

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกที่ป้อนด้วยพีดีบีเอ็มโดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

ANALYSIS OF ADDITIONAL LOSSES DUE TO HARMONIC VOLTAGES IN
AN INDUCTION MOTOR FED BY PWM H-BRIDGE MULTILEVEL
INVERTER DRIVE



ฉพ.
๑ 2327
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61631
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

b. 116 00170
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2430-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSIS OF ADDITIONAL LOSSES DUE TO HARMONIC VOLTAGES IN
AN INDUCTION MOTOR FED BY PWM H-BRIDGE MULTILEVEL
INVERTER DRIVE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ป้อนด้วยพีดับบลิวเอ็ม โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

นักศึกษา

นายฉัตรชัย เอมสะอาด

รหัสนักศึกษา

45061011

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทำการวิเคราะห์และศึกษาเกี่ยวกับค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ป้อนด้วยสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถต่อการใช้งานกับงานกำลังไฟฟ้าสูง, โดยสมรรถนะของระบบจึงมีความสำคัญพิเศษ ดังนั้นค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากสัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ของพีดับบลิวเอ็มจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับจึงควรถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งค่าแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆที่จะต้องนำมาพิจารณาอันได้แก่ค่าดัชนีการมอดดูเลชัน, ความถี่สวิตช์, เทคนิคการมอดดูเลชัน และระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นระหว่างอินเวอร์เตอร์หลายระดับกับอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ซึ่งจะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองและคำนวณฟังก์ชันการสูญเสียเพื่อค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ ชุดทดสอบในทางปฏิบัติประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ซึ่งจะใช้ทดสอบทั้งอินเวอร์เตอร์ทั่วไปและอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และสัญญาณพีดับบลิวเอ็มนั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ในวงจรกำลัง ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้จะนำไปเป็นประโยชน์สำหรับพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์หลายระดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title ANALYSIS OF ADDITIONAL LOSSES DUE TO
HARMONIC VOLTAGES IN AN INDUCTION MOTOR
FED BY PWM H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER
DRIVE

Student Mr.Chatrchai Aimsaard

Student ID. 45061011

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2006

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate additional loss mechanisms due to harmonic voltages in an induction motor fed by a PWM H-bridge multilevel inverter drive. Because a multilevel inverter system is utilized in high power application, the performance of the drive system is particularly important. Therefore, the additional losses of an induction motor due to non-sinusoidal waveform of PWM multilevel inverter should be considered so that the design of optimal multilevel inverter drives and induction motors can be achieved. Since harmonic output voltages of a multilevel inverter drive depend upon PWM characteristics, the PWM multilevel inverter parameters such as modulation indices, switching frequencies, PWM schemes, and dc voltage levels are discussed. The comparison between a conventional inverter drive and a multilevel inverter drive is also evaluated in the additional loss point of view. MATLAB simulation using loss factors is used as a tool to evaluate additional losses in an induction motor. Then, the additional loss characteristics from simulation results are examined with the experimental results. An experimental test rig consists of a 3 Hp induction motor supplied by both the conventional inverter and the multilevel inverter. A microcontroller board, PIC18F4431, is used to generate a PWM signal. Power mosfet is used as a switching device in the main power circuit. The results from the study will be particularly useful for an appropriated multilevel induction motor drive configuration.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความกรุณาของ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาในด้านต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอันเปรียบเสมือนบ้านหลังที่สอง, ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์, สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางด้านตำราเอกสารอ้างอิง และข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตรวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

คุณค่าและประโยชน์ที่ได้มีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การดูแลด้วยดีเสมอมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพนับถือและผู้มีพระคุณทุกท่าน

นิตร์ชัย เอ็มสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 วิธีการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.1.1 โครงสร้างและชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.1.2 หลักการทำงาน.....	5
2.1.3 วงจรสมมูล.....	7
2.1.4 การวิเคราะห์วงจรสมมูล.....	8
2.1.5 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	11
2.2 ค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
2.3 สรุป.....	15
บทที่ 3 การสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ฟังก์ชันการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก.....	16
3.3 วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสูญเสีย.....	18
3.4 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

3.5 สรุป	22
บทที่ 4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ	23
4.1 โครงสร้างและชนิดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	23
4.1.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดเคลมปี	24
4.1.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์เคลมปี	25
4.1.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Generalized	26
4.1.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์	27
4.2 การใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์	28
4.3 สรุป	30
บทที่ 5 การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	31
5.1 การคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	31
5.2 การวิเคราะห์การไหลการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	31
5.2.1 ผลกระทบของค่าดัชนีการมอดดูเลชันต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	31
5.2.2 ผลกระทบของระดับแรงดันไฟตรงต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	33
5.2.3 ผลกระทบของความถี่มูลฐานต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	34
5.2.4 ผลกระทบของความถี่สวิตช์ต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	35
5.2.5 ผลกระทบของเทคนิคการมอดดูเลชันต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก	36
5.3 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	37
5.3.1 การทำงานย่านความเร็วต่ำกว่าพิกัด	38
5.3.2 การทำงานย่านความเร็วสูงกว่าพิกัด	39
5.4 สรุป	40
บทที่ 6 การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์	65
6.1 การออกแบบวงจรกำลัง	65
6.1.1 การออกแบบแบบสวิตช์กำลัง	65
6.1.2 การออกแบบวงจรขับนำ	66
6.2 การออกแบบวงจรควบคุม	67
6.2.1 การมอดดูเลชันพีคดับลิวเอ็มของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
6.2.2 การมอดูเลชันพีคดับลิวเอ็มของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	70
6.2.3 การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	72
6.2.4 การออกแบบวงจรผสมสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม	77
6.3 การออกแบบโปรแกรม	79
6.4 สรุป	80
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	81
7.1 วิธีการทดสอบ	81
7.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ.....	83
7.2.1 ผลการทดสอบเทคนิค SPWM	83
7.2.2 ผลการทดสอบเทคนิค THPWM	85
7.2.3 ผลการทดสอบเทคนิค SVPWM	87
7.3 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ.....	89
7.3.1 ผลการทดสอบเทคนิค SPWM	89
7.3.2 ผลการทดสอบเทคนิค THPWM	93
7.3.3 ผลการทดสอบเทคนิค SVPWM	97
7.4 เปรียบเทียบค่าสูญเสียระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ	101
7.4.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค SPWM	101
7.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค THPWM	102
7.4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค SVPWM	103
7.5 สรุป	105
บทที่ 8 สรุปผล	106
8.1 วิจารณ์ผลการทดสอบ	106
8.2 สรุป	106
8.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	107
เอกสารอ้างอิง	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	117
ภาคผนวก ค รูปอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
3.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
4.1 ระดับแรงดันไฟตรงที่เหมาะสมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ ควบคุมมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 380 โวลต์	30
6.1 กระบวนการผสมสัญญาณพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ.....	76
7.1 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SPWM.....	84
7.2 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค THPWM	86
7.3 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SVPWM.....	88
7.4 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SPWM.....	92
7.5 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค THPWM.....	96
7.6 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM.....	100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....5
2.2	วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ7
2.3	วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อโอนย้ายมาด้านสเตเตอร์.....8
2.4	วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....10
2.5	การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่.....13
2.6	แผนผังการส่งผ่านพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....15
3.1	แสดงค่าการสูญเสียเดียวกันแต่ใช้ฟังก์ชันต่างกัน.....17
3.2	ตัวอย่างฟังก์ชันการสูญเสีย.....18
3.3	สัญญาณแรงดัน 3 เฟส แบบกึ่งสี่เหลี่ยม.....19
3.4	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์.....20
3.5	ฟังก์ชันการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....22
4.1	เปรียบเทียบสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต.....23
4.2	อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์.....24
4.3	อินเวอร์เตอร์สามระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์.....25
4.4	อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสามระดับชนิด Generalized.....26
4.5	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์.....27
4.6	แสดงความแตกต่างของจุดนิวตรอนและแรงดันเอาต์พุต.....28
4.7	เปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดเชอบริดจ์กับอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น.....29
5.1	แสดงค่าการสูญเสียที่แปรตามค่าดัชนีการมอดดูเลชัน.....32
5.2	เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อปรับแรงดันไฟตรง.....33
5.3	แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อมีการปรับความถี่มูลฐาน.....34
5.4	เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อมีการปรับความถี่สวิตซ์.....35
5.5	แสดงแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อมีความถี่สวิตซ์ที่แตกต่างกัน.....36
5.6	เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อใช้เทคนิคในการมอดดูเลชันแบบ ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ.....36
5.7	เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อใช้เทคนิคในการมอดดูเลชันแบบ ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ.....37
5.8	เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วย อินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดดูเลชันแบบ SPWM.....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
5.9 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM	38
5.10 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM	39
5.11 แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในย่านความเร็วสูงกว่าพิกัด	40
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	41
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	42
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	43
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	44
5.13 สูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	45
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	46
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	47
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	48
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	49
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	50
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	51
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	52
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 9 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	53
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 9 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	54
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 9 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	55
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	56
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	57
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	58
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	59
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	60
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	61
5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM.....	62
5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM.....	63
5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก 15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
6.1 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์	65
6.2 แสดงโครงสร้างของวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส.....	65
6.3 วงจรขับนำของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	66
6.4 วงจรกำลังหนึ่งเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้	67
6.5 วงจรกำลังทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	67
6.6 แสดงการมอดูเลชันแบบเร็กคูลาร์แซมปริงที่มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณไซน์	68
6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุต.....	69
6.8 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ PD	70
6.9 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ POD	71
6.10 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ PSCPWM.....	71
6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุต สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	72
6.12 แสดงวิธีการสร้างสัญญาณ A_1 , A_2 และ A_3	74
6.13 แสดงการมอดูเลชันเทคนิค SPWM ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ	75
6.14 แสดงตำแหน่งสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับของเฟส A	77
6.15 ไดอะแกรมของวงจรควบคุม	77
6.16 แสดงวงจรผสมสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟส	78
6.17 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์	79
6.18 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม	80
7.1 ตัวอย่างการวัดค่ากำลังไฟฟ้ามูลฐานและแรงดันมูลฐานด้วย PZ4000	82
7.2 ตัวอย่างการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟรวมด้วย PZ4000.....	82
7.3 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SPWM 50 Hz	83
7.4 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ SPWM.....	83
7.5 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค THPWM ความถี่ 50 Hz...85	85
7.6 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ THPWM	85
7.7 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SVPWM ความถี่ 50 Hz ...87	87
7.8 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ SVPWM.....	87
7.9 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 10 Hz	89
7.10 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 20 Hz	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
7.11 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 30 Hz	90
7.12 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 40 Hz	90
7.13 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 50 Hz	90
7.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM.....	91
7.15 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 10 Hz	93
7.16 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 20 Hz	93
7.17 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 30 Hz	94
7.18 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 40 Hz	94
7.19 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 50 Hz	94
7.20 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM	95
7.21 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 10 Hz	97
7.22 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 20 Hz	97
7.23 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 30 Hz	98
7.24 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 40 Hz	98
7.25 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 50 Hz	98
7.26 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM.....	99
7.27 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่าง อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	101
7.28 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	102
7.29 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่าง อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค THPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	102
7.30 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค THPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	103
7.31 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่าง อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	104
7.32 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM $f_s = 4.8$ kHz.....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในวงการอุตสาหกรรมได้มีการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำกันอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปจะใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด 2 ระดับ ซึ่งเมื่อมีความต้องการการควบคุมมอเตอร์ในขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจึงยังมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าการสูญเสียในตัวของมอเตอร์เอง นอกเหนือจากค่าสูญเสียปกติที่เกิดจากสัญญาณแรงดันมูลฐานแล้ว ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเช่นกัน เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปจะเป็นอินเวอร์เตอร์ 6 สวิตช์ (2 ระดับ) ซึ่งจะมีสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตเป็นลักษณะของสัญญาณแบบพีคดับลิวเอ็ม ดังนั้นค่าสูญเสียที่เกิดจากสัญญาณแรงดันไม่ไซน์หรือแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าสูง

หนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ คือการสร้างสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณไซน์มากยิ่งขึ้น วิธีการหนึ่งคือการใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งจะมีสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตที่เข้าใกล้ไซน์มากกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และด้วยคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่สามารถรองรับกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ อีกทั้งยังสามารถต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ เป็นต้น ได้อย่างสะดวก

โดยค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันฮาร์มอนิก เนื่องจากสัญญาณไม่เป็นไซน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับนั้นเคยได้ถูกนำมาพิจารณาแล้ว[1-4] ประกอบกับยังไม่มียานวิจัยในการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ที่ระดับแรงดันมูลฐานเดียวกัน เพื่อคำนวณหาค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก โดยผลที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคำนึงถึงค่าสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการปรับปรุงสัญญาณของแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้มีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าลดลง และยังสามารถเป็นแนวทางการใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.3 วิธีการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
3. วิเคราะห์และคำนวณทางคณิตศาสตร์ค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อหาจำนวนระดับที่เหมาะสมในการควบคุมมอเตอร์
4. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเพื่อใช้ในการทดลองเก็บผลเปรียบเทียบกับ
5. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์เพื่อใช้ในการทดลอง
6. เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ขอบเขตการวิจัยจะทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกเพียงเท่านั้น โดยไม่นำค่าการสูญเสียที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเข้ามาคำนวณ
2. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ เช่น ระดับแรงดันไฟตรง, ความถี่สวิตชิ่ง, ความถี่มูลฐาน และค่าดัชนีการมอดดูเลชัน เป็นต้น
3. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับและอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อใช้ในการทดลอง
4. เปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำระหว่างถูกป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ กับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกป้อนโดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา, วิธีการวิจัย, ขอบเขตของงานวิจัย, โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, ค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ, และสรุป
- บทที่ 3 การสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ บทนำ, ฟังก์ชันการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก, วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสูญเสีย, ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ และสรุป
- บทที่ 4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ โครงสร้างและชนิดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ, การใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ และสรุป
- บทที่ 5 การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก, การวิเคราะห์กลไกการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก, เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ และสรุป
- บทที่ 6 การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์ การออกแบบวงจรกำลัง, การออกแบบวงจรควบคุม, การออกแบบโปรแกรม และสรุป
- บทที่ 7 ผลการทดลอง วิธีการทดสอบ, ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ, ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ, เปรียบเทียบค่าสูญเสียระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ และสรุป
- บทที่ 8 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง วิจารณ์ผลการทดสอบ, สรุป และข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ภาคผนวก ค รูปอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เข้าใจกลไกค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ถูกป้อนด้วยสัญญาณพีคแบบลิแวนของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
2. เข้าใจหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซพริคซ์
3. สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คำนึงถึงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

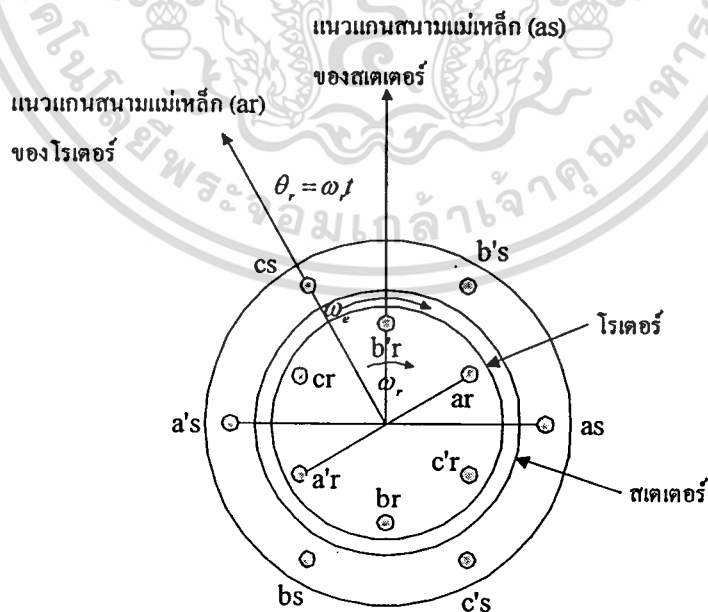
มอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.1 โครงสร้างและชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ด้วยโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความทนทาน, น้ำหนักเบา และง่ายต่อการบำรุงรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยการใช้งานก็ได้มีการพัฒนาการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วให้เหมาะสมกับงาน เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแบ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำออกได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่โรเตอร์มีการพันขดลวด (Wound Rotor) และชนิดโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) ซึ่งจะหล่อตัวนำภายใน โรเตอร์และต่อเชื่อมให้ถึงกันด้วยแหวนอลูมิเนียมทั้งสองข้างแทนการพันขดลวด โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกนั้นจะเป็นที่นิยมใช้งานมากกว่า เพราะมีความทนทานและมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการบำรุงรักษามากกว่า และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกขนาด 3 แรงม้า 380 โวลต์

2.1.2 หลักการทำงาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งวางให้ห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในมอเตอร์ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนด้านสเตเตอร์เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเร็วซิงโครนัสได้ตามสมการที่ 2.1

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

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส
 f_s คือ ความถี่ของขดลวดสเตเตอร์
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

โดยสนามแม่เหล็กหมุนจะไปเหนี่ยวนำกับขดลวดด้านโรเตอร์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดด้านโรเตอร์ ซึ่งขดลวดโรเตอร์นั้นได้มีการต่อให้ครบวงจรไว้แล้วจึงทำให้มีกระแสไหลในขดลวดโรเตอร์ กระแสในขดลวดโรเตอร์นี้ก็จะเป็นตัวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเช่นกันแต่จะมีความเร็วเท่ากับส่วนต่างของความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วของโรเตอร์ ค่าส่วนต่างของความเร็วนี้เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วซิงโครนัสจะเรียกว่า "สลลิป" ตามสมการที่ 2.2

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ s คือ ความเร็วสลลิป
 N_r คือ ความเร็วโรเตอร์
 ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์
 ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์
 ω_{sl} คือ ความเร็วเชิงมุมของสลลิป

แรงบิดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับการรวมกันทางเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กฝั่งสเตเตอร์กับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์จะมีค่าตามสมการที่ (2.3)

$$T = \pi \left(\frac{P}{2} \right) l r B_p F_p \sin \delta \quad (2.3)$$

เมื่อ	T	คือ แรงบิดของมอเตอร์
	l_r	คือ ความยาวตามของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก
	B_p	คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศ
	F_p	คือ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นบน โรเตอร์ (Rotor mmf)
	δ	คือ มุมระหว่างกระแสโรเตอร์กับกระแสแมกนีไตซิ่ง

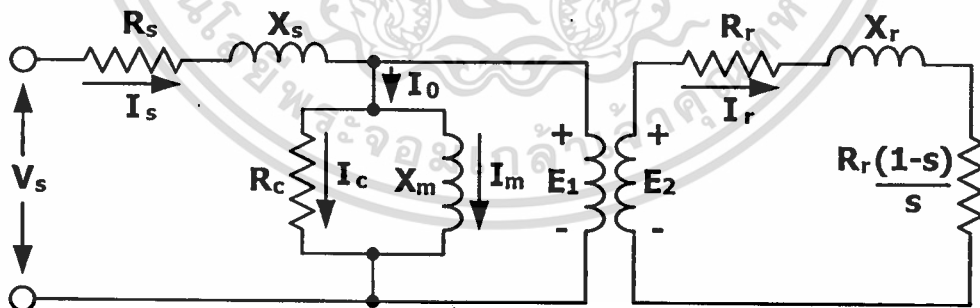
โดยสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามสมการที่ 2.3 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \left| \overline{\psi}_m \right| \left| \overline{I}_r \right| \sin \delta \quad (2.4)$$

เมื่อ	$\left \overline{\psi}_m \right $	คือ ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่ลัพธ์ต่อขั้วแม่เหล็ก
	$\left \overline{I}_r \right $	คือ กระแสสูงสุดบนโรเตอร์

2.1.3 วงจรสมมูล

จากโครงสร้างและหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเห็นได้ว่าการการทำงานที่คล้ายคลึงกับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่แตกต่างกันที่ขดลวดด้านทุติยภูมิของมอเตอร์นั้นจะเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลในลักษณะเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการคำนวณค่าต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

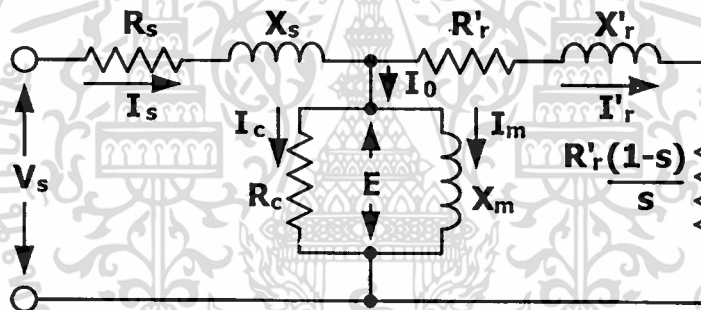
เมื่อ	V_s	คือ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ป้อนให้มอเตอร์
	I_s	คือ กระแสไฟฟ้าต่อเฟสด้านสเตเตอร์
	R_s	คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์
	X_s	คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลต่อเฟสของสเตเตอร์

I_0 คือ กระแสกระตุ้นต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- R_c คือ ค่าความต้านทานแทนการสูญเสียในแกนเหล็กต่อเฟส
 X_m คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในแกนเหล็กต่อเฟส
 I_c คือ กระแสที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่อเฟส
 I_m คือ กระแสแมกนีไตซิ่ง (Magnetizing current) ต่อเฟส
 E_1 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเฟสด้านสเตเตอร์
 E_2 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเฟสด้านโรเตอร์
 R_r คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของขดลวดโรเตอร์
 X_r คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลต่อเฟสของโรเตอร์
 I_r คือ กระแสไฟฟ้าต่อเฟสด้านโรเตอร์

และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ สามารถโอนย้ายวงจรทางด้านโรเตอร์ให้มาอยู่ทางฝั่งสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อ โอนย้ายมาด้านสเตเตอร์

- เมื่อ R'_r คือ ค่าความต้านทานต่อเฟสของขดลวด โรเตอร์ที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์
 X'_r คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลต่อเฟสของ โรเตอร์ที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์
 I'_r คือ กระแสไฟฟ้าต่อเฟสด้าน โรเตอร์ที่โอนย้ายมาฝั่งสเตเตอร์

2.1.4 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

กำลังไฟฟ้าอินพุท

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos \theta \quad (2.5)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์

$$P_{ls} = 3 I_s^2 R_s \quad (2.6)$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap)

$$P_g = 3 I_r^2 \frac{R_r}{S} \quad (2.7)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์

$$P_{lr} = 3 I_r^2 R_r \quad (2.8)$$

กำลังไฟฟ้าทางกล

$$P_{em} = P_g - P_{lr} \quad (2.9)$$

$$= \frac{3 I_r^2 R_r (1-S)}{S} \quad (2.10)$$

กำลังไฟฟ้าที่เพลลา

$$P_{sh} = P_{em} - P_{fw} \quad (2.11)$$

เมื่อ P_{fw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม

แรงบิดของมอเตอร์

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3 I_r^2 R_r}{S \omega_s} \quad (2.12)$$

ซึ่ง

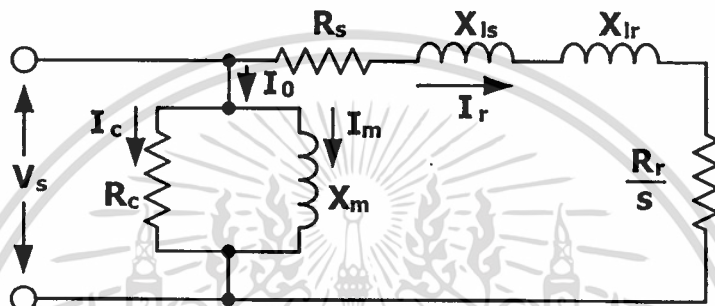
$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.12 จะได้
แรงบิดของมอเตอร์

$$T_{em} = \frac{3I_r^2 R_r P}{4\pi f S} \quad (2.14)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3 สามารถเขียนเป็นเป็นวงจรอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4 ค่ากระแส I_r สามารถหาได้ดังนี้

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (2.15)$$

ดังนั้นค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.16

$$S_m = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (2.16)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (R_s, X_{ls}) ให้ไม่มีผลต่อกำลังทางด้านเออร์เทอร์ของมอเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$I_r = \frac{S V_s}{\sqrt{R_r^2 + S^2 X_{lr}^2}} \quad (2.17)$$

$$S_m = \frac{R_r}{X_{lr}^2} \quad (2.18)$$

แทนค่าสมการที่ 2.17 และ 2.18 ลงในสมการที่ 2.14 จะได้สมการแรงบิดสูงสุดดังสมการ 2.19

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi fX_{lr}} \quad (2.19)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ และ $X_{lr} = 2\pi fL_{lr}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.19 จะได้

$$T_m = \frac{3P\left(\frac{V_s}{f}\right)^2}{16\pi^2 L_{lr}} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.20 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าคงที่เมื่อ อัตราส่วน $\left(\frac{V_s}{f}\right)$ มีค่าคงที่ด้วย

2.1.5 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปที่ 2.2 ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ (B) จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage : E) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่ายและเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.21)$$

เมื่อ e คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวด

ϕ คือ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_m \sin \omega t$ (2.22)

แทนค่าสมการที่ 2.22 ลงในสมการที่ 2.21 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (2.23)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ เมื่อแทนค่า $\cos \omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการที่ 2.23 ให้เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E = 4.44 N_s \phi f k_w \quad (2.24)$$

เมื่อ k_w คือ winding factor

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การปรับเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์นั้นความเร็วจะมีค่าแตกต่างกันมากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไป แต่ในการปรับความถี่ของมอเตอร์จะทำให้การปรับความเร็วที่ละเอียดมากกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่ทั้งนี้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย จากสมการที่ 2.20 และ 2.24 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s , E , ϕ และ T ดังนี้

$$V_s \approx E \quad (2.25)$$

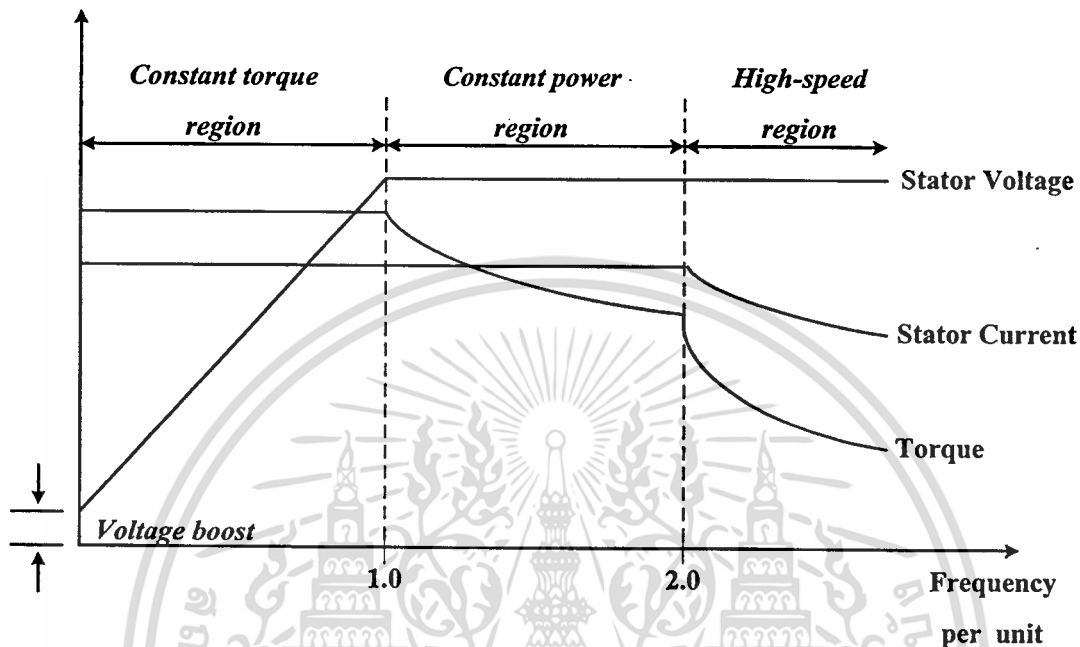
$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2 \cdot \left(\frac{E}{f}\right)^2 \quad (2.26)$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \quad (2.27)$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ $\left(\frac{V_s}{f}\right)$, $\left(\frac{E}{f}\right)$ ให้มีค่าคงที่จึงจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ ตั้งแต่ที่ระดับความถี่ต่ำถึงความถี่ที่พิกัดเราเรียกการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบนี้ว่า “การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage Variable Frequency: VVVF)” ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุทให้เป็นไปตามหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสามารถแบ่งช่วงของการควบคุมความเร็วได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่

1. ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจะต้องทำให้ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าช่วงดังกล่าวขนาดของแรงดันสเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ และในช่วงการทำงานนี้ค่ากระแสมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

2. ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังไฟฟ้ามักคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัดได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่มีค่าลดลง

จะเป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญเตเห็นาเปไซบระเษชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศลดลงด้วยและขีดจำกัดกระแสโรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่ช่วงนี้ค่าแรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 2.28

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} \cdot T_{rated} \quad (2.28)$$

$$P_{em,max} = \omega_r \cdot T_{em,max} \quad (2.29)$$

สมการที่ 2.29 จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกลซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เราเรียกช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power Region)

3. ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

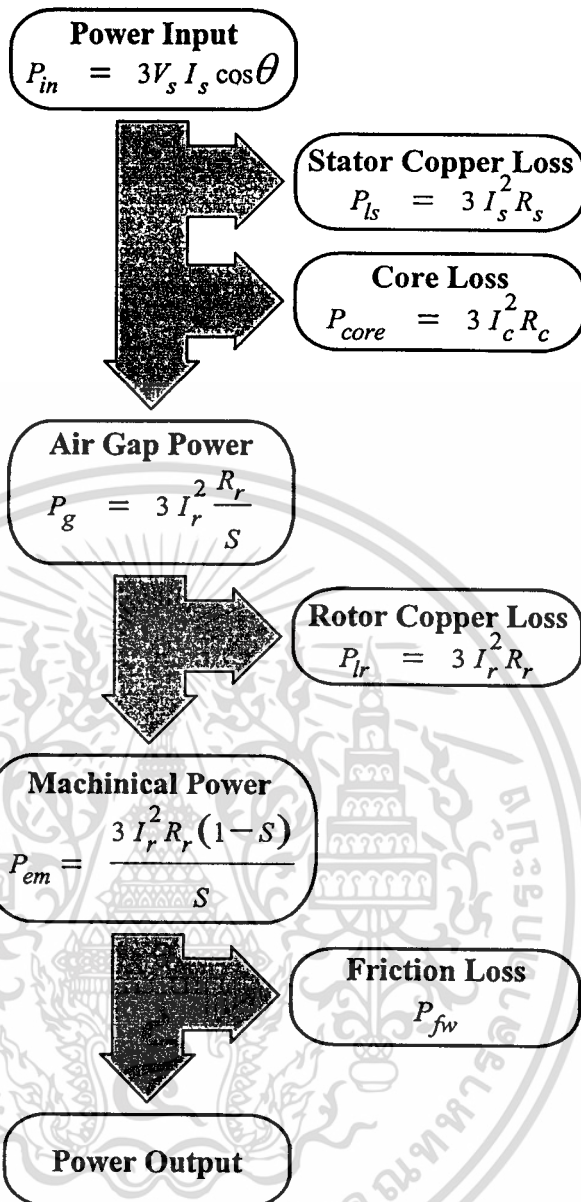
ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตมีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่ความถี่ที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสของมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางคานเอาท์พุทให้คงที่นั่นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัด โดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

2.2 ค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นประกอบด้วยค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ทั้งที่สเตเตอร์, โรเตอร์, แกนเหล็ก รวมทั้งค่าสูญเสียทางกล ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถดูได้จากแผนผังการส่งผ่านพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.6 และค่าสูญเสียหลักๆมีดังนี้

1. ค่าสูญเสียที่ตัวนำ ประกอบด้วยสองส่วนคือค่าสูญเสียที่ตัวนำด้านสเตเตอร์และโรเตอร์
2. ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและวัสดุที่ใช้ทำ เช่นการสูญเสียฮิสเตอรีซิสและกระแสไหลวน
3. ค่าสูญเสียจากการหมุน เกิดจากแรงเสียดทานหรือความฝืด และแรงลมต้านจากใบพัด ซึ่งโดยส่วนมากจะพิจารณาให้มีค่าคงที่ตลอดการทำงาน
4. ค่าสูญเสียสเตรย์ คือการสูญเสียที่นอกเหนือจากค่าสูญเสียในตัวนำ, แกนเหล็ก และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน เช่นกระแสฮาร์โมนิก เนื่องจากมอเตอร์ที่มีสล็อตเอียง, การสูญเสียของสนามแม่เหล็กที่หัวท้าย (End-leakage) และ Skew-leakage เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนผังการส่งผ่านพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3 สรุป

ในเนื้อหาบทได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งชนิด, โครงสร้าง, หลักการทำงาน และค่าสูญเสียในตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมทั้งวิธีการที่เหมาะสมในการควบคุมมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การตรวจสอบและวิเคราะห์กลไกการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกในบทต่อไป

บทที่ 3

การสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

ค่าการสูญเสียที่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันฮาร์มอนิกประกอบ 2 ส่วนคือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก(รวมค่าสูญเสียสเตรย์)และค่าสูญเสียในตัวนำ โดยทั่วไปการคำนวณหาค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีความยุ่งยากค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก เพราะจะมีองค์ประกอบหลายๆอย่างที่มีผลต่อค่าสูญเสียที่เกิดขึ้น เช่น การอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก, ขนาดของภาระในขณะนั้น และผลจากความถี่สูงเป็นต้น โดยที่ค่าสูญเสียในตัวนำนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันฮาร์มอนิกแล้วค่ากระแสฮาร์มอนิกก็มีผลต่อการสูญเสียด้วยเช่นกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำกัดขอบเขตการวิเคราะห์เฉพาะส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกเท่านั้น

3.2 ฟังก์ชันการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

โดยทั่วไปแล้ว โมเดลการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกจะแยกออกได้สองส่วนหลักๆ คือ การสูญเสียในตัวนำ และการสูญเสียที่แกนเหล็ก(รวมการสูญเสียสเตรย์) ในการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกได้มีหลายๆนักวิจัยนำเสนอฟังก์ชันการสูญเสียหลายๆฟังก์ชัน ดังนี้ [10]

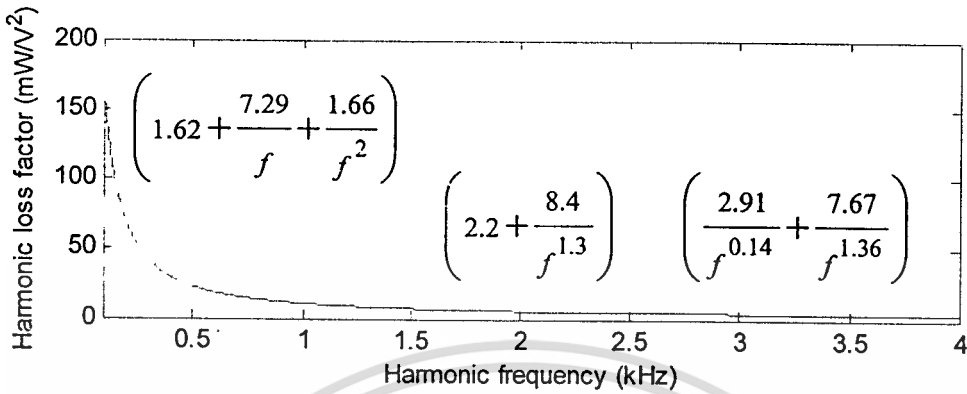
$$P_h = \sum_{n=1} \left(A + \frac{B}{f_n} + \frac{C}{f_n^2} \right) V_n^2 \quad (3.1)$$

$$P_h = \sum_{n=1} \left(A + \frac{B}{f_n^\alpha} \right) V_n^2 \quad (3.2)$$

$$P_h = \sum_{n=1} \left(\frac{A}{f_n^\alpha} + \frac{B}{f_n^\beta} \right) V_n^2 \quad (3.3)$$

ซึ่งแต่ละฟังก์ชันก็จะให้ลักษณะของค่าการสูญเสียที่ใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์เพียงเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่นในสมการที่ 3.1 ถ้าค่า A, B, C มีค่าเป็น 1.62, 7.29, 1.66 ตามลำดับ จะมีค่าเหมือนกับสมการที่ 3.2 เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ A, B, และตัวยกกำลัง α มีค่าเป็น 2.2, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4, 1.3 ตามลำดับ และจะมีค่าเหมือนสมการที่ 3.3 เมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์ A, B และด้วยกำลัง α, β มีค่าเป็น 2.91, 7.67, 0.14, 1.36 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงค่าการสูญเสียเดียวกันแต่ใช้ฟังก์ชันต่างกัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชันการสูญเสียตามสมการที่ 3.3 เนื่องจากเป็นสมการที่ชี้ให้เห็นว่าค่าการสูญเสียนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อค่าลำดับฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้นและยังแบ่งแยกระหว่างค่าสูญเสียในตัวนำและค่าเสียหายในแกนเหล็ก(รวมค่าสูญเสียสเตรย์)ดังแสดงในสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5 ตามลำดับ

ค่าสูญเสียในตัวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก

$$P_h = \sum_{n \neq 1} \left(\frac{A}{f_n^\alpha} \right) V_n^2 \tag{3.4}$$

ค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก

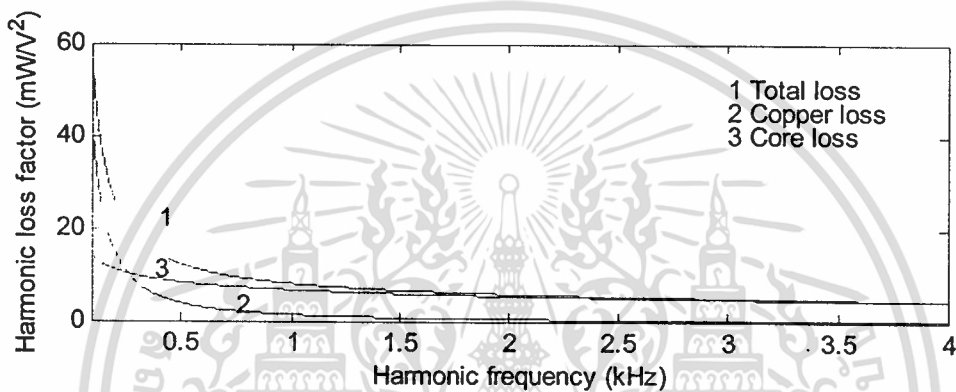
$$P_h = \sum_{n \neq 1} \left(\frac{B}{f_n^\beta} \right) V_n^2 \tag{3.5}$$

- เมื่อ P_h คือ ค่าสูญเสียรวมที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก, (Watt)
- n คือ ลำดับฮาร์มอนิก
- V_n คือ แรงดันไลน์ลำดับฮาร์มอนิกที่ n , (V_{rms})
- f_n คือ ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ n , (kHz)
- A คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียในตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- B คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่แกนเหล็ก
 α คือ เลขยกกำลังของการฟังก์ชันการสูญเสียที่ตัวนำ
 β คือ เลขยกกำลังของการฟังก์ชันการสูญเสียที่แกนเหล็ก

โดยค่าสัมประสิทธิ์ (A, B, α, β) นั้นจะเป็นค่าเฉพาะของมอเตอร์ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่า $\alpha = 1.5$ และค่า β จะมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 0.5 ยกตัวอย่างรูปที่ 3.2 แสดงฟังก์ชันการสูญเสียตามสมการที่ 3.3 เมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์ A, B, α, β มีค่าเป็น 1.38, 6.74, 1.5, 0.32 ตามลำดับ

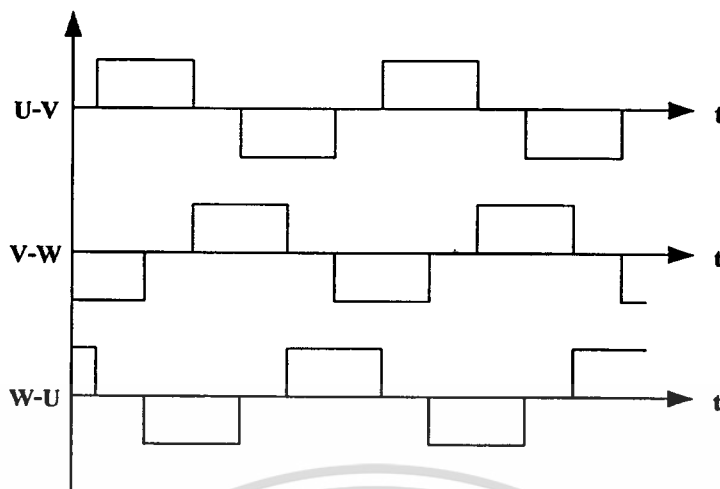


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างฟังก์ชันการสูญเสีย

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียในตัวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกนั้นจะมีค่าสูงในช่วงความถี่ต่ำและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าการสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกนั้นจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆเมื่อความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าสูญเสียในตัวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าเด่นชัดที่ความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าต่ำ และว่าสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าเด่นชัดที่ความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูง

3.3 วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสูญเสีย

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสูญเสียจะใช้วิธีการที่ง่ายและต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับมอเตอร์ทุกขนาด โดยอาศัยวิธีการป้อนสัญญาณแรงดันแบบกึ่งสี่เหลี่ยม (Six Step) เพราะสามารถทราบค่าของขนาดกลุ่มแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังแสดงในสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.3 สัญญาณแรงดัน 3 เฟส แบบกึ่งสี่เหลี่ยม

$$V_h = \frac{V_1}{h} \quad ; h = 6n \pm 1 \text{ และ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.6)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า $\alpha = 1.5$ เนื่องจากค่าแรงดันฮาร์โมนิกนั้นจะเป็นสัดส่วนกับลำดับฮาร์โมนิก $\left(\frac{V_1}{f}\right)$ และค่าความต้านทานจะสมมติให้เป็นสัดส่วนกับ \sqrt{f} ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจากสัญญาณแรงดันแบบกึ่งสี่เหลี่ยมจะสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.7

$$P_f = A \sum_f \frac{V_f^2}{f^{1.5}} + B \sum_f \frac{V_f^2}{f_n^\beta} \quad (3.7)$$

และเมื่อแทนค่า $V_f = \left(\frac{V_1}{f}\right)$ จะได้

$$P_f = A \frac{V_1^2}{f_1^{1.5}} \left(1 + \left(\frac{1}{5^2} \cdot \frac{1}{5^{1.5}}\right) + \left(\frac{1}{7^2} \cdot \frac{1}{7^{1.5}}\right) + \left(\frac{1}{11^2} \cdot \frac{1}{11^{1.5}}\right) + \left(\frac{1}{13^2} \cdot \frac{1}{13^{1.5}}\right) + \dots \right) \\ + B \frac{V_1^2}{f_1^\beta} \left(1 + \left(\frac{1}{5^2} \cdot \frac{1}{5^\beta}\right) + \left(\frac{1}{7^2} \cdot \frac{1}{7^\beta}\right) + \left(\frac{1}{11^2} \cdot \frac{1}{11^\beta}\right) + \left(\frac{1}{13^2} \cdot \frac{1}{13^\beta}\right) + \dots \right) \quad (3.8)$$

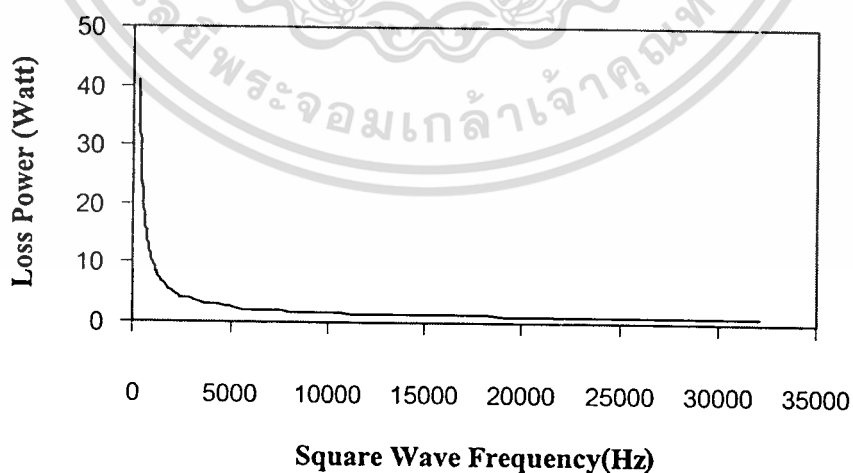
สมการที่ 3.8 จะใช้ในการพีชรูปคลื่นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ A , B , และ β โดยมีค่าอนุกรมของค่าสูญเสียในตัวนำประมาณ 1.005166

ดังนั้นจะเหลือค่าสัมประสิทธิ์ A, B, β ที่จะต้องทำการประมาณค่าต่อไป
ขั้นตอนการทดสอบเพื่อค่าสัมประสิทธิ์มีดังต่อไปนี้

1. ล็อคโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่กับที่
2. ป้อนแรงดันที่มีสัญญาณแบบกึ่งสี่เหลี่ยม ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกระดับแรงดันไฟตรงที่ใช้การทดสอบที่ 100 โวลต์ ซึ่งจะเท่ากับแรงดันมูลฐาน 78 โวลต์
3. เริ่มทำการวัดการสูญเสียตั้งแต่ความถี่ 300 Hz ถึง 30 kHz โดยทำการวัดและบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าด้านไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ และกำหนดให้ค่าสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์เป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเป็นที่ยอมรับได้ถ้าใช้อินเวอร์เตอร์แบบไอจีบีทีตัวเดียวไม่ใช้การต่อขยายกระแส (Darlington) และความถี่ไม่เกิน 50 kHz
4. นำค่าที่บันทึกได้ใช้วิธีการฟิตรูปลักษณ์ (Curve Fitting) ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว A, B, β โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธี Nonlinear least squares [10] ซึ่งวิธีการนี้จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเพียง 0.001 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

3.4 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์

จากขั้นตอนการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกในหัวข้อที่ 3.3 ได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก ขนาด 3 แรงม้า 380 โวลต์ ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความถี่ 300 Hz ถึง 30 kHz ผลที่ได้ดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

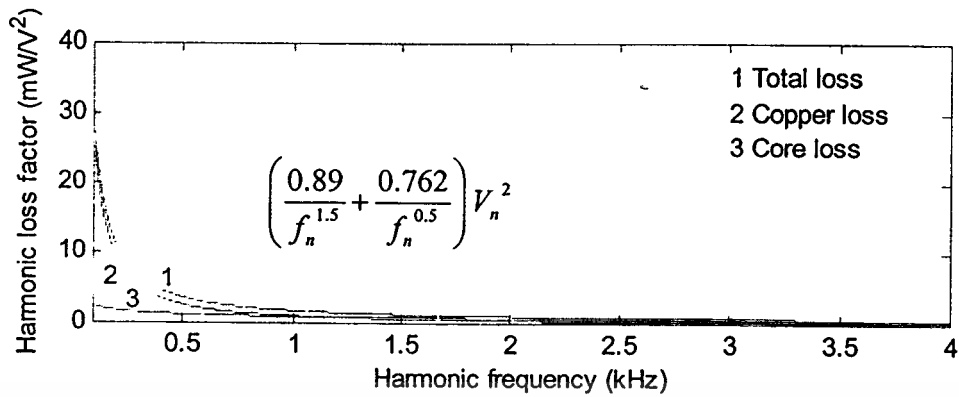
f (Hz)	P _{loss} (W)	f (Hz)	P _{loss} (W)	f (Hz)	P _{loss} (W)
301.2	40.9	1157.0	8.7	4000.0	2.9
333.3	36.0	1202.0	8.3	4673.0	2.6
352.1	33.9	1256.0	8.0	5208.0	2.3
378.8	31.1	1309.0	7.6	6024.0	2.1
400.0	29.2	1359.0	7.3	7092.0	1.9
450.5	25.6	1412.0	7.1	8000.0	1.8
500.0	22.5	1453.0	6.9	9174.0	1.7
549.5	20.3	1515.0	6.6	10100.0	1.6
602.4	18.2	1603.0	6.3	11260.0	1.5
653.6	16.6	1701.0	5.9	12820.0	1.4
699.3	15.5	1852.0	5.5	13740.0	1.3
751.9	14.2	1908.0	5.3	14790.0	1.3
800.0	13.2	2016.0	5.0	16030.0	1.2
853.2	12.0	2193.0	4.7	17480.0	1.2
912.4	11.4	2358.0	4.4	19080.0	1.1
957.9	10.8	2488.0	4.2	21370.0	1.1
1008.0	10.3	2732.0	3.9	24040.0	1.0
1055.0	9.7	3049.0	3.6	27470.0	1.0
1106.0	9.3	3623.0	3.1	32050.0	1.0

จากผลการทดสอบที่ได้เมื่อใช้การฟิตรูปคลื่นด้วยวิธี Nonlinear least squares ค่าสัมประสิทธิ์ A , B , β จะมีค่า 0.89, 0.762 และ 0.5 ตามลำดับซึ่งสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันการสูญเสียได้ตามสมการที่ 3.9

$$P_h = \sum_{n=1} \left(\frac{0.89}{f_n^{1.5}} + \frac{0.762}{f_n^{0.5}} \right) V_n^2 \quad (3.9)$$

และจะมีลักษณะของฟังก์ชันการสูญเสียดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.5 สรุป

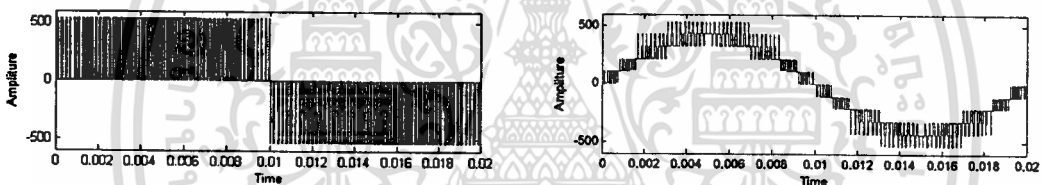
ในบทนี้ได้กล่าวถึงค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าสูญเสียในคัมและค่าสูญเสียในแกน(รวมค่าสูญเสียสเตรย์) และการเลือกใช้ฟังก์ชันเพื่อใช้คำนวณหาค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก เพื่อศึกษาแนวโน้มของการสูญเสียที่จะเกิดขึ้น รวมทั้งวิธีในการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่จะใช้ฟังก์ชันเพื่อคำนวณค่าการสูญเสีย รวมทั้งผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะใช้สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในบทต่อไป

บทที่ 4

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

4.1 โครงสร้างและชนิดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับทำให้สัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ กับอินเวอร์เตอร์ 11 ระดับที่ขนาดของแรงดันคั่นมูลฐานเท่ากัน การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ นอกจากนี้การแบ่งย่อยแรงจ่ายไฟตรงยังทำให้เหมาะต่อการต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์พลังงาน หรือแบตเตอรี่ เป็นต้น



(ก) อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

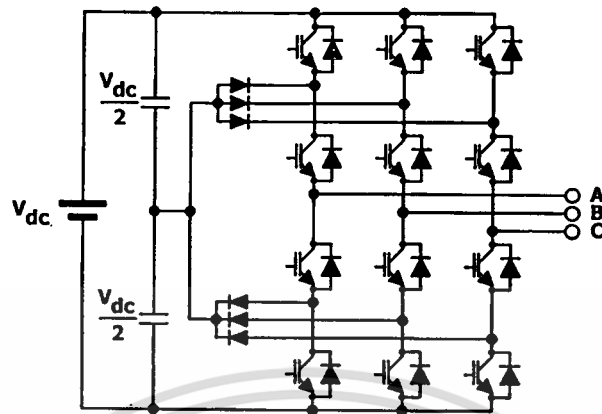
(ข) อินเวอร์เตอร์ 11 ระดับ

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต

โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งออกได้ 4 ชนิด ดังนี้

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Generalized
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

4.1.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์



รูปที่ 4.2 อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์

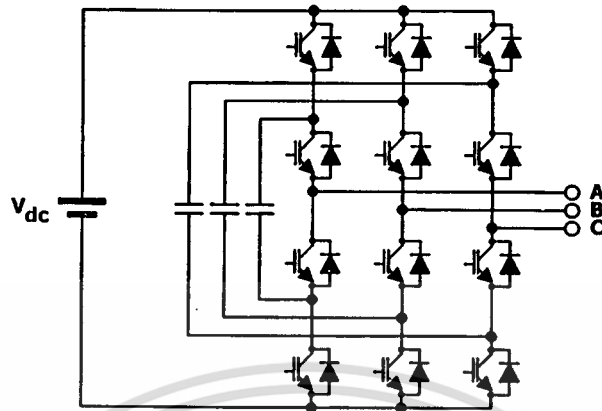
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์หรือชนิดนิวตรอนพอยต์แคลมป์ (Neutral-Point Clamped : NPC) ถูกคิดค้นโดย A. Nabae ในปี ค.ศ. 1981 จะมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แต่จะมีการต่ออุปกรณ์สวิตช์เพิ่มเข้าไปในแต่ละกิ่งเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต โดยอาศัยตัวเก็บประจุในการแบ่งแรงดันและใช้ไดโอดต่อเพิ่มเข้ามาเพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลในแต่ละระดับดังรูปที่ 4.2 โดยจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ 4.1

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับกับจำนวนระดับ

$$N_{sw} = 6(n-1) \quad (4.1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนระดับ

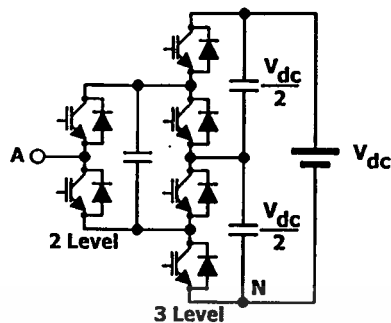
4.1.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์



รูปที่ 4.3 อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์หรือชนิดฟร่ายลิ่งคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์ถูกคิดค้นโดย T. A. Meynard ในปี ค.ศ. 1992 โครงสร้างก็จะใกล้เคียงกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ นอกเหนือจากอุปกรณ์สวิตช์ที่นำมาต่ออนุกรมเพิ่มในแต่ละกิ่งเพื่อจำนวนระดับของสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตแล้ว จะอาศัยตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างสวิตช์ในแต่ละระดับในการแบ่งแรงดันดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์จึงจะต้องมีการควบคุมในการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุ และค่าของตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าที่เหมาะสมด้วย และความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์กับจำนวนระดับจะมีค่าเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ ตามสมการที่ 4.1 เช่นกัน

4.1.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Generalized



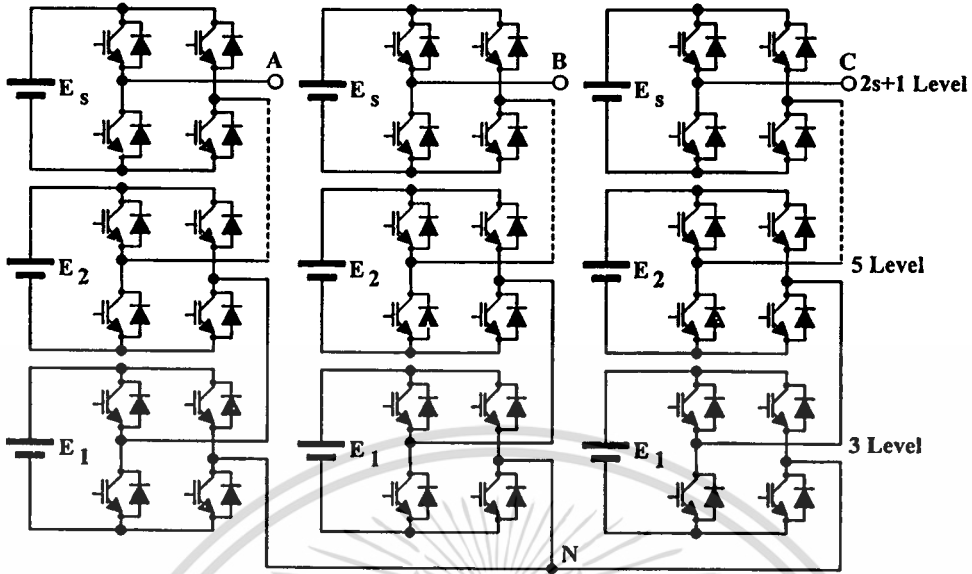
รูปที่ 4.4 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 3 ระดับชนิด Generalized

อินเวอร์เตอร์ชนิด Generalized ถูกคิดค้นโดย F. Z. Peng ในปี ค.ศ. 2001 เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่นำอุปกรณ์สวิตช์มาต่อกันลักษณะการแบ่งแรงดันครั้งละครั้งหนึ่งแล้วนำเอาเอาท์พุทมาต่อกันในลักษณะปริมาตรดังรูปที่ 4.4 โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้จะมีคุณสมบัติโดดเด่นตรงที่สามารถรักษาระดับแรงดันในตัวเก็บประจุให้เท่ากันได้ด้วยตัวเอง (Self Balancing Voltage) แต่จะมีข้อด้อยในเรื่องของจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งจะใช้จำนวนของอุปกรณ์สวิตช์มากกว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกันที่จำนวนระดับเดียวกัน โดยจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ชนิด Generalized ตามสมการที่ 4.2

จำนวนสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Generalized

$$N_{sw-g} = 3n(n-1) \quad (4.2)$$

4.1.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์



รูปที่ 4.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ถูกคิดค้นโดย P. Hammond ในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสหรือเอชบริดจ์ที่นำเอาแรงดันด้านเอาต์พุตมาต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 4.5 ซึ่งอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดสามารถให้แรงดันเอาต์พุตเป็น E , $-E$ หรือศูนย์ ซึ่งจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะเป็นได้แต่จำนวนระดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น เพราะจำนวนระดับนั้นจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนของแหล่งจ่ายหรือจำนวนของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟสตามสมการที่ 4.3

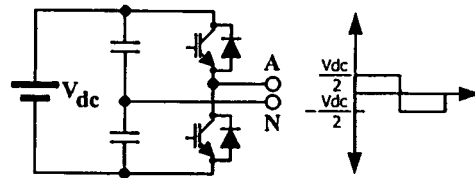
$$n = 2s + 1 \tag{4.3}$$

เมื่อ s คือ จำนวนแหล่งจ่ายไฟตรงต่อเฟส

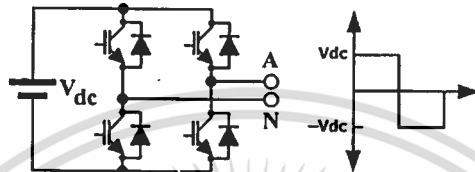
และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะข้อย่อยที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะต้องแยกกราวด์กัน ซึ่งหากแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงเป็นเป็นชนิดเซลล์พลังงานหรือแบตเตอรี่ จะต้องมีการบริหารการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพรวมของระบบ แต่ข้อได้เปรียบจะอยู่ที่การใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงซึ่งสูงกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอุปกรณ์สวิตช์กับจำนวนระดับจะมีค่าเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดเคลมปีและชนิดคาปาซิเตอร์เคลมปีตามสมการที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์



(ก) แสดงจุดนิวตรอนและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ



(ข) แสดงจุดนิวตรอนและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์

รูปที่ 4.6 แสดงความแตกต่างของจุดนิวตรอนและแรงดันเอาต์พุต

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มีจุดนิวตรอนที่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์แบบอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มีคุณสมบัติในการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงสูงกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นถึงสองเท่า ซึ่งแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีค่าความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความกว้างพัลส์และแรงดันไฟตรงตามสมการที่ 4.4

$$V_{AN} = D \cdot V_{dc} \quad (4.4)$$

เมื่อ V_{AN} คือ แรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

D คือ อัตราส่วนความกว้างพัลส์

V_{dc} คือ ระดับแรงดันไฟตรง

ระดับแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะขึ้นระดับแรงดันและจำนวนของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟสในแต่ละเฟสดังสมการที่ 4.5

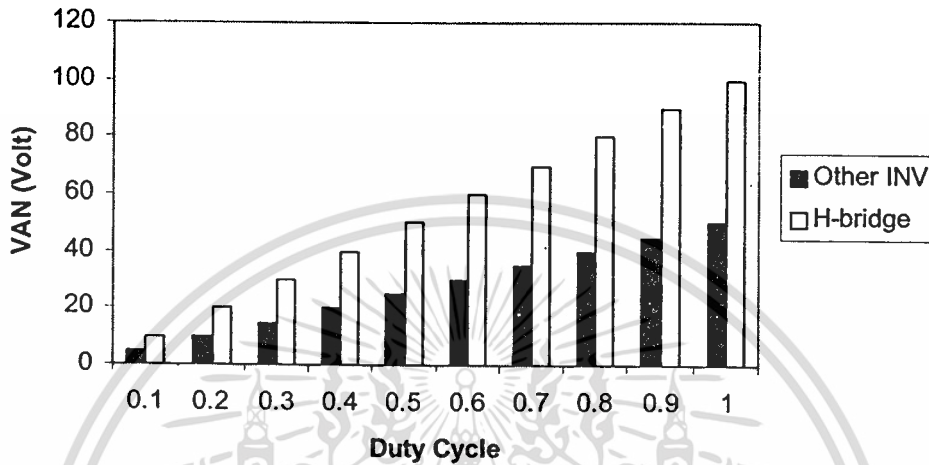
$$V_{dc} = sE \quad (4.5)$$

เมื่อ E คือ ระดับแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่แรงดันเฟสเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์สองระดับและอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นจะมีค่าความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความกว้างพัลส์และแรงดันไฟตรงดังสมการที่ 4.6

$$V_{AN} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot V_{dc} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์กับอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น

ด้วยข้อได้เปรียบด้านการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ ดังนั้นหากนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มาใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำในระดับแรงดันเดียวกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจึงสามารถลดระดับแรงดันไฟตรงลงมาได้ครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้สามารถลดพิสัยของอุปกรณ์สวิตซ์ลงมาได้ แต่ถ้าหากใช้งานที่ระดับแรงดันไฟตรงที่เท่ากันก็ จะทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีความสามารถในการทำงานที่เป็นเชิงเส้นเพราะสามารถสร้างแรงดันเอาต์พุทได้สูงกว่า

ในการลดระดับแรงดันไฟตรงมาครึ่งหนึ่งนั้น หากต้องการใช้งานกับแหล่งจ่ายประเภท เซลล์พลังงานหรือแบตเตอรี่ จะต้องออกแบบให้มีค่าเหมาะสมกับแหล่งพลังงานที่ใช้งานด้วย ยกตัวอย่างเช่นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิสัยแรงดัน 380 โวลต์ ค่าระดับแรงดันไฟตรงปกติจะ อยู่ที่ 537.4 โวลต์ หากใช้แรงดันไฟตรงเพียงครึ่งจะอยู่ที่ 268.7 โวลต์ และกำหนดให้ระดับไฟฟ้า ของเซลล์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 12 โวลต์ต่อเซลล์ ดังนั้นระดับแรงดันไฟตรงที่เหมาะสมจะต้องมีค่า ใกล้เคียง 268.7 โวลต์และหารด้วย 12 ลงตัวดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับแรงดันไฟตรงที่เหมาะสมเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ควบคุมมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 380 โวลต์

จำนวนระดับ (n)	จำนวนแหล่งจ่าย ต่อเฟส (s)	แรงดันไฟตรงของ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส (E)	แรงดันไฟตรง (V_{dc})
3	1	276	276
5	2	144	288
7	3	96	288
9	4	72	288
11	5	60	300
13	6	48	288
15	7	48	336

4.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆซึ่งได้เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ต่างๆกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสหลายๆชุดที่นำแรงดันด้านเอาต์พุตมาต่ออนุกรมกัน โดยมีข้อดีในด้านการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรง หมายถึงสามารถใช้ระดับแรงดันไฟตรงที่ต่ำกว่าเมื่อใช้ควบคุมมอเตอร์ที่ระดับแรงดันเดียวกัน และมีข้อเสียที่แหล่งจ่ายไฟตรงแต่ละชุดจะต้องแยกกราวด์กัน

บทที่ 5

การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1 การคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ในการคำนวณค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น จะต้องอาศัยการหาค่าคุณลักษณะของสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกจากแรงดันไลต์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณกับสมการฟังก์ชันการสูญเสียที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของมอเตอร์ตัวนั้นๆ ก็จะได้ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

5.2 การวิเคราะห์กลไกการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ในการศึกษาและวิเคราะห์กลไกการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อจะได้ทราบวิธีการที่เหมาะสมในการลดค่าสูญเสียและการเลือกจำนวนระดับที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้าตัวมอเตอร์ ซึ่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์จะเป็นสัญญาณพีคดับลิเวียม ที่มีองค์ประกอบต่างๆที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

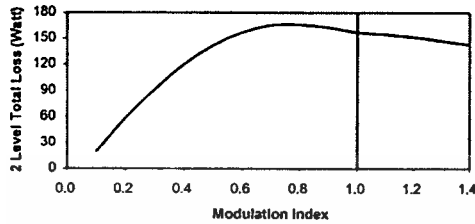
- ผลกระทบของค่าดัชนีการมอดูเลชันต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก
- ผลกระทบของระดับแรงดัน ไฟตรงต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก
- ผลกระทบของความถี่มูลฐานต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก
- ผลกระทบของความถี่สวิตชิ่งต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก
- ผลกระทบของเทคนิคการมอดูเลชันต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

โดยในการคำนวณหาค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกนี้จะใช้ค่าฟังก์ชันการสูญเสียที่มีค่าสัมประสิทธิ์ A, B, α, β มีค่าเป็น 1.38, 6.74, 1.5, 0.32 ตามลำดับ ตลอดทุกเงื่อนไขการคำนวณ

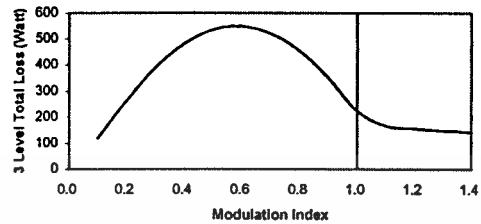
5.2.1 ผลกระทบของค่าดัชนีการมอดูเลชันต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ในการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันหรือการปรับขนาดของสัญญาณแรงดันมูลฐานด้านเอาต์พุท ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ถูกป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และอินเวอร์เตอร์ 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ระดับ ชนิดเอชบริดจ์ โดยการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันและกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆมีค่าเท่ากันดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

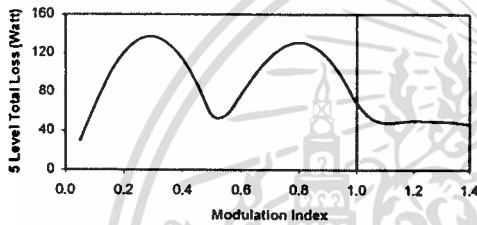
ความถี่แรงดันมูลฐาน $f_1 = 50$ Hz, ความถี่คลื่นพาหะ $f_c = 5$ kHz, แรงดันไฟตรง $V_{dc} = 537.4$ V, และใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM โดยในการคำนวณได้ทดลองปรับค่าตัวแปรดัชนีการมอดูเลชันตั้งแต่ 0.1 จนถึง 1.4 ซึ่งครอบคลุมถึงการทำงานในย่านโอเวอร์มอดูเลชัน



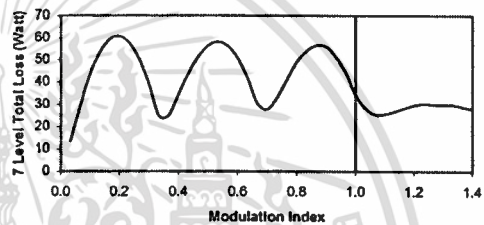
ก) อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ



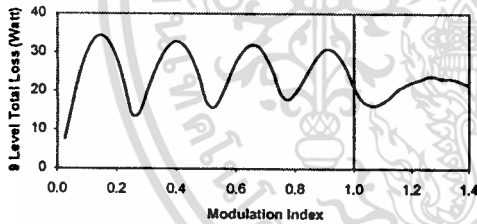
ข) อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ



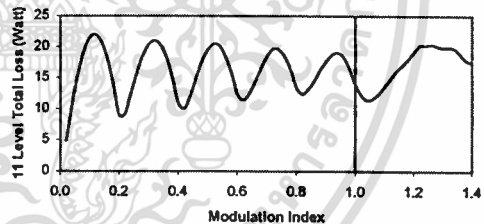
ค) อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ



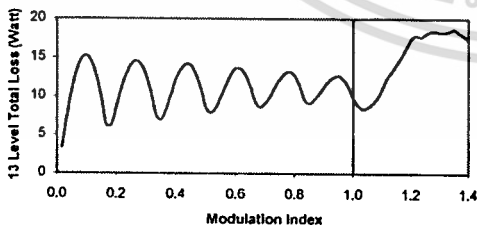
ง) อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ



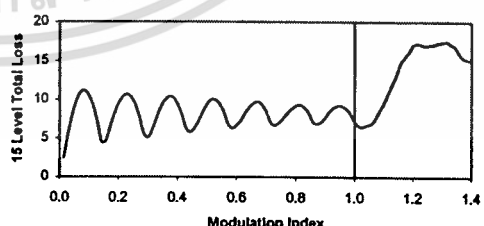
จ) อินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ



ฉ) อินเวอร์เตอร์ 11 ระดับ



ช) อินเวอร์เตอร์ 13 ระดับ



ซ) อินเวอร์เตอร์ 15 ระดับ

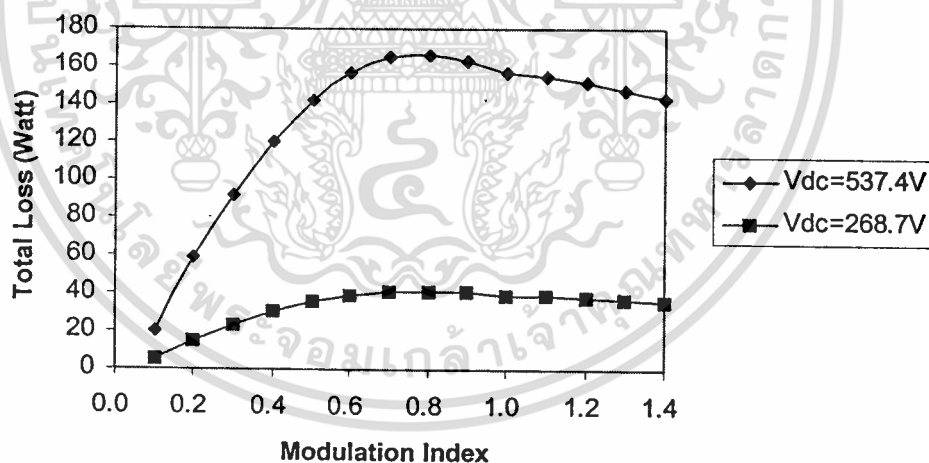
รูปที่ 5.1 แสดงค่าการสูญเสียที่แปรตามค่าดัชนีการมอดูเลชัน

จากรูปที่ 5.1 ผลการคำนวณค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่แปรตามค่าดัชนีการมอดูเลชันของอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับจะเห็นได้ว่า ค่าการสูญเสียนั้นเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีการมอดูเลชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขชั้นของแต่ละระดับเป็นสำคัญโดยจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของคลื่นพาหะ และจะมีค่าลดลงเมื่อค่าดัชนีการมอดูเลชันมีค่าห่างจากจุดสูงสุดออกมา ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์กลุ่มของแรงดันฮาร์มอนิกกลุ่มแรกนั้นจะมีค่าสูงสุด เนื่องจากแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่ำจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในอันดับที่สูงกว่า ดังนั้นจำนวนยอดของค่าสูญเสียจึงจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนคลื่นพาหะเช่น ที่ 5 ระดับจะมีจำนวนยอดสูงสุดเท่ากับ 2 หรือที่ 7 ระดับจะมีจำนวนยอดสูงสุดเท่ากับ 3 เป็นต้น

5.2.2 ผลกระทบของระดับแรงดันไฟตรงต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

โดยปกติแล้วในการควบคุมมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันค่าแรงดันไฟตรงจะมีค่าคงที่ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์นั้นจะสามารถออกแบบให้ระดับไฟตรงมีความหลากหลายได้ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของระดับแรงดันไฟตรงต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก โดยในการวิเคราะห์ที่เลือกการคำนวณค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับโดยการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟตรงที่ $V_{dc} = 537.4 \text{ V}$ และที่ 268.7 V และมีความถี่แรงดันมูลฐาน $f_1 = 50 \text{ Hz}$, ความถี่คลื่นพาหะ $f_2 = 5 \text{ kHz}$, และใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM โดยผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2



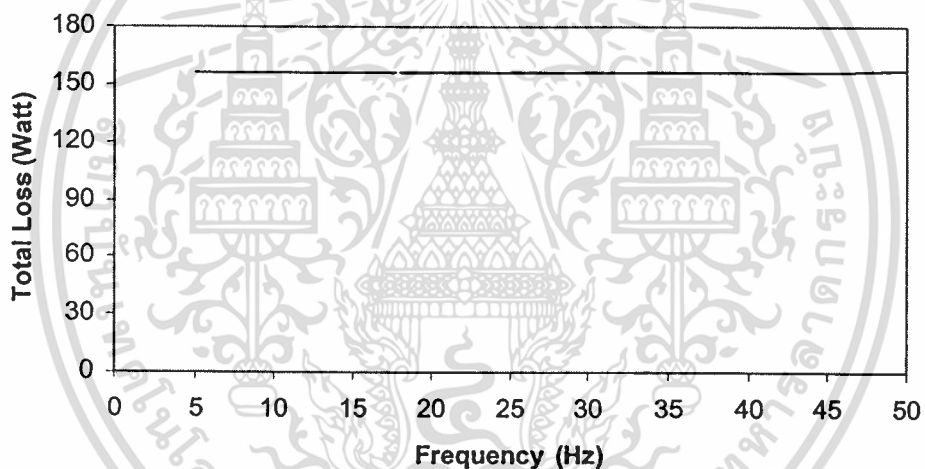
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อปรับแรงดันไฟตรง

เนื่องจากค่าแรงดันมูลฐานด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์นั้นจะแปรผันตามระดับแรงดันไฟตรง(ค่าดัชนีการมอดูเลชัน ไม่เกินหนึ่ง) และค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกนั้นแปรผันตามค่าแรงดันมูลฐานกำลังสอง ดังนั้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกก็จะแปรผันตามระดับแรงดันไฟตรงกำลังสอง ดังรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดระดับแรงดันไฟตรงจาก 537.4 V ลงมา

เครื่องหนึ่งที่ 268.7 V ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่แรงดันไฟตรง 268.7 V จะมีค่าเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันไฟตรง 537.4 V

5.2.3 ผลกระทบของความถี่มูลฐานต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอินเวอร์เตอร์มักจะมีการปรับความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งจะอาศัยการปรับความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อปรับความเร็ว ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงผลกระทบการปรับความถี่มูลฐานต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงควรถูกนำมาพิจารณาด้วย โดยคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกตั้งแต่ความถี่มูลฐาน 5 Hz จนถึง 50 Hz ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่ความถี่คลื่นพาหะ $f_c = 5$ kHz, แรงดันไฟตรง $V_{dc} = 537.4$ โวลต์, ดัชนีการมอดดูเลชัน $m = 1$, และใช้เทคนิคการมอดดูเลชันแบบ SPWM โดยผลการคำนวณที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3

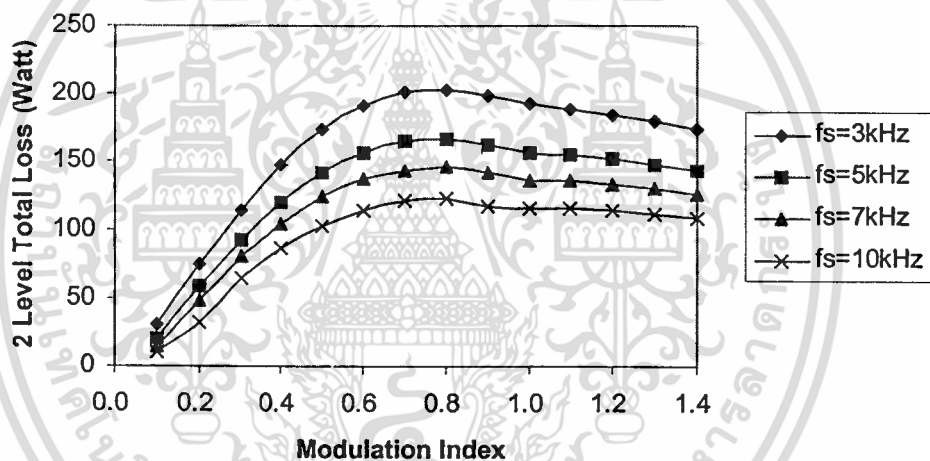


รูปที่ 5.3 แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อมีการปรับความถี่มูลฐาน

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าผลกระทบต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อมีการปรับความถี่มูลฐานในย่านความเร็วต่ำกว่าพิกัดนั้นจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเพราะลักษณะคุณลักษณะของแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณในฟังก์ชันหาค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกแล้วค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงมีค่าคงที่ แต่ถ้าหากความถี่มูลฐานมีค่าสูงมากๆจนทำให้แรงดันเอาต์พุตเกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำเกิดขึ้นค่าการสูญเสียก็จะมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดขึ้นได้ยากในทางปฏิบัติเพราะความถี่มูลฐานที่ใช้งานจริงจะมีค่าที่ไม่สูงมากนัก

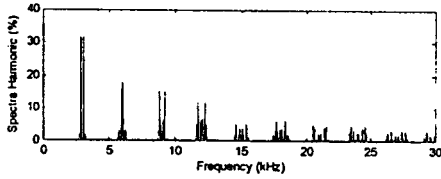
5.2.4 ผลกระทบของความถี่สวิตช์ต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ความถี่สวิตช์หรือความถี่ของคลื่นพาหะนั้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเพราะจะส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มเอทพุท ในการออกแบบค่าความถี่สวิตช์จะต้องมีค่าที่สูงพอ ($m_f > 21$) เพื่อให้แรงดันด้านเอาต์พุทมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิง แต่ก็ไม่ควรมีค่ามากเกินไปเพราะจะทำให้ค่าสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมจะใช้ความถี่สวิตช์อยู่ในย่าน 3 kHz ถึง 15 kHz ในการคำนวณผลกระทบของความถี่สวิตช์ต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่มีการปรับความถี่ สวิตช์ 3 kHz, 5 kHz, 7 kHz และ 10 kHz โดยมี ความถี่แรงดันมูลฐาน $f_1 = 50$ Hz, แรงดันไฟตรง $V_{dc} = 537.4$ V และใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM โดยผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 5.4

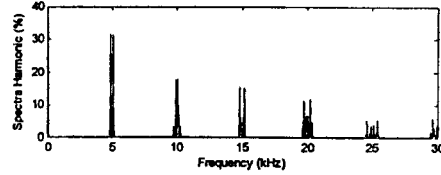


รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อมีการปรับความถี่สวิตช์

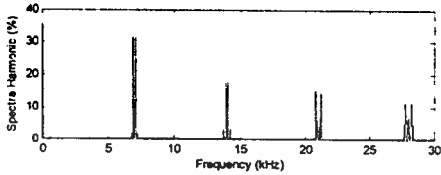
จากรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความถี่สวิตช์มีค่าสูงขึ้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าลดลง เนื่องจากกลุ่มฮาร์มอนิกจะเลื่อนห่างจากแรงดันมูลฐานมากยิ่งขึ้นซึ่งกลุ่มของฮาร์มอนิกที่มีลำดับฮาร์มอนิกที่สูงขึ้นย่อมส่งผลต่อค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำน้อยลง โดยรูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างของกลุ่มฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่ความถี่สวิตช์ต่างกัน



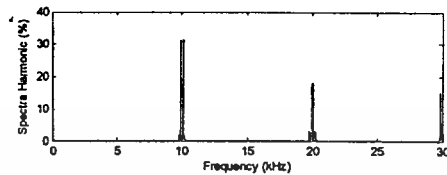
ก) ความถี่สวิตซิ่ง 3 kHz



ข) ความถี่สวิตซิ่ง 5 kHz



ก) ความถี่สวิตซิ่ง 7 kHz

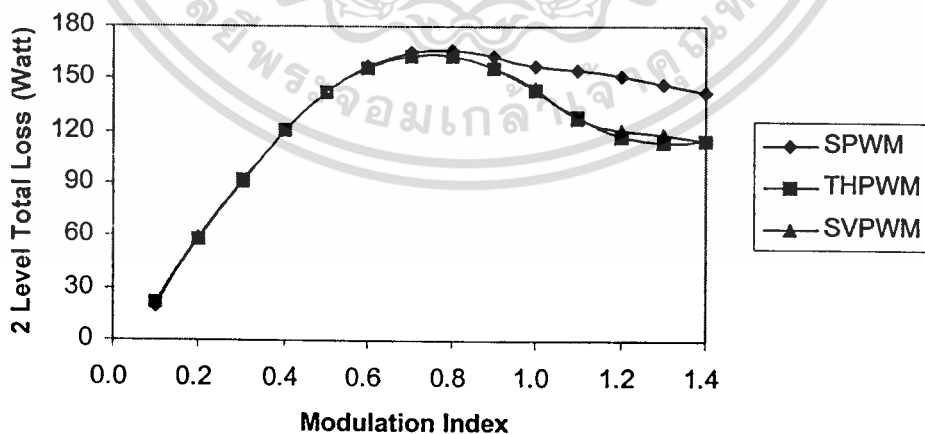


ข) ความถี่สวิตซิ่ง 10 kHz

รูปที่ 5.5 แสดงแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อมีความถี่สวิตซิ่งที่แตกต่างกัน

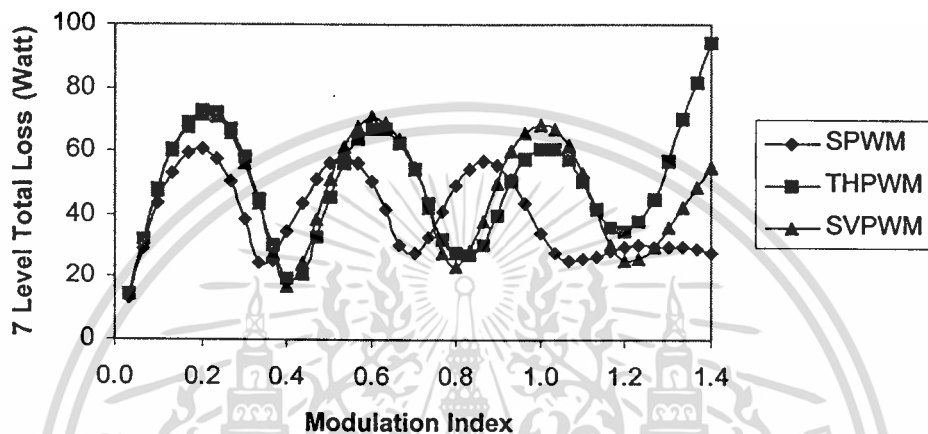
5.2.5 ผลกระทบของเทคนิคการมอดดูเลชั่นต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการมอดดูเลชั่นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการมอดดูเลชั่นให้สูงขึ้น ซึ่งวัตถุประสงค์หลักคือการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงให้ดีขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก โดยมีปรับเปลี่ยนเทคนิคการมอดดูเลชั่น 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการมอดดูเลชั่นแบบไซน์ (SPWM), เทคนิคการมอดดูเลชั่นแบบไซน์บวกด้วยฮาร์มอนิกที่ 3 (THPWM) และเทคนิคการมอดดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ โดยมีความถี่มูลฐาน $f_1 = 50$ Hz, แรงดันไฟตรง $V_{dc} = 537.4$ V และความถี่สวิตซิ่ง $f_s = 5$ kHz โดยแสดงตัวอย่างการของค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และ 7 ระดับ ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อใช้เทคนิคในการมอดดูเลชั่นแบบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

จากรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่ใช้เทคนิคในการมอดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM จะเห็นว่าค่าสูญเสียที่ดัชนีการมอดูเลชัน 0.1 ถึง 0.7 สูญเสียของทุกเทคนิคนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และที่ดัชนีการมอดูเลชัน 0.7 ถึง 1.4 ค่าสูญเสียของเทคนิคการมอดูเลชัน THPWM และ SVPWM ก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM จะมีค่าสูงกว่าเทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM และ SVPWM เนื่องจากเทคนิค SPWM จะเกิดโอเวอร์มอดูเลชันก่อนเทคนิคอื่นๆ



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกเมื่อใช้เทคนิคในการมอดูเลชันแบบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

จากรูปที่ 5.7 แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ที่ใช้เทคนิคในการมอดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM จะเห็นว่าค่าสูญเสียที่ของเทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM และ SVPWM จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่ค่าดัชนีการมอดูเลชัน 0 ถึง 0.8 ส่วนที่ค่าดัชนีการมอดูเลชัน 0.8 ขึ้นไปจะเริ่มมีค่าที่แตกต่างกันและจะแตกต่างกันมากยิ่งขึ้นเมื่อค่าดัชนีการมอดูเลชันมีค่าสูงขึ้น โดยที่เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM จะมีค่าสูงกว่าเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM ในส่วนเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM นั้นจะมีค่าที่แตกต่างกับอีกทั้ง 2 เทคนิคทั้งขนาดและจุดสูงสุดของค่าสูญเสีย

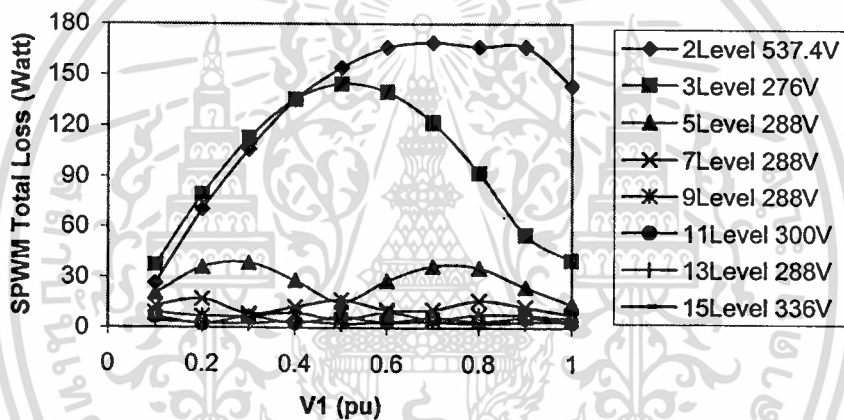
5.3 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจะต้องทำการเปรียบเทียบที่ค่าแรงดันมูลฐานและความถี่เดียวกัน ซึ่งควรจะเป็นค่าที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ก็จะใช้ค่าจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดแรงดัน 380 โวลต์ อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะใช้งานที่แรงดันไฟตรง 537.4 โวลต์ ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ระดับแรงดันไฟตรงของแต่ละระดับจะใช้ตามตารางที่ 4.1 โดยใน

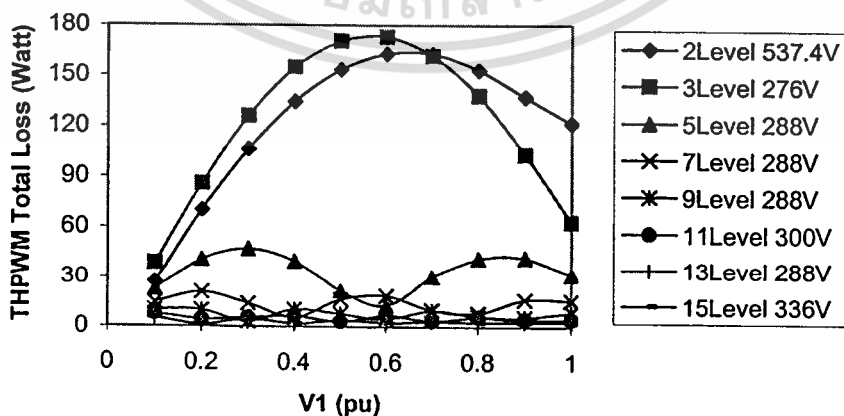
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงดันต่อความถี่ถึงที่ (V/f) โดยสามารถแบ่งย่านการทำงานออกได้เป็น 2 ช่วงคือ การทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วพิกัดหรือย่านแรงบิดคงที่ และย่านการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัดหรือย่านกำลังไฟฟ้าคงที่

5.3.1 การทำงานย่านความเร็วต่ำกว่าพิกัด

สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการทำงานย่านความเร็วต่ำกว่าพิกัดหรือย่านแรงบิดคงที่นั้น สัญญาณแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะต้องรักษาอัตราส่วนระหว่างแรงดันมูลฐานและความถี่มูลฐานให้คงที่ เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงตลอดย่านการทำงาน ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะต้องเปรียบเทียบกันที่จุดทำงานเดียวกัน หรือที่แรงดันและความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากัน กำหนดให้ความถี่สวิดซิ่ง $f_s = 5 \text{ kHz}$ และใช้ระดับแรงดันไฟตรงตามตารางที่ 4.1



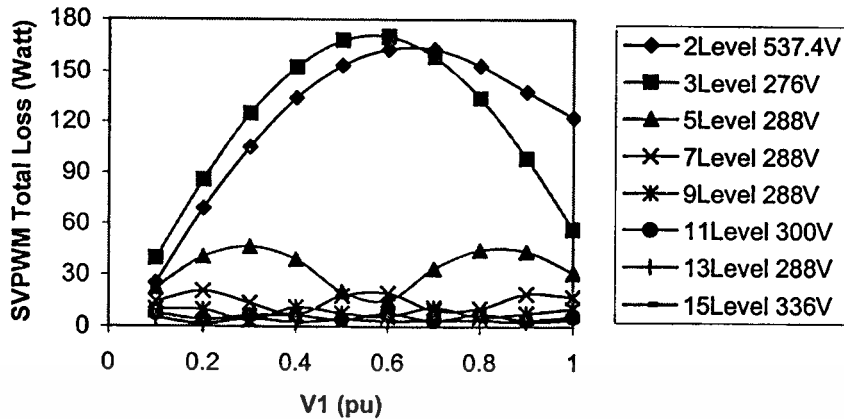
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วย

อินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM ประโยชน์ด้านการคำนวณการนำไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

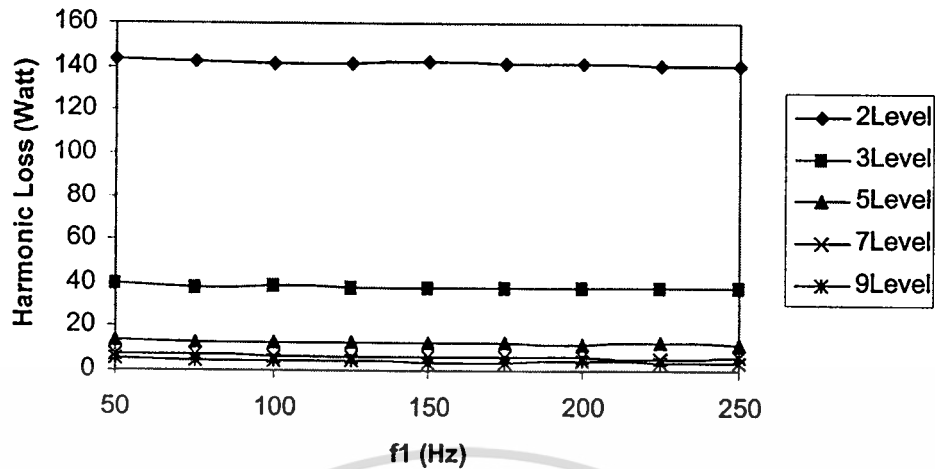


รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM

จากรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับ โดยใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนระดับมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ยกเว้นอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และค่าสูญเสียจะลดลงเมื่อจำนวนระดับเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับจนถึง 15 ระดับค่าสูญเสียจะมีค่าความแตกต่างกันไม่มาก

5.3.2 การทำงานย่านความเร็วสูงกว่าพิกัด

ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการทำงานย่านความเร็วสูงกว่าพิกัดหรือย่านกำลังไฟฟ้าคงที่นั้น แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะต้องรักษาไว้ที่แรงดันที่พิกัด ดังนั้นในการควบคุมความเร็วจึงทำการปรับเฉพาะความถี่มูลฐานเพียงอย่างเดียว โดยในการคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2, 3, 5, 7 และ 9 ระดับ ซึ่งจะรักษาแรงดันมูลฐานไว้ที่พิกัด และปรับความถี่มูลฐานจากพิกัด 50 Hz จนถึง 250 Hz โดยให้ความถี่สวิตซ์ $f_s = 5$ kHz, เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM และใช้ระดับแรงดันไฟตรงตามตารางที่ 4.1 ซึ่งผลที่คำนวณได้แสดงในรูปที่ 5.11



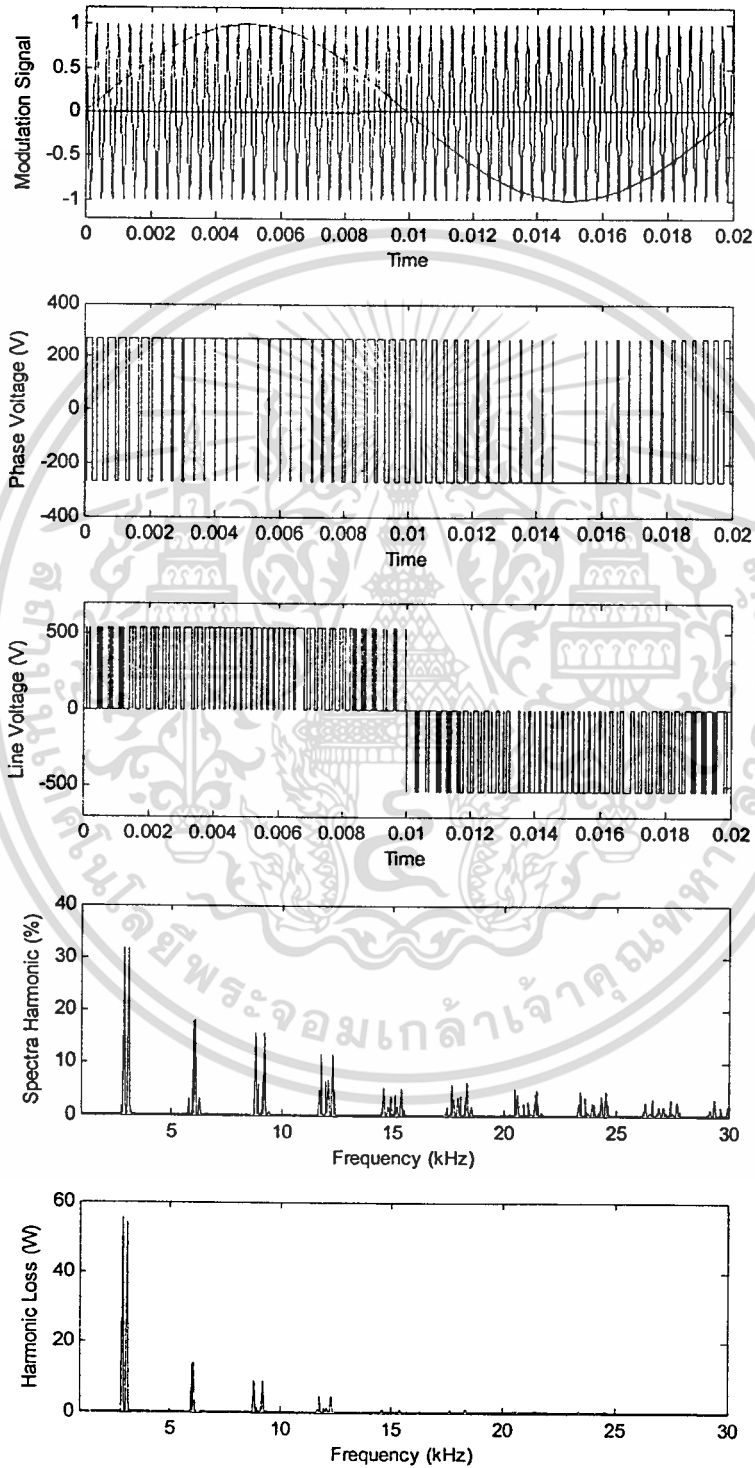
รูปที่ 5.11 แสดงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในย่านความเร็วสูงกว่าพิกัด

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในการทำงานย่านความเร็วสูงกว่าพิกัดนั้นค่าการสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับจะมีค่าคงที่ ระดับของค่าสูญเสียนี้อาจมีค่าลดลงเมื่อจำนวนระดับมีค่าสูงขึ้น

5.4 สรุป

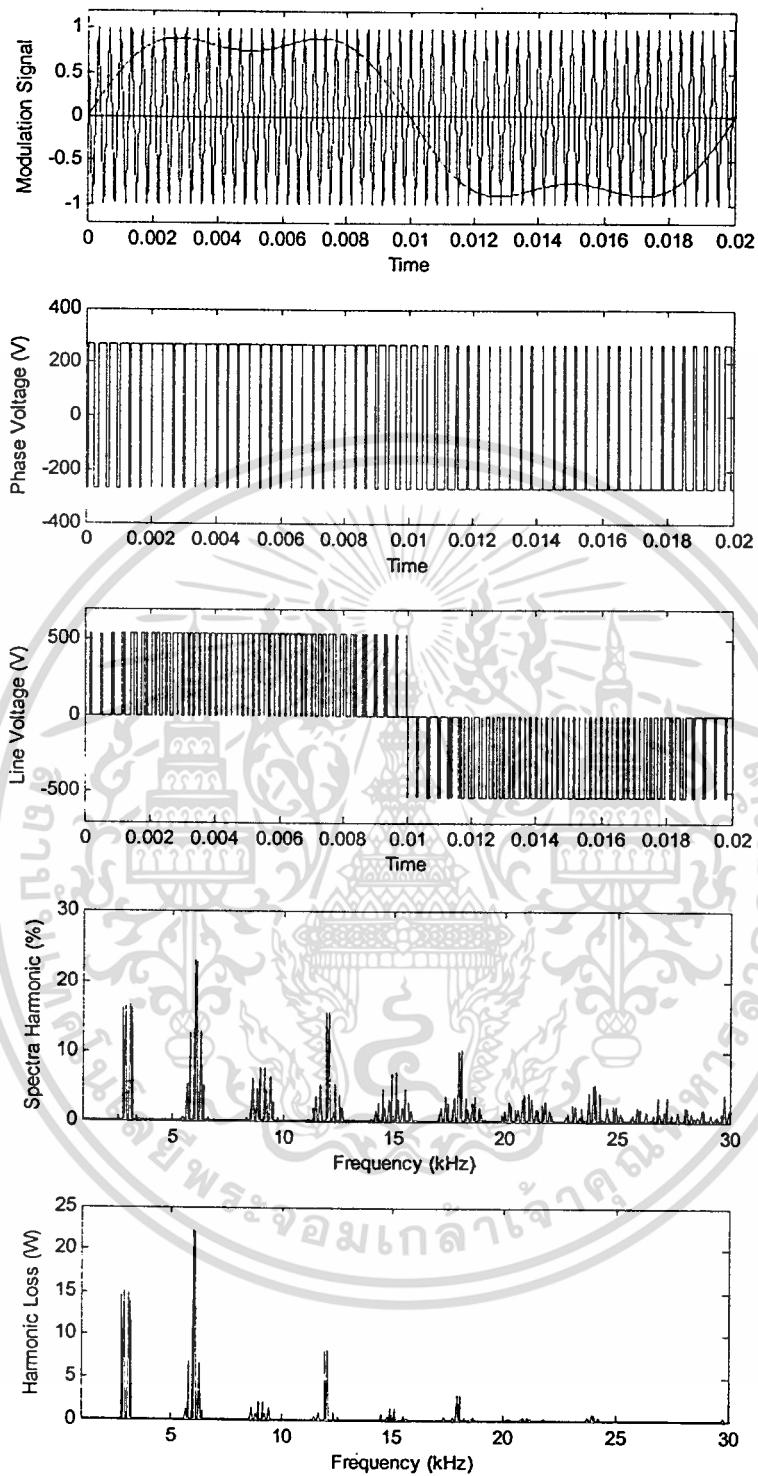
จากผลการคำนวณหาค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ถูกป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ระดับต่างๆ สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อจำนวนระดับของสัญญาณแรงดันมีค่าสูงขึ้นหรือสัญญาณแรงดันมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณไซน์มากยิ่งขึ้น จะทำให้ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าลดลง ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้อ้างอิงในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คำนึงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำจะอยู่ที่ 5 ถึง 7 ระดับ เพราะที่จำนวนระดับที่สูงกว่านี้ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าลดลงไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุน, ความยุ่งยากในการออกแบบ และค่าสูญเสียในตัวของอินเวอร์เตอร์ที่จะเพิ่มขึ้นมา และในส่วนท้ายของบทนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ค่าดัชนีมอดูเลชันเท่ากับ 1 ที่ความถี่สวิตซ์ $f_s = 4.8 \text{ kHz}$ ของอินเวอร์เตอร์ 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ระดับ เทคนิค SPWM, THPWM และ SVPWM



รูปที่ 5.12 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

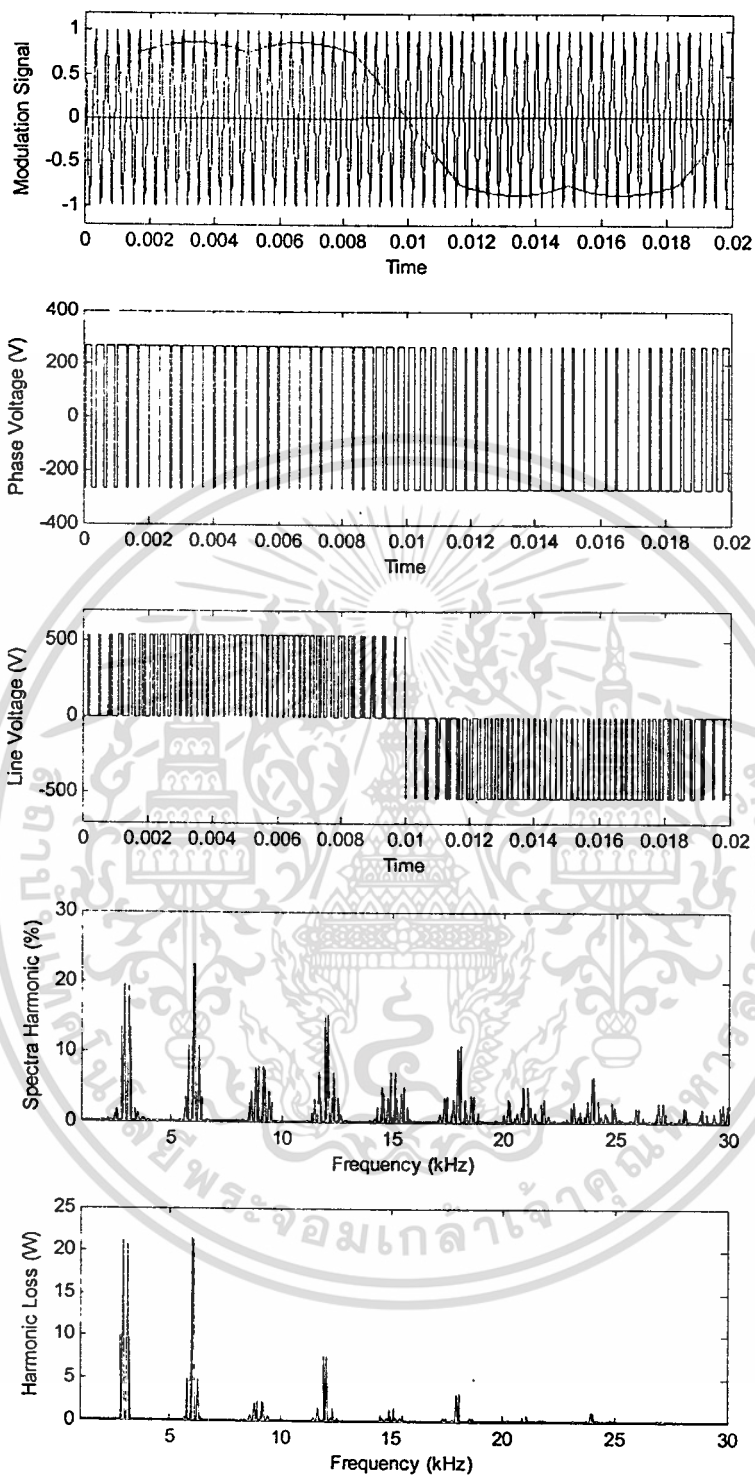
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_s = 3 \text{ kHz}$, SPWM ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

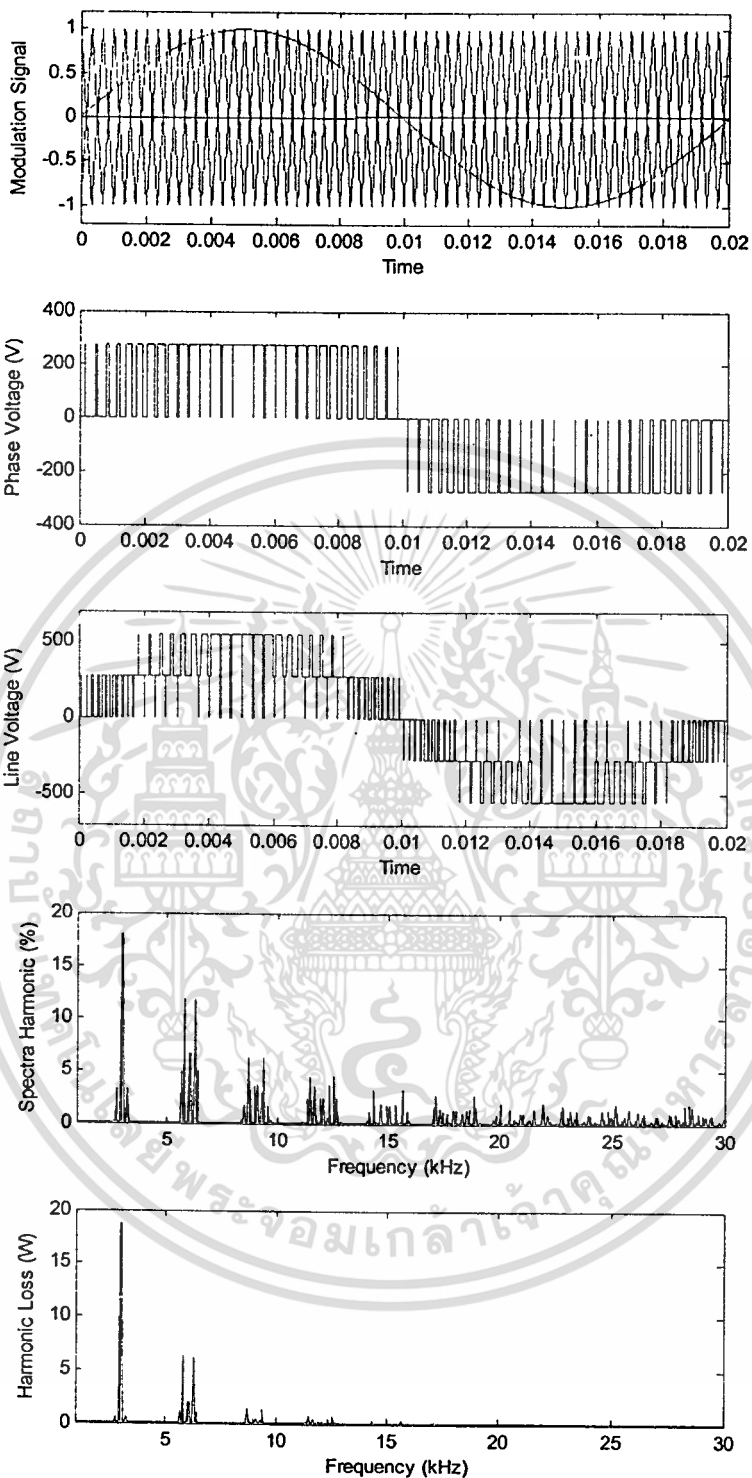
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

2 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

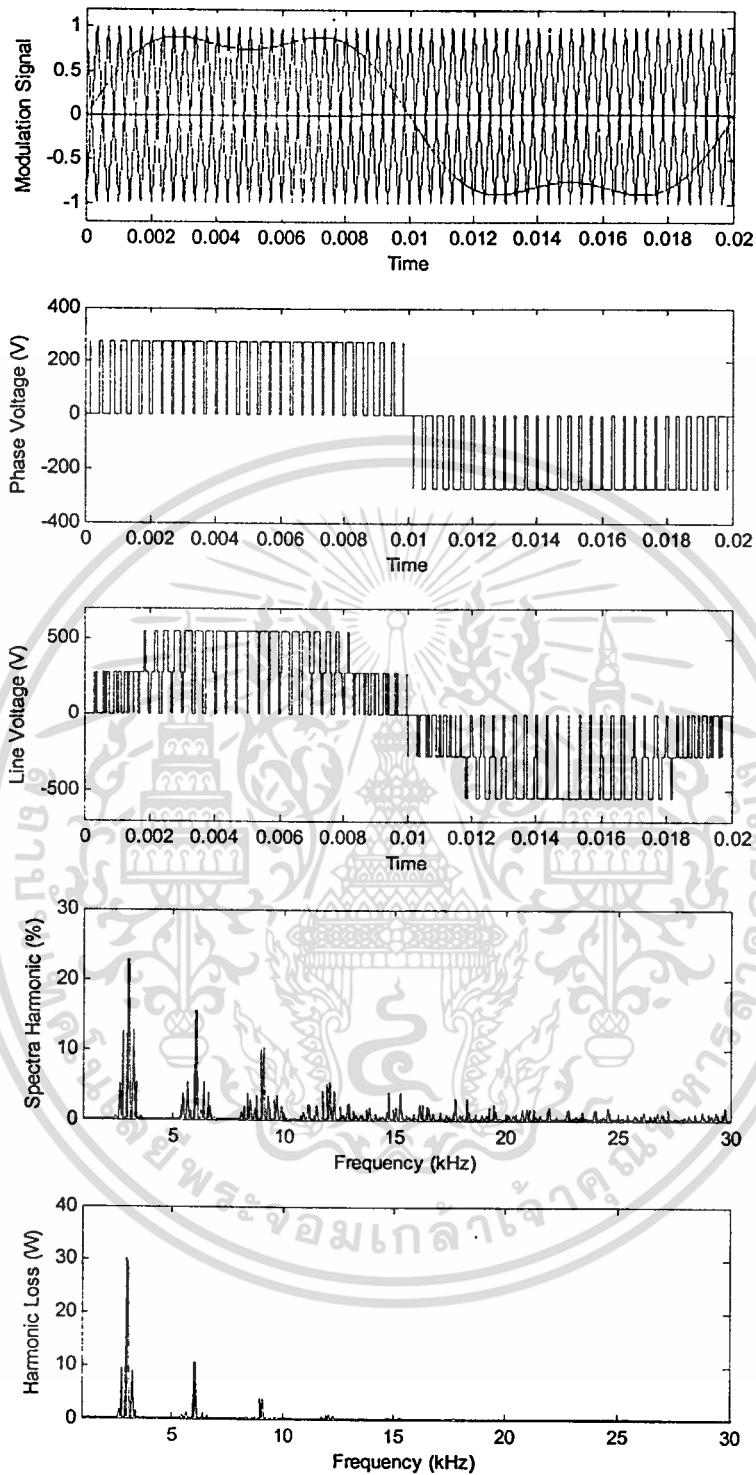
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

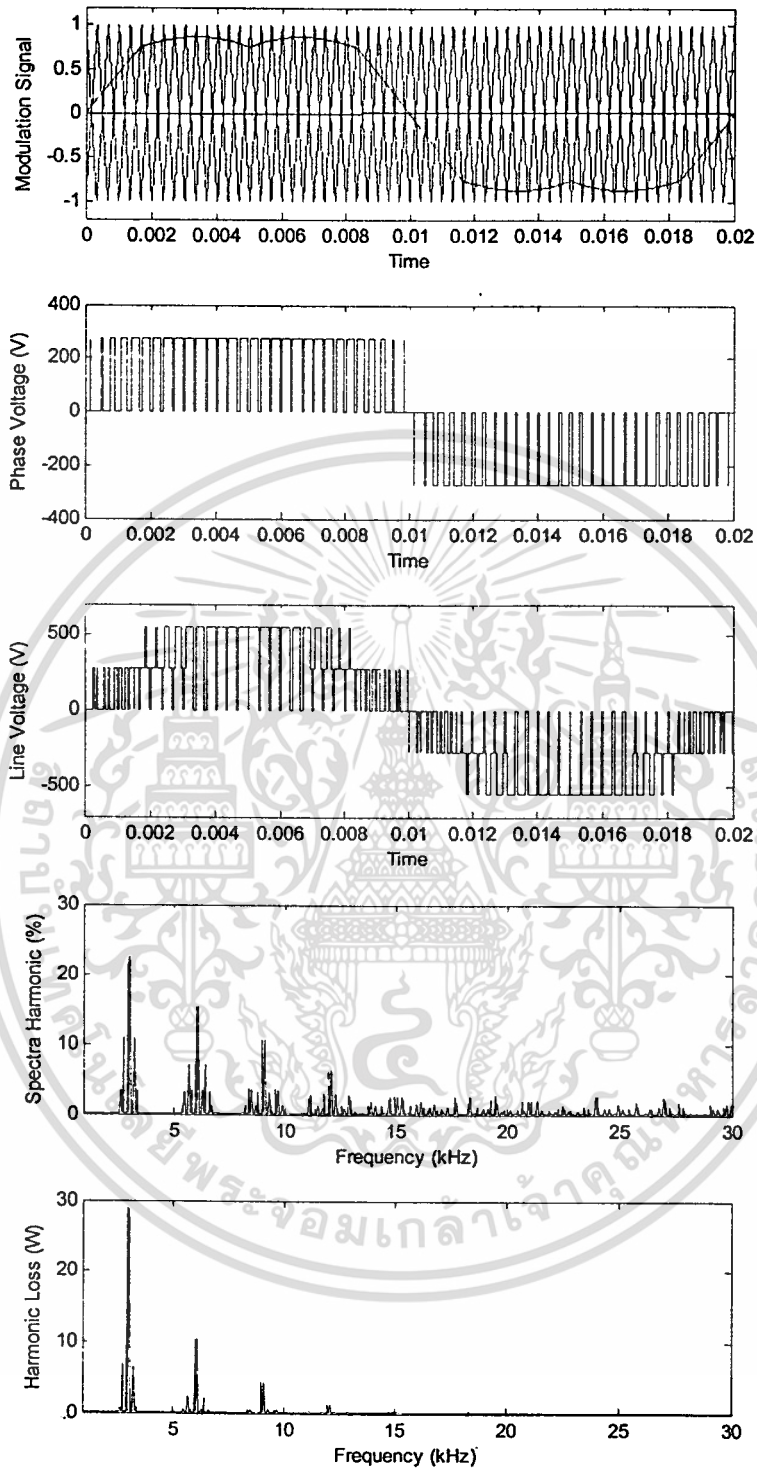
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

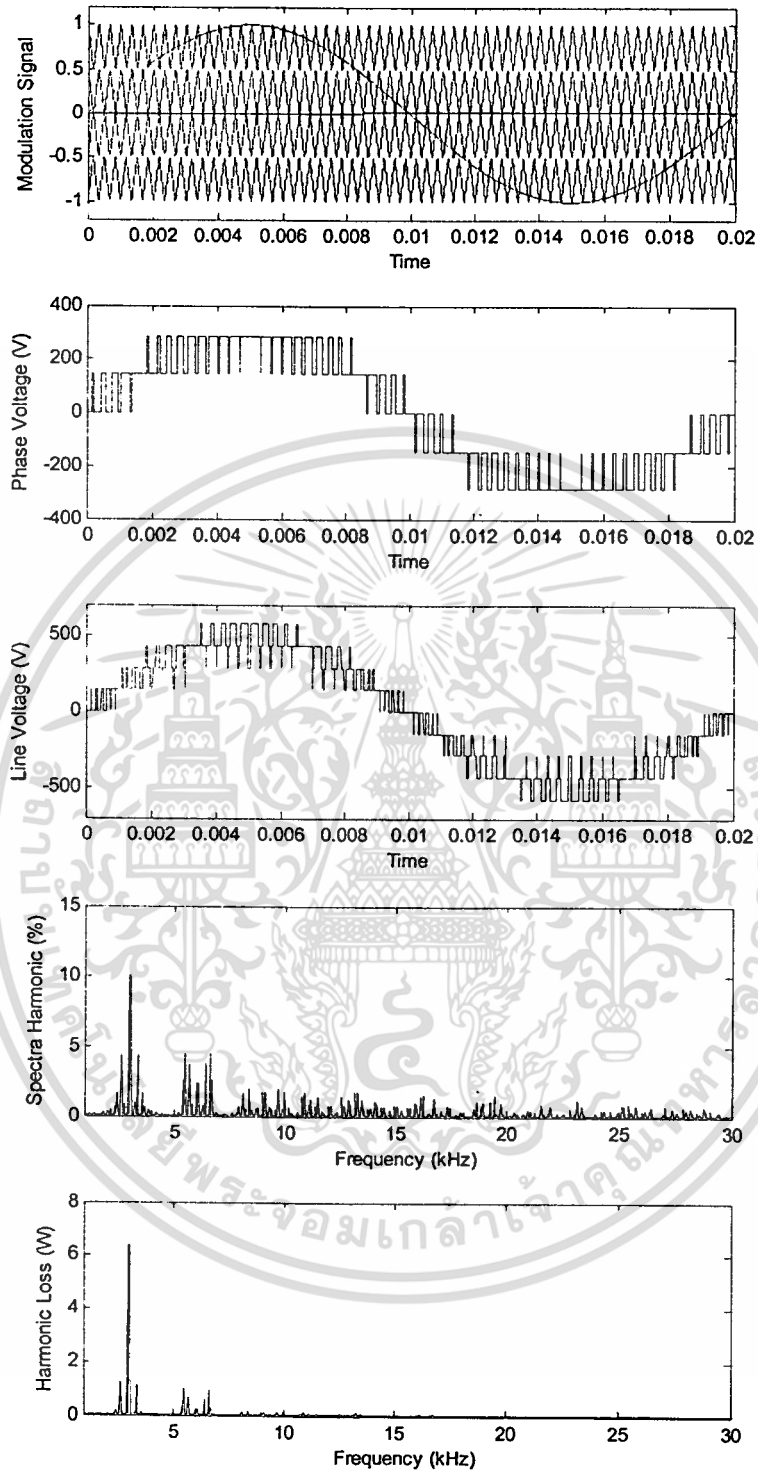
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

3 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

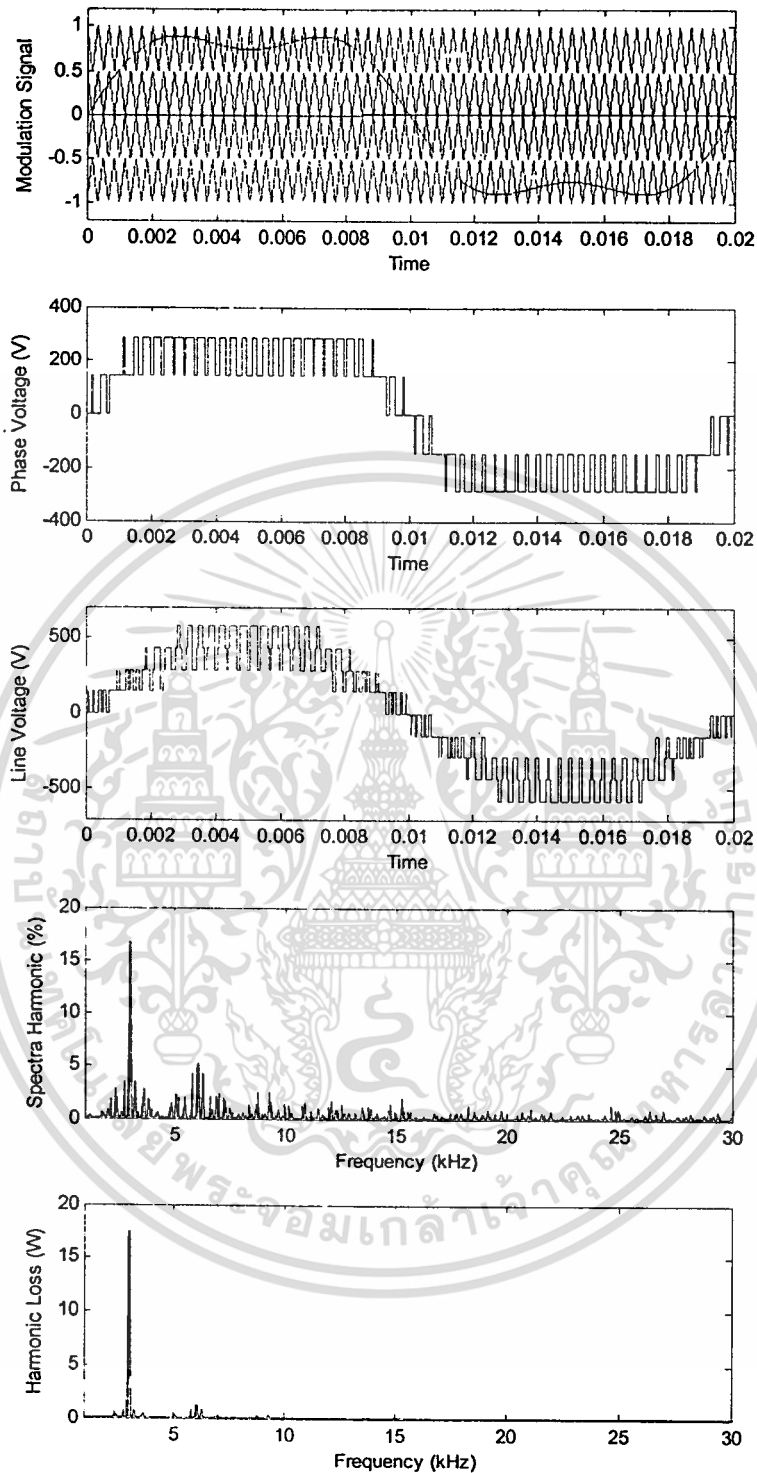
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

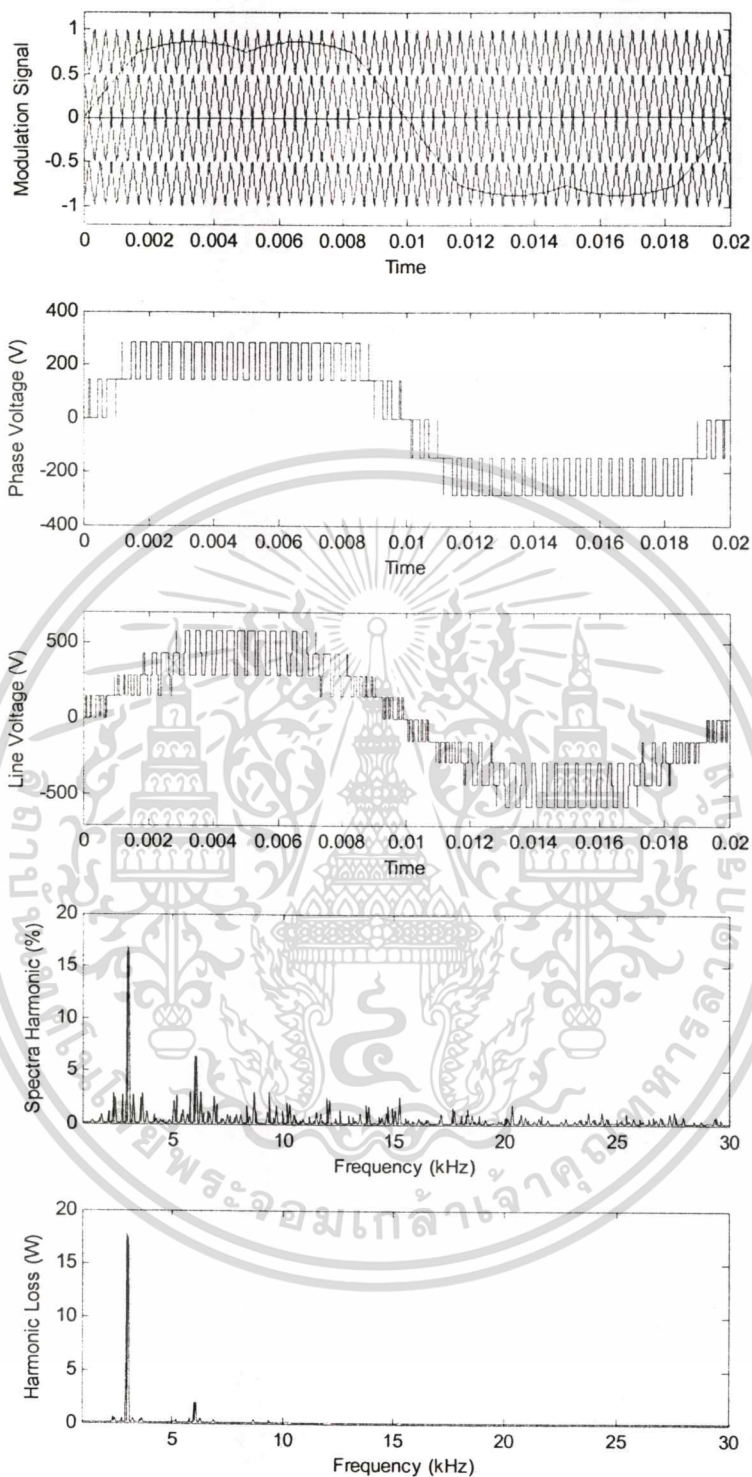
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

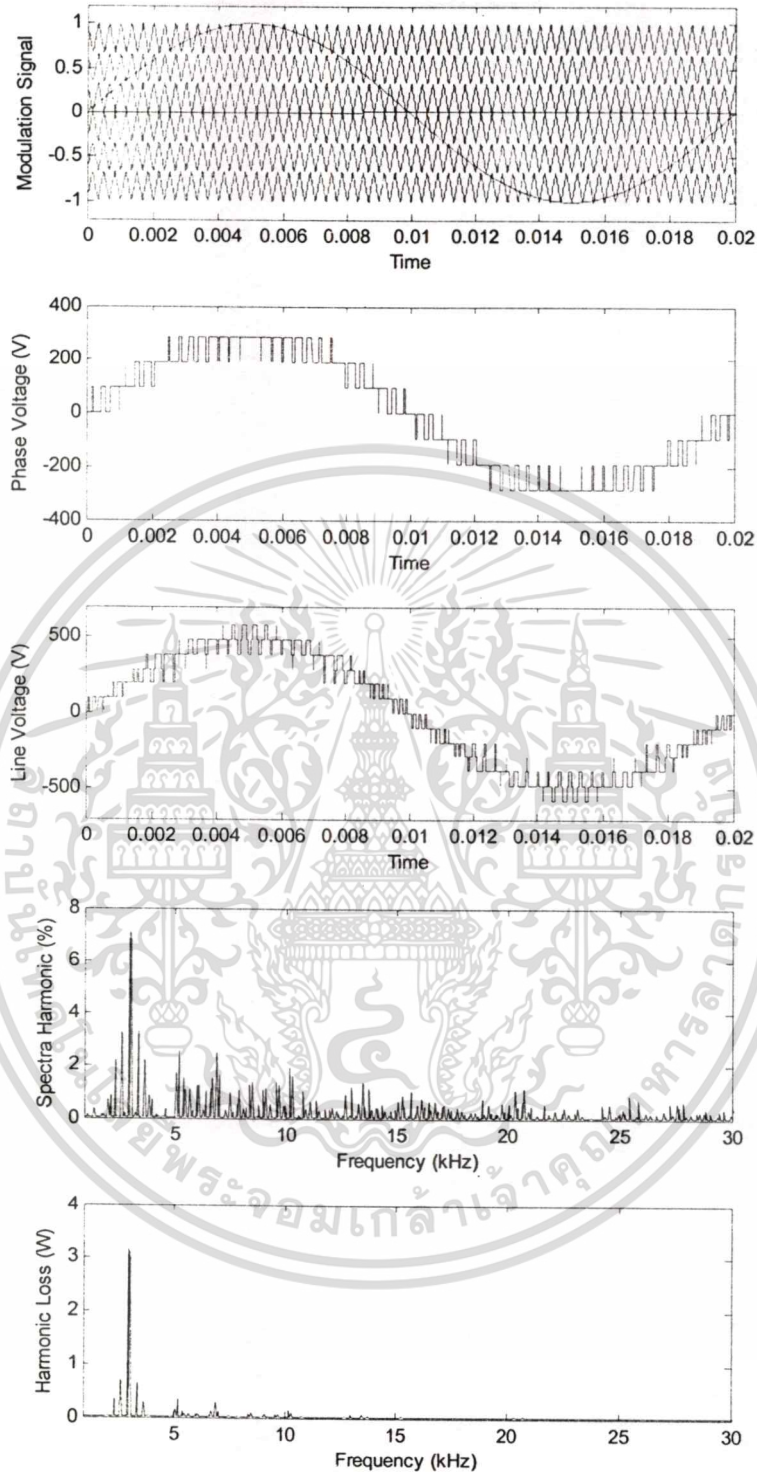
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

5 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

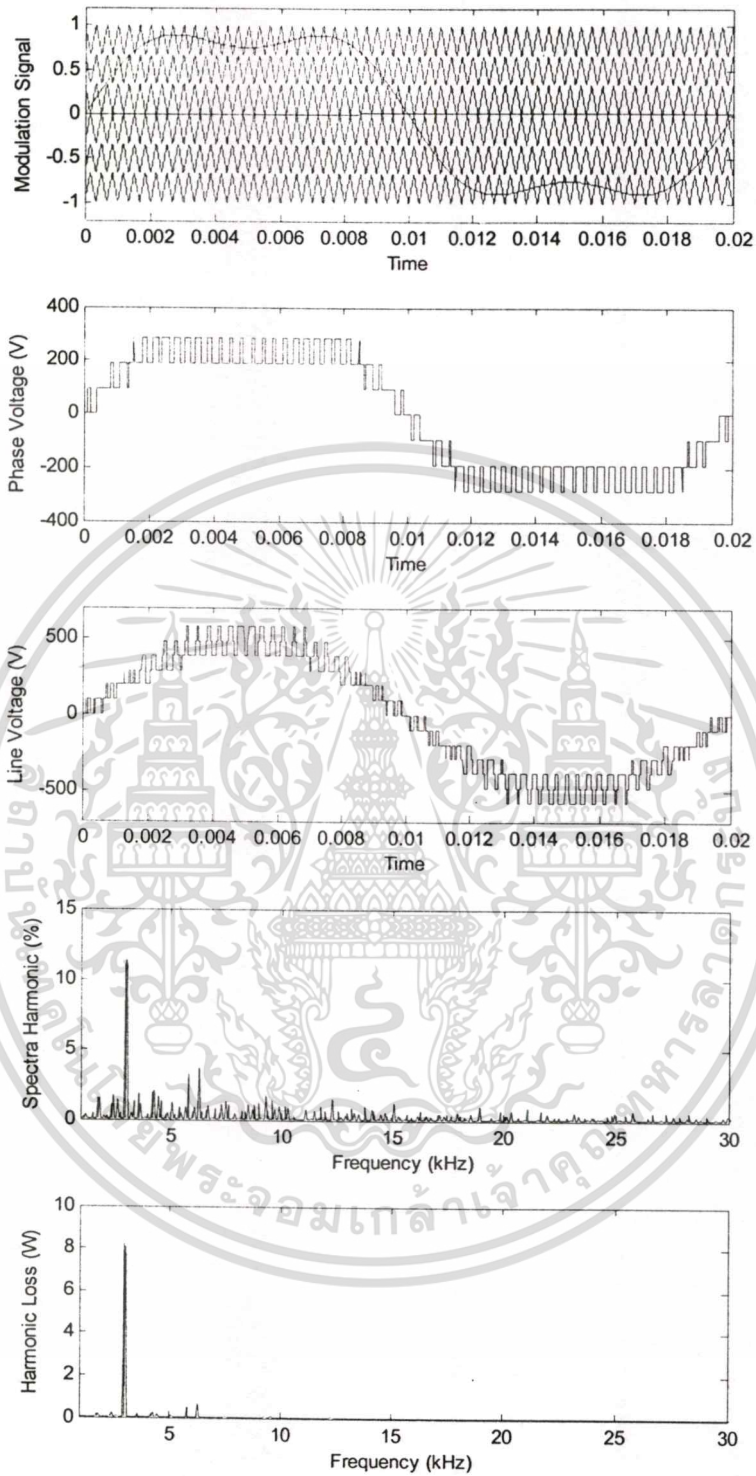
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

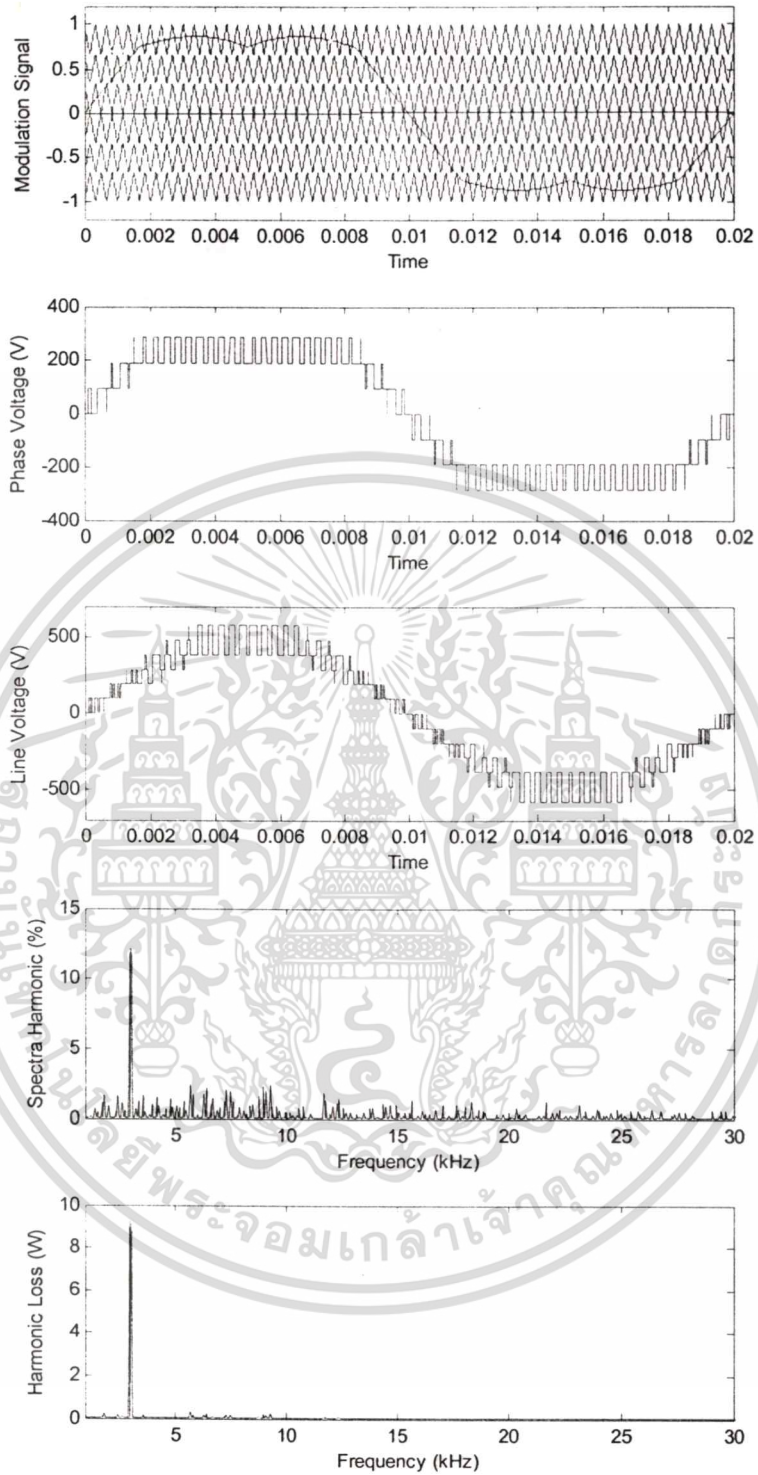
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิก

7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_s = 3 \text{ kHz}$, THPWM

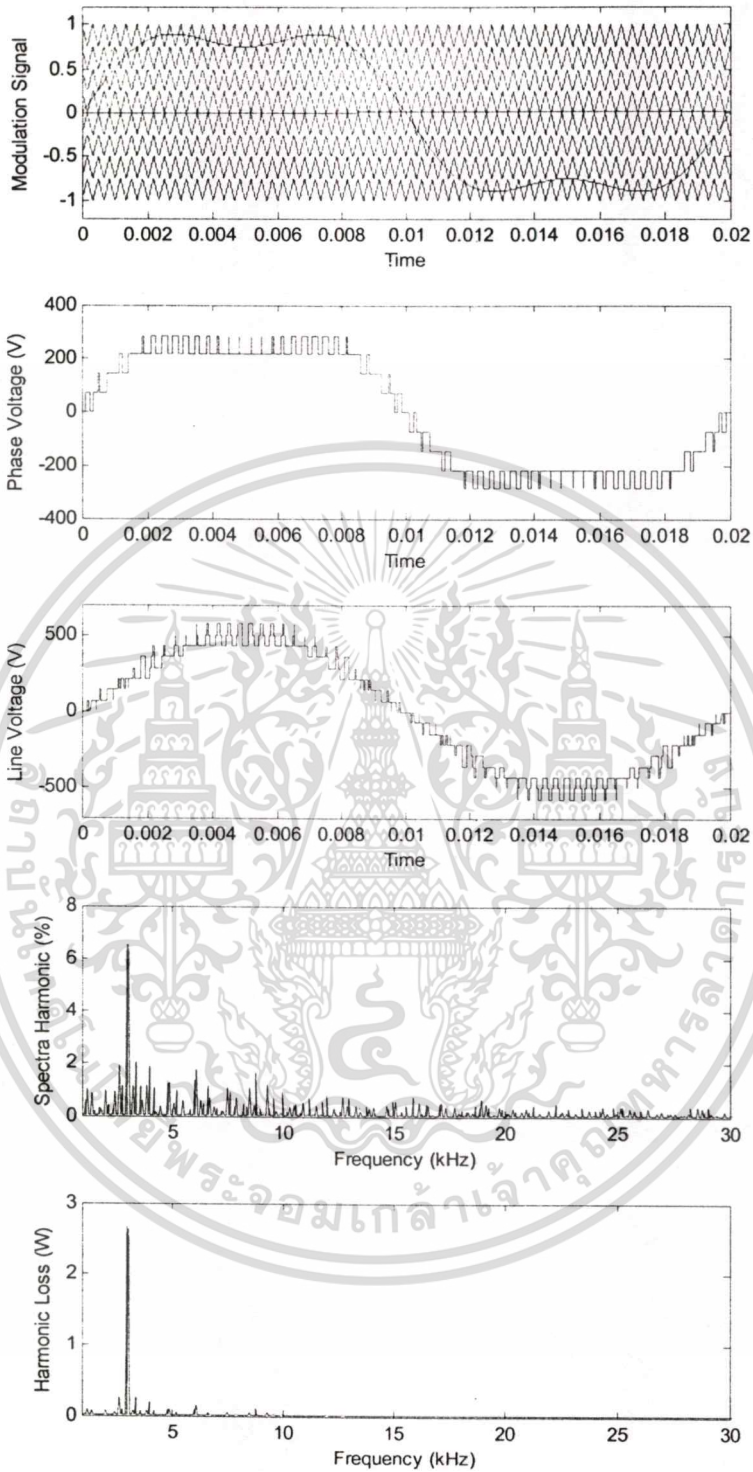
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิก

7 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

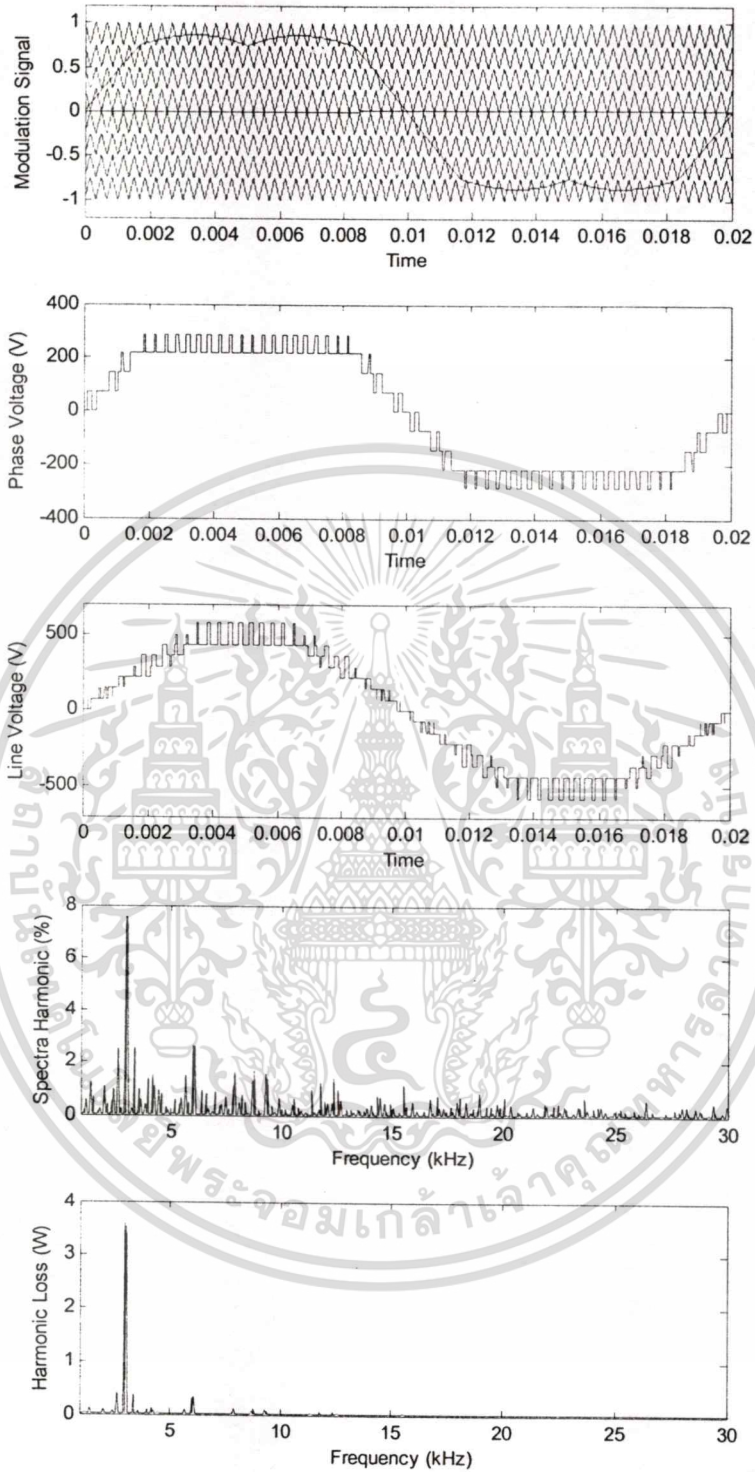
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

9 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

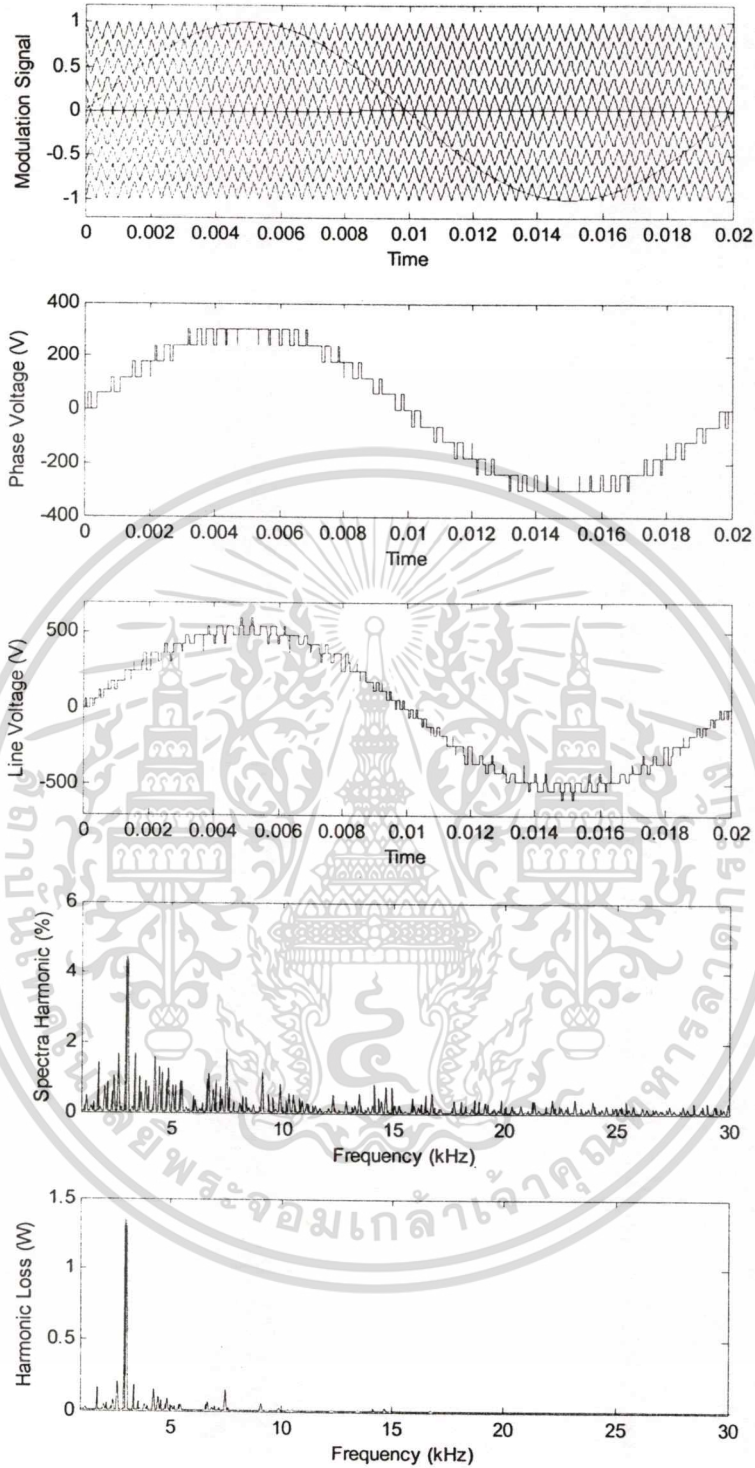
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

9 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

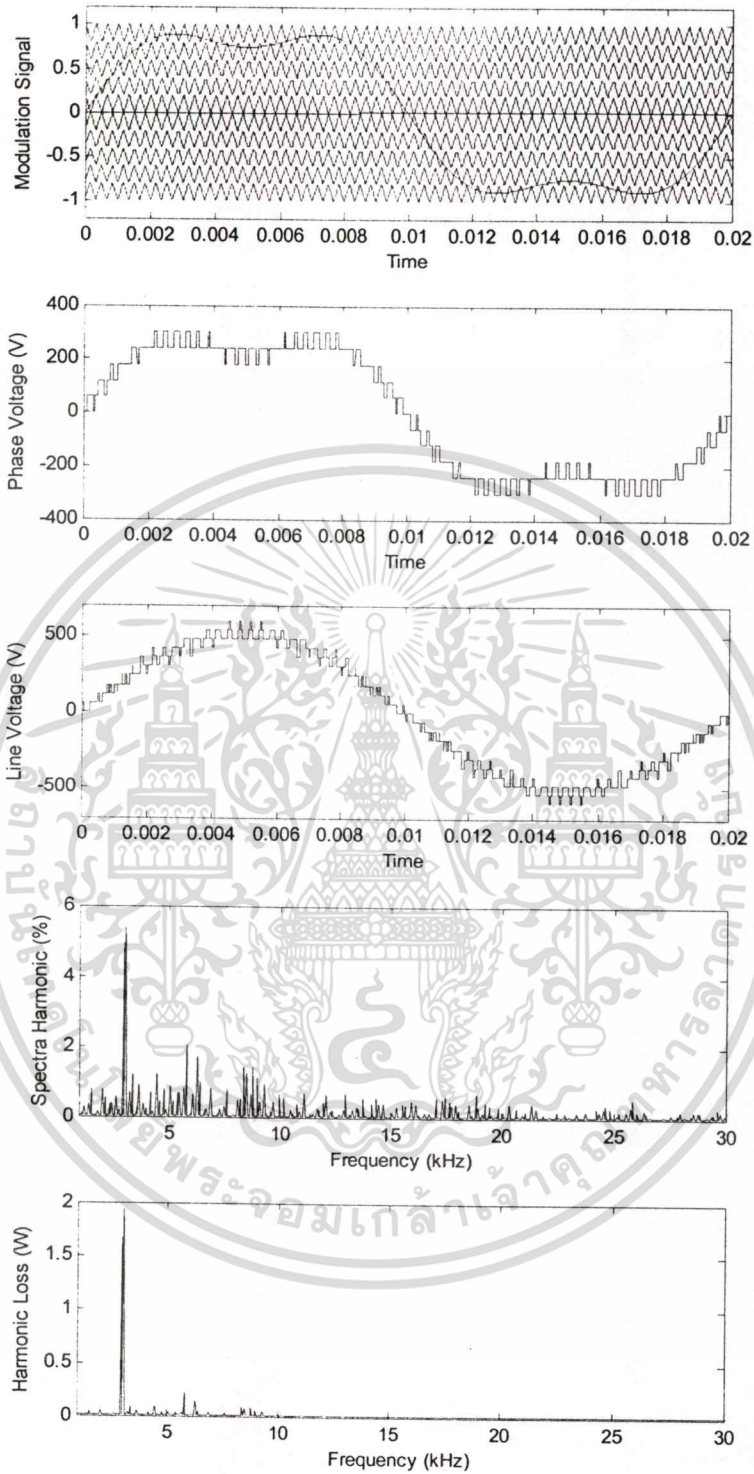
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

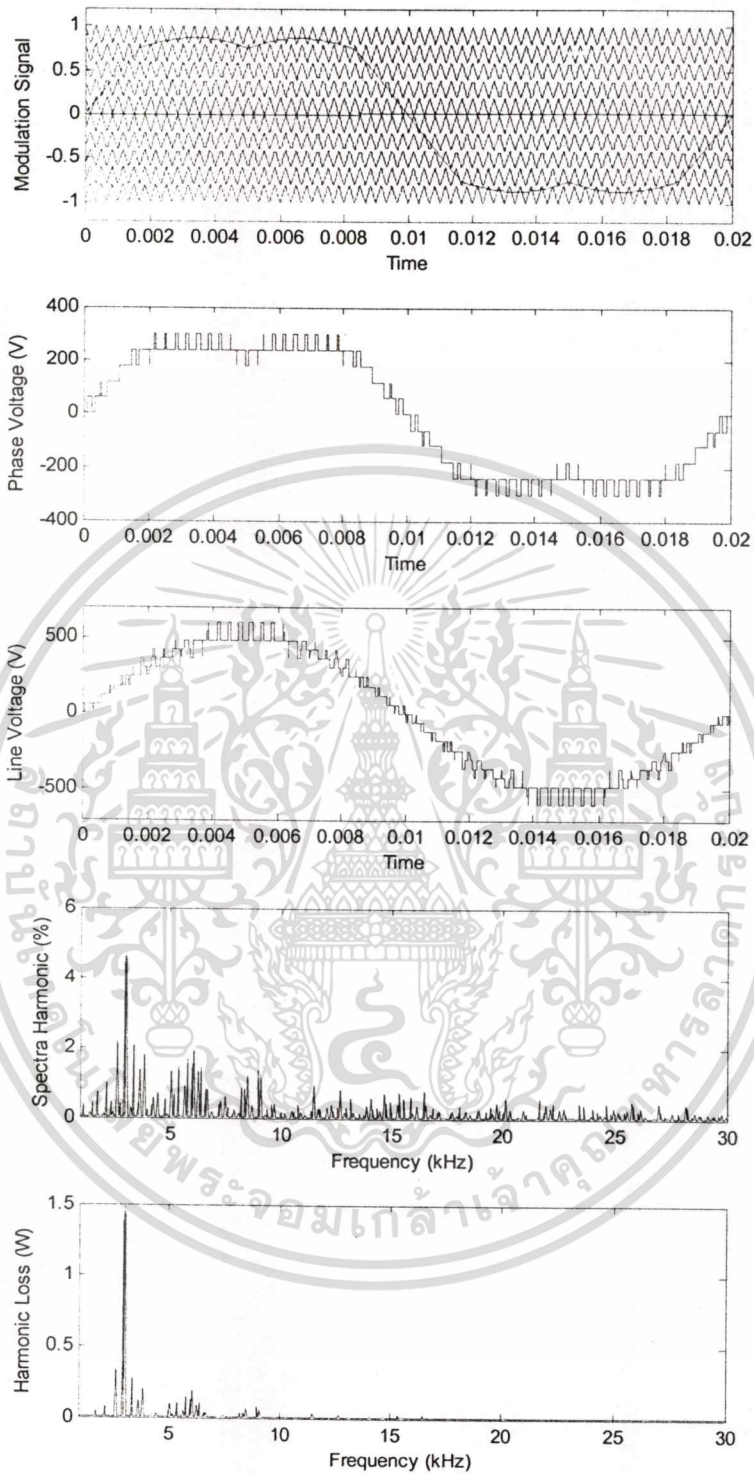
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

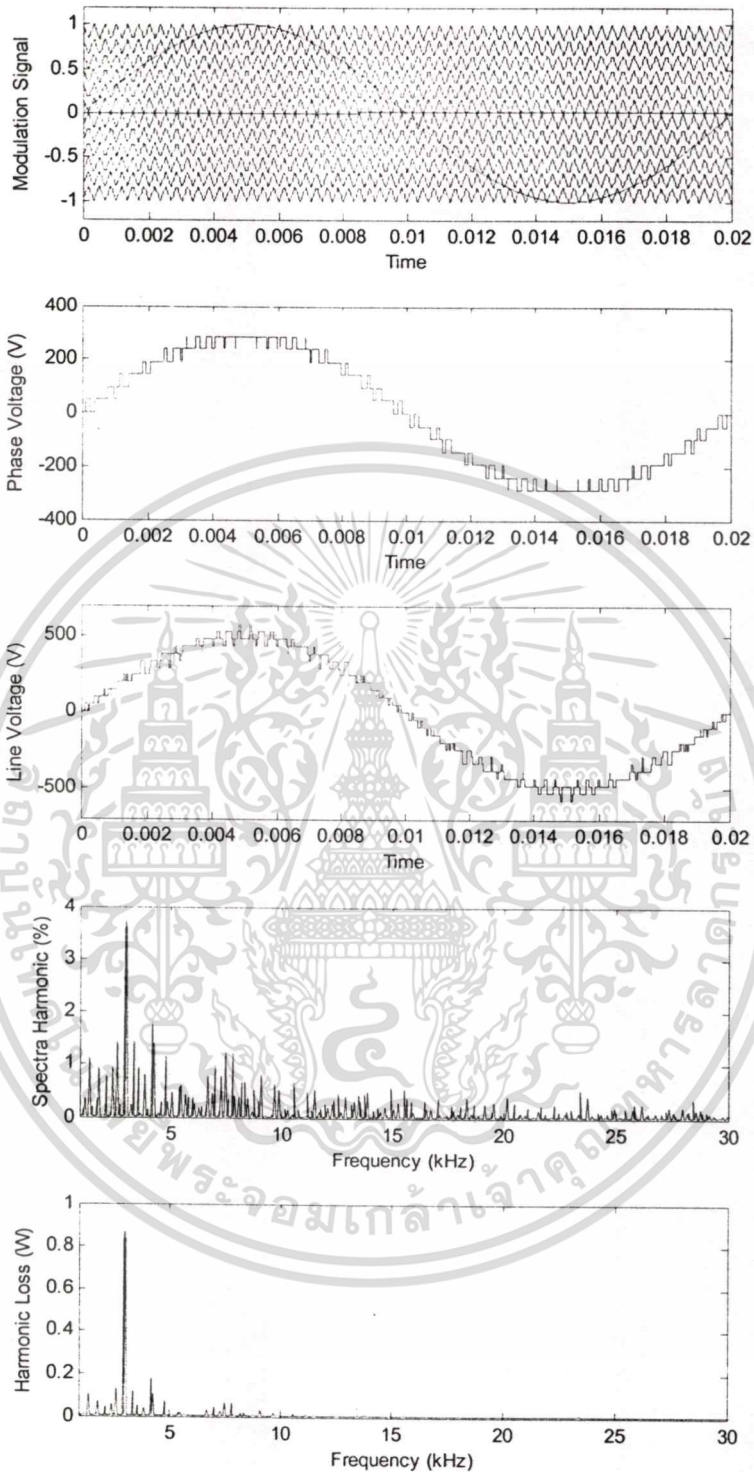
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

11 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

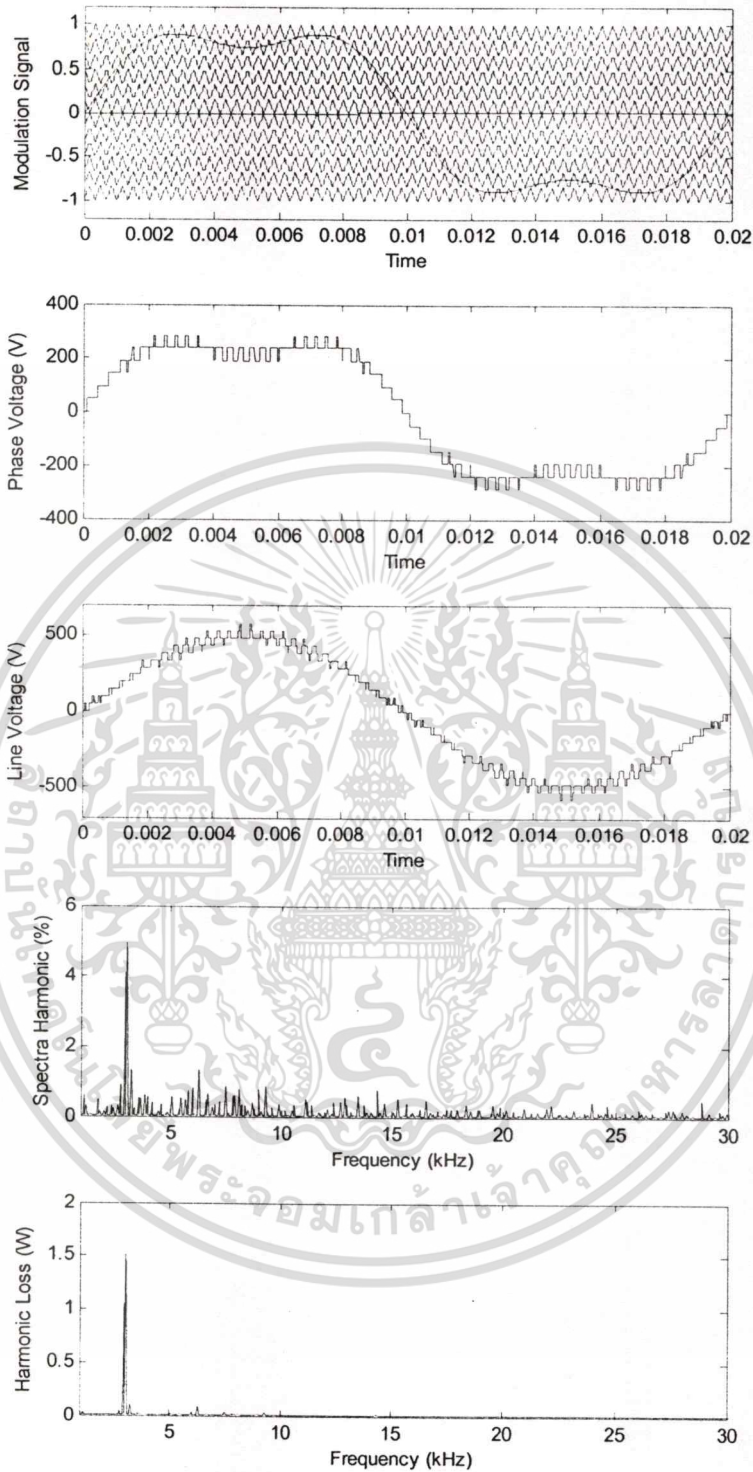
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

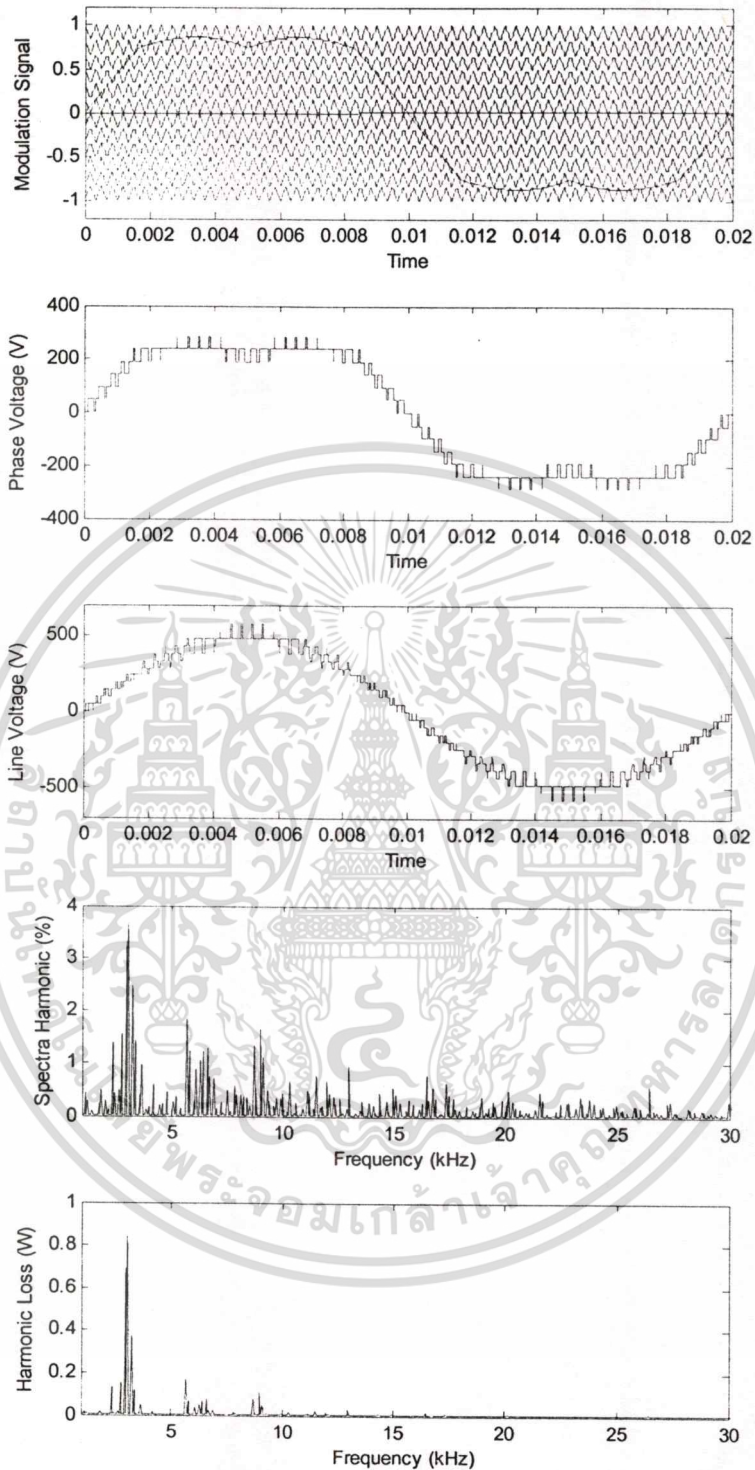
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิก

13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

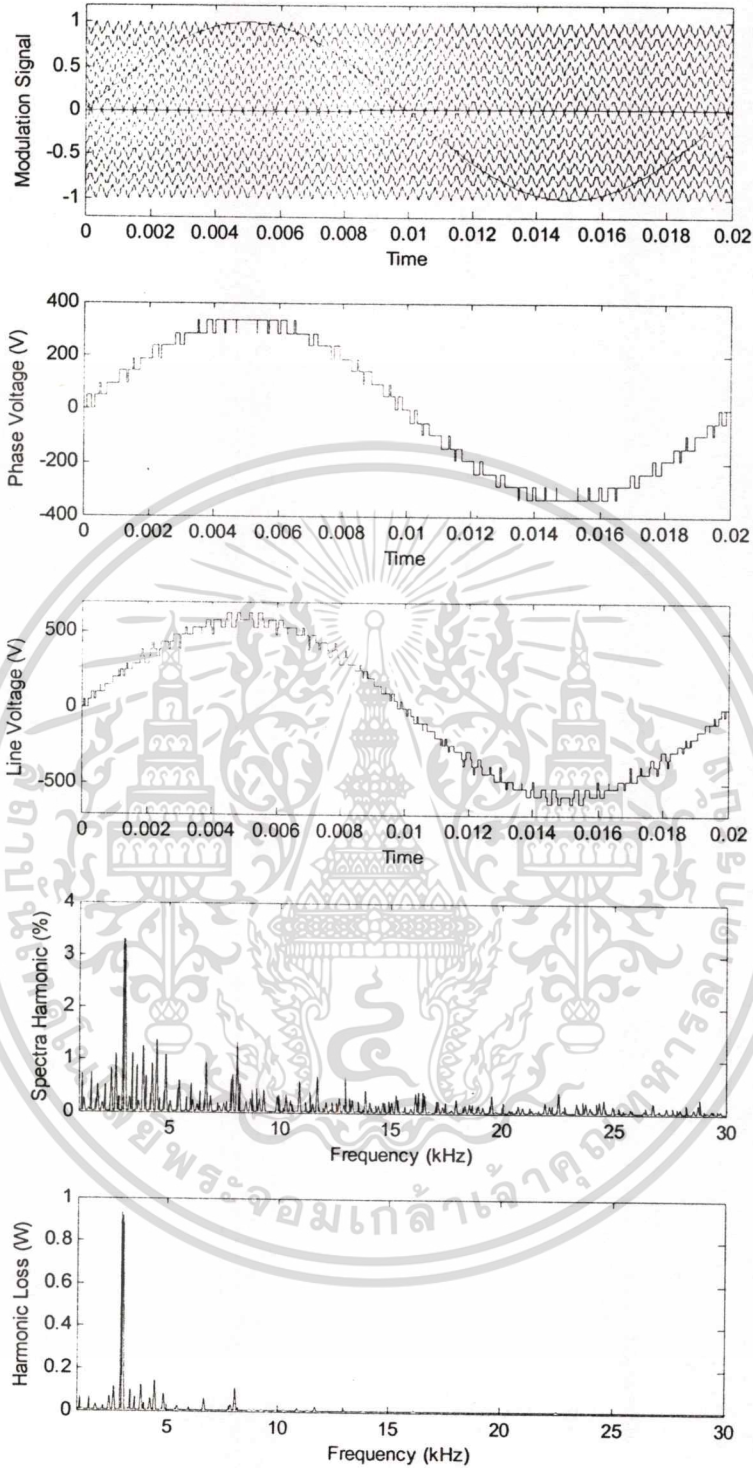
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

13 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

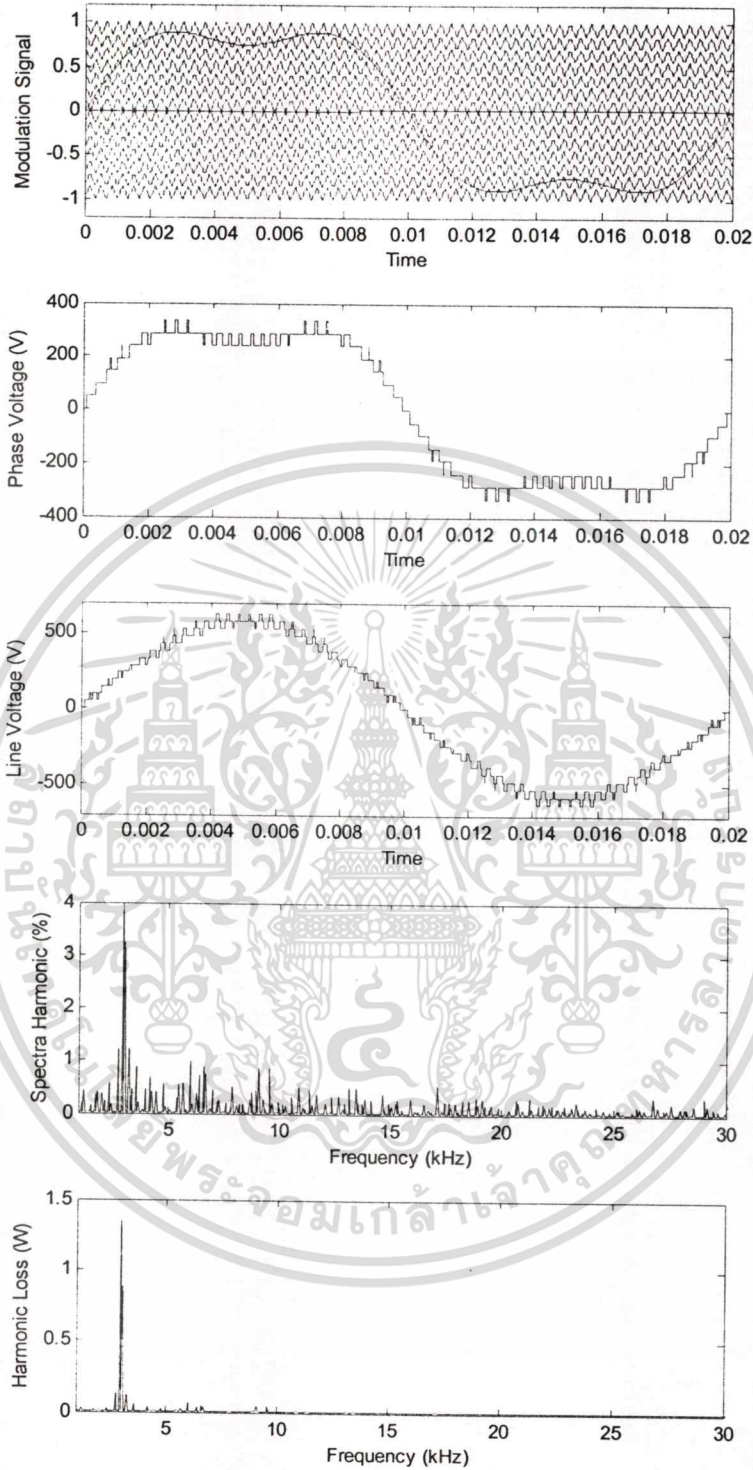
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SPWM

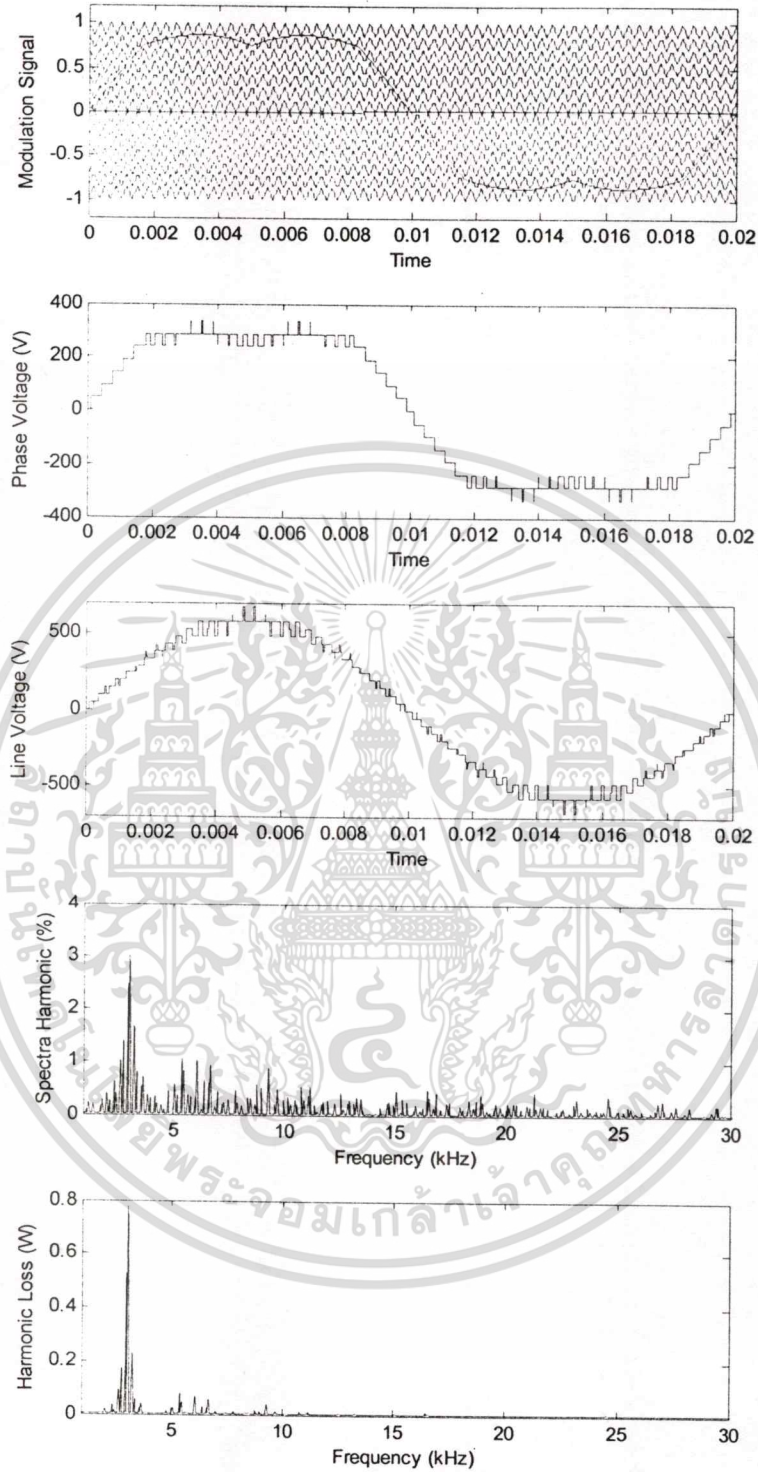
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, THPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก

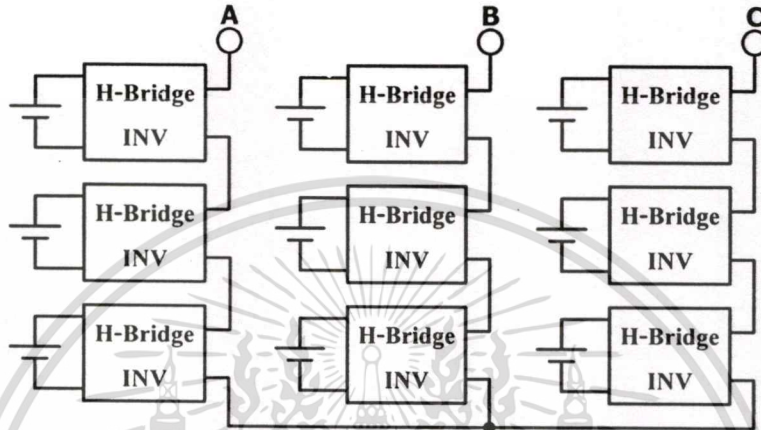
15 Level, Mod = 1, $f_1 = 50$ Hz, $f_s = 3$ kHz, SVPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

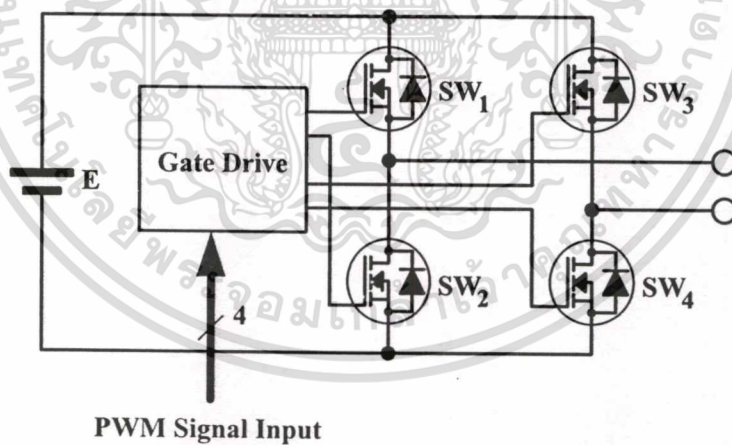
การออกแบบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์

6.1 การออกแบบวงจรกำลัง



รูปที่ 6.1 แสดง โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์

6.1.1 การออกแบบสวิตช์กำลัง



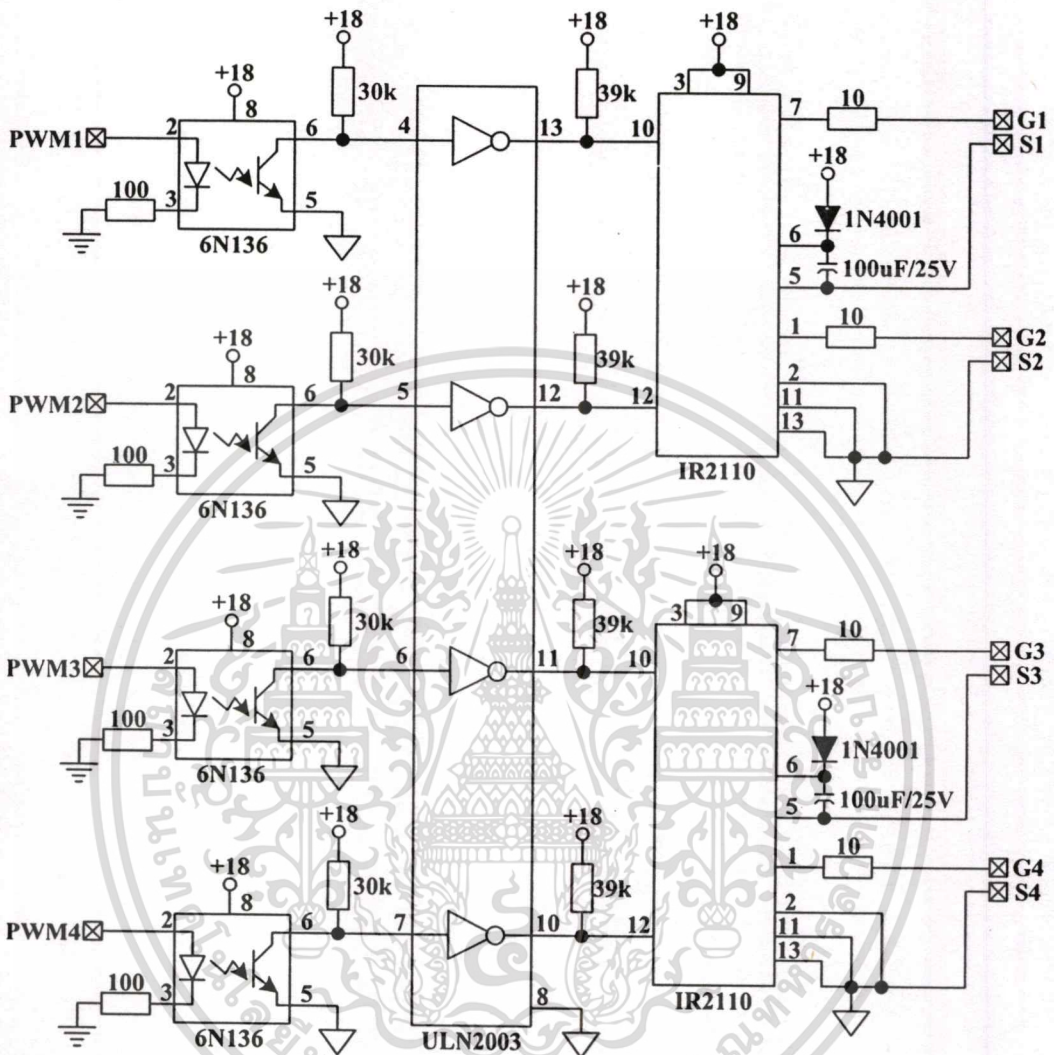
รูปที่ 6.2 แสดง โครงสร้างของวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า 380 โวลต์ ด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์ สำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์จะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสฟูลบริดจ์จำนวน 9 ชุดดังรูปที่ 6.1 และได้ออกแบบให้ทำงานที่ค่าระดับแรงดันไฟตรงเท่ากับ 288 โวลต์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแต่ละชุดจะทำงานที่แรงดัน 96 โวลต์ตามตารางที่ 4.1 โดยได้เลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์เป็นมอสเฟสชนิดเอ็นเบอร์ IRFS630B ซึ่งมีพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

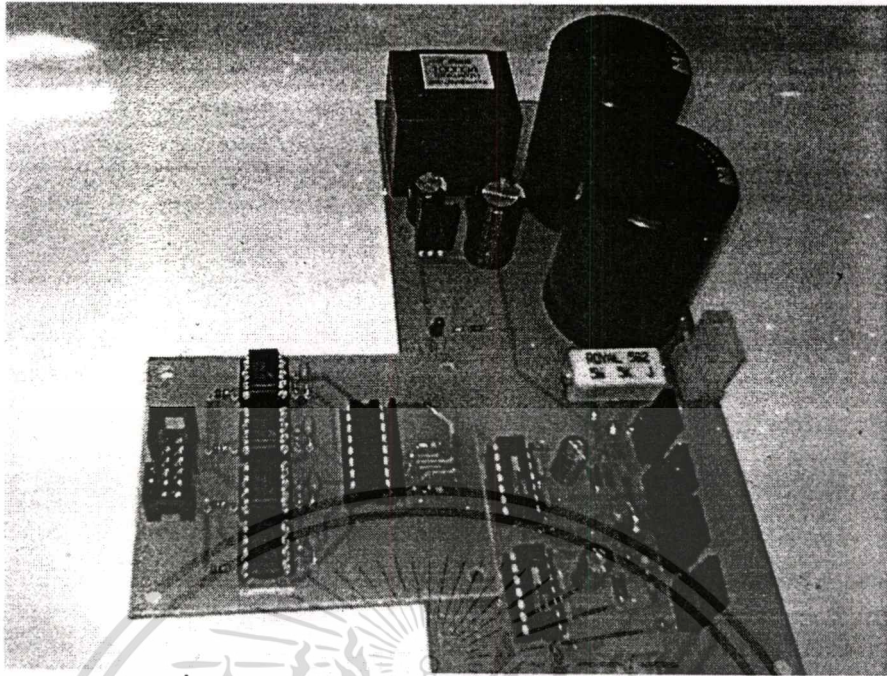
6.1.2 การออกแบบวงจรขับนำ



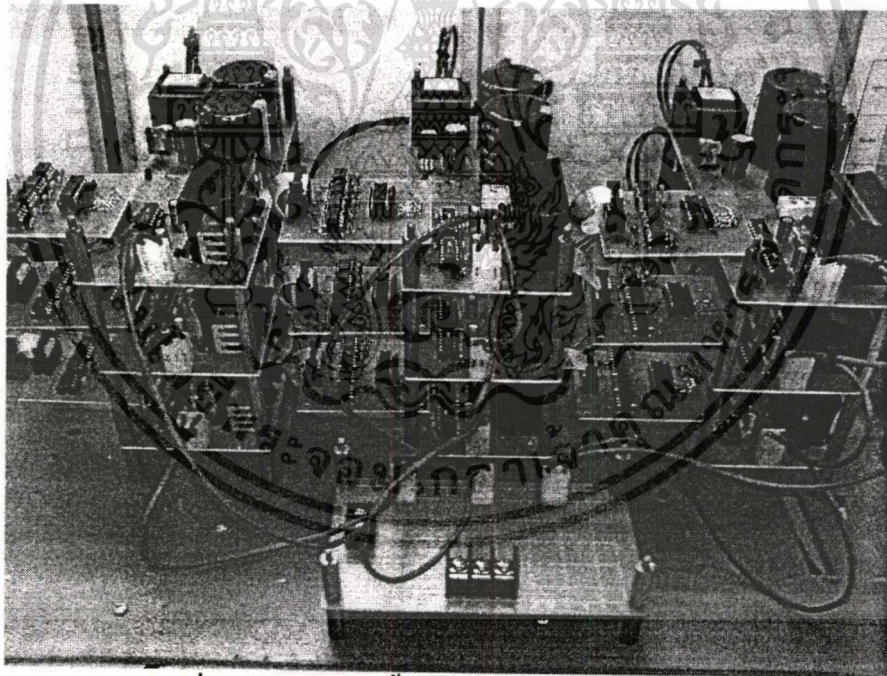
รูปที่ 6.3 วงจรขับนำของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วงจรขับนำเลือกใช้ไอซีเบอร์ IR2110 เป็นตัวขับนำเพราะสามารถใช้ไฟเลี้ยงเพียงชุดเดียว ทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงและต้นทุนก็มีความลดลง โดยใช้อปโตไดโอดเบอร์ 6N136 ต่อแบบกลับสัญญาณ (Invert) เพื่อแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุม และใช้ไอซีเบอร์ ULN2003 เพื่อกลับสัญญาณให้เป็นเหมือนด้านอินพุตก่อนเข้าไอซีขับนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 วงจรกำลังหนึ่งเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



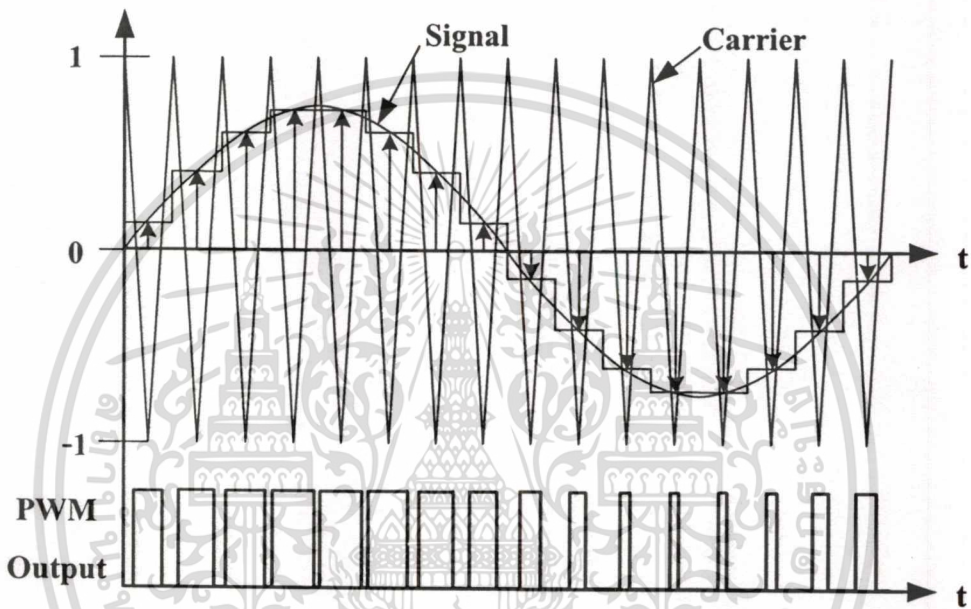
รูปที่ 6.5 วงจรกำลังทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

6.2 การออกแบบวงจรควบคุม

ในการออกแบบวงจรควบคุม นั้นความยุ่งยากจะทวีตามจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ เพราะนั่นหมายถึงจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากใช้ระบบการควบคุมแบบอนาล็อกจะต้องใช้ตัวคอมแพเลเตอร์หลายชุดด้วยกัน ซึ่งใช้การคอมแพเลเตอร์ในทางอนาล็อกแม้จะง่ายต่อการออกแบบก็จริงแต่ก็จะพบความยุ่งยากในเรื่องวงจรที่ซับซ้อน และค่าออฟเซตที่จะเกิดขึ้น วิธีการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและควบคุมการทำงาน เพราะจะทำให้วงจรควบคุมมีขนาดเล็กและสามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้สะดวกกว่า ก่อนทำการออกแบบจะต้องทำความเข้าใจหลักการออกแบบวงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับต่อไป

6.2.1 การมอดูเลชันพีดีดับลิแวนแบบอาศัยคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ



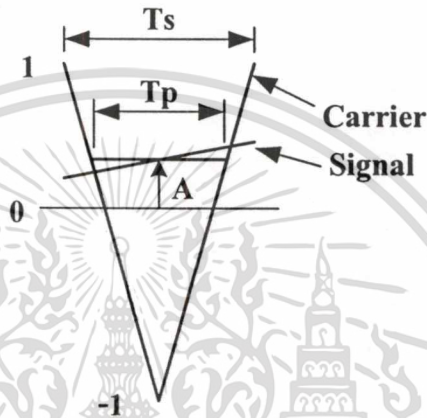
รูปที่ 6.6 แสดงการมอดูเลชันแบบเร็กกูลาร์แซมปลิงที่มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณไซน์

ในการออกแบบวงจรควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบอาศัยคลื่นพาหะนั้น จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบวงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับแบบอาศัยคลื่นพาหะเสียก่อน โดยเทคนิคที่ใช้เรียกว่า เร็กกูลาร์แซมปลิง (Regular Sampling) โดยจะกำหนดให้คลื่นพาหะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความสูงของยอดล่างและบนเท่ากับ -1 และ 1 ตามลำดับ และกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการมอดูเลชันมีค่าคงที่ตลอดช่วงคาบของคลื่นพาหะ ดังรูปที่ 6.6 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพัลส์กับความสูงของสัญญาณอ้างอิงจะเป็นไปตามสมการที่ 6.1

$$\frac{T_p}{T_s} = \frac{1}{2} + \frac{A}{2} \quad ; -1 \leq A \leq 1 \quad (6.1)$$

หรือ
$$T_p = (1 + A) \frac{T_s}{2} \quad (6.2)$$

- เมื่อ T_p คือ ความกว้างพัลส์ของสัญญาณเอาต์พุต
 T_s คือ คาบเวลาของคลื่นพาหะ
 A คือ ความสูงของสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุต

ดังนั้นถ้าความสูงของสัญญาณอ้างอิง (A) นั้นเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของสัญญาณไซน์ หรือเทคนิคการมอดูเลชันแบบไซน์ (SPWM) จึงสามารถเขียนในรูปสมการได้ ดังสมการที่ 6.3

$$T_p = (1 + m \sin(\omega t)) \frac{T_s}{2} \quad (6.3)$$

เทคนิคการมอดูเลชันแบบไซน์บวกด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 (THPWM) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 6.4

$$T_p = \left(1 + m \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \sin(3\omega t) \right) \right) \frac{T_s}{2} \quad (6.4)$$

และเทคนิคการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ (เทียบเท่า) แบบอาศัยคลื่นพาหะ สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 6.5

$$T_p = \left(1 + m \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \text{Tri}(3\omega t) \right) \right) \frac{T_s}{2} \quad (6.5)$$

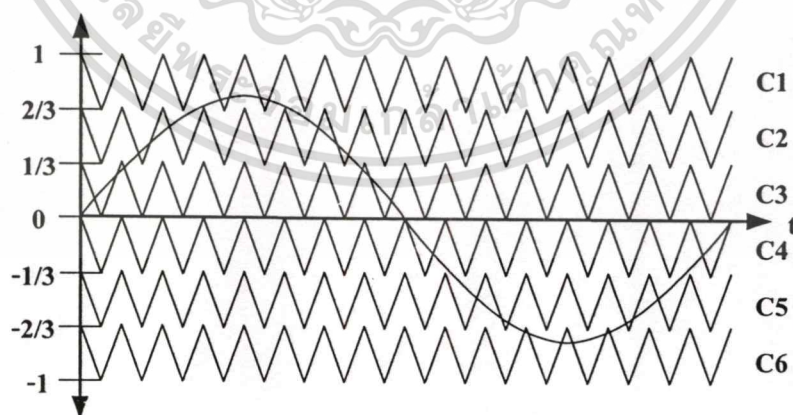
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } Tri(\omega t) = \begin{cases} \frac{2(\omega t)}{\pi} & ; 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{-2}{\pi} \left((\omega t) - \frac{\pi}{2} \right) + 1 & ; \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2} \\ \frac{2}{\pi} \left((\omega t) - \frac{3\pi}{2} \right) - 1 & ; \frac{3\pi}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (6.6)$$

6.2.2 การมอดูเลชันพีดับบลิวเอ็มแบบอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

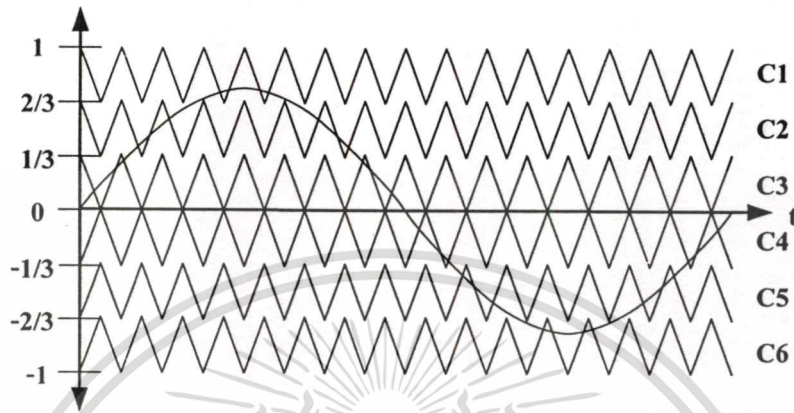
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบอาศัยคลื่นพาหะ ซึ่งการมอดูเลชันของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 7 ระดับจะประกอบด้วยสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณของคลื่นพาหะสามเหลี่ยมอีก 6 สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 6.8 ประกอบด้วยคลื่นพาหะในซีกบวก 3 สัญญาณและซีกลบ 3 สัญญาณ โดยกำหนดให้ค่ายอดสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นพาหะรวม มีค่า 1 และ -1 ตามลำดับเพื่อให้สะดวกในการกำหนดค่าดัชนีการมอดู โดยคลื่นพาหะแต่ละคลื่นจะมีความสูงจากยอดถึงยอดเท่ากับ $1/3$ ซึ่งเทคนิคของคลื่นพาหะมีนั้ได้มีหลายนักวิจัยคิดค้นวิธีการมากมายเพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยเทคนิคที่นิยมใช้มีด้วยกัน 3 วิธีดังนี้

1. Phase Disposition: PD ลักษณะคลื่นพาหะที่ใช้จะมีลักษณะมุมเฟสเริ่มต้นที่เหมือนกัน และจำนวนของคลื่นพาหะเท่ากับจำนวนระดับลบหนึ่ง ตัวอย่างของคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ดังรูปที่ 6.8



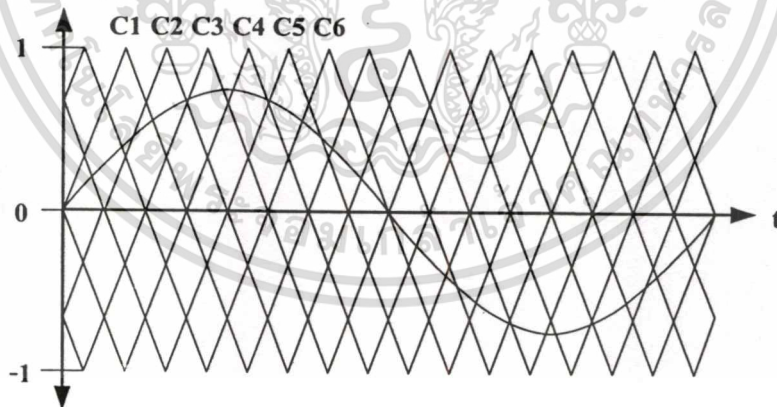
รูปที่ 6.8 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ PD

2. Phase Opposition Disposition : POD จะมีลักษณะใกล้เคียงกับเทคนิค PD จะแตกต่างกันที่สัญญาณของคลื่นพาหะในซีกลบจะมีมุมต่างเฟสกับคลื่นพาหะในซีกบวกเท่ากับ 180 องศา ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ POD

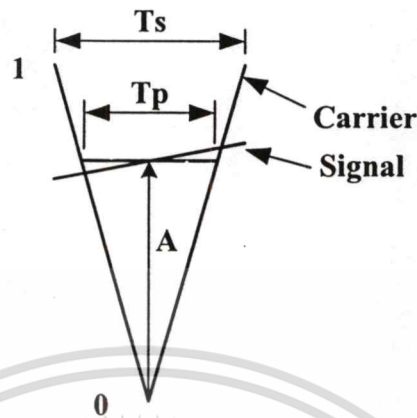
3. Phase-Shifted Carrier PWM: PSCPWM จะอาศัยมุมต่างเฟสของแต่ละคลื่นพาหะ เพื่อคำนวณสัญญาณพีดีบีบลิวเอ็มเอท์พุท ซึ่งแต่ละคลื่นพาหะจะมีความสูงขดต่างและบนเท่ากับ -1 และ 1 ตามลำดับ ลักษณะของคลื่นพาหะตามรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงเทคนิคการมอดูเลชันแบบ PSCPWM

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกเทคนิคของคลื่นพาหะแบบ PD เพราะจะทำให้สัญญาณพีดีบีบลิวเอ็มเอท์พุทมีความสมมาตรทั้งด้านซีกบวกและซีกลบ

6.2.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาต์พุต สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพัลส์กับความสูงของสัญญาณอ้างอิงสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นเนื่องจากความสูงของคลื่นพาหะจะขึ้นอยู่กับจำนวนระดับ ดังนั้นในการหาค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณเอาต์พุตจะอาศัยหลักการเดียวกับการหาค่าความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับในสมการที่ 6.1 โดยจะพิจารณาให้ค่าความสูงจากยอดถึงยอดของคลื่นพาหะเป็นหนึ่งหน่วย ดังรูปที่ 6.11 และความสูงของสัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลชันมีจุดอ้างอิงที่ศูนย์ (ขอบล่างของคลื่นพาหะ) ดังนั้นค่าความกว้างของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นไปตามสมการที่ 6.7

$$\frac{T_p}{T_s} = A \quad ; 0 \leq A \leq 1 \quad (6.7)$$

ดังนั้นถ้าใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM ก็จะเป็นไปตามสมการที่ 6.8, 6.9 และ 6.10 ตามลำดับ

$$T_p = m \sin(\omega t) T_s \quad (6.8)$$

$$T_p = m \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \sin(3\omega t) \right) T_s \quad (6.9)$$

$$T_p = m \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \text{Tri}(3\omega t) \right) T_s \quad (6.9)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับความสูงของคลื่นพาหะจะเท่ากับ $1/3$ ดังนั้นในการทำให้ความสูงของคลื่นพาหะมีค่าเป็นหนึ่งหน่วยจึงจะต้องคูณด้วย 3 ยกตัวอย่างการคำนวณเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM จะเป็นดังสมการที่ 6.10

$$T_p = \begin{cases} 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{2}{3}\right)T_s & ; \frac{2}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq 1 \\ 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{1}{3}\right)T_s & ; \frac{1}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{2}{3} \\ 3(m\sin(\omega t))T_s & ; 0 \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{1}{3} \\ 3\left(m\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\right)T_s & ; -\frac{1}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq 0 \\ 3\left(m\sin(\omega t) + \frac{2}{3}\right)T_s & ; -\frac{2}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq -\frac{1}{3} \\ 3(m\sin(\omega t) + 1)T_s & ; -1 \leq m\sin(\omega t) \leq -\frac{2}{3} \end{cases} \quad (6.10)$$

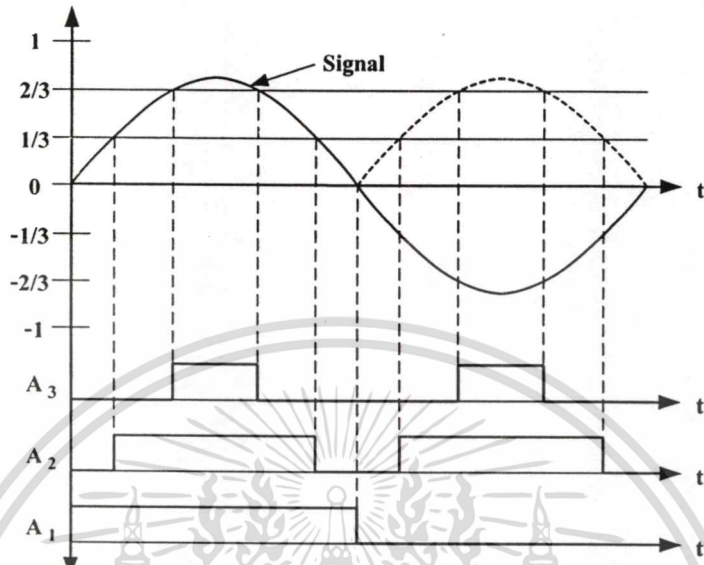
และเนื่องจากการสร้างสัญญาณพีคดับลิแวมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทั่วไปมีตัวกำเนิดสัญญาณพีคดับลิแวมเพียง 6 สัญญาณ ดังนั้นในการสร้างสัญญาณพีคดับลิแวมทั้ง 36 สัญญาณสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ จะต้องอาศัยวงจรภายนอกเพื่อผสมสัญญาณให้ได้สัญญาณพีคดับลิแวมทั้ง 36 สัญญาณตามที่ต้องการ โดยสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการผสมสัญญาณนั้นจะมาจากเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับค่าคงที่ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับนี้จะต้องใช้สัญญาณนี้ 3 สัญญาณต่อเฟส สัญญาณดังกล่าวนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 6.11, 6.12 และ 6.13

$$A_1 = \begin{cases} = 1 & ; \text{Signal} \geq 0 \\ = 0 & ; \text{Signal} < 0 \end{cases} \quad (6.11)$$

$$A_2 = \begin{cases} = 1 & ; |\text{Signal}| \geq \frac{1}{3} \\ = 0 & ; |\text{Signal}| < \frac{1}{3} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$A_3 = \begin{cases} = 1 & ; |\text{Signal}| \geq \frac{2}{3} \\ = 0 & ; |\text{Signal}| < \frac{2}{3} \end{cases} \quad (6.13)$$

สัญญาณ A_1, A_2 และ A_3 นั้นสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 6.8

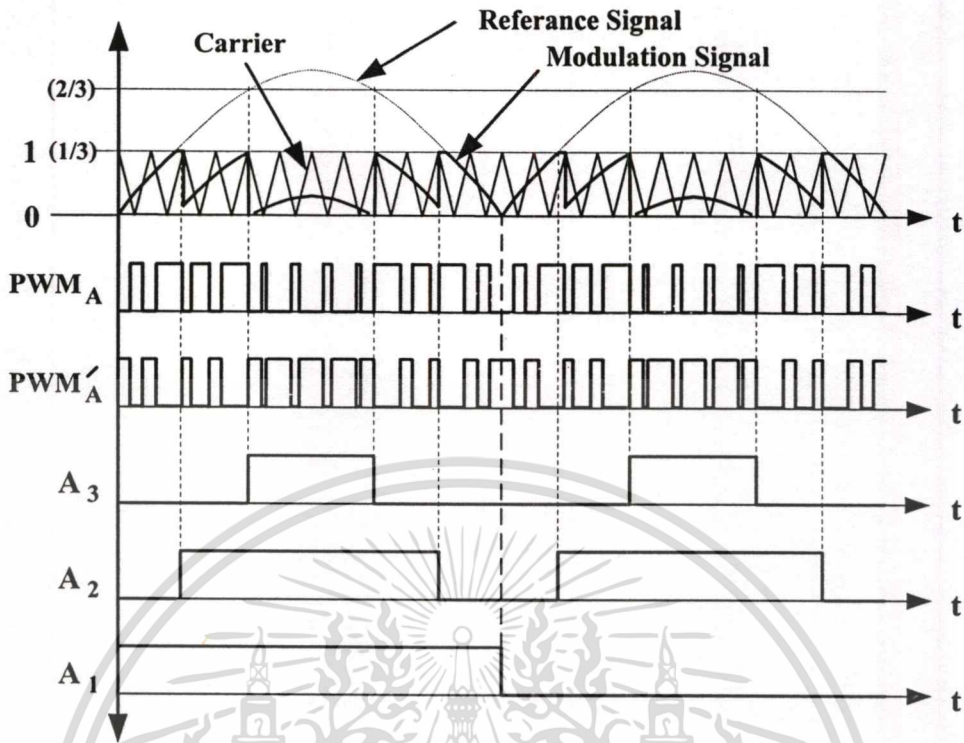


รูปที่ 6.12 แสดงวิธีการสร้างสัญญาณ A_1, A_2 และ A_3

ในกระบวนการเก็บข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงนั้นสามารถลดจำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บได้ เพราะสัญญาณทางด้านซีกบวกและลบสมมาตรกัน ดังนั้นจึงสามารถเก็บข้อมูลของสัญญาณอ้างอิง เฉพาะซีกบวก สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มก็จะเป็น ดังนี้

$$T_p = \begin{cases} 3 \left(m \sin(\omega t) - \frac{2}{3} \right) T_s & ; \frac{2}{3} \leq m \sin(\omega t) \leq 1 \\ 3 \left(m \sin(\omega t) - \frac{1}{3} \right) T_s & ; \frac{1}{3} \leq m \sin(\omega t) \leq \frac{2}{3} \\ 3 (m \sin(\omega t)) T_s & ; 0 \leq m \sin(\omega t) \leq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (6.14)$$

จากสมการที่ 6.14 เมื่อนำสร้างสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.13 แสดงการมอดูเลชันเทคนิค SPWM ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

เมื่อ PWM'_A คือ สัญญาณตรงข้ามของ PWM_A

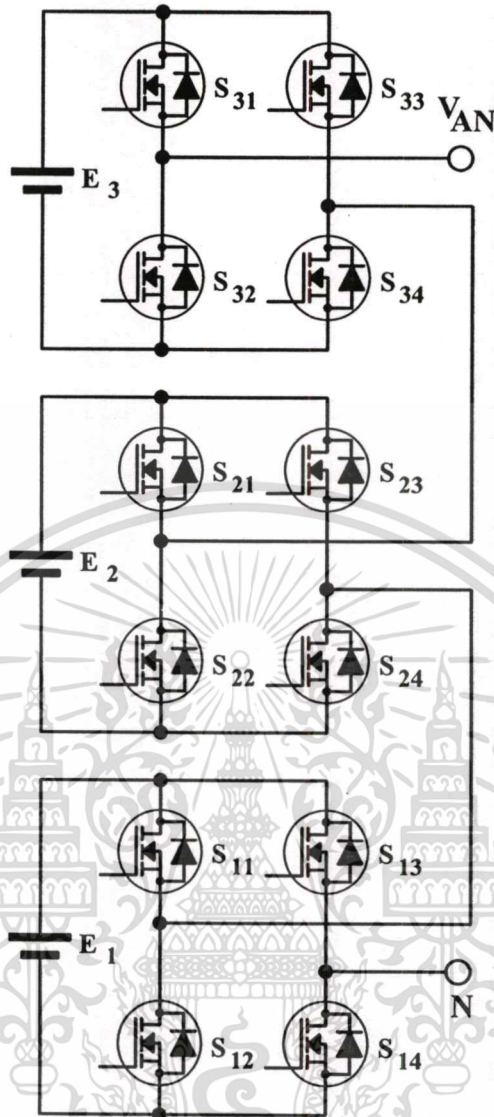
เมื่อสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากรูปที่ 6.13 มาเข้ากระบวนการตามตารางที่ 6.1 จะได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มเอชท์พุทครบตามที่ต้องการ

ตารางที่ 6.1 กระบวนการผสมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

สวิตช์	กระบวนการ	ลักษณะสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม
S_{31}	$(PWM_A \cdot A_3) \cdot A_1$	
S_{32}	$(PWM'_A + \bar{A}_3) + \bar{A}_1$	
S_{33}	$(PWM_A \cdot A_3) \cdot \bar{A}_1$	
S_{34}	$(PWM'_A + \bar{A}_3) + A_1$	
S_{21}	$((PWM_A + A_3) \cdot A_2) \cdot A_1$	
S_{22}	$((PWM'_A \cdot \bar{A}_3) + \bar{A}_2) + \bar{A}_1$	
S_{23}	$((PWM_A + A_3) \cdot A_2) \cdot \bar{A}_1$	
S_{24}	$((PWM'_A \cdot \bar{A}_3) + \bar{A}_2) + A_1$	
S_{11}	$(PWM_A + A_2) \cdot A_1$	
S_{12}	$(PWM'_A \cdot \bar{A}_2) + \bar{A}_1$	
S_{13}	$(PWM_A + A_2) \cdot \bar{A}_1$	
S_{14}	$(PWM'_A \cdot \bar{A}_2) + A_1$	
สัญญาณแรงดันเฟสเอาต์พุต		

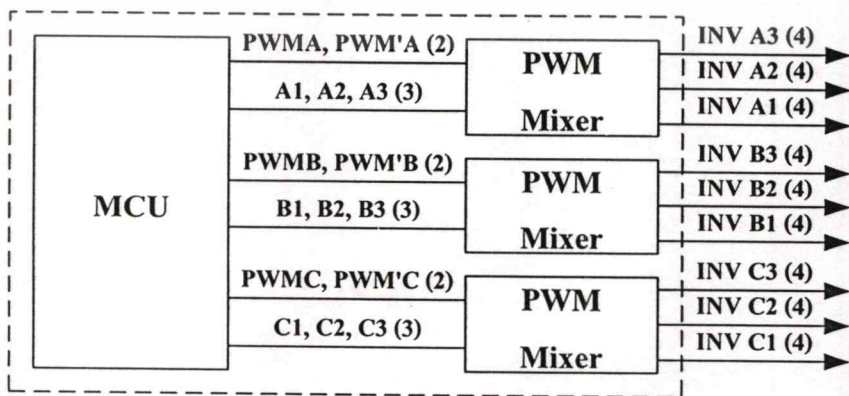
โดยตำแหน่งของสวิตช์นั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 6.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 แสดงตำแหน่งสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับของเฟส A

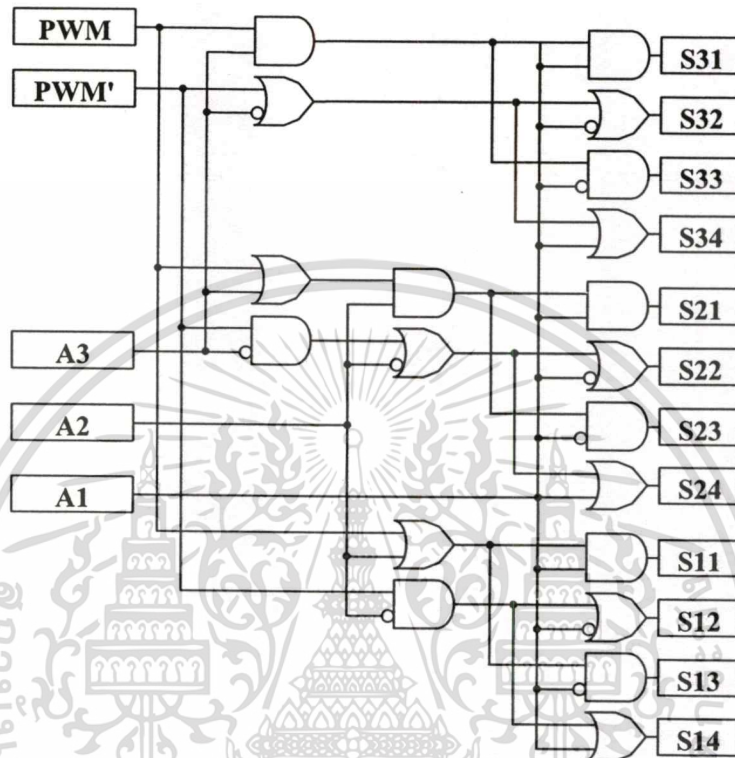
6.2.4 การออกแบบวงจรผสมสัญญาณพีดับลิวิตเอ็ม



รูปที่ 6.15 ไคอะแกรมของวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการการสร้างสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะต้องอาศัยวงจรถลอจิกเกต ภายนอกในการผสมสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มทั้งหมด ซึ่งกระบวนการผสมสัญญาณ นั้นจะเป็นไปตามตารางที่ 6.1 ซึ่งสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมทางลอจิกได้ดังรูปที่ 6.16

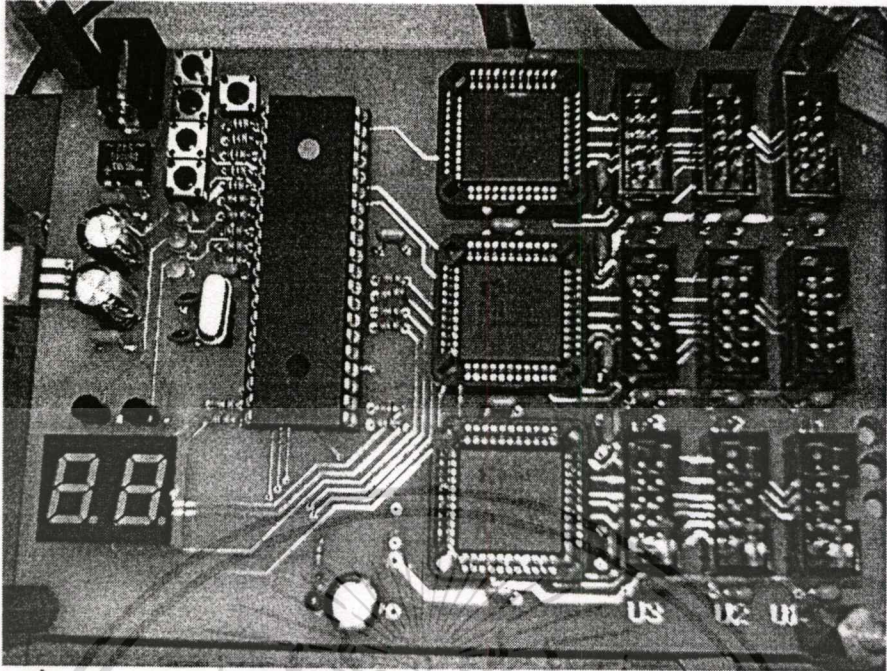


รูปที่ 6.16 แสดงวงจรผสมสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม 1 เฟส

จากรูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่าวงจรที่ใช้สำหรับผสมสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม 1 เฟส มีจำนวนอุปกรณ์ที่มากพอสมควร ซึ่งจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้ CPLD (Complex Programmable Logic Device) เบอร์ X9536XL-7C ซึ่งเป็นไอซีรวมวงจรถลอจิกที่สามารถโปรแกรมได้ จึงสามารถลดขนาดของวงจรให้เล็กลงได้ และยังสามารถปรับเปลี่ยนและแก้ไขไดอะแกรมได้อย่างสะดวก โดย CPLD เบอร์ X9536XL-7C มีคุณสมบัติหลักๆ ดังนี้

- เขียนและลบโปรแกรมได้ถึง 10,000 ครั้ง
- มีเกตให้ใช้งาน 800 เกต
- ใช้เวลาในการประมวลผล 7 nS
- มีพอร์ตให้ใช้งาน 34 พอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์

6.3 การออกแบบโปรแกรม

ในการออกแบบโปรแกรมจะต้องขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ที่ใช้งาน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F4431 ซึ่งมีคุณสมบัติหลักๆ ดังนี้

- เขียนและลบโปรแกรมได้ถึง 100,000 ครั้ง
- ความเร็วสูงสุด 1 MHz ($F_{osc} = 40 \text{ MHz}$)
- หน่วยความจำ 16 kByte
- พอร์ตใช้งาน 36 พอร์ต
- ชุดสร้างสัญญาณ PWM 8 ช่อง

การเลือกความถี่สวิตซ์ ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะอยู่ในช่วง 3 kHz ถึง 10 kHz โดยในวิทยานิพนธ์เลือกใช้ความถี่ สวิตซ์ที่ 4.8 kHz

จากหลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มในหัวข้อที่ 7.2.3 เมื่อนำมาเขียนเป็นโปรแกรมจะมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

6.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเซพบริดจ์ ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม และวิธีการสร้างสัญญาพีดับบลิวเอ็มสำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำให้มีความสะดวกในการปรับเปลี่ยนแก้ไขส่วนต่างๆ และสามารถลดขนาดและต้นทุนได้อย่างมาก

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

7.1 วิธีการทดสอบ

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกนี้ได้โดยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ภาระ ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

$$P_0 = P_1 + P_h \quad (7.1)$$

เมื่อ	P_0	คือ ค่าสูญเสียรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
	P_1	คือ ค่าสูญเสียปกติที่เกิดจากแรงดันมูลฐาน
	P_h	คือ ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิก

ซึ่ง P_1 ประกอบไปด้วยค่าสูญเสียในตัวนำและแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันมูลฐานรวมกับค่าสูญเสียจากการหมุน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้เครื่อง PZ4000 Power Analyzer ซึ่งสามารถแยกวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้ทั้งกำลังรวมและกำลังไฟฟ้าที่ลำดับค่าฮาร์มอนิกต่างๆ ได้ ดังนั้นในการวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะเท่ากับผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้ายรวมกับกำลังไฟฟ้ามูลฐาน (ลำดับที่ 1) โดยมีวิธีขั้นตอนในการวัดดังนี้

การวัดค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้ามูลฐานจะต้องวัดใน โหมดฮาร์มอนิก (Harmonics) ซึ่งค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้ามูลฐานนั้นจะอยู่ในลำดับที่ 1 ดังตัวอย่างในรูปที่ 7.1

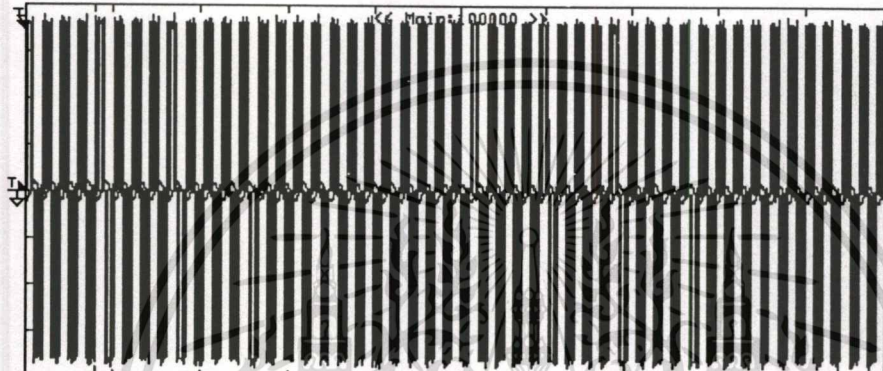
ส่วนการวัดค่ากำลังไฟฟ้ายรวมและกระแสไฟฟ้าจะวัดใน โหมดปกติ (Normal) ดังตัวอย่างในรูปที่ 7.2

YOKOGAWA \blacktriangle
 CH2 10Apk

Uover: - - - -
 Iover: - - - -

***** P Σ List ***** ***** U Σ List *****

Or.	P[W]	Hdf[%]	Or.	U[V]	Hdf[%]
dc	0.28188k		dc	426.661	
1	0.26841k		1	380.972	
2	0.00028k		2	2.953	
3	0.00000k		3	0.853	
4	-0.00001k		4	0.793	
5	0.00067k		5	11.961	
6	0.00000k		6	1.395	
7	0.00052k		7	7.270	
8	0.00000k		8	0.703	
9	-0.00000k		9	1.227	



Stopped 5 111 2006/03/31 00:51:00

Setup Mode

Harmonics

Wiring A - (B) 3V3A-1P2W

Display Resolution 5dpts 5dpts

P11 Source CH1

Initialize

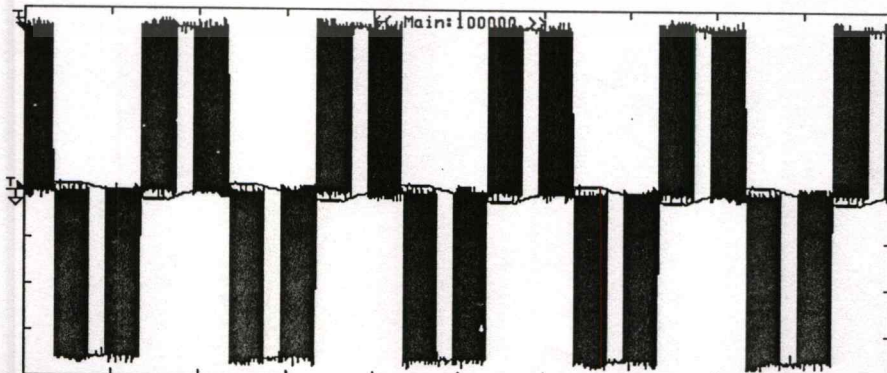
รูปที่ 7.1 ตัวอย่างการวัดค่ากำลังไฟฟ้ามูลฐานและแรงดันมูลฐานด้วย PZ4000

YOKOGAWA \blacktriangle
 CH2 10Apk

Uover: - - - -
 Iover: - - - -

100ms 1MS/s
 100ms 1MS/s

	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A
Urms [V]	430.837	430.875	431.025	0.000	430.912
Umn [V]	384.712	384.607	384.921	0.000	384.747
Udc [V]	0.014	-0.282	0.016	0.148	-0.084
Uac [V]	430.837	430.875	431.025	0.000	430.912
Irms [A]	3.2691	3.2932	3.2872	0.000	3.2832
Imn [A]	3.2144	3.2409	3.2429	0.000	3.2327
Idc [A]	-0.0138	0.0196	-0.0127	-0.030	-0.0023
Iac [A]	3.2691	3.2931	3.2872	0.000	3.2831
P [W]	-0.47188k	0.75379k	-1.22736k	-0.0000k	0.28192k
S [VA]	1.40845k	1.41894k	1.41688k	0.0000k	2.45043k
Q [var]	1.32705k	1.20216k	0.70793k	0.0000k	2.52921k
λ []	-0.33503	0.53124	-0.86623	Error	0.11505



Stopped 2 111 2006/03/31 00:52:02

Setup Mode

Normal

Wiring A - (B) 3V3A-1P2W

Display Resolution 5dpts 5dpts

Initialize

รูปที่ 7.2 ตัวอย่างการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟรวมด้วย PZ4000

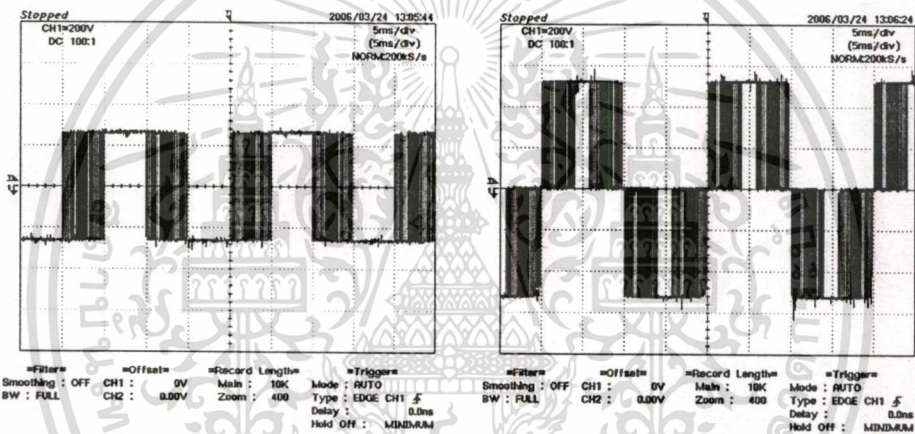
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

ในการทดสอบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ได้ทำการวัดค่าสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะไว้ภาวะที่การควบคุมแบบ V/f , $f_s = 4.8 \text{ kHz}$ เทคนิค SPWM, THPWM และ SVPWM และปรับความถี่มูลฐานตั้งแต่ 11 Hz จนถึง 50 Hz ผลการทดสอบได้ดังนี้

7.2.1 ผลการทดสอบเทคนิค SPWM

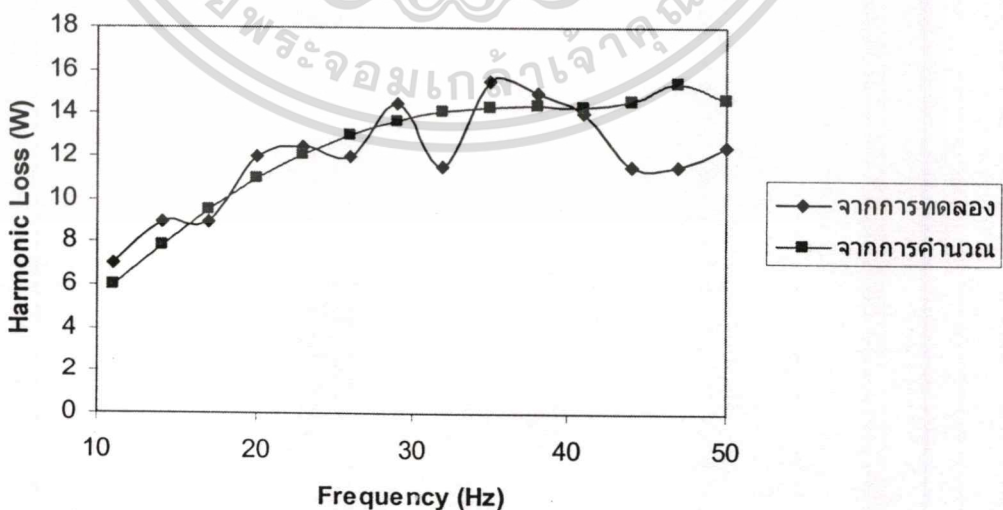
จากการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.1 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.4



ก) แรงดันเฟส 50 Hz

ข) แรงดันไลน์ 5 Hz

รูปที่ 7.3 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SPWM 50 Hz



รูปที่ 7.4 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ SPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

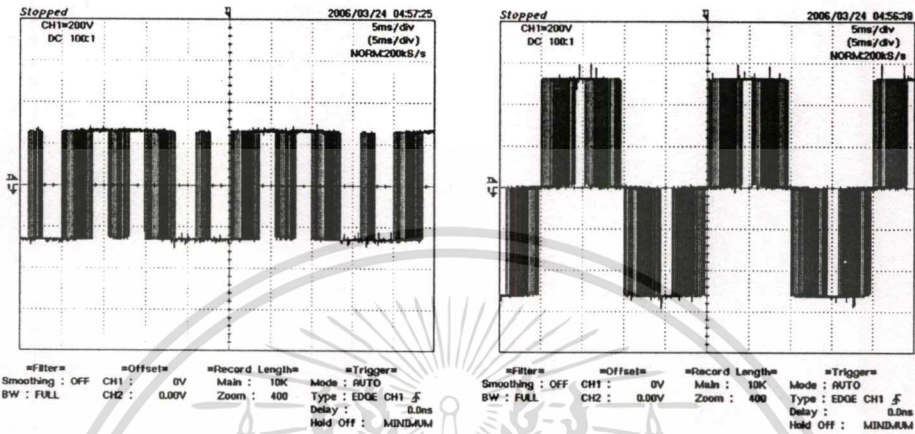
จากรูปที่ 7.4 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มน้ำที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยจะมีค่าค่อยๆสูงขึ้นตามความถี่ แต่จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่อความถี่สูงขึ้น เนื่องมาจากในการควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าออกของกลุ่มแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้น ตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย ดังนั้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันฮาร์มอนิกในกลุ่มต้นเป็นสำคัญ

ตารางที่ 7.1 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SPWM

f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_o (W)	P_i (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	83.0	2.88	104	97	7	5.96
14	107.3	3.08	126	117	9	7.85
17	129.7	3.04	135	126	9	9.54
20	151.8	3.07	147	135	12	10.98
23	174.5	3.10	161	148.5	12.5	12.12
26	198.1	3.16	177.5	165.5	12	13.04
29	221.3	3.20	192	177.5	14.5	13.69
32	244.1	3.22	207.5	196	11.5	14.09
35	266.5	3.23	224	208.5	15.5	14.29
38	289.2	3.20	232.5	217.5	15	14.36
41	311.8	3.22	248	234	14	14.29
44	335.2	3.25	261	249.5	11.5	14.62
47	357.6	3.28	276.5	265	11.5	15.41
50	380.6	3.30	285	272.5	12.5	14.72

7.2.2 ผลการทดสอบเทคนิค THPWM

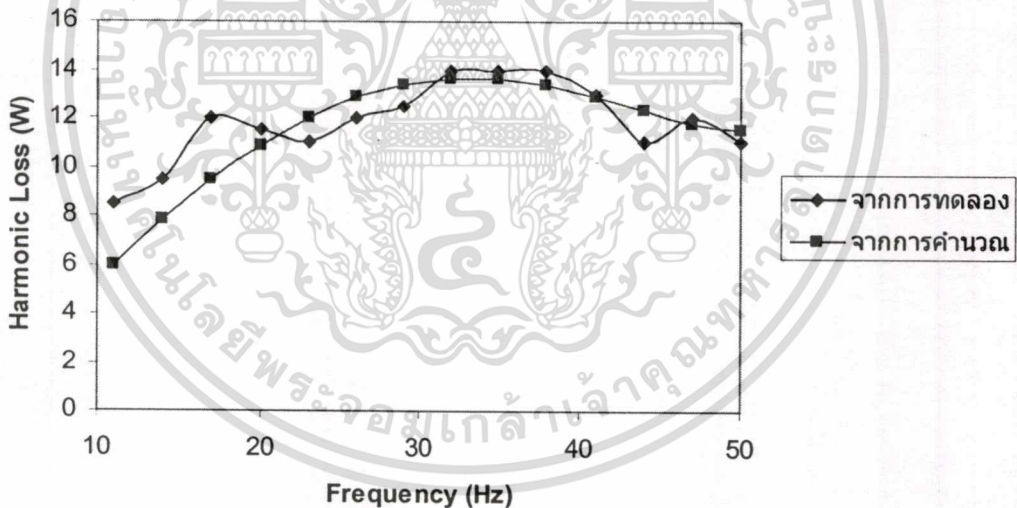
จากการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค THPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.2 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.6



ก) แรงดันเฟส 50 Hz

ข) แรงดันไลน์ 50 Hz

รูปที่ 7.5 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค THPWM ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 7.6 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ THPWM

จากรูปที่ 7.6 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 35 Hz ซึ่งที่ความถี่ 11 Hz ถึง 35 Hz จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ความถี่ 35 Hz ถึง 50 Hz จะมีค่าค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ

เนื่องมาจากในการควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

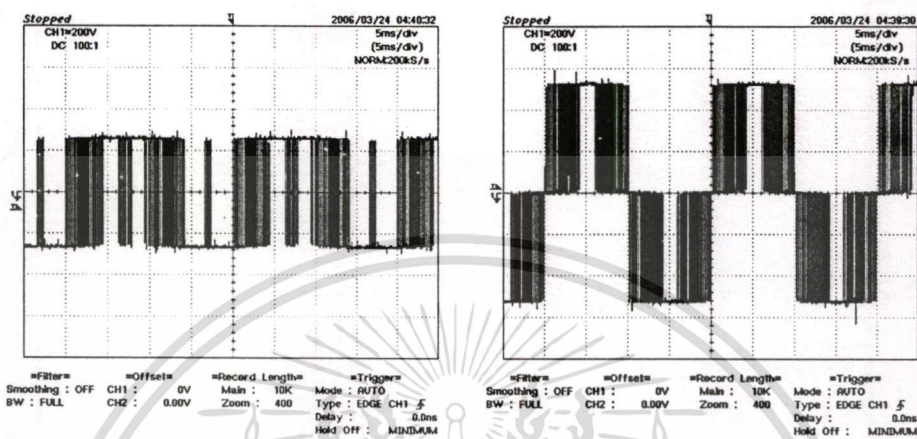
คงที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมีอคติเลขน้ไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่ายอดของกลุ่มแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้น ตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย ดังนั้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันฮาร์มอนิกในกลุ่มต้นเป็นสำคัญ

ตารางที่ 7.2 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค THPWM

f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_0 (W)	P_1 (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	83.8	2.96	107.0	98.5	8.5	5.99
14	106.2	2.98	118.0	108.5	9.5	7.86
17	129.2	3.06	135.5	123.5	12.0	9.50
20	152.2	3.12	148.5	137.0	11.5	10.89
23	174.1	3.10	156.5	145.5	11.0	12.04
26	198.1	3.17	174.5	162.5	12.0	12.86
29	221.3	3.20	190.0	177.5	12.5	13.37
32	244.9	3.24	202.5	188.5	14.0	13.64
35	265.5	3.20	211.0	197.0	14.0	13.61
38	289.5	3.22	230.0	216.0	14.0	13.35
41	311.4	3.20	243.0	230.0	13.0	12.88
44	334.8	3.23	253.5	242.5	11.0	12.29
47	357.4	3.25	268.5	256.5	12.0	11.79
50	380.4	3.26	285.5	274.5	11.0	11.55

7.2.3 ผลการทดสอบเทคนิค SVPWM

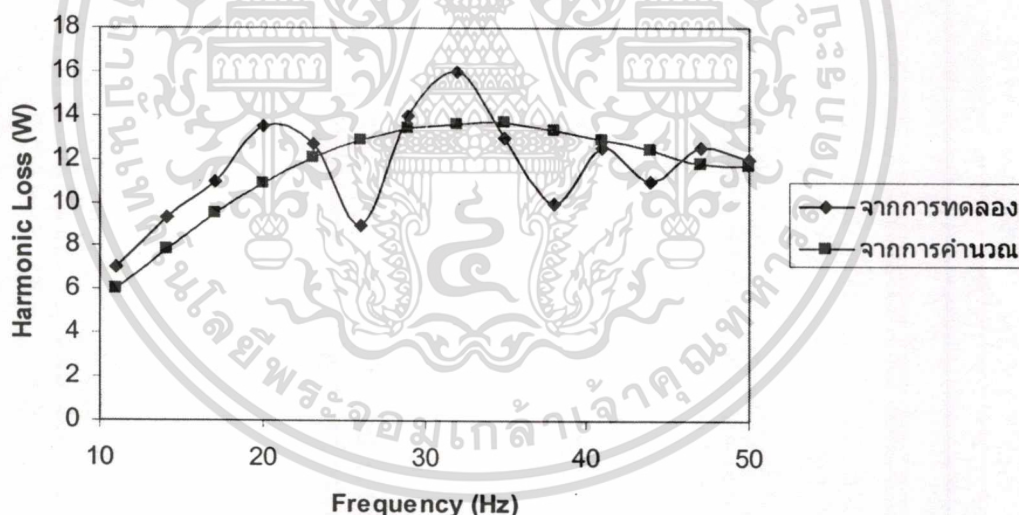
จากการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SVPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.3 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.8



ก) แรงดันเฟส 50 Hz

ข) แรงดันไลน์ 50 Hz

รูปที่ 7.7 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SVPWM ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 7.8 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ SVPWM

จากรูปที่ 7.8 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 35 Hz ซึ่งที่ความถี่ 11 Hz ถึง 35 Hz จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ความถี่ 35 Hz ถึง 50

Hz จะมีค่าอยู่ลดลงอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับเทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM เนื่องมาจากในไม่ช้ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของของกลุ่มแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้นตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย ดังนั้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันฮาร์มอนิกในกลุ่มต้นเป็นสำคัญ

ตารางที่ 7.3 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เทคนิค SVPWM

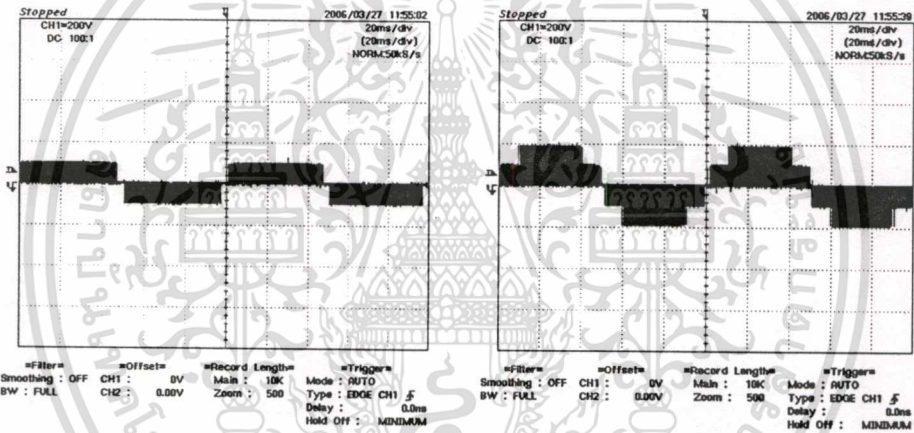
f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_0 (W)	P_1 (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	84.3	2.98	111.5	104.5	7	5.99
14	106.8	2.98	120.5	111.2	9.3	7.87
17	128.6	3.02	135	124	11	9.52
20	151.8	3.10	151	137.5	13.5	10.89
23	174.4	3.08	161.5	148.8	12.7	12.05
26	197.3	3.10	175	166	9	12.89
29	221.2	3.18	196	182	14	13.40
32	244.3	3.20	206.5	190.5	16	13.65
35	265.7	3.19	215.5	202.5	13	13.66
38	288.7	3.22	226	216	10	13.36
41	311.7	3.26	245.5	233	12.5	12.90
44	334.3	3.25	256	245	11	12.40
47	358.0	3.26	272.5	260	12.5	11.81
50	379.4	3.26	285	273	12	11.70

7.3 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

ในการทดสอบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ ได้ทำการวัดค่าสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะไว้การะที่การควบคุมแบบ V/f, $f_s = 4.8 \text{ kHz}$ เทคนิค SPWM, THPWM และ SVPWM และปรับความถี่มูลฐานตั้งแต่ 11 Hz จนถึง 50 Hz ผลการทดสอบได้ดังนี้

7.3.1 ผลการทดสอบเทคนิค SPWM

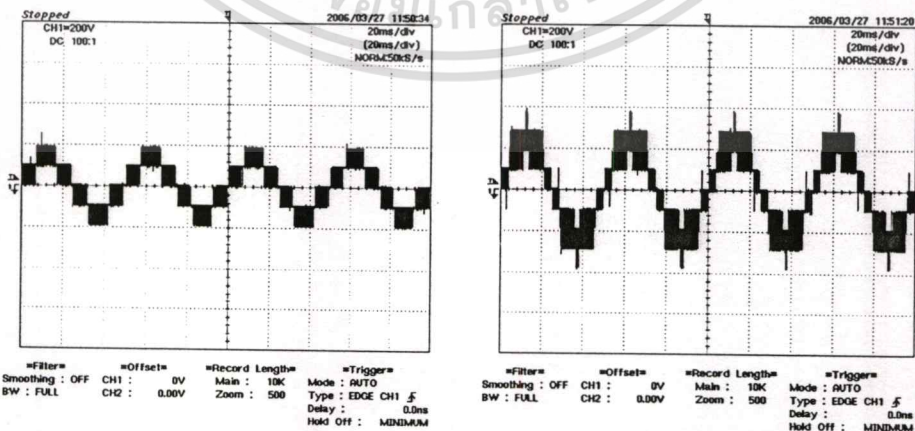
จากการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.4 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.14 โดยรูปที่ 7.9 ถึง 7.13 แสดงลักษณะแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM



ก) แรงดันเฟส 10 Hz

ข) แรงดันไลน์ 10 Hz

รูปที่ 7.9 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 10 Hz

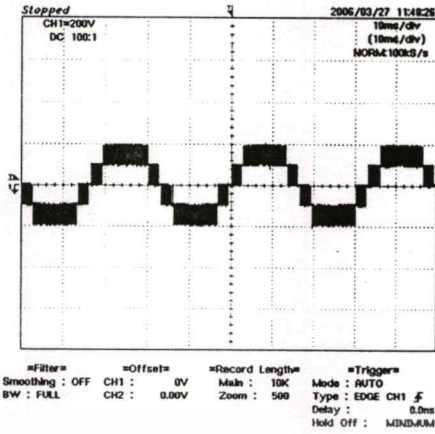


ค) แรงดันเฟส 20 Hz

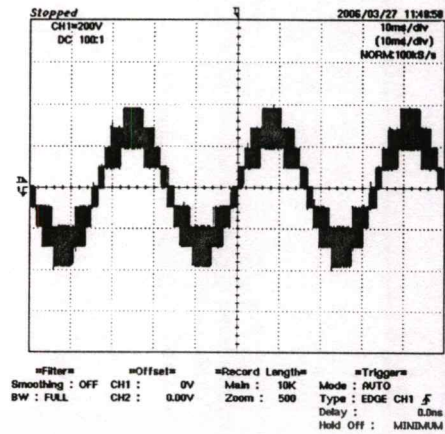
ง) แรงดันไลน์ 20 Hz

รูปที่ 7.10 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

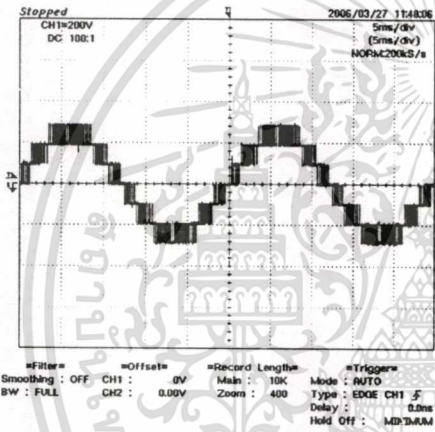


จ) แรงดันเฟส 30 Hz

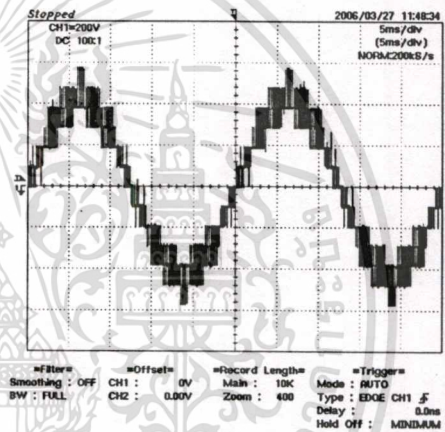


ฉ) แรงดันไลน์ 30 Hz

รูปที่ 7.11 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 30 Hz

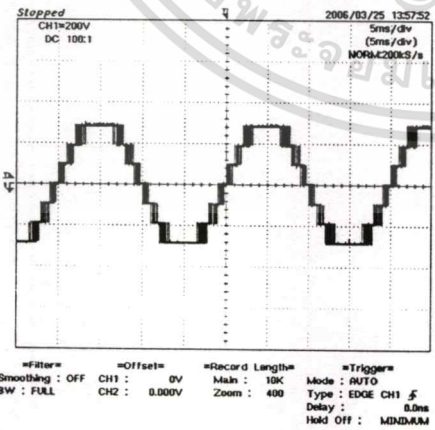


ช) แรงดันเฟส 40 Hz

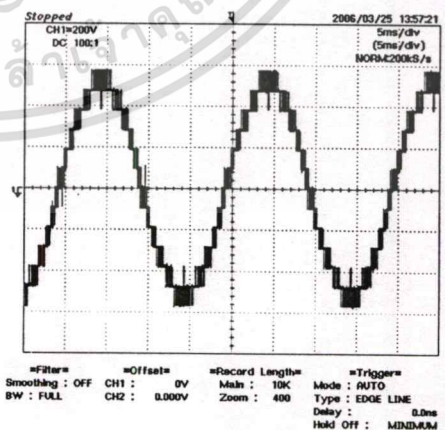


ซ) แรงดันไลน์ 40 Hz

รูปที่ 7.12 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 40 Hz



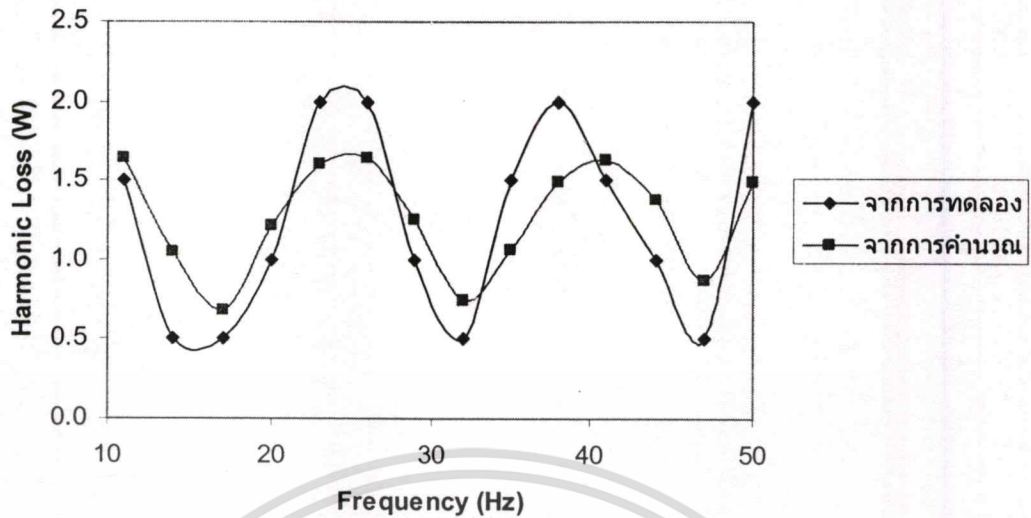
ฅ) แรงดันเฟส 50 Hz



ญ) แรงดันไลน์ 50 Hz

รูปที่ 7.13 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.14 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SPWM

จากรูปที่ 7.14 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเป็นรูปคลื่น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 11 Hz, 25 Hz และ 41 Hz ค่าต่ำสุดที่ความถี่ 17 Hz, 32 Hz และ 47 Hz ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละช่วงของคลื่นพาหะ เนื่องมาจากในการควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่ายอดของกลุ่มแรงดันฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆ จะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้น ตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย แต่เนื่องด้วยลักษณะคุณสมบัติแรงดันฮาร์มอนิกของสัญญาณที่ดับลิแวนเอ็มในอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีการเปลี่ยนตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละระดับของคลื่นพาหะ จึงทำให้ค่าสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นลงดังกล่าว

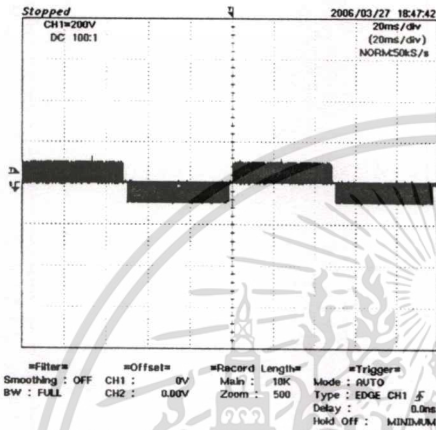
ตารางที่ 7.4 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SPWM

f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_0 (W)	P_1 (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	83.7	2.94	101.5	100.0	1.5	1.65
14	106.4	3.00	115.0	114.5	0.5	1.05
17	128.2	2.98	124.0	123.5	0.5	0.68
20	151.3	3.05	137.5	136.5	1.0	1.21
23	174.4	3.11	153.0	151.0	2.0	1.61
26	197.6	3.13	166.0	164.0	2.0	1.64
29	219.7	3.14	175.0	174.0	1.0	1.25
32	242.7	3.16	189.5	189.0	0.5	0.74
35	265.5	3.16	203.0	201.5	1.5	1.06
38	289.5	3.22	222.0	220.0	2.0	1.49
41	311.7	3.24	233.5	232.0	1.5	1.63
44	333.5	3.20	245.0	244.0	1.0	1.37
47	358.3	3.26	265.5	265.0	0.5	0.87
50	380.8	3.28	280.0	278.0	2.0	1.49

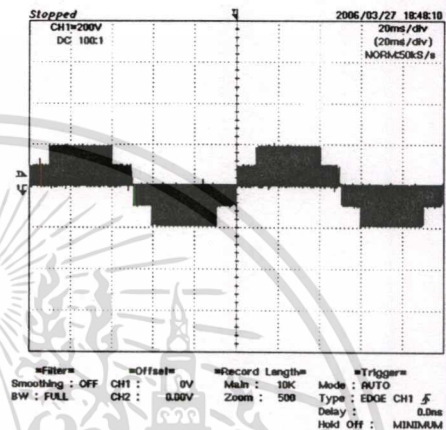
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2 ผลการทดสอบเทคนิค THPWM

จากการทดสอบวัดค่าสัญญาณจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์: หนึ่งวินาทีที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค THPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.5 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.20 โดยรูปที่ 7.15 ถึง 7.19 แสดงลักษณะแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิคการมอดดูเลชั่นแบบ THPWM

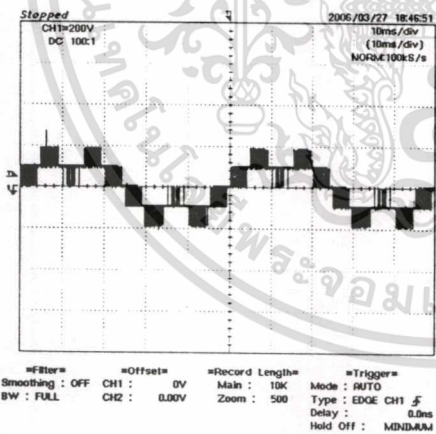


ก) แรงดันเฟส 10 Hz

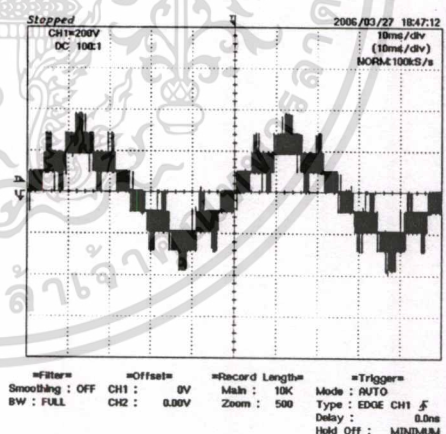


ข) แรงดันไลน์ 10 Hz

รูปที่ 7.15 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 10 Hz



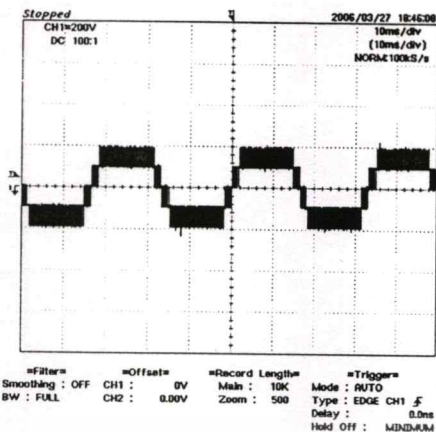
ค) แรงดันเฟส 20 Hz



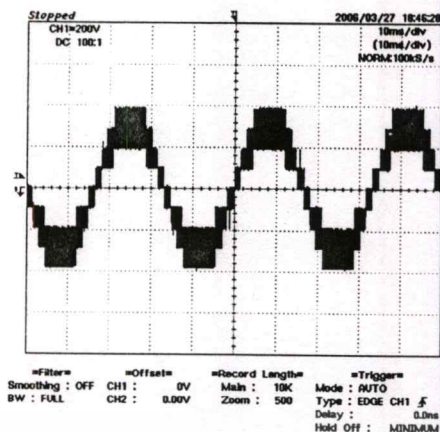
ง) แรงดันไลน์ 20 Hz

รูปที่ 7.16 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

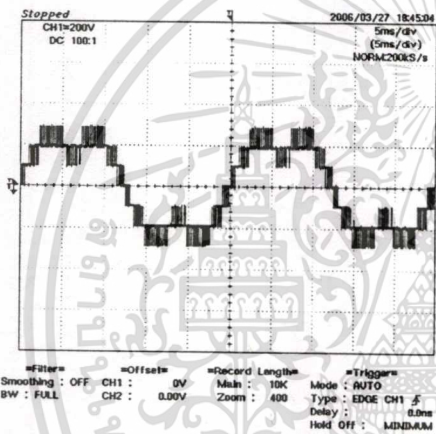


จ) แรงดันเฟส 30 Hz

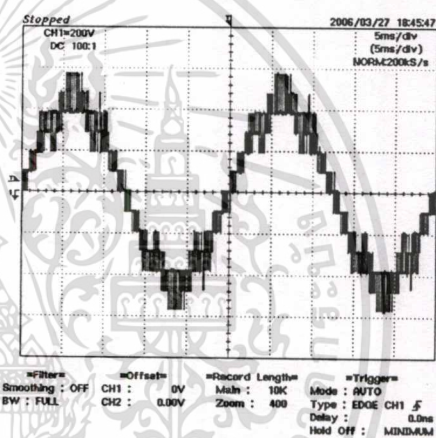


ฉ) แรงดันไลน์ 30 Hz

รูปที่ 7.17 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 30 Hz

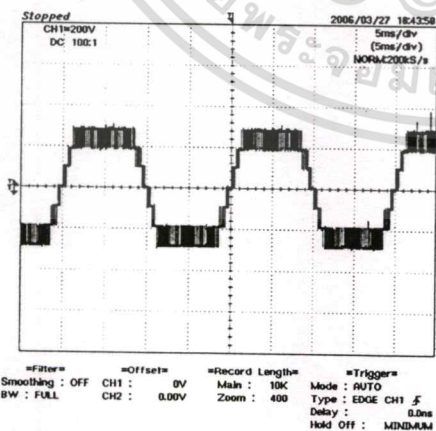


ช) แรงดันเฟส 40 Hz

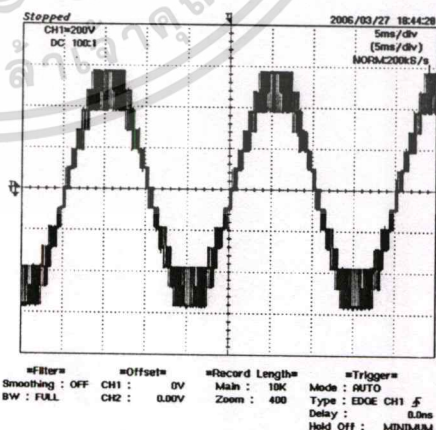


ซ) แรงดันไลน์ 40 Hz

รูปที่ 7.18 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 40 Hz



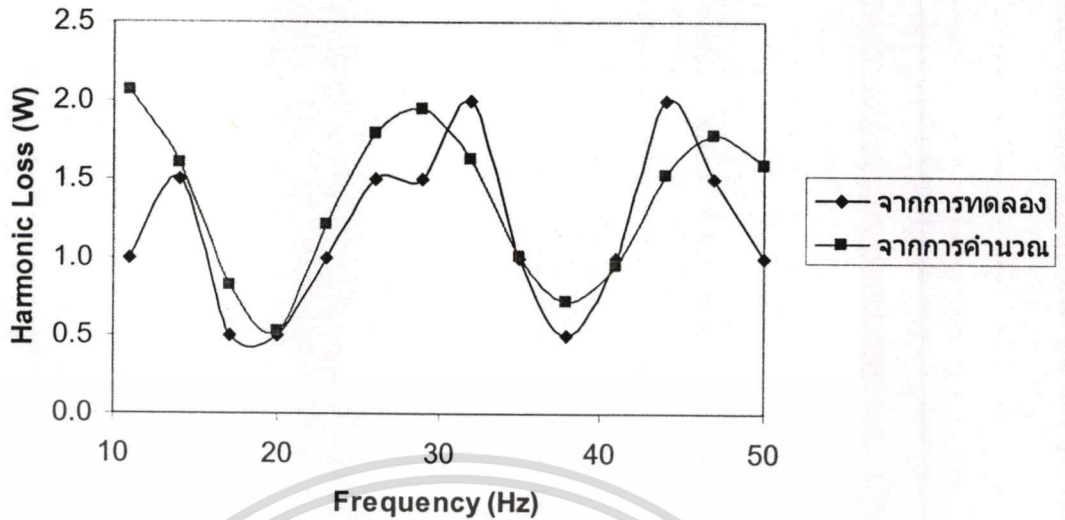
ฅ) แรงดันเฟส 50 Hz



ฉ) แรงดันไลน์ 50 Hz

รูปที่ 7.19 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.20 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ THPWM

จากรูปที่ 7.20 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเป็นรูปคลื่น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 11 Hz, 29 Hz และ 47 Hz ค่าต่ำสุดที่ความถี่ 20 Hz และ 38 Hz ซึ่งจะการเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละช่วงของคลื่นพาหะ เนื่องจากในการควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้น ตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย แต่เนื่องด้วยลักษณะคุณสมบัติแรงดันฮาร์มอนิกของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มในอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีการเปลี่ยนตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละระดับของคลื่นพาหะ จึงทำให้ค่าสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นลงดังกล่าว

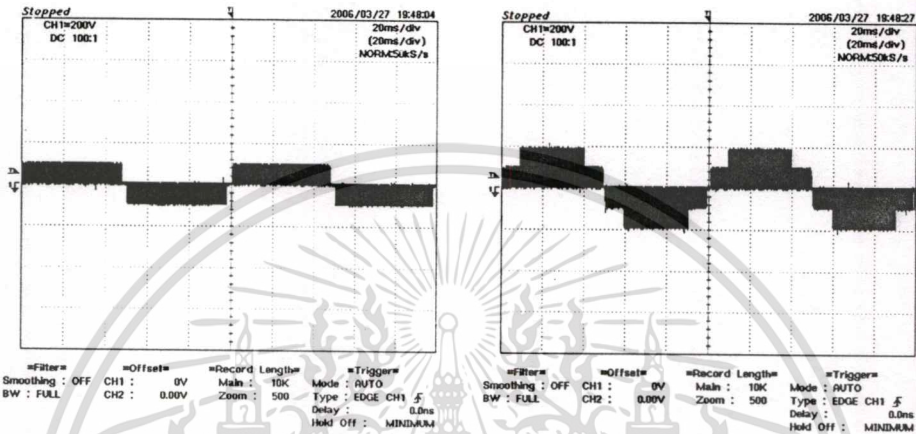
ตารางที่ 7.5 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค THPWM

f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_0 (W)	P_1 (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	83.8	2.96	100.5	99.5	1.0	2.07
14	106.0	2.99	110.5	109.0	1.5	1.61
17	128.6	3.02	121.5	121.0	0.5	0.82
20	151.9	3.07	135.0	134.5	0.5	0.53
23	174.7	3.11	149.5	148.5	1.0	1.22
26	196.8	3.10	160.5	159.0	1.5	1.80
29	221.4	3.19	179.5	178.0	1.5	1.95
32	243.1	3.18	189.5	187.5	2.0	1.63
35	266.5	3.23	205.0	204.0	1.0	1.00
38	287.5	3.16	218.5	218.0	0.5	0.71
41	311.5	3.21	236.0	235.0	1.0	0.95
44	333.5	3.23	246.5	244.5	2.0	1.53
47	356.5	3.20	262.5	261.0	1.5	1.78
50	380.4	3.32	276.0	275.0	1.0	1.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.3 ผลการทดสอบเทคนิค SVPWM

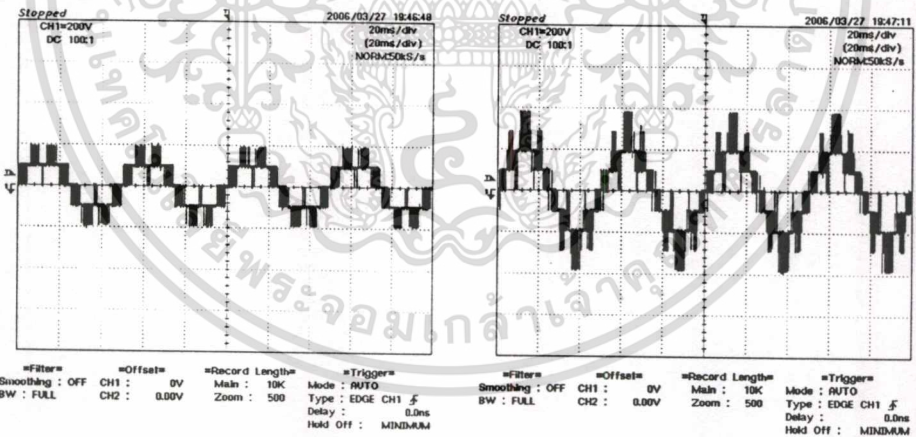
จากการทดสอบวัดค่าสัญญาณจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนโดยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM ผลที่ได้ดังในตารางที่ 7.6 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังรูปที่ 7.26 โดยรูปที่ 7.21 ถึง 7.25 แสดงลักษณะแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิคการมีอคตูล์เช่นแบบ SVPWM



ก) แรงดันเฟส 10 Hz

ข) แรงดันไลน์ 10 Hz

รูปที่ 7.21 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 10 Hz

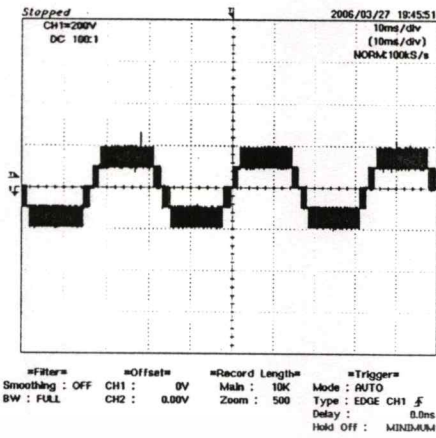


ค) แรงดันเฟส 20 Hz

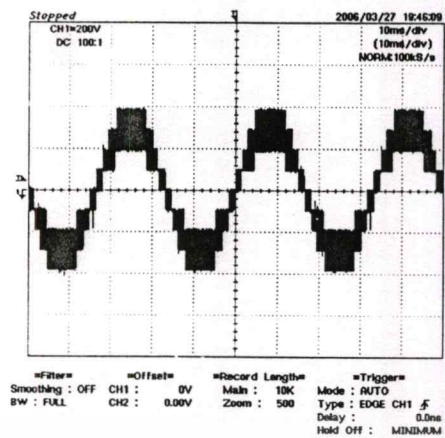
ง) แรงดันไลน์ 20 Hz

รูปที่ 7.22 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

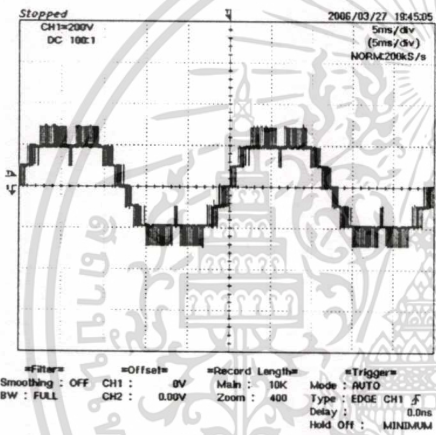


จ) แรงดันเฟส 30 Hz

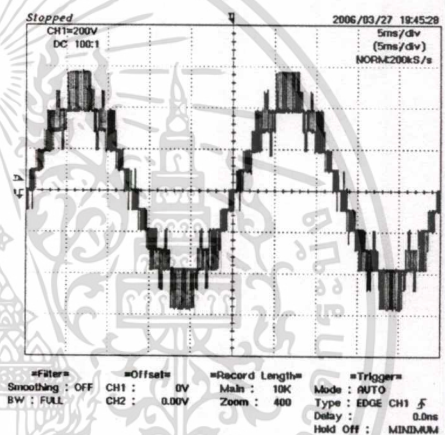


ฉ) แรงดันไลน์ 30 Hz

รูปที่ 7.23 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 30 Hz

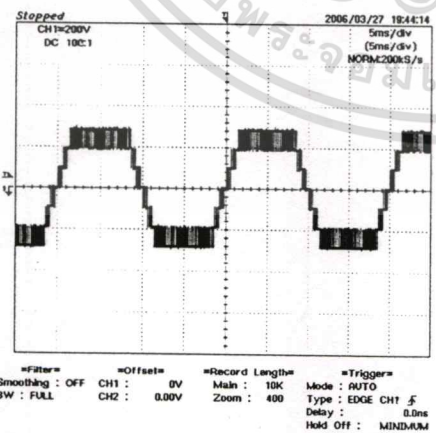


ช) แรงดันเฟส 40 Hz

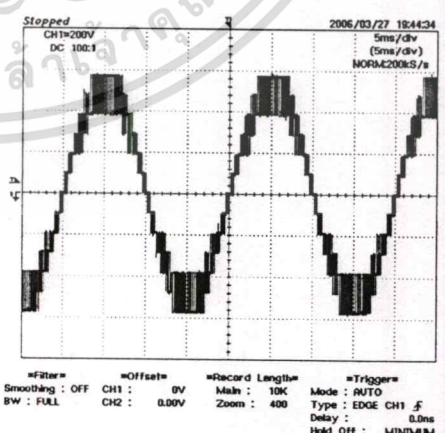


ซ) แรงดันไลน์ 40 Hz

รูปที่ 7.24 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 40 Hz



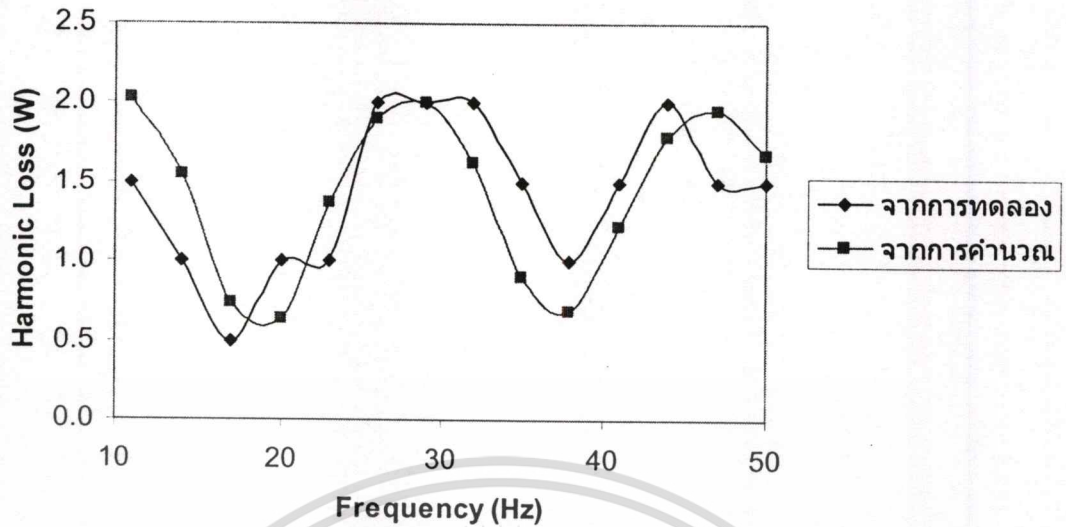
ฅ) แรงดันเฟส 50 Hz



ฉ) แรงดันไลน์ 50 Hz

รูปที่ 7.25 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.26 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ SVPWM

จากรูปที่ 7.26 คือค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชวีรีจ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียง แต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งอยู่บ้าง ซึ่งค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเป็นรูปคลื่น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 11 Hz, 29 Hz และ 47 Hz ค่าต่ำสุดที่ความถี่ 17 Hz และ 38 Hz ซึ่งจะการเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละช่วงของคลื่นพาหะ เนื่องจากในการควบคุมมอเตอร์แบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่จะมีการปรับค่าดัชนีการมอดูเลชันไปพร้อมกับความถี่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของค่าสูญเสียฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต้นๆจะส่งผลต่อค่าสูญเสียมากกว่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงขึ้น ตามลักษณะฟังก์ชันการสูญเสีย แต่เนื่องด้วยลักษณะคุณสมบัติแรงดันฮาร์มอนิกของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มในอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีการเปลี่ยนตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละระดับของคลื่นพาหะ จึงทำให้ค่าสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นลงดังกล่าว

ตารางที่ 7.6 ผลการวัดค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM

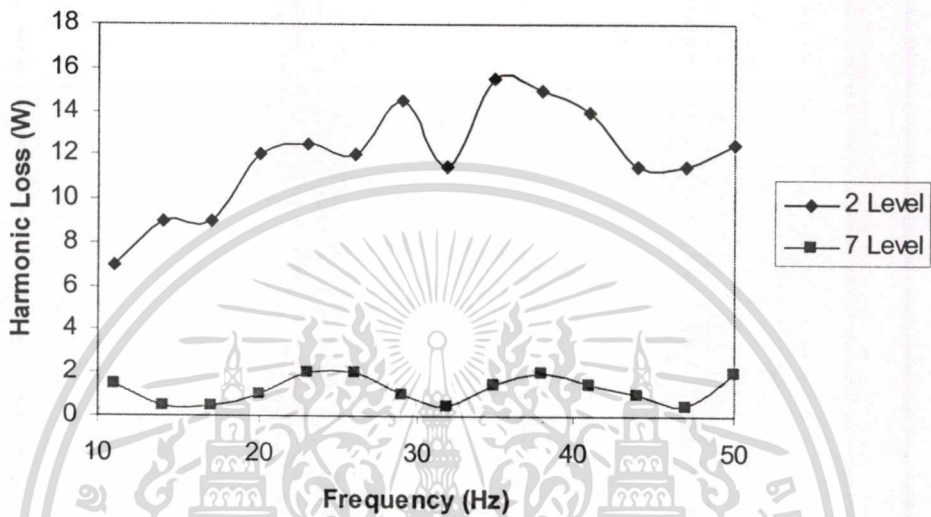
f_1 (Hz)	V_{rms} (V)	I (A)	P_0 (W)	P_1 (W)	P_h (W)	P_h (W) คำนวณ
11	83.8	2.98	101.5	100.0	1.5	2.03
14	106.4	2.98	110.5	109.5	1.0	2.03
17	130.0	3.00	121.5	121.0	0.5	1.55
20	153.2	3.06	135.5	134.5	1.0	0.74
23	173.6	3.10	149.5	148.5	1.0	0.63
26	197.4	3.11	161.0	159.0	2.0	1.37
29	220.6	3.18	180.0	178.0	2.0	1.91
32	243.5	3.20	189.5	187.5	2.0	2.01
35	265.8	3.20	206.0	204.5	1.5	1.62
38	288.6	3.18	218.0	217.0	1.0	0.90
41	311.4	3.24	236.0	234.5	1.5	0.68
44	332.8	3.25	246.5	244.5	2.0	1.22
47	357.4	3.28	262.5	261.0	1.5	1.79
50	380.2	3.30	277.0	275.5	1.5	1.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 เปรียบเทียบค่าสูญเสียระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ

7.4.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค SPWM

เมื่อนำผลการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SPWM ดังรูปที่ 7.27

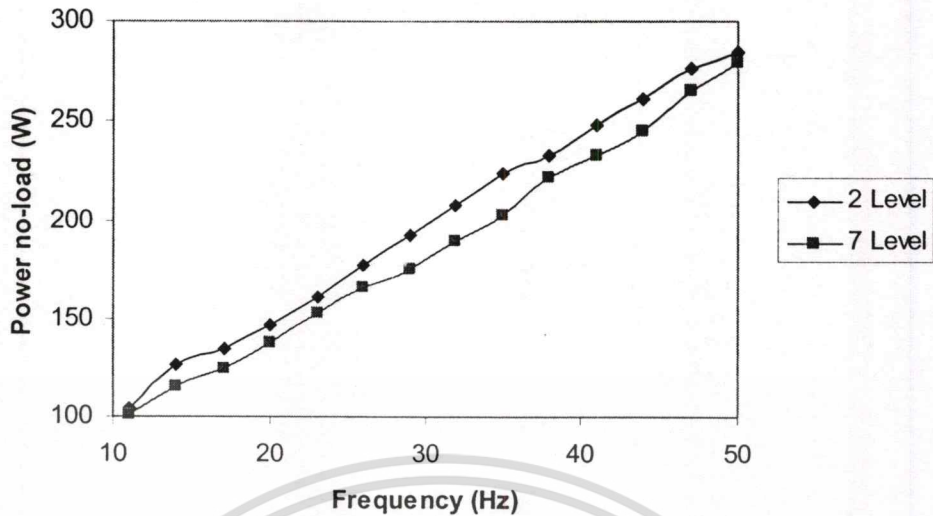


รูปที่ 7.27 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ

เทคนิค SPWM $f_s = 4.8 \text{ kHz}$

จากรูปที่ 7.27 เป็นการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ กับ 7 ระดับ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM จะเห็นได้ว่าจะมีส่วนต่างโดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ โดยที่ความถี่ 35 Hz จะมีความแตกต่างมากที่สุด ซึ่งค่าส่วนต่างค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่ต่ำลง และส่วนต่างก็จะมีค่าค่อยๆ คงที่เมื่อความถี่สูงขึ้น

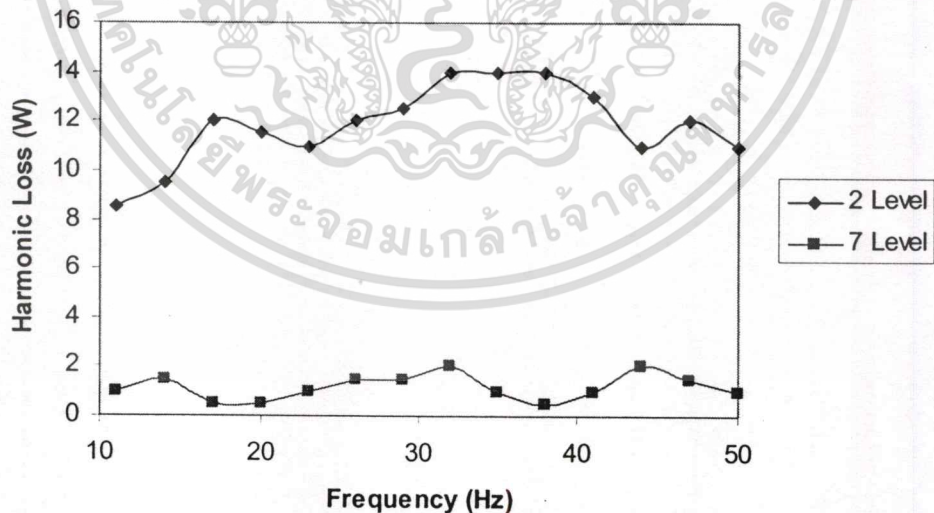
เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM จะได้ดังรูปที่ 7.28 โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงที่การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานแบบแรงบิดคงที่ ดังนั้นเมื่อความถี่สูงขึ้นหรือความเร็วเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มตามด้วย และจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับจะมีค่าน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ



รูปที่ 7.28 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SPWM $f_s = 4.8$ kHz

7.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค THPWM

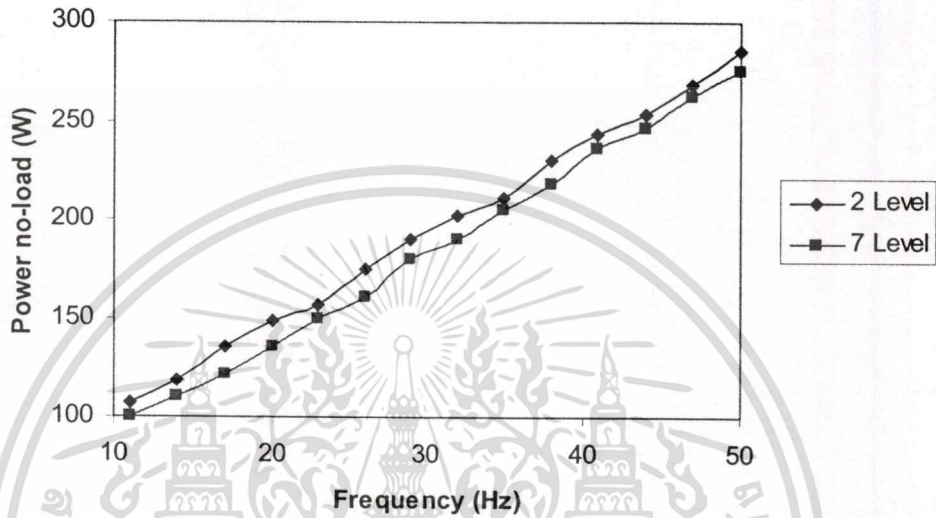
เมื่อนำผลการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค THPWM ดังรูปที่ 7.29



รูปที่ 7.29 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค THPWM $f_s = 4.8$ kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.29 เป็นการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ กับ 7 ระดับ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM จะเห็นได้ว่า จะมีส่วนต่างโดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ โดยที่ความถี่ 38 Hz จะมีความแตกต่างมากที่สุด ซึ่งค่าส่วนต่างค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่ต่ำลง และส่วนต่างก็จะมีค่าค่อยๆ คงที่เมื่อความถี่สูงขึ้น

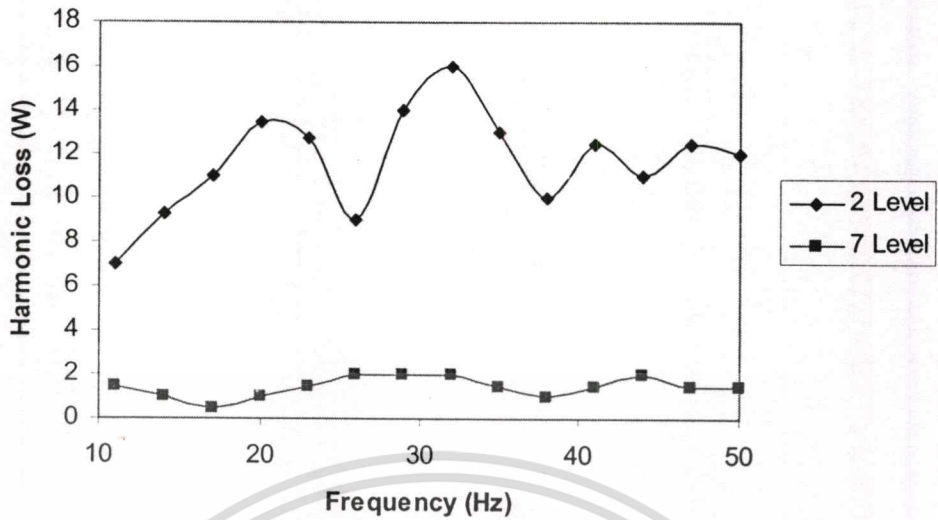


รูปที่ 7.30 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค THPWM $f_s = 4.8$ kHz

เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ THPWM จะได้ดังรูปที่ 7.30 โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงที่การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานแบบแรงบิดคงที่ ดังนั้นเมื่อความถี่สูงขึ้นหรือความเร็วเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มตามด้วย และจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับจะมีค่าน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

7.4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบเทคนิค SVPWM

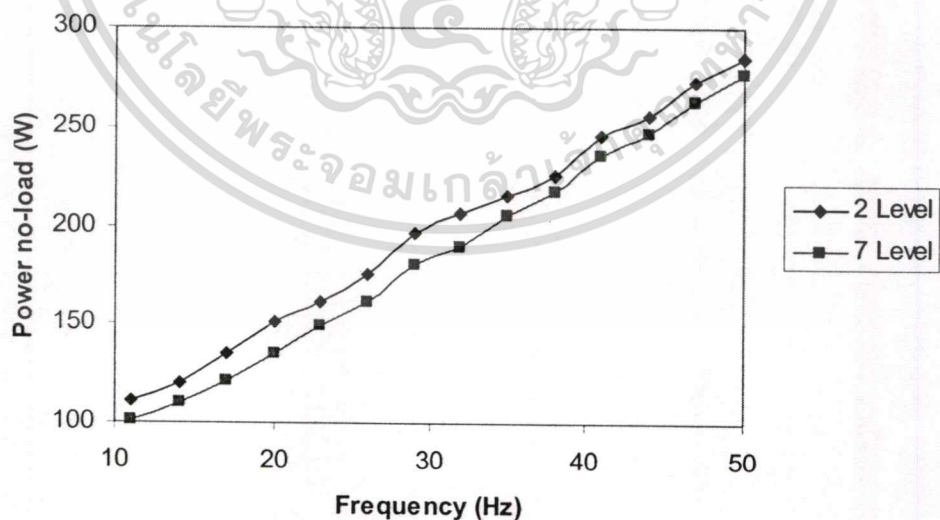
เมื่อนำผลการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM ดังรูปที่ 7.31



รูปที่ 7.31 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ

เทคนิค SVPWM $f_s = 4.8 \text{ kHz}$

จากรูปที่ 7.31 เป็นการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ กับ 7 ระดับ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM จะเห็นได้ว่า จะมีส่วนต่างโดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ โดยที่ความถี่ 32 Hz จะมีความแตกต่างมากที่สุด ซึ่งค่าส่วนต่างค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่ต่ำลง และส่วนต่างก็จะมีค่าค่อยๆ คงที่เมื่อความถี่สูงขึ้น



รูปที่ 7.32 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับ เทคนิค SVPWM $f_s = 4.8 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ เทคนิคการมอดูเลชันแบบ SVPWM จะได้ดังรูปที่ 7.32 โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงที่การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานแบบแรงบิดคงที่ ดังนั้นเมื่อความถี่สูงขึ้นหรือความเร็วเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มตามด้วย และจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับจะมีค่าน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

7.5 สรุป

ผลจากการตรวจสอบค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกระหว่างผลการคำนวณกับผลที่วัดได้จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการแกว่งตัวค่อนข้างมาก เนื่องมาจากค่าที่วัดได้นั้นจะมีการแกว่ง จึงต้องใช้การประมาณในการอ่านค่าจึงมีโอกาสทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะเมื่อค่าสูญเสียมีค่าน้อย แต่ค่าผลการทดสอบที่วัดได้นั้นยังคงมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าที่คำนวณได้ด้วยฟังก์ชันค่าสูญเสีย ผลต่างระหว่างค่าสูญเสียที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับกับ 7 ระดับจะเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 วัตต์ ซึ่งเป็นการยืนยันถึงหลักการของค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิก เมื่อสัญญาณแรงดันเข้าใกล้ไซน์มากขึ้นค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกก็จะลดลง

บทที่ 8

สรุปผล

8.1 วิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบวัดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งปกติจะวัดได้ยากแต่ด้วยเครื่อง PZ4000 Power Analyzer นั้นสามารถแยกวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้ทั้งกำลังไฟฟารวมและกำลังไฟฟ้ามูลฐาน ทำให้สามารถทราบค่ากำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกได้สะดวกมากยิ่งขึ้นแต่ด้วยเครื่อง PZ4000 ออกแบบให้วัดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 20 kW ดังนั้นเมื่อนำมาวัดกับค่ากำลังที่ขนาดต่างๆ โอกาสค่าความผิดพลาดก็จะมีมากขึ้นเนื่องจากค่าที่อ่านได้จะมีการแกว่งตัว ดังนั้นจะอาศัยการประมาณค่าในการบันทึกผล แต่ผลที่ยังคงมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีค่าน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ โดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ทั้งเทคนิคการมอดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM หรือคิดเป็นประมาณ 3.7 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียที่เกิดจากแรงดันมูลฐานที่พิกัด

8.2 สรุป

ด้วยคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีความสามารถทำงานที่กำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ถึงแม้จะมีข้อเสียเปรียบในเรื่องจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์ที่ต้องใช้มากกว่า แต่จะมีข้อได้เปรียบในด้านสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตจะมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณไซน์มากยิ่งขึ้นและข้อได้เปรียบในการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ รวมถึงความสามารถในการต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนได้อย่างสะดวก

ในระบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกนอกเหนือจากค่าสูญเสียปกติจากแรงดันมูลฐานนั้นย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการลดค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจึงสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะให้กับระบบการควบคุมได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งที่ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อศึกษาถึงกลไกการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกว่ามีตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการสูญเสีย ซึ่งมาจากคุณสมบัติของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม เช่น ค่าดัชนีการมอดูเลชัน, ความถี่สวิตซ์ และระดับแรงดันไฟตรง เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดค่าสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำหรือเจ้าของลิขสิทธิ์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้มีการคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกด้วยฟังก์ชันการสูญเสียเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบผลจากผลการคำนวณค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้ จึงได้เลือกสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ซึ่งหากเลือกอินเวอร์เตอร์ให้มีจำนวนระดับสูงกว่า 7 ระดับ ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าน้อยกว่าก็จริง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ค่าการสูญเสียจะมีความแตกต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับจำนวนอุปกรณ์สวิตช์และต้นทุนที่ต้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนระดับ

และได้มีการยืนยันผลการวิเคราะห์โดยผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และ 7 ระดับชนิดเซพริคัล แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าน้อยจะขึ้นอยู่กับสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งถ้ายิ่งสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้นค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าลดลง ผลที่ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซพริคัลหรือชนิดอื่นๆ ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยคำนึงถึงค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกหรืองานในงานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

8.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

- ในการวัดสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกในทางปฏิบัติ ต้องการเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำ และสามารถแยกกำลังไฟฟ้ารวมกับกำลังไฟฟ้ามูลฐานได้ ซึ่ง PZ4000 ทำได้ดีในระดับที่น่าพอใจแต่ความแม่นยำในการวัดกำลังไฟฟ้าระดับต่ำยังมีการแกว่งของค่าที่อ่านได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการกระเพื่อมของกระแส หรือสนามแม่เหล็กในมอเตอร์มีค่าไม่สม่ำเสมอ
- ในการควบคุมที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดจนทำให้อินเวอร์เตอร์ย่อยหนึ่งเฟสในระดับบนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ จะทำให้สวิตช์ 2 ตัวด้านล่างของอินเวอร์เตอร์นำกระแสตลอดเวลา เป็นผลทำให้เกิดความร้อนสะสมอย่างต่อเนื่องหากระบบระบายความร้อนไม่ดีพอจะทำให้มีโอกาสสูงที่อินเวอร์เตอร์ชุดด้านบนได้รับความเสียหาย
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซพริคัลนั้นจะมีแหล่งจ่ายที่อิสระต่อกัน ดังนั้นในการรักษาระดับแรงดันของแหล่งแต่ละชุดให้มีค่าเท่ากันค่อนข้างมีความลำบาก อาจส่งผลค่าค่าแรงดันด้านเอาต์พุตและคุณสมบัติของสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่อาจเปลี่ยนแปลงไป

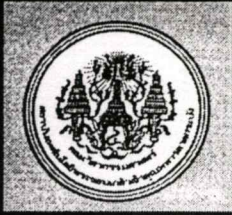
เอกสารอ้างอิง

- [1] Takahashi I., Nabae A., Akagi H., "A new neutral-point clamped pwm inverter," **IEEE Trans. Ind. Application**, Vol. IA-17, Sep-Oct. 1981. pp. 518-523.
- [2] Meynard T. A., Foch H., "Muti-level choppers for high voltage applications," **Eur. Power Electron. Drives J.**, Vol. 2, No. 1, Mar. 1992. pp. 41.
- [3] Hammond P., "A new approach to enhance power quality for medium voltage ac drive," **IEEE Trans. Ind Application**, Vol. 33, Jan.-Feb. 1997. pp. 202-208.
- [4] Peng F.Z., "A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing," **IEEE Trans. Ind. Application**, Vol. 37, No. 2, March-April 2001. pp. 611-618.
- [5] Bogietti A., Ferraris P., Lazzari M., Profumo F., "Influence of the Inverter Characteristics on Iron Losses in PWM Inverter-Fed Induction Motors.," **IEEE Trans. On Magnetic**, Vol. 2, No. 5, September 1996. pp. 1190-1194.
- [6] Kinnares V., Clare J.C, Bradly K.J., "A New Technique For determining & Predicting Harmonic Power Loss in PWM fed Induction Machine," **ICEM96 Vigo/Spain**, 1996, pp. 327-331.
- [7] Khomfoi S., Kinnares V., Viriya P., "Investigation Into Core Losses due too Harmonic Voltages in PWM fed Induction Motors," **IEEE 1999 International Conference on Power Electronic and Drive Systems PEDS'99**, 27-29 July 1999 Hongkong, pp104-109.
- [8] Khomfoi S. , Kinnares V., Viriya P., "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, Singapo.
- [9] Mohan N., Undeland T. M., Robins W. P., **Power Electronics Converters, Applications, and Design**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [10] สุรินทร์ คำฝอย "การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์บนพื้นฐานของการสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกจ่ายโดยพีคดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ENGINEERING

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2549

1.	Direction Sequence Construction for Offline Thai Handwriting <i>Kor Kirlikorn Boontae Krutrachue</i>	1
2.	การสังเคราะห์วัสดุประกอบคล้ายไม้จากพีวีซีกับผงหนังและเยื่อขานอ่อน <i>ไพศาล นาคพิพัฒน์ เตือนพร บุญศิริคำชัย</i>	7
3.	การออกแบบวงจรขยายป้องกันกระแสแรงดันต่ำ <i>มนตรี สุขเลี้ยง สมพงษ์ วิเศษพวงกิจ กอบชัย เพรชญา</i>	14
4.	วงจรยกความถี่ในโหมด OTA-C ที่โปรแกรมได้ทางดิจิทัล <i>สุวัฒน์ สุวรรณะ มนต์ดี คำเงิน ทวีพัฒน์ พรหมณี กอบชัย เพรชญา กฤษณ์ อังแก้ว จิระศักดิ์ ชาญพิธรรม</i>	20
5.	การศึกษาคุณสมบัติของไฟฟ้าและผลต่อขบวนการแสงของฟิล์มเพชร <i>ทรงเกียรติ กิตติธรรมรักษ์ วิฑูรย์ สุทธิรุ่งเรือง</i>	26
6.	โฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันของฟิล์มเพชรชนิดเส้นและฟิล์มเพชรชนิดที่ <i>ทรงเกียรติ กิตติธรรมรักษ์ วิฑูรย์ สุทธิรุ่งเรือง</i>	32
7.	คุณสมบัติของวัสดุซิลิกซ์ เซมิคอนดักเตอร์ไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยคุณสมบัติของ <i>นิรันดร์ สุทธิรุ่งเรือง วิฑูรย์ สุทธิรุ่งเรือง</i>	38
8.	การศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของโมเลกุลแก๊สในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม <i>กมลді สอดคล้อง เอลิษาณี มานนท์ วิจิตร กิณเรศ สุรชาติ สิริภักดิ์</i>	44
9.	ไฟฟ้ากำลังบนคลื่นสี่เหลี่ยม <i>โศภณ สวัสดิ์วัฒนะ ประภาส ไชยสุวรรณ</i>	50
10.	การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวส์โลบีสเตสสำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม <i>คุณกษมภ์ พิเศษพาณิชย์ มณฑล สิลาจินดาไพฑูริย์</i>	56
11.	การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันสาร์เวนิสที่ป้อนด้วยพีคบัลลิสเต็ม โดยขึ้นแวลต์เตอร์ในหลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์ <i>ศักรชัย เอมระชาด วิจิตร กิณเรศ</i>	62
12.	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาการทำงานผิดพลาดของระบบป้องกันโซน 3 ไฟโรจน์ เทียนทอง มณฑล สิลาจินดาไพฑูริย์	68
13.	วงจรดิจิทัลใหม่ขยายฟังก์ชันคอนเวอร์เตอร์ที่มีการปรับปรุงแวลต์จกคร่อมระหว่างคาปาซิเตอร์ในวงจร <i>จตุรศักดิ์ จันทโร วิจิตร กิณเรศ</i>	74
14.	การออกแบบและวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานอินพุตด้านกับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ มีการควบคุมแวลต์และรูปร่างของคลื่นเปลี่ยนแปลงความถี่สูง <i>บุญศรี วรรณภาส ประภาส ไชยสุวรรณ วิจิตร กิณเรศ</i>	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในวงการอุตสาหกรรมได้มีการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำกันอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดสองระดับ ซึ่งเมื่อมีความต้องการการควบคุมมอเตอร์ในขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ค่าสูญเสียของมอเตอร์จึงยังมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น เพราะจะส่งผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

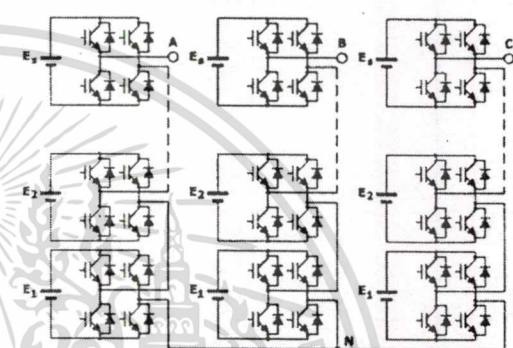
แรงดันฮาร์มอนิกสั่นนอกจากจะส่งผลทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิดแล้วยังทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นจากการสูญเสียปกติที่เกิดจากแรงดันมูลฐาน ขึ้นอยู่กับความถี่ตวิตซิ่ง, การมอดูเลชัน, เป็นต้น ซึ่งในบางจุดของการทำงานค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นนี้อาจจะมีความมากกว่าค่าสูญเสียที่เกิดจากแรงดันมูลฐาน โดยเฉพาะที่ความถี่ทำให้ประสิทธิภาพต่ำ [5] โดยค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันฮาร์มอนิกนี้เนื่องจากสัญญาณไม่เป็นไซน์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับนั้นเคยได้ถูกนำมาพิจารณาแล้ว [1-4]

ด้วยคุณคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีสามารถในการทำงาน ในงานประเภทที่ต้องการพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง อีกทั้งมีสัญญาณของแรงดันด้านเอาต์พุตที่เข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้นยอมทำให้ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับ ประกอบกันยังไม่มีการวิจัยในการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าสูญเสียที่เกิดจากจากแรงดันฮาร์มอนิกซ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ดังนั้นในบทความฉบับนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นระหว่างอินเวอร์เตอร์สองระดับกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 380 โวลต์ โดยการใช้โปรแกรม MATLAB /Simulink เพื่อคำนวณหาค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันฮาร์มอนิกซ์ ทั้งการทำงานย่านความเร็วต่ำกว่าพิกัด และย่านความเร็วสูงกว่าพิกัดโดยวิธีการควบคุมแบบ V/f คงที่ โดยผลที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการค่านิ่งถึงค่าสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกซ์

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์

โดยหลักการพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยข้อได้เปรียบที่นำอุปกรณ์สวิตซ์มาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นอินเวอร์เตอร์หลายระดับจึงมีความสามารถรองรับการใช้งานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งได้ 4 ชนิดได้แก่ชนิดไดโอดแคดลมป์, ชนิดคาปาซิเตอร์แคดลมป์, ชนิด Generalized และชนิดเชอบริดจ์ซึ่งใช้ในรายงานฉบับนี้



รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์

โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์มีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสหรือเชอบริดจ์ที่นำเอาแรงดันด้านเอาต์พุตมาต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 1 ซึ่งอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดสามารถให้แรงดันเอาต์พุตเป็น E₁, -E₁ หรือศูนย์ โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะต้องแยกกราวด์กัน จึงเหมาะสำหรับการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่นเซลล์พลังงาน, เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแบตเตอรี่ เป็นต้น

โดยจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ชนิดเชอบริดจ์นั้นจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงต่อเฟสดังสมการที่ 1

n = 2s + 1 (1)

เมื่อ n คือ จำนวนระดับ
s คือ จำนวนแหล่งจ่ายไฟตรงต่อเฟส

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์มีจุดนิวตรอนที่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์แบบอื่น ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเชอบริดจ์นี้ยังมีคุณสมบัติในการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงสูงกว่าอินเวอร์เตอร์

ชนิดคลื่นถึงสองเท่า ซึ่งแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีค่าความสัมพันธ์กับดัชนีการมอดูเลชัน (m) และแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ตามสมการที่ 2 ซึ่งสมการนี้จะใช้ได้ในช่วง $0 \leq m \leq 1$ ถ้า $m > 1$ จะเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน (Over Modulation) ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมอดูเลชันเอาท์พุทไม่เป็นเชิงเส้นกับดัชนีการมอดูเลชัน

$$V_{peak} = m \cdot V_{dc} \tag{2}$$

$$V_{dc} = sE \tag{3}$$

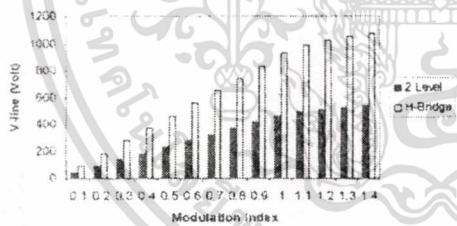
เมื่อ E คือ แรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์

ส่วนแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์สองระดับและอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีการมอดูเลชันและแรงดันไฟตรงตามสมการที่ 4

$$V_{peak} = \frac{1}{2} m \cdot V_{dc} \tag{4}$$

โดยจำนวนตัวครึ่งของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนระดับหรือจำนวนอินเวอร์เตอร์แบ่งเฟสตามสมการที่ 5

$$N_{lev} = 12s = 6(n-1) \tag{5}$$



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงที่ระดับดัชนีการมอดูเลชันและแรงดันไฟตรงเดียวกัน

ดังนั้นหากมีอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์มาใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิทแรงดันไฟฟ้าทั่วไป (220/380 โวลต์) จึงสามารถลดระดับแรงดันไฟตรงลงมาได้ 50% ซึ่งทำให้สามารถลดพิทของอุปกรณ์สวิตซ์ลงมาได้ แต่ถ้าไม่ลดระดับแรงดันไฟตรงลงก็จะทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์จะมีความสามารถในการทำงานย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ที่กว้างขึ้น แต่หาก

ต้องการใช้งานกับแหล่งจ่ายประเภทเซลล์พลังงานหรือแบตเตอรี่ ระดับแรงดันไฟฟ้าไฟตรงควรจะถูกออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าไฟตรงดังกล่าว

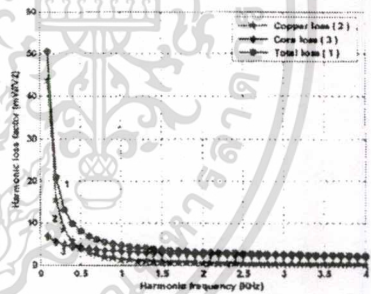
3. การสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์

ในบทความฉบับนี้ได้ใช้ฟังก์ชันการสูญเสียตามสมการที่ 6 [4]

$$P_n = \sum_{n=1} \left(\frac{A}{f_n^\alpha} + \frac{B}{f_n^\beta} \right) V_n^2 \tag{6}$$

- เมื่อ P_n คือ ค่าสูญเสียรวมจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ (วัตต์)
- V_n คือ แรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n (V_{rms})
- f_n คือ ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n (kHz)
- A คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในตัวนำ
- α คือ เลขยกกำลังฟังก์ชันการสูญเสียในตัวนำ
- B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่แกนเหล็ก
- β คือ เลขยกกำลังฟังก์ชันการสูญเสียที่แกนเหล็ก

โดยทั่วไปค่า α เท่ากับ 1.5 และค่า β จะมีค่าระหว่าง 0.3-0.5 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 โดยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สามารถได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [3]



รูปที่ 3 ตัวอย่างของฟังก์ชันการสูญเสีย

$$A = 1.38, B = 6.73, \alpha = 1.5, \beta = 0.32$$

ตัวอย่างฟังก์ชันค่าสูญเสียจะมีลักษณะดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย 3 เส้นได้แก่ ค่าสูญเสียรวม, ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก และค่าสูญเสียในตัวนำ ดังเส้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยค่าฟังก์ชันการสูญเสียในตัวนำจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าฟังก์ชันการสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าค่อยๆ ลดลงและมีค่าเกือบคงที่เมื่อความถี่สูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะส่งผลต่อค่าสูญเสียรวมมากกว่าค่าสูญเสียในตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกส์

ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มนั้นๆ เช่น ระดับดัชนีการมอดูเลชัน, ความถี่สวิทซ์ซิง, เทคนิคในการมอดูเลชัน, ระดับแรงดันไฟตรง และจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ถ้าจำนวนระดับเพิ่มขึ้นก็จะทำให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้น ย่อมทำให้ค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์มอนิกส์มีค่าลดลง

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์นี้ได้โดยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ไร้ภาระ ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

$$P_0 = P_i + P_h + P_\omega \tag{7}$$

เมื่อ P_0 คือ ค่าสูญเสียรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 P_i คือ ค่าสูญเสียปกติที่เกิดจากแรงดันมาตรฐาน
 P_h คือ ค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์
 P_ω คือ ค่าสูญเสียจากการหมุน

5. การจำลองและคำนวณ

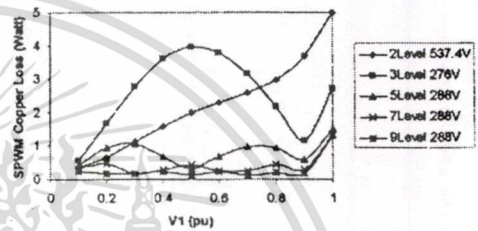
การสร้างแรงดันเอาต์พุตจะอาศัย Simulink จากนั้นใช้ MATLAB คำนวณค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้น โดยอาศัยฟังก์ชันดังในหัวข้อที่ 3 ทั้งย่านแรงบิดคงที่และย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ รวมทั้งผลกระทบที่เกิดจากเทคนิคการมอดูเลชันแบบต่างๆที่มีผลต่อค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้น โดยจะเป็นการเปรียบเทียบค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากอินเวอร์เตอร์สองระดับและอินเวอร์เตอร์ 3, 5, 7 และ 9 ระดับชนิดเอชบริดจ์ โดยแต่ละระดับจะใช้แรงดันไฟตรงที่เหมาะสมป้อนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่กัก 3 แรงม้า 380 โวลท์

ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการสูญเสียเพื่อเปรียบเทียบทั้งสัญญาณมอดูเลชัน, แรงดันไลน์, แรงดันฮาร์มอนิกส์ และค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับในรูปที่ 7 และของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับชนิดเอชบริดจ์ในรูปที่ 8

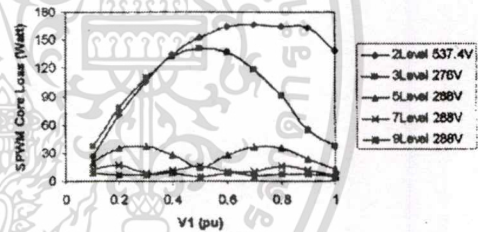
5.1 การทำงานย่านแรงบิดคงที่

รูปที่ 4 จะเป็นค่าสูญเสียในตัวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียของ

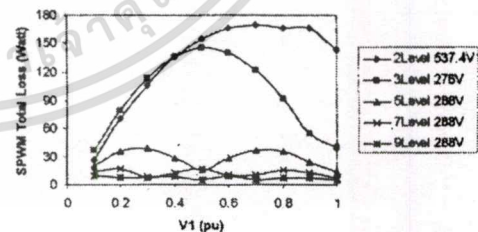
อินเวอร์เตอร์สองระดับในช่วงแรงดันเอาต์พุตมาตรฐาน 0.1-0.8 pu จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ส่วนค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีลักษณะโค้งตามค่าดัชนีการมอดูเลชันของแต่ละระดับเป็นสำคัญ และในช่วงแรงดัน 0.8 pu ขึ้นไปค่าสูญเสียทั้งของอินเวอร์เตอร์สองระดับและอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่ค่าระดับแรงดันสูงกว่า 0.8 pu นั้นเทคนิค SPWM ต้องทำงานที่ดัชนีการมอดูเลชันเกินหนึ่ง ย่อมทำให้มีฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำเกิดขึ้น ทำให้มีค่าสูญเสียเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในตัวนำของอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์

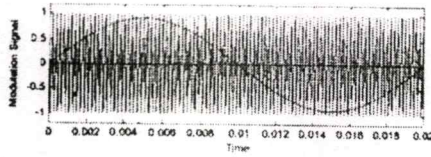


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในแกนเหล็กของอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์

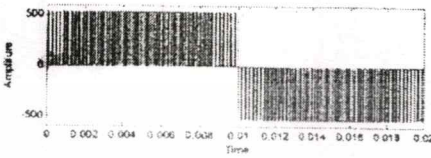


รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าสูญเสียรวมของอินเวอร์เตอร์แต่ละระดับที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์

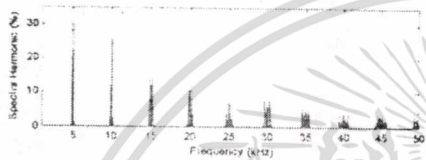
รูปที่ 5 จะเป็นค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์สองระดับจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและจะ



(ก) สัญญาณการมอดูเลชัน



(ข) แรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์

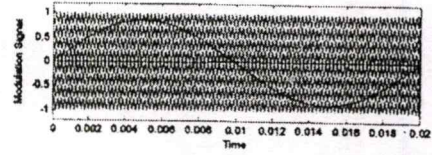


(ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน (ไม่รวมแรงดันมอดูเลชัน)

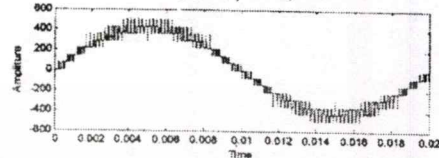


(ง) ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์

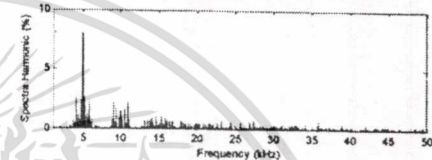
รูปที่ 7 ตัวการสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ



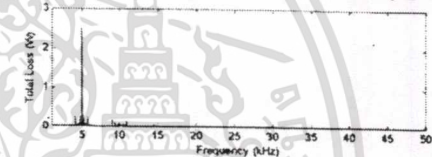
(ก) สัญญาณการมอดูเลชัน



(ข) แรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์



(ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน (ไม่รวมแรงดันมอดูเลชัน)



(ง) ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์

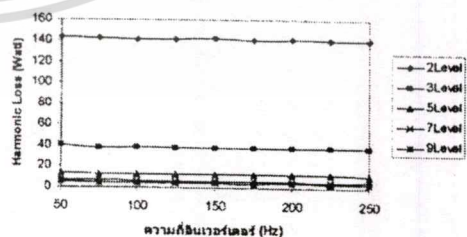
รูปที่ 8 ตัวการสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์

มีกำลังลดลงเมื่อระดับแรงดันเข้าใกล้ที่กัก ส่วนค่าสูญเสียในแกนเหล็กของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีลักษณะเส้นโค้งตามค่าดัชนีการมอดูเลชันของแต่ละระดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าสูญเสียในตัวนำกับค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเห็นได้ว่า ค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าสูงกว่าค่าสูญเสียในตัวนำมาก จึงทำให้ค่าสูญเสียรวมดังรูปที่ 6 มีลักษณะเด่นชัดกับค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

จากผลการจำลองการคำนวณค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4, 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์นั้นจะส่งผลต่อค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกส์อย่างเห็นได้ชัด ค่าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะมีค่าใกล้เคียงกับของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ 5 ระดับค่าการสูญเสียก็จะลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อจำนวนระดับที่สูงขึ้นอัตราการลดลงของค่าสูญเสียจะมีน้อยลงเปรียบเทียบระหว่าง 7 ระดับ กับ 9 ระดับ

5.2 การทำงานย่านกำลังไฟฟ้าคงที่

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความเร็วสูงกว่าที่กักจะทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ดังนั้นเมื่อแรงดันคงที่ค่าดัชนีการมอดูเลชันก็จะคงที่ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และค่าการสูญเสียจึงขึ้นอยู่กับจำนวนระดับเป็นสำคัญ โดยที่จำนวนระดับสูงขึ้นค่าการสูญเสียก็จะมีค่าน้อยลงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ในย่านการทำงานกำลังไฟฟ้าคงที่

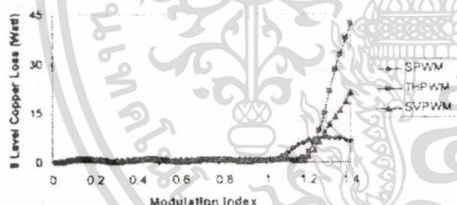
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลกระทบจากเทคนิคการมอดูเลชันแบบต่างๆ

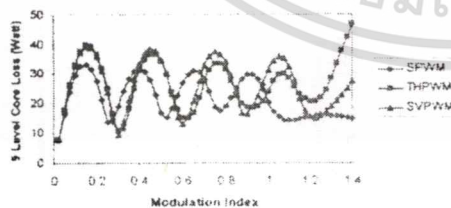
ในบทความฉบับนี้ได้จำลองการทำงานเพื่อหาค่าสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ 3 เทคนิคได้แก่ การใช้สัญญาณมอดูเลชันแบบไซน์ (SPWM), ไซน์ร่วมกับฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (THPWM) และสเปคเทรลเซอร์ (SVPWM)

จากตัวอย่างผลการคำนวณค่าสูญเสียในตัวนำของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับชนิดเอชบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 10 ในช่วงค่า $m \leq 1$ จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียในตัวนำของแต่ละเทคนิคจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยในช่วงที่ $m > 1$ ค่าสูญเสียในตัวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของโอเวอร์มอดูเลชันจะมีฮาร์โมนิกส์อันดับคี่ เช่น อันดับที่ 5, 7, 11, 13, ... เกิดขึ้นซึ่งจะมีผลต่อกระแสฮาร์โมนิกส์อย่างมาก

ส่วนรูปที่ 11 จะเป็นค่าสูญเสียในแกนเหล็กของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ จะเห็นได้ว่าเทคนิค THPWM กับ SVPWM จะมีค่าใกล้เคียงกันแต่จะเริ่มมีค่าที่แตกต่างกันในช่วง $m > 1$ โดยเทคนิค SPWM จะไม่มีการทำงานที่เป็นเชิงเส้นน้อยที่สุดก่อนจะเกิดโอเวอร์มอดูเลชัน แต่ในช่วงการทำงานที่ $m > 1$ และจะมีค่าสูญเสียน้อยกว่าเทคนิค THPWM และ SVPWM



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในตัวนำจากการใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในแกนเหล็กจากการใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์ 9 ระดับ

6. สรุป

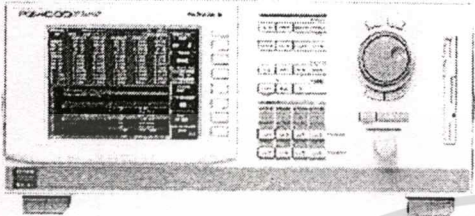
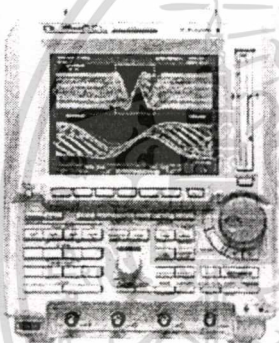

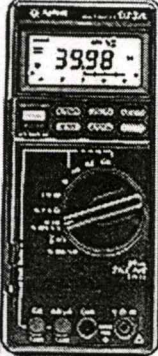
จากผลการคำนวณค่าการสูญเสียที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ถ้าจำนวนระดับเพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้นย่อมทำให้ค่าการสูญเสียจากแรงดันฮาร์โมนิกส์มีค่าลดลง แต่ก็ต้องแลกด้วยต้นทุนและค่าสูญเสียของตัวอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูงขึ้น โดยจำนวนระดับที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำควรจะอยู่ในช่วง 5-7 ระดับ โดยจะพบว่าลักษณะของค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนระดับและจะแปรตามค่าดัชนีการมอดูเลชันในแต่ละระดับเป็นสำคัญ ผลที่ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยคำนึงถึงค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เป็นนัยสำคัญ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Bogietti, P. Ferraris, M. Lazzari and F. Profumo, "Influence of the Inverter Characteristics on Iron Losses in PWM Inverter-Fed Induction Motors," IEEE Trans. Magnetic, vol. 2, No. 5, pp. 1190-1194, September 1996.
- [2] V. Kinnaree, J.C. Clare and K.J. Bradley, "A New Technique For determining & Predicting Harmonic Power Loss in PWM fed Induction Machine," ICEM96 Vigo/Spain, pp. 327-331, 1996.
- [3] S. Khomfoi, V. Kinnaree and P. Viriya "Investigation Into Core Losses due too Harmonic Voltages in PWM fed Induction Motors," IEEE 1999 International Conference on Power Electronic and Drive Systems, PEDS'99, 27-29 July 1999, pp. 104-109, Hong Kong.
- [4] T.M. Undeland and N. Mohan "Loss Consideration in Induction Motor Drives," IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 3 No.4, October 1988, pp. 497-452
- [5] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robins "Power Electronics Converters, Applications, and Design," 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc, Canada, 1995.

ภาคผนวก ข

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

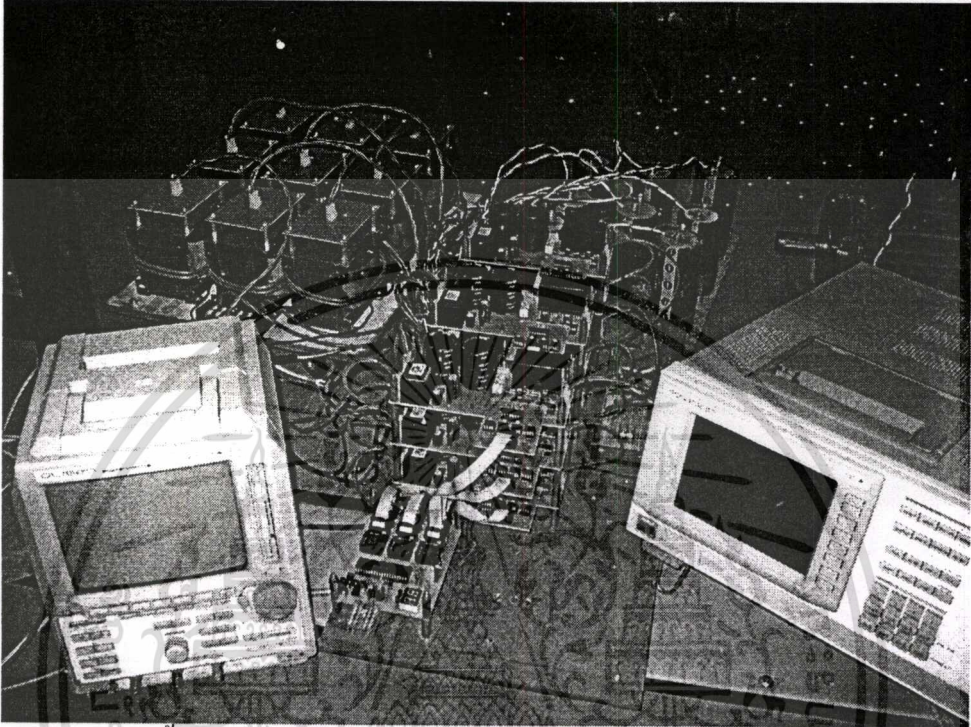
	<p>ผลิตภัณฑ์ Power Analyzer (YAKOGAWA) รุ่น PZ4000 รายละเอียด</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wide Measurement Bandwidth (DC to 2 MHz) - Accurately Sampling 5 MS/s - Harmonic Analysis (up to 500th Order)
	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1520/L (4 Channel) รายละเอียด</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bandwidth 150 MHz - 200 MS/s sampling rate on one channel - or 100 MS/s on two channels - 8 bit vertical resolution - DC to 30 MHz, 850V (DC + AC peak) - 2% DC accuracy, Internal low pass filter
	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe รุ่น 700924 รายละเอียด</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sampling Rate 100 MHz - A Probe Lets You Make Wide-Band - Differential Input Measurements
	<p>ผลิตภัณฑ์ Multi Meter (Hewlett Packard) รุ่น 973A รายละเอียด</p> <ul style="list-style-type: none"> - True RMS 20 kHz Accuracy = 0.1% - Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts - Iac or Idc : 0 to 10 Amperes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

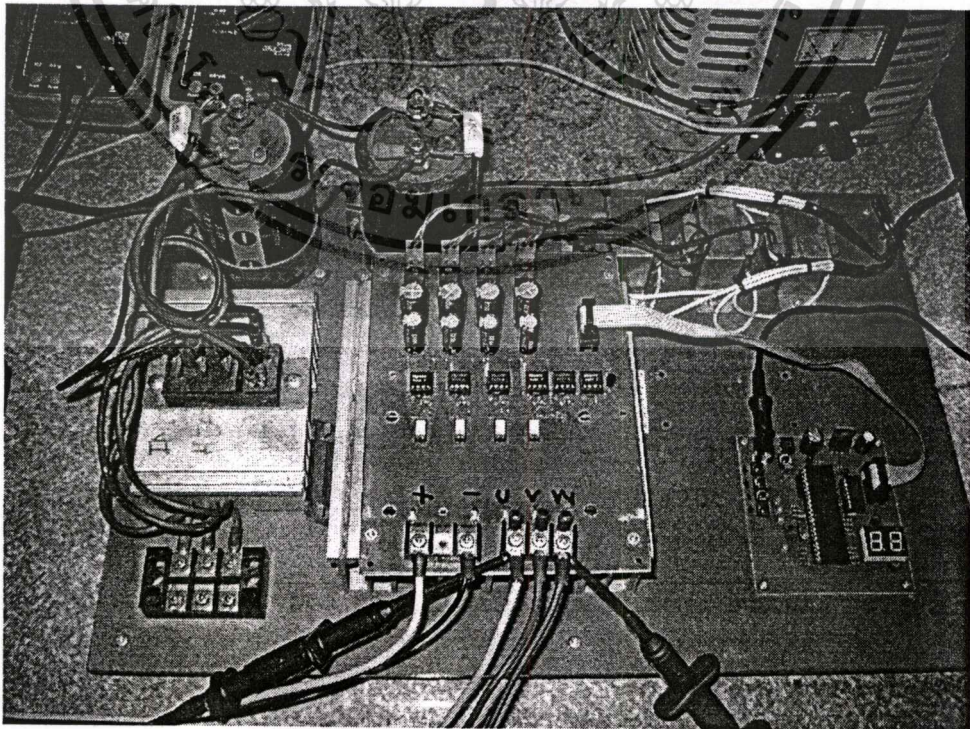
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

รูปอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปชิ้นงานอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอชบริดจ์ที่ใช้ในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับที่ใช้ในทดสอบเพื่อเปรียบเทียบไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ฉัตรชัย เอมสะอาด เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2519 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้