

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษา ผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากวงจรขับเคลื่อนเหนี่ยวนำ

THE STUDY OF EMI EFFECT FROM INDUCTION MOTOR DRIVE



นาย จริญญาศักดิ์ รังค์ภักดิ์
นาย วีระศักดิ์ จันทร์แก้ว
นาย สวัสดิ์ ภูขงค์
น.ส.ศรีอมาศ มากชู

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ปพ.

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

๙ ๒๕๖

คณะวิศวกรรมศาสตร์

๒๕๖๕

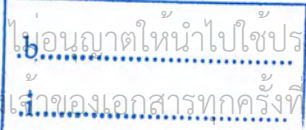
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๖๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 49892

วันที่เดือน,ปี ๒ ๒๕๖ ๒๕๖๕



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ยืมต้องคืนหนังสือเล่มนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษา ผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากวงจรขับเคลื่อนเหนี่ยวนำ
THE STUDY OF EMI EFFECT FROM INDUCTION MOTOR DRIVE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

THE STUDY OF EMI EFFECT FROM INDUCTION MOTOR DRIVE

ผู้จัดทำ

1. นาย จรัญศักดิ์ รงค์ภักดี รหัสประจำตัว 43015109
2. นาย วีระศักดิ์ จันทร์แก้ว รหัสประจำตัว 43015135
3. นาย สวัสดิ์ ภูขงศ์ รหัสประจำตัว 43015140
4. น.ส.เครือมาศ มากชู รหัสประจำตัว 43015155



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษา ผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นาย จริญญาศักดิ์ รงค์ภักดี

นาย วีระศักดิ์ จันทร์แก้ว

นาย สวัสดิ์ ภูซงค์

น.ส.เครือมาศ มากชู

ผศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) ซึ่งผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากชุดอินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.5 แรงม้า ในสภาวะการทำงานที่มีแรงบิดและความเร็วรอบต่างกันซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า โดยทำการศึกษาและปรับปรุงแก้ไขให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ว่าด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับการควบคุมสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาตามสายตัวนำซึ่งมีผลต่อระบบไฟฟ้า และข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมที่ไม่ทำให้เกิดการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ตามมาตรฐาน CISPR 11

The Study of EMI effect from Induction motor drive

Charunsak Rongphugdee

Werasak Chunkaw

Sawatdee Poochong

Khruamas Magchu

Asst.Prof.Dr.Werachet Khan-ngern Advisor

2002

Abstract

The purpose of this project is to study electromagnetic interference (EMI) of 1.5 kW inverter to control 0.5 hp induction motor. These conditions experimental are tested at various loads and frequency of inverter. The main noise sources are an inverter and an induction motor. This project is focused on the improving EMI emission refer to IEC 61000-3-2 standard (deals with disturbances in supply system including harmonics and voltage fluctuation) and CISPR 11 standard where equipment designed to generate RF energy for industrial scientific and medical (ISM) purpose.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ร.อ.ดร. วีรเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาชี้แนวทางและแนะนำ ด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณ พี่วริษฐ์ ธรรมศิริโรจน์ พี่คมกริช คระระนันท์ และพี่ๆห้องปฏิบัติการวิจัย Electromagnetic compatibility (EMC) ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือใช้ในการทำวิจัย

และท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจตลอดมาจนประสบความสำเร็จสมดังปรารถนา

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1 บทนำ	4
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	4
2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	4
2.2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.2.3 วงจรสมมูล	7
2.2.4 การควบคุมความเร็วด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage, Variable Frequency : VVVF)	9
2.3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
2.3.1 พีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์(PWM Inverter)	12
2.3.1.1 ความสัมพันธ์ของพีดีบีเบิลยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส	14
2.3.1.2 การทำงานของพีดีบีเบิลยูเอ็มในย่านคัทชันการมีอดดูละทเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$)	16
2.3.1.3 การทำงานของพีดีบีเบิลยูเอ็มในย่านคัทชันการมีอดดูละทเกิน ($m_a > 1.0$)	17
2.3.1.4 การทำงานในย่านรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม (square wave)	18
2.4 สรุป	19
บทที่ 3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	20
3.1 บทนำ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2	ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)	20
3.3	ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	21
3.3.1	สัญญาณรบกวน	21
3.3.2	การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ	22
3.3.2.1	โหมดผลต่าง	23
3.3.2.2	โหมดคร่อม	23
3.3.3	การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำตามมาตรฐาน CISPR	24
3.3.3.1	AMN/LISN	24
3.3.3.2	แผ่นกราวด์	27
3.3.3.3	เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัด	27
3.3.3.4	การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ	27
3.3.4	การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR	29
3.4	วงจรกรองความถี่	30
3.4.1	วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ(Capacitor filter)	31
3.4.2	วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ(Inductor filter)	32
3.4.3	วงจรกรองความถี่แบบ LC(LC filter)	33
3.4.4	วงจรกรองความถี่แบบ π (Pi filter)	34
3.4.5	วงจรกรองความถี่แบบ T(T filter)	34
3.5	สรุป	34
บทที่	4 การจำลองการทำงาน	35
4.1	บทนำ	35
4.2	การสร้างแบบจำลองการทำงาน	35
4.2.1	การสร้างสัญญาณควบคุม SPWM และวงจร Dead Time ด้วยโปรแกรม PSpice	35
4.2.2	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	37
4.2.3	แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	37
4.2.4	แบบจำลอง LISN	38
4.3	ผลการจำลองการทำงาน	38
4.3.1	ผลการจำลองสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	39

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

	4.3.2	ผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ	42
	4.4	สรุป	48
บทที่	5	การทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ	50
	5.1	บทนำ	50
	5.2	วัตถุประสงค์การทดลอง	50
	5.3	ขอบเขตการทดลอง	50
	5.4	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	50
	5.5	วิธีการทดลอง	51
	5.6	ผลการทดลอง	51
	5.6.1	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง	51
	5.6.2	ผลการทดลองวัดสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน	54
	5.7	สรุป	55
บทที่	6	การประยุกต์ใช้วงจรลงความถี่	56
	6.1	บทนำ	56
	6.2	วัตถุประสงค์การทดลอง	56
	6.3	ขอบเขตการทดลอง	56
	6.4	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	57
	6.5	วิธีการทดลอง	57
	6.6	ผลการทดลอง	57
	6.6.1	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์	58
	6.6.2	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์	59
	6.7	สรุป	60
บทที่	7	ผลการทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ	61
	7.1	บทนำ	61
	7.2	วัตถุประสงค์การทดลอง	61

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า	
7.3	ขอบเขตการทดลอง	61
7.4	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	61
7.5	วิธีการทดลอง	62
7.6	ผลการทดลอง	62
7.6.1	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์	63
7.6.2	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์	65
7.7	สรุป	67
บทที่ 8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	68
8.1	สรุปผลการวิจัย	68
8.2	ข้อเสนอแนะ	69
8.3	สิ่งที่จะพัฒนาต่อไป	69
บรรณานุกรม		70
ภาคผนวก		71
	ภาคผนวก ก. ภาพถ่ายและข้อมูลของอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	72
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์	75

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	7
2.2	วงจรสมมูลใกล้เคียงต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	9
2.3	การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิดและกระแสเตอร์กับความถี่	9
2.4	กราฟแสดงแรงบิด-ความเร็วมอเตอร์เมื่อควบคุมแบบ VVVF	10
2.5	บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
2.6	วงจรกำลังของพีคดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์	12
2.7	พีคดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน	13
2.8	อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	14
2.9	รูปคลื่นแรงดันพีคดับเบิลยูเอ็ม และสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์	15
2.10	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างแรงดันไลน์กับแรงดันเชื่อม โยงดีซี ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ในฟังก์ชันของอัตราส่วนการมอดูเลต	17
2.11	อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบกึ่งสแตติค	19
3.1	ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	20
3.2	ความสัมพันธ์ของนิยามของ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	21
3.3	สัญญาณรบกวนที่สร้าง โดยธรรมชาติและมนุษย์	22
3.4	การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ	23
3.5	การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ	23
3.6	ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวน ใน โหมคผลต่าง	23
3.7	ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวน ใน โหมคร่วม	24
3.8	เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR	25
3.9	วงจร AMN/LISN ตามมาตรฐาน CISPR	26
3.10	การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN	26
3.11	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ	28
3.12	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ	29
3.13	แสดงลักษณะทั่วไปในการ ป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter	31
3.14	แสดงวงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ	31
3.15	วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.16	วงจรกรองความถี่แบบ LC	33
3.17	การต่อ LC Filter อนุกรม	33
3.18	แสดง π section filter	34
3.19	วงจรกรองความถี่แบบ T	34
4.1	ส่วนประกอบของแบบจำลองการทำงาน	35
4.2	แบบจำลองวงจรสร้างสัญญาณ SPWM	36
4.3	วงจรสร้างเคาท์ไม้ม	36
4.4	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	37
4.5	แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	38
4.6	แบบจำลองของ LISN	38
4.7	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อ โหลดสูงขึ้น ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)	39
4.8	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	40
4.9	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	41
4.10	ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนเมื่อ โหลดมอเตอร์สูงขึ้น ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)	42
4.11	ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	43
4.12	ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนเมื่อปรับเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	44
4.13	ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)	45
4.14	ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	45
4.15	ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนเมื่อ โหลดมอเตอร์สูงขึ้น ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz)	46
4.17	ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	47
4.18	ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz)	48
4.19	ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)	48
5.1	วงจรการทดลอง	51
5.2	ผลการทดลองและจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนในตัวนำเมื่อเปลี่ยนโหลดของมอเตอร์ (เงื่อนไขการจำลอง : $m_a = 1$, Switching Frequency = 15.5 kHz)	52
5.3	ผลการทดลองและจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนในตัวนำเมื่อเปลี่ยน ความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	53
5.4	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนในตัวนำเทียบกับเส้นมาตรฐานเมื่อเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์	54
5.5	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนในตัวนำเทียบกับเส้นมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนความถี่ เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	54
6.1	วงจรการทดลองใช้วงจรรองความถี่	56
6.2	วงจรภายในของวงจรรองความถี่	57
6.3	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก	58
6.4	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.	58
6.5	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก	58
6.6	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz	59
6.7	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz	59
6.8	ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz	59
7.1	วงจรทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ	62
7.2	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลด ของมอเตอร์ ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz ที่ย่านวัด 0.009-1 MHz	63
7.3	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลด ของมอเตอร์ ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz ที่ย่านวัด 1 - 30 MHz	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.4	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.ที่ย่านวัด 0.009-1MHz	65
7.5	ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.ที่ย่านวัด 1-30 MHz	66



1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบอุตสาหกรรม มีการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำกันอย่างแพร่หลาย เพราะมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้สะดวกและรวดเร็ว ทำให้ระบบการทำงานมีความน่าเชื่อถือ สำหรับการควบคุมการทำงานของพีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter) สามเฟส มีหลายรูปแบบที่ใช้ในการควบคุมตามแต่วัตถุประสงค์ของผู้ออกแบบ การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้น อาศัยหลักการการสวิตซ์ความถี่สูงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการทำงานดังกล่าวจะเป็นสาเหตุของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน (Electromagnetic Interference : EMI) มีทั้งที่แพร่กระจายตามสายตัวนำ (Conducted EMI) และแผ่กระจายมาทางอากาศ (Radiated EMI) [1] ที่ทำให้เกิดการรบกวนภายในตัวเอง และการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือวัด อุปกรณ์สื่อสาร และอื่นๆในระบบใกล้เคียงให้ทำงานผิดพลาดได้ และถ้าระดับการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงเกินกว่าอุปกรณ์เหล่านั้นจะทนได้ ก็จะทำให้เกิดการเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้น

ดังนั้นเมื่อเทคโนโลยีทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์พัฒนาขึ้น โดยที่อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ทำให้เทคนิคการปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำนิยมใช้แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม เพื่อลดการสูญเสียในตัวนำโดยการเพิ่มความถี่การสวิตซ์ของพีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นไซน์มากขึ้น แต่โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความถี่ส่วนใหญ่เป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ทำให้การเปลี่ยนความถี่ต้องเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลตด้วยเพื่อควบคุมการคงที่ของฟลักซ์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่) จากการพัฒนาเครื่องมอดูเลตดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากการทำงานของชุดขับมอเตอร์ดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา และการออกแบบสร้างอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถลดผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนได้อย่างเหมาะสม

ปริญญานิพนธ์นี้จะนำเสนอผลการศึกษาการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ และแผ่กระจายทางอากาศ ที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบจ่ายแรงดัน โดยการศึกษาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำจะทำการจำลองระบบ (Simulation) ด้วยโปรแกรม PSpice ในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1MHz เพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับการทดลองวัดตามมาตรฐาน CISPR ตลอดจนการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ (EMI Filter) ในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ และในส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แผ่กระจายทางอากาศจะทำการทดลองวัดและวิเคราะห์ผลแนวโน้มการเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz โดยในการศึกษาทุกกรณี จะทำการศึกษาถึงผลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง โหลดของมอเตอร์และ

ความถี่ของอินเวอร์เตอร์

1.2 วัตถุประสงค์

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลกระทบต่อการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการขับเคลื่อนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยในการศึกษาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน จะศึกษาทั้งกรณีที่แพร่กระจายมาตามตัวนำและแพร่กระจายมาทางอากาศ ภายใต้สภาวะโหลดที่แตกต่างกันและความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่างกัน และนำผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหาผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน

1.3 ขอบเขตการทำงาน

ขอบเขตของการศึกษาในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 kW ภายใต้เงื่อนไขโหลดที่แตกต่างกัน (คงที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 50 Hz) และความถี่ของอินเวอร์เตอร์ต่างกัน (คงที่โหลดของมอเตอร์) และจำลองระบบการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเปรียบเทียบกับการวัด แล้วนำผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน CISPR ตลอดจนการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำโดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษาของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดจะประกอบอยู่ในแต่ละบทของของปฏิญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทั้งที่มาตามตัวนำและแพร่กระจายมาทางอากาศ
2. ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้ที่ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์และตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาจำลองระบบร่วมกับการทดลอง
3. เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองวัดผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายมาตามสายตัวนำ และทำการทดลองวัดผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่เกิดจากการทำงานของที่ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ในทุกสภาวะ โหลด โดยคงที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 50 Hz และทดลองคงที่น้ำหนักโหลดของมอเตอร์ โดยเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์
4. เปรียบเทียบผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่มาตามสายตัวนำกับผลของการจำลองระบบในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์แนวโน้มนำการเกิด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนดังกล่าว
5. วิเคราะห์และปรับปรุงเพิ่มเติมในส่วนของการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ และประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน
6. เตรียมอุปกรณ์เครื่องมือและทดลองวัดผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายมาทางอากาศแล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์แนวโน้มนำการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนดังกล่าว
7. สรุปผลการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันผลงานการวิจัยเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבวงวน โดยเฉพาะในประเทศไทยยังมีน้อยซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องใหม่อยู่ แต่ว่าในอนาคตการพัฒนาของเทคโนโลยีด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะการสวิตชิงความถี่สูงที่เป็นสาเหตุของปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבวงวนมีการใช้กันมากขึ้น ดังนั้นปัญหานี้จะเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องมีการศึกษาและการแก้ปัญหาลดจนมีการกำหนดมาตรฐานการผลิตที่มากขึ้นในอนาคต ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังต่อไปนี้

1. มีความรู้ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבวงวน
2. สามารถใช้เครื่องมือวัดเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
3. มีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבวงวนทั้งที่มาตามสายตัวนำและทางอากาศที่เกิดจากการทำงานของชุดขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
4. สามารถประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่เพื่อแก้ปัญหาลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבวงวนในตัวนำได้อย่างถูกต้อง
5. สามารถประยุกต์ใช้ความรู้ ความเข้าใจเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในอนาคต



บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็มซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในการศึกษาและทำวิจัย เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานในเชิงทฤษฎี นำไปสู่การทดลองและ วิเคราะห์ปัญหาได้อย่างถูกต้องในการศึกษาผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของชุดขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อไป

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีค่อตัวนำในโรเตอร์ มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษา น้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือความเร็วจากสภาวะ ไม่มีโหลดจนกระทั่งจับ โหลดเต็มที่จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียก็คือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ตัวประกอบกำลังต่ำและล้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมักสูงเป็น 5 เท่าหรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด(ขณะจับ โหลดเต็มๆ)

2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนอยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor)

- ส่วนอยู่กับที่มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ที่บรรจุอยู่ในร่องสล๊อต
- โรเตอร์แบ่งออกเป็นสองแบบคือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนต เสาขาค้ำด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่าสล๊อต (Slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ นำแกนโรเตอร์ไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้ลูมิเนียมเหลวอัดแน่นอยู่ในร่องสล๊อต และมีครีบยื่นออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากแบบกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลีปริง (Slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่ มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ขาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ โดยส่วนโรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟโดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในแอร์แกป (Air Gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่ N_s : ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f : ความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ (Hz)

P : จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แต่ในขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มีการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจะไม่มีแรงบิด (Torque) เกิดขึ้นและขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r ใดๆ ที่มีความเร็วแตกต่างจากความเร็ว N_s จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิด ความแตกต่างสัมพัทธ์ของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่าสลิป (Slip)

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.2)$$

โดยที่ ω_s : ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator Angular Frequency)

ω_r : ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor Angular Frequency)

S : Slip

เมื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวดคอปเปอร์และโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะหมุนกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (N_s) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในคัตวานั้นจะมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของสายกรณินี้สลิปเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยอัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำซ้ำลดค่าสลิปก็จะลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับสลิป สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = SE_2 \quad (2.3)$$

$$X_r = SE_2 \quad (2.4)$$

ในการทำงานเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปดังนี้

$$f_r = Sf \quad (2.5)$$

เมื่อ E_r : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ
 E_2 : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่
 X_r : ค่ารีแอคแตนซ์ต่อเฟส ขณะโรเตอร์อยู่กับที่
 f_r : ความถี่ของโรเตอร์

การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังอินพุทของมอเตอร์ไม่ได้เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายเทกำลังผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap) ด้วยการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสก็คือ $E_r = SE_2$ ถ้าเอาแรงเคลื่อนจำนวนนี้หารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์ (Z_2) ก็จะได้กระแสโรเตอร์ต่อเฟส (I_2) ไหลอยู่ในโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{SE_2}{Z_2}$$

$$= \frac{SE_2}{\sqrt{(R_2^2 + S^2 X_2^2)}} \quad (2.6)$$

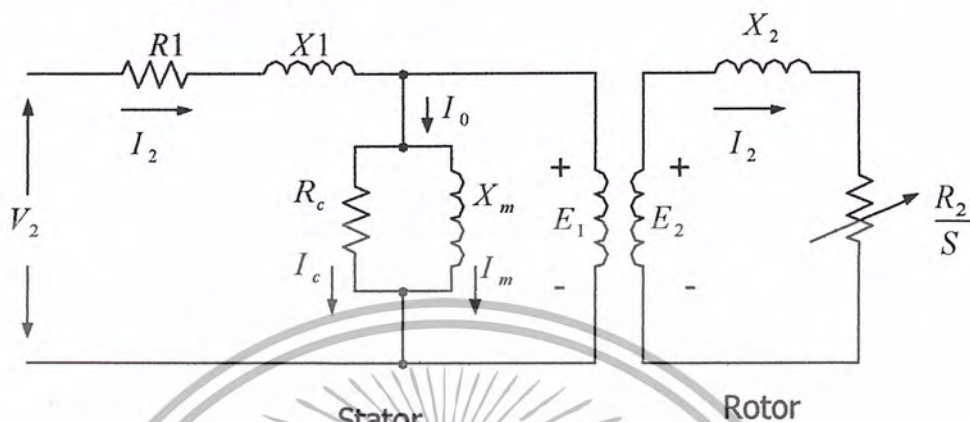
จากสมการที่ 2.6 ใช้คำนวณหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ทั้งขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (Start) และเมื่อหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใดๆก็ได้ โดยขณะเริ่มหมุนใช้แทนค่าสลิป $S = 1$ ลงในสมการที่ 2.6 กระแสโรเตอร์ขณะมอเตอร์เริ่มหมุนดังนี้

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2^2 + jX_2^2)}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 วงจรสมมูล

เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้อาศัยหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลง จะต่างกันก็ตรงที่มอเตอร์มีส่วนที่ 2 (Secondary) เคลื่อนที่หรือหมุนได้ ดังนั้นจึงเขียนวงจรสมมูลได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงธรรมดา ดังรูปซึ่งเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

- X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
- X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
- X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
- R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
- R_c คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
- I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
- I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.1 กระแส I_0 ไหลในขดลวดสเตเตอร์เป็นกระแสส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss) การเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากไม่ว่าไหลของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้นถ้าย้ายวงจรถนนานที่ I_0 ไหลผ่านมาไว้ที่ต้นทางของวงจรสมมูลจะทำให้วิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำง่ายขึ้น โดยมีเหตุผลดังนี้คือ

1. การย้ายวงจรถนนานที่กระแส I_0 ไหลผ่านนี้จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเพราะ R_1 และ X_1 มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับ X_m และจะได้วงจรสมมูลที่พิจารณาได้ง่าย
2. วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะไม่คิดค่า I_0 ซึ่งเป็นส่วนประกอบเล็กๆ เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด แต่กรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะค่า I_0 มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 30-50% ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม X_m เป็นจำนวนมากจึงต้องคงค่า X_m ไว้ในวงจรสมมูล

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถย้ายข้างรวมกันได้ ถ้าทราบอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ในทำนองเดียวกันถ้าทราบอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (Turn ratio : a) ก็จะสามารถย้ายค่าในวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นกัน

ในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงโรเตอร์มายังวงจรเทียบเคียงสเตเตอร์ ซึ่งหาค่าต่าง ๆ ของวงจรสมมูลได้ดังนี้คือ

$$E_2' = aE_2 = E_1 \quad (2.8)$$

เมื่อ E_2' = แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

$$I_2' = \frac{I_2}{a} \quad (2.9)$$

เมื่อ I_2' = กระแสของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R_2' = a^2 R_2 \quad (2.10)$$

$$X_2' = a^2 X_2 \quad (2.11)$$

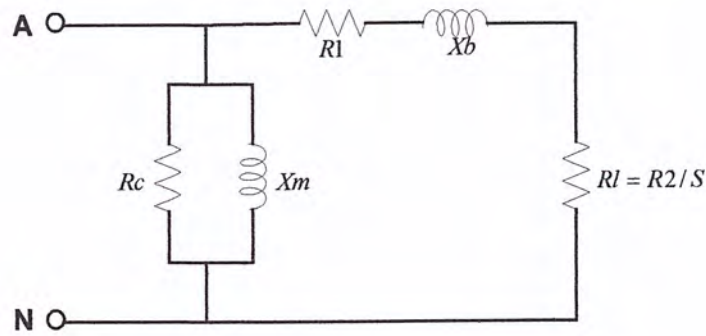
เมื่อ R_2' = ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

X_2' = รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.1 ค่าของ $\frac{R_2}{S}$ สามารถแยกเทอมออกได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{S} &= R_2 + \frac{R_2}{S} - R_2 \\ &= R_2 + R_2 \frac{(1-S)}{S} \end{aligned} \quad (2.12)$$

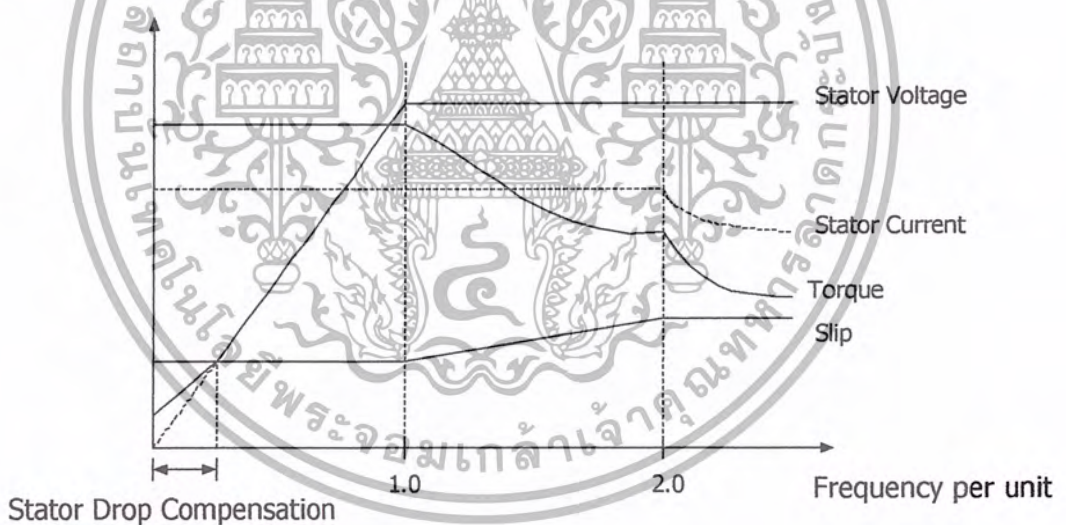
นำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.8 - 2.12 มาเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูป



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลโกลั้เพียงต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.2.4 การควบคุมความเร็วด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage, Variable Frequency : VVVF)

เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีและเหมาะที่สุดสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิดและกระแสเตเตอร์กับความถี่

ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติสลลิปต่ำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วของมอเตอร์ จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิง โครนัสของสนามแม่เหล็กในแอร์แกปที่อยู่ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งการที่จะเปลี่ยนความเร็วเชิง โครนัสสามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์อย่างเดียวจะทำให้สนามแม่เหล็กในแอร์แกปของมอเตอร์ลดลงด้วย สังเกตได้จากสมการที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

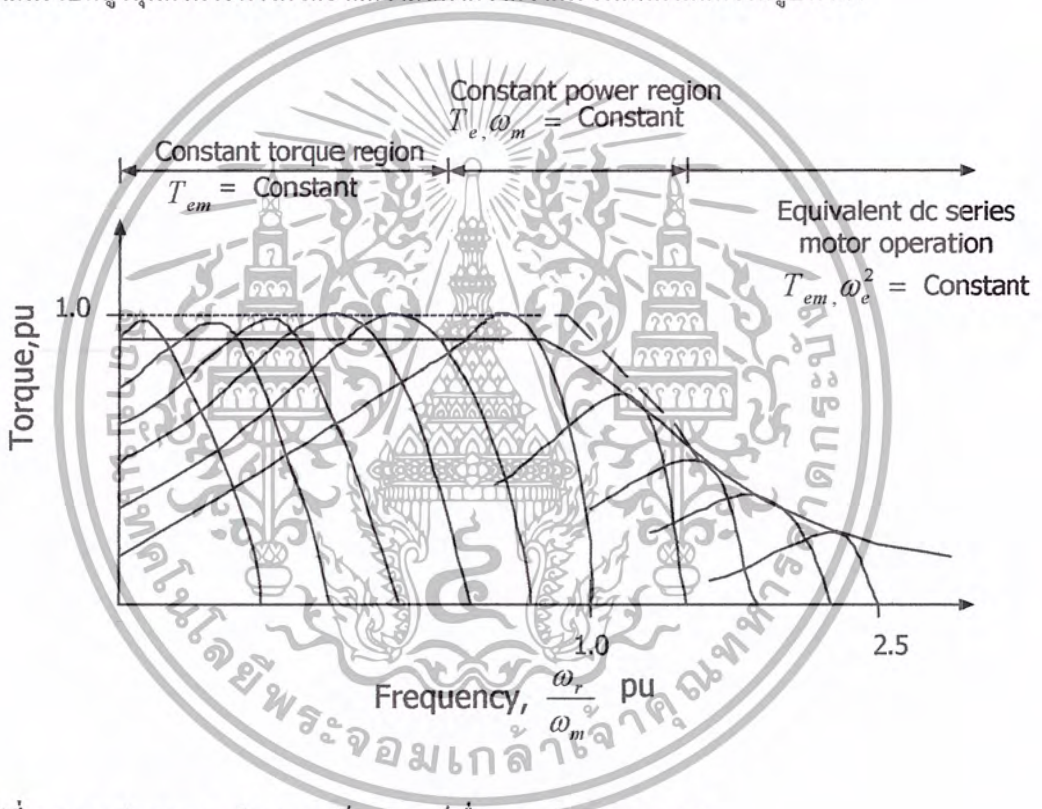
$$E = 4.44 N f \phi$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \tag{2.13}$$

จะได้

$$T_m \propto \left(\frac{E}{f}\right)^2 \propto \phi^2 \tag{2.14}$$

เมื่อแอมเพอร์ฟลักซ์ลดลงจะทำให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ลดลง แต่ในการที่จะรักษาขนาดแม่เหล็กในแอมเพอร์และแรงบิดสูงสุดให้คงที่ จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ด้วย เพื่อรักษาความถี่ของ $\frac{E}{f}$ ให้คงที่เพื่อให้แรงบิดสูงสุดคงที่นั่นเอง แต่การควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแรงบิดสูงสุดคงที่จะทำได้ในย่านความถี่ต่ำกว่าความเร็วพิกัดดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงแรงบิด-ความเร็วมอเตอร์เมื่อควบคุมแบบ VVVF

ในย่านความถี่ต่ำ การรักษาให้ $\frac{E}{f}$ คงที่จะไม่เพียงพอที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะความถี่ต่ำ ๆ ค่าความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นทำให้แรงดันตกคร่อมสูง เป็นผลให้มีการสูญเสีย ดังนั้นจะต้องเพิ่มแรงดันที่จะต้องจ่ายให้กับสเตเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่เป็นไปตามเส้นทึบของกราฟรูปที่ 2.3 แทนการ

เปลี่ยนแปลงตามเส้นประ ซึ่งเป็นกราฟ $\frac{E}{f}$ คงที่

ส่วนในย่านความถี่สูงกว่าความถี่พิกัด จะไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่พิกัดได้เพราะจะเกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องคงที่แรงดันไว้ที่พิกัด เป็นเหตุให้แรงบิดสูงสุดลดลงเนื่องจากการลดลงของสนามแม่เหล็กในแอร์แกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังออกสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ด้วยการลดความเข้มของสนามแม่เหล็กเรียกว่าเป็นการทำงานในย่านกำลังคงที่ (Constant Power Region) หรือ (Field Weakening Region) เนื่องจากการควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้จะเป็นการแปรเปลี่ยนทั้งความถี่และแรงดัน ทำให้สามารถเร่งความเร็วจากศูนย์ไปสู่ความเร็วที่ต้องการ โดยมีทอร์คสูงสุดคงที่ได้

แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบนี้ไม่ได้เป็นรูปไซน์ ดังนั้นมอเตอร์จะได้รับแรงดันฮาร์โมนิกส์ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในแอร์แกนด้วยความเร็วที่สูงกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency) มาก แต่แรงดันฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์มากขึ้น

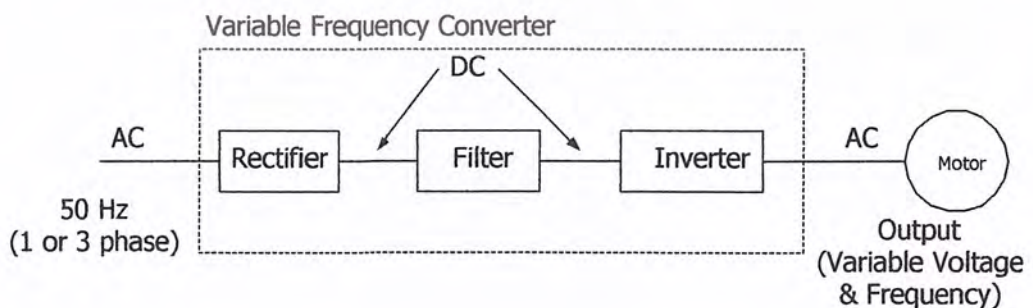
2.3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ[2]

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ซึ่งจะต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ $\left(\frac{V}{f}\right)$ ให้คงที่ตลอด

ช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ

3. สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดคงที่ที่ต้องการ



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.5 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟเข้า เอชซี จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดัน ดีซี โดยการ
ใช้เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้ (Controlled or Uncontrolled Rectifier)
และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟ ดีซี ให้เป็น เอชซี ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันและความถี่ได้ โดย
ทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกออกตามชนิดของอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

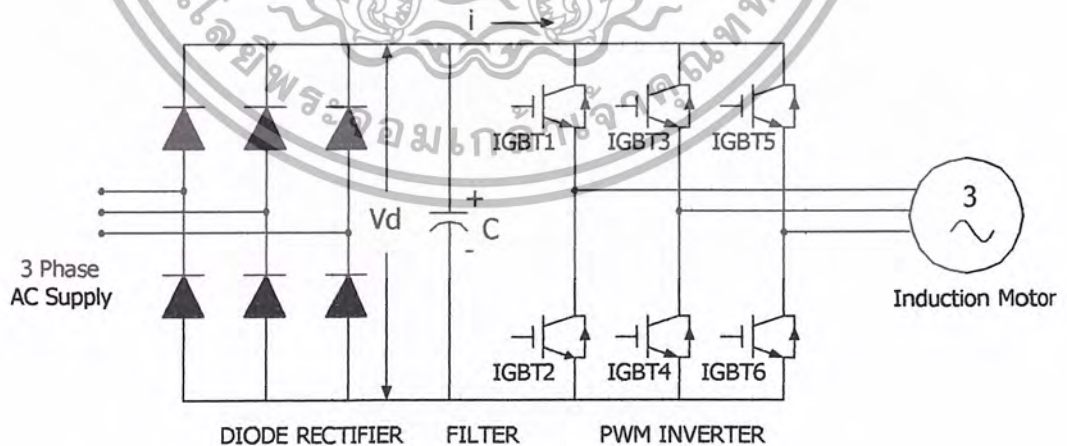
1. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter : CSI)
2. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter : VSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน
ที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะอินเวอร์เตอร์
แบบจ่ายแรงดัน แบบพีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น

2.3.1 พีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของแรงดันดีซีลิงค์มีขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุทของอิน
เวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และโดยทั่วไปแบ่งออก
เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6 สแต็ปอินเวอร์เตอร์ และ พีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบ
จ่ายแรงดันคือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย ปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง ส่วนข้อเสีย มักมี
ปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิตชิงในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้วงจรลัด
เอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

โครงสร้างของพีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ ในส่วนของแรงดันดีซีลิงค์โดยทั่วไปจะใช้เรกติไฟ
เออร์ที่เป็นไดโอด (ทั้ง 1 เฟสและ 3 เฟสดังรูปที่ 2.6 และ 2.7) ทำให้แรงดันของดีซีลิงค์มีค่าคงที่ ซึ่งไม่
สามารถควบคุมแรงดันดีซีได้

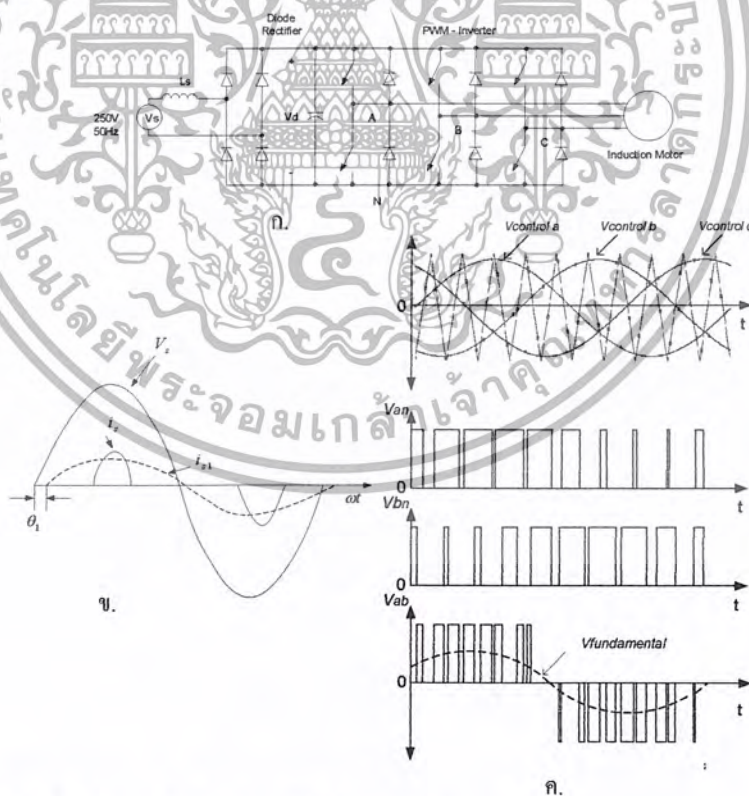


รูปที่ 2.6 วงจรกำลังของพีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 2.7 ก. เป็นการแสดงลักษณะทางโครงสร้างของพีคเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่าย
แรงดันโดยรับแรงดันไฟฟ้อน 1-เฟส จากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าผ่านไดโอดเรกติไฟเออร์ซึ่งเป็นวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแรงดัน ซีซี. ป้อนให้กับพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์และในส่วนของพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนี้ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทั้งความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หลักการหนึ่งที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ ก็คือจะใช้การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส (Vcontrol) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแมกนิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วย โดยจะนำสัญญาณควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle waveform) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิตซ์ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7ก จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบไปควบคุมลำดับของการสวิตซ์อีกที เมื่อพิจารณาแรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7ก รูปล่างสุดนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะประกอบด้วยแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงจำนวนมาก ดังนั้นค่ากระแสกระเพื่อมของมอเตอร์ จึงมีค่าต่ำเนื่องจากมอเตอร์จะมีลิกเกจรีแอกแตนซ์อยู่ และกำลังงานสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในลวดทองแดงเนื่องจากแรงดันที่ไม่เป็นไซน์ในมอเตอร์ จึงต่ำลงไปด้วยเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับต่ำไม่ปรากฏแต่เนื่องจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ ที่ความถี่สูงๆถ้ามีค่านีการมีอคลเลขต่ำๆแล้ว จะมีแอมพลิจูดที่สูงมาก เมื่อเทียบกับฟิวดาเมนทอล ดังรูปที่ 2.7ก และ ข ดังนั้นการสูญเสียในแกนเหล็ก (Eddy Current และ Hysteresis ทั้งใน Stator และ Rotor) จะเพิ่มขึ้นมากซึ่งการสูญเสียในแกนเหล็กนี้ทำให้มอเตอร์บางตัวอาจมีการสูญเสียโดยรวม สูงกว่า การสวิตซ์แบบ Six-step อีกก็เป็นได้โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคลาสของมอเตอร์ วัสดุสารแม่เหล็กที่ใช้ทำมอเตอร์ และ ความถี่การสวิตซ์



รูปที่ 2.7 พีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

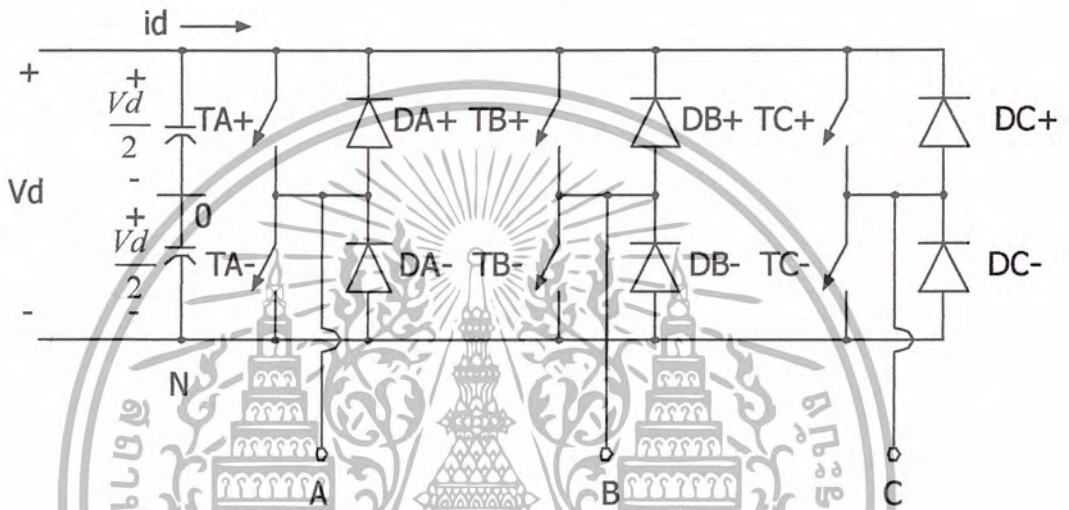
ในการประยุกต์ใช้งาน เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน (UPS.) และการขับเคลื่อนมอเตอร์

เหนี่ยวนำ ส่วนใหญ่มักจะใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งสามารถเป็นไปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสจะมาจากการนำเอาอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว 3 ตัว โดยที่อินเวอร์เตอร์แต่ละตัวสามารถกำเนิดแรงดันโดยมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า โดยที่การนำเอาอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมาต่อเป็นสามเฟสนั้นทางด้านเอาต์พุตนั้นต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแยกระหว่างอินเวอร์เตอร์กับภาระทางไฟฟ้า ซึ่งในทางปฏิบัติงานจริงๆแล้วจะไม่นิยมใช้วิธีนี้นัก ข้อเสียอีกประการหนึ่งก็คือต้องใช้อุปกรณ์การสวิตช์ถึง 12 ตัว

การใช้งานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยวงจรสวิตช์ 3 กิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8

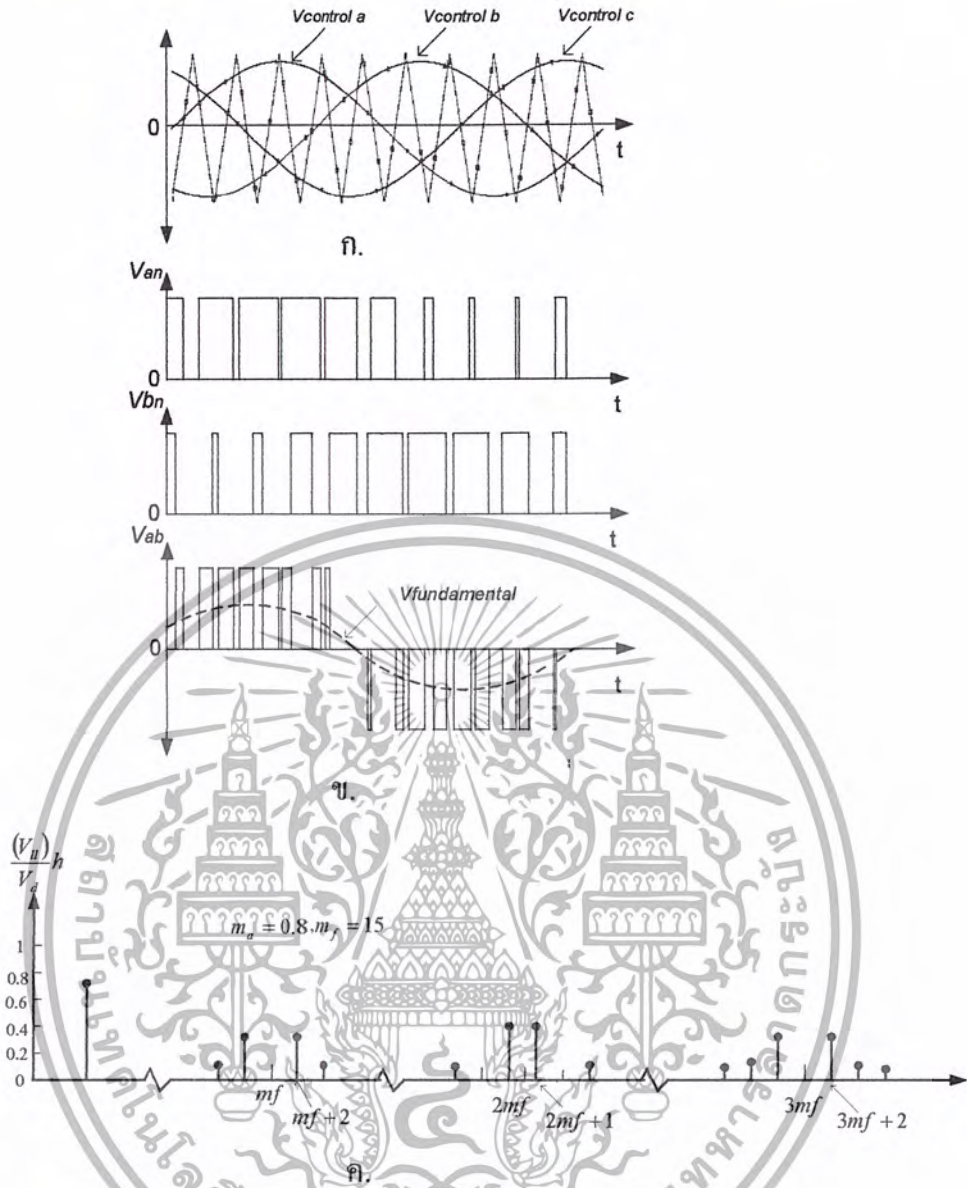


รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตในแต่ละกิ่งวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันคิตซี V_d และสถานะของการสวิตช์แต่ละตัวเท่านั้น และแรงดันเอาต์พุตจะแยกอิสระออกจากกระแสไหลลัดเอาต์พุตตั้งแต่สวิตช์หนึ่งตัวในสองตัวในกิ่งวงจรมันจะทำงานเสมอในทุกๆช่วงเวลา ซึ่งถ้าไม่นำผลของช่วงเวลาเนื่องการสวิตช์มาพิจารณาแล้ว จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไหลลัด

2.3.1.1 ความสัมพันธ์ของพีคดับเบิลยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

จุดมุ่งหมายของการใช้พีคดับเบิลยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส คือการควบคุมแรงดันเอาต์พุตและความถี่ด้วยการคงที่แรงดันคิตซี อินพุตการกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มจะใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเดียวกันและเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมแบบไซน์ซึ่งมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.9 เพื่อต้องการให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนั้นมีความสมดุลย์



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันที่ดับเบิลยูเอ็มและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์

ในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงจำนวนขององค์ประกอบแรงดันดีซีเฉลี่ย และแรงดันเอาต์พุต V_{AN} และ V_{BN} ซึ่งได้จากการวัดเมื่ออ้างอิงกับด้านลบของแรงดันเชื่อม โยงดีซี และจะสังเกตเห็นว่าแรงดันเอาต์พุต V_{AB} จะไม่มีองค์ประกอบของแรงดันดีซี เนื่องจากถูกหักลบกันหมดไป (ถ้าแรงดัน V_{AN} และ V_{BN} นั้นสมดุล) เนื่องจากแรงดัน V_{AB} นั้นเกิดจากแรงดัน $V_{AN} - V_{BN}$ ซึ่งจะเห็นว่าหลักการนี้เหมือนกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนั้น ฮาร์มอนิกส์ในแรงดันไลน์นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา และแรงดันฮาร์มอนิกส์เอาต์พุตในแต่ละกึ่งเช่น V_{AN} ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะแสดงให้เห็นถึงฮาร์มอนิกส์ V_{AO} ซึ่งถ้ากำหนดอัตราส่วนของความถี่มอดูเลตเป็นจำนวนคี่แล้วจะเห็นว่าเฉพาะฮาร์มอนิกส์ที่เท่ากันที่จะเกิดขึ้นในฮาร์มอนิกส์ไลน์แบนด์โดยที่ศูนย์กลางของฮาร์มอนิกส์จะอยู่ที่จำนวนอัตราส่วนของความถี่มอดูเลต (m_f) และจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของ m_f และเมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์ที่ m_f ในแรงดัน V_{AN}

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ V_{BN} คือ 120° เท่าของ m_f ($120^\circ m_f$) ซึ่งความต่างเฟสนี้จะมีค่าสมมูลเป็นศูนย์ (เป็นจำนวนเท่าของ 360°) ถ้า m_f เป็นจำนวนคี่และเป็น 3 เท่า ซึ่งสิ่งที่สอดคล้องกันก็คือฮาร์มอนิกที่ m_f จะปรากฏที่แรงดันไลน์เอ๊าท์พุท V_{AB} ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้การใช้งานที่ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์จึงเลือกอัตราส่วนความถี่มอดูเลตเป็นจำนวนคี่ 3 เท่า ($3m_f$) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกคู่ด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกที่เป็นนัยสำคัญของกิ่งวงจรอินเวอร์เตอร์ได้จากแรงดันไลน์เอ๊าท์พุทของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ข้อพิจารณาของพีดับเบิลยูเอ็ม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กรณีที่ค่า m_f ค่าๆ ค่า m_f ควรจะเป็นจำนวนคี่และเป็นพีดับเบิลยูเอ็มชนิดซิงโครนัสพีดับเบิลยูเอ็ม เพื่อที่จะกำจัดฮาร์มอนิกคู่ที่จะเกิดขึ้น และมากไปกว่านั้นค่า m_f ควรเป็นค่าจำนวนเท่าของ 3 เพื่อที่จะกำจัดค่าของฮาร์มอนิกที่เป็นนัยสำคัญในแรงดันไลน์
2. กรณีที่ค่า m_f มากๆ ค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกคู่ย่อยที่เกิดจากอะซิงโครนัสพีดับเบิลยูเอ็ม จะมีขนาดค่าเมื่อค่าของ m_f สูงๆ สามารถใช้อะซิงโครนัสพีดับเบิลยูเอ็ม ในขณะที่ความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมคงที่ และความถี่ของแรงดันควบคุมเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลของค่าของ m_f ใดๆก็ตาม ถ้าอินเวอร์เตอร์ถูกจ่ายให้กับโหลด เช่น มอเตอร์ ผลของฮาร์มอนิกคู่ย่อย จะเกิดขึ้นกับกระแสของมอเตอร์ ดังนั้นในกรณีของอะซิงโครนัสพีดับเบิลยูเอ็ม ก็ควรจะหลีกเลี่ยงการใช้งานเมื่อความถี่ของรูปคลื่นนั้นมีค่าต่ำ
3. กรณีโอเวอร์มอดูเลต ($m_a > 1.0$) จะไม่มีผลกับค่าของ m_f มากนัก แต่ถ้าในสถานะที่สำคัญๆ ค่าของ m_f ที่มีค่าน้อยก็ควรพิจารณา

2.3.1.2 การทำงานของพีดับเบิลยูเอ็ม ในย่านดัชนีการมอดูเลตเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$)

ในย่านการมอดูเลตที่เป็นเชิงเส้น $m_a \leq 1.0$ องค์ประกอบของความถี่พินคาเมนทอลในแรงดันเอ๊าท์พุทจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับอัตราส่วนการมอดูเลต จากรูปที่ 2.14x ค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่พินคาเมนทอลในกิ่งหนึ่งของแรงดันพินคาเมนทอลคือ

$$\hat{V}_{AN1} = m_a \frac{V_d}{2} \quad (2.15)$$

ดังนั้นแรงดันไลน์ที่ความถี่พินคาเมนทอล ซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศา สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\begin{aligned} V_{LL1} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \hat{V}_{AN1} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \\ &\approx 0.612 m_a V_d \quad (m_a \leq 1.0) \end{aligned} \quad (2.16)$$

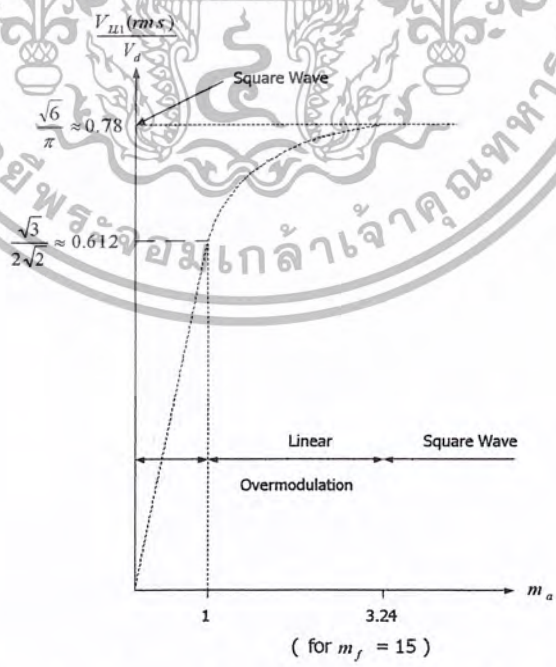
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ของแรงดันโวลต์ในลำดับต่างๆสามารถคำนวณได้[3] ซึ่งฮาร์โมนิกส์ บางตัวจะถูกกำจัดออกไปจากแรงดันโวลต์ ซึ่งแรงดันฮาร์โมนิกส์อาร์เอ็มเอสก็สามารถคำนวณได้เช่นกัน

2.3.1.3 การทำงานของพีคดับเบิลยูเอ็ม ในย่านดัชนีการมอดูเลเทเกิน ($m_a > 1.0$)

ในการทำงานของ พีคดับเบิลยูเอ็ม ในช่วงโอเวอร์มอดูเลเทคือช่วงค่าสูงสุดของแรงดันควบคุม ที่ยอมให้เกินค่าสูงสุดของรูปคลื่นสามเหลี่ยมซึ่งจะไม่เหมือนกับในช่วงค่าดัชนีการมอดูเลเทเชิงเส้น ในย่านนี้โหมดการทำงานของแรงดันพินคาเมนทอลจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่าดัชนีการมอดูเลเท ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.10 โดยที่ค่าแรงดันโวลต์อาร์เอ็มเอสของความถี่พินคาเมนทอล (V_{LL1}) ถูกพล็อตเพื่อแสดงความสัมพันธ์กับฟังก์ชันของค่าดัชนีการมอดูเลเท ซึ่งจะคล้ายกับพีคดับเบิลยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว และถ้าค่าดัชนีการมอดูเลเทสูงมากๆแล้วแรงดันพีคดับเบิลยูเอ็มเอาท์พุทจะเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม (square wave) ซึ่งผลดังกล่าวคือค่าแรงดันโวลต์สูงสุดของ V_{LL1} จะเท่ากับ $0.78V_d$ ซึ่งจะพิจารณาในหัวข้อถัดไป

ในย่านการทำงานนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการทำงานในย่านที่เป็นเชิงเส้นจะพบว่าฮาร์โมนิกส์ด้านข้าง (Harmonic side band) ที่ปรากฏตรงกึ่งกลางของความถี่มอดูเลเทและแต่ละเท่าของ m_f จะมีค่ามากกว่า อย่างไรก็ตามฮาร์โมนิกส์ที่เป็นนัยสำคัญจะไม่เกิดขึ้นมากนัก ดังนั้นถ้าต้องการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกส์ด้านข้างจะไม่มากนัก แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดและความถี่สวิตซ์ที่เลือกใช้ซึ่งบางครั้งการสูญเสียฮาร์โมนิกส์ในย่าน โอเวอร์มอดูเลเทจะมีค่าต่ำกว่าการสูญเสียฮาร์โมนิกส์ในย่านมอดูเลเทเชิงเส้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างแรงดันโวลต์กับแรงดันเชื่อม โยจติซีของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ในฟังก์ชันของอัตราส่วนการมอดูเลเท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.4 การทำงานในย่านรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม (square wave)

ถ้าแรงดันเชื่อม โยงคี่ซีของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมได้ อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.11ก สามารถทำงานในย่านกึ่งสี่เหลี่ยมหรือในย่านคี่ซีการมอดูเลตสูงมากๆ ($m_a \gg 1$) ซึ่งรูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มจะกลายเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมซึ่งรูปคลื่นแรงดันแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11ข ซึ่งในที่นี้จังหวะการสวิตช์ของอุปกรณ์การสวิตช์แต่ละตัวคือ 180 องศา (อัตราส่วนการนำกระแส 50 %) ดังนั้นในทุกช่วงเวลาจะมีสวิตช์ทำงานสามตัว

การทำงานในโหมดกึ่งสี่เหลี่ยม อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตได้ ดังนั้นแรงดันเชื่อม โยงคี่ซีอินพุตต้องสามารถควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ ดังนั้นความถี่พินคาเมนทอลของแรงดันไลน์เอาต์พุตสามารถเขียนความสัมพันธ์สำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในหนึ่งกึ่งซึ่งทำงานในโหมดกึ่งสี่เหลี่ยม ได้เป็น

$$V_{LL(mus)} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \quad (2.17)$$

$$= \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d$$

$$\approx 0.78 V_d$$

แรงดันไลน์เอาต์พุตจะไม่ขึ้นอยู่กับโหลดและประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ $(6n \pm 1 : n = 1, 2, \dots)$ ซึ่งแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกส์ลำดับนั้นๆจะลดลงเป็นสัดส่วนกลับของลำดับฮาร์มอนิกส์ของตัวเอง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_{LLh} = \frac{0.78}{h} V_d \quad (2.18)$$

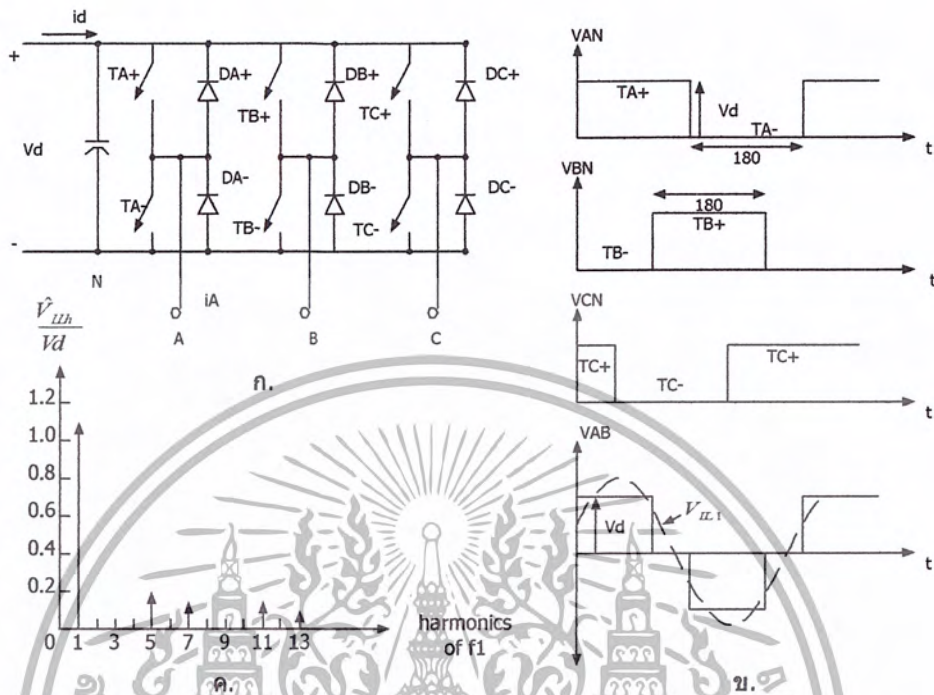
$$\text{เมื่อ } h = 6n \pm 1 (n = 1, 2, 3)$$

จากสมการ 2.16 - 2.18 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไลน์เอาต์พุตพินคาเมนทอลกับค่าคี่ซีการมอดูเลตและแรงดันเชื่อม โยงคี่ซี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีของการทำงานในย่านการมอดูเลตเชิงเส้นแรงดันไลน์เอาต์พุตสามารถควบคุมได้ จากการปรับเปลี่ยนค่าคี่ซีการมอดูเลตและค่าแรงดันเชื่อม โยงคี่ซีซึ่งในแต่ละวิธีจะมีผลต่อการเกิดการสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป จากข้อพิจารณาข้างต้นสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญของรูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มที่มีผลต่อการสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ดังนี้

1. ค่าคี่ซีการมอดูเลต
2. เทคนิคการกำเนิดรูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็ม
3. ความถี่สวิตช์หรือค่าอัตราส่วนความถี่สวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่พารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้จะทำการพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบกึ่งตัวนำ

2.4 สรุป

ในบทนี้เนื้อจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ใช้ในการศึกษาเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าרבกวน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะกล่าวให้เห็นภาพรวมของทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อพื้นฐานที่จะนำไปสู่การทดลอง ตรวจสอบและวิเคราะห์ในบทต่อไป

สัญญาณรรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 บทนำ

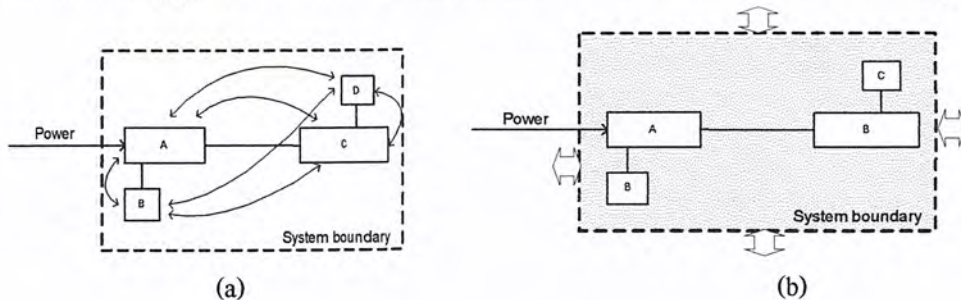
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility : EMC) และอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรรบกวนทั้งที่มาตามสายตัวนำและแพร่กระจายทางอากาศ ซึ่งจะทำการอธิบายสาเหตุและที่มาของปัญหาของสัญญาณรรบกวนที่เกิดขึ้นและกล่าวถึงมาตรฐานในการวัดสัญญาณรรบกวนโดยสังเขป โดยอ้างอิงมาตรฐาน CISPR เป็นหลัก

3.2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวข้อที่ว่าด้วยเรื่องการเกิดการรบกวนกัน (Interference) หรือความทนทานต่อสัญญาณรรบกวน (Immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรรบกวน (Susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือ “ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบที่สามารถทำงานอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและต้องไม่เป็นตัวสร้างสัญญาณรรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่สภาพแวดล้อม” [1] ซึ่งสัญญาณรรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งมาจากตัวระบบเดียวกันเองและจากระบบภายนอก ดังนั้นความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (Intra-system EMC) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (Inter-system EMC) ซึ่งนิยามของทั้งสองประเภทเป็นดังนี้ [4]

1) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันและไม่สร้างสัญญาณรรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบเดียวกันทนไม่ได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 (a)

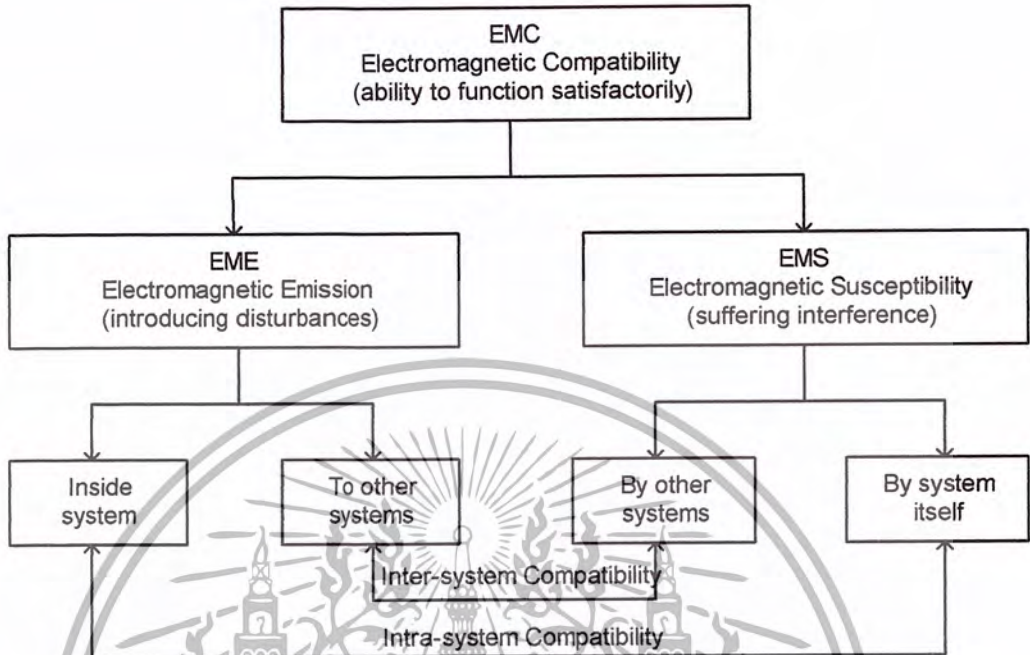
2) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างโดยระบบภายนอกและไม่สร้างสัญญาณรรบกวนในระดับที่ระบบอื่นภายนอกไม่สามารถทำงานได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 (b)



รูปที่ 3.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (a) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ (b) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ของนิยามต่าง ๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงดังรูปที่ 3.2 [5]



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

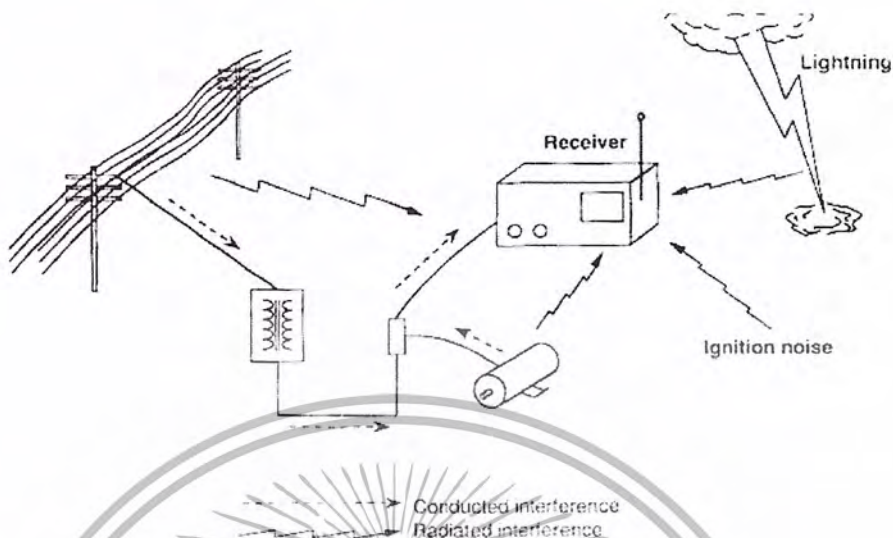
3.3 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.3.1 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (Noise) คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใด ๆ ทำงานอยู่หรือปนเข้ามา กับสัญญาณที่พึงประสงค์ ซึ่งบ่อยครั้งสัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดการผิดพลาดถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไป อุปกรณ์หรือระบบจะรับได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนมีหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้เกิดได้จากที่สร้าง โดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์หรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” หมายถึงสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์หรือเครื่องมือใดๆ ก็ตามที่สร้างออกมารบกวนอุปกรณ์ข้างเคียงหรือรบกวนตัวมันเองในขณะที่ทำงาน เป็นผลให้เกิดความผิดปกติในการทำงานหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ การรบกวนนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน[6] ได้แก่แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Electromagnetic Interference Source) ส่วนที่ได้รับผลการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Receptor) และการเชื่อมต่อระหว่างสองส่วนแรก (Coupling) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้สองลักษณะ คือ โดยผ่านทางตัวนำ เช่น สายกำลัง หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายสัญญาณหรือที่เรียกว่า Conduction และการเชื่อมต่อ โดยผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะแผ่กระจายผ่านตัวกลางทางอากาศเรียกการเชื่อมต่อแบบนี้ว่า Radiation



รูปที่ 3.3 สัญญาณรบกวนที่สร้างโดยธรรมชาติและมนุษย์

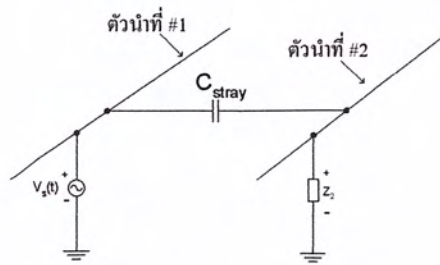
3.3.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ (Conducted interference) จะเกิดกับอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ต่ำถึงปานกลางการรบกวนเกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ในย่านตั้งแต่ 150kHz ถึง 30MHz ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำคือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเกิดสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม (Common-mode: CM) และ โหมดแตกต่าง (Differential - mode: DM) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป และการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานของการเกิดสัญญาณรบกวนไปสู่ตัวที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งการส่งผ่าน (Coupling) และการกระจาย (Propagation) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive coupling) และการส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) [7]

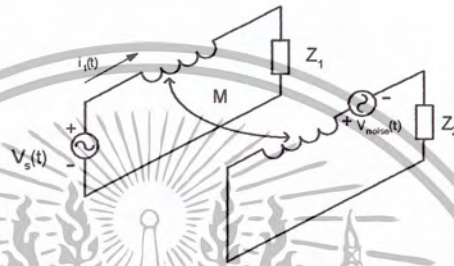
- การส่งผ่านด้วยตัวเก็บประจุเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวน โดยกระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุแฉง (Stray capacitance) ไปยังตัวนำอีกตัวหนึ่งที่อยู่ติดกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 และถ้ากระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุกราวด์จะเป็นการสร้างสัญญาณรบกวนชนิดโหมดร่วม

- การส่งผ่านด้วยการเหนี่ยวนำเป็นการส่งผ่านพลังงานของสัญญาณรบกวน โดยวิธีทางแม่เหล็ก โดยในสายตัวนำจะค่าการเหนี่ยวนำเสมือน (Mutual inductance : M) อยู่ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลผ่านก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้ก็ไปเหนี่ยวนำกับค่าการเหนี่ยวนำของอีกตัวนำหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



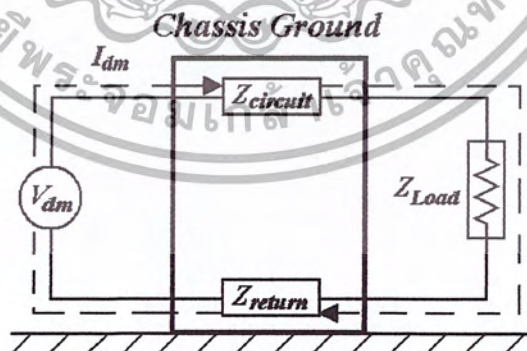
รูปที่ 3.4 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.5 การส่งผ่านสัญญาณรบกวนผ่านตัวเหนี่ยวนำ

3.3.2.1 โหมดผลต่าง

โหมดผลต่าง คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าเฉพาะใน line และ neutral เท่านั้น ให้ถือว่าวงจรนี้ไม่มีส่วนใดต่อสองกราวด์ ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะเป็นดังรูปที่ 3.6



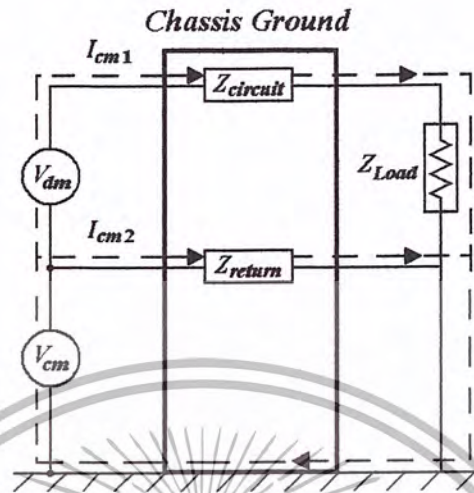
รูปที่ 3.6 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนใน โหมดผลต่าง

3.3.2.2 โหมดร่วม

โหมดร่วม คือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า กับกราวด์ของระบบทั้งในส่วนของ line และ neutral โดยจะถือว่าทั้ง line และ neutral ของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไหลลงกราวด์ของระบบดังรูปที่ 3.7 โดยผ่านทางตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) ที่อยู่ระหว่างตัวนำกับกราวด์ของวงจร



รูปที่ 3.7 ทิศทางการส่งผ่านสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม

3.3.3 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

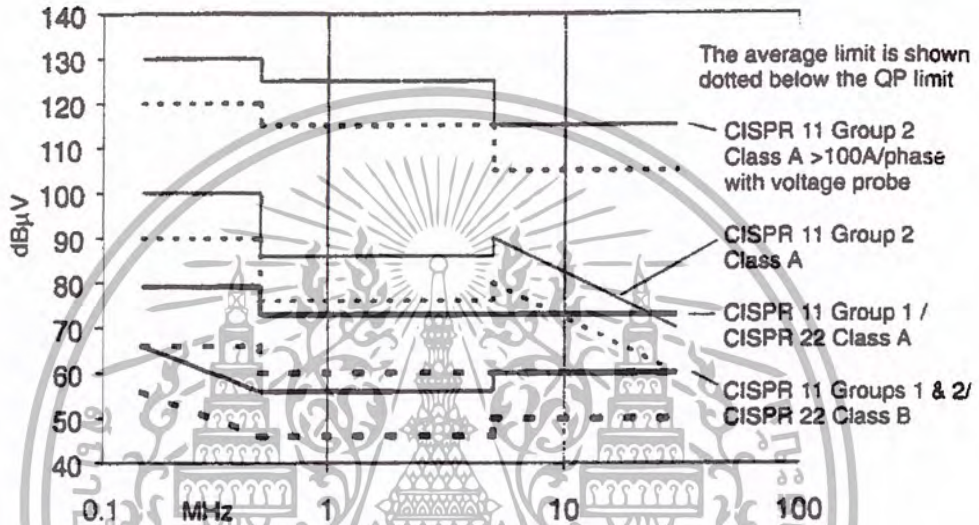
การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกต้อนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้หลายอย่างและเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำในโหมดร่วม ซึ่งได้แปลและเรียบเรียงมาจากมาตรฐาน CISPR 11 [8] และ CISPR 22 [9] (COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES: CISPR) โดยมีเงื่อนไขของอุปกรณ์ดังนี้

3.3.3.1 AMN/LISN

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้ง่าย โดยการต่อไว้ที่ทางด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test : EUT) ซึ่งสาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายไฟเพราะที่ด้านออกของแหล่งจ่ายไฟเป็นเส้นทางหลักของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์จะไปรบกวนวงจรอื่นทางตัวนำ และเพราะว่าสายที่ต่อจากแหล่งจ่ายจะทำตัวคล้ายกับเป็นสายอากาศแผ่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลองจาก EN 55022 (CISPR 22) ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 3 เมื่อปี 1997 [9] ได้นำเสนอการทดลองการรบกวนทางตัวนำที่พอร์ตโทรคมนาคม (Telecommunication ports) แต่ที่กล่าวไว้ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อีกมาก ในรูปที่ 3.8 คือ ระดับเส้นเปรียบเทียบหรือกลุ่มเส้นจำกัด (limit) ที่ความถี่ต่าง ๆ ของ CISPR เกือบทุกมาตรฐาน โดยที่ Class A (เส้นทึบ) ใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในเชิงการค้า และอุตสาหกรรม และ Class B (เส้นประ) ใช้สำหรับอุปกรณ์สำนักงาน ที่พักอาศัย ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการค้า และอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

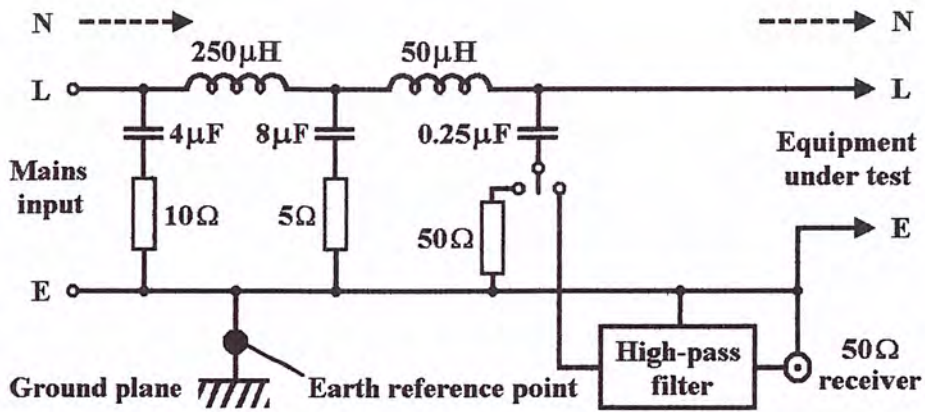
เส้นจำกัดเหล่านี้ได้สมมุติความต้านทานที่ความถี่วิทยุเพื่อเตรียมสำหรับการทดลอง ซึ่งโดยทั่วไปความต้านทานหลักสามารถปรับค่าได้กว้างแค่ไหนขึ้นอยู่กับสิ่งที่แวลลุ่มที่จะทำการวัด เมื่อทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานและถ้า EUT มีความต้านทานต่ออยู่กับแหล่งจ่าย โดยไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าไรแต่อาจจะมีค่าค่อนข้างสูง ในการทดลองให้ทำการวัดค่าหลายๆ ครั้ง จากหลายๆ ห้องทดลองที่มีค่าเท่ากันความต้านทานหลักที่ต่อเข้าไปจะต้องมีความเสถียรภาพ นั่นเป็นที่มาของ Artificial Main Network หรือ AMN ตามมาตรฐาน CISPR หรือ Line Impedance Stabilization Network หรือ LISN ตามมาตรฐานอเมริกา และรวมไปถึงโครงข่ายชนิดอื่นๆ ด้วย



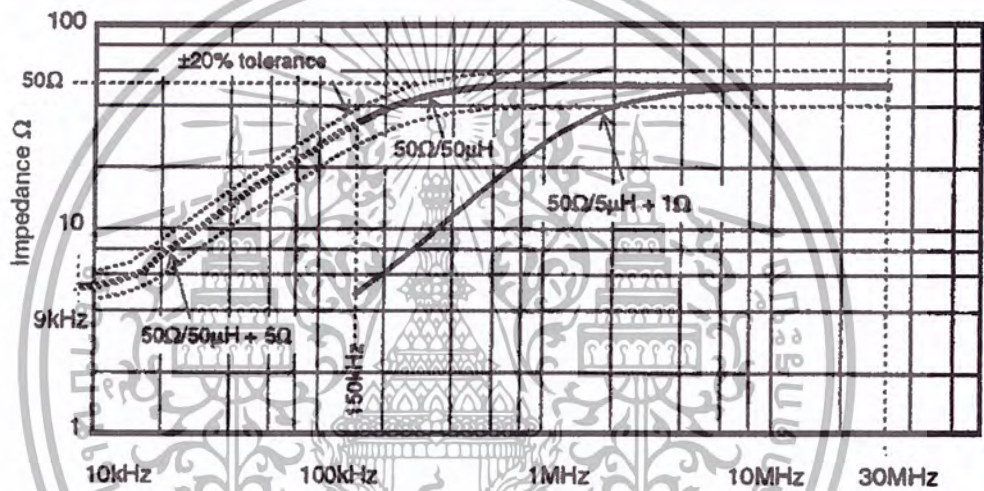
รูปที่ 3.8 เส้นจำกัดของการรบกวนทางตัวนำตามมาตรฐาน CISPR

ข้อบังคับเกี่ยวกับ AMN/LISN จะอยู่ใน CISPR 16-1 [10] ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป แต่ที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบคือ $50 \Omega / 50 \mu\text{H} \pm 5 \Omega$ AMN/LISN จากข้อบังคับต้องการหมายถึงความต้านทานระหว่างสายแต่ละเส้นกับจุดดิน (earth) จะมีค่าเป็น 50Ω ขนานกับ $50 \mu\text{H}$ ที่ความถี่ 150 kHz ถึง 30 MHz แต่ถ้าต้องการทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz จะใช้ตัวต้านทาน 5Ω ต่ออนุกรมกับ $50 \mu\text{H}$ แทน รูปที่ 3.9 เป็นวงจรพื้นฐานของโครงข่ายดังกล่าว และรูปที่ 3.10 เป็นการตอบสนองต่อความถี่ตามมาตรฐาน CISPR 16-1 โครงข่ายที่ใช้ในแต่ละสายจะต้องมีค่าที่เท่ากันทั้ง 2 สาย ในกรณี 1 เฟส และ 3 หรือ 4 สายในกรณี 3 เฟส วงจรกรองแบบความถี่สูงผ่านอาจจะไม่ต้องมีก็ได้ แต่ในเชิงพาณิชย์จะต่อไว้กับ AMN/LISN เพื่อช่วยลดความถี่ต่ำ (50 Hz และฮาร์มอนิกส์) ที่ไหลผ่านเครื่องมือวัด และป้องกันผลที่เกิดจากกระแสเกิน

AMN/LISN จะต้องนำสัญญาณที่จะวัดทั้งสองสายมาต่อเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณที่มีความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss) ต่ำ และสามารถปรับระดับของสัญญาณที่จะวัดได้เพื่อจะระดับให้แยกออกจากแหล่งจ่ายไฟ วิธีการเหล่านี้สามารถทำได้โดยใช้ส่วนต่างๆ ในโครงข่าย



รูปที่ 3.9 วงจร AMN/LISN ตามมาตรฐาน CISPR



รูปที่ 3.10 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของ AMN/LISN

CISPR 16-1 ได้กำหนดโครงข่าย $50 \Omega / 50 \mu\text{H} \pm 5 \Omega$ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อความถี่ดังรูปที่ 3.10 สามารถใช้ได้กับกระแสสูงสุด 500 A อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถใช้เป็นวงจรอ้างอิงให้กับทุกมาตรฐานของ CISPR ได้ เพราะค่อนข้างจะเป็นเชิงพาณิชย์จึงใช้ได้ในช่วงที่ไม่กว้างมาก สิ่งสำคัญในการใช้ AMN/LISN คือต้องต่อจุดเปรียบเทียบเข้ากับแผ่นกราวด์ (ground plane) ซึ่งพบได้ตามมาตรฐานในการวัดทั่วไปจะเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ $12 \mu\text{F}$ ต่ออยู่ระหว่างแต่ละสายกับกราวด์ ถ้าเป็นเหตุการณ์จริงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230 V ความถี่ 50 Hz และมีค่าความจุไฟฟ้านี้ต่ออยู่ด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดกระแสประมาณ 0.9 A ไหลผ่านตัวเก็บประจุลงดิน กระแสนี้จะเป็นอันตรายอย่างมากหากไม่มีกรงป้องกันโดยการต่อสายลงดิน ดังนั้นจะต้องแหล่งจ่ายและระบบสายดินที่เชื่อถือได้เมื่อต้องการใช้ AMN/LISN การทดลองโดยทั่วไปจึงต้องมีข้อบังคับในเรื่องนี้เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ อุปกรณ์ที่ใช้จึงต้องมีฉลากเกี่ยวกับวิธีใช้อย่างปลอดภัยจากผู้ประกอบการเพื่อป้องกันกระแสรั่วที่มีค่าสูง และต้องต่อสายดินทุกครั้ง ถ้าไม่ได้ทำการแยกระบบ (isolate) ของ AMN/LISN ออกจากแหล่งจ่ายไฟและจุดเปรียบเทียบหลัก [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบที่สองของกระแสรั่วจากแหล่งจ่ายไฟของ AMN/LISN ไม่สามารถจะป้องกันโดยใช้ earth leakage หรือ residual current circuit breaker (RCB) ได้ ดังนั้นถ้าต้องการความปลอดภัยที่แน่นอน ควรใช้หม้อแปลงแยกระบบที่จะวัดออกจากแหล่งจ่ายไฟและวิธีนี้จะไม่มีผลต่อความถี่วิทยุที่ต้องการจะวัดด้วย ถึงแม้ว่าจะถูกจำกัดกระแส โดยแหล่งจ่ายซึ่งอาจเป็นปัญหาในของวงจรแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายไฟตรงแบบใหม่ซึ่งเป็นที่นิยม อาจทำให้หม้อแปลงอิ่มตัวด้วยกระแสที่สูงมากในทุกครั้งคาบ วิธีนี้จะทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไป และทำให้การวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนผิดจากความเป็นจริง ทำให้ต้องใช้ใช้พีคโวลต์แอมป์ที่สูงในการทดลอง [4]

3.3.3.2 แผ่นกราวด์

เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด หรือ EUT ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร [8, 9, 11] และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงวัสดุที่ใช้ทำกล่อง ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร

แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบใต้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลอง และต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคงด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้ และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบของอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตร มีขนาดไม่ต่ำกว่า 2 เมตรคูณ 2 เมตร

จุดกราวด์อ้างอิงของ AMN/LISN และ Impedance Stabilization Network (ISN) จะต้องคั่นกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำ โดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ [9]

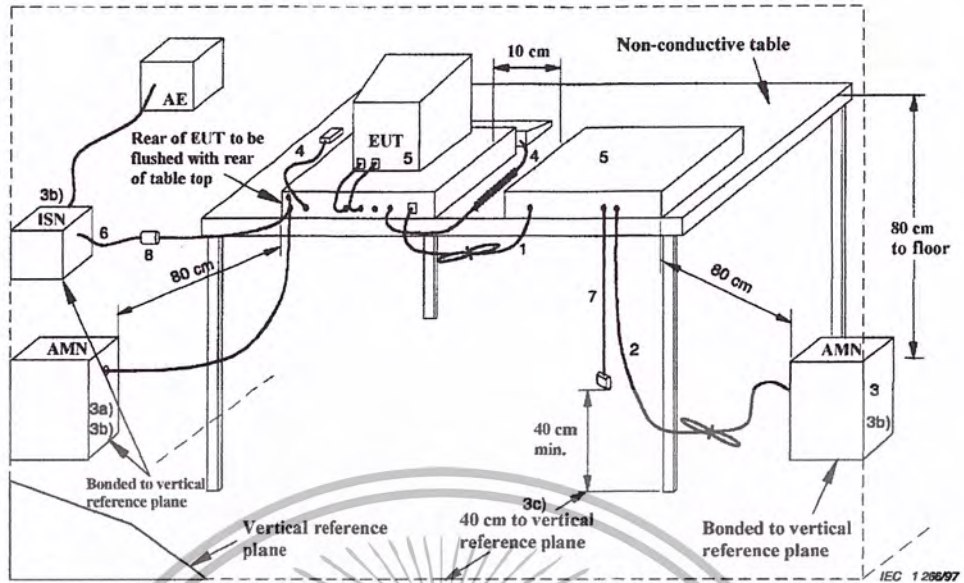
3.3.3.3 เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัด

เครื่องรับสัญญาณที่ได้จากการวัดปกติมักจะใช้ Spectrum analyzer เป็นเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในการวัดแบบ quasi-peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 [10] เครื่องรับสัญญาณแบบ average จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบ peak จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 3 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 dB ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1

3.3.3.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ

รูปที่ 3.11 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้ [9, 12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AMN : Artificial mains network

AE : Associated equipment

EUT : Equipment under test

ISN : Impedance stabilization network

รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ [9]

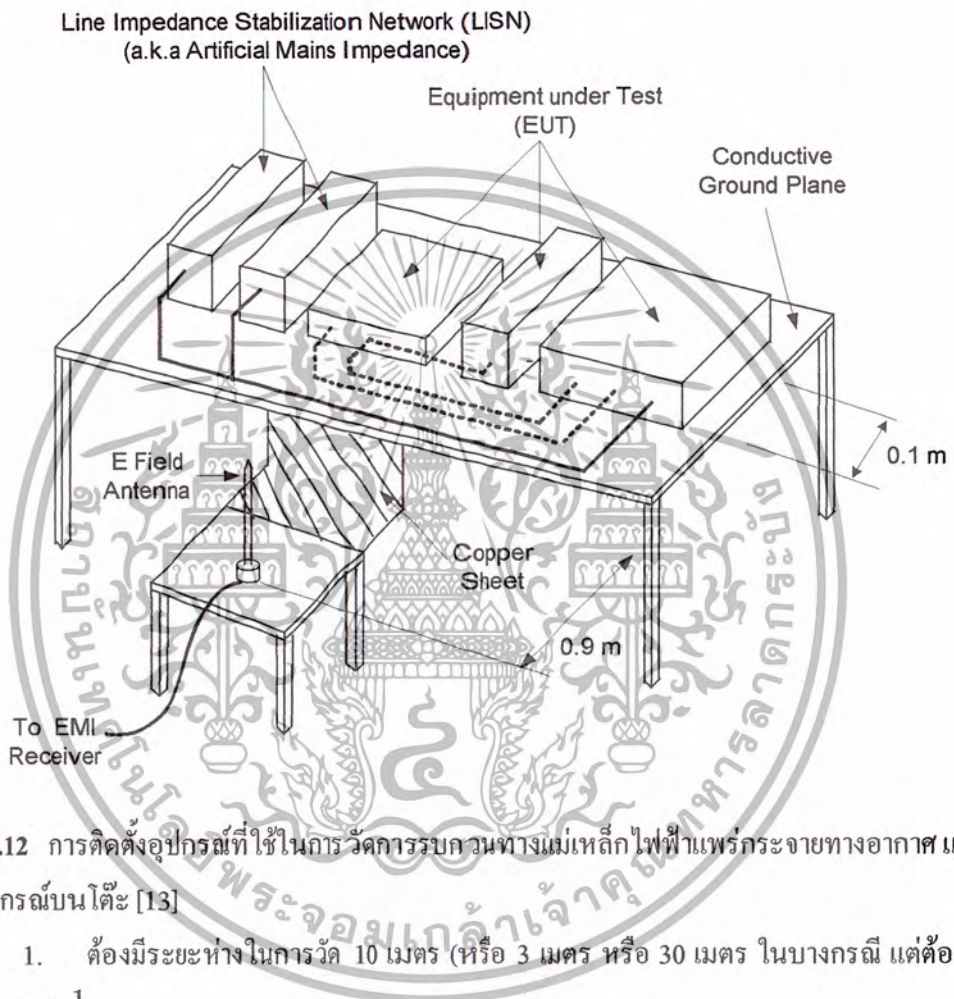
1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เหนือแนวระดับของแผ่นกราวด์และไม่สามารถทำให้สั้นได้ จะต้องมัดทาบปลายสายให้มีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายไฟจากแหล่งจ่ายจะต้องมัดทาบกันให้สายสั้นที่สุด
3. อุปกรณ์ที่ติดตั้งจะวัดต้องค่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ AMN/LISN และ ISN ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ที่อยู่ในแนวระดับ
 - a) แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องค่อมาจาก AMN/LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีปลายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์
 - b) AMN/LISN และ ISN ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด 80 เซนติเมตร และอย่างน้อย 80 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆ และแผ่น โลหะอื่นๆ
 - c) สายไฟหลักและสายสัญญาณควรวางให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่ทำได้และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร
4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น สายคีย์บอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆให้วางเหมือนการใช้งานทั่วไป
5. สิ่งที่อยู่รอบๆ ภายนอกจะต้องอยู่ห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นข้างเคียงและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางอยู่บนตัวควบคุมได้
6. มีสายสัญญาณเข้าออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ current probe ควรวางห่างจาก ISN ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร

3.3.4 การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR

รูปที่ 3.12 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังนี้ [13]



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศ แบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ [13]

1. ต้องมีระยะห่างในการวัด 10 เมตร (หรือ 3 เมตร หรือ 30 เมตร ในบางกรณี แต่ต้องแก้ไขแฟคเตอร์ $\frac{1}{D}$)
2. สถานที่ทดสอบต้องเป็นที่โล่งและจัดห้องให้ไม่มีการสะท้อนของสัญญาณ
3. จัดวางสายเคเบิล อินพุท เอาท์พุท ควรจัดวางให้เหมาะสมกับชนิด
4. สำหรับกรณีหาสนามแม่เหล็กสูงสุด
 - a) ให้สายอากาศหันไปทางแม่เหล็กทั้งแนวตั้งและแนวนอน
 - b) ปรับความสูงของสายอากาศจาก 1 ถึง 4 เมตร เพื่อหาจุดสูงสุดของผลการสะท้อนกลับของกราวด์ (ground)
 - c) หมุน EUT 360° เพื่อหาจุดที่มีการแผ่รังสีที่แย่มากที่สุดของแบบอุปกรณ์ (หรือทำให้สายอากาศเคลื่อนที่รอบๆ EUT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตัวรับสัญญาณต้องให้สอดคล้องกับข้อประกาศข้อ 16 ของ CISPR มี band width (6 dB) ที่ 9 kHz สำหรับใช้งานที่ความถี่ $0.15 < f < 30$ MHz หรือ 120kHz ที่ความถี่ $30 < f < 1000$ MHz

6. ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบควอซี-พีค (quasi-peak detector) ตัวตรวจจับสัญญาณแบบควอซี-พีค ควรกำหนดค่า band width ไว้ต้องมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณระหว่างสัญญาณ Broadband(BB) และสัญญาณ Narrowband(NB) ข้อบังคับในการออกแบบการป้องกันสัญญาณรบกวนทั้ง 2 ชนิด กรณีใช้เกี่ยวกับบ้านพักอาศัย, เกี่ยวกับโรงงานและเกี่ยวกับการค้า ควรใช้มาตรฐานพลเรือนของ CISPR

3.4 วงจรกรองความถี่

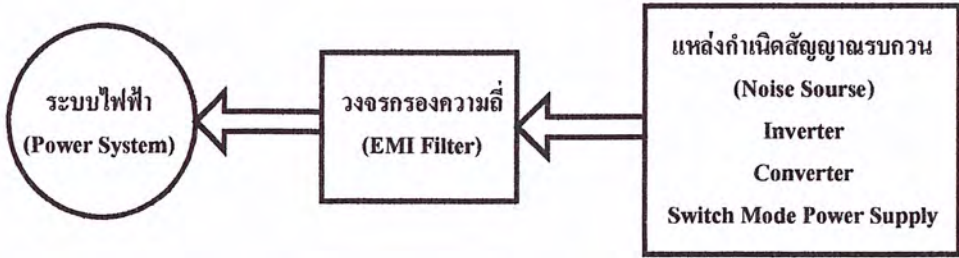
วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งผลจากการรบกวนทางคลื่นสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงเข้าไปรบกวนในระบบ โดยวงจรจะกรองคลื่นความถี่สูงไม่ให้ผ่านไปแต่จะยอมให้คลื่นความถี่ต่ำสามารถผ่านไปได้ ถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำสัญญาณรบกวนความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 150kHz – 30MHz และถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางอากาศสัญญาณรบกวนความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 30MHz – 1GHz ซึ่งเราจะใช้วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่ส่งผ่านทางสายตัวนำ

เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงเข้าไปรบกวนในระบบจึงต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อกรองความถี่สูงไม่ให้เข้าไปรบกวนในระบบและให้ยอมคลื่นความถี่ต่ำที่เราต้องการผ่านไปได้ โดยค่าความถี่ที่วงจรกรองความถี่ต่ำสามารถกรองได้เรียกว่า Cut-Off Frequency วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กจะมีความแตกต่างจากวงจรกรองความถี่ต่ำ อื่นๆ คือ ในวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิก (Harmonic Filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำจะมีค่าของ Cut-Off Frequency ตั้งแต่ 50Hz ขึ้นไป แต่วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก จะทำงานในย่านความถี่ที่สูงคือมีค่าของ Cut-Off Frequency ที่ความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz – 30 MHz ซึ่งสูงกว่าวงจรกรองความถี่ผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิก

กล่าวได้ว่าวงจรกรองความถี่ทั้งสองแบบทำงานในย่านความถี่ที่ต่างกัน โดยวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกจะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานหรือเรียกว่าเป็นลำดับของฮาร์โมนิก และยอมให้คลื่นความถี่พื้นฐานทะลุผ่านไปได้ เช่น ถ้าคลื่นความถี่ พื้นฐานมีค่าเท่ากับ 50 Hz วงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกก็จะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นลำดับของฮาร์โมนิกส์ ต่างๆเช่น ลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 จะมีความถี่เท่ากับ 3 เท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานคือ 150 Hz ลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่ 5 จะมีความถี่เท่ากับ 5 เท่าของคลื่นความถี่พื้นฐานคือ 250 Hz ซึ่งต่างจากวงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะกรองคลื่นความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz ขึ้นไป

วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็ก เช่น Switching Mode Power

Supply, Converter, Inverter ไม่ให้ไปรบกวนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ ดังรูปที่ 3.13



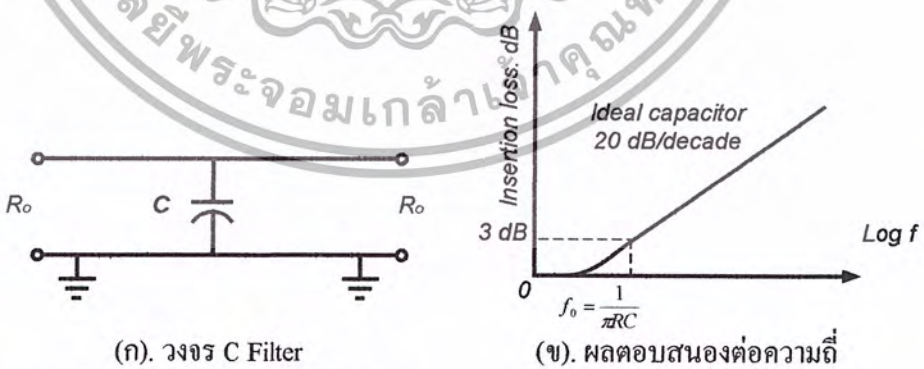
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะทั่วไปในการป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter

3.4.1 วงจรกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

เป็นวงจรกรองที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านที่ง่ายที่สุด ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจูดอนานอยู่ระหว่างตัวนำซึ่งมีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่และมีสายตัวนำลงดินที่แสดงดังรูปที่ 3.14 การทำงานของวงจรโดยสัญญาณความถี่สูงจะต่อผ่านตัวเก็บประจุซึ่ง Insertion loss ของวงจรกรองนี้จะกำหนดโดย

$$f_0 = \frac{1}{\pi RC} \tag{3.1}$$

- เมื่อ
- f : ความถี่
 - f_0 : ความถี่ตัดผ่านจุดต่อ
 - C : ตัวเก็บประจุ (ตัวต้านทานของวงจรกรอง)



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

ในทางปฏิบัติแล้วตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยทั้งค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่ ผลนี้เกิดจากแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของตัวนำ (ขาของตัวเก็บประจุ) ผลเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด จากสาเหตุเหล่านี้เองทำให้เกิดผลของการกำทอนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่กำหนด วงจรกรองจะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุเมื่อก่อนถึงความถี่กำหนดและเมื่อผ่านความถี่กำหนดไปแล้ว ตัวเก็บประจุนี้จะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวเก็บประจุแบบกระดาษพอลิออลูมิเนียม (Metalized Paper Capacitor) มีขนาดเล็กแต่จะมีประสิทธิภาพต่ำในย่านความถี่วิทยุ สาเหตุจากมีความต้านทานจุดต่อสูงและผลของความเหนี่ยวนำจากตัวนำของแผ่นฟิล์มโลหะ โดยส่วนมากจะใช้ที่ย่านความถี่ 20 MHz

ตัวเก็บประจุไมก้าและเซรามิกเป็นตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็ก และจะใช้ย่านความถี่ประมาณ 200 MHz

Feedthrough Capacitor เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้งานในย่านความถี่สูงสามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลของความถี่กำหนดที่ความถี่สูงถึง 1 GHz Feedthrough เป็นตัวเก็บประจุแบบ 3 ขั้ว และออกแบบเพื่อลดผลของตัวเหนี่ยวนำเนื่องจากความยาวของตัวนำ

Electrolytic Capacitor มักจะใช้สำหรับ DC Filter ใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและมีองค์ประกอบการสูญเสียมาก

3.4.2 วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor filter)

วงจรกรองกรอแบบนี้จะต่ออนุกรมกับตัวนำที่ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.16 จะได้ Insertion Loss ดังนี้

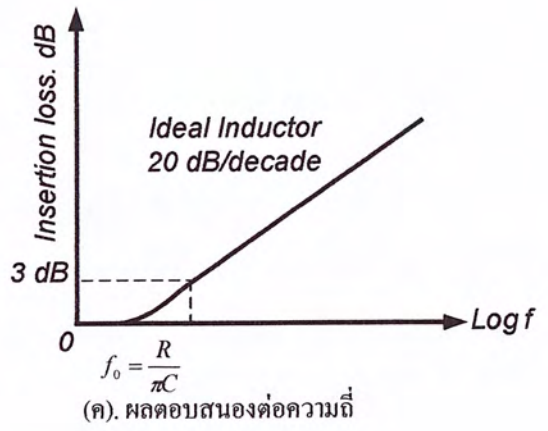
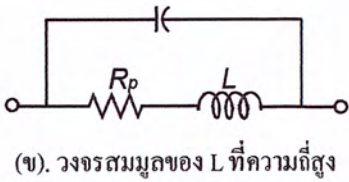
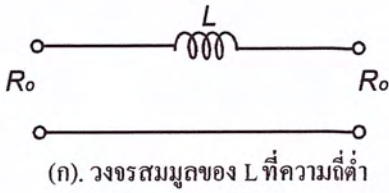
$$f_0 = \frac{R}{\pi C} \quad (3.2)$$

เมื่อ L : ค่าความเหนี่ยวนำ (Henry)

R_0 : ค่าความต้านทานจุดต่อ (Ohm)

f : ค่าความถี่ (Hz)

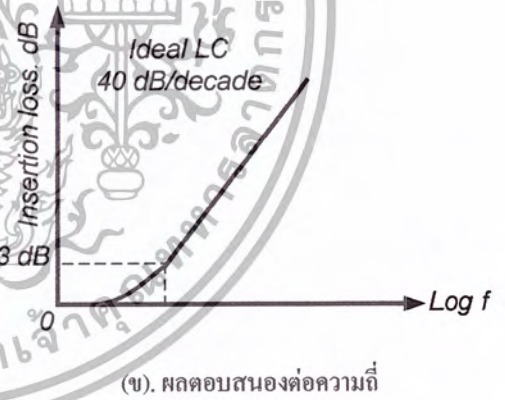
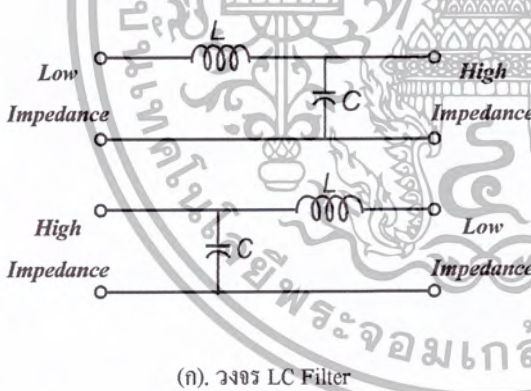
ในทางปฏิบัติแล้วตัวเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความต้านทาน ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดภายใน แสดงวงจรมุมได้ดังรูปที่ 3.16 วงจรกรองตัวเหนี่ยวนำจะมีทั้งแบบแกนอากาศ แกนเหล็กและแกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งแกนเฟอร์ไรท์จะมีค่า μ_0 สูงทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทั้ง อิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องมีค่าต่ำและค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง



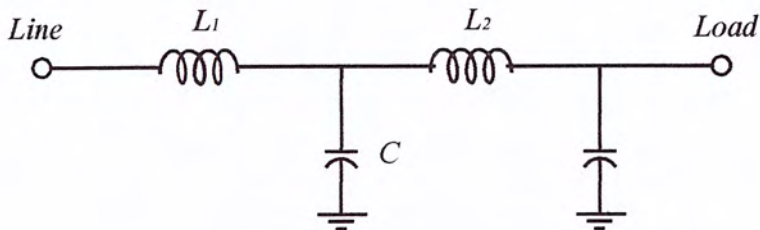
รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

3.4.3 วงจรกรองความถี่แบบ LC (LC filter)

ค่าประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบ LC แสดงดังรูปที่ 3.17 เมื่ออิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าและโหลดไม่เท่ากัน ค่า Insertion loss จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงก็ต่อเมื่อค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ต้องมีค่าสูงกว่าภาระทางไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายเมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย และอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน กำหนดให้เป็น R_o



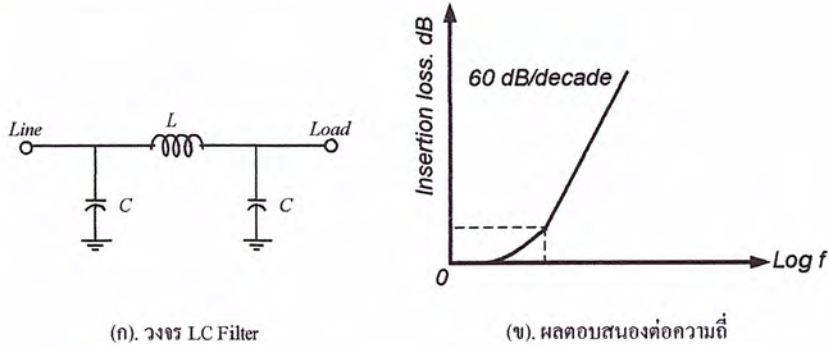
รูปที่ 3.16 วงจรกรองความถี่แบบ LC



รูปที่ 3.17 การต่อ LC Filter อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 วงจรกรองความถี่แบบ π (Pi filter)

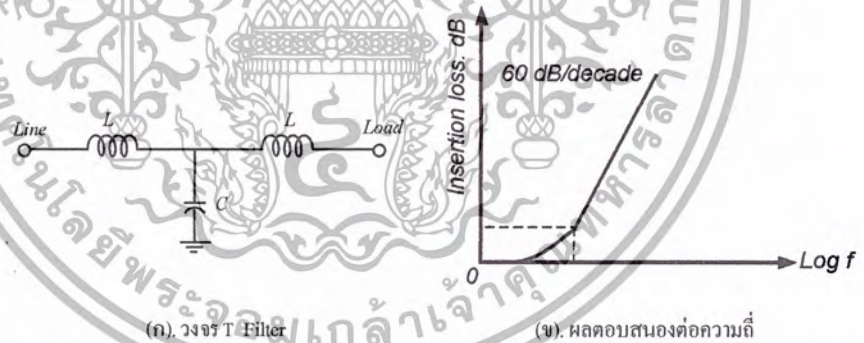


รูป 3.18 แสดง π section filter

จากคุณลักษณะดังรูป วงจรความถี่แบบ π จะมีค่า Insertion loss สูงกว่าแบบอื่นๆซึ่งค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ π จะมีความชันของกราฟ = 60 dB/decade วงจรกรองความถี่แบบ π จะมีประสิทธิภาพต่ำสำหรับสัญญาณรบกวนที่เป็นแบบ Transient วงจรกรองแบบ π จะสามารถเพิ่มค่าความถี่ของการกรองโดยการ Shielding ด้วยกล่องโลหะ

3.4.5 วงจรกรองแบบ T (T filter)

วงจรกรองที่ให้ความถี่ต่ำผ่าน ที่แสดงดังรูปที่ 3.19 ซึ่งใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแบบ Transient



รูปที่ 3.19 วงจรกรองความถี่แบบ T

3.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มาตรฐานการในการวัดและข้อกำหนดต่างๆตามมาตรฐาน CISPR ตลอดจนหลักการและชนิดของวงจรกรองความถี่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้รบกวนในตัวนำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา การทดลอง การวิเคราะห์ผลและการประยุกต์ใช้งานอย่างถูกต้องในบทต่อไป

บทที่ 4

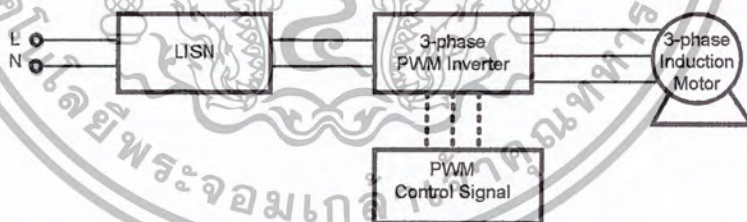
การจำลองการทำงาน

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอแบบจำลองการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและผลการจำลอง ทั้งส่วนของการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนตามสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานชุดขับเคลื่อนดังกล่าว ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ เปลี่ยนแปลงความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ และเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ โดยแบบจำลองที่นำเสนอนี้ใช้โปรแกรม PSpice ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ มีความสะดวกในการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีเบอร์ต่างๆ และการตั้งค่าต่างๆ ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง สามารถต่อวงจรตามแบบวงจรที่ต้องการได้ไม่ยาก นอกจากนี้ในส่วนของ การจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสามารถแสดงผลในแกนเวลาและความถี่ และปรับสเกลเป็นแบบลิเนียร์หรือสเกลลอ็กได้สะดวกรวดเร็ว

4.2 การสร้างแบบจำลองการทำงาน

เนื่องจากวงจรรวมในการจำลองประกอบด้วยหลายส่วน เพื่อความสะดวกและป้องกันความผิดพลาดจึงทำการออกแบบวงจรจำลองออกเป็นหลายๆ ทดสอบการทำงานของแต่ละส่วนจนไม่เกิดข้อผิดพลาดใดๆ ระหว่างการทำงานของโปรแกรมแล้วจึงนำวงจรทั้งหมดมาต่อรวมกันเป็นวงจรรวม ซึ่งแบบจำลองนี้จะประกอบด้วย 4 ส่วน คือ วงจรสร้างสัญญาณควบคุม SPWM และ เดดไทม์ (Deadtime) วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, วงจรสมมุติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และวงจร LISN ส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลองดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองการทำงาน

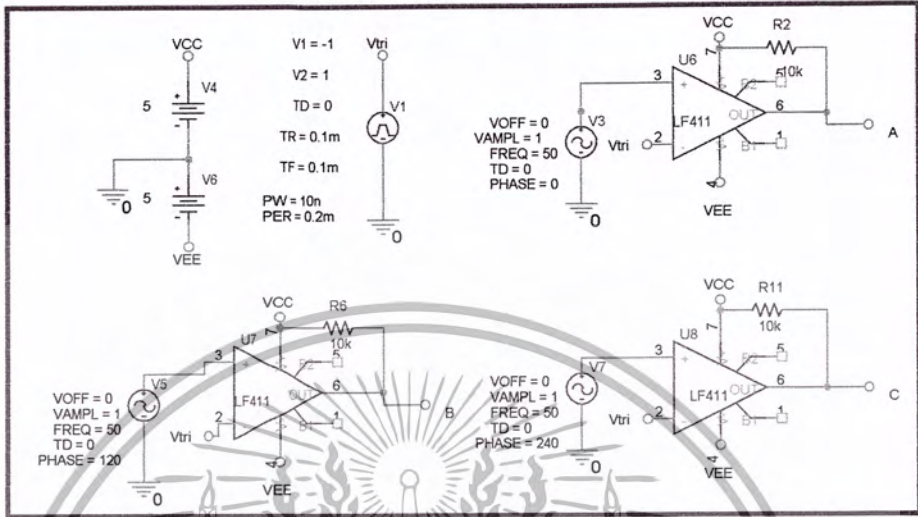
4.2.1 การสร้างสัญญาณควบคุม SPWM และวงจร Dead Time ด้วยโปรแกรม PSpice

ในการสร้างสัญญาณควบคุม SPWM ใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณของออปแอมป์ โดยใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งสัญญาณไซน์แต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศา ดังแสดงในรูป 4.2 เมื่อได้สัญญาณดังกล่าวมาจากออปแอมป์แล้วจะนำไปเข้าวงจรเดดไทม์ เพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในกิ่ง (branch) เดียวกันของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถจะเปลี่ยนสถานะทันทีทันใดได้ ในการเลื่อนเวลาของสัญญาณที่ดับเบิกลูเอ็่มจะอาศัยคุณสมบัติของไอซีลอจิกที่เป็นชมิทริกเกอร์ (Schmitt-trigger) ที่ทำงานเมื่อระดับแรงดันอินพุตถึงระดับที่สามารถทำให้

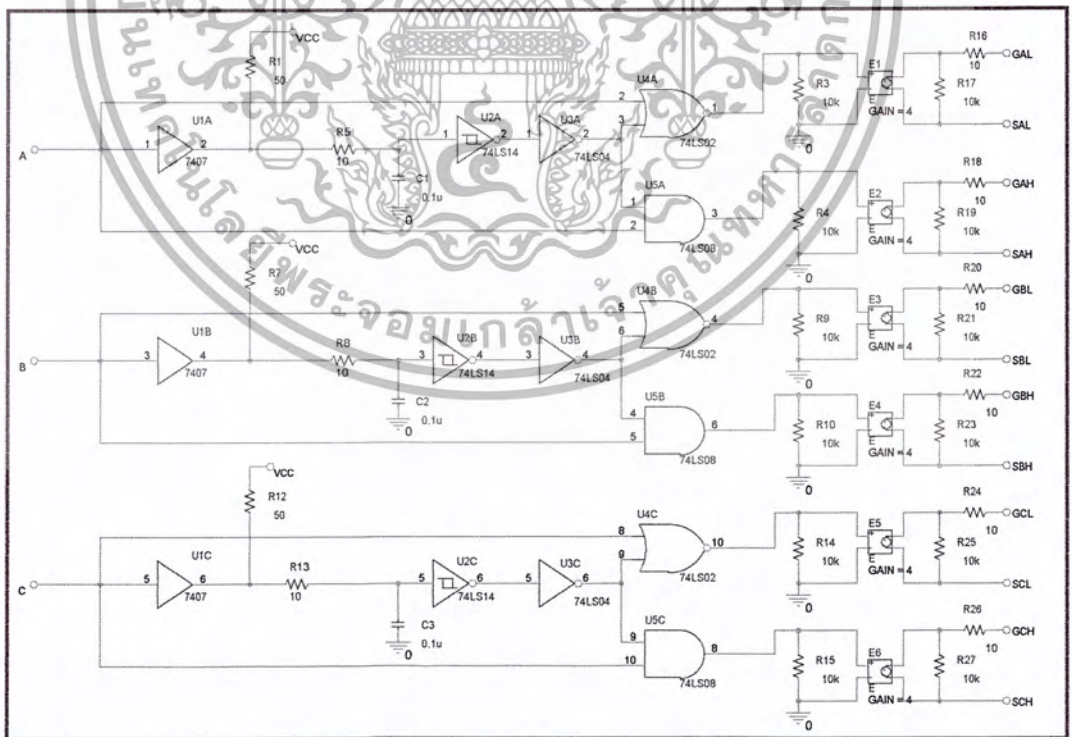
อุปกรณ์ทำงานได้ โดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในการหน่วงเวลาของสัญญาณที่ดับเบิกลูเอ็่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

หลังจากนั้นก็นำสัญญาณดังกล่าวมาผ่าน ไอซีเบอร์ 74 LS14 ซึ่งเป็นไอซีอินเวอร์ตแบบขมิตริกเกอร์ก็ จะทำให้ได้สัญญาณที่เลื่อนเวลาออกไป สำหรับในการแอนด์และออร์จะใช้ไอซีเบอร์ 74LS08 และ 74LS02 ซึ่งเป็นไอซีแอนด์เกตและออร์เกตตามลำดับ วงจรสร้างเคทใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจรสร้างสัญญาณ SPWM

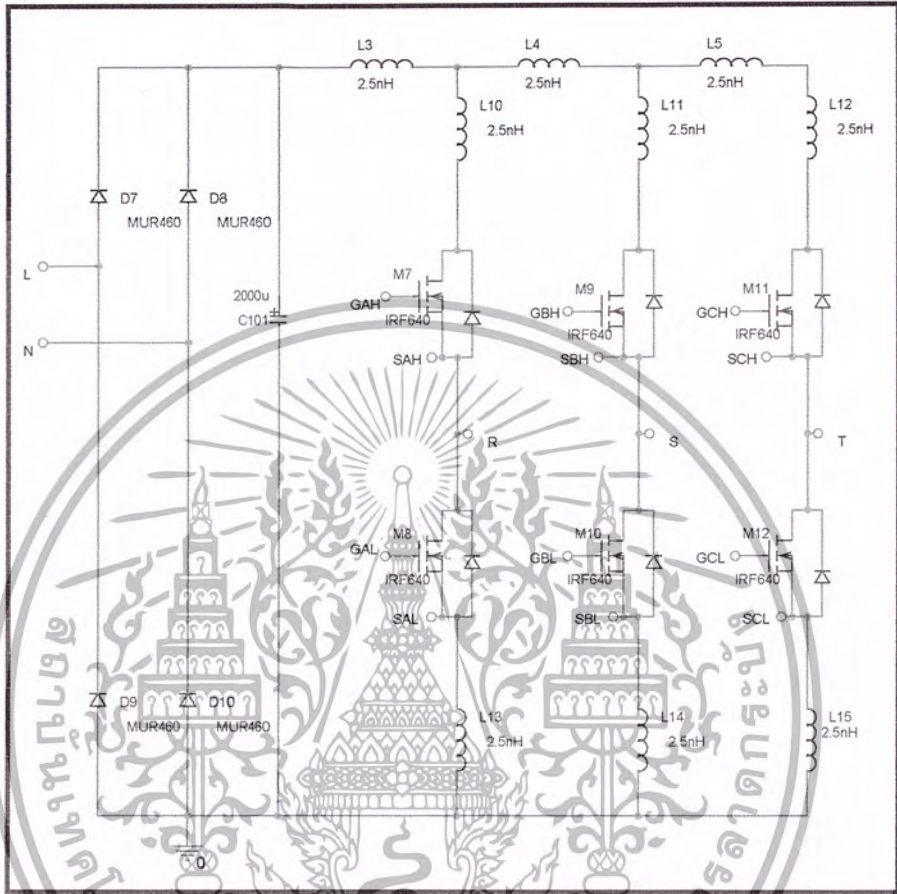


รูปที่ 4.3 วงจรสร้างเคทใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

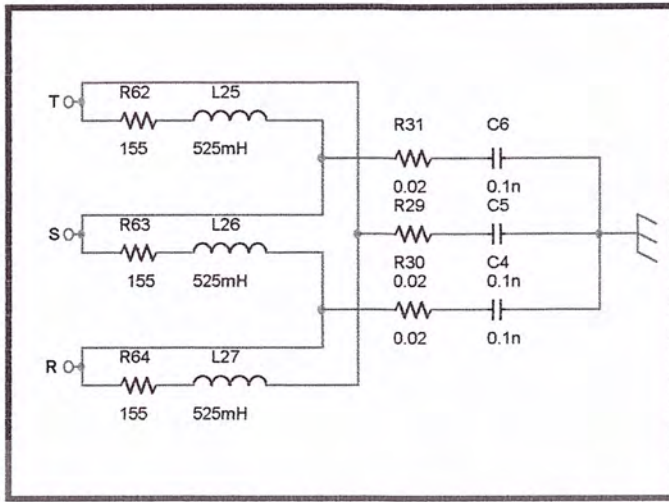
แบบจำลองที่สร้างเป็นอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งเป็นจำลองที่ใช้การทดลองใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ในการสวิตชิง หลักทฤษฎีของพีคดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 วงจรแบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

4.2.3 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

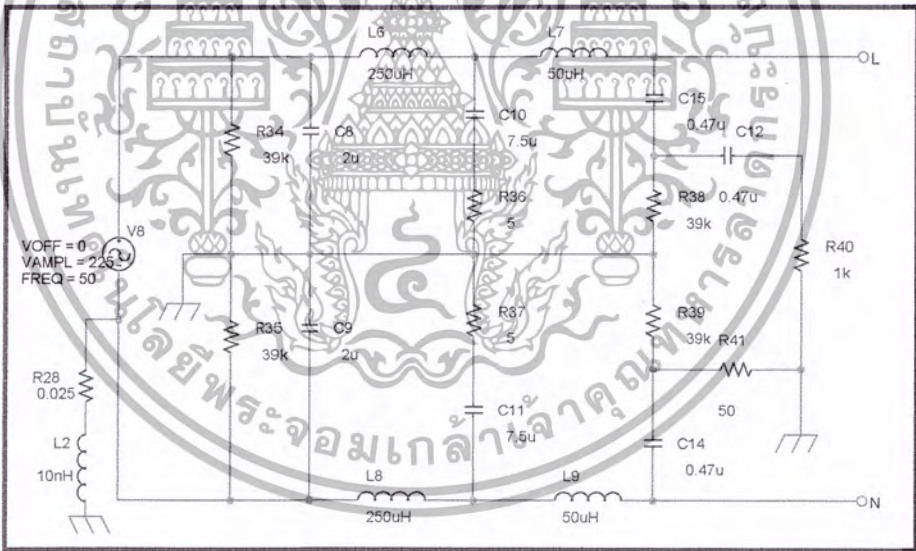
ในการทำแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้วงจรสมมูลโดยประมาณ เนื่องจากในการศึกษาผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน จะเน้นผลการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (อินเวอร์เตอร์) เป็นหลัก โดยจะนำวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาเพื่อทำการทดลองในเงื่อนไขของการเปลี่ยนโหลดเท่านั้น แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

4.2.4 แบบจำลอง LISN

LISN เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่มาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ที่อยู่ในวงจรออกจากกัน ทำให้สัญญาณที่วัดได้เกิดจากทำงานของอุปกรณ์เพียงทางเดียวแบบจำลองของ LISN ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองของ LISN

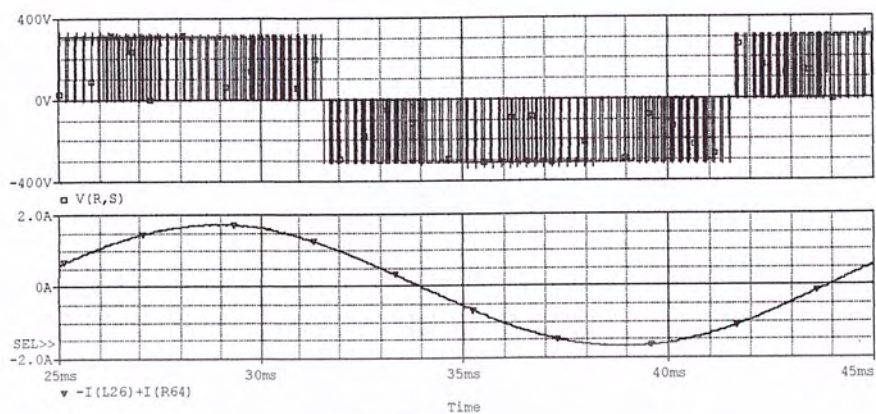
4.3 ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนของสัญญาณกระแสและแรงดัน เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และส่วนของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กรบกวนในตัวนำภายในตู้เย็น 3 กรณี คือ

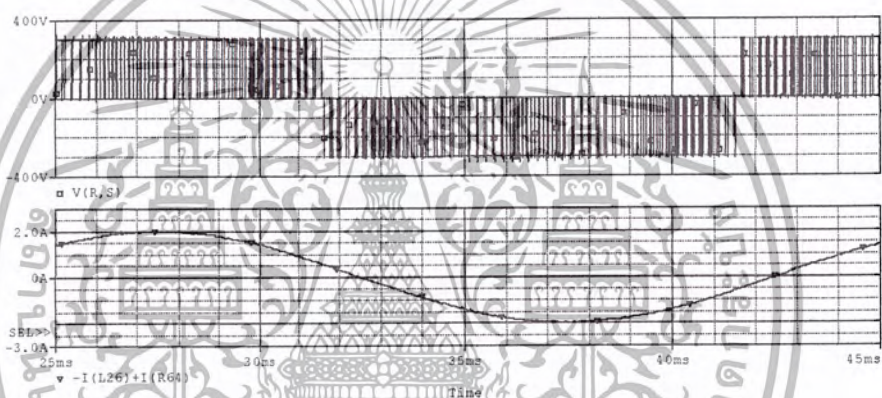
1. เปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ 0 กก., 4 กก. และ 8 กก.
2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 20 Hz, 50 Hz และ 80 Hz
3. เปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต 0.8, 1 และ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

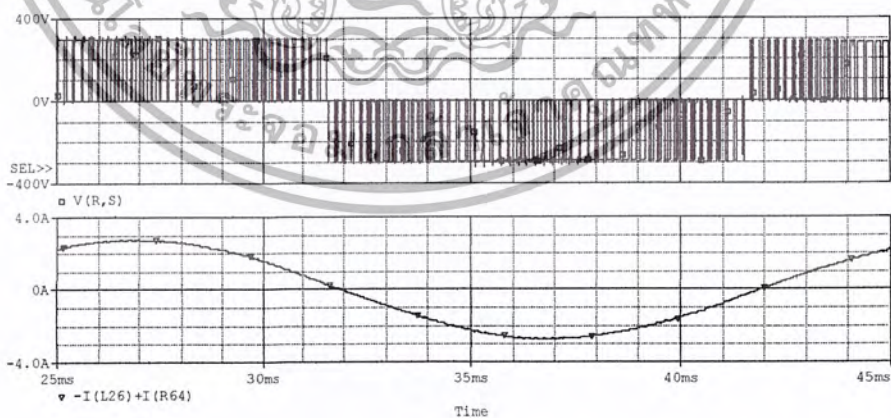
4.3.1 ผลการจำลองสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



(ก) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



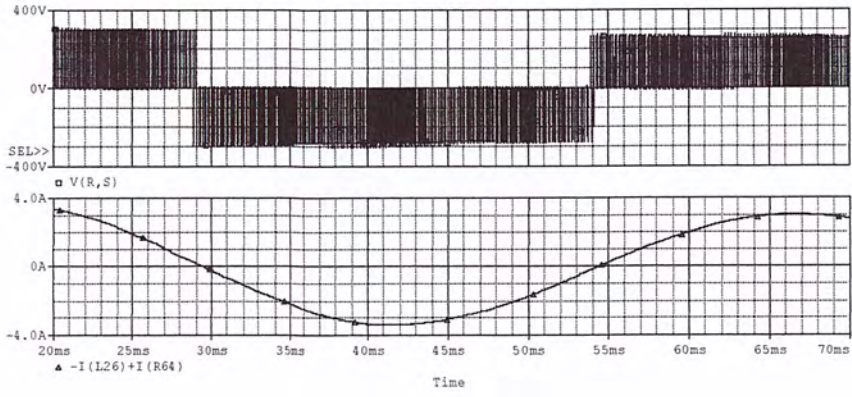
(ข) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.



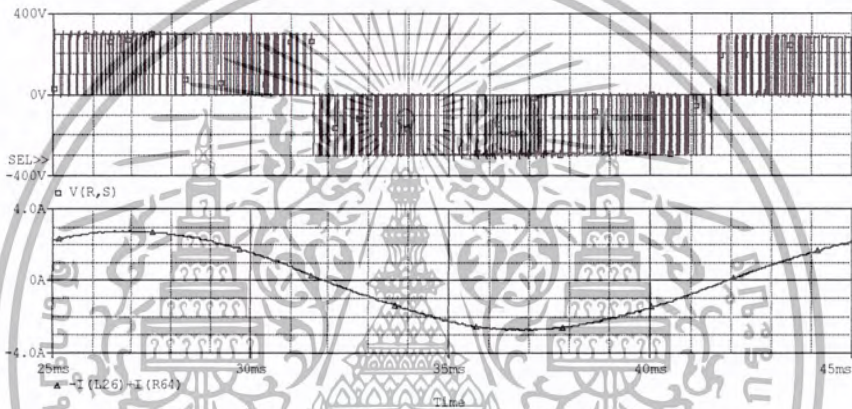
(ค) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

รูปที่ 4.7 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อ โหลดสูงขึ้น ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)

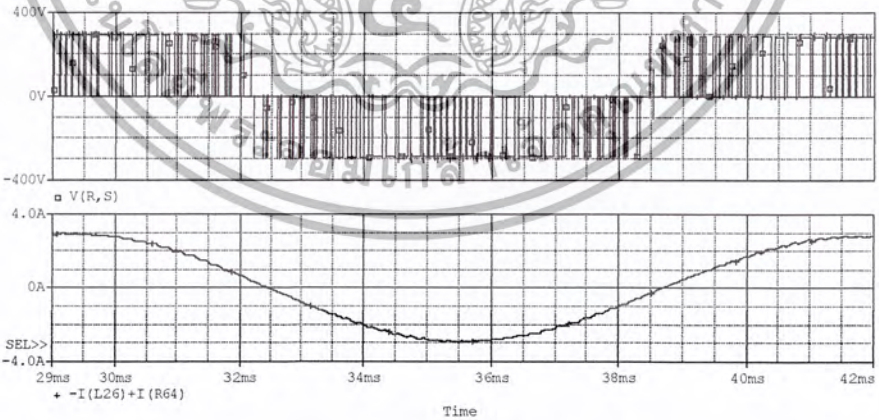
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



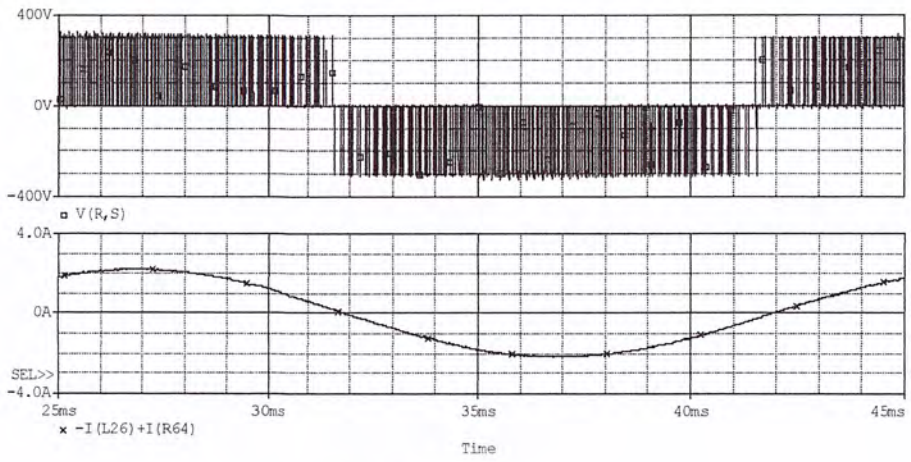
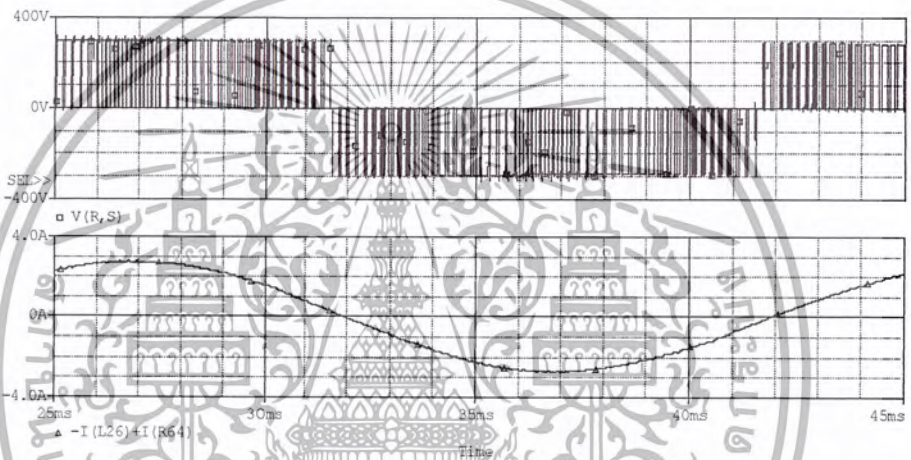
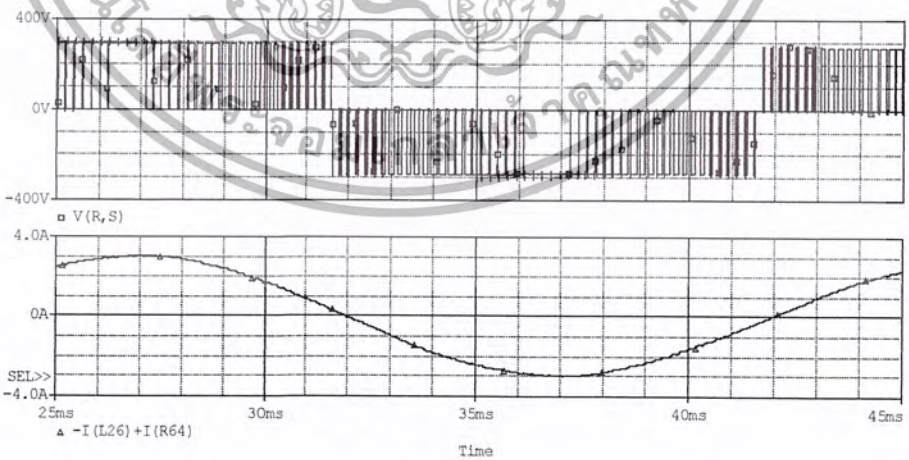
(ข) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(ค) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

รูปที่ 4.8 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

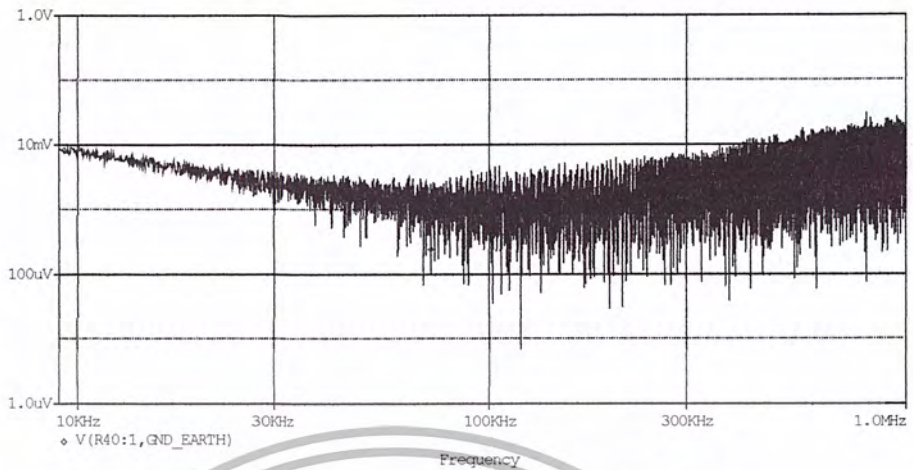
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $m_a = 0.8$ (ข) $m_a = 1$ (ค) $m_a = 1.2$

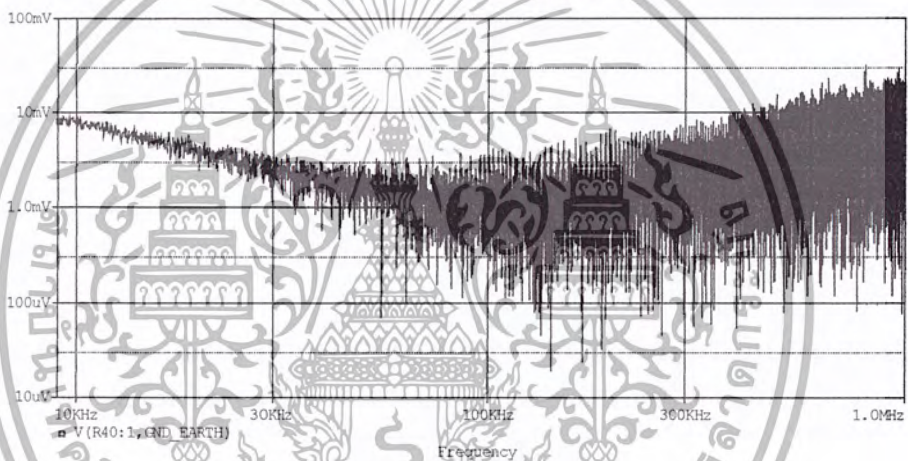
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

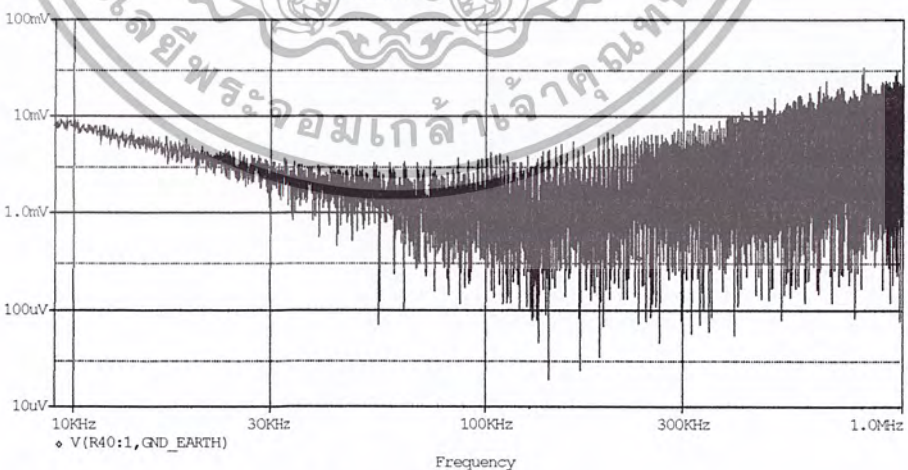
4.3.2 ผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ



(ก) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



(ข) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.

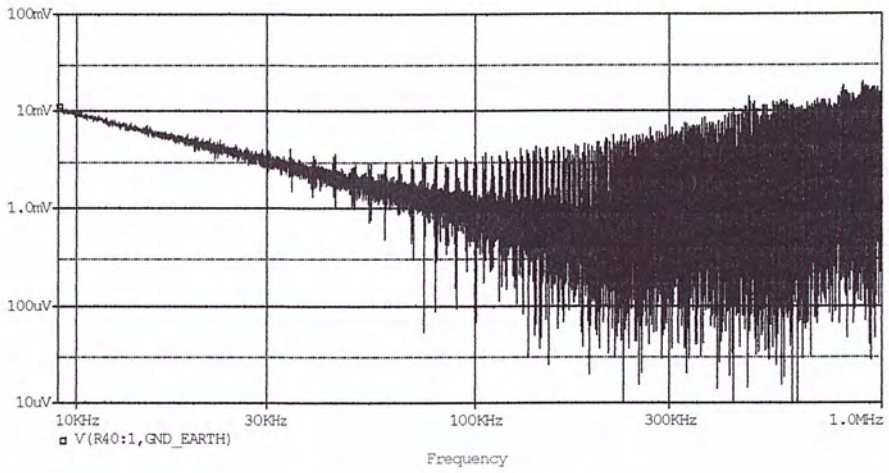


(ค) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

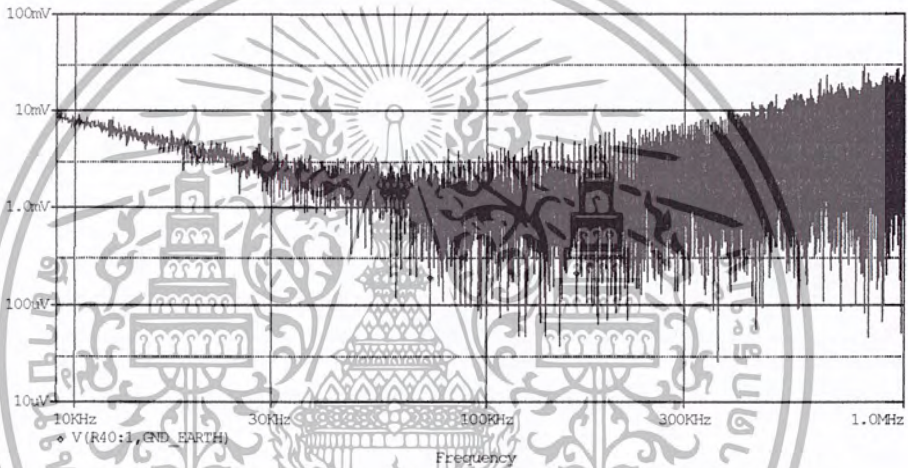
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อโหลดมอเตอร์สูงขึ้น

($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)

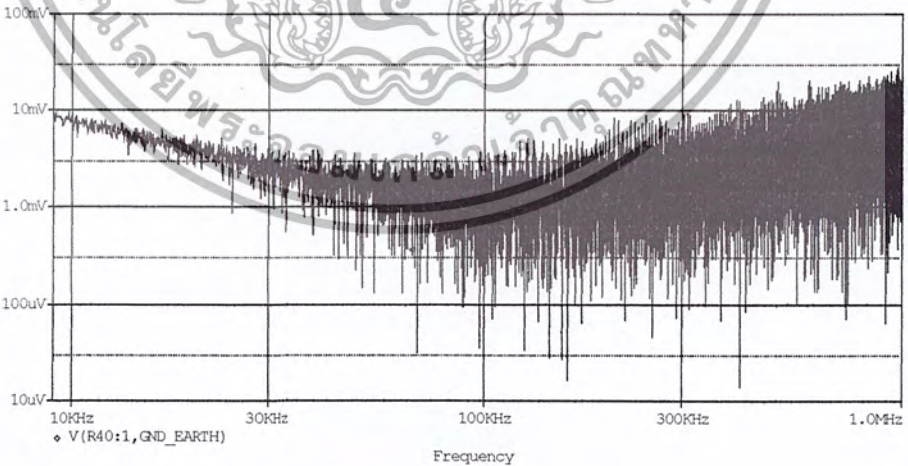
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



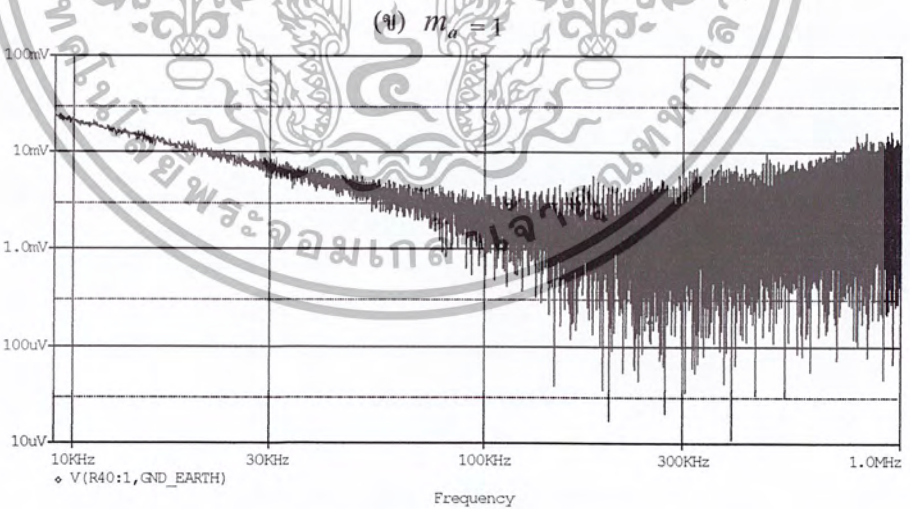
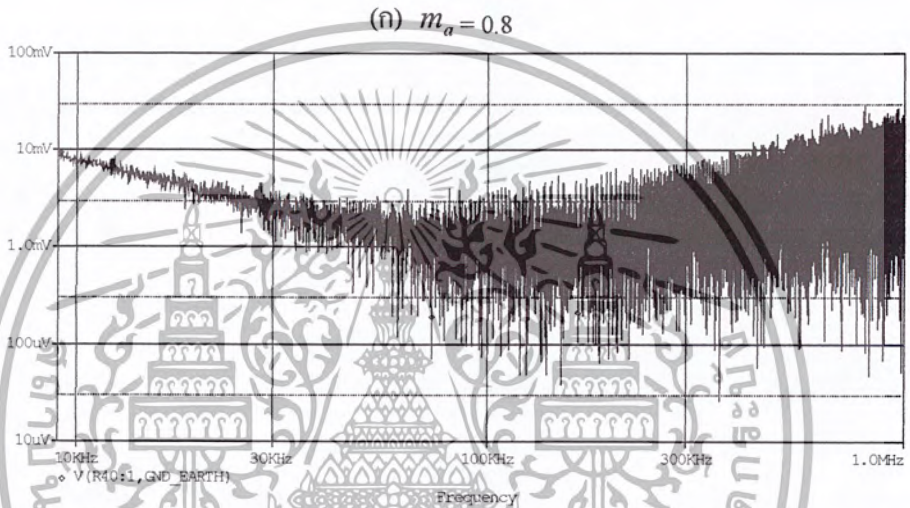
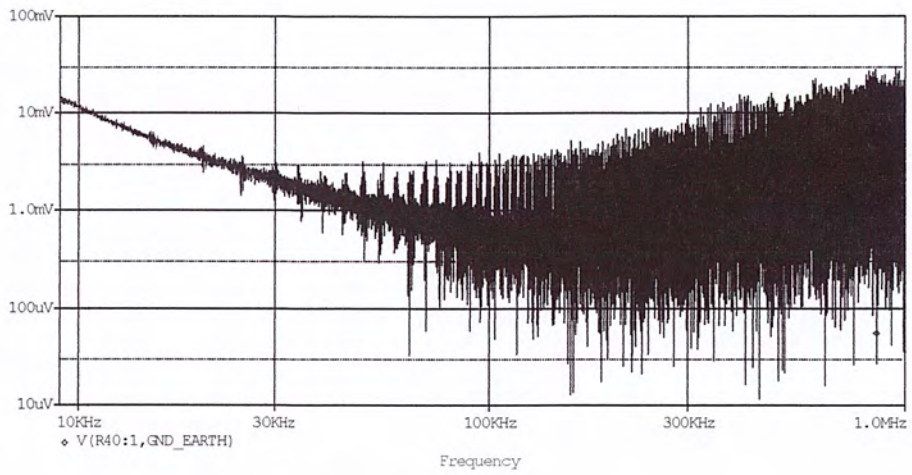
(ข) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(ค) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

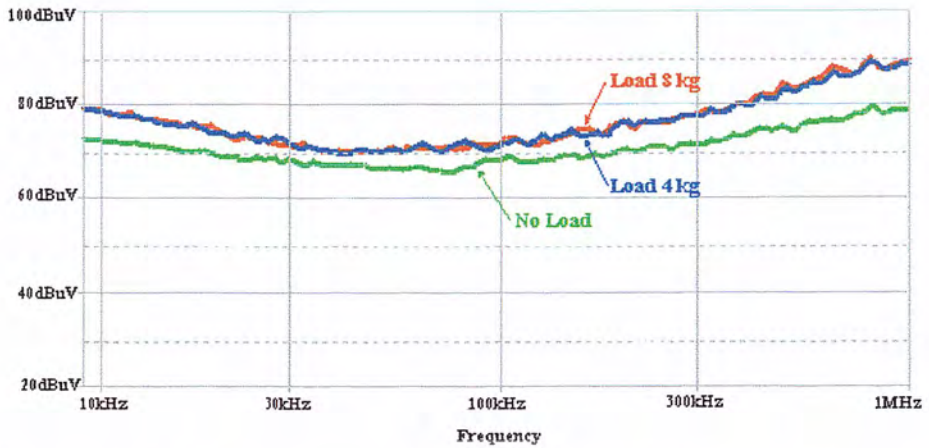
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

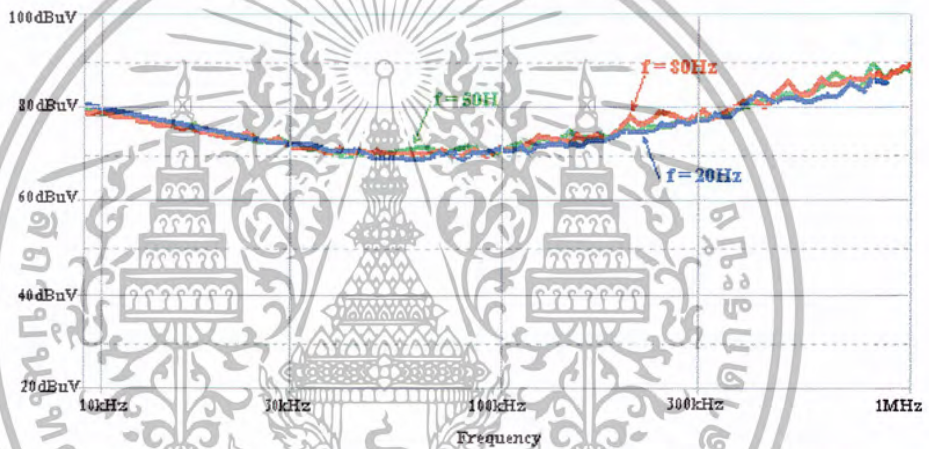


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน เมื่อปรับเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

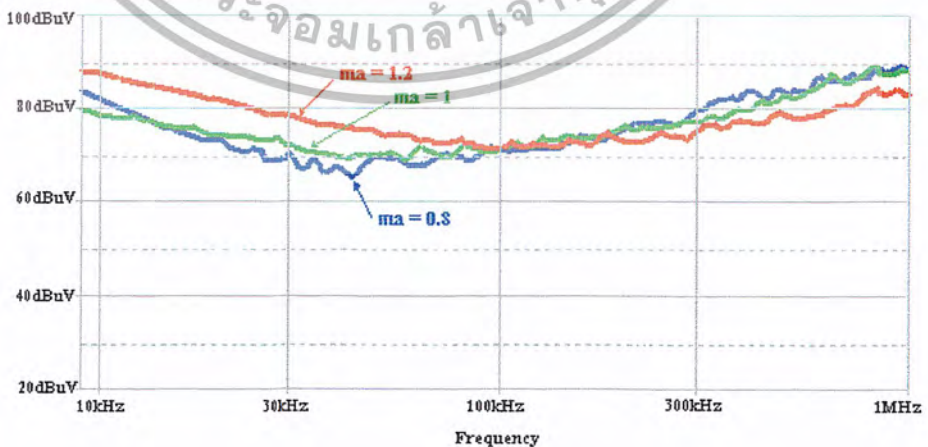
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz)

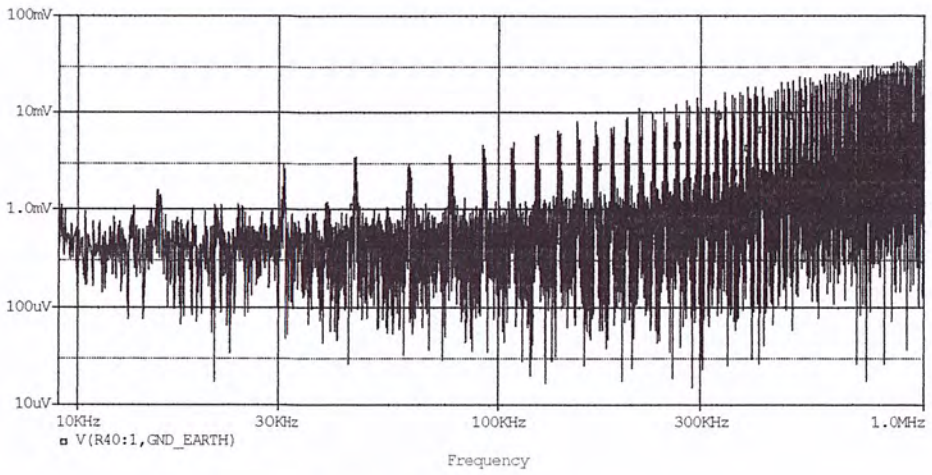


รูปที่ 4.14 ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1$, Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

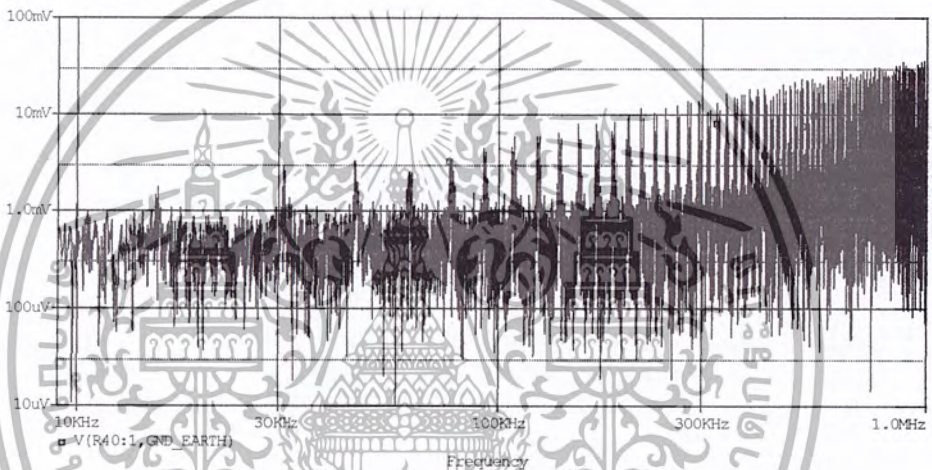


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต (Switching Frequency = 5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

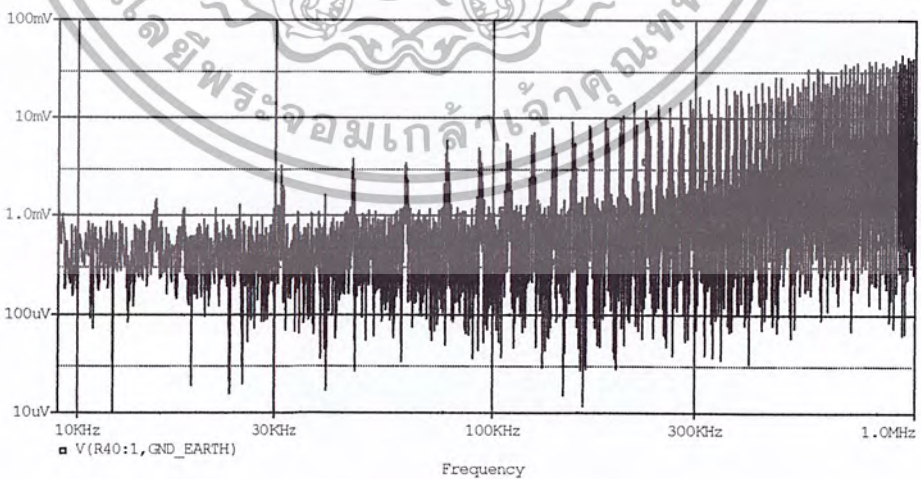
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



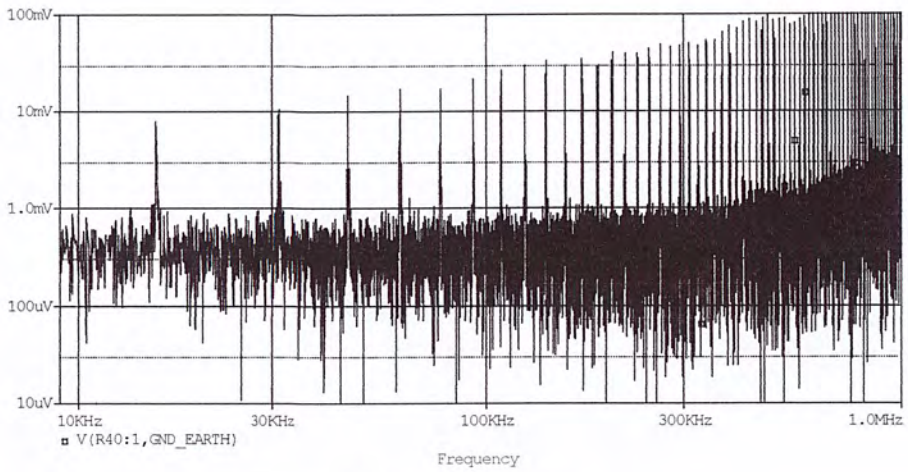
(ข) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.



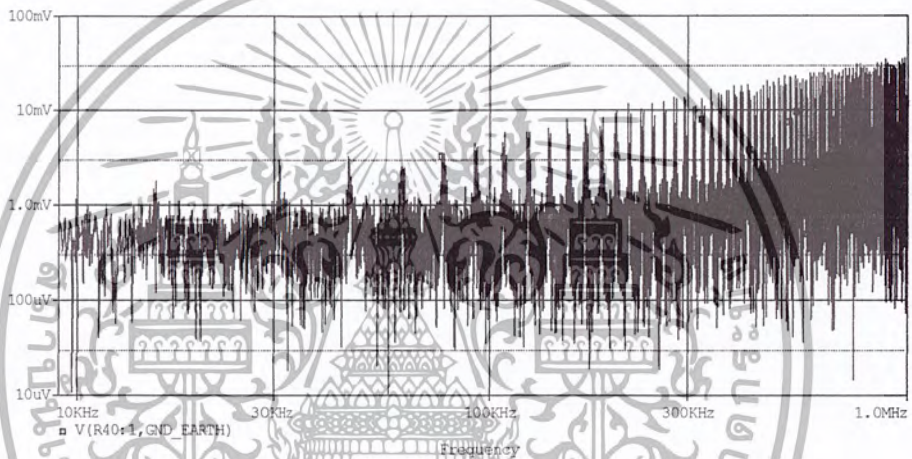
(ค) โหลดมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

รูปที่ 4.16 ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อโหลดมอเตอร์สูงขึ้น

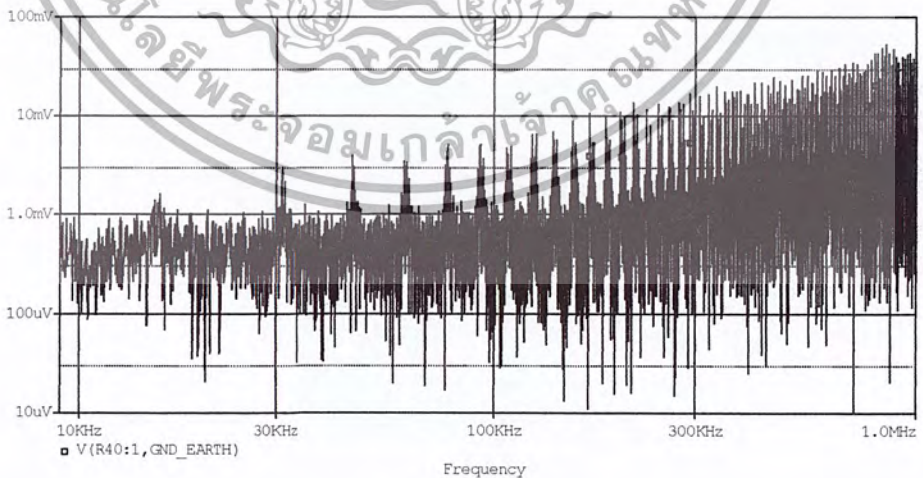
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีอีที จำกัด การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



(ข) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz

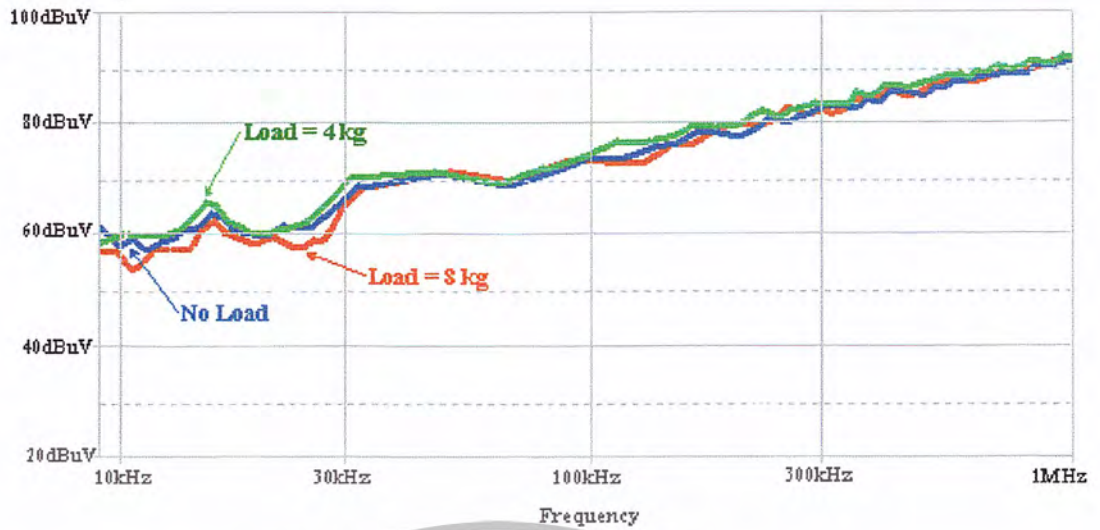


(ค) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

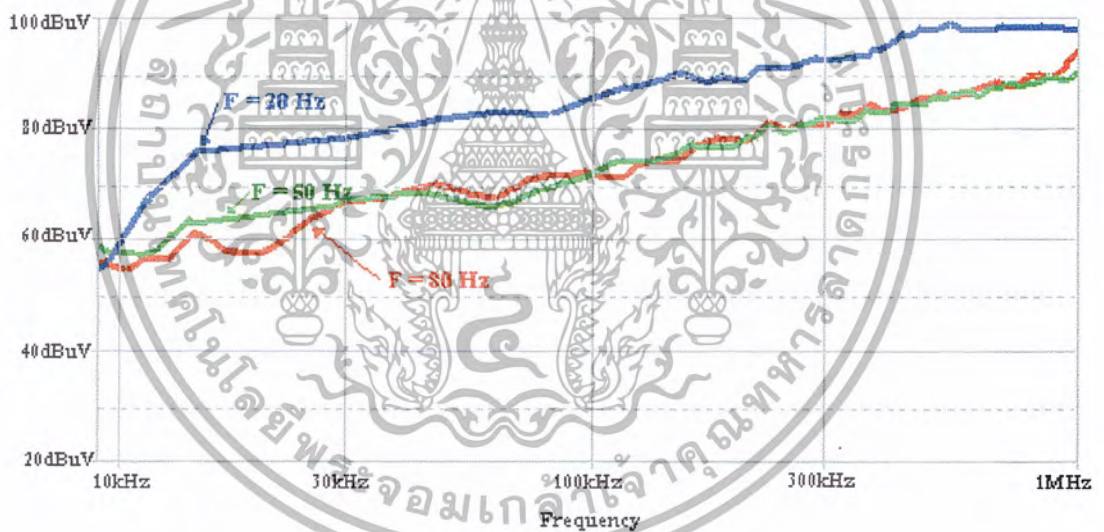
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองรูปคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่อินเวอร์เตอร์

($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz)



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz, โหลดมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.)

4.4 สรุป

จากผลที่ได้จากการจำลองการทำงานระดับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1 MHz ทุกเงื่อนไขการทดลองมีแนวโน้มของสัญญาณรบกวนสูงขึ้น ระหว่างย่านความถี่ 300 kHz ถึง 1 MHz ส่วนในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 300 kHz จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน โดยผลที่เกิดขึ้นมาจากความถี่สวิตช์ซึ่งเป็นหลัก เมื่อเพิ่มความถี่สวิตช์ซึ่งเป็น 15.5 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.18 การเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงโหลดของมอเตอร์จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวน แต่ถ้าหากปรับความถี่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ให้ต่ำลงจะทำให้ระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน สูงขึ้น ดังแสดงในรูป 4.19 ส่วนการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมีอคติจะไม่ส่งผลมากนักรายละเอียดต่างๆ ดังแสดงในตารางสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ

เงื่อนไขการจำลอง	ผลของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ
1. ความถี่สวิทซ์ = 5 kHz 1.1 เปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ 1.2 เปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 1.3 เปลี่ยนแปลง ดัชนีการมีอคติ	เพิ่มขึ้นเมื่อโหลดของมอเตอร์สูงขึ้น ไม่เปลี่ยนแปลง ในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 100 kHz m_d สูงเกิด EMI สูง ย่านความถี่ 100 kHz ถึง 1 MHz มีผลน้อย
2. ความถี่สวิทซ์ = 15.5 kHz 2.1 เปลี่ยนแปลง โหลดของมอเตอร์ 2.2 เปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์	มีผลน้อยมาก ความถี่ค่า 20 Hz เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูงกว่า 50 และ 80 Hz

อย่างไรก็ตามในการศึกษาในเรื่องคลื่นแม่เหล็กกรบกวนซึ่งเป็นย่านความถี่สูง ผลการจำลองระบบจะต้องทดลองควบคู่ไปกับผลจากการวัดเพราะความสามารถของโปรแกรมที่ทำการจำลองระบบยังไม่มีความสามารถเพียงพอเมื่อความถี่สูงขึ้น และเนื่องจากมีผลของค่าองค์ประกอบแผ่นของอุปกรณ์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งไม่ทราบค่าทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจะนำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 5

การทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ เป็นการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในโหมดร่วมซึ่งทฤษฎีได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2.2 โดยนำมาเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 11 และมีการเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับการวัดเพื่อวิเคราะห์ผลการเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำร่วมกันในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1 MHz ซึ่งการทดลองนี้ก็เพื่อจะศึกษาพฤติกรรมการเกิดขึ้นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับข้อกำหนดในการติดตั้งเครื่องมือวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3.4

5.2 วัดอุปกรณ์การทดลอง

1. เพื่อเก็บข้อมูลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่มาตามสายตัวนำ
2. นำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ปัญหาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา

5.3 ขอบเขตการทดลอง

1. ทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำ โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้
 - 1.1 ทดลองเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. โดยปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ 50 Hz
 - 1.2 ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 20, 50 และ 80 Hz โดยโหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก.
2. ทดลองเปรียบเทียบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน กับเส้นมาตรฐาน CISPR 11

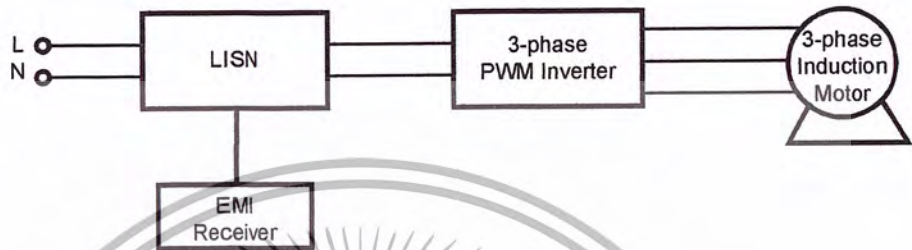
5.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. FUJI inverter รุ่น FVR-C9S-7JE(0.1~1.5kW)
2. 3- ϕ Induction motor 0.5 แรงม้า
3. EMC Analyzer 9 kHz -1.5GHz
4. LISN Model 3810/2 LISN 50 Ω 50/250 μ H, 9 kHz -30MHz
5. คาชั่งสปริง 0-10 กก.
6. ลูกตุ้มน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรและจัดชุดทดลองตามรูปที่ 5.1
2. ทดลองเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. โดยปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ 50 Hz
3. ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 20, 50 และ 80Hz โดยโหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก.



รูปที่ 5.1 วงจรการทดลอง

5.6 ผลการทดลอง

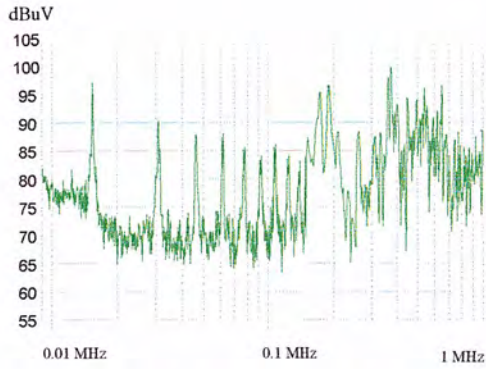
ผลการทดลองจะนำเสนอเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผลการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1MHz จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองและวิเคราะห์ผลร่วมกัน ส่วนที่สองเป็นผลการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเพื่อเปรียบเทียบกับระดับมาตรฐานในย่านความถี่ 150 kHz ถึง 30MHz โดยอ้างอิงมาตรฐาน CISPR เป็นหลัก

5.6.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

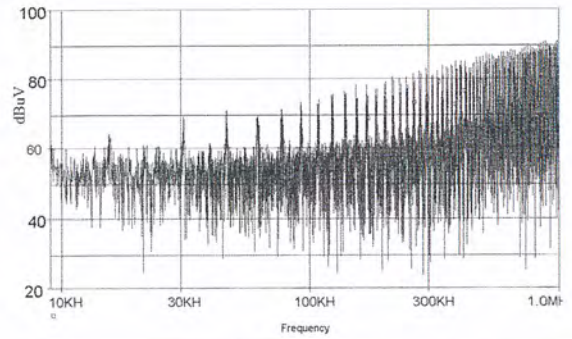
จากการเปรียบเทียบผลการวัดและจำลองตามเงื่อนไขการเปลี่ยนโหลดของมอเตอร์และความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 100 kHz จะเห็นได้ชัดว่าความถี่หลักของสัญญาณรบกวนจะเท่ากับจำนวนเท่าของความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์นั่นคือ 15.5, 31, 46.5 kHz ... ตามลำดับซึ่งเพิ่มขึ้นไปในแนวทางเดียวกันทั้งจากการวัดและการจำลอง ส่วนในย่านความถี่ 100 kHz ถึง 1 MHz สัญญาณรบกวนมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์จะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาสัญญาณรบกวนมากนัก และเมื่อเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่ำลงระดับของสัญญาณรบกวนก็จะเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงรูปที่ 5.3 (ก) และ (ข) ซึ่งการวัดและจำลองมีผลใกล้เคียงกัน

จากผลการวัดและการจำลองเห็นได้ว่าจะมีรูปกราฟที่ไม่เหมือนกันอยู่ ซึ่งมีสาเหตุจากความสามารถของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ที่ยังมีความสามารถไม่เพียงพอในการจำลองระบบความถี่สูง นอกจากนี้ทางปฏิบัติเมื่อความถี่สูงขึ้นองค์ประกอบของวงจรจะเปลี่ยนไปเนื่องจากองค์ประกอบแผ่นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรไฟฟ้าซึ่งไม่สามารถทราบค่าได้ ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของการจำลองระบบได้

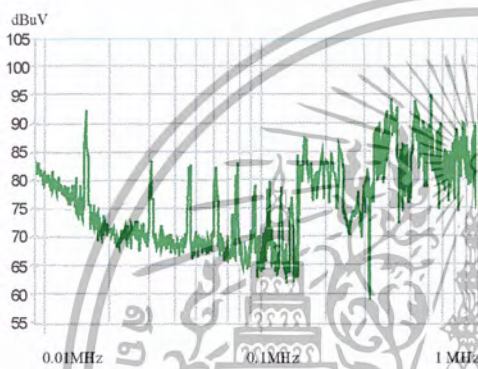
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



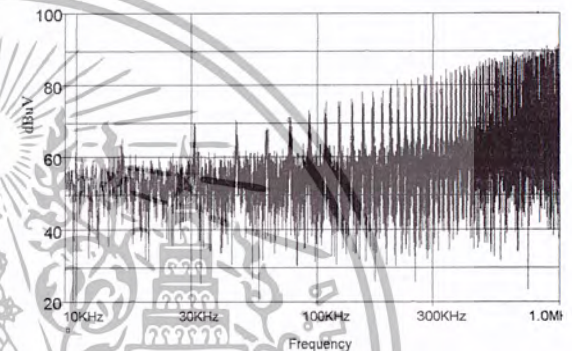
(ก) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



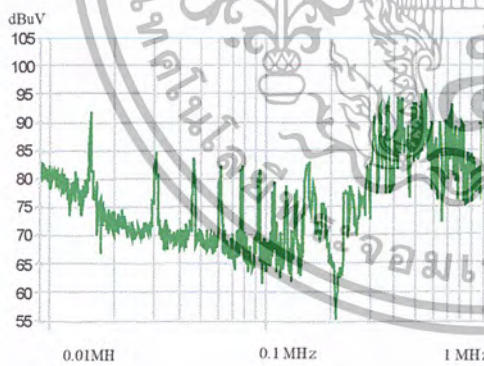
(ข) ผลการจำลองเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



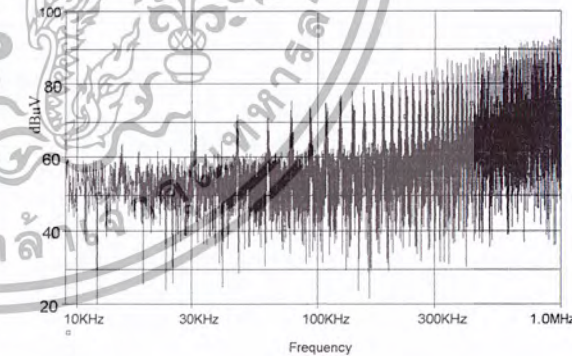
(ค) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.



(ง) ผลการจำลองเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.

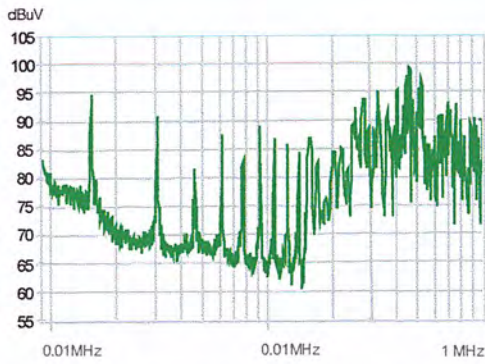


(จ) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

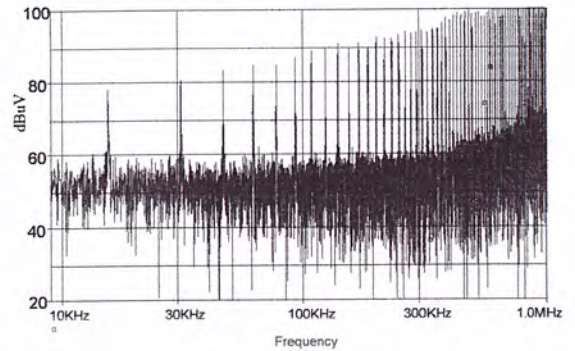


(ฉ) ผลการจำลองเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

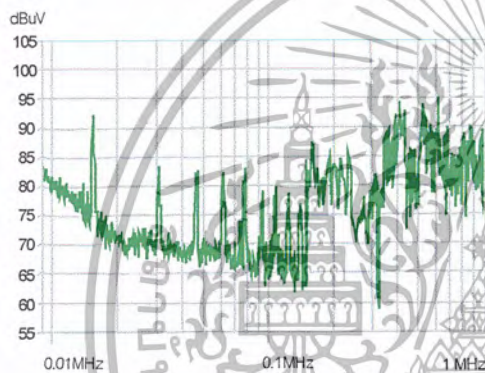
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองและจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำเมื่อเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์ (เงื่อนไขการจำลอง : $m_a = 1$, Switching Frequency = 15.5 kHz)



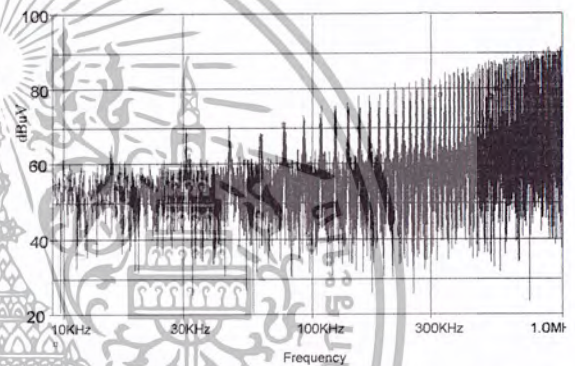
(ก) ผลการวัดที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



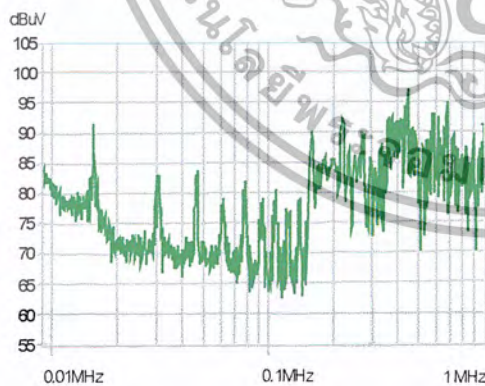
(ข) ผลการจำลองที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



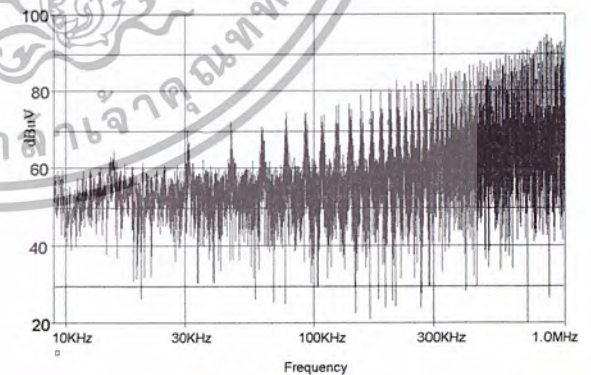
(ค) ผลการวัดที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(ง) ผลการจำลองที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(จ) ผลการวัดที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

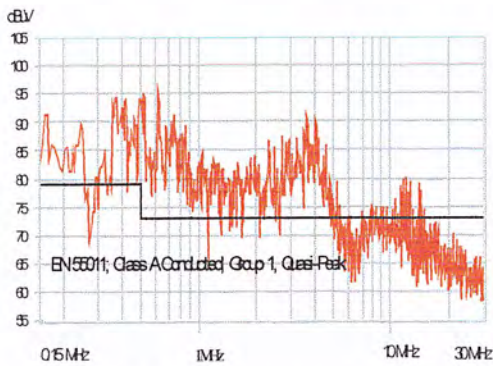


(ฉ) ผลการจำลองที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

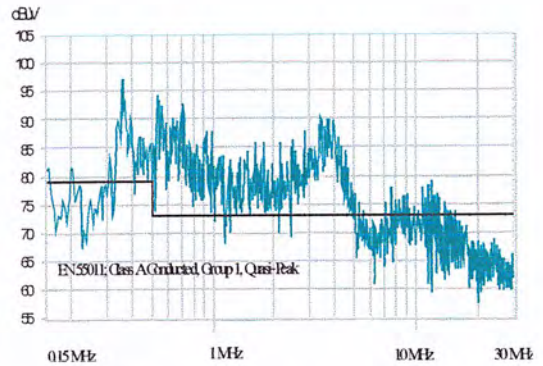
รูปที่ 5.3 ผลการทดลองและจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำเมื่อเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (เงื่อนไขการจำลอง : รูป(ข) $m_a = 0.8$, รูป(ง) $m_a = 1$, รูป(ฉ) $m_a = 1.2$, Switching Frequency = 15.5 kHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

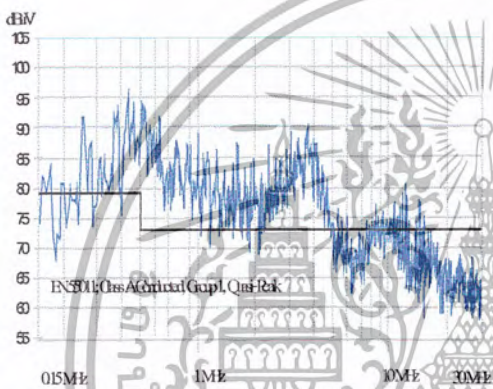
5.6.2 ผลการทดลองวัดสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน



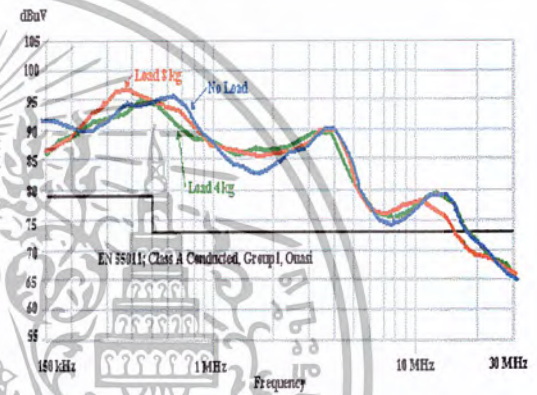
(ก) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



(ข) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.

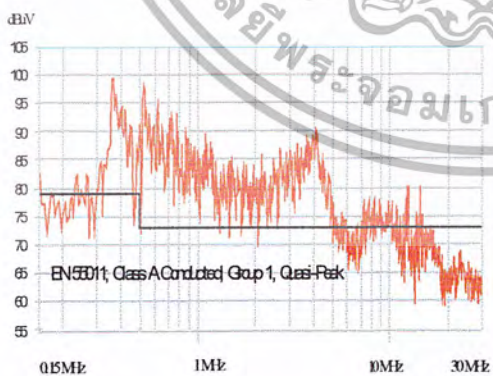


(ค) ผลการวัดเมื่อ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

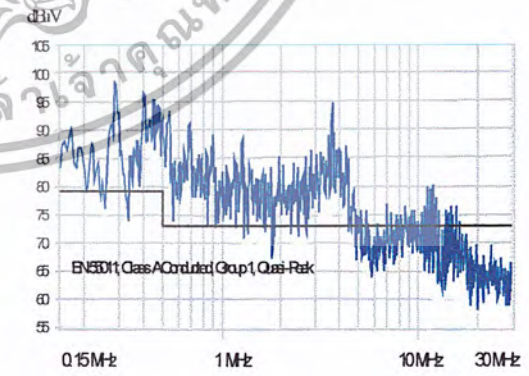


(ง) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 5.4 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในดาวน์เทียบกับเส้นมาตรฐานเมื่อเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์



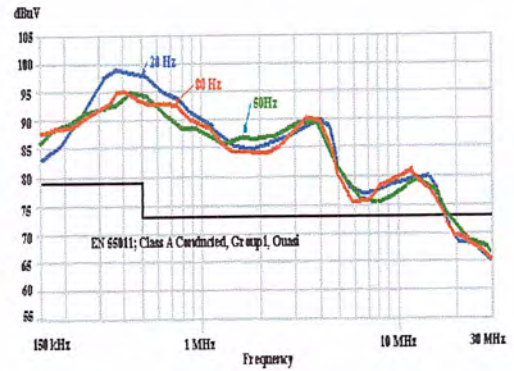
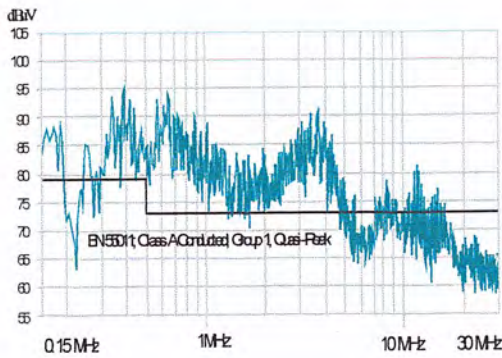
(ก) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



(ข) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz

รูปที่ 5.5 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในดาวน์เทียบกับเส้นมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80Hz

(ง) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 5.5 (ต่อ) ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำเทียบกับเส้นมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

5.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดลองวัดและผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำในโหมดรวมที่เกิดจากการทำงานของวงจรขับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และเปรียบเทียบระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนกับเส้นระดับมาตรฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่กำหนดมาตรฐาน CISPR 11 ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปให้เห็นประเด็นสำคัญดังนี้

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำที่เกิดจากการทำงานของวงจรขับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษานี้มีระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูงสุดที่ 90 dB μ V ถึง 100 dB μ V ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ 150 kHz ถึง 1 MHz และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นจนต่ำกว่าระดับมาตรฐานเมื่อความถี่เกิน 20 MHz
2. ผลของความถี่ในการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ปรากฏเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำอย่างชัดเจนทั้งจากการวัดและจำลองในย่านความถี่ไม่เกิน 200 kHz ดังแสดงในรูปที่ 5.2
3. ผลของการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์จะไม่ส่งผลมากนักต่อระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำโดยเฉพาะในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์
4. เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่ำลงจะทำให้ระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำสูงขึ้นซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้งจากการวัดและจำลองดังแสดงในรูปที่ 5.3
5. จากผลการทดลองทั้ง 2 กรณีคือ เปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์และเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำไม่มากนัก โดยเมื่อความถี่สูงขึ้นระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนค่อนข้างจะคงที่เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดทั้ง 2 กรณีศึกษา

บทที่ 6 การประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่

6.1 บทนำ

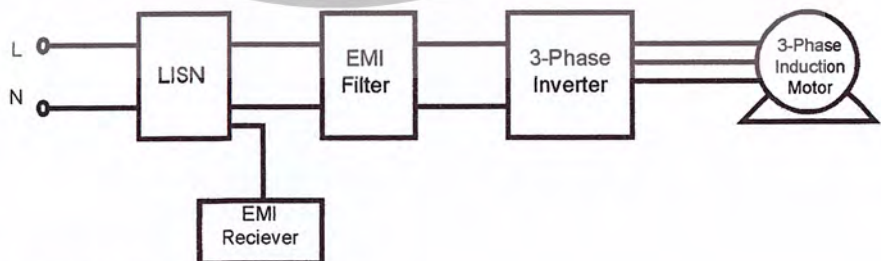
จากผลการทดลองในบทที่ 5 จะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำมีค่ามากกว่าที่มาตรฐาน CISPR ได้กำหนดไว้ ในบทนี้จะนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาโดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่มาแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำที่เกิดขึ้น โดยจะเป็นการทดลองนำวงจรกรองความถี่มาต่อร่วมกับชุดทดลองเพื่อดูผลว่าวงจรกรองความถี่ที่นำมาต่อนั้นสามารถลดระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนได้มากน้อยเพียงใด

6.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

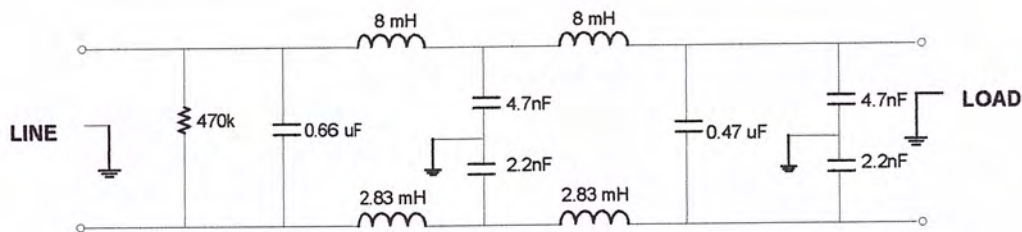
1. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่
2. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำด้วยวงจรกรองความถี่

6.3 ขอบเขตการทดลอง

1. ทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ตามรูปที่ 6.1 โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้
 - 1.1 ทดลองเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. โดยปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ 50 Hz
 - 1.2 ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 20, 50 และ 80 Hz โดยน้ำหนักโหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก.
2. ทดลองเปรียบเทียบระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนกับเส้นมาตรฐาน CISPR 11 ก่อนและหลังใช้ วงจรกรองความถี่



รูปที่ 6.1 วงจรการทดลองใช้วงจรกรองความถี่



รูปที่ 6.2 วงจรภายในของวงจรกรองความถี่

6.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. FUJI inverter รุ่น FVR-C9S-7JE(0.1~1.5kW)
2. 3- ϕ Induction motor 0.5 แรงม้า
3. EMC Analyzer 9 kHz-1.5GHz
4. LISN Model 3810/2 LISN 50 Ω 50/250 μ H, 9 kHz-30MHz
5. ตาชั่งสปริง 0-10 กก.
6. ลูกค้อนน้ำหนัก
7. EMI Filter DELTA ELECTRONIC 06DPDW3

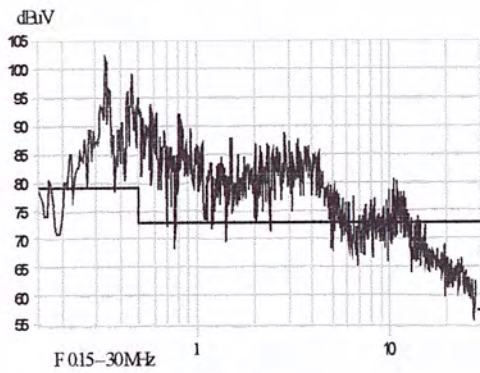
6.5 วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรและจุดวัดทดลองตามรูปที่ 6.1
2. ทดลองเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. โดยปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ 50 Hz
3. ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 20, 50 และ 80Hz โดยน้ำหนักโหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก.

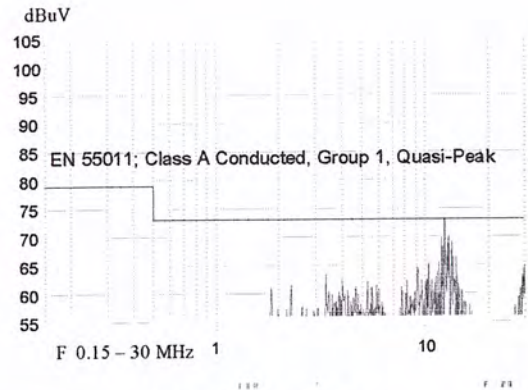
6.6 ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะนำเสนอผลการวัดระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเมื่อต่อและไม่ต่อวงจรกรองสัญญาณความถี่ในวงจร เพื่อเปรียบเทียบการลดลงของระดับสัญญาณรบกวนดังกล่าวและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน CISPR โดยมีเงื่อนไขการทดลองคือ ทดลองเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ และเปลี่ยนแปลงความถี่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ เพื่อทดลองว่าในสภาวะดังกล่าวจะส่งผลการกระทบต่อการทำงานของวงจรกรองความถี่อย่างไร

6.6.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์

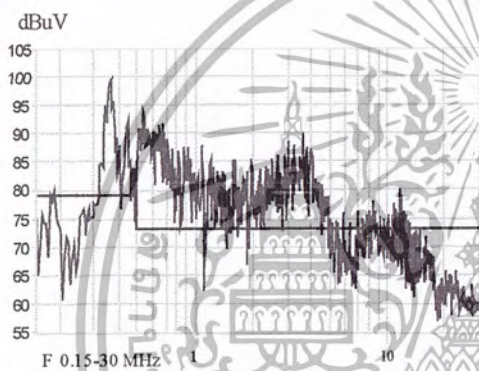


(ก) ก่อนใช้ EMI Filter

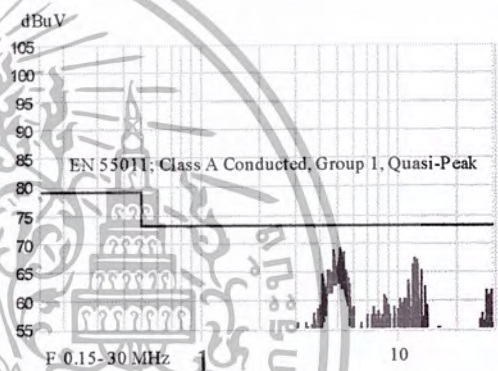


(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.3 ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.

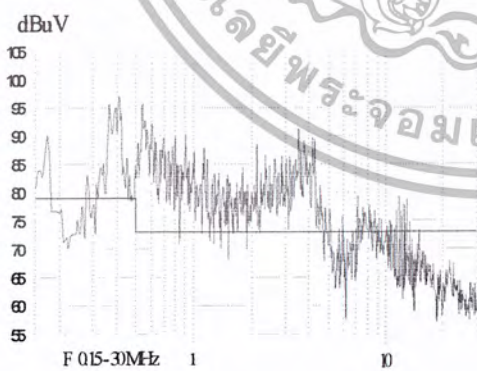


(ก) ก่อนใช้ EMI Filter

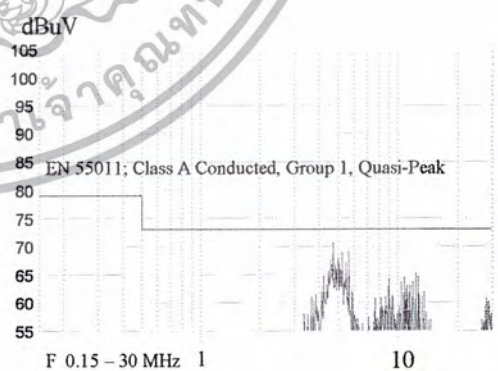


(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.4 ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.



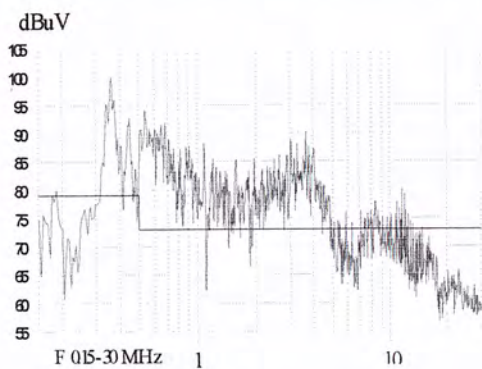
(ก) ก่อนใช้ EMI Filter



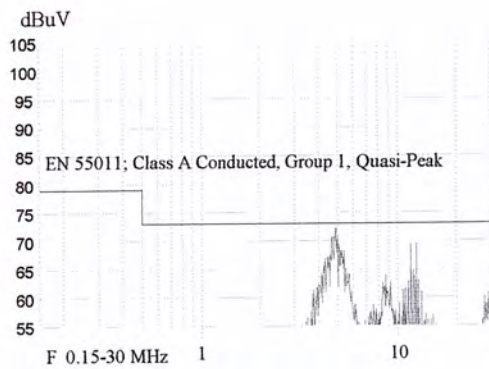
(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.5 ผลการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

6.6.2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์

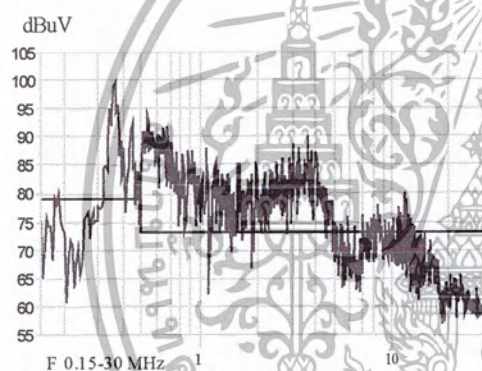


(ก) ก่อนใช้ EMI Filter

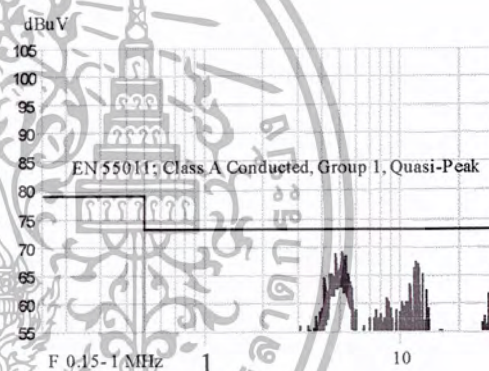


(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.6 ผลการทดลองของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz

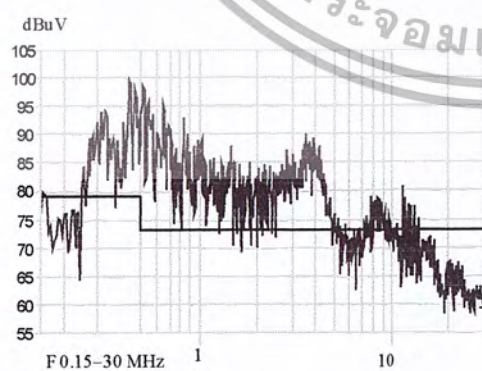


(ก) ก่อนใช้ EMI Filter

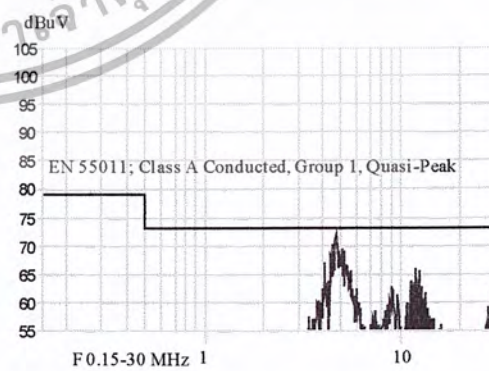


(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.7 ผลการทดลองของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(ก) ก่อนใช้ EMI Filter



(ข) หลังใช้ EMI Filter

รูปที่ 6.8 ผลการทดลองของสัญญาณรบกวนเมื่อใช้ EMI Filter ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 สรุป

จากผลการทดลองในบทนี้ทั้งในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดมอเตอร์และเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ เมื่อนำวงจรรองความถี่มาต่อร่วมกับวงจรชุดทดลองเป็นผลให้สามารถลดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนให้อยู่ภายใต้เส้นมาตรฐาน CISPR 11 ที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจากการทดลองในบทนี้พอที่จะเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่มาตามสายตัวนำที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าโดยการใช้วงจรรองความถี่ในการแก้ปัญหา



บทที่ 7

ผลการทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ ที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบพีคิบิลิยูเอ็ม เพื่อทำการวิเคราะห์ให้เห็นแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนดังกล่าวในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz โดยทำการทดลองวัดในตำแหน่งที่ระดับของสัญญาณรบกวนสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 7.1 การวัดจะอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR ดังแสดงในบทที่ 3 เพื่อเป็นข้อมูลที่สามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาได้ โดยการทดลองภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์และการเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

7.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อเก็บข้อมูลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ
2. เพื่อนำข้อมูลที่ได้อาจะวิเคราะห์ปัญหาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา

7.3 ขอบเขตการทดลอง

ทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

1. ทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และขณะเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์คงที่ 50 Hz โดยทดลองที่ย่านการวัดของ EMC Analyzer ที่ 9 kHz ถึง 1 MHz และ 1 MHz ถึง 30 MHz
2. ทดลองวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศ ก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และขณะเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 20, 40 และ 80 Hz โหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก. โดยทดลองที่ย่านการวัดของ EMC Analyzer ที่ 9 kHz ถึง 1 MHz และ 1 MHz ถึง 30 MHz

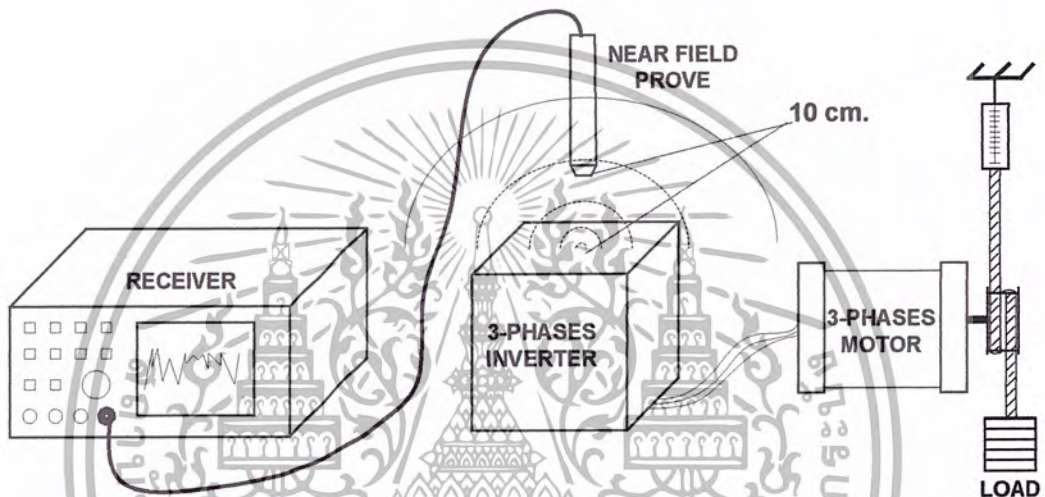
7.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. FUJI INVERTER รุ่น FVR – C9S – 7JE (0.1~ 1.5 kW)
2. 3- ϕ Induction motor 0.5 แรงม้า
3. EMC Analyzer 9 kHz – 1.5 GHz
4. NEAR FIELD PROBE
5. คาชิ่งสปริง 0 – 10 กก.
6. ลูกค้อนน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรและจัดชุดทดลองตามรูปที่ 7.1
2. ทดลองเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ 4 และ 8 กก. ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์คงที่ 50 Hz โดยทดลองที่ย่านการวัดของ EMC Analyzer ที่ 9 kHz ถึง 1 MHz และ 1 MHz ถึง 30 MHz
3. ทดลองเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 20, 40 และ 80 Hz โหลดของมอเตอร์คงที่ 4 กก. โดยทดลองที่ย่านการวัดของ EMC Analyzer ที่ 9 kHz ถึง 1 MHz และ 1 MHz ถึง 30 MHz

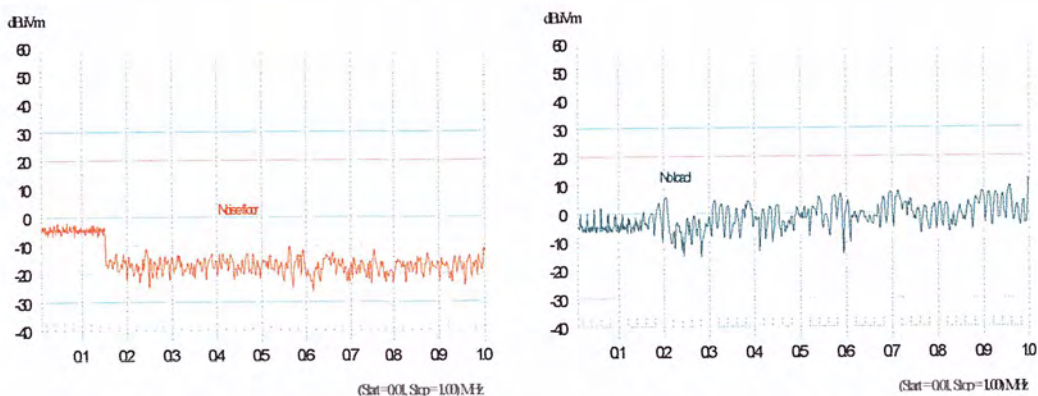


รูปที่ 7.1 วงจรทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบวงที่แพร่กระจายทางอากาศ

7.6 ผลการทดลอง

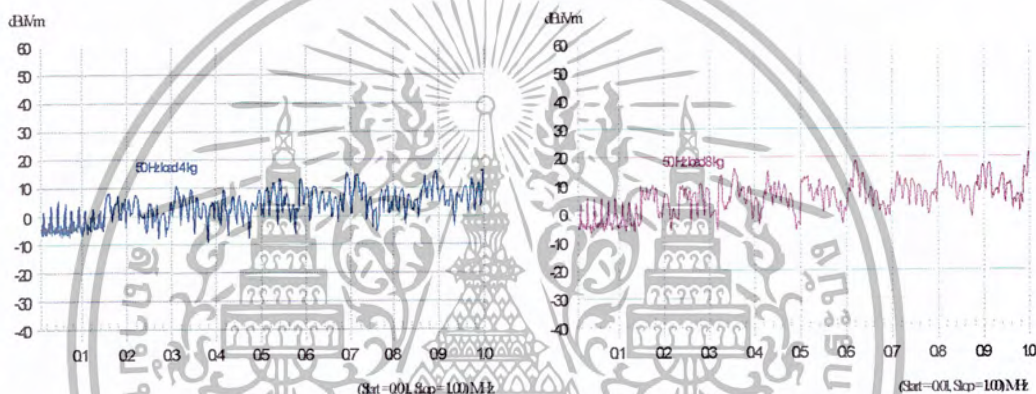
ผลการทดลองจะนำเสนอเป็นสองกรณีศึกษาคือ หัวข้อ 7.6.1 เป็นผลทดลองการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบวงในกรณีของการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ 0, 4 และ 8 กก. ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์คงที่ 50 Hz หัวข้อ 7.6.2 เป็นผลทดลองการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบวงในกรณีของการเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยคงที่น้ำหนักโหลดของมอเตอร์ไว้ที่ 4 กก. และมีการเปรียบเทียบระดับยอดคลื่นของสัญญาณรบกวนในสภาวะการเปลี่ยนแปลงโหลดมอเตอร์ดังกล่าว เพื่อให้เห็นแนวโน้มของระดับสัญญาณรบกวนที่เปลี่ยนไป โดยทดลองที่ย่านการวัดของ EMC Analyzer ที่ 9 kHz ถึง 1 MHz และ 1 MHz ถึง 30 MHz

7.6.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์



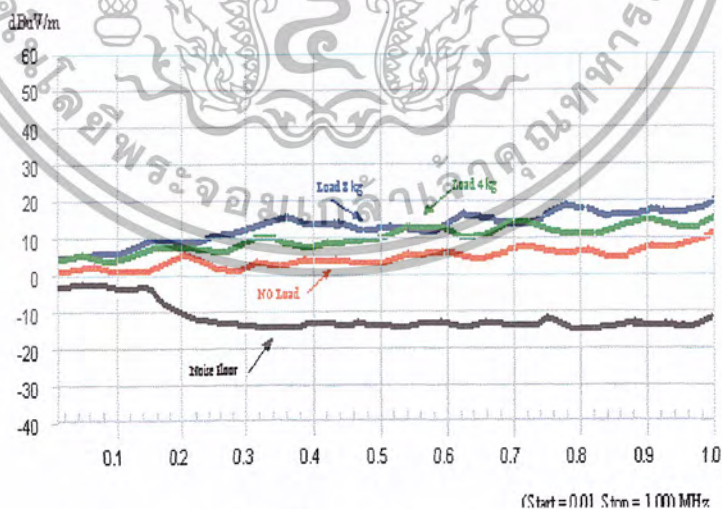
(ก) ก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

(ข) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



(ค) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.

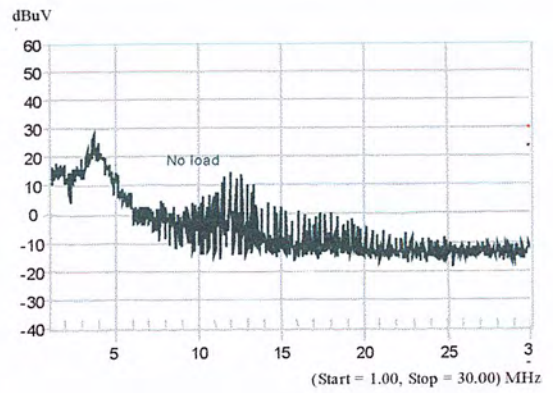
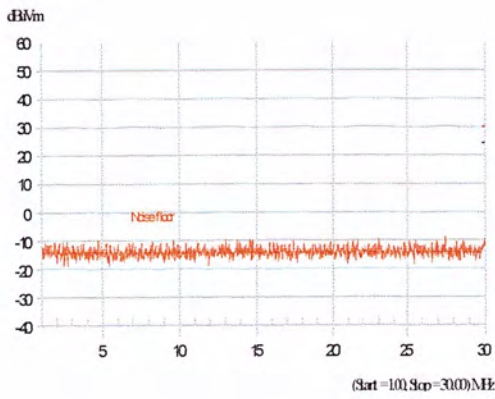
(ง) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.



(จ) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

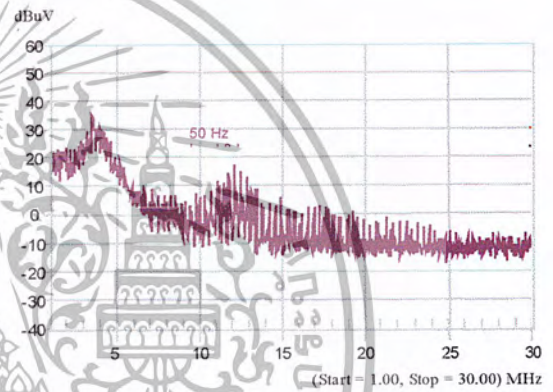
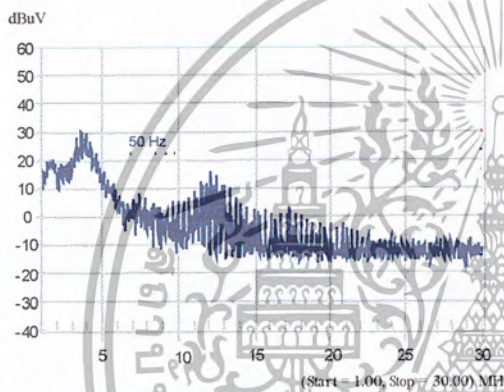
รูปที่ 7.2 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz ที่ย่านวัด 0.009-1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



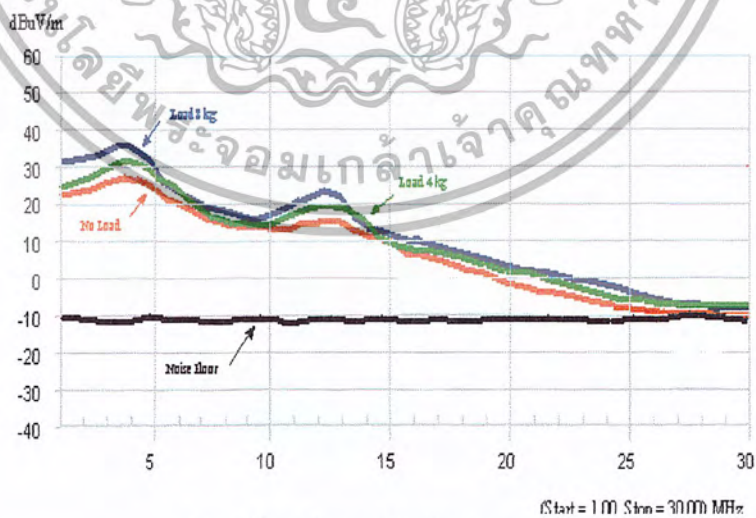
(ก) ก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

(ข) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 0 กก.



(ค) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก.

(ง) โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 8 กก.

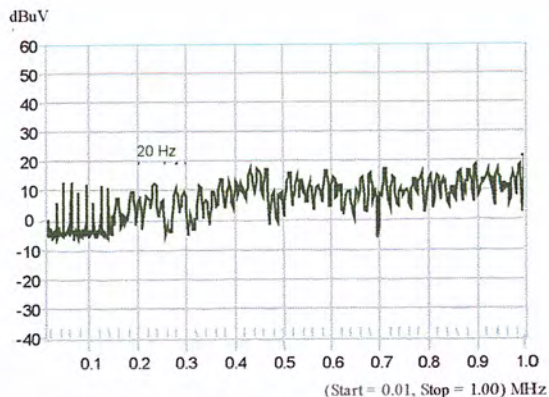
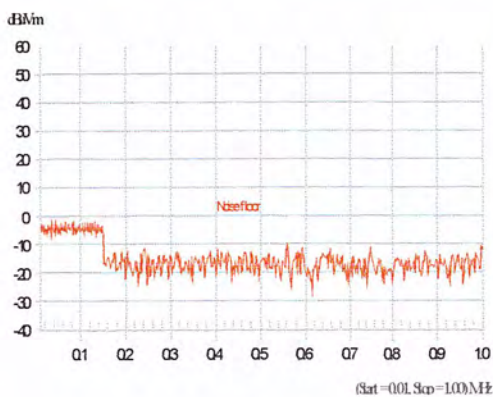


(จ) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 7.3 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz ที่ย่านวัด 1 ถึง 30 MHz

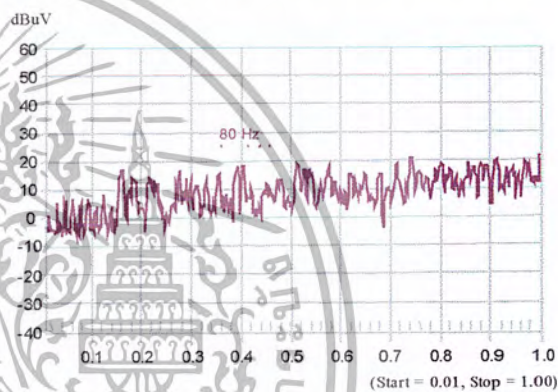
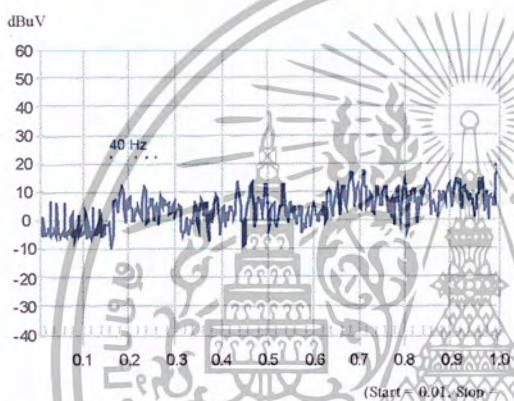
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6.2 ผลทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์



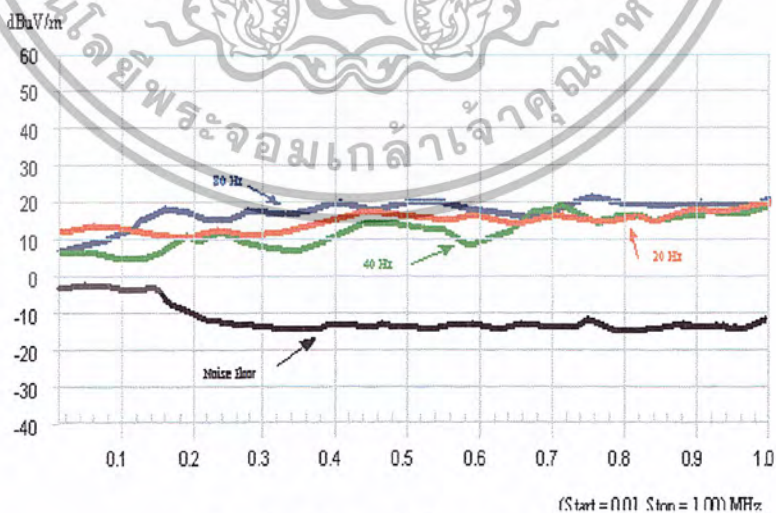
(ก) ก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

(ข) ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



(ค) ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz

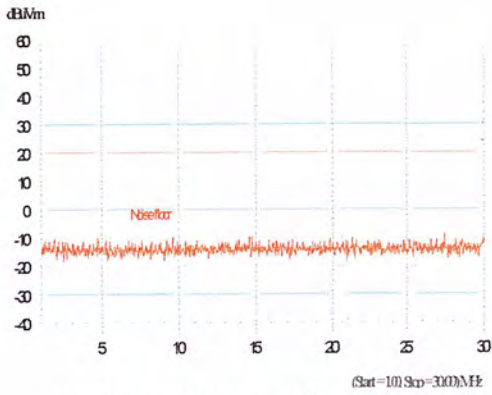
(ง) ความถี่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz



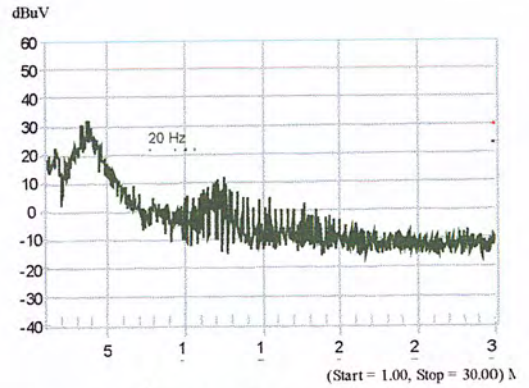
(จ) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 7.4 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 กก. ที่ย่านวัด 0.009 ถึง 1MHz

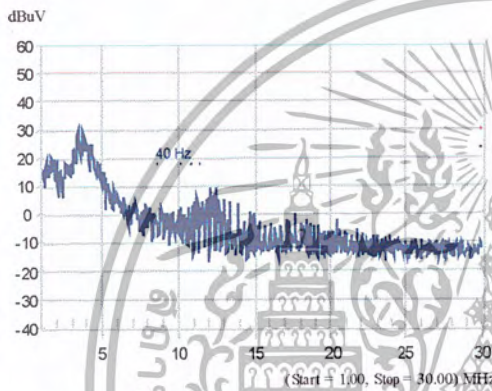
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



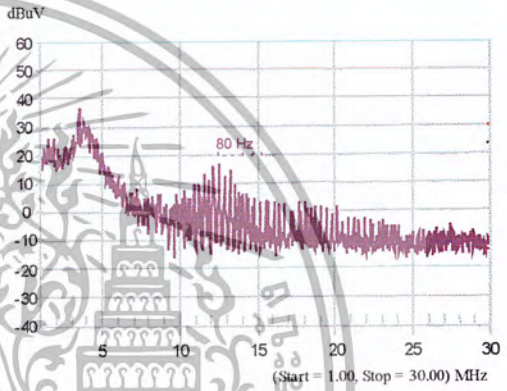
(ก) ก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์



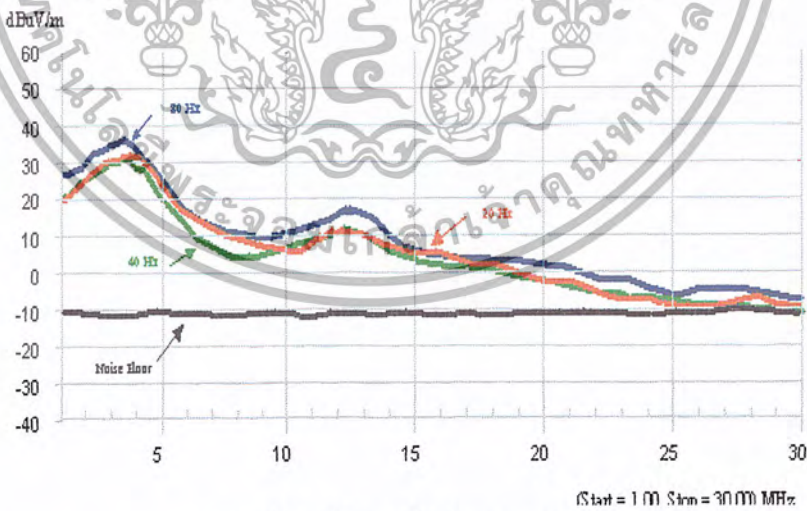
(ข) ความถี่เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 20 Hz



(ค) ความถี่เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 Hz



(ง) ความถี่เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 80 Hz



(จ) เปรียบเทียบระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 7.5 ผลการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ โหลดของมอเตอร์เท่ากับ 4 ก.ที่ย่านวัด 1 ถึง 30 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 สรุป

ในกรณีของการเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1MHz มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ โหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 7.2(จ) ส่วนผลการวัดในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz ระดับของสัญญาณรบกวนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น จนกระทั่งไม่มีผลของสัญญาณรบกวนจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อความถี่สูงถึง 30 MHz ดังแสดงในรูปที่ 7.3(จ) ส่วนการเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณรบกวนน้อย

ในกรณีการเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มการเกิดสัญญาณรบกวนเหมือนกับกรณีแรก คือระดับของสัญญาณรบกวนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นและเมื่อความถี่สูงขึ้นการเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ส่งผลน้อยมาต่อระดับของสัญญาณรบกวน

จากการทดลองทั้งสองกรณีจะเห็น ได้มีระดับการเกิดสัญญาณรบกวนที่ใกล้เคียงกัน เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานขับเคลื่อนมอเตอร์ระดับของสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบระดับสัญญาณรบกวนก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (Noise Floor) และมีการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยน โหลดของมอเตอร์และความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ที่เกิดจากการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบพิตช์เบิลยูเอ็ม ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นอินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปขนาด 2 กิโลวัตต์ จ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดครึ่งแรมม้า (รายละเอียดของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่อยู่ในภาคผนวก) โดยได้ศึกษาผลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทั้งที่มาตามสายตัวนำและแพร่กระจายทางอากาศภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์และความถี่ของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยในการทดลองจะอ้างอิงมาตรฐาน CISPR เป็นหลัก และมีการทดลองประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำด้วย จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปแยกเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ที่เกินระดับมาตรฐานจะอยู่ในย่านความถี่ไม่เกิน 20 MHz มีระดับการรบกวนของสัญญาณสูงสุดอยู่ที่ประมาณ ไม่เกิน 100 dBuV อยู่ในย่านความถี่ 150 kHz ถึง 1 MHz และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ส่วนในย่านความถี่ประมาณ 9 kHz ถึง 200 kHz จะปรากฏผลของความถี่ในการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจนคือ ค่าสูงสุดของระดับสัญญาณ (Amplitude) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจะอยู่ที่ความถี่ 15.5, 31, 46.5...kHz ตามลำดับซึ่งเมื่อทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PSpice จำลองการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน โดยให้ความถี่ในการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 15.5 kHz ผลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนก็ออกมาในลักษณะเดียวกันกับการทดลองวัด
2. ผลการทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำหลังจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ระดับของสัญญาณรบกวนจะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงกว่า 2 MHz ส่วนในย่านความถี่ 150 kHz ถึง 2 MHz เมื่อเพิ่มโหลดของมอเตอร์สูงขึ้นระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็กการเปลี่ยนแปลงโหลดทำให้กระแสของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลา (di/dt) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนค่อนข้างคงที่ จากเหตุดังกล่าวจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์จะไม่ส่งผลมากนักต่อการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน
3. การเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะทำให้ระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำสูงขึ้นดังแสดงในผลการทดลองและจำลองในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 1 MHz เห็นได้ว่าเมื่อปรับความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 20 Hz ระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจะสูงกว่าเมื่อปรับความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 50 และ 80 Hz
4. จากผลการทดลองวัดจะเห็นได้ว่าระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำยังเกินระดับมาตรฐานอยู่ การแก้ปัญหานี้ดังแสดงในบทที่ 6 โดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่สำเร็จรูปมาต่อ

เข้ากับวงจรทางเข้าของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนลดลงต่ำกว่าระดับเส้นมาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำได้อย่างสมบูรณ์

5. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนที่แพร่กระจายทางอากาศที่ทดลองวัดอยู่ในย่านความถี่ 1MHz ถึง 30 MHz มีระดับของสัญญาณรบกวนสูงสุดอยู่ประมาณ 35 dBuV/m ที่ย่านความถี่ 3 MHz ถึง 4 MHz หลังจากนั้นมีความถี่ไม่มีผลลงจนกระทั่งเท่ากับระดับของสัญญาณรบกวนก่อนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ประมาณ 30 MHz ผลการเพิ่มโหลดของมอเตอร์ทำให้ระดับสัญญาณรบกวนเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในย่านความถี่ไม่เกิน 10 MHz หลังจากนั้นไม่มีผลมากนัก ส่วนการเปลี่ยนแปลงความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ส่งผลกระทบต่อระดับสัญญาณรบกวน

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเป็นการทดลองวัดและเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลซึ่งอยู่ในย่านความถี่สูง โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการวัดมีสูงเพราะเครื่องมือวัดมีความไวต่อสัญญาณสูงมาก ดังนั้นในขั้นตอนการวัดจะต้องทำซ้ำหลายๆ ครั้งในการทดลองแต่ละกรณีเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องที่สุดและจะต้องปลดเครื่องมือวัดอื่นออกจากวงจรทั้งหมดในขณะที่ทำการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการวัด และนอกจากนี้ต้องจัดสถานะแวดล้อม ตำแหน่งการวัดและคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆตามมาตรฐานการวัดที่ใช้อ้างอิง เพื่อให้ได้ผลการวัดถูกต้องตามมาตรฐานสากล

8.3 สิ่งที่จะพัฒนาต่อไป

ผลการศึกษาในปริณัยณิพจน์นี้เป็นผลการศึกษาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำและแพร่กระจายทางอากาศ มีผลการวัดและข้อมูลของผลการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในกรณีต่างๆ และผลการทดลองประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ ในการแก้ปัญหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาออกแบบสร้างวงจรกรองความถี่ที่ใช้กับพีดีบีแอลเอ็มอินเวอร์เตอร์ได้เหมาะสมและประหยัดกว่าที่องค์ลาดนอกจากนี้การศึกษาและพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทางอากาศของอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์โดยอาศัยหลักการ Box Shielding ก็เป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

บรรณานุกรม

- [1] Henry W. Ott. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. 2nd Ed. Singapore : JOHN WILEY & SONS. Inc. 1998.
- [2] Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins “Power Electronics Converters, Applicationns, and Design,” Second edition, pp. 225-230.
- [3] S. Khomfoi, V. Kinnares and P. Viriya “Influence of PWM Characteristics on the Core Losses due to Harmonic Voltage in PWM Fed Induction Motors” IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting, 23-27 January 2000, Singapore.
- [4] Tim Williams and Keith Armstrong. EMC for Systems and Installations. Oxford : Newnes. Inc. 2000.
- [5] Jasper Goedbloed. Electromagnetic Compatibility. Singapore : Prentice Hall. Inc. 1992.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, ร.อ. เอกสารประกอบการสอนวิชา Electromagnetic Compatibility. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [7] Redl, R. “Power Electronics and Electromagnetic Compatibility” Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC’96 Records, 27th Annual IEEE, Volume : 1, 1996 pp.15-21
- [8] International Electrotechnique Commission. CISPR 11, Industrial, scientific and medical(ISM) radio-frequency equipment-Electromagnetic disturbance characteristics-Limits and methods of measurement. 3rd ed. Geneva : IEC Central Office. 1997.
- [9] International Electrotechnique Commission. CISPR 22, Information technology equipment – Radio disturbance characteristics-Limits and methods of measurement. 3rd ed. Geneva : IEC Central Office., 1997.
- [10] International Electrotechnique Commission. CISPR 16-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 1 : Radio disturbance and immunity measuring apparatus. 2nd ed. Geneva : IEC Central Office., 1999.
- [11] Bernhard Keiser. Principles of Electromagnetic Compatibility. Massachusetts : Artech House, Inc. 1987.
- [12] Tim Williams. EMC for product designers. 2nd Oxford : Newnes., 2000.
- [13] Michel Mardiguian. Controlling Radiated Emissions by Design. New York : Van Nostrand Reinhold., 1992.

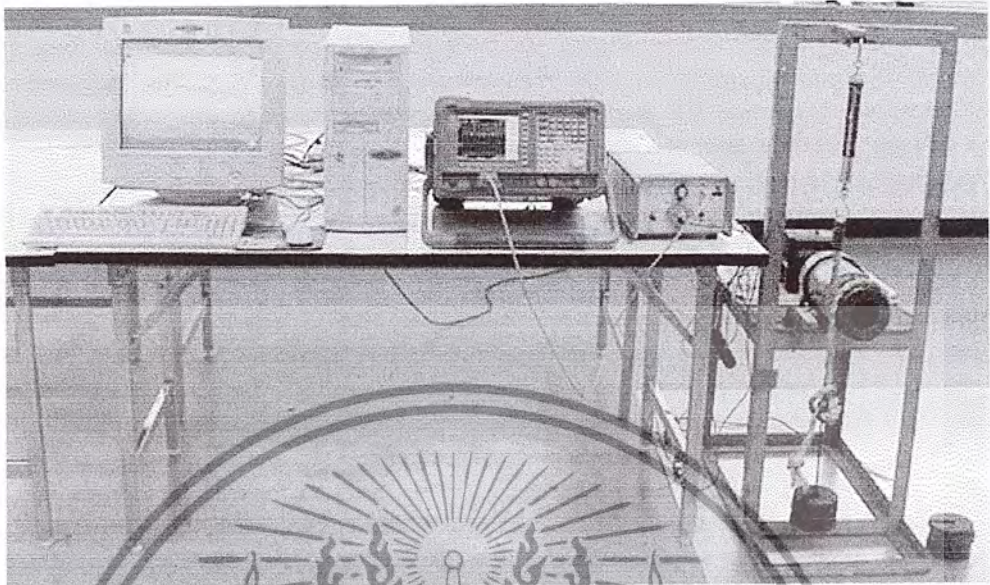
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



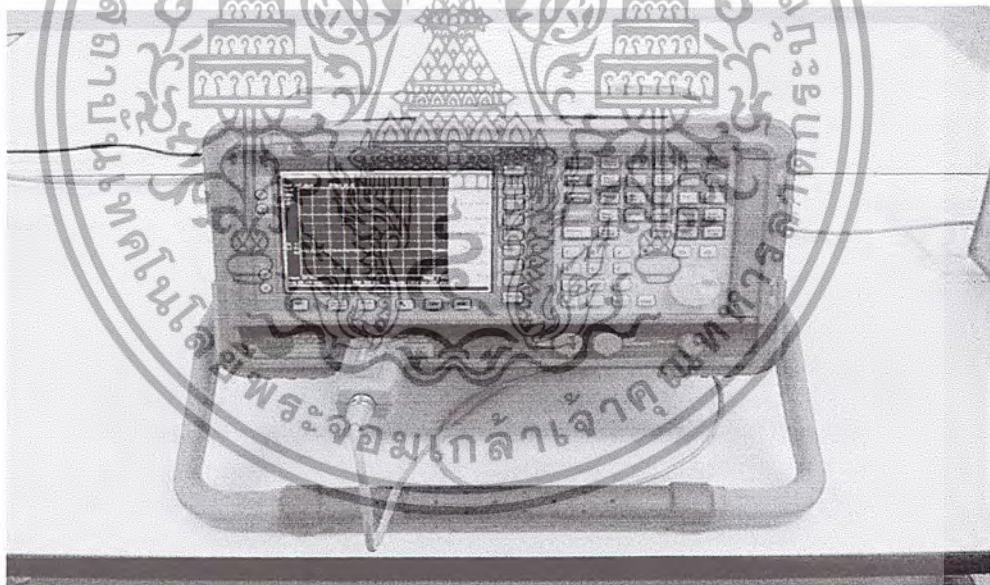
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ภาพถ่ายและข้อมูลของอุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

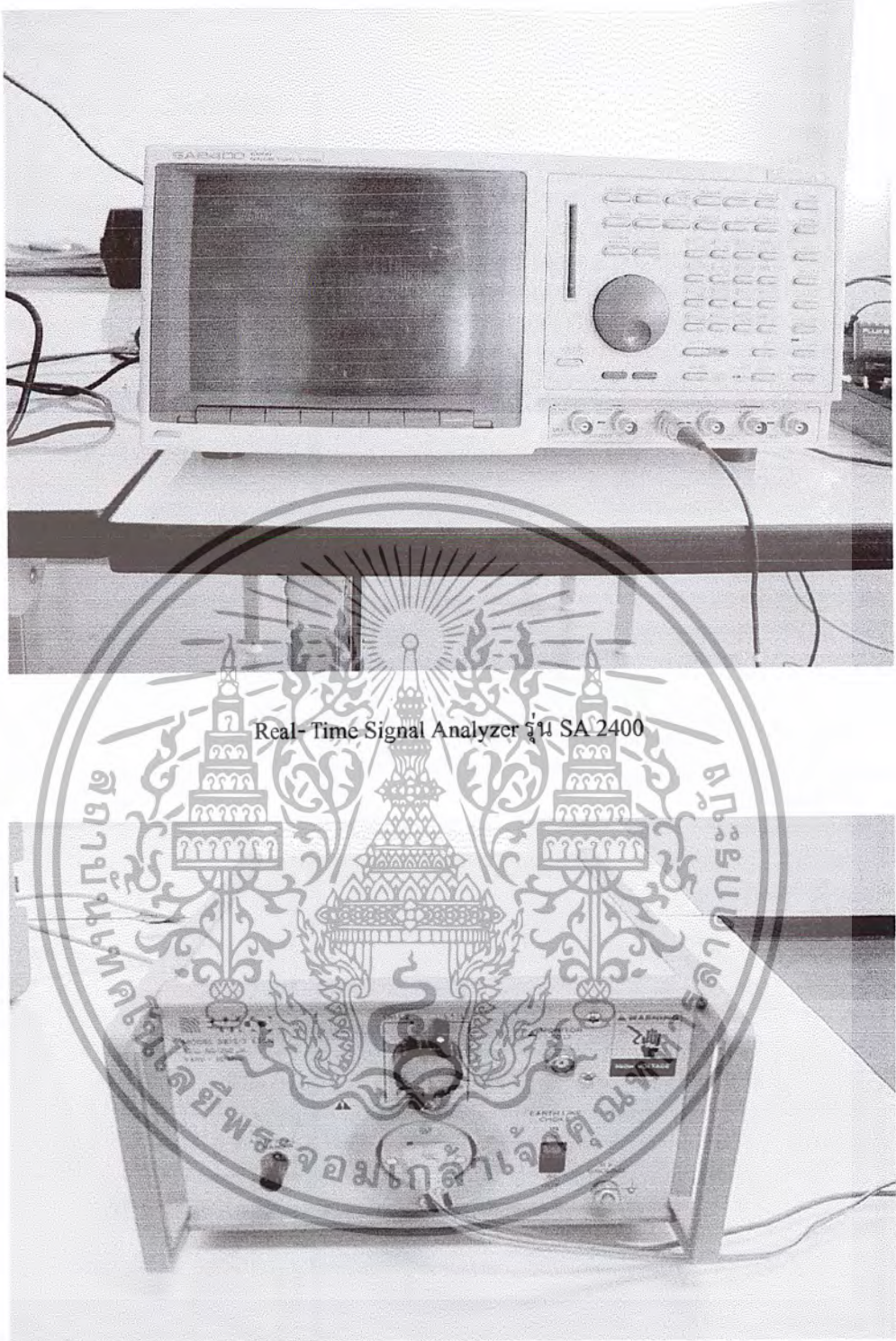


ภาพถ่ายชุดทดลอง



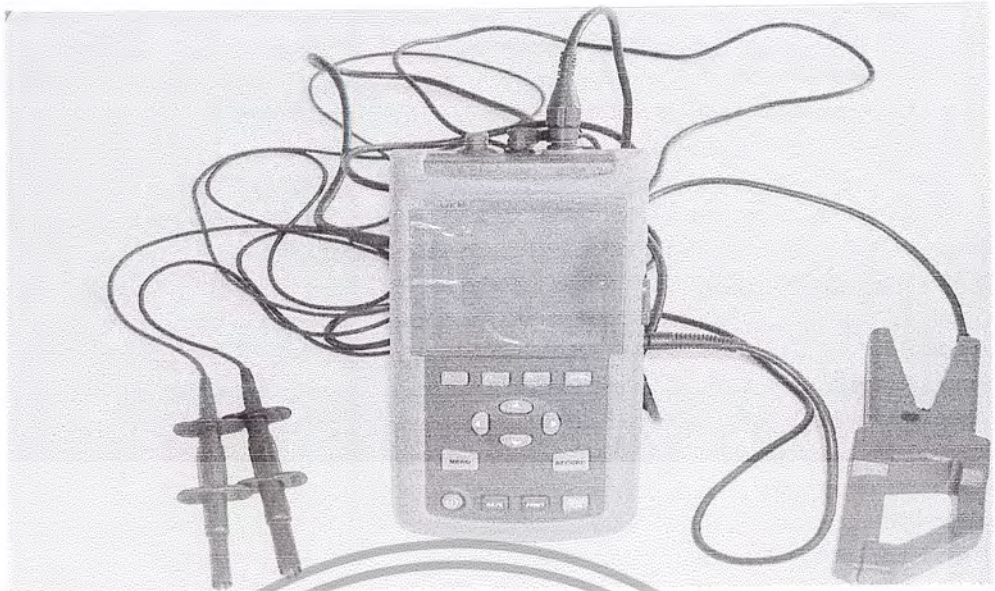
EMC Analyzer 9 kHz-1.5GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LISN Model 3810/2 LISN 50Ω $50/250 \mu\text{H}$,9 kHz -30MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Power Quality Analyzer รุ่น FLUKE 43



เครื่องวัดความเร็วรอบ

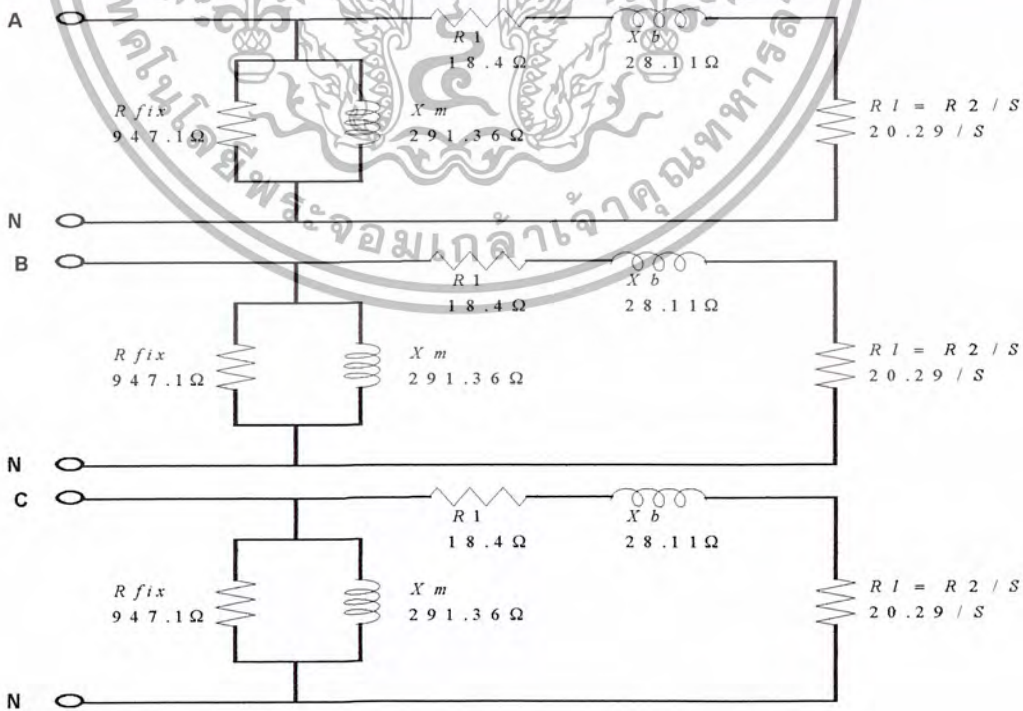
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์

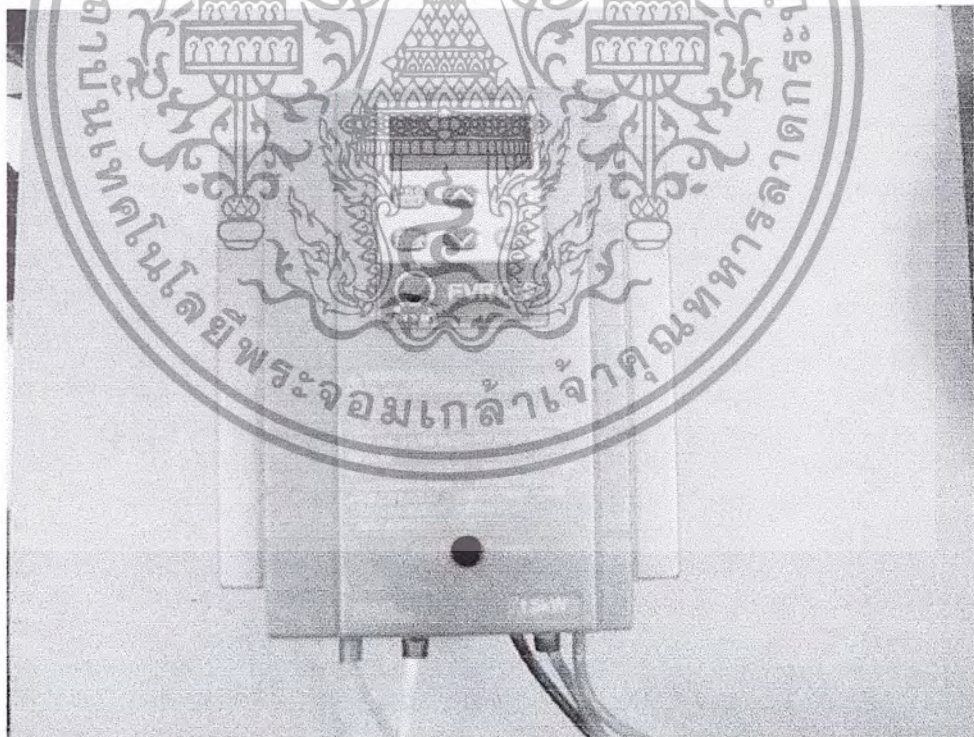
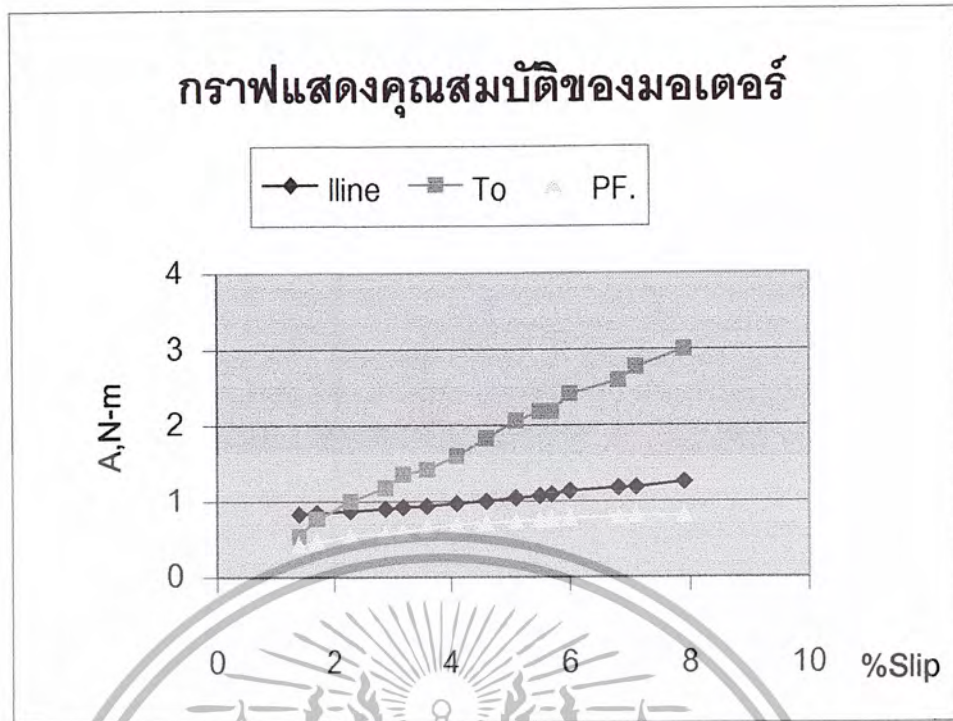


3-Ø Induction motor 0.5 แรงม้า



Modeling Three Phases Induction Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FUJI inverter รุ่น FVR-C9S-7JE(0.1~1.5 kW)

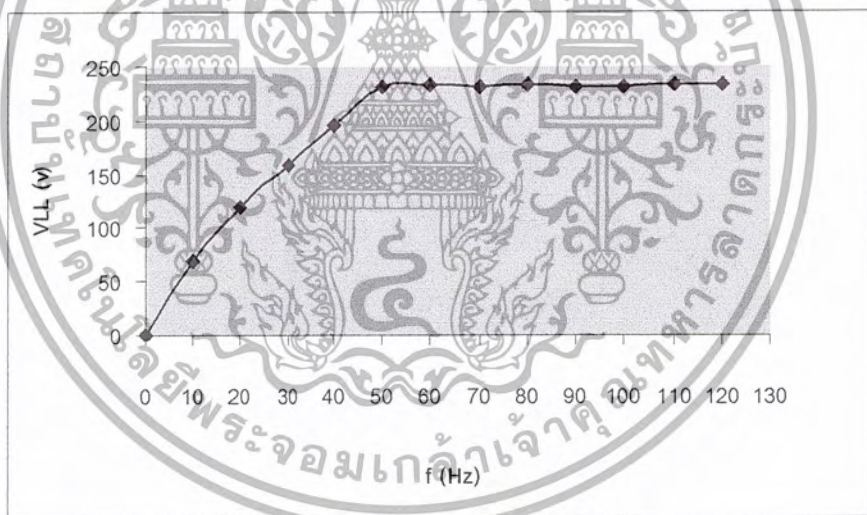
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดของอินเวอร์เตอร์

- Phase : 1 \emptyset \Rightarrow single phase
- Voltage range : 220V \sim 240V \Rightarrow AC200V Series
- Frequency : 50/60 Hz
- Rated output capacity 0.87 KVA
- Rated output current 2.1 A
- Output frequency range : 1 \sim 120 Hz

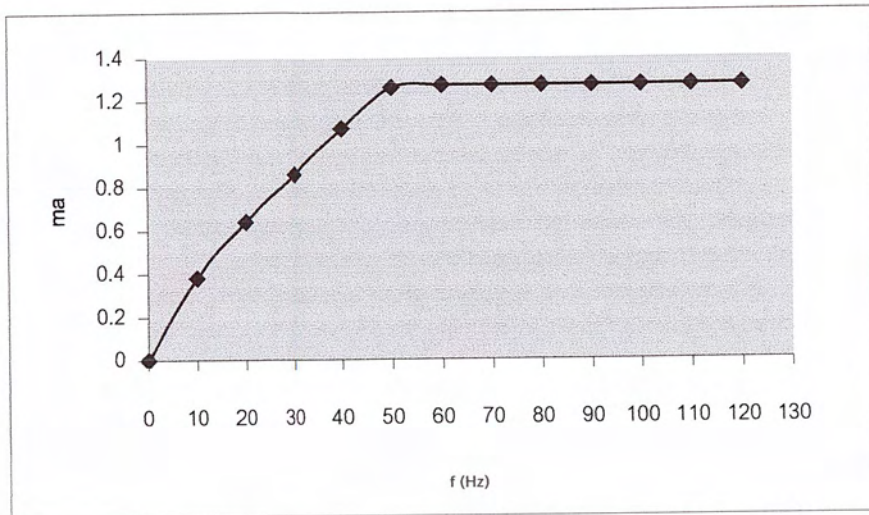
ตารางบันทึกผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์

$f(\text{Hz})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$V_{LL}(V)$	0	69.8	118.7	158.5	195.8	230.8	232.6	232	233	231.4	232.1	232.8	232.5
m_a	0	0.38	0.64	0.86	1.07	1.26	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V, f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m_a กับ f



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้