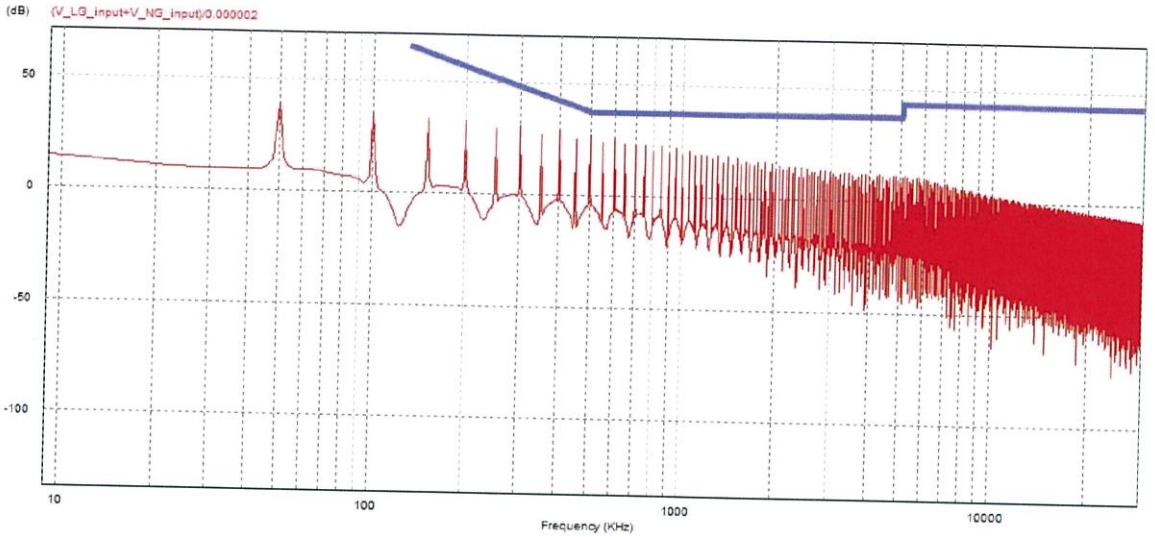
ทำการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม โดยวัดแรงดันระหว่างไลน์กับกราวด์ และแรงดันระหว่างนิวทรัลกับกราวด์ ดังสมการที่ 3.1

$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \quad (3.3)$$



$$(C_{comp} = 470 pF)$$

รูปที่ 3.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์ พร้อมกับ LISN และ Balancing circuit แบบที่ 1



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่ เมื่อมีการใช้เทคนิค noise balancing (แบบที่1)

3.4.2 วิธีการบาลานซ์ซึ่งแบบที่2

วงจรที่สมดุล (Balancing circuit) คือ วงจรซึ่งประกอบด้วยตัวนำ 2 เส้นที่มีอิมพีแดนซ์เทียบกับกราวด์(หรือเปรียบกับตัวนำอื่นๆ) เท่ากัน จุดประสงค์ในการบาลานซ์เพื่อที่จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนตัวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของคอมมอนโหมดและจะหักล้างกันพอดีที่เอาท์พุท

การใช้วงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลหรือดิฟแอมป์ เป็นวิธีหนึ่งในการนำหลักของเรื่องการบาลานซ์ไปใช้งาน โหลดของดิฟแอมป์นั้นจะมีลักษณะสมดุลอยู่แล้ว ในขณะที่ภาคแหล่งกำเนิดสัญญาณเป็นส่วนที่ไม่สมดุลซึ่งเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิด R_s ดังรูป 3.11 ดังนั้นหากเราสามารถทำให้ภาคแหล่งกำเนิดสมดุลเทียบกับกราวด์ วงจรทั้งระบบก็เป็นวงจรที่สมดุล ดังรูป 3.12

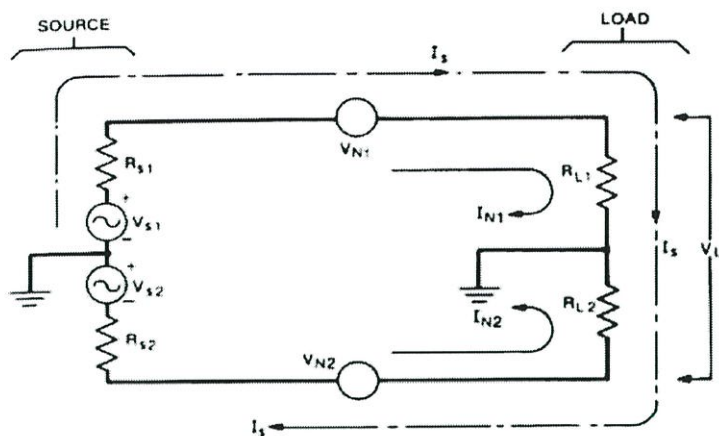
V_{n1} และ V_{n2} คือแรงดันรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวนำ ส่วนแรงดันรวมของ V_{s1} , V_{s2} จะก่อให้เกิดกระแสสัญญาณ I_s ขึ้น ดังนั้น V_L ที่ปรากฏที่โหลดคือ

$$V_L = I_{N1}R_{L1} - I_{N2}R_{L2} + I_s (R_{L1} + R_{L2}) \quad (3.4)$$

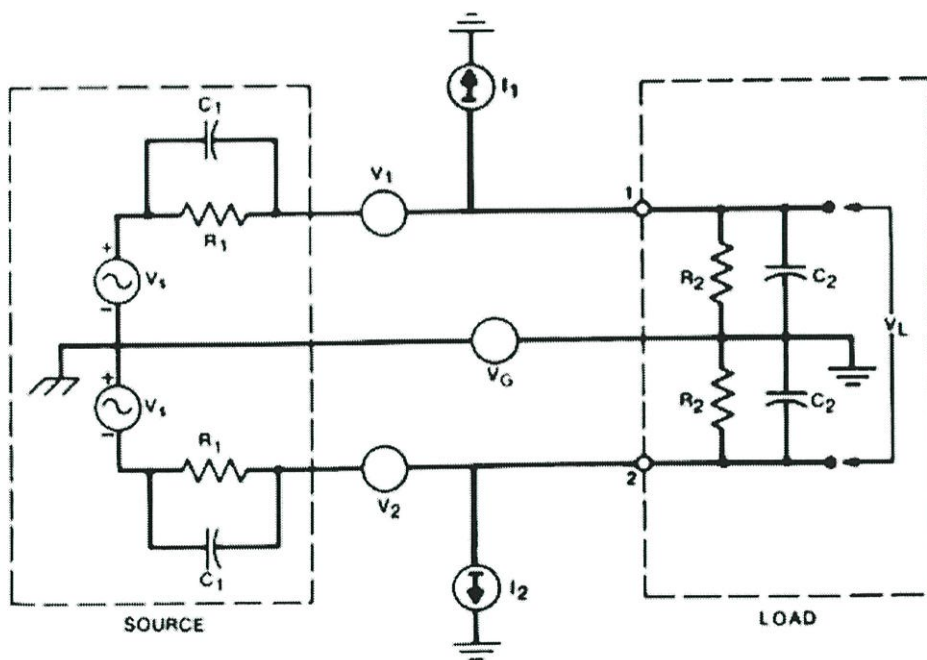
สองเทอมแรกในสมการ (3.4) คือแรงดันจากสัญญาณรบกวน และเทอมสุดท้ายคือแรงดันจากสัญญาณที่เราต้องการ ดังนั้นหาก $I_{N1} = I_{N2}$ และ $R_{L1} = R_{L2}$ แล้วจะได้

$$V_L = I_s (R_{L1} + R_{L2}) \quad (3.5)$$

ในวงจรสมมูลรูป 3.12 นั้น V_1 และ V_2 คือแรงดันรบกวนซึ่งเกิดจากการคับปลิงผ่านสนามแม่เหล็ก V_3 คือแรงดันรบกวนจากการคับปลิงของสนามไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุ C_{31} และ C_{32} V_G คือความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ แรงดันของสัญญาณรบกวนที่ขั้วที่ 1 และ 2 โดยการอิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 คืออิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดสมมูลเทียบกับกราวด์ [10]



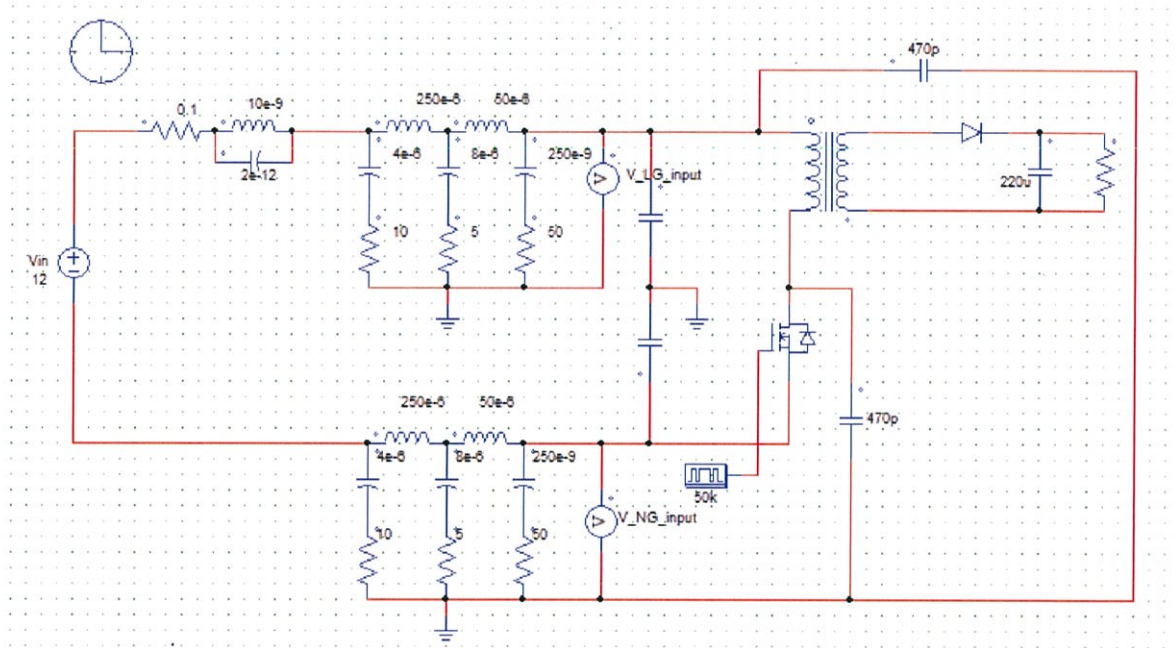
รูปที่ 3.12 อิมพีแดนซ์รวมระหว่างตัวนำในวงจรที่ 1 และ 2 เทียบกับกราวด์ [10]

ทำการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวม (Common Mode Interference) ดังนี้

สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม (Common Mode Interference : CM)

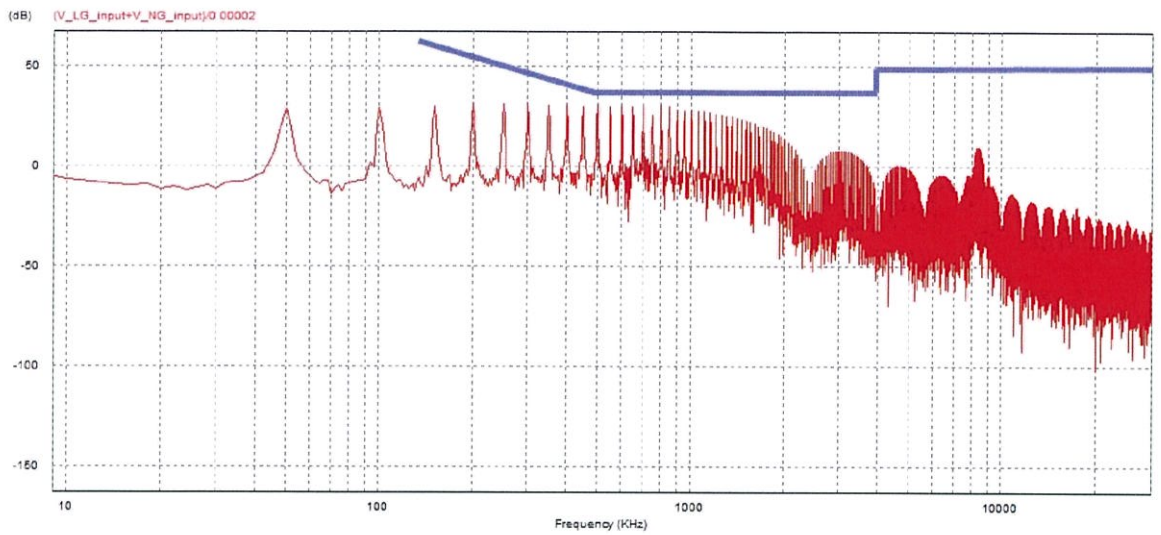
ทำการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม โดยวัดแรงดันระหว่างไลน์กับกราวด์ และแรงดันระหว่างนิวทรัลกับกราวด์ ดังสมการที่ 3.1

$$V_{CM} = \frac{V_{LG} + V_{NG}}{2} \quad (3.3)$$



(Ccomp = 470pF)

รูปที่ 3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอเตอร์พร้อมกับ LISN และ Balancing circuit แบบที่ 2



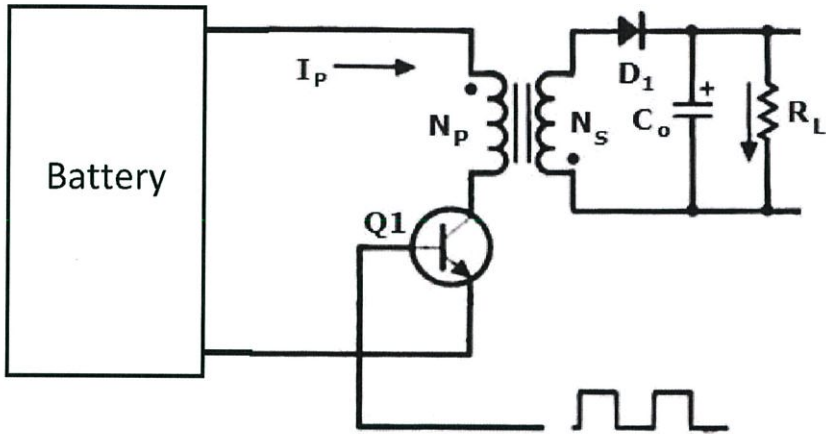
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่ เมื่อมีการใช้เทคนิค noise balancing (แบบที่2)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

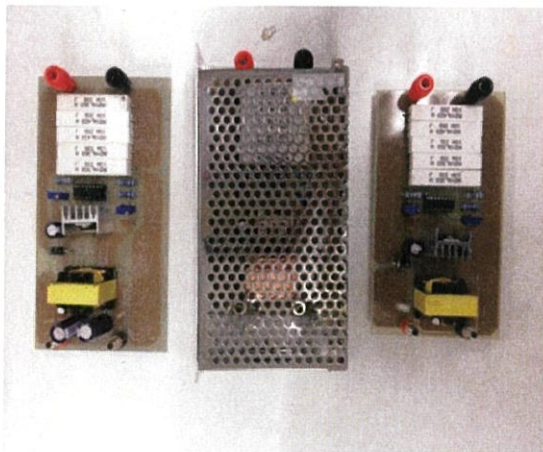
4.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนวงจรควบคุม (Control circuit) และส่วนของวงจรหลัก (Main circuit) โดยรูปวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนวงจรควบคุม และส่วนวงจรหลัก

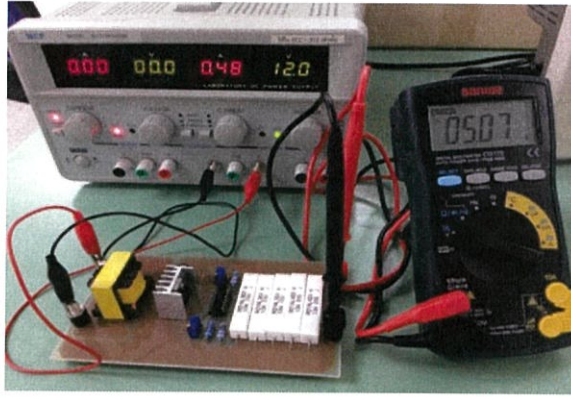


รูปที่ 4.1 โครงสร้างวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์รับไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ โดยรับสัญญาณขับแบบพีดับเบิลยูเอ็มจากวงจร TL494 สู่ขาเกตของมอสเฟตและแรงดันไฟฟ้าถูกถอนลงเข้ามาที่ตัวต้านทาน

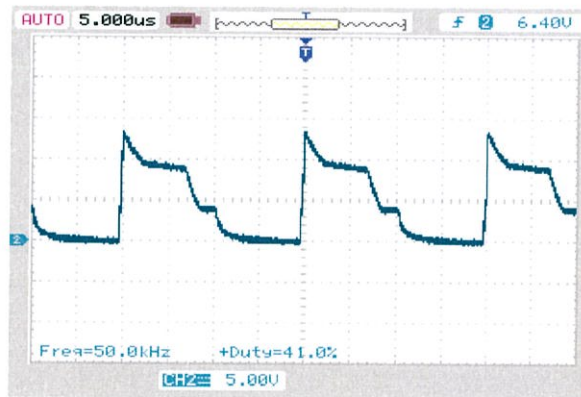


รูปที่ 4.2 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโครงงาน



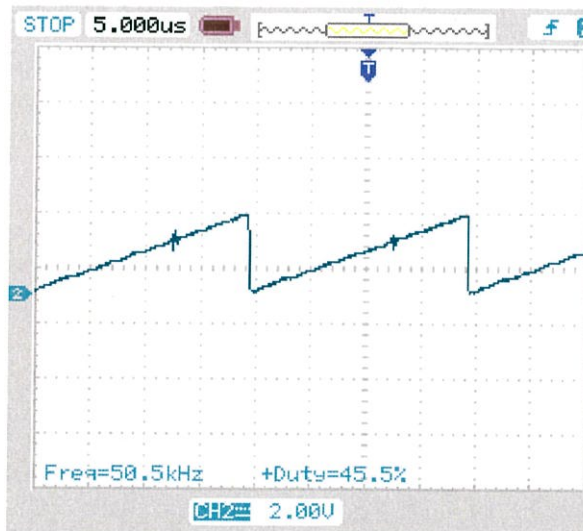
รูปที่ 4.3 การใช้งานฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กับแบตเตอรี่

4.2 ผลการวัดสัญญาณของไอซี TL 494



(ก) สัญญาณพินเลี้ยงที่ขา 5 ของไอซี

รูปที่ 4.4 สัญญาณแสดงรูปคลื่นพัลส์ในวงจรจับเกต



(ข) สัญญาณจับเกตที่ขา 9 ของไอซี

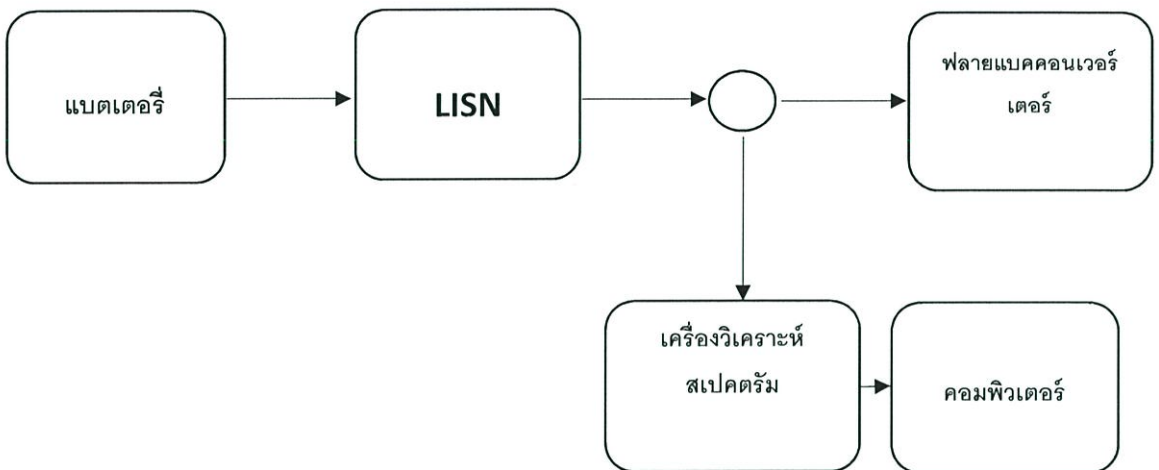
รูปที่ 4.4 สัญญาณแสดงรูปคลื่นพัลส์ในวงจรจับเกต

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงสัญญาณใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์ทำงานโดยกำหนดให้ทำงานที่ความถี่เท่ากับ 50 kHz และช่วงเวลาในการนำกระแสเท่ากับ 45% เพื่อให้กระแสที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มนำกระแสอีกครั้ง

4.3 ผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวน

4.3.1 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ

การทดลองนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบตเตอรี่ เพื่อทำการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

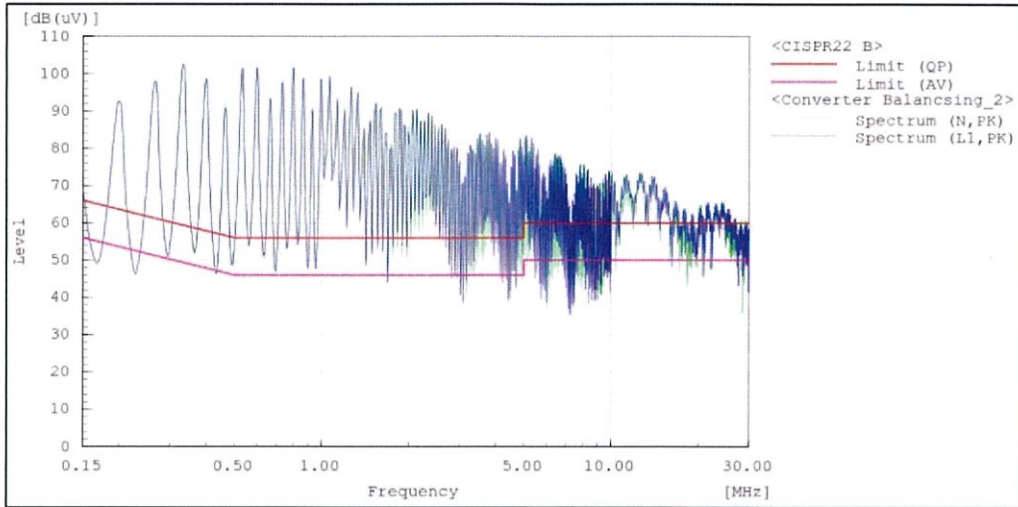


รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายตัวนำ

จากรูปที่ 4.5 จะทำการทดสอบโดยการป้อนไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่ผ่านโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) เข้าสู่วงจรทดสอบ ซึ่งสัญญาณที่ได้จาก LISN จะเข้าไปสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) เพื่อวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 Class B เพื่อส่งเข้าคอมพิวเตอร์ในการเก็บข้อมูล

ซึ่งการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ซึ่งจะทำการวัดทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัล

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิร์ตซ์โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และสายนิวทรัล



รูปที่ 4.6 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average Value) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

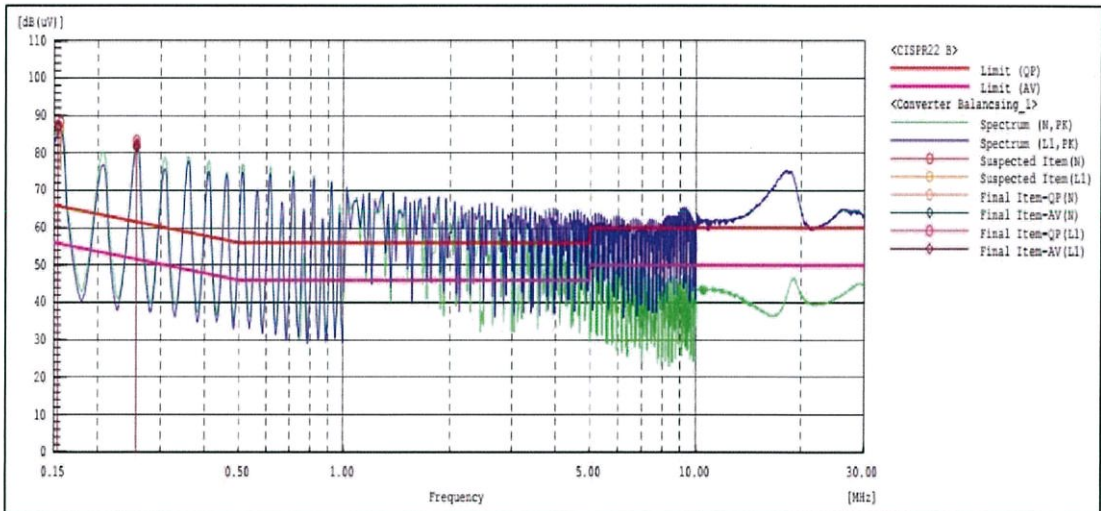
เมื่อทำการทดสอบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่มากตั้งแต่ช่วงความถี่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล

--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading	Reading	c.f	Result	Result	Limit	Limit	Margin	Margin
	[MHz]	QP	AV	[dB]	QP	AV	QP	AV	QP	AV
		[dB (uV)]	[dB (uV)]		[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB]	[dB]
1	0.1537	77.4	76.9	10.1	87.5	87.0	65.8	55.8	-21.7	-31.2
2	0.2564	72.4	71.9	10.0	82.4	81.9	61.5	51.5	-20.9	-30.4
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading	Reading	c.f	Result	Result	Limit	Limit	Margin	Margin
	[MHz]	QP	AV	[dB]	QP	AV	QP	AV	QP	AV
		[dB (uV)]	[dB (uV)]		[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB (uV)]	[dB]	[dB]
1	0.1539	77.2	76.7	10.1	87.3	86.8	65.8	55.8	-21.5	-31.0
2	0.2567	72.2	71.6	10.0	82.2	81.6	61.5	51.5	-20.7	-30.1

รูปที่ 4.7 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนกรณีใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.7 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทรัลเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B พบว่าข้อมูลในช่อง Margin QP [dB] จะมีค่าติดลบอยู่ทั้งหมด ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่เกินค่ามาตรฐานกำหนดไว้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และสายนิวทรัล

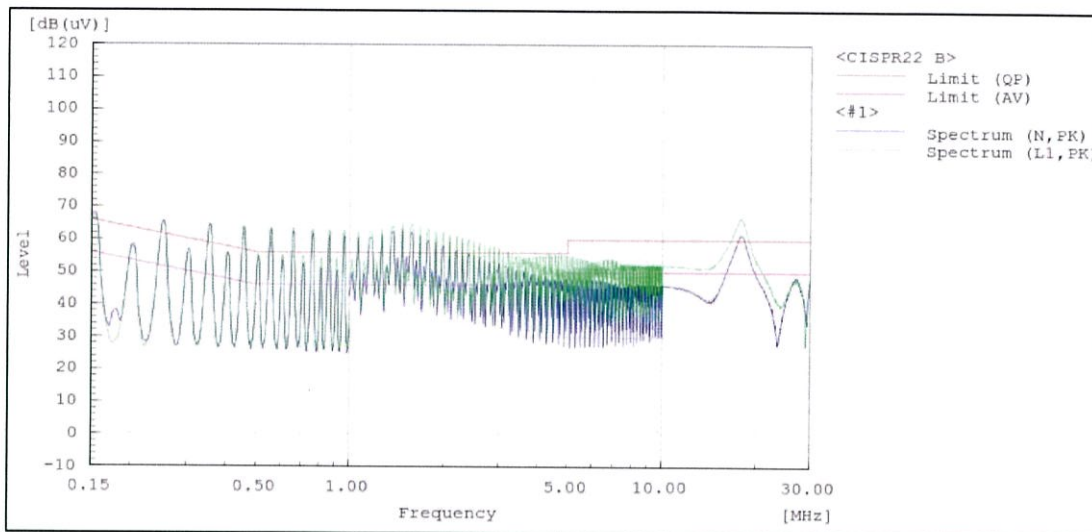


รูปที่ 4.8 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรพลาสมาคอนเวอร์เตอร์หลังจากใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน ($C=47\mu\text{F}$)

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average Value) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบแบบใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน พบว่าการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบสามารถลดทอนลงมาได้ระดับหนึ่ง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่ตั้งแต่ช่วงความถี่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และสายนิวทรัล



รูปที่ 4.9 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรพลาสมาคอนเวอร์เตอร์หลังจากใช้วิธีสมมูลสัญญาณรบกวน (C=3300µF)

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีเขียวคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average Value) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

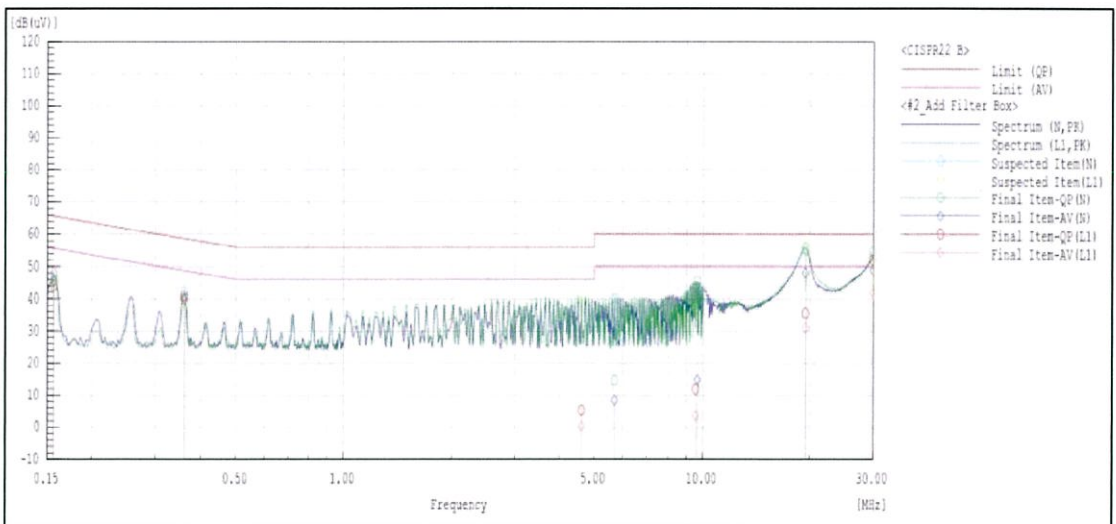
เมื่อทำการทดสอบวงจรที่เพิ่มขนาดตัวประจุให้มีค่ามากกว่ากรณีที่แล้ว พบว่าการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบสามารถลดทอนลงมาใกล้เคียงเส้น Quasi peak ซึ่งยังอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่ไม่มาก ตั้งแต่ช่วงความถี่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30เมกกะเฮิร์ตซ์ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล

--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading	Reading	c.f	Result	Result	Limit	Limit	Margin	Margin
	[MHz]	QP	AV	[dB]	QP	AV	QP	AV	QP	AV
		[dB(uV)]	[dB(uV)]		[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB]	[dB]
1	0.1564	35.8	35.3	10.1	45.9	45.4	65.7	55.7	19.8	10.3
2	0.3604	30.1	29.9	10.0	40.1	39.9	58.7	48.7	18.6	8.8
3	5.7025	4.3	-2.0	10.3	14.6	8.3	60.0	50.0	45.4	41.7
4	9.6625	31.0	4.4	10.5	41.5	14.9	60.0	50.0	18.5	35.1
5	19.450	43.8	36.6	11.5	55.3	48.1	60.0	50.0	4.7	1.9
6	30.000	41.2	35.4	12.4	54.6	48.8	60.0	50.0	5.4	1.2
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading	Reading	c.f	Result	Result	Limit	Limit	Margin	Margin
	[MHz]	QP	AV	[dB]	QP	AV	QP	AV	QP	AV
		[dB(uV)]	[dB(uV)]		[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB(uV)]	[dB]	[dB]
1	0.1564	34.0	33.2	10.1	44.1	43.3	65.7	55.7	21.6	7.4
2	0.3604	30.9	29.9	10.0	40.9	39.9	58.7	48.7	17.8	8.8
3	4.6225	-5.0	-10.0	10.2	5.2	0.3	56.0	46.0	50.8	45.7
4	9.550	1.4	-6.9	10.5	11.9	3.6	60.0	50.0	48.1	46.4
5	19.450	23.6	19.2	11.8	35.4	31.0	60.0	50.0	24.6	19.0
6	29.950	39.3	29.1	12.8	52.1	41.9	60.0	50.0	7.9	8.1

รูปที่ 4.10 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนกรณีต่อวงจรกรองความถี่สูง

จากข้อมูลในรูปที่ 4.10 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์ และสายนิวทรัลเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B พบว่าข้อมูลในช่อง Margin QP [dB] จะมีค่าเป็นบวกอยู่ทั้งหมด ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนดไว้

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



รูปที่ 4.11 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายคอนเวอร์เตอร์หลังจากต่อวงจรกรองความถี่สูง

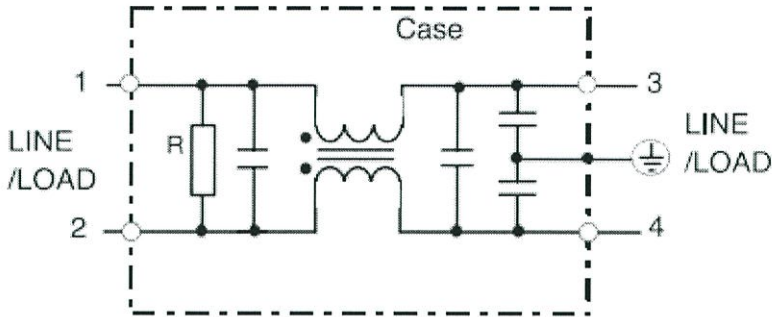
โดยวงจรกรองความถี่สูงที่เลือกใช้นั้น คือ Noise Filter MBS-1215-22



รูปที่ 4.12 ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ลดสัญญาณรบกวน MBS-1215-22

โดยพารามิเตอร์ของตัวกรองกระแสไฟฟ้า ลดสัญญาณรบกวน MBS-1215-22 ประกอบไปด้วย

$$L = 5mH, C_x = 0.33\mu F, C_y = 3300pF, R = 1M\Omega$$



R: Breeder resistance

รูปที่ 4.13 วงจรไฟฟ้าของตัวกรองกระแสไฟฟ้า ลดสัญญาณรบกวน MBS-1215-22

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average Value) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบวงจรหลังจากต่อวงจรรองความถี่สูง พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ตั้งแต่ช่วงความถี่เริ่มต้น จนถึงความถี่ 30เมกะเฮิรตซ์ ทั้งในสายไลน์และนิวทรัล

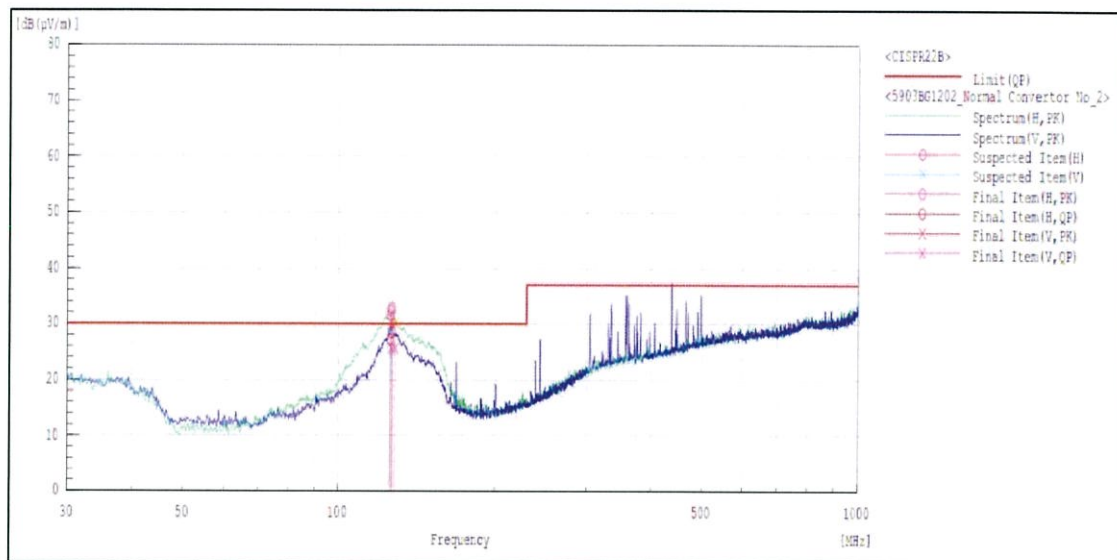
4.3.2 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ

No.	Frequency [MHz]	(F)	Reading QP [dB(μV)]	c.f [dB(1/m)]	Result PK [dB(μV/m)]	Result QP [dB(μV/m)]	Limit QP [dB(μV/m)]	Margin PK [dB]	Margin QP [dB]	Height [cm]	Angle [°]
1	126.333	H	37.3	-8.8	32.8	28.5	30.0	-32.8	1.5	258.0	350.0
2	126.380	V	34.4	-8.8	30.1	25.6	30.0	-30.1	4.4	114.0	254.0

รูปที่ 4.14 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากข้อมูลในรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในแกนตั้งและแกนนอน เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] มีค่ามากกว่าศูนย์เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่เกือบจะเกินค่ามาตรฐาน

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองการแผ่สัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศในย่านความถี่ 30 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิรตซ์ โดยเทียบกับมาตรฐาน EN55022 class B ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนตามแกนนอนและกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนตามแกนตั้ง

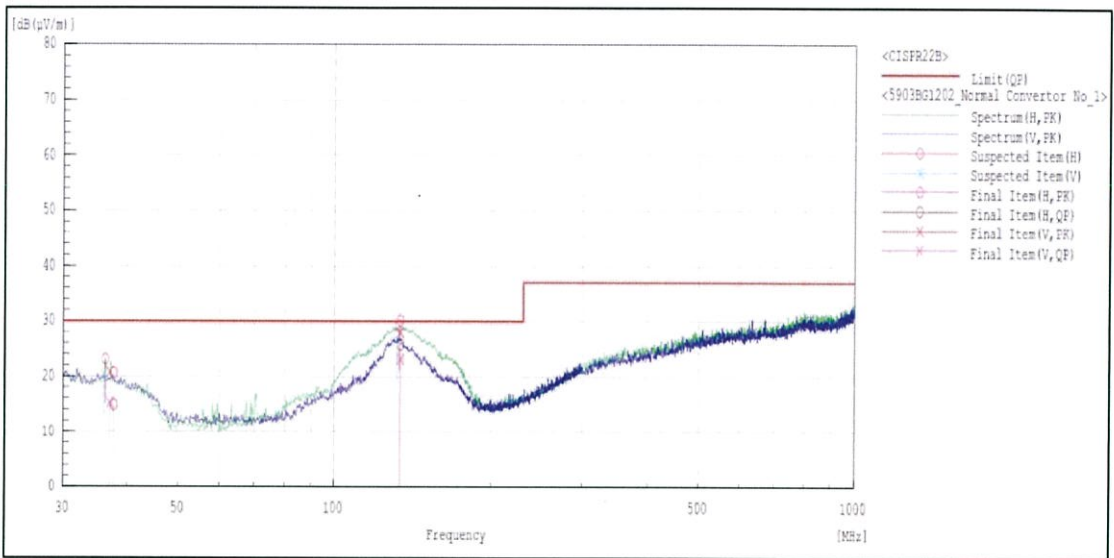
เมื่อทำการทดสอบวงจร พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในแกนตั้งและแกนนอน

No.	Frequency (F)	Reading	c.f	Result	Result	Limit	Margin	Margin	Height	Angle	
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (1/m)]	[dB (µV/m)]	[dB (µV/m)]	[dB (µV/m)]	[dB]	[dB]	[cm]	[°]	
1	134.130	V	32.1	-9.0	27.9	23.1	30.0	-27.9	6.9	258.0	284.0
2	134.130	H	34.7	-9.0	30.1	25.7	30.0	-30.1	4.3	400.0	182.0

รูปที่ 4.16 ข้อมูลผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนของวงจรหลังจากชิลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์

จากรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในแกนตั้งและแกนนอนเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B หลังจากซีลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์ จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนลดทอนลงและอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกะเฮิร์ตซ์โดยทำการวัดทั้งในแกนนอนและแกนตั้ง



รูปที่ 4.17 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากซีลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนตามแกนนอนและกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนตามแกนตั้ง

เมื่อทำการทดสอบวงจรหลังจากซีลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์ พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในแกนตั้งและแกนนอน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและทางอากาศระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับวงจรพลาสมาแบบคอนเวอร์เตอร์ โดยที่ผลการทดลองที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 class B ซึ่งใช้สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

การทดลองเริ่มจากการทดสอบการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ไฟเลี้ยงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 V จากนั้นทดสอบสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มซึ่งได้ความถี่และช่วงเวลานำกระแสตามต้องการ แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปขับเคลื่อนมอเตอร์ในวงจรพลาสมาแบบคอนเวอร์เตอร์และทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ซึ่งได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5 V ซึ่งถือว่าการทำงานของวงจรเป็นปกติ จากนั้นทำการเพิ่มวงจรที่ใช้วิธีเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวนลงไปในวงจรและทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ซึ่งการทำงานของวงจรก็ทำงานเป็นปกติ

การทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้ทดสอบการทำงานทั้งทางสายตัวนำและทางอากาศ โดยการทดสอบทางสายตัวนำกรณีมีตัววงจรเพียงอย่างเดียวผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเกินมาตรฐานอยู่มาก ซึ่งหลังจากใช้วิธีเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีขึ้น จากนั้นนำวงจรดังกล่าวมาใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนลดลงอยู่ใต้เส้นมาตรฐาน ในส่วนของการทดสอบทางอากาศกรณีมีตัววงจรเพียงอย่างเดียวผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งหลังจากชิลด์หุ้มแปลงและต่อกล่องเคสลงกราวด์ทดสอบได้ว่าค่าสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนได้เล็กน้อย

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเมื่อมีการใช้วิธีเทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวนอาจจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้เนื่องจากขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่ ซึ่งเราอาจจะแก้ไขได้โดยการลดขนาดตัวเก็บประจุและใส่ฟังก์ชันเสริมโดยการใส่ฟิวเตอร์เพิ่มเข้าไป โดยในส่วนของการทดสอบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจะเห็นว่าผลการทดสอบลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนรอบการชิลด์หุ้มแปลงและหากกล่องเคสที่เป็นการปิดทึบแทนการเจาะรู


เอกสารอ้างอิง

- [1] กานต์ บำรุงศิริ, “Study and Analysis of PWM Signal Effects on Generating Electromagnetic Interference in Power Converter,”ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [2] วีระเชษฐ ชันเงิน, Power Electronics, พิมพ์ครั้งที่ 9.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.2553
- [3] วีระเชษฐ ชันเงิน, ชัยยันต์ เจตนาเสน, การรบกวนทางไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [4] Henry Wk Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiley & Sons, 2009
- [5] ประสิทธิ์ ทิพพุด, ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์, EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานการทดสอบ, พิมพ์ครั้งที่1 กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2549
- [6] Pulse A technitrol company, Understanding Common Mode noise, G019.A (4/99)
- [7] สุวัฒน์ แซ่ตัน, เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย,พิมพ์ครั้งที่3 .กรุงเทพฯ :ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2558
- [8] กอบชัย เดชหาญ, การลดสัญญาณรบกวนในระบบอิเล็กทรอนิกส์, พิมพ์ครั้งที่1 .กรุงเทพฯ :สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2528
- [9] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, Switch-mode Power Supplies, พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.2553
- [10] มงคล อัครโกวิทกรณ และ วัดสัน ธิรภัทรพงศ์, Noise Reduction, พิมพ์ครั้งที่1 .กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2539
- [11] ธีรศักดิ์ สมภารจันทร์, “EMI self-learning toolkit for engineers,” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [12] Daniel Cochrane, Passive Cancellation of Common-Mode Electronic Interference in Switching Power Converter, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001

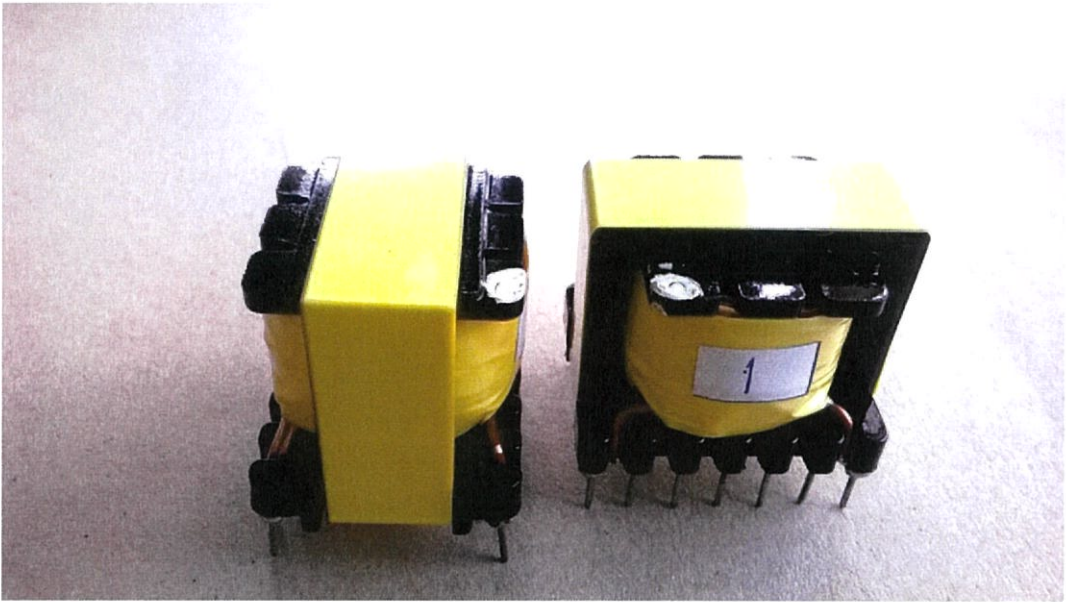
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

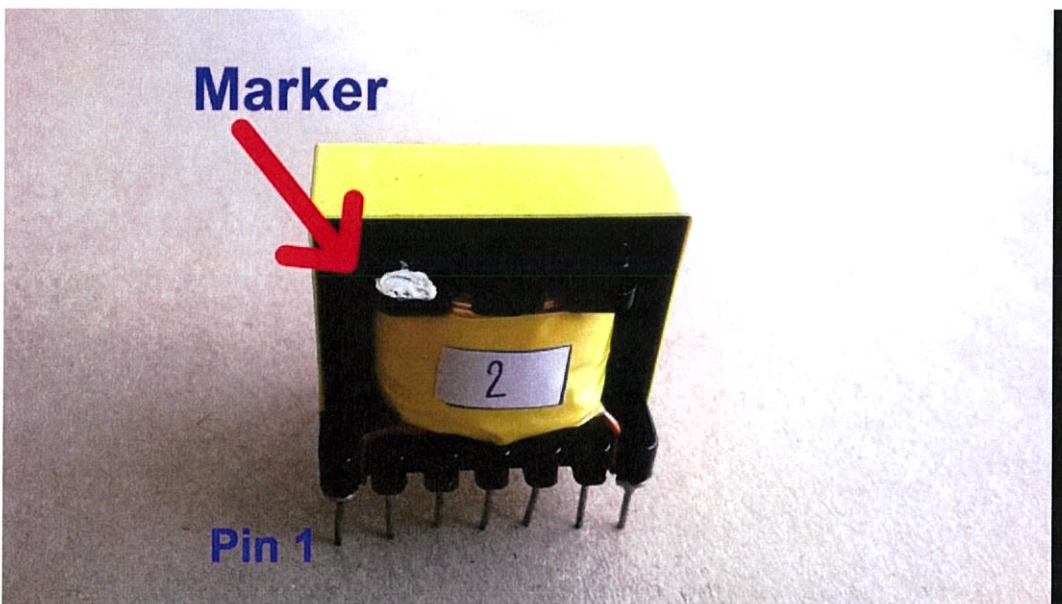
ข้อมูลจำเพาะของหม้อแปลงความถี่สูง

		D A T A T E S T									
Part Number : TRANSFORMER EI-33 (14P)			Customer :			Test by :		Date : 11-03-2559			
Parameter	Ind	Ind	DCR	DCR	TRP	HI - POT	HI - POT				
Test condition	1KHz, 250m V	1KHz, 250m V			1KHz, 1V	5KV, 50HZ	1.0KV, 50HZ				
Test equipment	Zentech 1012F	Zentech 1012F	Zentech 502A	Zentech 502A	Zentech 310	Zentech 9072	Zentech 9072				
Max value											
Nom value	1.725	0.613	20.33	12.83	1.66	3 Sec	3 Sec				
Min value											
Unit	mH	mH	mΩ	mΩ		1mA	1mA				
Test						CORE / ALL PIN	wind / wind				
1	1.626	0.570	20.490	13.530	1.66	PASS	PASS				
2	1.612	0.570	20.83	13.39	1.66	PASS	PASS				
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
M											
σ											
M + 3σ											
M - 3σ											

รูปที่ ก-1 ทดสอบการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูงที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ ก-2 หม้อแปลงความถี่สูงสำหรับการลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ ก-3 จุดรับไฟเข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูง

ภาคผนวก ข

มาตรฐาน EN 55022

BRITISH STANDARD EN 55022
Information technology equipment
Radio disturbance characteristics
Limits and methods of measurement

1. Introduction

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

2. Scope and object

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

3. Definitions

For the purposes of this document the following definitions apply;

3.1 information technology equipment (ITE)

Any equipment

- a) which has a primary function of either (or a combination of) entry, storage, display, retrieval, transmission, processing, switching, or control, of data and of telecommunication messages and which may be equipped with one or more terminal ports typically operated for information transfer;
- b) With a rated supply voltage not exceeding 600 V.

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

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

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

3.2 equipment under test (EUT)

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

4. Classification of ITE

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

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

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

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

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

Class A ITE

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

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

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

the higher reading shall be recorded with the exception of any brief isolated high reading which shall be ignored.

4.1 Limits of mains terminal disturbance voltage

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

Frequency range (MHz)	Limits dB(μ V)	
	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,50	79	66
0,50 to 30	73	60

NOTE: The lower limit shall apply at the transition frequency.

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

Frequency range (MHz)	Limits dB(μ V)	
	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,50	66 to 56	56 to 46
0,50 to 5	56	46
5 to 30	60	50

NOTE 1: The lower limit shall apply at the transition frequencies.
NOTE 2: The limit decreases linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,50 MHz.

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

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

Frequency range (MHz)	Voltage limits dB(μ V)		Current limits dB(μ A)	
	Quasi-peak	Average	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,5	97 to 87	84 to 74	53 to 43	40 to 30
0,5 to 30	87	74	43	30

NOTE 1 The limits decrease linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,5 MHz.
NOTE 2 The current and voltage disturbance limits are derived for use with an impedance stabilization network (ISN) which presents a common mode (asymmetric mode) impedance of 150 Ω to the telecommunication port under test (conversion factor is $20 \log_{10} 150 / l = 44$ dB)

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

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

NOTE 1 The limits decrease linearly with the logarithm of the frequency in the range 0,15 MHz to 0,5 MHz.

NOTE 2 The current and voltage disturbance limits are derived for use with an impedance stabilization network (ISN) which presents a common mode (asymmetric mode) impedance of 150 Ω to the telecommunication port under test (conversion factor is $20 \log_{10} 150/l = 44$ dB).

ภาคผนวก ค
บทความวิชาการ

การหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลรวมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย

เทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน

Cancellation of Common Mode Electromagnetic Noise in a Power Electronic

Circuit Using Noise Balancing technique

นายกษิต สดกกลับ นายกัณฑ์เอนก เพ็องฟูพงศ์ นายพรภพ อนิวัตกุลชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 8099

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการหักล้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยได้ทำการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) ที่ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งนำไปใช้จ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์ที่มีมีกักและความถี่เดียวกับที่ใช้ในบ้านทั่วไป แต่ในการใช้งานอุปกรณ์สวิตชิ่งนั้นมักก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระดับที่สูงมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่อการทำงานหรือส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขปัญหานี้ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการหักล้างสัญญาณรบกวน (Noise balancing) ให้เป็นไปตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยอ้างอิงได้จากมาตรฐาน EN55022 Class B

คำสำคัญ: สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า, เทคนิคการสมดุลสัญญาณรบกวน, วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์, สัญญาณรบกวนแบบโหมดผลรวม, การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทางสายตัวนำ

Abstract

This project presents a study on cancellation of common mode electromagnetic noise in a power electronic circuit, which is here in flyback converter, functioning with high-frequency switching devices. This flyback converter is designed in discontinuous current mode, and used to supply electrical

household appliances. The use of this kind of converter can generate high-frequency noise that could damage or malfunction the nearby sensitive equipment. Hence, EMI reduction technique is required to solve the electromagnetic compatibility (EMC) problem in order to meet an applied standard such as EN 55022 class B standard.

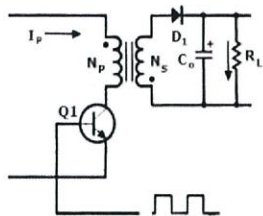
Keywords: Electromagnetic interference, Noise Balancing technique, Flyback converter, Common mode noise, Conducted Emission

1. บทนำ

ในปัจจุบันนั้น อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นเรื่อยๆ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีความไวต่อความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับสูงมาก ดังนั้น สิ่งที่มีมักจะเกิดขึ้นอยู่เสมอและยากที่จะหลีกเลี่ยงได้ก็คือ ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปัญหาทางไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายได้อย่างมากมายมหาศาลเลยทีเดียว ซึ่งปัญหาทางไฟฟ้าปัญหาหนึ่งก็คือ ปัญหาจากการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราใช้งานอยู่นั้นจะผลิตสัญญาณความถี่ออกมาเมื่อมีการใช้งาน การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าส่งผลให้อุปกรณ์ที่ถูกรบกวนนั้นเกิดข้อบกพร่อง การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อผู้ใช้สินค้า ต้องผ่านการทดสอบมาตรฐานที่กำหนด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [1]

วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 watt และให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI/EMI ก่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อยและมีราคาถูก

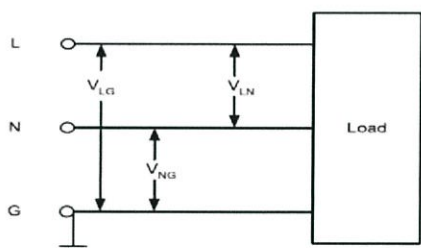
2.2 สัญญาณรบกวนแบบโหมคผลรวม

วงจรไฟฟ้า 1 เฟสซึ่งประกอบไปด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าโหมคผลรวม (Common mode voltage) ดังนี้

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

โดย V_{LG} : แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับกราวด์

V_{NG} : แรงดันไฟฟ้าระหว่างนิวทรัลกับกราวด์



รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้า 1 เฟส [2]

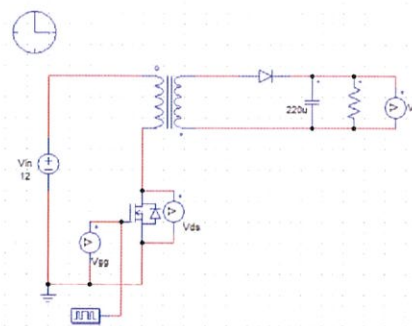
2.3 การสมดุลสัญญาณรบกวน

วงจรที่สมดุล (Balancing circuit) คือ วงจรซึ่งประกอบด้วยตัวนำ 2 เส้นที่มีอิมพีแดนซ์เทียบกับกราวด์ (หรือเปรียบกับตัวนำอื่นๆ) เท่ากัน จุดประสงค์ในการบาลานซ์เพื่อที่จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนตัวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของคอมมอนโหมคและจะหักล้างกันพอดีที่เอาท์พุท

3. การออกแบบ

3.1 การออกแบบแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

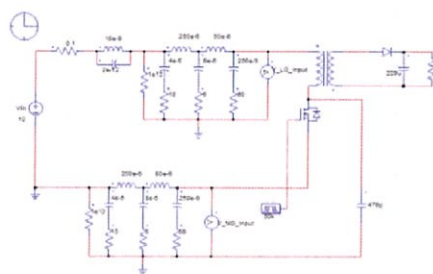
จำลองการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Psim



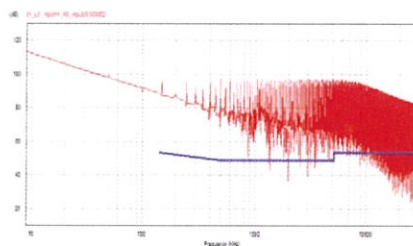
รูปที่ 3 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

3.2 การจำลองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Psim

การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องมีโครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network : LISN) ต่อเข้ากับด้านหน้าของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4

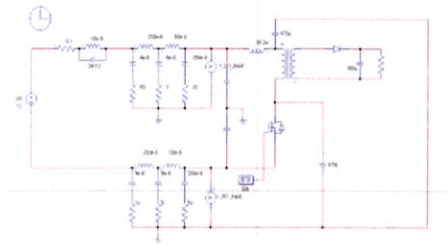


(ก) วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พร้อม LISN

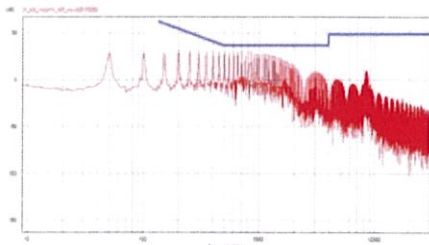


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมคผลรวมกับความถี่
รูปที่ 4 การจำลองสัญญาณรบกวนด้วยโปรแกรม Psim

3.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง



(ก) วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พร้อมกับ LISN และ Balancing circuit

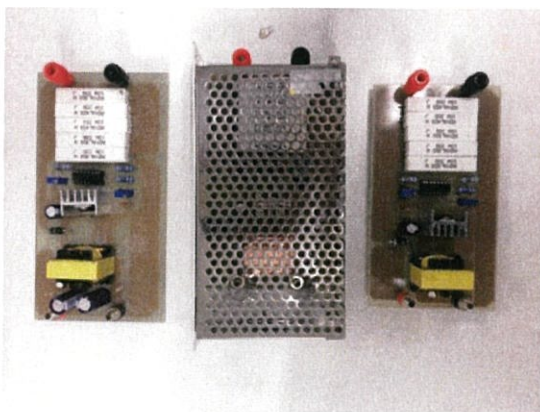


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมกับความถี่เมื่อมีการใช้เทคนิค noise balancing

รูปที่ 5 การจำลองสัญญาณรบกวนด้วยโปรแกรม Psim

3.4 วงจรจริง

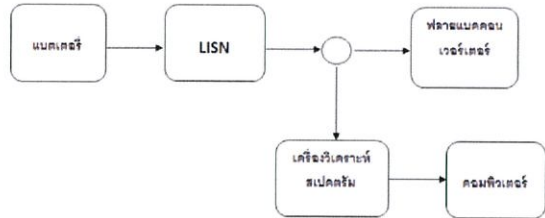
รูปที่ 6 เป็นวงจรจริงที่สร้างขึ้นจากการออกแบบโดยด้านเข้าของวงจรใช้ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานโดยกำหนดให้ทำงานที่ความถี่เท่ากับ 50 kHz และช่วงเวลาในการนำกระแสเท่ากับ 45% แรงดันไฟฟ้าด้านออก 5 โวลต์ และนำวงจรนี้ไปใช้ทดสอบสัญญาณรบกวน



รูปที่ 6 แสดงรูปวงจรจริงที่สร้างขึ้น

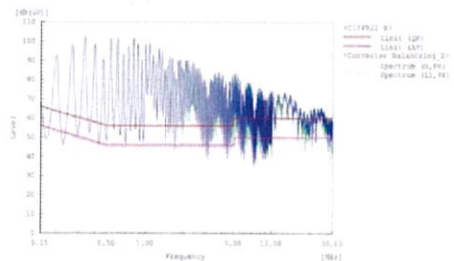
4. ผลการทดลอง

การทดลองนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบตเตอรี่ โดยทำการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (EET) ซึ่งการวัดแสดงดังรูปที่ 7



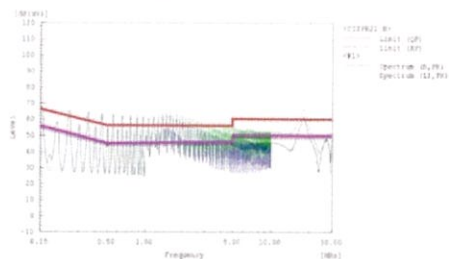
รูปที่ 7 การวัดสัญญาณรบกวน

การทดสอบสัญญาณรบกวนนั้นได้ทำในย่านความถี่เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในย่านความถี่ 150 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์โดยทำการวัดทั้งในสายไลน์ และ สายนิวทรัล

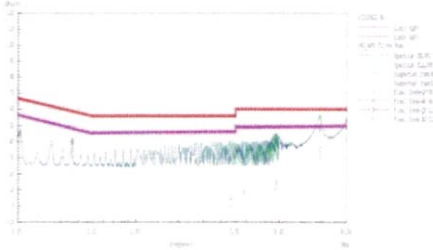


รูปที่ 8 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

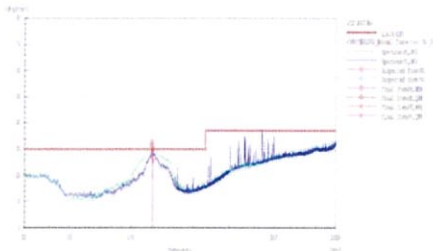
จะเห็นว่าเส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average Value) โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล



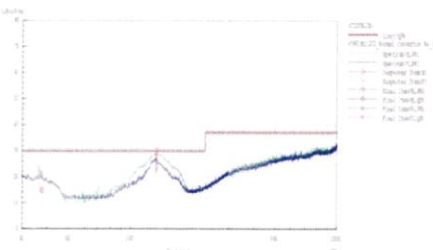
รูปที่ 9 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากใช้วิธีสมดุลสัญญาณรบกวน (C=3300uF)



รูปที่ 10 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายคอนเวอร์เตอร์ หลังจากค่อวงจรรบกวนความถี่สูง



รูปที่ 11 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 12 สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเมื่อเทียบกับมาตรฐาน EN55022 Class B ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์หลังจากชิลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์

เมื่อทำการทดสอบวงจรหลังจากชิลด์หม้อแปลงและใส่กล่องเคสที่ต่อลงกราวด์ พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งในแกนตั้งและแกนนอน

5. บทสรุป

การทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้ทดสอบการทำงานทั้งทางสายตัวนำและทางอากาศ โดยการทดสอบทางสายตัวนำกรณีมีแคว้งจรเพียงอย่างเดียวผลการทดสอบ

แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเกินมาตรฐานอยู่มาก ซึ่งหลังจากใช้วิธีเทคนิคการสมมูลสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีขึ้น จากนั้นนำวงจรดังกล่าวมาใส่ตัวกรองสัญญาณรบกวนผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนลดลงอยู่ได้เส้นมาตรฐาน ในส่วนของ การทดสอบทางอากาศกรณีมีแคว้งจรเพียงอย่างเดียวผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งหลังจากชิลด์หม้อแปลงและต่อกล่องเคสลงกราวด์ทดสอบได้ว่าค่าสัญญาณรบกวนสามารถลดทอนได้เล็กน้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1]. สุวัฒน์ แร่คั่น, เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์ิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย, พิมพ์ครั้งที่ 3 .กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2558
- [2]. วีระเชษฐ ชันเงิน, Power Electronics, พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟ้าหุ่่นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินติ้ง.2553

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายกษิต สุกถกลับ

เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 865/27 ซ.ปิ่นนวิติ47 บางจาก

พระโขนง สุขุมวิท101 จ.กรุงเทพ 10260

โทรศัพท์ 0869722278

Email : kskasidit@gmail.com



นายกันท์เอนก ฟ็องฟูงศ์

เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 51/61 หมู่บ้านร่วมสุขวิลล่า2

เขตสะพานสูง ถนนรามคำแหง

จ.กรุงเทพมหานคร 10 260

โทรศัพท์ 0864113831

Email : Gunanek.f@gmail.com



นายพรภพ อนินัตกุลชัย

เกิดวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 186/341 ซ.รามคำแหง190/1 เขตมีนบุรี

จ.กรุงเทพมหานคร 10510

โทรศัพท์ 0855652360

Email : aupigpink@hotmail.com

ประวัติผู้เขียน



นายกษิติศ สุดกลับ เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536
 ที่อยู่ 865/27 ซ.ปทุมณีวิถี่47 บางจาก พระโขนง ถนนสุขุมวิท101
 จ.กรุงเทพมหานคร 10260
 โทรศัพท์ 086-972-2278 Email : kskasidit@gmail.com



นายกัณฑ์เอนก เฟื่องฟูพงศ์ เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2536
 ที่อยู่ 51/61 หมู่บ้านร่มสุขวิลล่า2 เขตสะพานสูง ถนนรามคำแหง
 จ.กรุงเทพมหานคร 10240
 โทรศัพท์ 086-411-3831 Email : Gunanek.f@gmail.com



นายพรภพ อนิวัตกุลชัย เกิดวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2536
 ที่อยู่ 186/341 ซ.รามคำแหง190/1 เขตมีนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร 10510
 โทรศัพท์ 085-565-2360 Email : aupigpink@hotmail.com