สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล โดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

A BALANCED SOURCE POWER TRANSFER CASCADE MULTILEVEL INVERTER BASED ON AN OPTIMIZED STEPPED-WAVEFORM HARMONIC ELIMINATION TECHNIQUE FOR THREE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE

T067444

สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์

SITTIPORN JEARRANUNTAPISUT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 67444
วัน,เดือน,ปี 15 S.A. 2549

.b 11671099
.i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2818-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A BALANCED SOURCE POWER TRANSFER CASCADE MULTILEVEL INVERTER BASED ON AN OPTIMIZED STEPPED-WAVEFORM HARMONIC ELIMINATION TECHNIQUE FOR THREE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE

SITTIPORN JEARRANUNTAPISUT

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

ISBN 974-15-2818-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันไดสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
นักศึกษา	นายสิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์
รหัสนักศึกษา	44611003
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์และศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส รูปแบบการสวิทช์ได้ใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได และเทคนิคการหมุนพัลส์ ในการออกแบบรูปแบบการสวิทช์ ที่ทำให้แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีลักษณะเหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ จ่ายกำลังไฟฟ้าได้เท่าๆ กัน โดยในงานวิจัยนี้ได้จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของการทำงาน ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Balanced Source Power Transfer Cascade Mutilevel Inverter Based on an Optimized Stepped-Waveform Harmonic Elimination Technique for Three-Phase Induction Motor Drive
Student	Mr.Sittiporn Jearranuntapisut
Student ID	44611003
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents analysis and operation of a cascade multilevel inverter for three phase induction motor drives. The switching pattern is based on an optimized stepped-waveform harmonic elimination and pulse rotation technique providing similar waveform output voltage of each H-bridge inverter in a period operation. The objective of this technique is to offer similarly useful power transfer of each dc supply of the H-bridge inverter. Simulation using MATLAB/SIMULINK program is also included. Additionally, testing of the prototype for verifying operation compared with simulation was conducted under both conditions of balanced source and unbalanced source power transfer. The result appears satisfactory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิศวกรรมไฟฟ้าและห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางด้านตำราและเอกสารอ้างอิง รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นักศึกษาปริญญาโททุกคนที่ประจำห้องปฏิบัติการ Power Electronics and Machine Control ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เคารพรักยิ่ง ตลอดจนญาติผู้ใหญ่ และพี่ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดียิ่งยามผู้วิจัยรู้สึกท้อแท้

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. II
กิตติกรรมประกาศ.. III
สารบัญ.. IV
สารบัญตาราง.. VIII
สารบัญรูป.. IX
บทที่ 1 บทนำ.. 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.. 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.. 2
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.. 2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.. 3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.. 3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.. 4

บทที่ 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ.. 5
2.1 บทนำ.. 5
2.2 อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (H-Bridge Inverter).. 5
2.2.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์.. 5
2.2.2 สัญญาณเกทและการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์.. 6
2.2.3 เวลาประวิง (Dead Time).. 8
2.3 องค์ประกอบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด.. 9
2.3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว..... 9
2.3.2 โครงสร้างคาสเคดอินเวอร์เตอร์สามเฟส.. 16
2.3.3 การแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Separated DC Sources SDCSs). 18
2.10 สรุป.. 20

บทที่ 3 เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได.. 21
3.1 บทนำ.. 21
3.2 วิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์.. 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การวิเคราะห์หามุมสวิทชิ่งเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์.. 25

3.3.1 ทฤษฎีนิวตัน-ราปสัน.. 26

3.3.2 การหาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีนิวตัน-ราปสัน........................ 28

3.3.3 การคำนวณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม

(Total Harmonic Distortion: THD).. 35

3.4 เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation).. 36

3.5 สรุป.. 36

บทที่ 4 การจำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด................................ 37

4.1 บทนำ.. 37

4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด.................................. 37

4.2.1 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่แหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลัง

ไฟฟ้าไม่สมดุล.. 39

4.2.1.1 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 0.6$.. 39

4.2.1.2 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 0.8$.. 41

4.2.1.3 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 1$.. 43

4.2.1.4 ที่ $f = 50$ Hz, $M = 0.6$.. 45

4.2.1.5 ที่ $f = 50$ Hz, $M = 0.8$.. 47

4.2.1.6 ที่ $f = 50$ Hz, $M = 1$.. 49

4.2.1.7 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 0.6$.. 51

4.2.1.8 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 0.8$.. 53

4.2.1.9 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 1$.. 55

4.2.2 สรุปผลการจำลอง ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล...... 57

4.2.3 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่แหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลัง

ไฟฟ้าสมดุล.. 58

4.2.3.1 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 0.6$.. 58

4.2.3.2 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 0.8$.. 60

4.2.3.3 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 1$.. 62

4.2.3.4 ที่ $f = 50$ Hz, $M = 0.6$.. 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3.5 ที่ f = 50 Hz, M = 0.8 66
4.2.3.6 ที่ f = 50 Hz, M = 1 68
4.2.3.7 ที่ f = 70 Hz, M = 0.6 70
4.2.3.8 ที่ f = 70 Hz, M = 0.8 72
4.2.3.9 ที่ f = 70 Hz, M = 1 74
4.2.4 สรุปผลการจำลอง ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล 76
4.3 สรุป 77

บทที่ 5 การออกแบบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 78
5.1 บทนำ 78
5.2 การออกแบบวงจรกำลัง 78
5.2.1 การออกแบบสวิทช์กำลัง 78
5.2.2 การออกแบบวงจรขับนำเกท 80
5.3 การออกแบบวงจรควบคุม 82
5.3.1 สัญญาณเกทของสวิทช์แต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 82
5.3.2 วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์) 83
5.3.3 การออกแบบโปรแกรม 84
5.4 สรุป 86

บทที่ 6 ผลการทดลอง 87
6.1 บทนำ 87
6.2 การทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 87
6.2.1 ทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล 89
6.2.1.1 ที่ f = 40 Hz, M = 0.6 89
6.2.1.2 ที่ f = 40 Hz, M = 0.8 91
6.2.1.3 ที่ f = 40 Hz, M = 1 93
6.2.1.4 ที่ f = 50 Hz, M = 0.6 95
6.2.1.5 ที่ f = 50 Hz, M = 0.8 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.1.6 ที่ f = 50 Hz, M = 1 99

6.2.1.7 ที่ f = 70 Hz, M = 0.6 101

6.2.1.8 ที่ f = 70 Hz, M = 0.8 103

6.2.1.9 ที่ f = 70 Hz, M = 1 105

6.2.2 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล... 107

6.2.3 ทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล 108

6.2.3.1 ที่ f = 40 Hz, M = 0.6 108

6.2.3.2 ที่ f = 40 Hz, M = 0.8 110

6.2.3.3 ที่ f = 40 Hz, M = 1 112

6.2.3.4 ที่ f = 50 Hz, M = 0.6 114

6.2.3.5 ที่ f = 50 Hz, M = 0.8 116

6.2.3.6 ที่ f = 50 Hz, M = 1 118

6.2.3.7 ที่ f = 70 Hz, M = 0.6 120

6.2.3.8 ที่ f = 70 Hz, M = 0.8 122

6.2.3.9 ที่ f = 70 Hz, M = 1 124

6.2.4 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล........ 126

6.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของอัตราส่วนแรงดันและความถี่ทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 127

6.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติ speed – torque curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส....... 133

6.5 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 134

6.6 สรุป 136

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 138

7.1 สรุปผลการทดสอบ 138

7.1.1 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล... 138

7.1.2 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล........ 138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.2 สรุปผลการทำงานทั้งระบบ.......... 139

7.3 ข้อเสนอแนะ.......... 139

เอกสารอ้างอิง.......... 141

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก 142

ภาคผนวก ข 145

ภาคผนวก ค 148

ค.1 หลักการหาค่ามุมสวิทช์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ.......... 149

ค.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แจ็คระดับชนิดแคสเคด ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ.......... 152

ค.2.1 ที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง $M = 0.4$ $f = 50$ Hz.......... 152

ค.2.2 ที่ระดับมอดูเลชั่นต่ำ $M = 0.2$ $f = 50$ Hz.......... 154

ค.3 ผลการทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด.......... 156

ค.3.1 กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง $M = 0.4$ $f = 50$ Hz.......... 156

ค.3.2 กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง $M = 0.4$ $f = 50$ Hz.......... 158

ค.4 สรุป.......... 161

ภาคผนวก ง 161

ภาคผนวก จ 199

ประวัติผู้เขียน 214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ลักษณะการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์.. 6
2.2 สภาวะการสวิทช์ในหนึ่งคาบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์............ 16
3.1 จำนวนฮาร์มอนิกส์ที่ถูกกำจัดทั้งในระบบเฟสเดียวและระบบสามเฟส............................. 29
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ THD_V ของแรงดันไลน์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ที่ค่า M=1.. 33
3.3 แสดงค่ามุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ........ 34
4.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A.. 57
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.. 57
4.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A.. 76
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.. 77
5.1 แสดงสัญญาณเกทสวิทช์.. 84
6.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A.. 107
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.. 107
6.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A.. 126
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.. 127
6.5 ค่าขนาดของแรงดันไลน์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ.. 128
6.6 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base1} = 40 Hz.......................... 129
6.7 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base2} = 50 Hz.......................... 129
6.8 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base3} = 60 Hz.......................... 129
6.9 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base4} = 70 Hz.......................... 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

6.10 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล.. 135
6.11 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล.. 135
ค.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulation Index กับมุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด.. 151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ยังไม่มีการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ 1
2.1 อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 1 เซลล์ 6
2.2 ลักษณะการทำงานของสวิทช์ในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 7
2.3 รูปแบบการสวิทซ์ด้วยวิธี Repeated zero-level 7
2.4 รูปแบบการสวิทซ์ด้วยวิธี Swapped zero-level 8
2.5 เวลาประวิงในสัญญาณเกท 9
2.6 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด 10
2.7 รูปคลื่นแรงดันเฟส 11 ระดับ และรูปคลื่นเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ 11
2.8 รูปแบบการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 12
2.9 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 14
2.10 อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 17
2.11 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของคาสเคดอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับขั้น 3 เฟส 18
2.12 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 19
2.13 การลัดวงจรของการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 20
3.1 รูปคลื่นเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์แคสเคดที่ s เอชบริดจ์เซลล์ 22
3.2 รูปคลื่นหลายระดับที่ s เอชบริดจ์เซลล์ 23
3.3 ควอเตอร์แรกของรูปคลื่นรายคาบแบบควอเตอร์ซิมเมทรี 24
3.4 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุท ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ 30
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ THD_V ของแรงดันไลน์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ 33
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulation Index กับมุมสวิทชิ่ง 34
3.7 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ได้ทำการปรับรูปแบบการสวิทช์ใหม่ 36
4.1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่ต่อแบบวาย (Y) 38
4.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่ใช้ในการจำลอง 38
4.3 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 39
4.4 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz 40

4.6 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz 40

4.7 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 40

4.8 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 41

4.9 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 41

4.10 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz 42

4.11 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz 42

4.12 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 42

4.13 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 43

4.14 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz 43

4.15 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz 44

4.16 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz 44

4.17 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 44

4.18 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 45

4.19 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 45

4.20 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 50$ Hz 46

4.21 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 50$ Hz 46

4.22 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 46

4.23 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 47

4.24 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.25 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz 48

4.26 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz 48

4.27 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 48

4.28 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 49

4.29 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 49

4.30 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz 50

4.31 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz 50

4.32 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 50

4.33 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 51

4.34 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 51

4.35 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz 52

4.36 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz 52

4.37 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 52

4.38 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 53

4.39 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 53

4.40 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz 54

4.41 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz 54

4.42 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 54

4.43 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 55

4.44 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.45 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 70$ Hz ... 56

4.46 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 70$ Hz ... 56

4.47 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 56

4.48 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 58

4.49 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 58

4.50 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz ... 59

4.51 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz ... 59

4.52 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 59

4.53 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 60

4.54 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 60

4.55 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz ... 61

4.56 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz ... 61

4.57 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 61

4.58 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 62

4.59 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz ... 62

4.60 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz ... 63

4.61 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz ... 63

4.62 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 63

4.63 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz ... 64

4.64 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz ... 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.65 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz 65
4.66 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz 65
4.67 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 65
4.68 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 66
4.69 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 66
4.70 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz 67
4.71 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz 67
4.72 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 67
4.73 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 68
4.74 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 68
4.75 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz 69
4.76 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz 69
4.77 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 69
4.78 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 70
4.79 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 70
4.80 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz 71
4.81 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz 71
4.82 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 71
4.83 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 72
4.84 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.85 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz 73

4.86 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz 73

4.87 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 73

4.88 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 74

4.89 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 74

4.90 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz 75

4.91 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz 75

4.92 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 75

5.1 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด 78

5.2 แสดงโครงสร้างของวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 78

5.3 ชุดวงจรแหล่งจ่ายคอนเวอร์เตอร์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดในเฟส A 79

5.4 วงจรขับนำเกทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 80

5.5 วงจรกำลังหนึ่งเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 81

5.6 วงจรกำลังทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 81

5.7 สัญญาณเกทของสวิทช์แต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับเฟส A ที่ ค่าดัชนีมอดูเลชั่นเท่ากับ 1 ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz 82

5.8 วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 83

5.9 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม 85

6.1 วงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ใช้ในการทดสอบ 88

6.2 แสดงการวัดกระแส, แรงดัน, และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์ในแต่ละเซลล์ 88

6.3 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz 89

6.4 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz 89

6.5 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.6 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 40$ Hz 90

6.7 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 90

6.8 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz...... 91

6.9 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz 91

6.10 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 40$ Hz........ 92

6.11 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 40$ Hz 92

6.12 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 92

6.13 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz...... 93

6.14 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz 93

6.15 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 40$ Hz........ 94

6.16 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 40$ Hz 94

6.17 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 94

6.18 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz...... 95

6.19 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 95

6.20 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 50$ Hz........ 96

6.21 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 50$ Hz 96

6.22 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 96

6.23 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz...... 97

6.24 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz 97

6.25 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 50$ Hz........ 98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.26	สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz	98
6.27	สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a	98
6.28	ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz	99
6.29	สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz	99
6.30	สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz	100
6.31	สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz	100
6.32	สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a	100
6.33	ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	101
6.34	สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	101
6.35	สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz	102
6.36	สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz	102
6.37	สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a	102
6.38	ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	103
6.39	สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	103
6.40	สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz	104
6.41	สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz	104
6.42	สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a	104
6.43	ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	105
6.44	สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz	105
6.45	สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.46 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz ... 106

6.47 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 106

6.48 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 108

6.49 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 108

6.50 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz ... 109

6.51 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz ... 109

6.52 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 109

6.53 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 110

6.54 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 110

6.55 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz ... 111

6.56 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz ... 111

6.57 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 111

6.58 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 112

6.59 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz ... 112

6.60 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz ... 113

6.61 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz ... 113

6.62 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 113

6.63 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz ... 114

6.64 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz ... 114

6.65 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz ... 115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.66 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz 115

6.67 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 115

6.68 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 116

6.69 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 116

6.70 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz 117

6.71 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz 117

6.72 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 117

6.73 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 118

6.74 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz 118

6.75 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz 119

6.76 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz 119

6.77 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 119

6.78 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 120

6.79 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 120

6.80 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz 121

6.81 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz 121

6.82 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 121

6.83 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 122

6.84 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 122

6.85 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz 123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.86 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz 123

6.87 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 123

6.88 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz.... 124

6.89 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz 124

6.90 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz........ 125

6.91 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz 125

6.92 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a 125

6.93 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base1} = 40 Hz........ 130

6.94 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base2} = 50 Hz........ 131

6.95 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base3} = 60 Hz........ 131

6.96 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base4} = 70 Hz........ 132

6.97 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานกับความถี่ด้านเอาท์พุทที่ความถี่กำหนดต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง........ 132

6.98 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เมื่อความถี่กำหนด f = 40 Hz........ 133

6.99 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เมื่อความถี่กำหนด f = 50 Hz........ 134

6.100 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในกรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลและสมดุล........ 136

ค.1 แสดงรูปคลื่นที่ครึ่งคาบบวกของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ระดับมอดูเลชั่นต่างๆ........ 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ค.2 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 152

ค.3 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 152

ค.4 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn}, V_{cn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ... 153

ค.5 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ... 153

ค.6 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 153

ค.7 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 154

ค.8 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 154

ค.9 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn}, V_{cn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส Van ... 155

ค.10 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ... 155

ค.11 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 155

ค.12 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 156

ค.13 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 156

ค.14 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 50$ Hz ... 157

ค.15 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 50$ Hz ... 157

ค.16 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 157

ค.17 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 158

ค.18 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ... 158

ค.19 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 50$ Hz ... 159

ค.20 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 50$ Hz ... 159

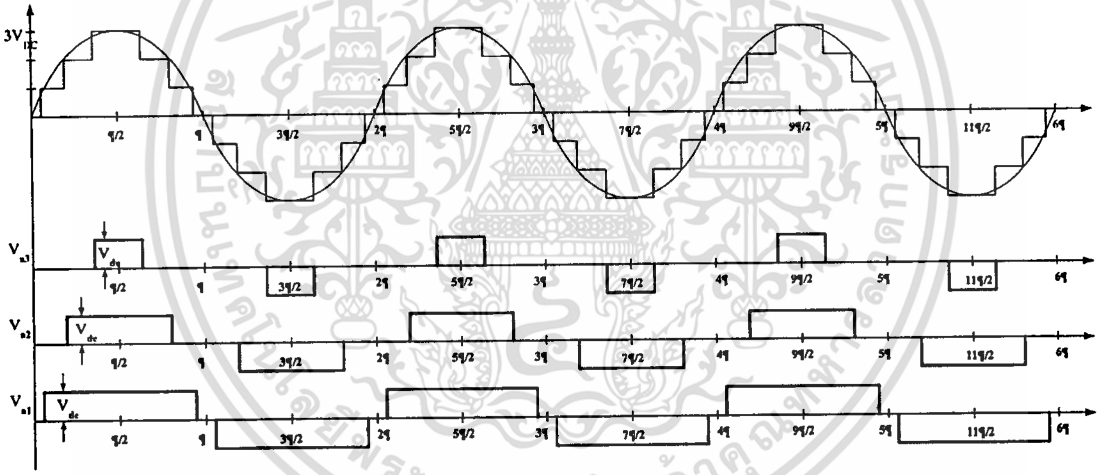
ค.21 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a ... 159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในงานภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์กันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดยังมีความสามารถในการทำงานที่แรงดันและกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ และยังมีค่าลดทอนจากฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านเอาท์พุทลดลง เพราะมีลักษณะของสัญญาณเข้าใกล้ไซน์มากกว่า และคุณสมบัติในการใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุทที่ดีกว่า เมื่อมีการแบ่งระดับแรงดัน อุปกรณ์สวิตช์ก็จะทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง ทำให้ราคาของอุปกรณ์สวิทช์ต่อหน่วยจึงมีค่าถูกลง แต่เนื่องจากลักษณะรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ ในแต่ละระดับแรงดันนั้น มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ยังไม่มีการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าเกิดจากรูปแบบของการสวิทช์ในหนึ่งคาบเวลาที่แตกต่างกันของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละชุดในเฟสเดียวกัน ซึ่งรูปแบบของการสวิทช์ในลักษณะนี้จะทำให้แหล่งจ่ายอินพุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวในกิ่งเดียวกันจ่ายพลังงานออกไปไม่เท่ากันส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานหรือแบตเตอรี่ (หรือหม้อแปลงแยกแท็ป) จ่ายพลังงานหมดไปไม่พร้อมกัน ทำให้อายุการใช้งานของแหล่งจ่ายพลังงานแต่ละตัวสั้น-ยาวไม่เท่ากัน ,ความร้อนที่สะสมภายในอุปกรณ์สวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ระดับแรงดันด้านล่างมีช่วงเวลาการทำงานที่นานกว่าจะมีค่ามากขึ้น ทำให้อุปกรณ์สวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์นั้นเกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหายได้ และจะมีผลอย่างมากกับระบบชาร์จแบตเตอรี่ในระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า (Hybrid Electric Vehicles) [4], [5] เมื่อนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดนี้ไปใช้งาน โดยจะทำให้ระบบชาร์จแบตเตอรี่ทำงานไม่พร้อมกัน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดนั้นลดลงด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้เห็นถึงความสำคัญของรูปแบบการควบคุมการสวิทช์ ที่จะทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของแหล่งจ่ายพลังงานของอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์สวิทชิ่ง ให้มีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะช่วยส่งผลให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดดีขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้เพื่อจัดสร้างชุดทดสอบ การทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดโดยเปรียบเทียบทางทฤษฎี โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได

1.2.3 ปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ให้เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีลักษณะเหมือนกันในหนึ่งคาบการทำงาน

1.2.4 เพื่อรักษาระดับสมดุลของแหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ให้จ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปได้เท่าๆ กัน

1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นกับแรงดันเฟส, แรงดันไลน์และกระแสเอาท์พุท เมื่อความถี่มูลฐานและค่าดัชนีมอดูเลชั่นเปลี่ยนแปลง

1.2.6 เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยในวิทยานิพนธ์เป็นการนำเอาเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบขั้นบันได [8] และเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) [4], [5] มาใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด โดยจะใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบขั้นบันไดในการหาค่ามุมสวิทชิ่งให้กับอุปกรณ์สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละชุด เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการในรูปคลื่นแรงดันไลน์ออกไป ส่วนเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) นั้นจะใช้ในการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟสเดียวกัน ให้มีลักษณะของแรงดันเอาท์พุทเหมือนกัน เพิ่มทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟสเดียวกัน จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้เท่าๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาหลักการนิวตัน-ราปสัน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบขั้นบันได

1.4.2 จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.4.3 ทำการสร้างชุดทดลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

1.4.4 ทำการทดลองขับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 3 HP 380 V ที่ค่าความถี่มูลฐานและค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด โดยได้ทำการศึกษาเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบขั้นบันได เพื่อนำมาใช้ในการหามุมสวิทชิ่งให้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการออกไป จากนั้นทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK สร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบเพื่อทดลองขับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ค่าความถี่เอาท์พุทและค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ สรุปผลการทดลองและวิจารณ์ และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งออกเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย เนื้อหาโดยย่อในแต่ละบท ตลอดจนประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์, ทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด และสรุป

บทที่ 3 ทฤษฎี Newton-Raphson Method, เทคนิคกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได และสรุป

บทที่ 4 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล, กรณีแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล และสรุป

บทที่ 5 การออกแบบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด การออกแบบวงจรกำลัง ,การออกแบบวงจรควบคุม ,การออกแบบโปรแกรม และสรุป

บทที่ 6 ผลการทดลอง กรณีแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล, กรณีแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล และสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง ผลการทดสอบ ,สรุป และข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.6.1 สามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

1.6.2 สามารถนำเอาทฤษฎี Newton-Raphson Method มาประยุกต์เทคนิคกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได

1.6.3 สามารถนำเอาเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) มาใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานทางด้านแหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

2.1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับทำให้สัญญาณแรงดันด้านเอาท์พุทมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิทช์ดังกล่าวทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ นอกจากนี้การแบ่งย่อยแรงจ่ายไฟตรงยังทำให้เหมาะต่อการต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์พลังงาน หรือแบตเตอรี่ เป็นต้น

อินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิด ดังนี้

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ [1]
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด Generalized
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

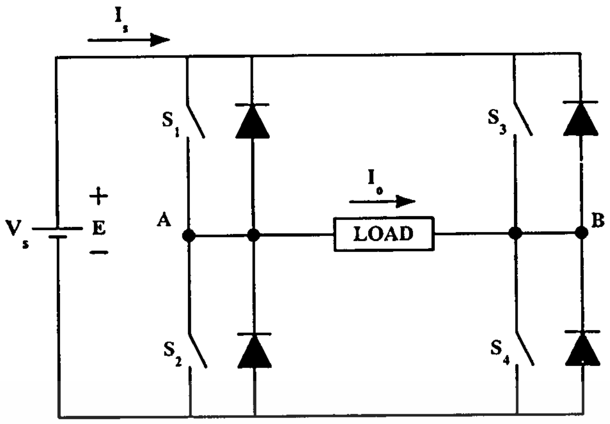
โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเท่านั้น ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์, สัญญาณเกทและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์, เวลาประวิง (เดดไทม์) ของสวิทช์, โครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด และการแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.2 อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (H-Bridge Inverter)

2.2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

จำนวนระดับขั้นแรงดันที่น้อยที่สุดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดใช้การคาสเคดด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแยกอิสระแหล่งจ่ายดีซี มีแค่ 3 ระดับขั้น นั่นคืออินเวอร์เตอร์หลายระดับจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 1 เซลล์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จะประกอบด้วย 4 สวิทซ์หลักและ 4 ฟรีวิลลิ่งไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 1 เซลล์

2.2.2 สัญญาณเกทและการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

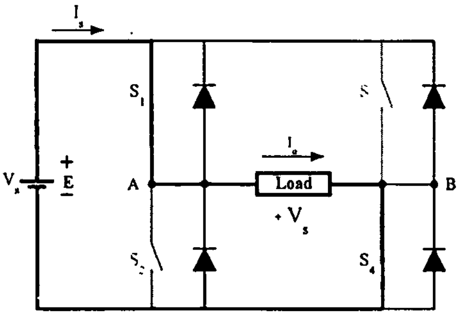
อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จะมีลักษณะการสวิทช์ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สามารถวิเคราะห์แรงดันที่ตกคร่อมจุด A และจุด B ได้เป็น 3 ระดับด้วยกันคือ $+E$, $-E$ และระดับศูนย์ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในรูปที่ 2.1 มีหลักการทำงานดังนี้คือ ถ้าสวิทช์ S_1 และ S_4 ทำงานพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นบวก และทางเดินของกระแสคือ I_O ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และถ้าสวิทช์ S_2 และ S_3 ทำงานพร้อมกันแรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ค)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

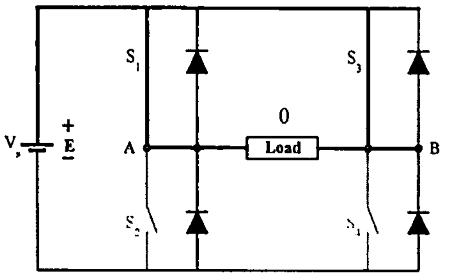
สวิทช์ที่นำกระแส	แรงดันเอาท์พุท V_{AB}
S_1, S_4	$+E$
S_2, S_3	$-E$
S_1, S_3 หรือ S_2, S_4	0

ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นศูนย์ สามารถเกิดได้ 2 กรณีคือ กรณีที่หนึ่ง สวิทช์ S_1 และ S_3 ทำงานพร้อมกัน ส่วน S_3 และ S_4 หยุดทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) กรณีที่สอง สวิทช์ S_2 และ S_4 ทำงานพร้อมกัน ส่วน S_1 และ S_3 หยุดทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ง)

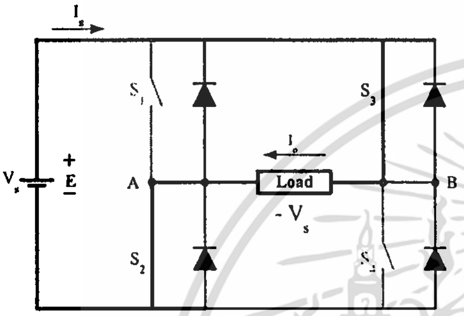
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



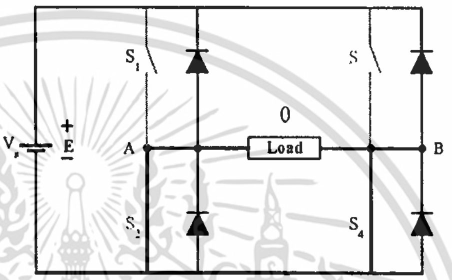
ก) สวิทช์ S_1 และ S_4 นำกระแส



ข) สวิทช์ S_1 และ S_3 นำกระแส



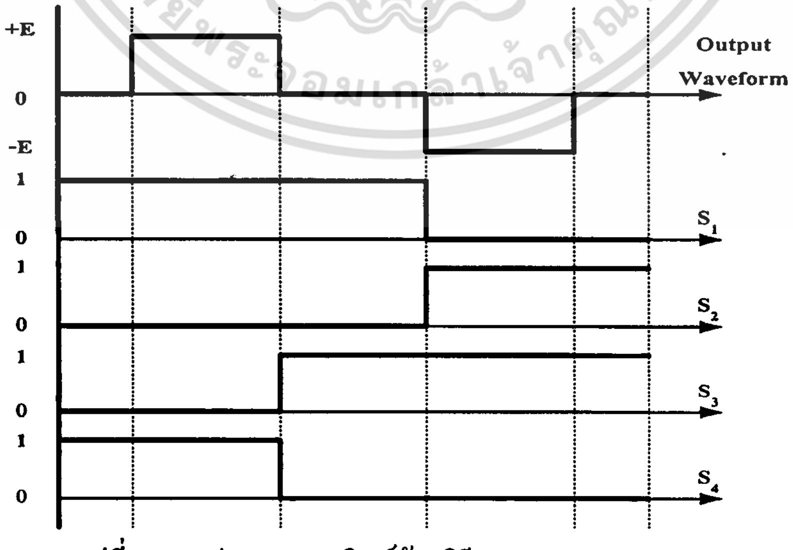
ค) สวิทช์ S_2 และ S_3 นำกระแส



ง) สวิทช์ S_2 และ S_4 นำกระแส

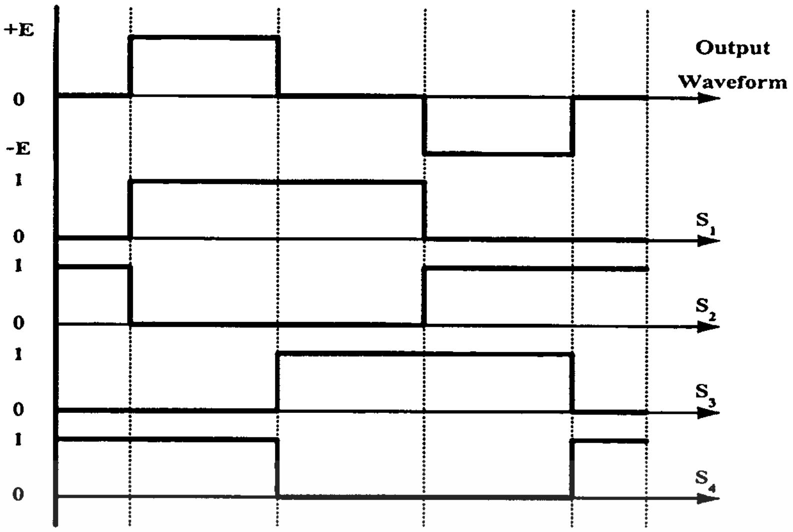
รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของสวิทช์ในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

สัญญาณเกทในรูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการสวิทช์ด้วยวิธี Repeated zero-level ด้วยวิธีนี้แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B ที่เป็นศูนย์ทั้งหมด เกิดจากสวิทช์ S_1 และ S_3 ทำงาน



รูปที่ 2.3 รูปแบบการสวิทช์ด้วยวิธี Repeated zero-level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



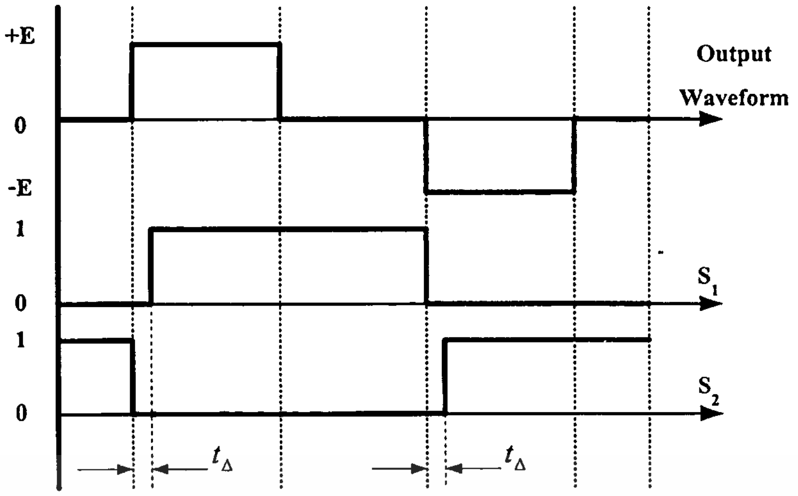
รูปที่ 2.4 รูปแบบการสวิทซ์ด้วยวิธี Swapped zero-level

เมื่อสัญญาณเกทมีระดับเป็น 1 แทนการทำงานของสวิทซ์ ส่วนเมื่อสัญญาณเกทมีระดับเป็น 0 แทนการหยุดทำงานของสวิทซ์ ซึ่งจากรูปที่ 2.3 พบว่าสวิทซ์ S_1 และ S_3 ทำงานมากกว่าสวิทซ์ S_2 และ S_4 ในแต่ละรอบ ของหนึ่งคาบเวลาการทำงาน เป็นผลให้สวิทซ์ S_1 และ S_3 ใช้กำลังงานและเกิดความร้อนมากกว่าสวิทซ์อีกสองตัว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงได้เสนอรูปแบบการสวิทซ์ด้วยวิธี Swapped zero-level ด้วยวิธีนี้แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B เป็นศูนย์ เกิดได้ 2 กรณี กรณีแรกสวิทซ์ S_1 และ S_2 ทำงาน กรณีที่สอง S_3 และ S_4 ทำงาน ด้วยวิธีนี้เวลาในการทำงานของสวิทซ์แต่ละตัวจะใช้เวลาเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปแบบการสวิทซ์แบบนี้จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

2.2.3 เวลาประวิง (Dead Time)

อีกส่วนหนึ่งที่ต้องสนใจสำหรับสัญญาณเกทคือ เวลาประวิง จากหัวข้อที่ 2.2.2 สวิทซ์ที่ใช้จะเป็นแบบอุดมคติ จึงยอมให้สวิทซ์ 2 ตัวในกิ่งเดียวกัน เปลี่ยนแปลงการทำงานแบบทันทีทันใดได้ในทิศทางที่กลับกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้น อุปกรณ์สวิทซ์จะต้องใช้เวลาส่วนหนึ่ง เพื่อทำให้เกิดการหยุดทำงานที่สมบูรณ์ ซึ่งอุปกรณ์สวิทซ์แต่ละประเภทจะใช้เวลาไม่เท่ากัน ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรจากคุณสมบัติดังกล่าวของสวิทซ์จึงจำเป็นต้องหน่วงเวลาด้วย เวลาประวิง, t_Δ ให้กับสวิทซ์ในกิ่งเดียวกันเมื่อทำงานกลับสถานะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงสัญญาณเกทของสวิทซ์ S_1 และ S_2 ในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เวลาประวิงในสัญญาณเกท

2.3 องค์ประกอบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

2.3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว

จากการวิเคราะห์รูปคลื่นหลายระดับนั้น เกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม ดังนั้นขนาดของแรงดันเฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดันเอาท์พุทของแต่ละเซลล์รวมกัน ซึ่งจำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$m = 2s + 1 \tag{2.1}$$

โดยที่ m คือ จำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

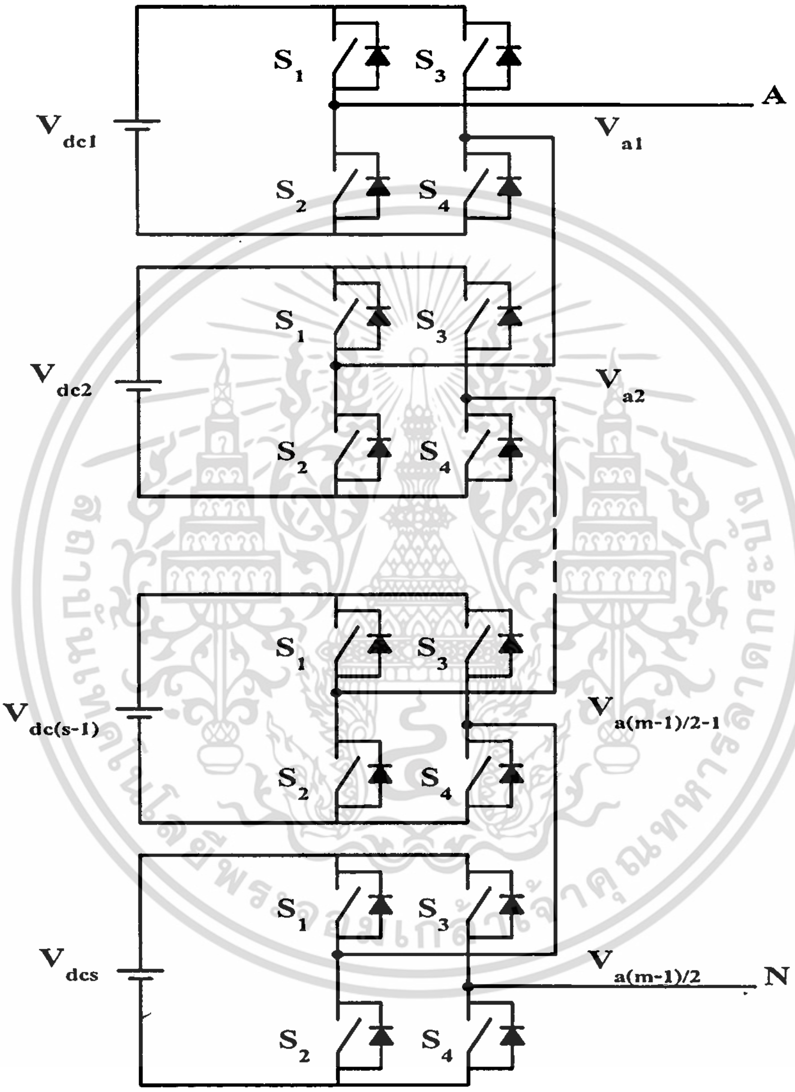
s คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ยกตัวอย่างเช่นถ้าต้องการรูปคลื่นแรงดันเฟส 11 ระดับ จะต้องใช้อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จำนวน 5 เซลล์ ในรูปที่ 2.6 จะแสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียวที่ m ระดับ ซึ่งแร่งดันเฟสเอาท์พุทก็คือ ผลรวมของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์สามรถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{AN} = V_{dc1} + V_{dc2} + \ldots + V_{dc(s-1)} + V_{dcs} \tag{2.2}$$

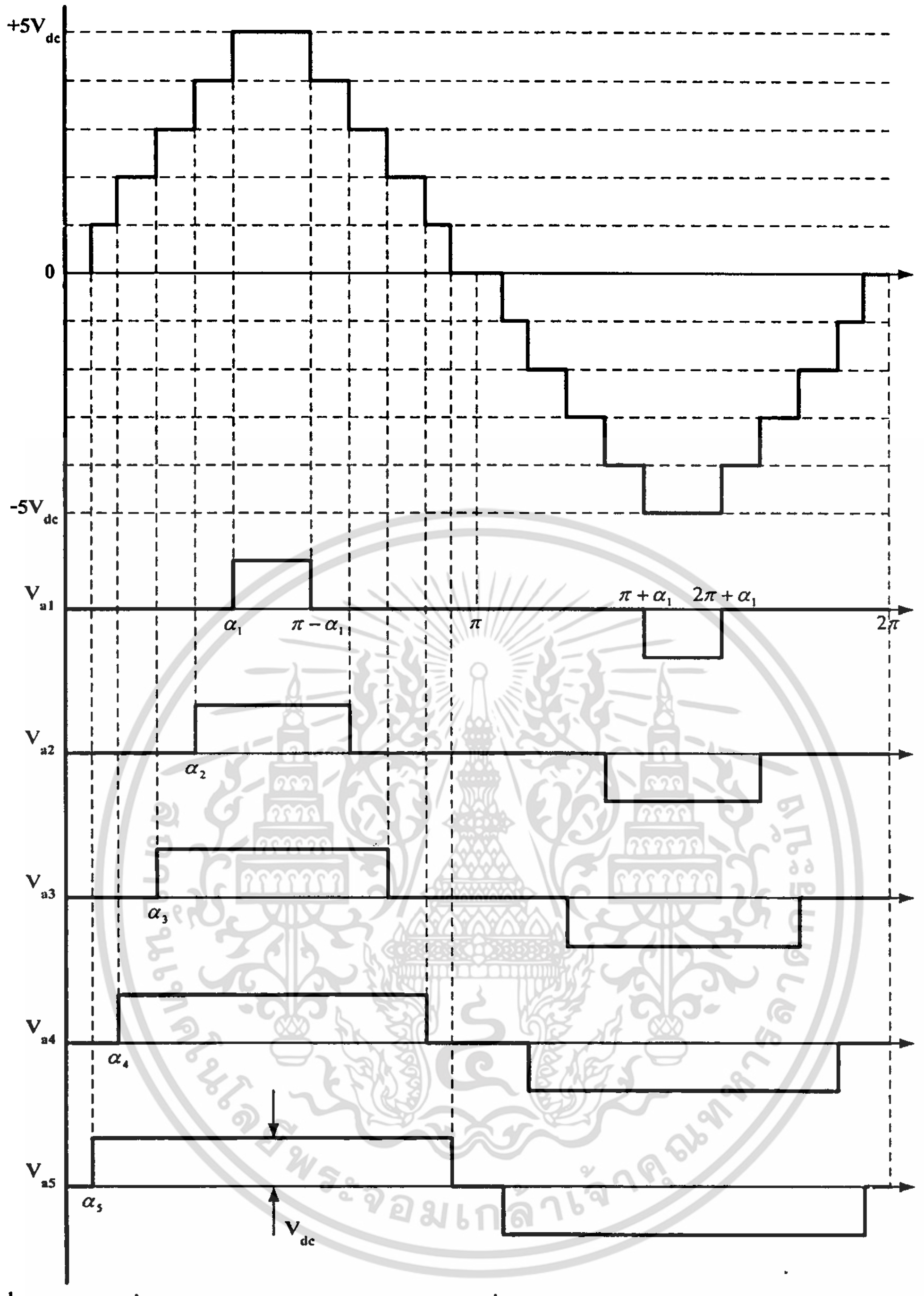
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกำหนดให้ระดับแรงดันที่ศูนย์ คือจุดร่วมของเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจำนวนระดับของแรงดันเอาท์พุทคือ 2s + 1 รูปที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟส ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด 11 ระดับ และรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์โดยกำหนดให้แรงดันไฟตรงแต่ละเซลล์ มีขนาดเท่ากัน $V_{dc1} = V_{dc2} = \ldots = V_{dc(s-1)} = V_{dcs} = V_{dc}$



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

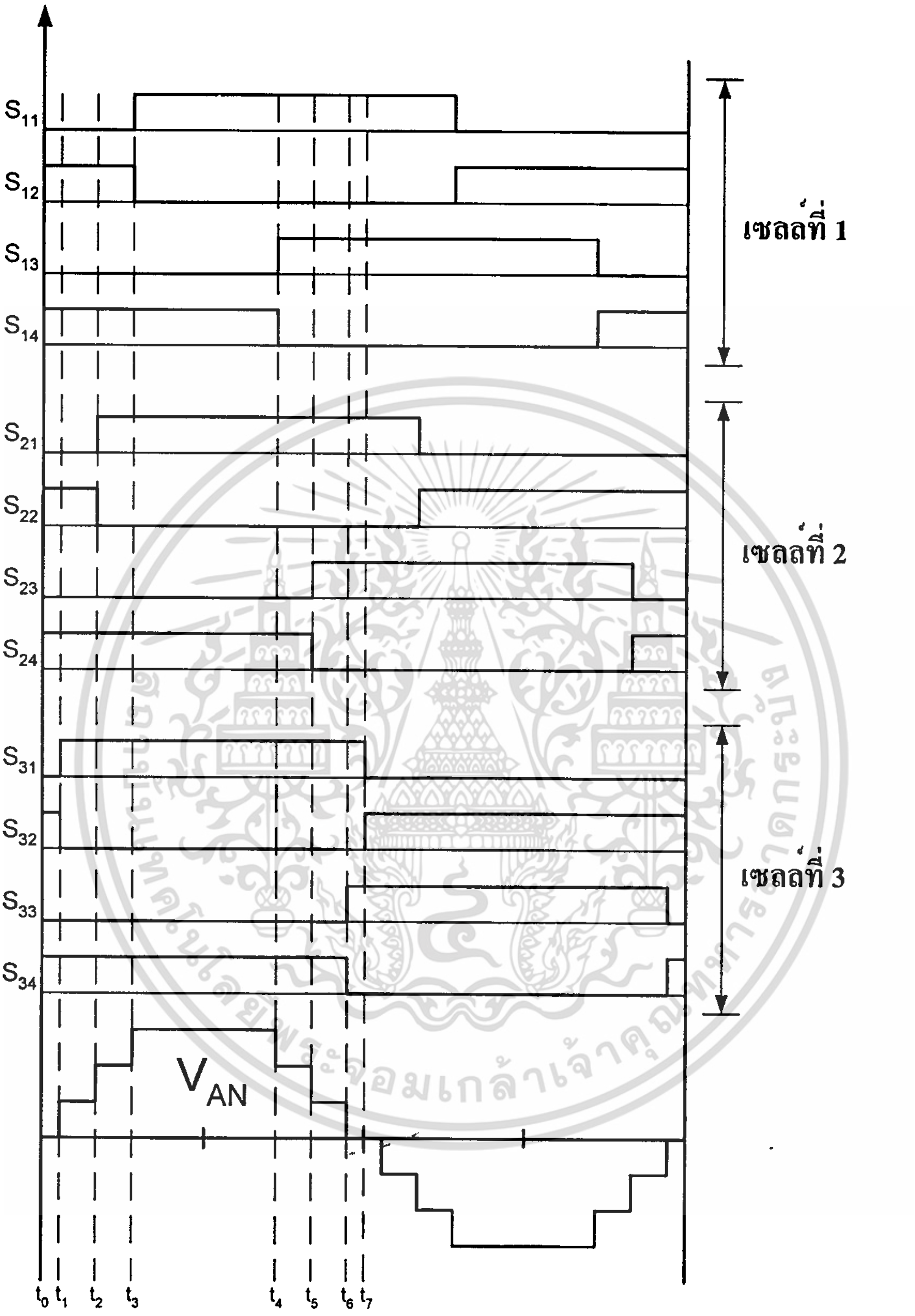


รูปที่ 2.7 รูปคลื่นแรงดันเฟส 11 ระดับ และรูปคลื่นเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์

รูปคลื่นเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ดังในรูปที่ 2.7 มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และรูปคลื่นเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ เป็นลักษณะ ควอเตอร์สมมาตร (Quarter-Symmetries) ทำให้ไม่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกส์ความถี่เลขคี่ และยังสามารถลดค่าของ THD ได้ด้วยการหามุมสวิทช์จากการคำนวณแบบนิวเมอริคอล ซึ่งจะอธิบายในบทต่อไป

ซึ่งรูปแบบการควบคุมการสวิทช์และหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8

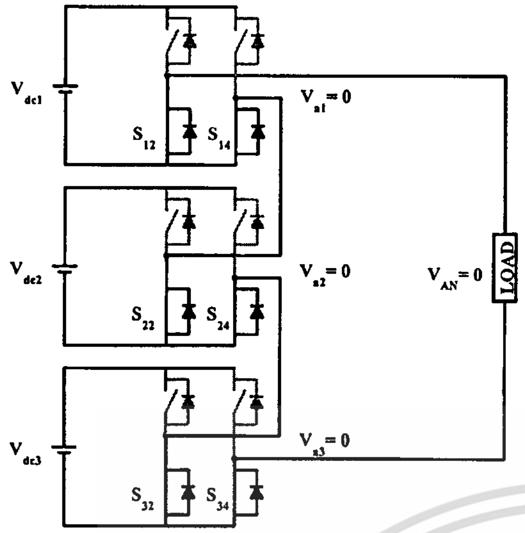
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



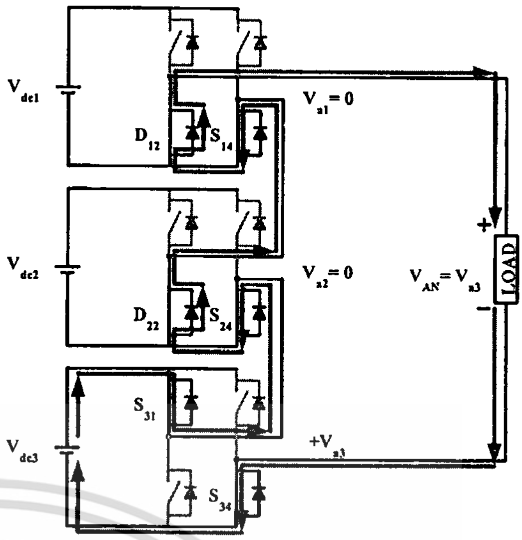
รูปที่ 2.8 รูปแบบการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากรูปที่ 2.8 สามรถแบ่งโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดได้เป็น 6 โหมดการทำงานด้วยกัน และสามารถอธิบายการทำงานของสวิทช์ได้ดังนี้

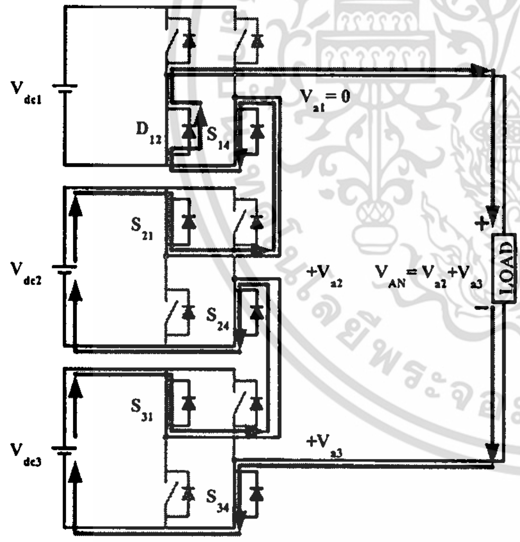
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



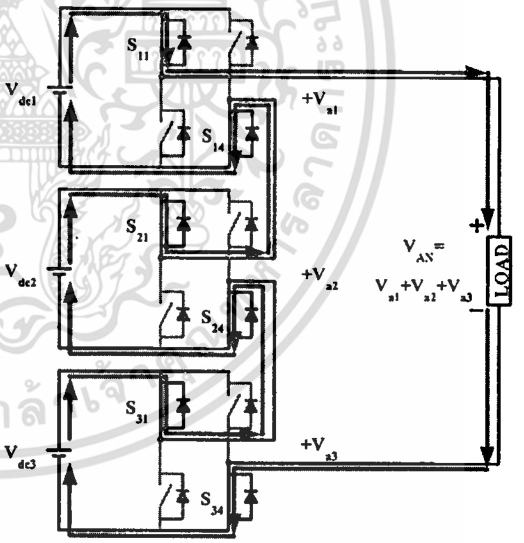
(ก) โหมด 0



(ข) โหมด 1



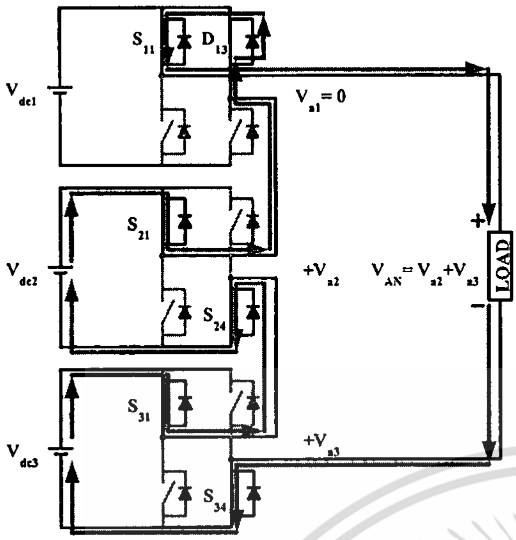
(ค) โหมด 2



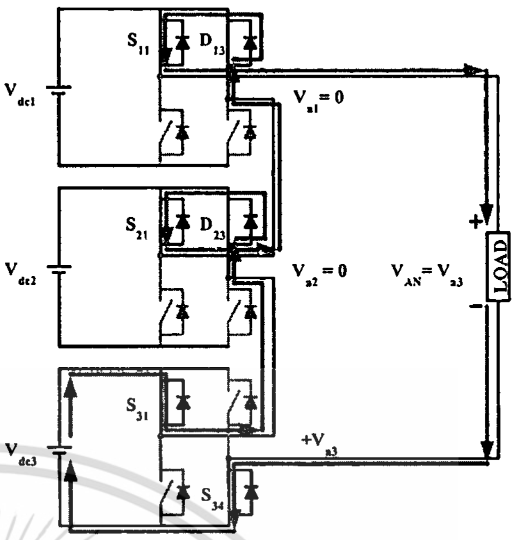
(ง) โหมด 3

รูปที่ 2.9 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

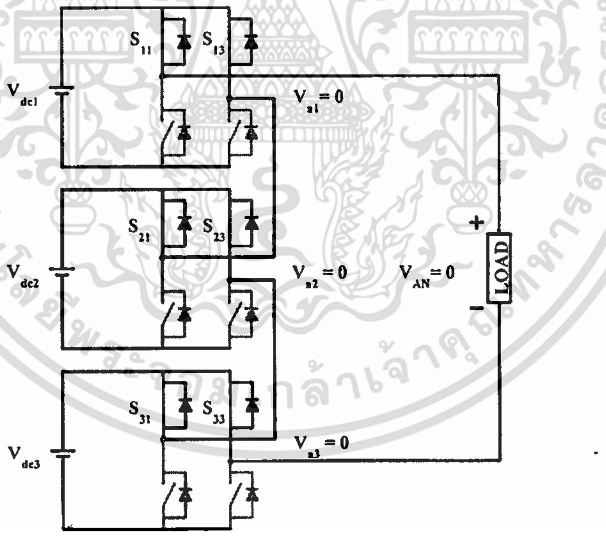
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โหมด 4



(ฉ) โหมด 5



(ช) โหมด 6

รูปที่ 2.9 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mode 0 (t_0-t_1) : ที่เวลา t_0 สวิทช์ S_{12} , S_{14} , S_{22} , S_{24} , S_{32} และ S_{34} ของอินเวอร์เตอร์นำกระแส ทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสที่โหลด แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจึงเท่ากับศูนย์ $V_{AN} = 0$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_1

Mode 1 (t_1-t_2) : ที่เวลา t_1 จะมีสวิทช์ S_{12} , S_{14} , S_{22} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิทช์ S_{31} , S_{24} , ไดโอดของสวิทช์ S_{22} , S_{14} , ไดโอดของสวิทช์ S_{12} เข้าโหลดผ่านสวิทช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = +V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_2

Mode 2 (t_2-t_3) : ที่เวลา t_2 จะมีสวิทช์ S_{12} , S_{14} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิทช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_{dc2} , S_{21} , S_{14} , ไดโอดของสวิทช์ S_{12} เข้าโหลดผ่านสวิทช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_3

Mode 3 (t_3-t_4) : ที่เวลา t_3 จะมีสวิทช์ S_{11} , S_{14} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิทช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_2 , S_{21} , S_{14} , เข้าขั้วลบของ V_1 , S_{11} , เข้าโหลดผ่านสวิทช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_4

Mode 4 (t_4-t_5) : ที่เวลา t_4 จะมีสวิทช์ S_{11} , S_{13} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิทช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_{dc2} , S_{21} , S_{14} , ไดโอดของสวิทช์ S_{13} เข้าโหลดผ่านสวิทช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_5

Mode 5 (t_5-t_6) : ที่เวลา t_5 จะมีสวิทช์ S_{11} , S_{13} , S_{22} , S_{23} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิทช์ S_{31} , ไดโอดของสวิทช์ S_{23} , สวิทช์ S_{21} , ไดโอดของสวิทช์ S_{13} , สวิทช์ S_{11} เข้าโหลดผ่านสวิทช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = +V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_6

Mode 6 (t_6-t_7) : ที่เวลา t_6 สวิทช์ S_{11} , S_{13} , S_{21} , S_{23} , S_{31} และ S_{33} ของอินเวอร์เตอร์นำกระแส ทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสที่โหลด แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจึงเท่ากับศูนย์ $V_{AN} = 0$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_7 ที่เวลานี้จะทำให้แรงดันเฟส V_{AN} ที่ตกคร่อมโหลดครบครึ่งไซเคิลบวก ส่วนในครึ่งไซเคิลลบ ก็จะมีลักษณะการการทำงานที่คล้ายคลึงกันกับครึ่งไซเคิลบวก เพียงแต่ทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกัน

จากหลักการทำงานข้างต้นสามารถสรุปสภาวะการสวิทช์ในหนึ่งคาบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์ได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สภาวะการสวิทช์ในหนึ่งคาบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์

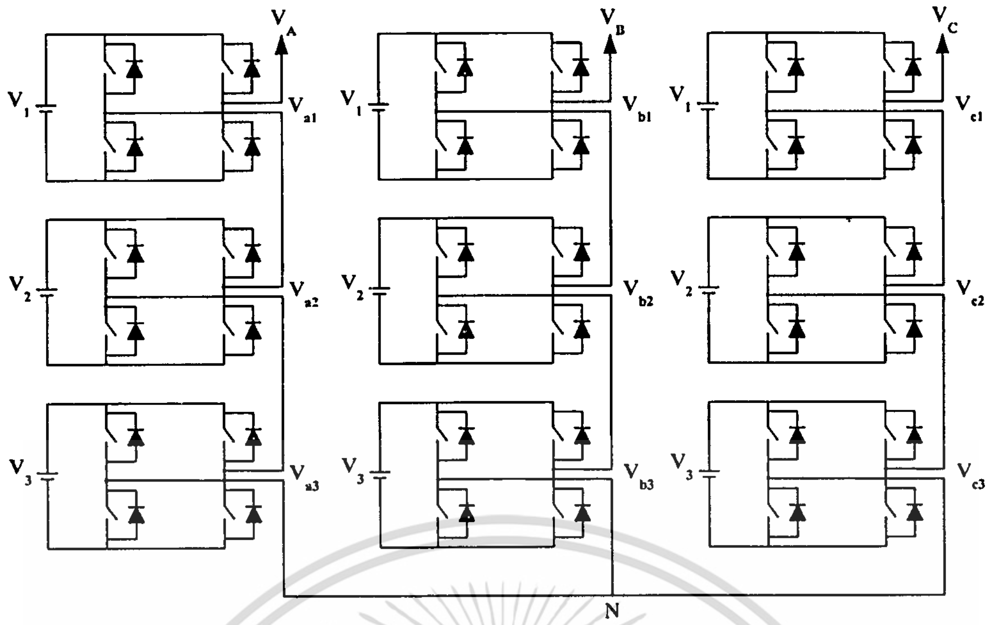
เซลล์ที่ 1				เซลล์ที่ 2				เซลล์ที่ 3				ขนาดแรงดันเฟสเอาท์พุท
S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	$3V_{dc}$
0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	$2V_{dc}$
1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	V_{dc}
1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	$-V_{dc}$
1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	
0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	
0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	$-2V_{dc}$
1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	$-3V_{dc}$

2.3.2 โครงสร้างคาสเคดอินเวอร์เตอร์สามเฟส

สำหรับระบบสามเฟสเกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว 3 ชุด ต่อกันในลักษณะเดลต้าหรือสตาร์ (วาย Y) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นโครงสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดสามเฟส ต่อกันแบบสตาร์ (วาย Y) ซึ่งเกิดจากอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว มาต่อกันในลักษณะสตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากรูปที่ 2.16 คือแรงดันของเฟส A เกิดจากผลรวมของแรงดัน V_{a1}, V_{a2} และ V_{a3} เป็นเช่นเดียวกันในเฟส B และเฟส C เพียงแต่จะมีองศาทางไฟฟ้าต่างกันคือ 0, 120 และ 240 ในเฟส A, เฟส B และเฟส C ตามลำดับ ตามทฤษฎีของระบบสามเฟส พบว่าแรงดันไลน์อธิบายได้ด้วยสองแรงดันเฟส ยกตัวอย่างเช่น ความต่างศักย์ระหว่างเฟส A และเฟส B คือแรงดันไลน์ V_{AB} สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \tag{2.3}$$

โดยที่ V_{AB} คือ แรงดันไลน์

V_{AN} คือ แรงดันเฟส A เทียบกับจุด N

V_{BN} คือ แรงดันเฟส B เทียบกับจุด N

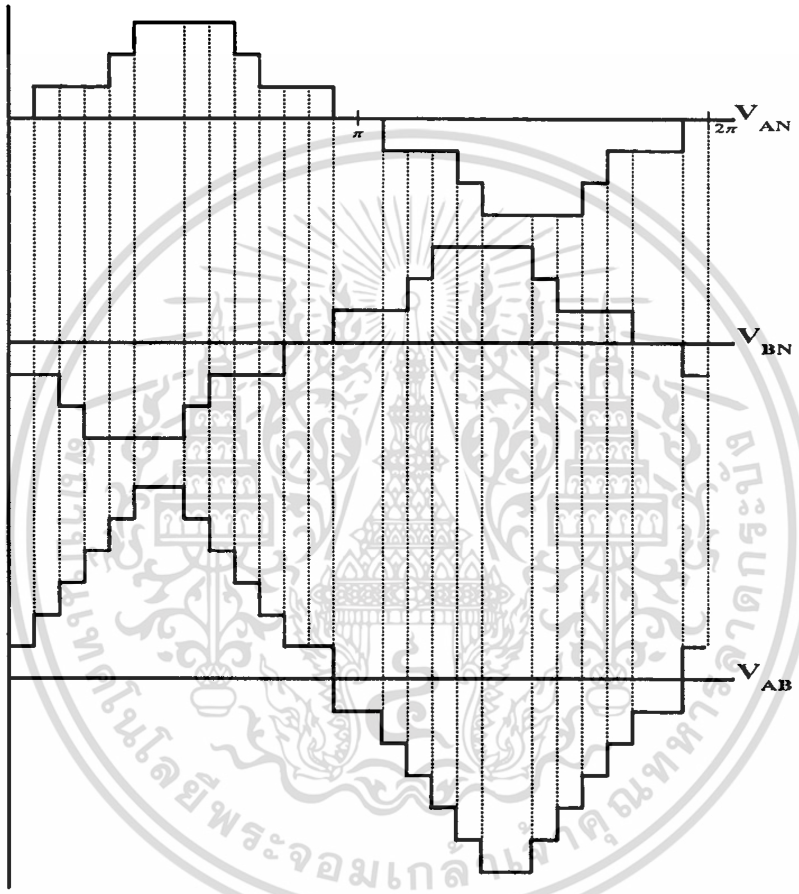
ในระบบสามเฟส จำนวนระดับขั้นที่มากที่สุดของแรงดันไลน์หาได้จาก $2m-1$ โดยที่ m คือ จำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟส ซึ่งจำนวนระดับขั้นของแรงดันไลน์นั้นจะขึ้นอยู่กับ ดัชนีมอดูเลชั่นและความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่ถูกกำจัด เช่น ถ้าใช้อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ก็จะได้แรงดันไลน์ 13 ระดับ ข้อดีของระบบสามเฟสก็คือ สามารถที่จะกำจัดฮาร์มอนิกส์เลขคี่ ที่เป็นผลคูณของเลขสาม (Triples Harmonic) ในแรงดันไลน์ ของแต่ละเฟสจะมีขนาดและเฟสตรงกันทุกประการดังนั้นในแรงดันไลน์จะหักล้างกันหมด ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดกับฮาร์มอนิกส์ ที่เป็นผลคูณของเลข 3 ด้วย เช่น 6, 9, 12 เป็นต้น ดังนั้นจึงมีเพียงฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เป็นผลคูณของเลข 3 ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

67444

ต้องการกำจัดออกจากแรงดันเฟส เปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนดังนี้ ถ้าเป็นรูปคลื่น 9 ระดับขั้นเฟสเดียว ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ต้องกำจัดคือ ฮาร์มอนิกส์ที่ 3, 5 และ7 ส่วนในรูปคลื่น 9 ระดับขั้นสามเฟส ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ต้องกำจัดคือ ฮาร์มอนิกส์ที่ 5, 7 และ 11 ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดในระบบสามเฟสนั่นเอง

จากรูปที่ 2.11 แสดงแรงดันเอาท์พุทของเฟส A, V_{AN} แรงดันเอาท์พุทของเฟส B, V_{BN} และรูปคลื่นแรงดันไลน์ V_{AB} ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด



รูปที่ 2.11 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของแคสเคดอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ 3 เฟส

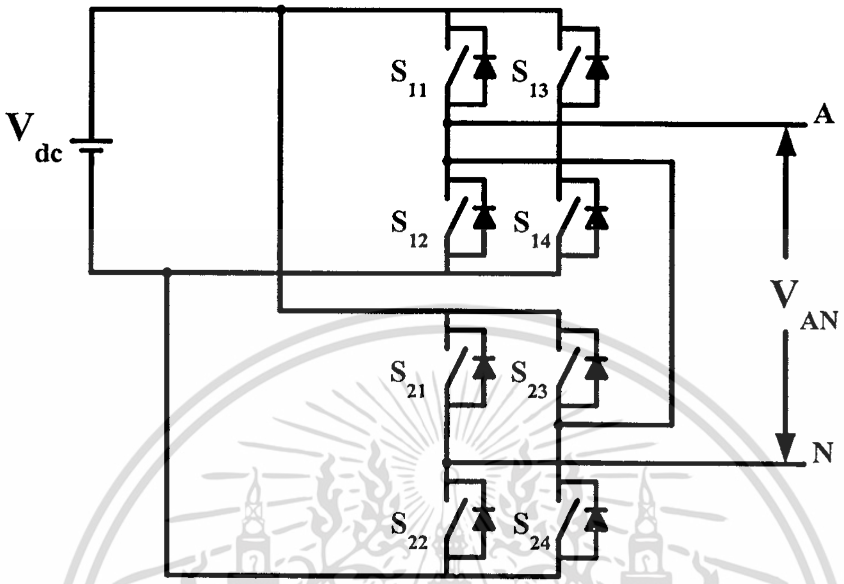
จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าแรงดันเฟส B ล้าหลังแรงดันเฟส A อยู่ 120 องศา และแรงดันไลน์นำหน้าแรงดันเฟส A อยู่ 30 องศา ซึ่งได้ตรงตามทฤษฎีของระบบไฟฟ้าสามเฟส

2.3.3 การแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Separated DC Sources SDCSs)

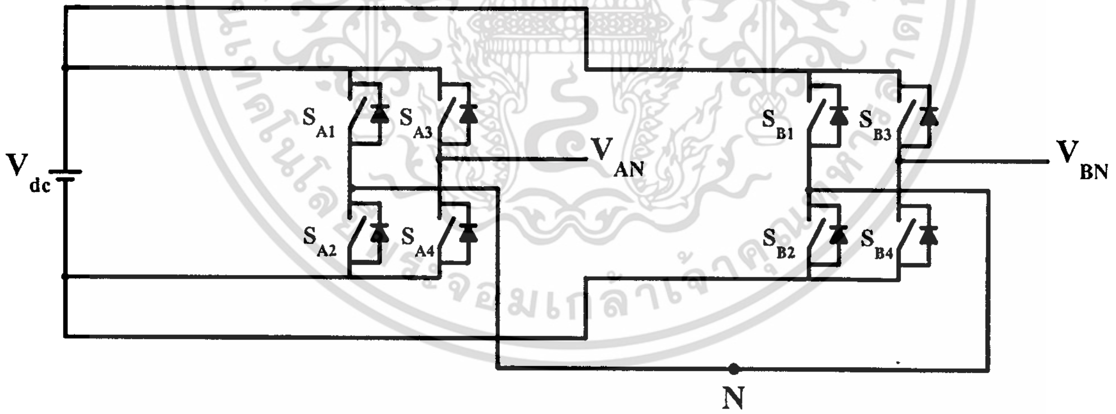
เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถูกนำมาใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายว่าเหตุใด อินเวอร์เตอร์ชนิดแคสเคดจึงต้องใช้การแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (SDCSs) ในการอธิบายจะแบ่งการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็น 2 กรณี กรณีแรก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตัวเดียวจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวเซลล์ในเฟส เดียวกัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12 (ก) ส่วนในกรณีที่สอง แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตัวเดียวจ่ายให้แต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข)



(ก)

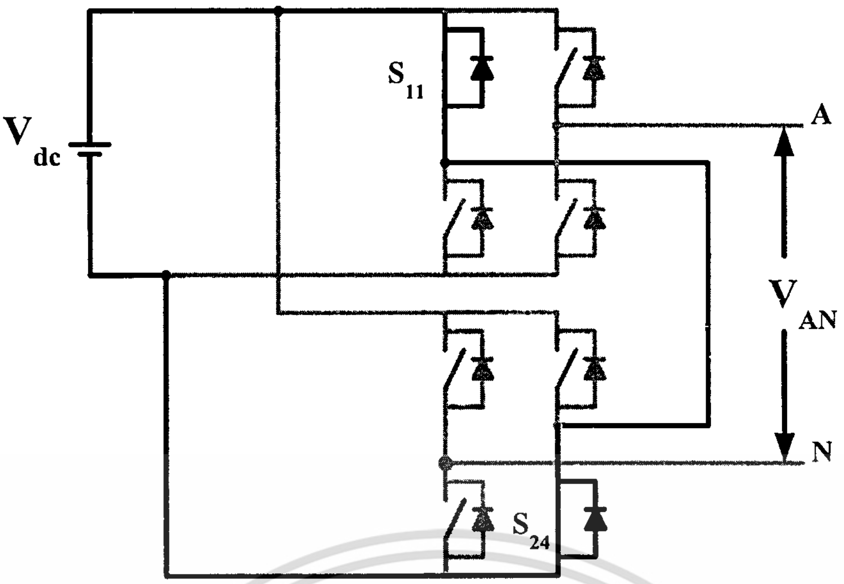


(ข)

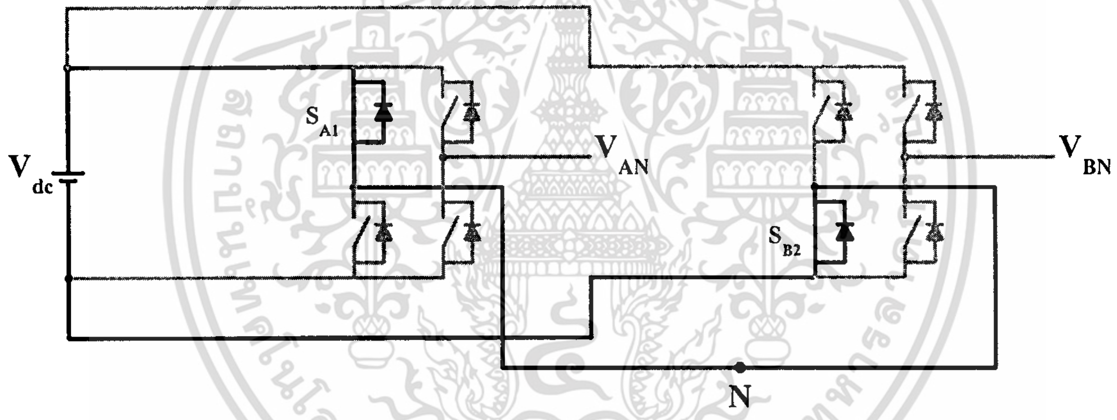
รูปที่ 2.12 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในกรณีแรกเมื่อต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดันในรูปที่ 2.12 (ก) จะเกิดการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเมื่อสวิทช์ S_{11} และ S_{24} ทำงานพร้อมกันดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 (ก) และเมื่อต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่สอง ที่แสดงในรูป 2.12 (ข) จะเกิดลัดวงจรขึ้นเมื่อสวิทช์ S_{A1} และ S_{B2} ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 การลัดวงจรของการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.4 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ หลักการทำงาน ลักษณะของสัญญาณขับเกทที่ช่วยลดปัญหา การสะสมความร้อนภายในอุปกรณ์สวิทช์ ที่เกิดจากช่วงเวลาการนำกระแสที่ไม่เท่ากัน และยังได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ หลักการทำงาน และการเลือกการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการหาค่าของมุมสวิทชิ่ง เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ โดยจะกล่าวถึงการวิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์, การหาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีนิวตัน-ราปสันเพื่อหาค่าคำตอบของมุมสวิทชิ่ง, ตัวอย่างของการหาค่ามุมสวิทชิ่งของเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขันบันไดโดยทฤษฎีนิวตัน-ราปสัน, และเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation)

3.2 วิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์ [8]

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะใช้สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ในรูปที่ 3.1 เป็นรูปคลื่นหลายระดับจากคาสเคดอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสมมุติมีลักษณะเป็น ฟังก์ชันรายคาบแบบ ควอเตอร์ซิมเมทรี ซึ่งจะมีมุมสวิทช์ในแต่ละระดับขั้นของรูปคลื่นอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ในควอเตอร์ที่ 2

$$\alpha_{s+1} = \pi - \alpha_s$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{2s+1} = \pi - \alpha_2$$

$$\alpha_{2s} = \pi - \alpha_1$$

ในควอเตอร์ที่ 3

$$\alpha_{2s+1} = \pi - \alpha_1$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{3s+1} = \pi - \alpha_{s-1}$$

$$\alpha_{3s} = \pi - \alpha_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

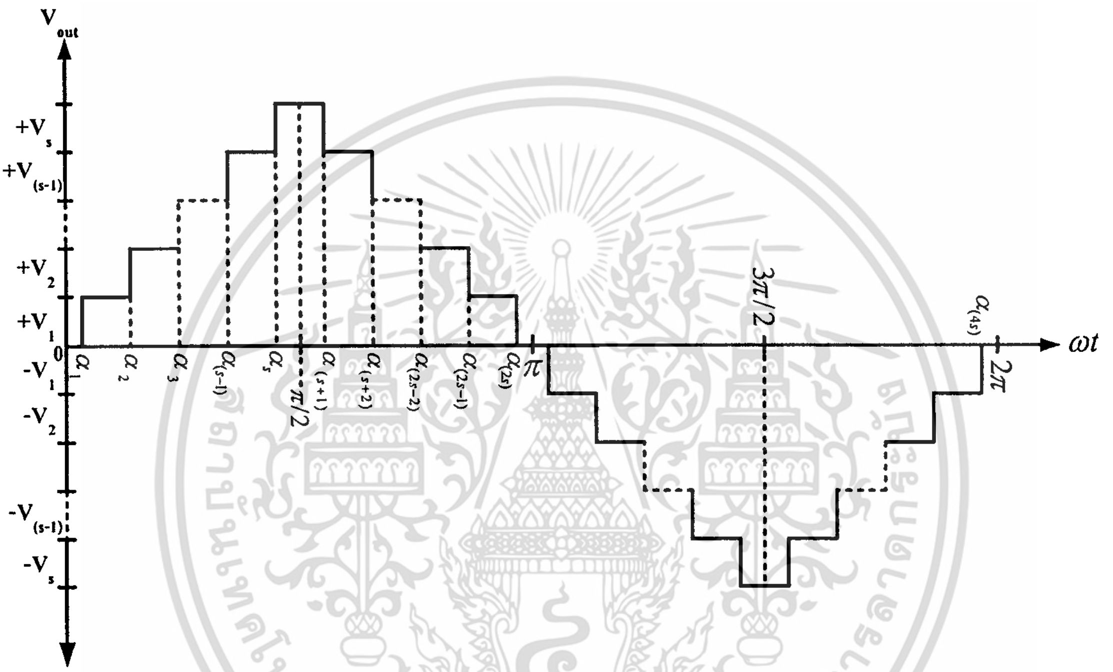
ในควอเตอร์ที่ 4

$$\alpha_{3s+1} = 2\pi - \alpha_s$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{4s+1} = 2\pi - \alpha_2$$

$$\alpha_{4s} = 2\pi - \alpha_1 \quad (3.1)$$

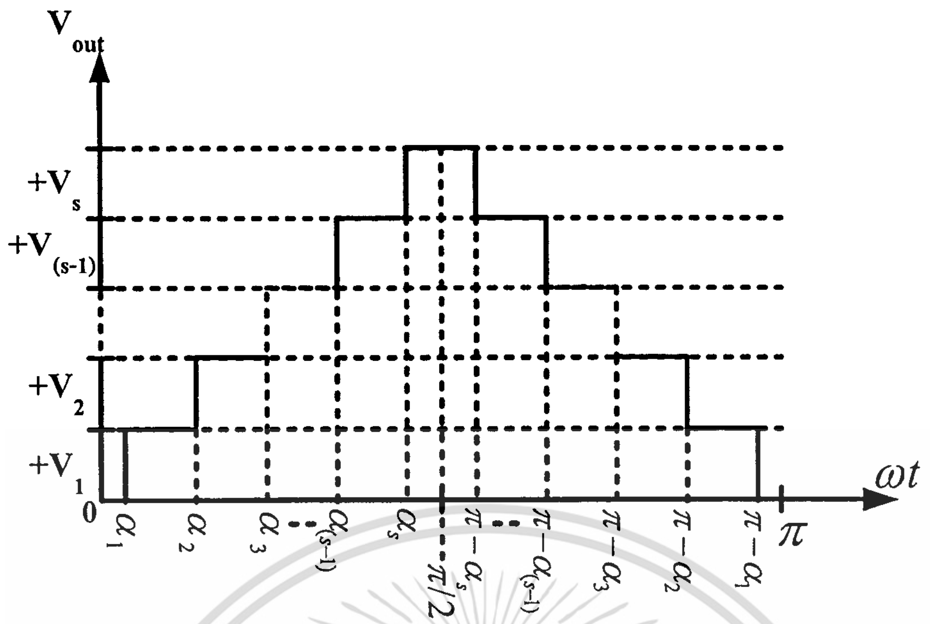


รูปที่ 3.1 รูปคลื่นเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์แคสเคดที่ s เอชบริดจ์เซลล์

จากรูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นครึ่งไซเคิลของรูปรายคาบแบบควอเตอร์สมมาตร ซึ่งจากรูป แรงดันเอาท์พุทที่ระดับศูนย์เริ่มจาก $\omega t = 0$ ถึง $\omega t = \alpha_1$ และที่ $\omega t = \alpha_1$ แรงดันเอาท์พุทจะเปลี่ยนจากศูนย์เป็น $+V_1$ และเปลี่ยน $+V_1$ เป็น $+(V_1 + V_2)$ ที่ $\omega t = \alpha_1$ และเป็นลักษณะเช่นนี้จนกระทั่ง $\omega t = \pi/2$ ระดับของแรงดันเอาท์พุทจะได้ $+V_1 + V_2 \ldots + V_{(s-1)} + V_s$ จากนั้นในควอเตอร์ที่ 2 ระดับของแรงดันเอาท์พุทจะลดลงเป็น $+V_1 + V_2 \ldots + V_{(s-1)}$ ที่ $\omega t = \pi - \alpha_s$ และก็จะเป็นลักษณะเช่นนี้จนกระทั่ง $\omega t = \pi - \alpha_1$ แรงดันเอาท์พุทจะกลับมาเป็นศูนย์อีกครั้ง

ส่วนในครึ่งไซเคิลหลัง (ครึ่งลบ) มีขั้นตอนของรูปคลื่นเช่นเดียวกันแต่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ และเหมือนกันในคาบต่อๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นหลายระดับที่ s เอชบริดจ์เซลล์

ดังนั้นในรูปที่ 3.3 จะแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นมีคุณลักษณะเป็นฟังก์ชันคี่ จึงทำให้สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์เขียนแทนได้ดังนี้

$$b_n = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\omega t)\sin(n\omega t)d(\omega t) \tag{3.2}$$

เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มคี่

$$b_n = 0 \tag{3.3}$$

เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มคู่

และ

$$a_n = 0 \tag{3.4}$$

ทุกๆ ค่าของ n

โดยที่

$$f(\omega t) = V_{out}(\omega t) \tag{3.5}$$

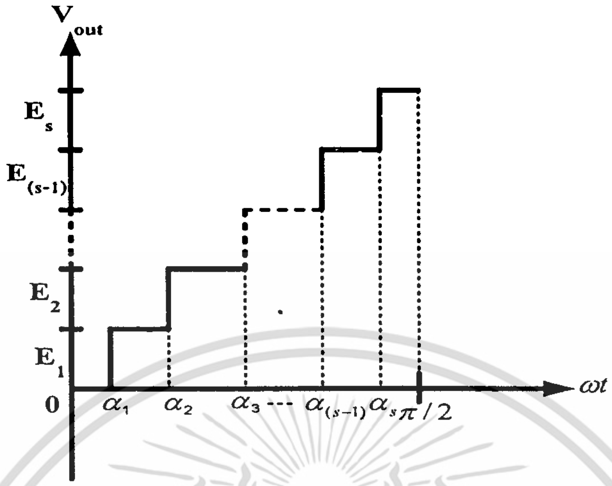
ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 ถึง 3.4 เขียนเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \tag{3.6}$$

และสมการที่ 3.2 กำหนดให้ $\alpha = \omega t$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\alpha)\sin(n\omega t)d(\alpha) \tag{3.7}$$



รูปที่ **3.3** ควอเตอร์แรกของรูปคลื่นในหนึ่งคาบแบบควอเตอร์สมมาตร

สมการที่ 3.7 และรูปที่ 3.3 เขียนได้เป็น

$$b_n = \frac{4}{\pi}\left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E_1 \sin(n\alpha)d\alpha + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} E_2 \sin(n\alpha)d\alpha + \ldots + \int_{\alpha s}^{\frac{\pi}{2}} E_s \sin(n\alpha)d\alpha\right] \tag{3.8}$$

$\because \quad V_1 = E_1$

$V_2 = E_2$

$\vdots$

$V_s = E_s - E_{(s-1)}$

ดังนั้น

$$b_n = \frac{4}{n\pi}\left[V_1\cos(n\alpha_1) + V_2\cos(n\alpha_2) + \ldots + V_s\cos(n\alpha_3)\right] \tag{3.9}$$

และ $V_1 = V_2 = \ldots = V_s = E$

เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{4E}{n\pi}\left[\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \ldots + \cos(n\alpha_s)\right] \tag{3.10}$$

หรือ

$$b_n = \frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k) \tag{3.11}$$

สุดท้ายอนุกรมฟูเรียร์ของรูปคลื่นหลายระดับที่ s เอชบริดจ์เซลล์เขียนได้ดังนี้

$$v_{out}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k)\right]\sin(n\omega t) \tag{3.12}$$

α_k คือ มุมสวิทชิ่ง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของ

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \ldots\ldots < \alpha_s < \frac{\pi}{2}$$

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว

n คือ อันดับฮาร์มอนิกส์เลขคี่

s คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่เซลล์ต่อเฟส

3.3 การวิเคราะห์หามุมสวิทชิ่งเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาค่ามุมสวิทช์ เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำที่ต้องการซึ่งจาก สมการที่ 3.11 และ 3.12 ส่วนประกอบของฮาร์มอนิกส์จากรูปคลื่นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขนาดของส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับศูนย์ (DC Component)
2. ขนาดของความถี่มูลฐาน, n = 1 และขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ n เลขคี่ได้เป็น

$$h_1 = \frac{4E}{\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(\alpha_k) \text{ และ } h_n = \frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k) \tag{3.13}$$

โดยที่ s คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่เซลล์ต่อเฟส

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว

α_k คือ มุมสวิทชิ่ง

n คือ อันดับฮาร์มอนิกส์เลขคี่

3. ขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ n เป็นจำนวนเต็มคู่ เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงมีเฉพาะฮาร์มอนิกส์เลขคี่เท่านั้นที่จะต้องกำจัดออกจากรูปคลื่นหลายระดับ ซึ่งมุมสวิทช์ของรูปคลื่นจะถูกปรับทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ THD (Total Harmonics Distortion) ของแรงดันเอาท์พุทลดลง

จากรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 3.1 มุมสวิทช์ $\alpha_1,\alpha_2,\ldots,$ และ α_s คือค่าที่ต้องการหาคำตอบ โดยการแก้สมการจำนวน s สมการ ซึ่งได้มาจากสมการที่ 3.13 สมการที่ได้เหล่านี้จะเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear equation) และสมการมีคำตอบได้หลายค่า ในทางปฏิบัติจะสามารถหาค่าของคำตอบโดยวิธีนิวเมอริคอล ซึ่งวิธีของนิวตัน- ราปสัน ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการหาค่าคำตอบของสมการ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำวิธีการของนิวตัน- ราปสัน มาใช้หาคำตอบในระบบสมการไม่เชิงเส้นนี้

3.3.1 ทฤษฎีนิวตัน-ราปสัน

วิธีนิวตัน-ราปสัน เป็นวิธีการคำนวณรากของสมการด้วยวิธีการประมาณค่า ซึ่งเหมาะสำหรับที่จะสร้างโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ เพื่อหาคำตอบ

สมการไม่เชิงเส้นที่มีตัวแปรจำนวน s ตัว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1(\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_s) &= k_1 \\ f_2(\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_s) &= k_2 \\ &\vdots \\ f_s(\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_s) &= k_s \end{aligned} \tag{3.14}$$

สมการที่ 3.14 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวคเตอร์ได้ดังนี้

$$F(\alpha) = K \tag{3.15}$$

โดยที่

$$F = [f_1, f_2, \ldots, f_s]^T$$

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_s]^T$$

$$K = [k_1, k_2, \ldots, k_s]^T$$

และ F,α,K คือ $s\times 1$ เมตริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสมการไม่เชิงเส้น (Non-Linear) สามารถหาคำตอบได้ โดยใช้เทคนิค ลิเนียไรเซชั่น (Linearization) นั่นคือการทำสมการไม่เชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้น ด้วยการแทนค่าโดยประมาณผลลัพธ์ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) ประมาณค่าเริ่มต้นของ α เมื่อ $j = 0$

$$\alpha^j = \left[\alpha_1^j, \alpha_2^j, \ldots, \alpha_s^j\right]^T \tag{3.16}$$

2) คำนวณหาค่าของ

$$F(\alpha^j) = F^j \tag{3.17}$$

3) ทำสมการที่ 3.15 เป็นสมการเชิงเส้นโดยแทนค่าด้วย α^j

$$F^j + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j d\alpha^j = K \tag{3.18}$$

โดยที่

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_s} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_s}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_s}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial f_s}{\partial \alpha_s} \end{bmatrix}$$

และ

$$d\alpha^j = \left[d\alpha_1^j \quad d\alpha_2^j \quad \cdots \quad d\alpha_s^j\right]^T$$

4) คำนวณค่าของ $d\alpha^j$ จากสมการที่ 3.18

$$d\alpha^j = INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j (K - F^j) \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j$ เป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์ $\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j$

5) ประมาณค่าเริ่มต้นใหม่โดยให้

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j \tag{3.20}$$

6) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าละเอียดตามต้องการ

3.3.2 การหาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นโดยทฤษฎีนิวตัน-ราปสัน

ขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่เลขคี่ ของรูปคลื่นหลายระดับ เขียนอีกครั้งได้เป็น

$$h_n = \frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k)\ ,\ n = 3,5,7,\ldots \tag{3.21}$$

ดังนั้น กลุ่มของสมการไม่เชิงเส้นตามสมการที่ 3.24 สามารถเขียนได้ดัง

1. สมการไม่เชิงเส้นของความถี่มูลฐาน

$$\frac{4E}{\pi}\left[\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \ldots + \cos(\alpha_s)\right] = h_1 \tag{3.22}$$

2. สมการไม่เชิงเส้นของฮาร์มอนิกส์เลขคี่

$$\frac{4E}{3\pi}\left[\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \ldots + \cos(3\alpha_s)\right] = h_3 \tag{3.23}$$

$$\frac{4E}{5\pi}\left[\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \ldots + \cos(5\alpha_s)\right] = h_5 \tag{3.24}$$

$$\vdots$$

$$\frac{4E}{n\pi}\left[\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \ldots + \cos(n\alpha_s)\right] = h_n \tag{3.25}$$

สำหรับรูปคลื่นเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ s เซลล์ มีมุมสวิทช์ที่ต้องการทราบค่าอยู่ s มุม คือ $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_s$ ซึ่งจะจัดให้อยู่ในรูปสมการ s สมการ เพื่อหาคำตอบของมุมสวิทช์ แต่มีเงื่อนไขว่า มุมสวิทช์ทั้งหมดต้องมีค่าน้อยกว่า $\frac{\pi}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.22 คือสมการไม่เชิงเส้นของความถี่มูลฐานของรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุท ส่วนสมการที่ 3.23, 3.24, 3.25 คือสมการไม่เชิงเส้นของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ลำดับที่ 5 และลำดับที่ n เลขคี่ของแรงดันเอาท์พุทตามลำดับ และทางด้านขวามือของสมการคือขนาดของฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ซึ่งสามารถควบคุมได้

การควบคุมขนาดของความถี่มูลฐาน พิจารณาให้อยู่ในรูปของดัชนีมอดูเลชั่น ได้ดังสมการ

$$M = \frac{h_1}{sE} \tag{3.26}$$

h_1 คือ ขนาดของค่าความถี่มูลฐาน
s คือ จำนวนแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่เซลล์ต่อเฟส

จากสมการที่ 3.22 และ 3.26 เขียนได้ใหม่เป็น

$$\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \ldots + \cos(\alpha_s) = \frac{sM\pi}{4} \tag{3.27}$$

สมการที่ 3.27 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของดัชนีมอดูเลชั่นถือเป็นการควบคุมขนาดของความถี่มูลฐาน ส่วนสมการที่เหลือ เป็นสมการขององค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

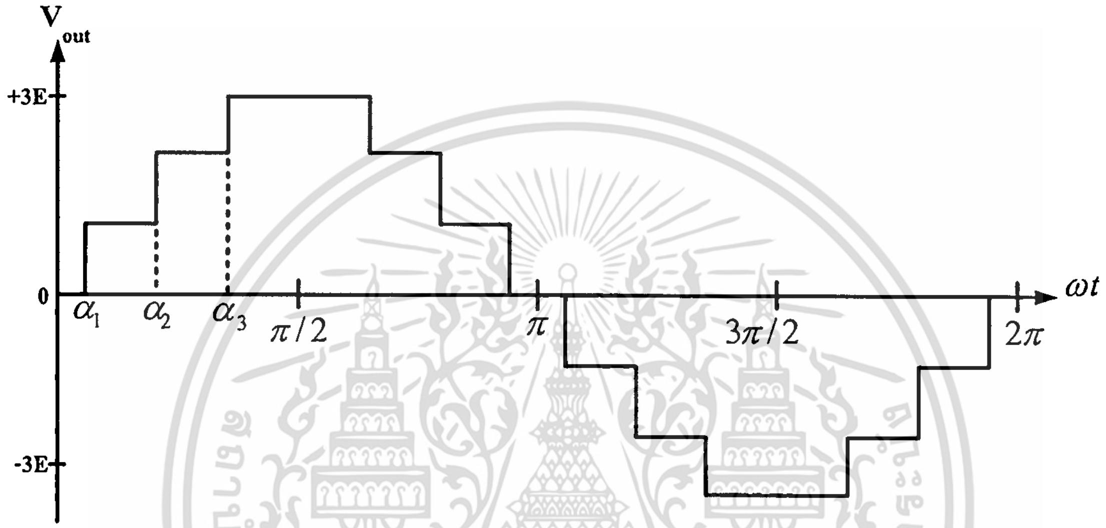
ตารางที่ 3.1 จำนวนฮาร์มอนิกส์ที่ถูกกำจัดทั้งในระบบเฟสเดียวและระบบสามเฟส

	ระบบเฟสเดียว	ระบบสามเฟส
จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	s	s (ต่อเฟส)
จำนวนระดับของแรงดันเอาท์พุท	2s+1 ระดับแรงดันเฟส	4s + 1 ระดับแรงดันไลน์
จำนวนฮาร์มอนิกส์ที่กำจัดออกได้จากแรงดันเฟส	ฮาร์มอนิกส์คี่ s – 1 ลำดับ	ฮาร์มอนิกส์คี่ที่เป็นผลคูณของเลข 3 s – 1 ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในระบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับเฟสเดียว จำนวนลำดับฮาร์มอนิกส์คี่ถูกกำจัดออกสูงสุดคือ s - 1 ลำดับ ส่วนในระบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามเฟส จำนวนลำดับฮาร์โมนิกส์คี่ที่เป็นผลคูณของเลข 3 ที่ถูกกำจัดออกสูงสุดคือ s - 1 ลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เพื่อให้เข้าใจวิธีการของ นิวตัน-ราปสัน มากยิ่งขึ้น จึงยกตัวอย่างรูปคลื่นของคาสเคดอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ที่แสดงในรูปที่ 3.4 กำหนดให้เป็นระบบเฟสเดียว มีค่าดัชนีมอดูเลชั่นเท่ากับ 1 มุมสวิทช์ที่ต้องการทราบค่าคือ α_1, α_2 และ α_3



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ

เพื่อควบคุมขนาดของความถี่มูลฐานและกำจัดฮาร์มอนิกส์ สามารถกำหนดสมการได้ดังนี้

$$\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) = \frac{3\pi}{4} \quad (3.28a)$$

$$\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) = 0 \quad (3.28b)$$

$$\cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) = 0 \quad (3.28c)$$

เมื่อหาค่ามุมสวิทช์ของสมการไม่เชิงเส้นจากสมการที่ 3.28a ถึง 3.28c ด้วยวิธีของนิวตัน-ราปสัน จึงต้องจัดสมการให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

1) เมตริกซ์ของมุมสวิทชิ่ง

$$\alpha^j = \left[\alpha_1^j, \alpha_2^j, \alpha_3^j\right]^T \quad (3.29a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เมตริกซ์ของระบบไม่เชิงเส้น

$$F^{j}=\begin{bmatrix}\cos(\alpha_1^{j})+\cos(\alpha_2^{j})+\cos(\alpha_3^{j})\\ \cos(5\alpha_1^{j})+\cos(5\alpha_2^{j})+\cos(5\alpha_3^{j})\\ \cos(7\alpha_1^{j})+\cos(7\alpha_2^{j})+\cos(7\alpha_3^{j})\end{bmatrix} \tag{3.29b}$$

และ

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^{j}=\begin{bmatrix}-\sin(\alpha_1^{j}) & -\sin(\alpha_2^{j}) & -\sin(\alpha_3^{j})\\ -5\sin(5\alpha_1^{j}) & -5\sin(5\alpha_2^{j}) & -5\sin(\alpha_3^{j})\\ -7\sin(7\alpha_1^{j}) & -7\sin(7\alpha_2^{j}) & -7\sin(7\alpha_3^{j})\end{bmatrix} \tag{3.29c}$$

3) เมตริกซ์ของขนาดฮาร์มอนิกส์

$$T=\begin{bmatrix}\frac{(3)(1)\pi}{4} & 0 & 0\end{bmatrix}^{T} \tag{3.29d}$$

ดังนั้นสมการที่ 3.29a ถึง 3.29d เขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$F(\alpha)=T \tag{3.30}$$

โดยใช้เมตริกซ์ที่ 3.29a ถึง 3.29d และวิธีนิวตัน-ราปสัน แสดงได้ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของ α ที่ $j=0$

$$\alpha^{0}=\left[\alpha_1^{0},\alpha_2^{0},\alpha_3^{0}\right]^{T} \tag{3.31}$$

2) คำนวณค่าของ

$$F(\alpha^{0})=F^{0} \tag{3.32}$$

3) ทำสมการที่ 3.30 เป็นสมการเชิงเส้นโดยแทน α^{0}

$$F^{0}+\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^{0}d\alpha^{0}=T \tag{3.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$d\alpha^0 = \left[d\alpha_1^0 \quad d\alpha_2^0 \quad d\alpha_3^0\right]^T$$

4) หาค่า $d\alpha^0$ จากสมการที่ 3.33

$$d\alpha^0 = INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0 (T - F^0) \tag{3.34}$$

ที่ $INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0$ เป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์ $\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0$

5) ประมาณค่าเริ่มต้นใหม่ โดยให้

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j \tag{3.35}$$

6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกระทั่ง $d\alpha^j$ มีค่าความละเอียดตามต้องการ และคำตอบต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \frac{\pi}{2} \tag{3.36}$$

ขั้นตอนการคำนวณหาคำตอบข้างต้น สามารถเขียนโปรแกรมในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ ซึ่งจะคำนวณตามขั้นตอนซ้ำไปเรื่อยๆจนกว่า เมตริกซ์ df^j มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งจะได้คำตอบคือ

$$\alpha_1 = 11.6817$$

$$\alpha_2 = 31.1783$$

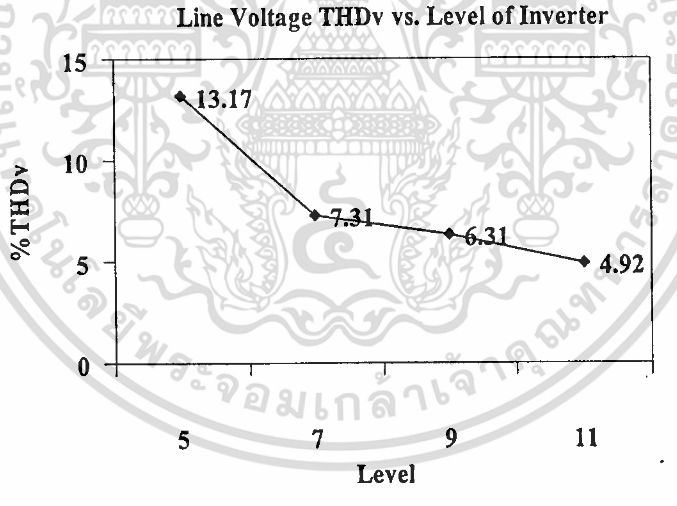
$$\alpha_3 = 58.5774$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนข้างต้นสามารถทำการคำนวณหาค่ามุมสวิทชิ่งของสวิทช์ในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ได้และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ THD_V ของแรงดันไลน์ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าในตารางที่ 3.2 นั้นเป็นค่าที่ได้จากเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันไดเท่านั้น ซึ่งหากใช้เทคนิคอื่นๆ ที่ไม่ใช่เทคนิคนี้แล้ว ค่าความสัมพันธ์ดังตารางที่ 3.2 อาจจะแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ THD_V ของแรงดันไลน์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ที่ค่า M=1

จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์	ค่า % THD_V ของแรงดันไลน์
5	13.17
7	7.31
9	6.31
11	4.92



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ THD_V ของแรงดันไลน์กับจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์

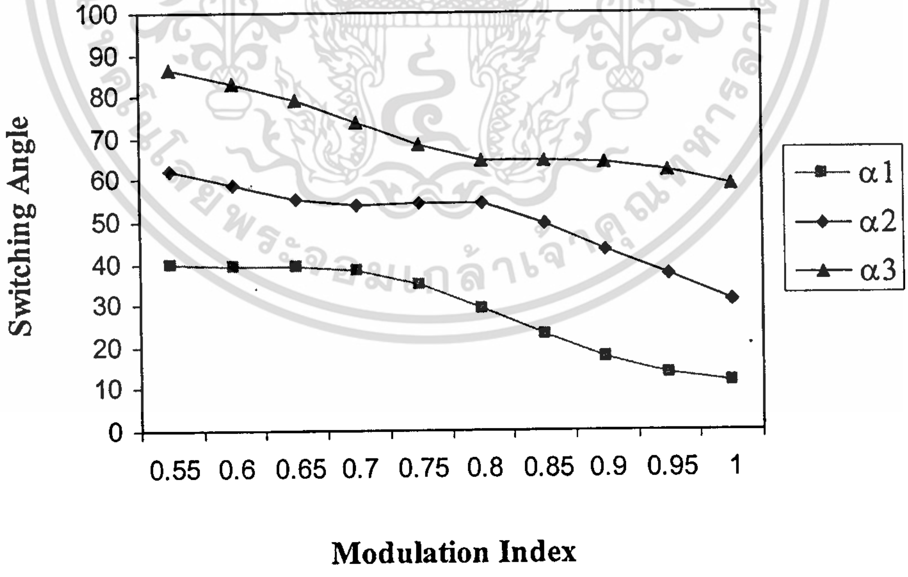
จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าที่ค่า THD_V ของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับจะเท่ากับ 13.17 % และที่ระดับแรงดันเอาท์พุทเป็นเจ็ดระดับค่า THD_V ลดลงเป็น 7.31 % และมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนระดับของแรงดันเพิ่มขึ้น ซึ่งจากค่า THD_V จะลดลงมากที่อินเวอร์เตอร์ห้าระดับเป็นอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับนั้น ส่วนที่อินเวอร์เตอร์เก้าและสิบเอ็ดระดับค่าเปอร์เซ็นต์ของ THD_V จะลดลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการศึกษาและ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด และจากวิธีการข้างต้นสามารถนำมาหาค่าของมุมสวิท ซึ่งมาใช้กับอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่ามุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ

Modulation Index (M)	α_1	α_2	α_3
1	11.6817	31.1783	58.5774
0.95	13.8158	37.1899	61.9216
0.9	17.5104	43.0523	64.1395
0.85	22.7654	49.3798	64.5562
0.8	29.2395	54.4383	64.4844
0.75	34.8935	54.4622	68.5500
0.7	38.3413	53.9297	73.9648
0.65	39.3876	55.5215	78.8979
0.6	39.4298	58.5839	83.1042
0.55	39.7742	62.1282	86.5693



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulation Index กับมุมสวิทชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การคำนวณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion: THD)

ค่าผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม THD สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_{(n)}^2}}{H_1} \tag{3.37}$$

โดยที่ H_1 คือ ขนาดของความถี่มูลฐาน ความถี่คือ ω_0

$H_{(n)}$ คือ ขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับ n ความถี่คือ $n\omega_0$

จากสมการที่ 3.21 ขนาดของความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นหลายระดับรายคาบแบบควอเตอร์สมมาตร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$h_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^{s} \cos(n\alpha_k) \tag{3.38}$$

จาก 3.37, $H_{(n)} = h_n$ และ $H_1 = h_1$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} h_{(n)}^2}}{h_1} \tag{3.39}$$

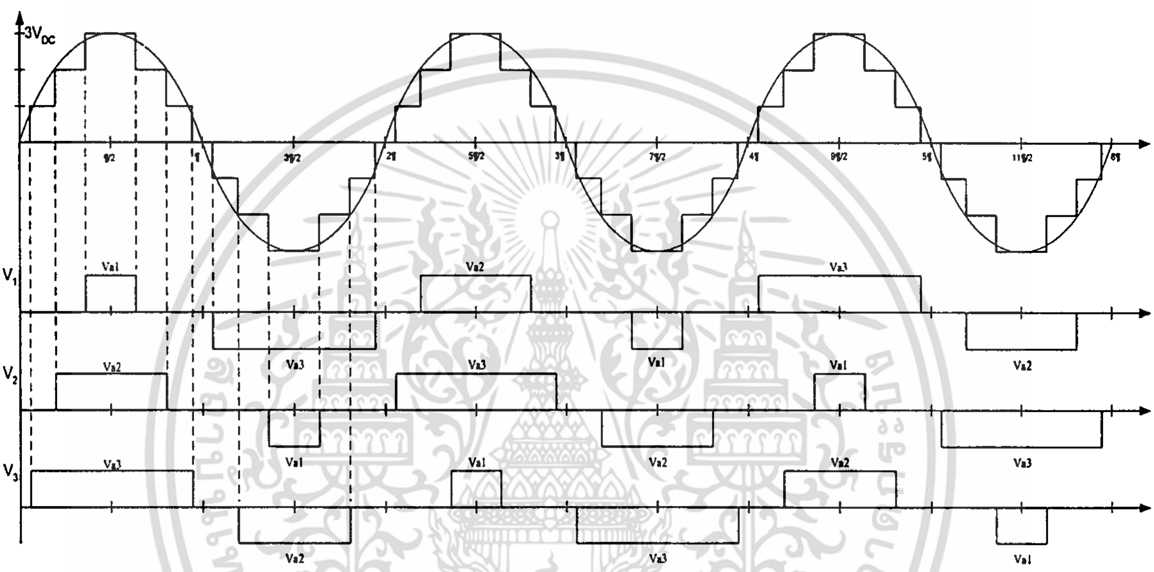
แทนค่าสมการที่ 3.38 ใน 3.39

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{s} \cos(n\alpha_k) \right]^2}}{\sum_{k=1}^{s} \cos(\alpha_k)} \tag{3.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation)

จากหัวข้อที่ 3.3.2 เมื่อทำการคำนวณค่าคำตอบของมุมสวิทชิ่งได้แล้ว หลังจากนั้นก็จะทำการกำหนดรูปแบบการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟสเดียวกัน ให้มีลักษณะของแรงดันเอาท์พุทที่เหมือนกันในหนึ่งคาบของเวลาการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดรูปแบบการสวิทช์ใหม่แล้ว เวลาการทำงานในหนึ่งคาบการทำงานจะถูกยืดออกไป คือ จากเดิมหนึ่งคาบเวลาในการทำงานเท่ากับ 20 ms ก็จะถูกยืดออกไปเป็น 60 ms แทน



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ได้ทำการปรับรูปแบบการสวิทช์ใหม่

3.5 สรุป

จากหัวข้อข้างต้น จะเห็นว่าสามารถที่จะนำเอาทฤษฎีของนิวตัน-ราปสัน มาประยุกต์ใช้ในการแก้สมการไม่เชิงเส้น เพื่อคำนวณหาค่าของมุมสวิทชิ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าค่าคำตอบของมุมสวิทชิ่งนั้น จะหาได้แค่เพียงค่าดัชนีมอดูเลชั่นเท่ากับ 0.55 เนื่องจากว่า เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นลดลงต่ำกว่า 0.55 จะไม่สามารถหาค่าคำตอบของมุมสวิทชิ่ง α ที่เหมาะสมได้ ซึ่งวิธีในการหาค่าคำตอบของมุมสวิทชิ่งที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำๆ จะขอนำเสนออีกครั้งในภาคผนวก ค ส่วนในบทต่อไปจะทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด เพื่อทำการพิสูจน์ค่าของมุมสวิทชิ่งที่คำนวณได้สามารถจำกัดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การจำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งในการจำลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่นและความถี่มูลฐาน โดยจะแสดงผลทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับขั้น

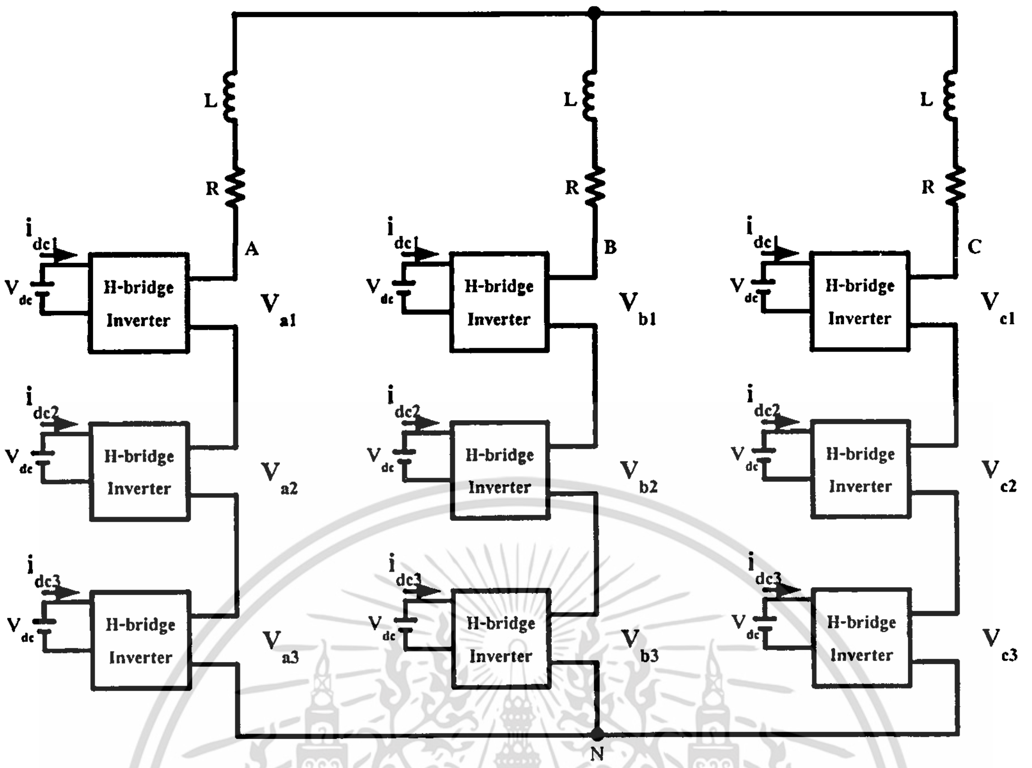
4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด และหลักการการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สามารถนำมาทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ ในระบบสามเฟสต่อแบบวาย (Y) ต่อเข้ากับโหลด R, L อนุกรมที่ต่อกันแบบวาย (Y) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทำการคงค่าความถี่มูลฐานที่ 30 Hz, 50 Hz, และ 70 Hz แล้วทำการปรับค่าของดัชนีมอดูเลชั่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1 เพื่อศึกษาผลของค่า THD ของแรงดันด้านเอาท์พุทเมื่อค่าความถี่และดัชนีมอดูเลชั่นเปลี่ยนแปลง

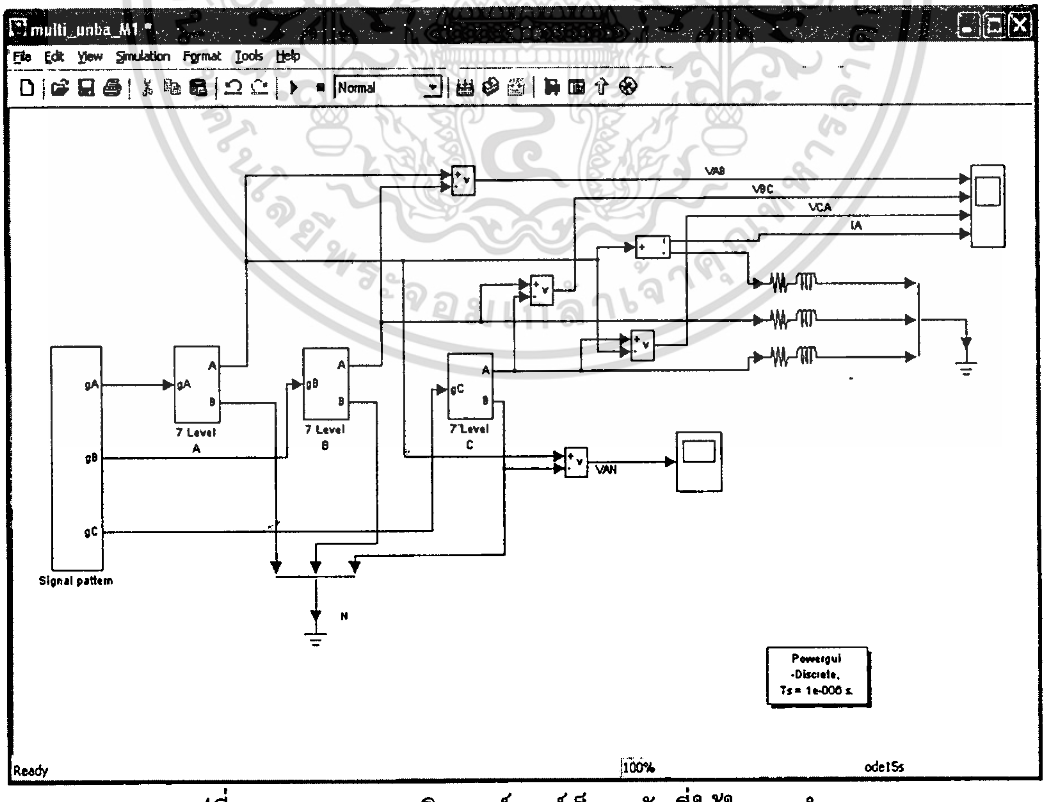
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 หาได้จากการนำค่าของกระแสและแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มาคูณกัน ดังสมการที่ 4.1

$$P = IV \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่ต่อแบบวาย (Y)



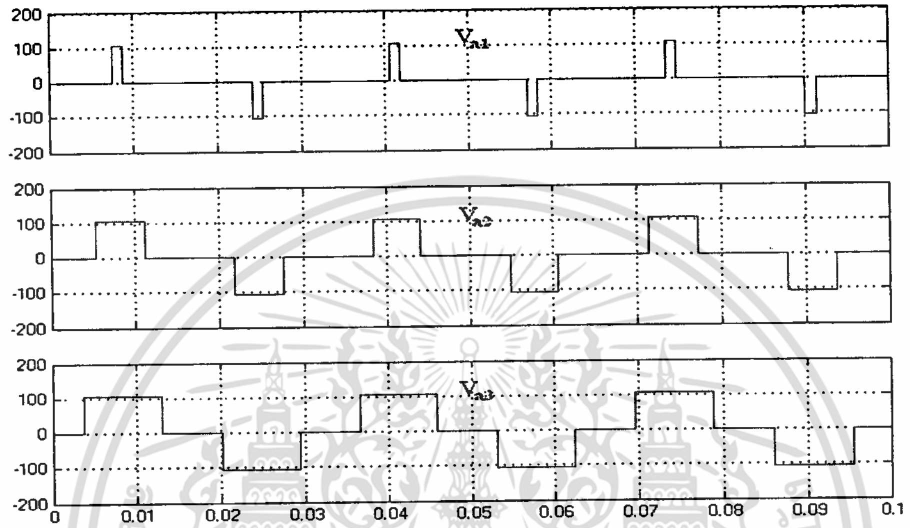
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่ใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

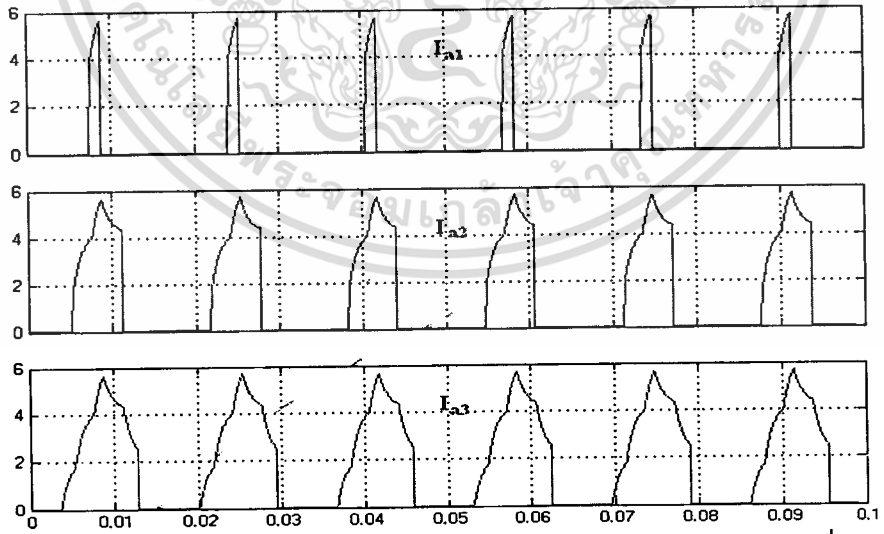
4.2.1 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่แหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

4.2.1.1 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 0.6$

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ $f = 30$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.3876°$, $\alpha_2 = 55.5215°$ และ $\alpha_3 = 78.8979°$



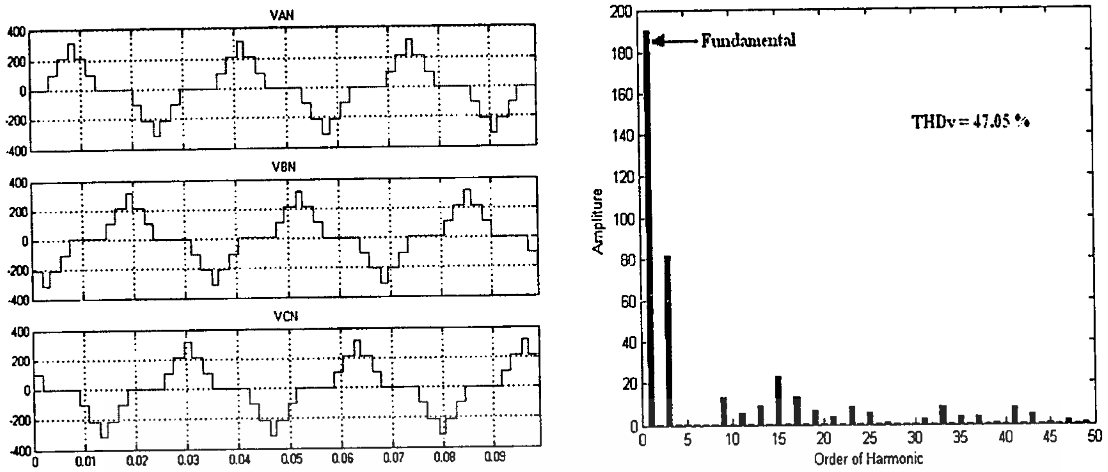
รูปที่ 4.3 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz



รูปที่ 4.4 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz

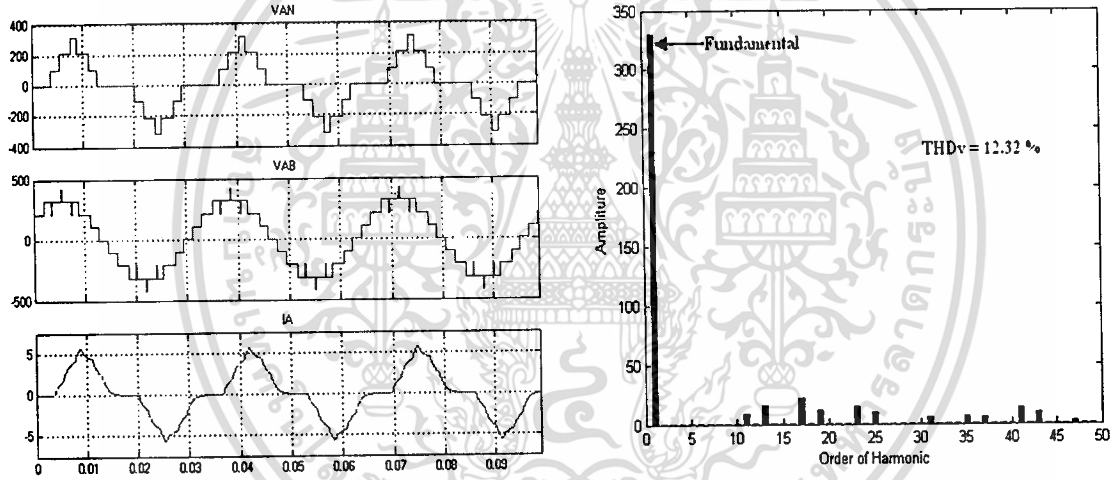
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 39.2 W, 155.3 W และ 203.4 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



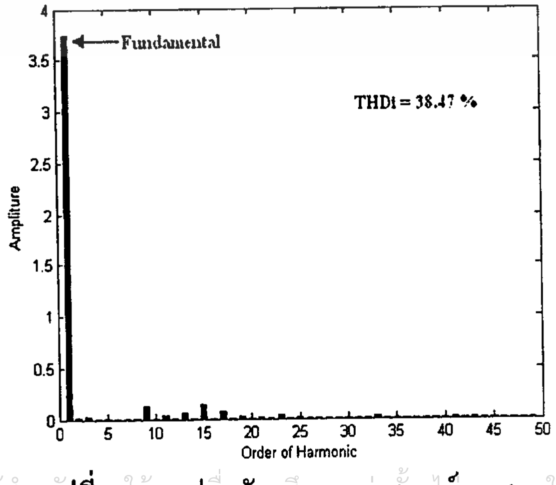
(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz

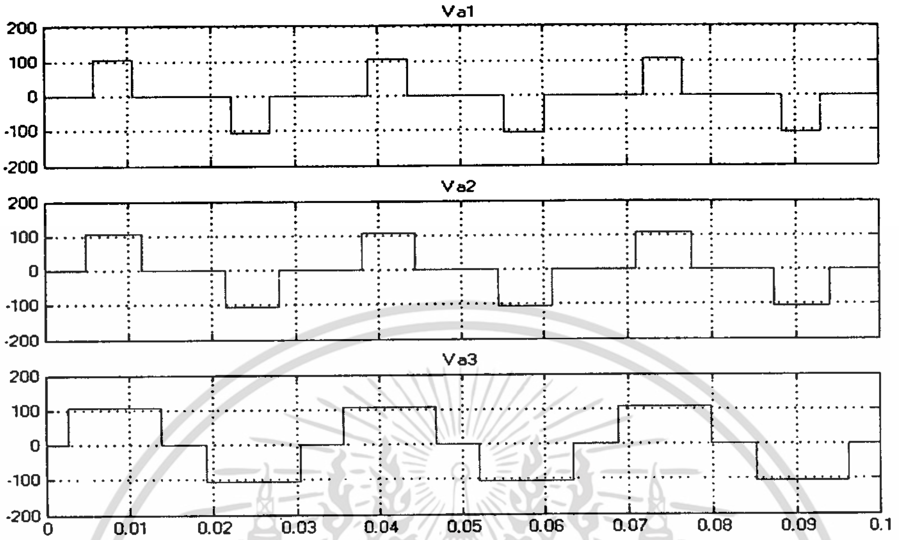


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

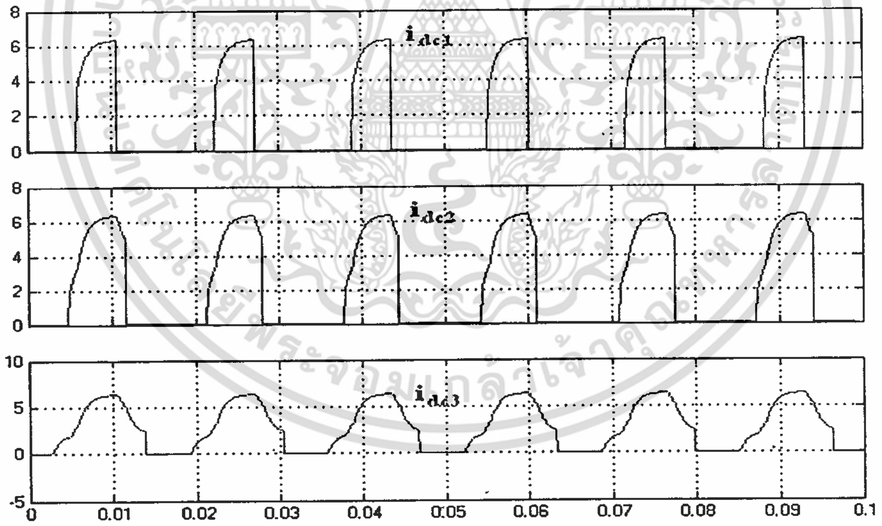
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 ที่ f = 30 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 30 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



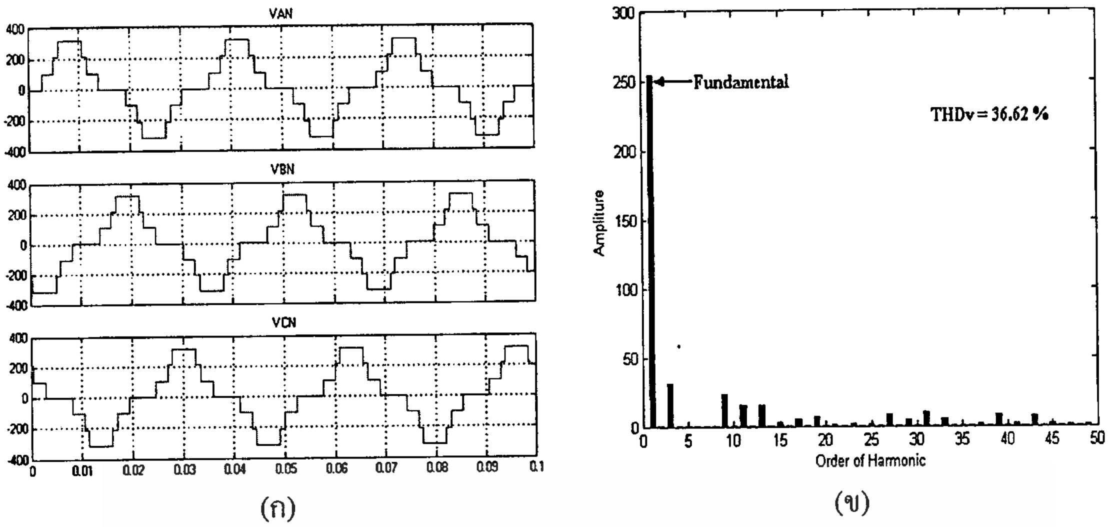
รูปที่ 4.8 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz



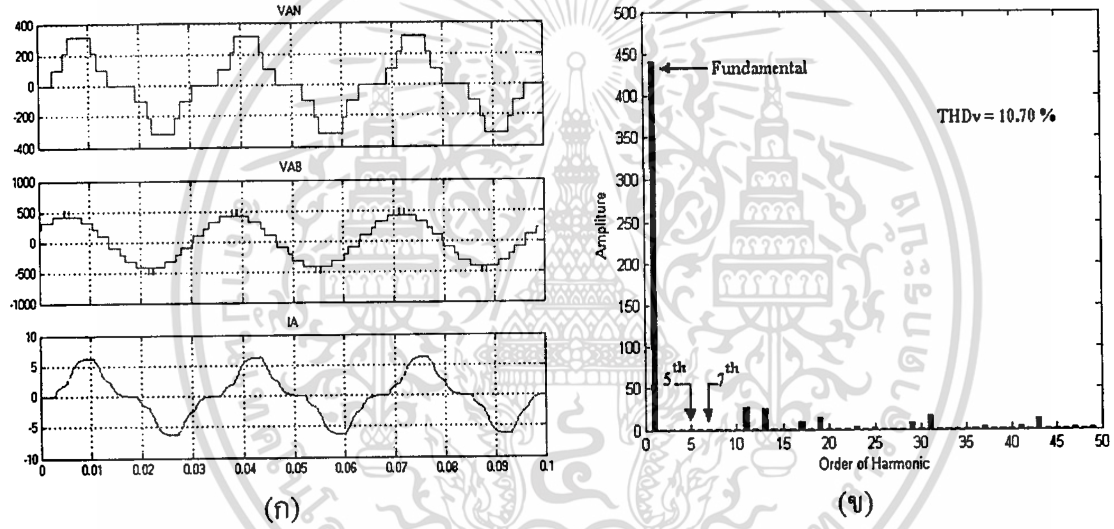
รูปที่ 4.9 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 170.2 W, 218.9 W และ 286 W ตามลำดับ

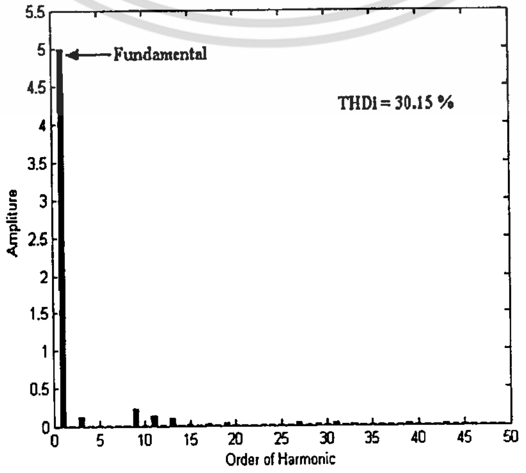
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 30$ Hz



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 30$ Hz

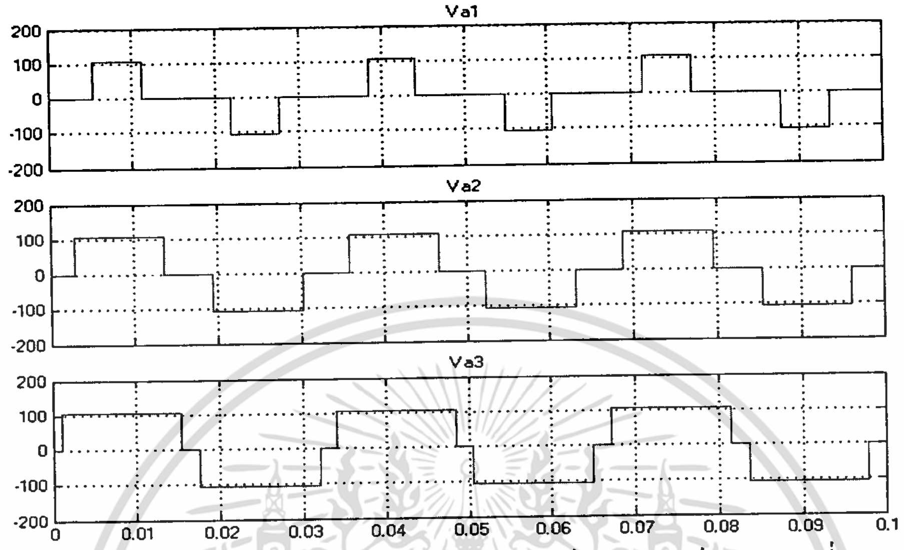


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

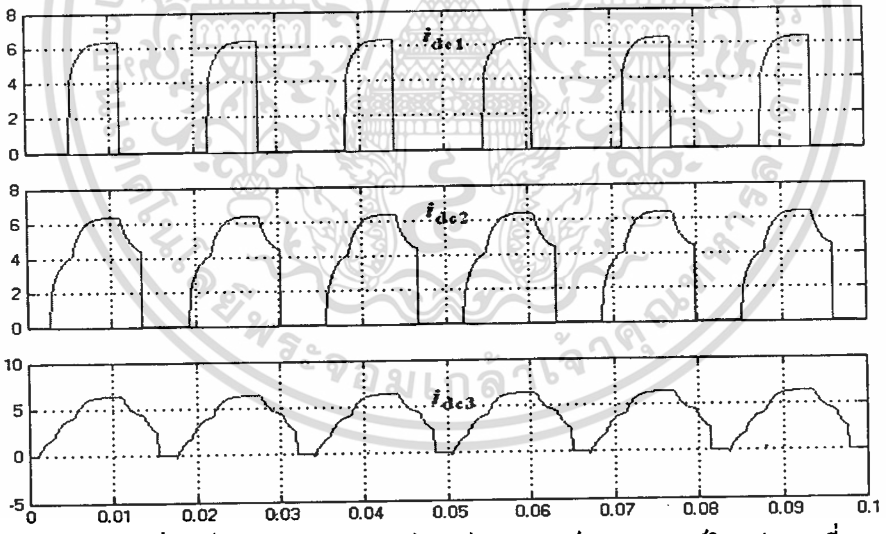
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 1$

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ $f = 30$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทซึ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



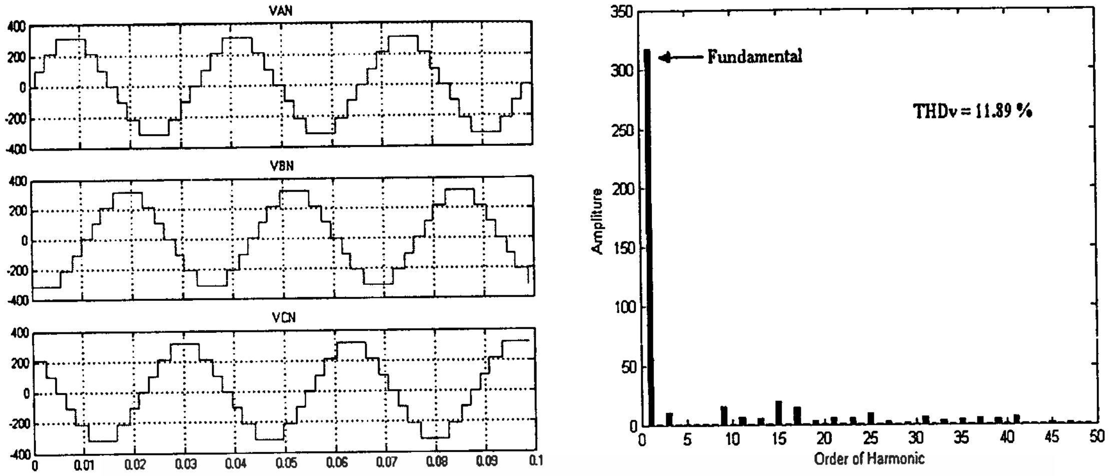
รูปที่ 4.13 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz



รูปที่ 4.14 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz

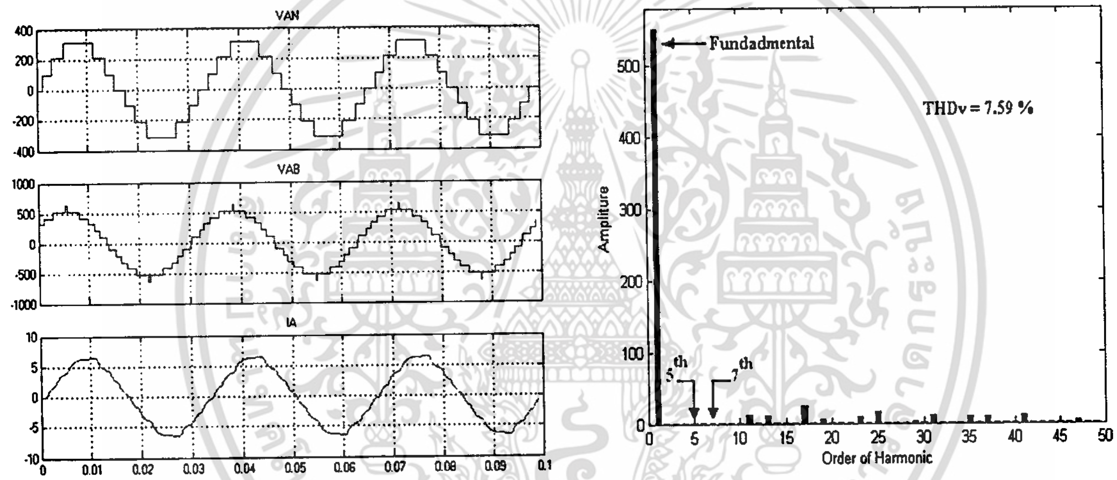
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 218.5 W, 351.5 W และ 399.1 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



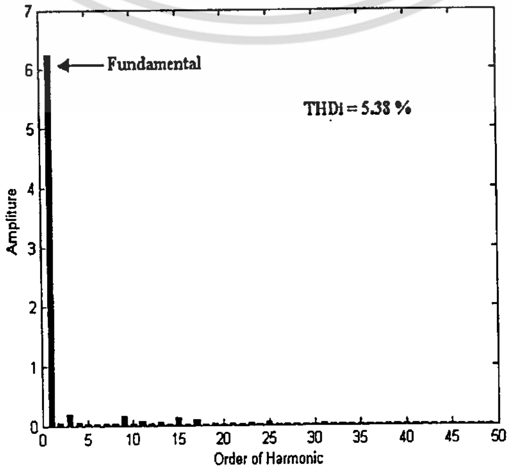
(ก) (ข)

รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 30 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 30 Hz

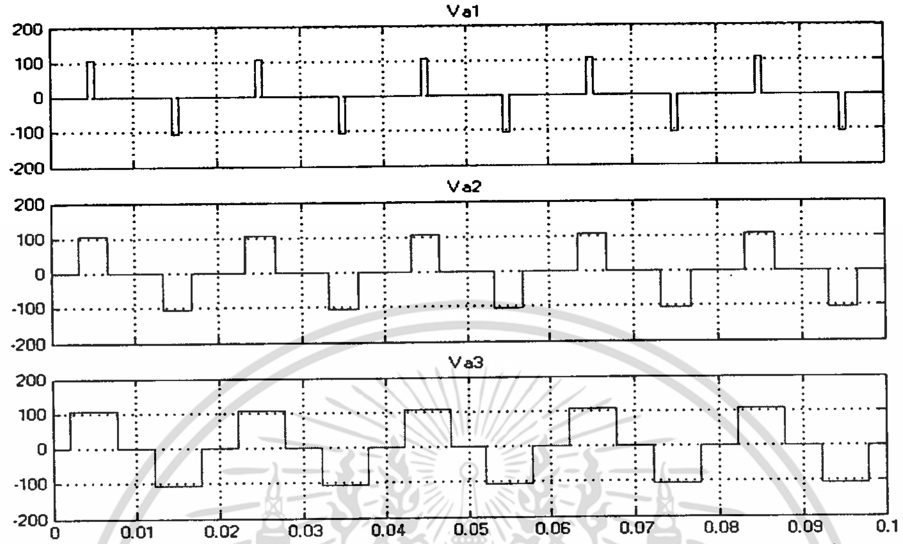


รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

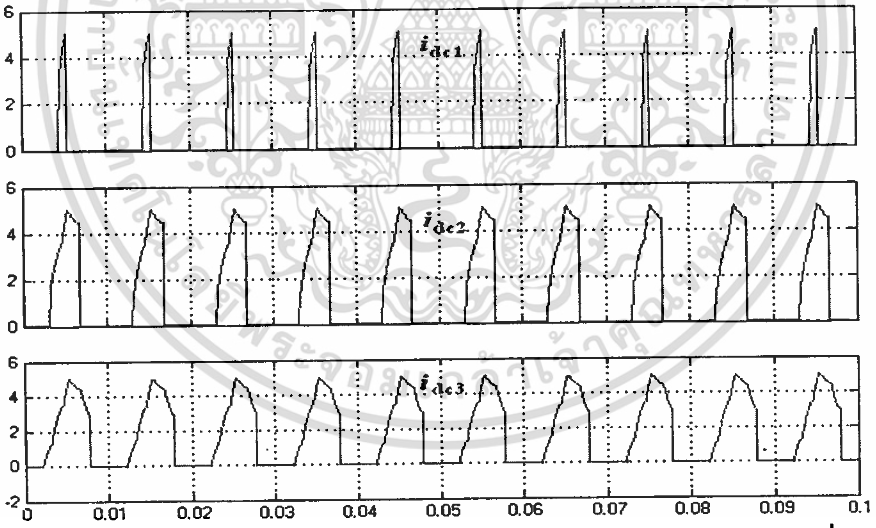
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.4 ที่ f = 50 Hz, M = 0.6

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.3876°$, $\alpha_2 = 55.5215°$ และ $\alpha_3 = 78.8979°$



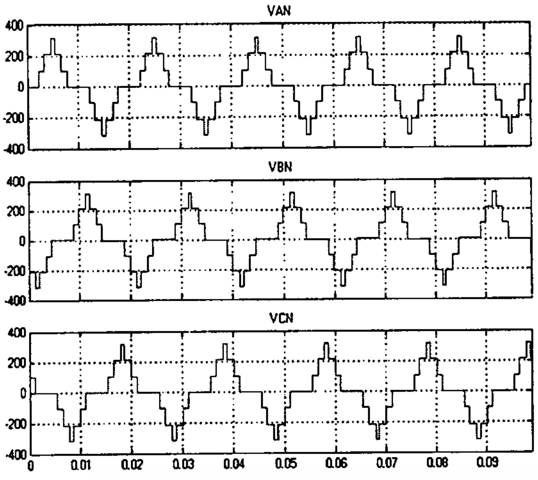
รูปที่ 4.18 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz



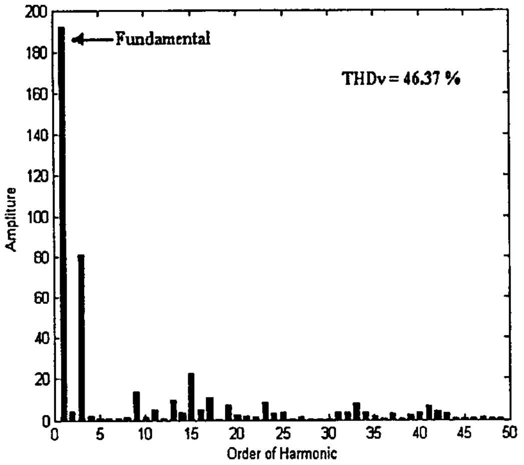
รูปที่ 4.19 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 35.74 W, 141.8 W และ 190.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

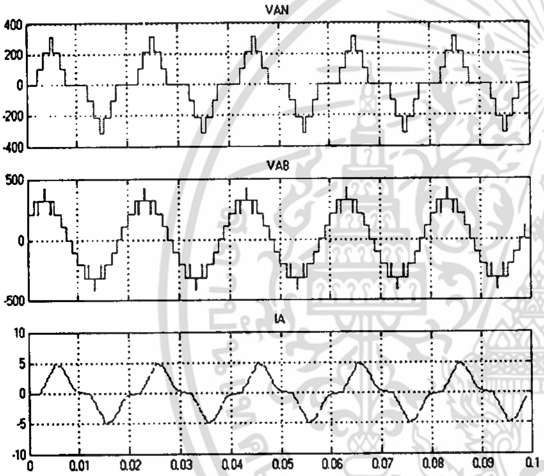


(ก)

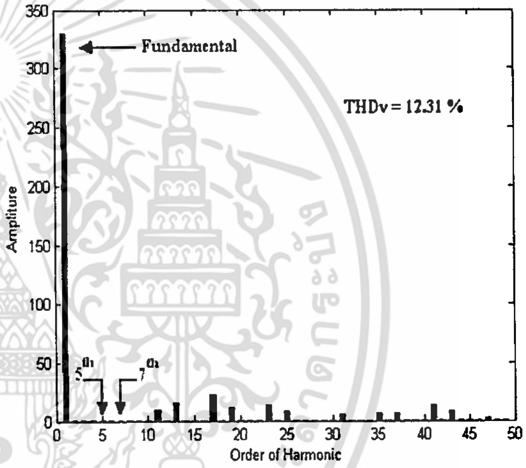


(ข)

รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz

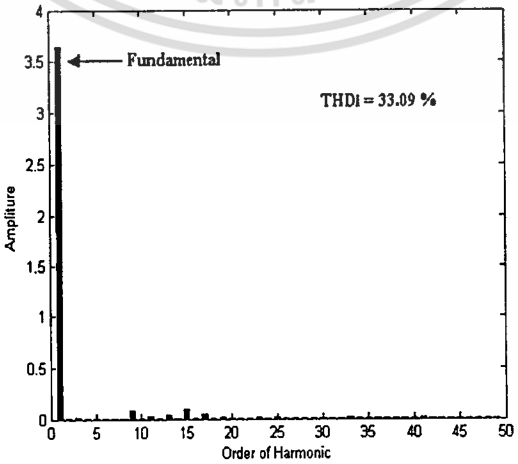


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz

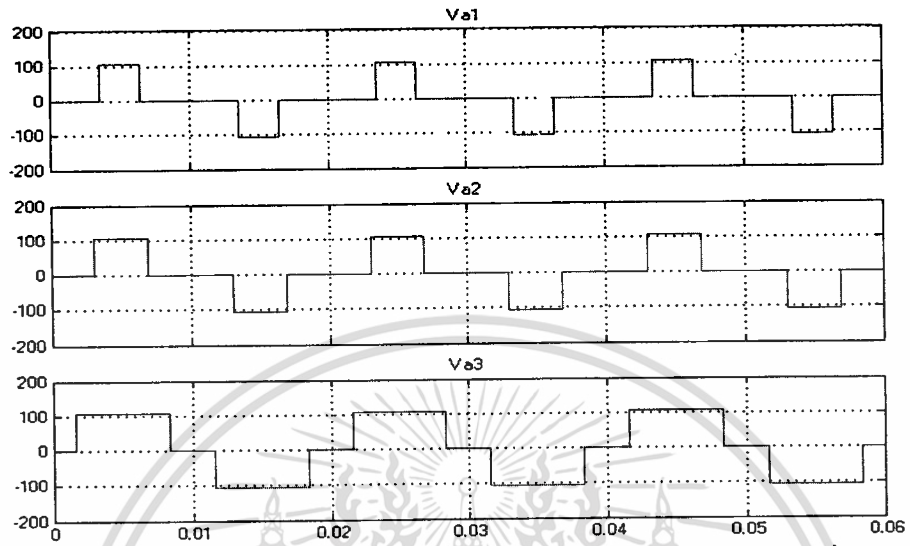


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

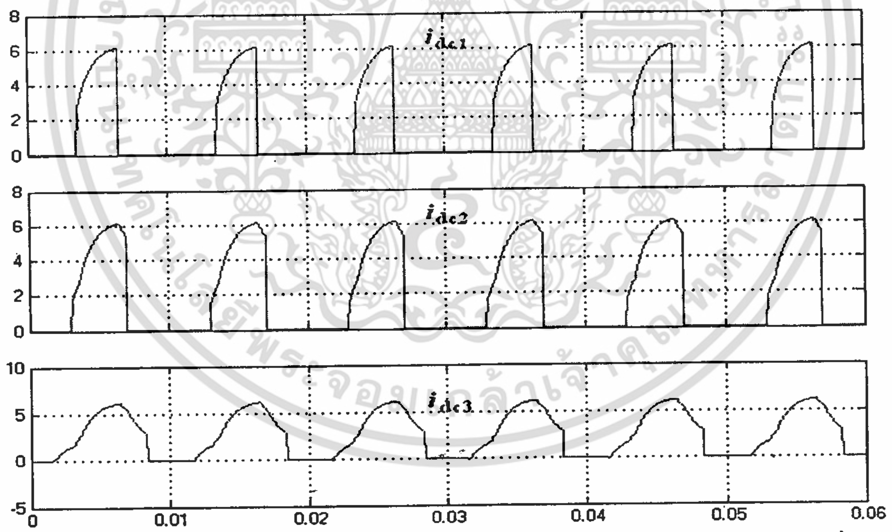
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.5 ที่ f = 50 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



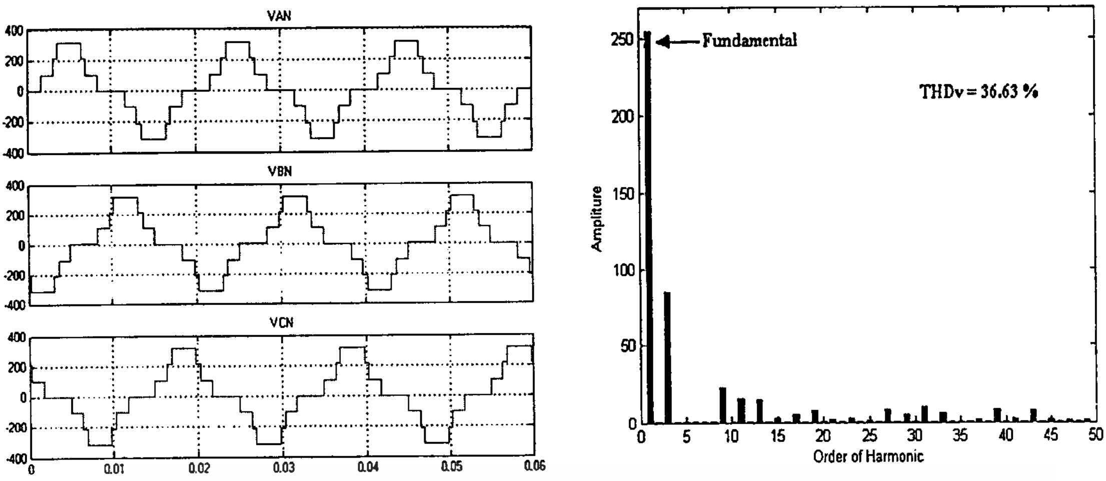
รูปที่ 4.23 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz



รูปที่ 4.24 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

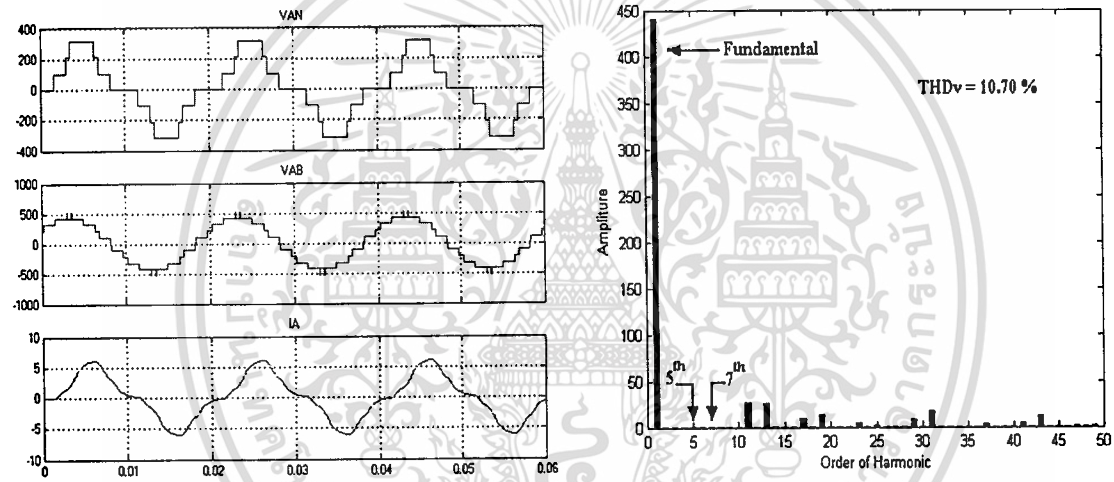
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 154.9 W, 201.6 W และ 272.3 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



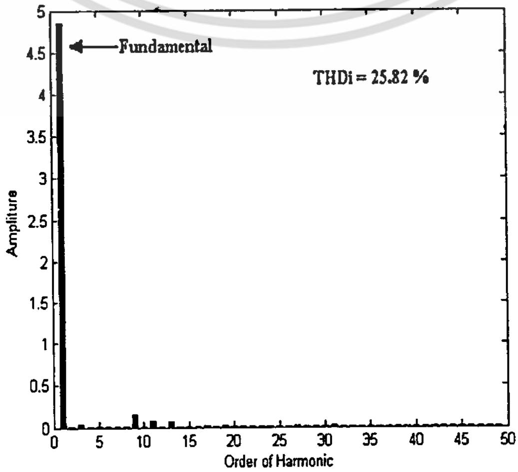
(ก) (ข)

รูปที่ 4.25 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ $f = 50$ Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.26 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ $f = 50$ Hz

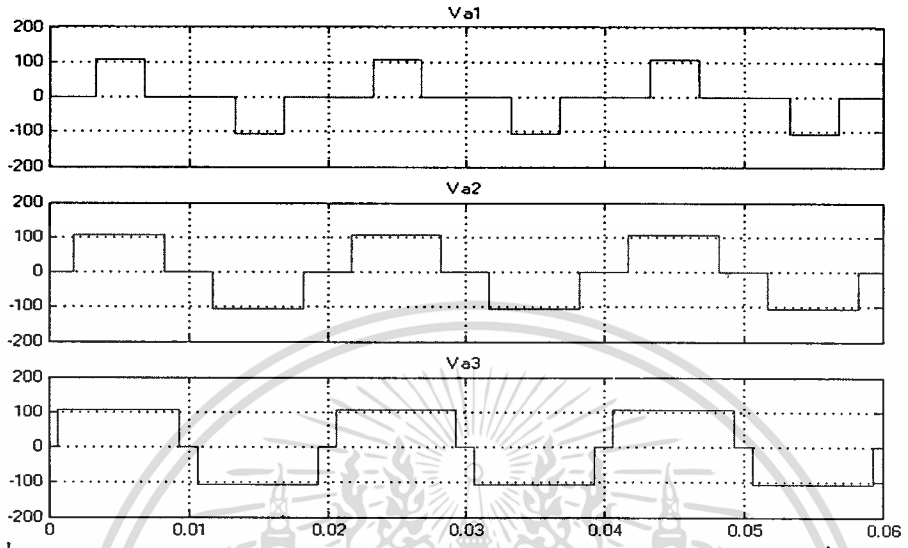


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

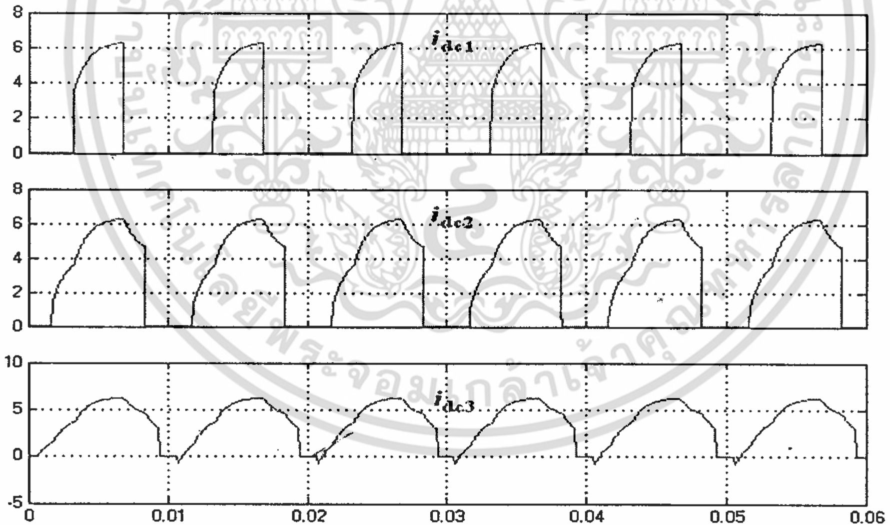
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.6 ที่ f = 50 Hz, M = 1

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



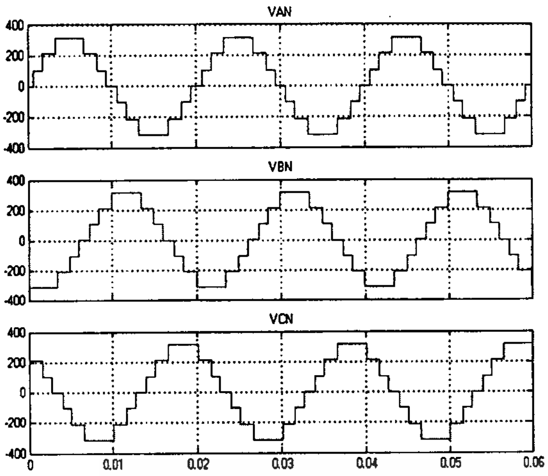
รูปที่ 4.28 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz



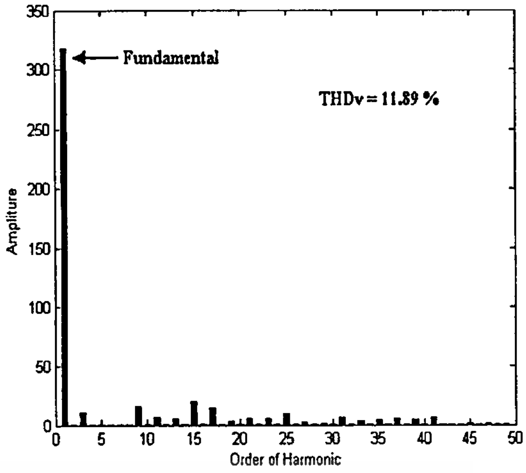
รูปที่ 4.29 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 206.8 W, 334.6 W และ 380.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

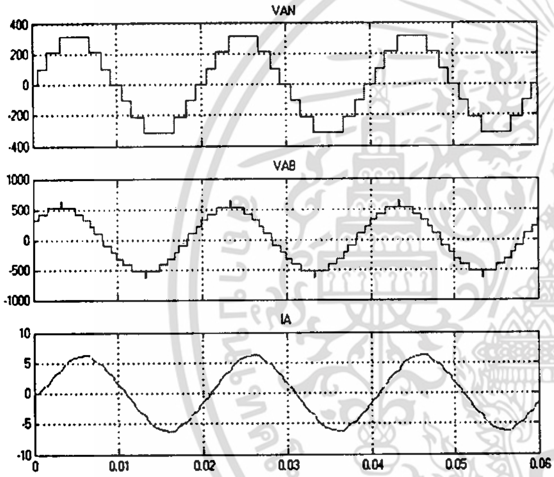


(ก)

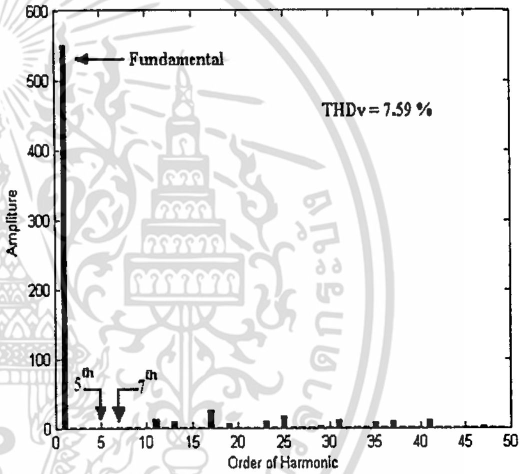


(ข)

รูปที่ 4.30 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz

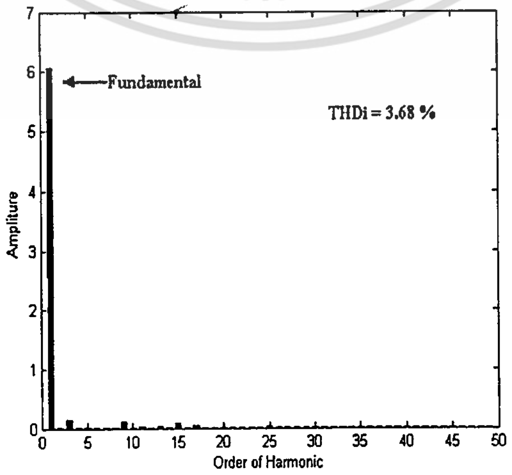


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.31 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz

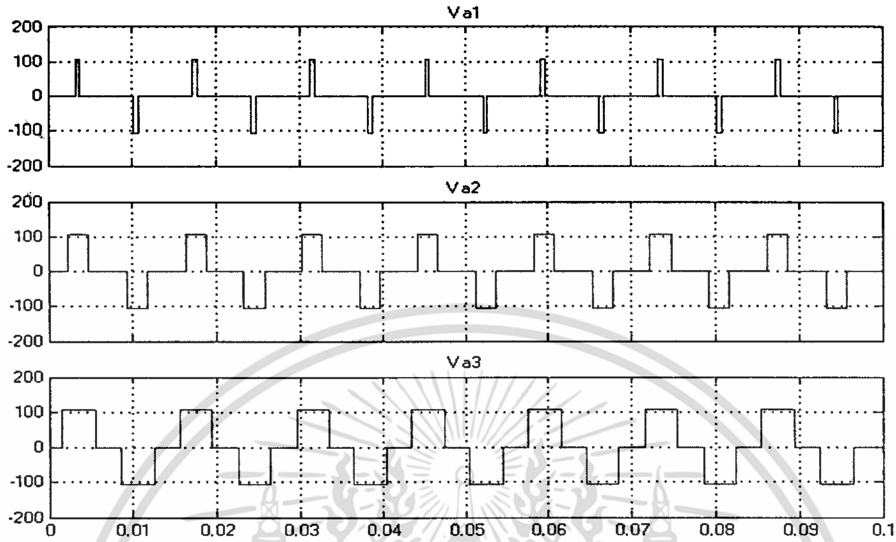


รูปที่ 4.32 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

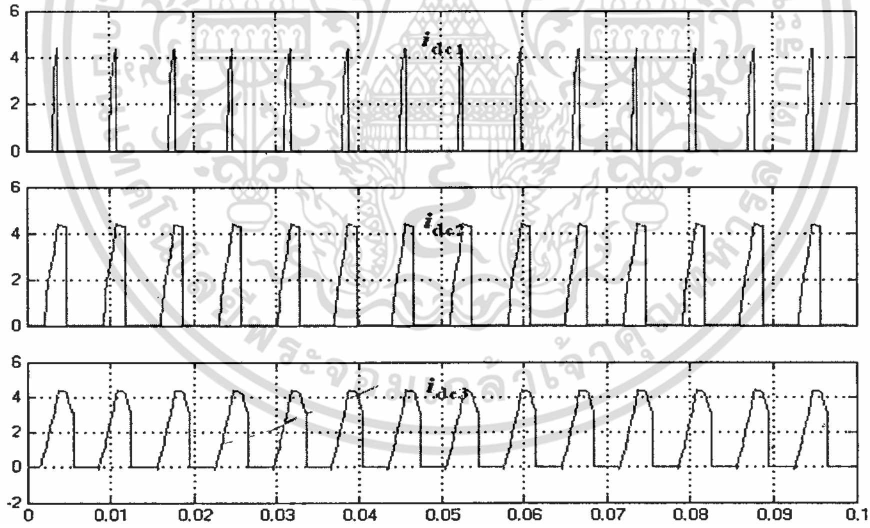
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.7 ที่ f = 70 Hz, M = 0.6

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 70 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น α_1 = 39.3876°, α_2 = 55.5215° และ α_3 = 78.8979°



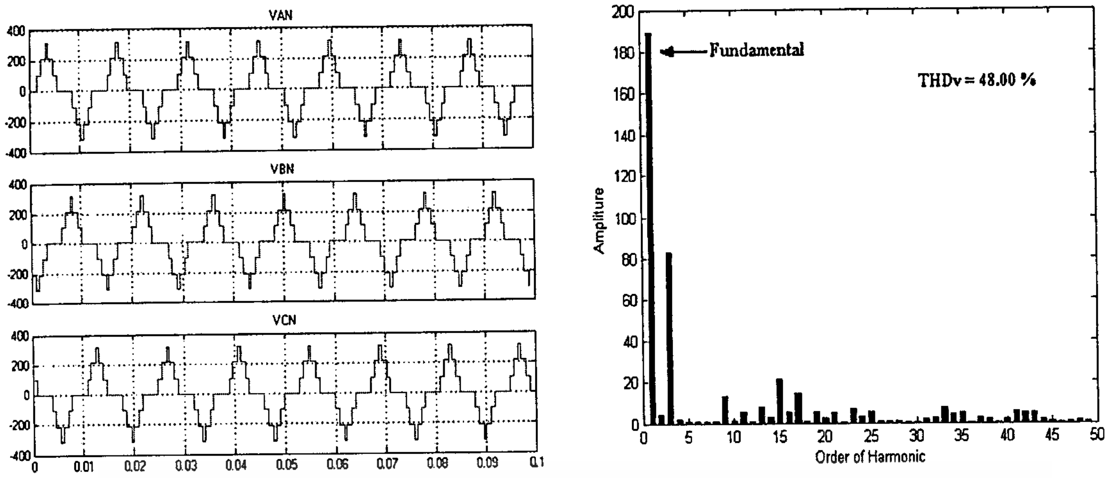
รูปที่ 4.33 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.34 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

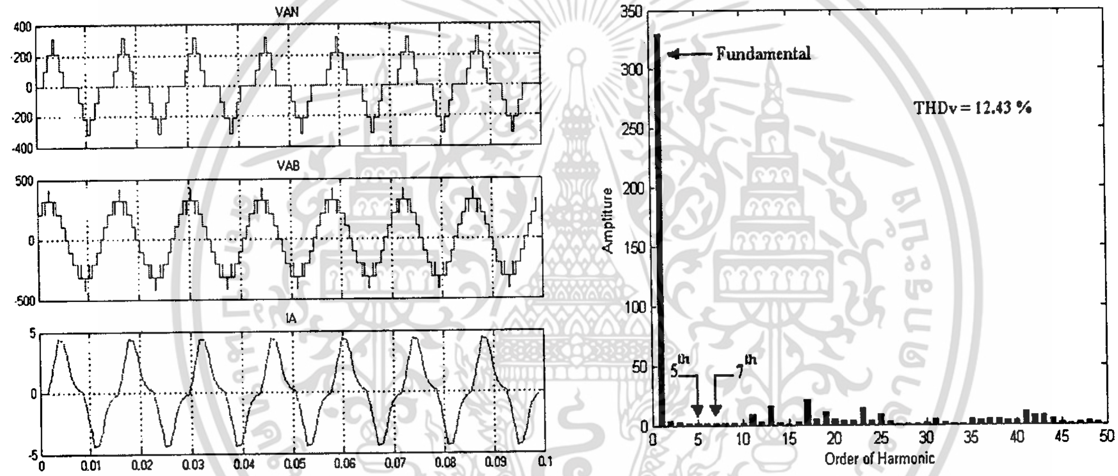
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 30.25 W, 122.5 W และ 168.7 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



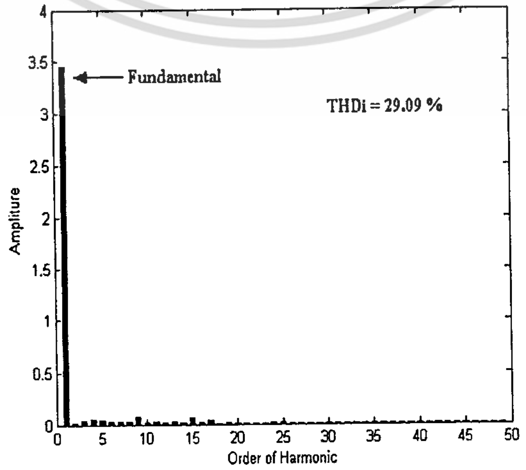
(ก) (ข)

รูปที่ 4.35 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.36 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz

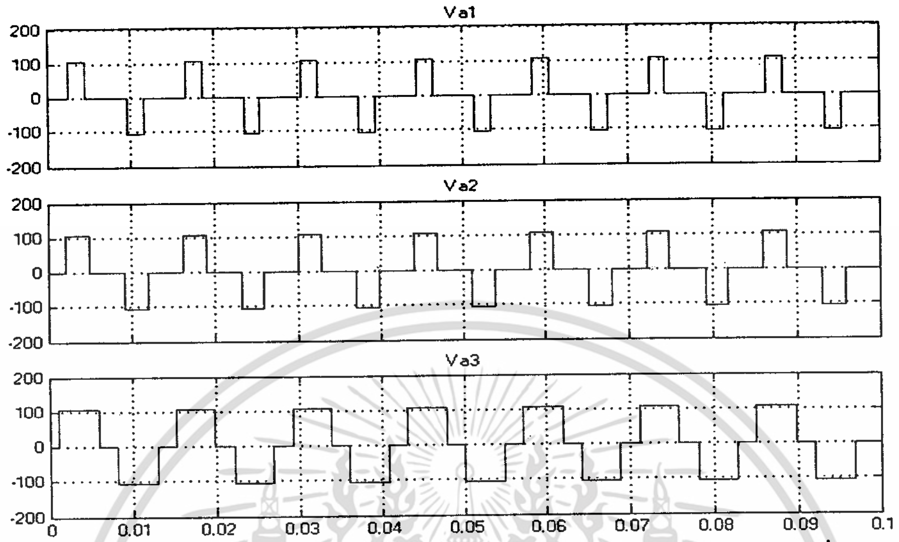


รูปที่ 4.37 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

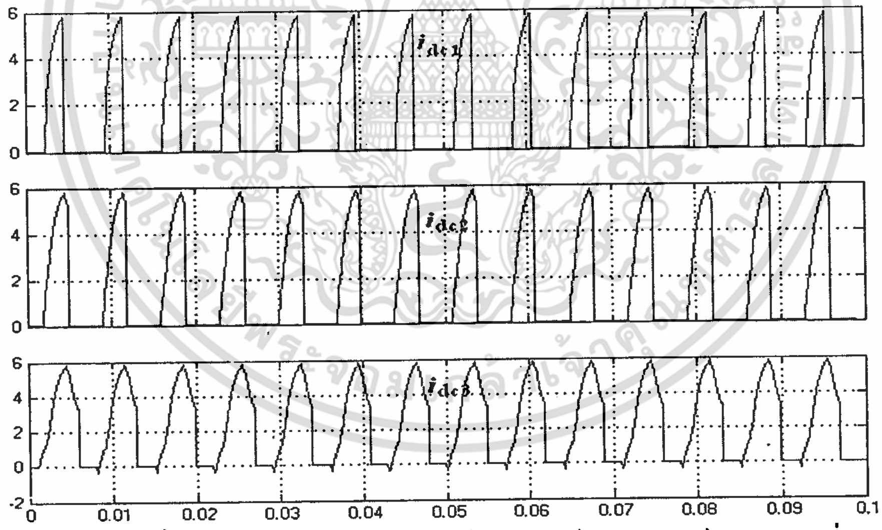
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.8 ที่ f = 70 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 70 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น α_1 = 29.2355°, α_2 = 54.4383° และ α_3 = 64.4844°



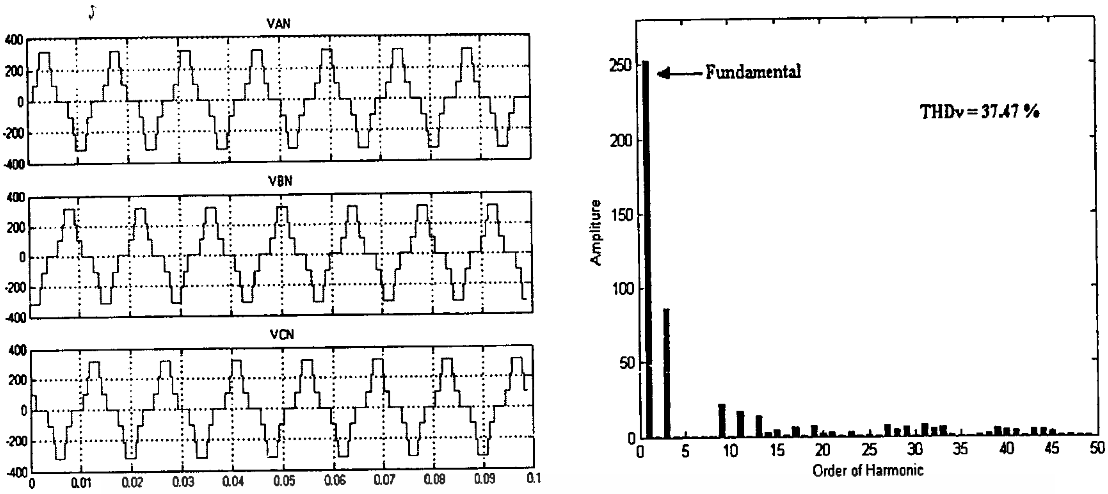
รูปที่ 4.38 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.39 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

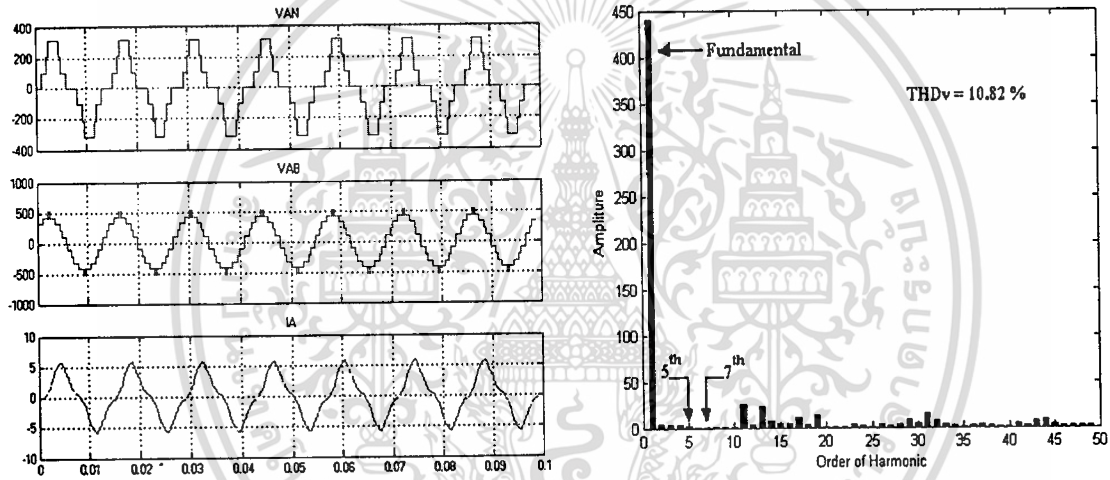
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 134.1 W, 176 W และ 244.2 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



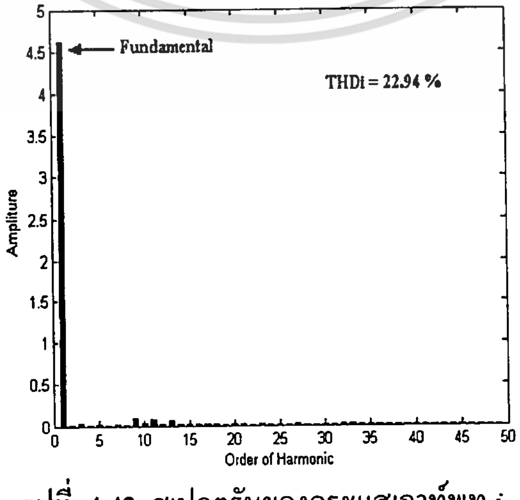
(ก) (ข)

รูปที่ 4.40 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.41 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz

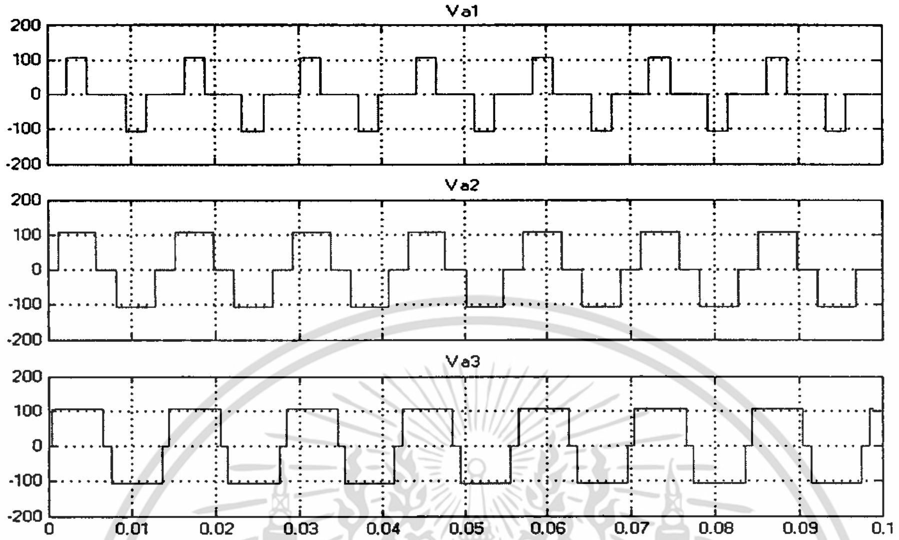


รูปที่ 4.42 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

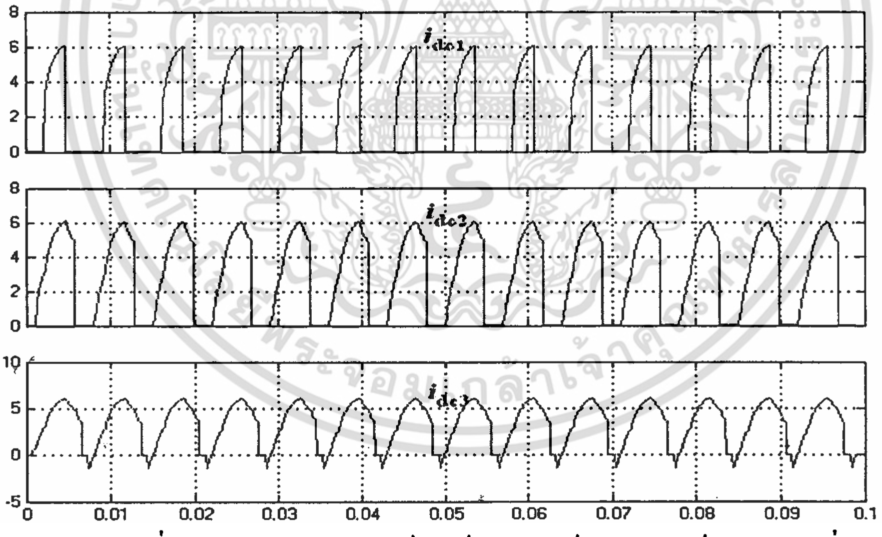
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.9 ที่ f = 70 Hz, M = 1

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 70 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



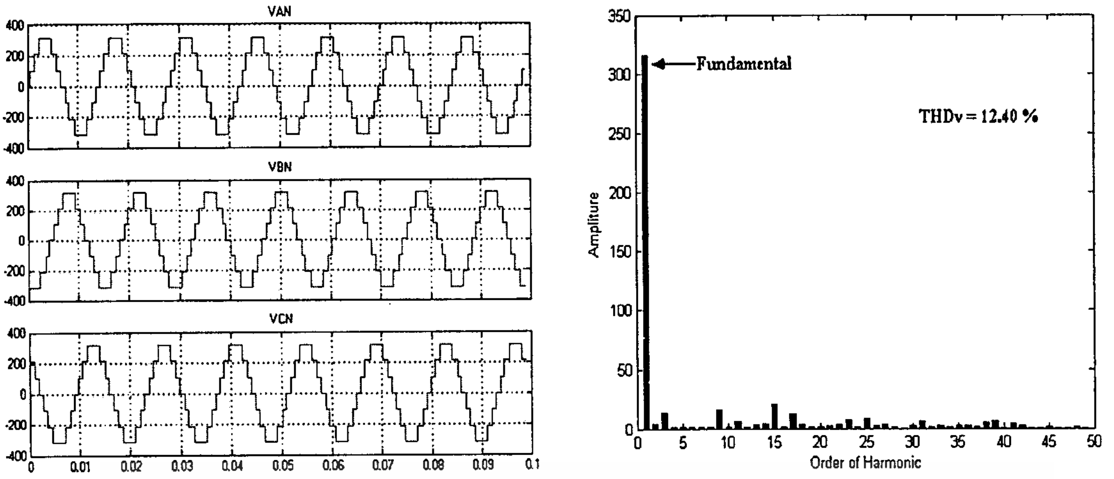
รูปที่ 4.43 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.44 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

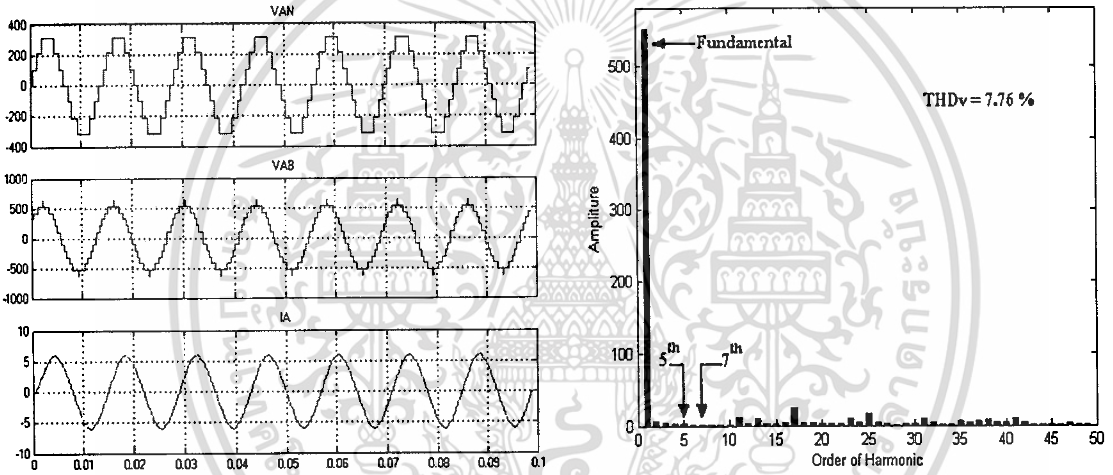
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 184.5 W, 299.9 W และ 341.2 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



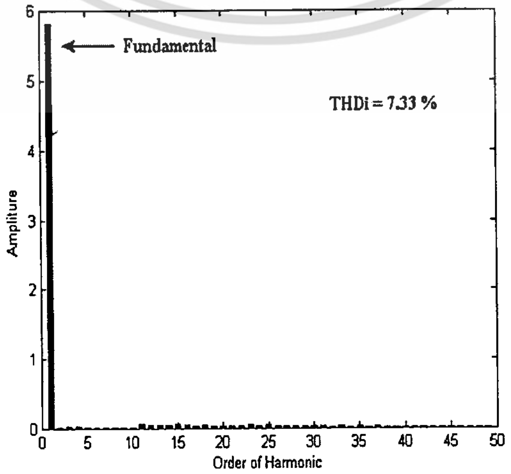
(ก) (ข)

รูปที่ 4.45 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.46 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.47 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สรุปผลการจำลอง ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

จากผลการจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ โดยปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่น ซึ่งมีความถี่กำหนด f_1 เท่ากับ 30 Hz, f_2 เท่ากับ 50 Hz, และ f_3 เท่ากับ 70 Hz จากผลการจำลองจะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่เท่ากัน ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากรูปแบบของการสวิทช์ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ไม่เหมือนกันนั่นเอง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ดัชนีมอดูเลชั่น (M)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 30 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	39.2	155.3	203.4	35.7	141.8	190.8	30.2	122.5	168.7
0.8	170.2	218.9	286	154.9	201.6	272.3	134.1	176	244.2
1	218.5	351.5	399.1	206.8	334.6	380.8	184.5	299.9	341.2

ส่วนในด้านของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (% THD) ของแรงดันไลน์ จากผลการจำลองจะเห็นว่า ที่ทุกค่าความถี่ที่กำหนด เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น ค่า THD ของแรงดันไลน์จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์

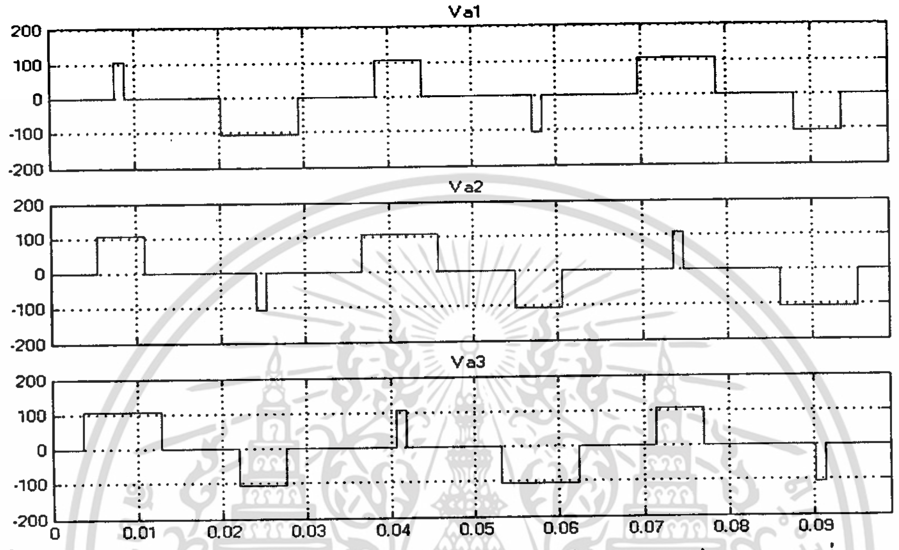
ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ และกระแสไลน์ (% THD)					
	30 Hz		50 Hz		70 Hz	
	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a
0.6	12.32	38.47	12.31	33.09	12.43	29.09
0.8	10.70	30.15	10.70	25.82	10.82	2294
1	7.59	5.38	7.59	3.68	7.76	7.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

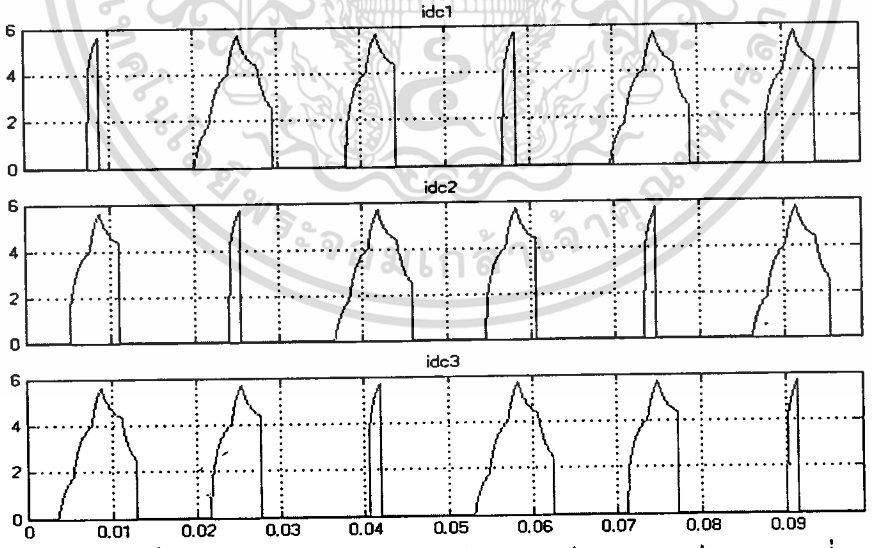
4.2.3 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับที่แหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

4.2.3.1 ที่ f = 30 Hz, M = 0.6

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 30 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.3876°$, $\alpha_2 = 55.5215°$ และ $\alpha_3 = 78.8979°$



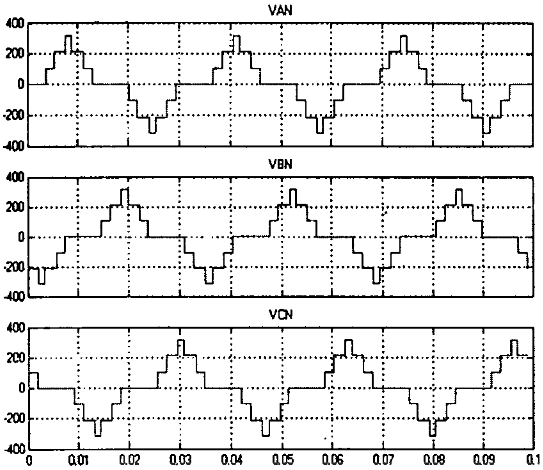
รูปที่ 4.48 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz



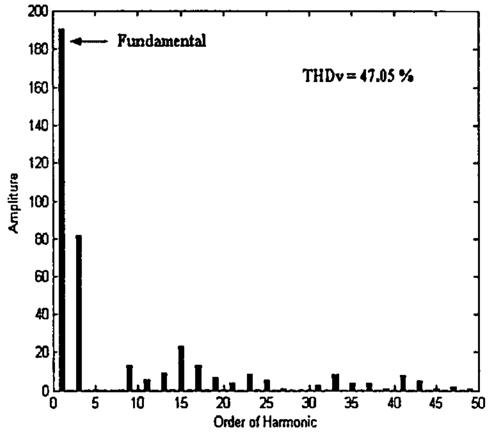
รูปที่ 4.49 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 133.4 W, 133.4 W และ 133.4 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

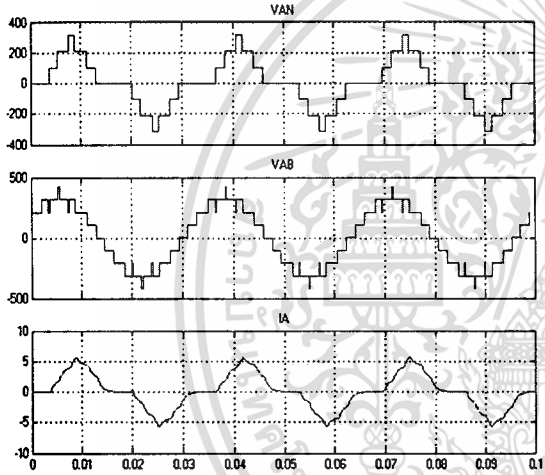


(ก)

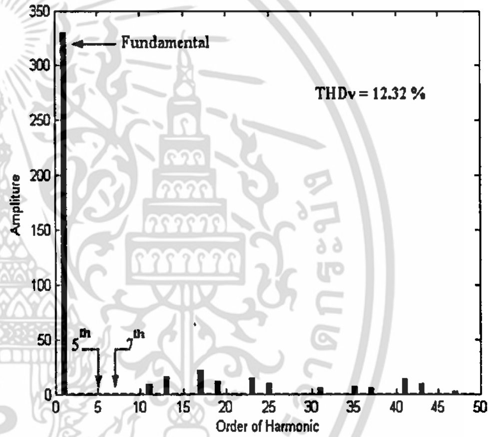


(ข)

รูปที่ 4.50 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 30 Hz

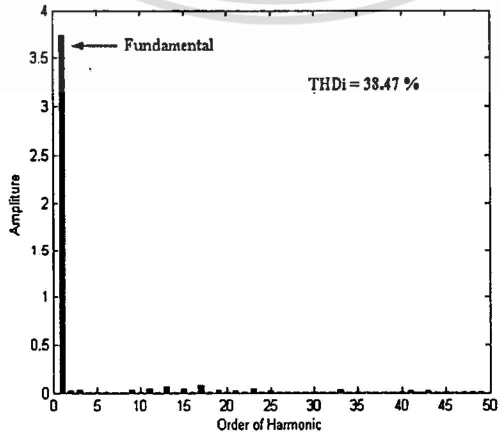


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.51 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 30 Hz

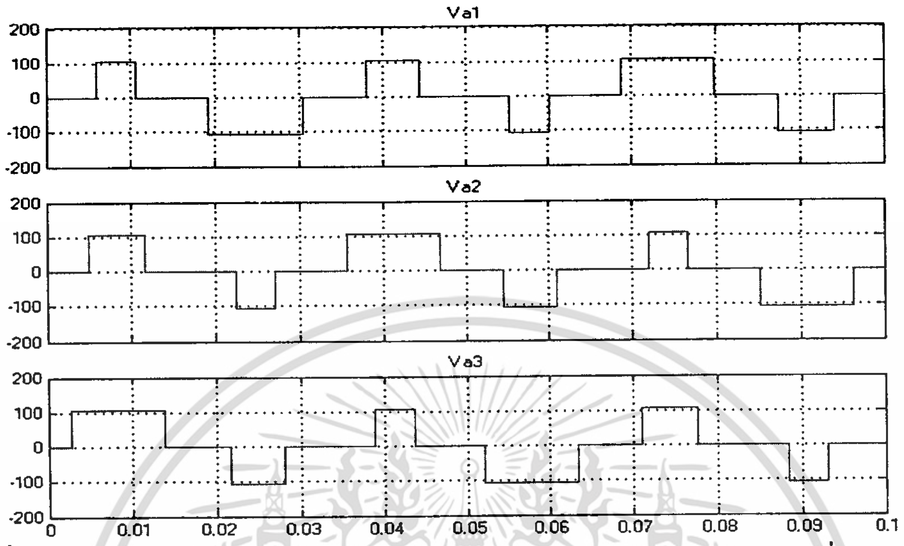


รูปที่ 4.52 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

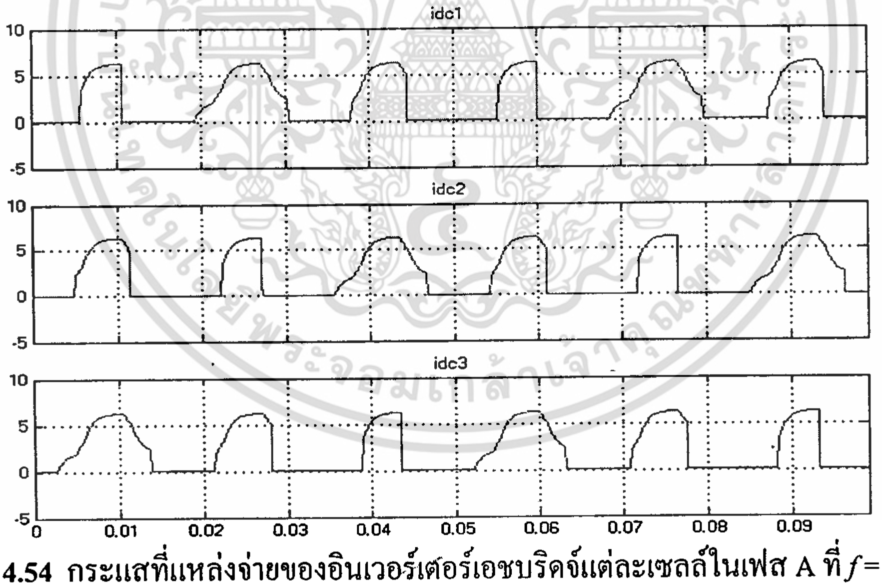
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 ที่ f = 30 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 30 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



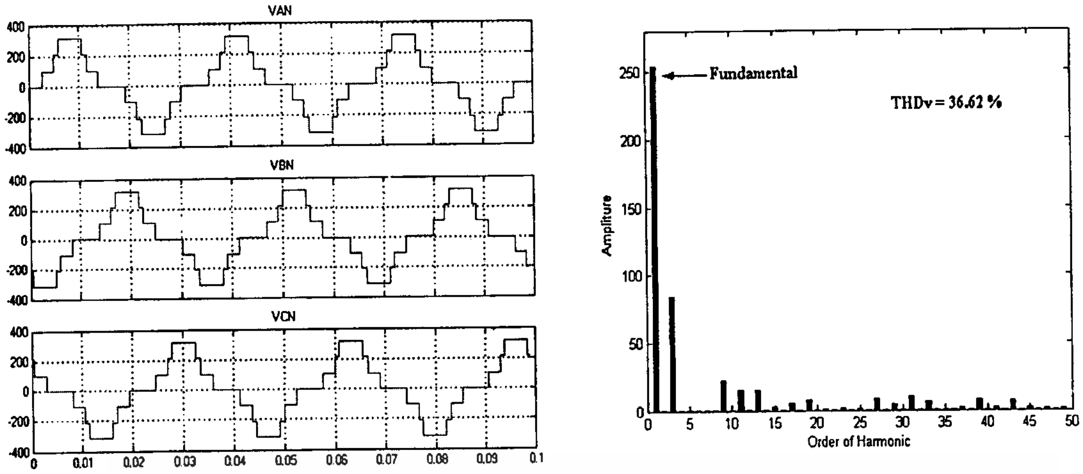
รูปที่ 4.53 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz



รูปที่ 4.54 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 30 Hz

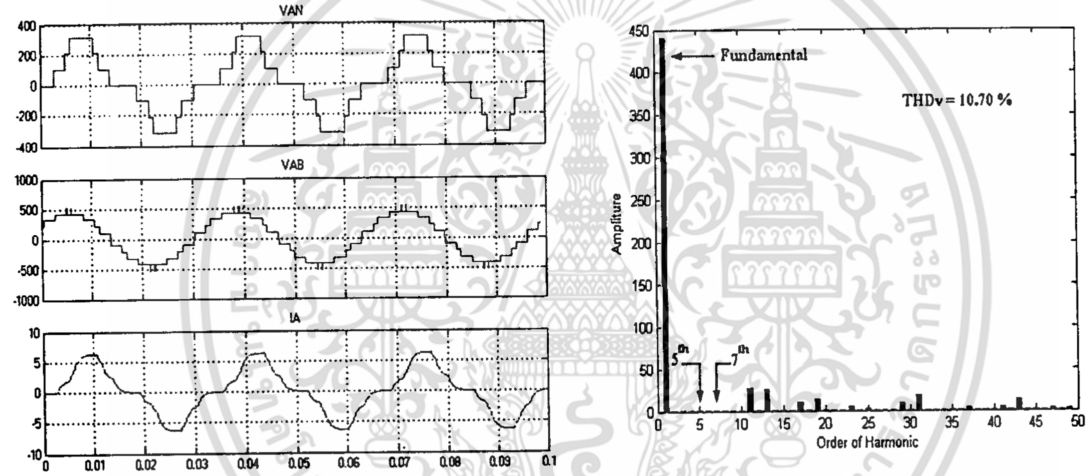
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 225 W, 225 W และ 225 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



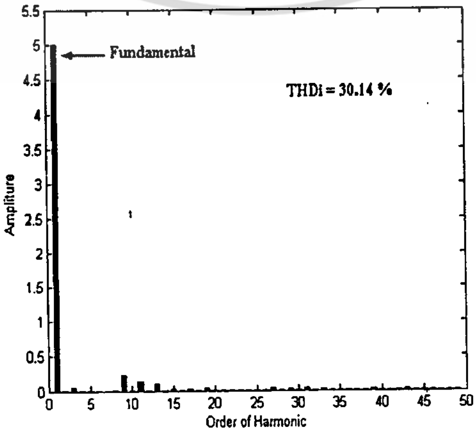
(ก) (ข)

รูปที่ 4.55 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 30 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.56 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 30 Hz

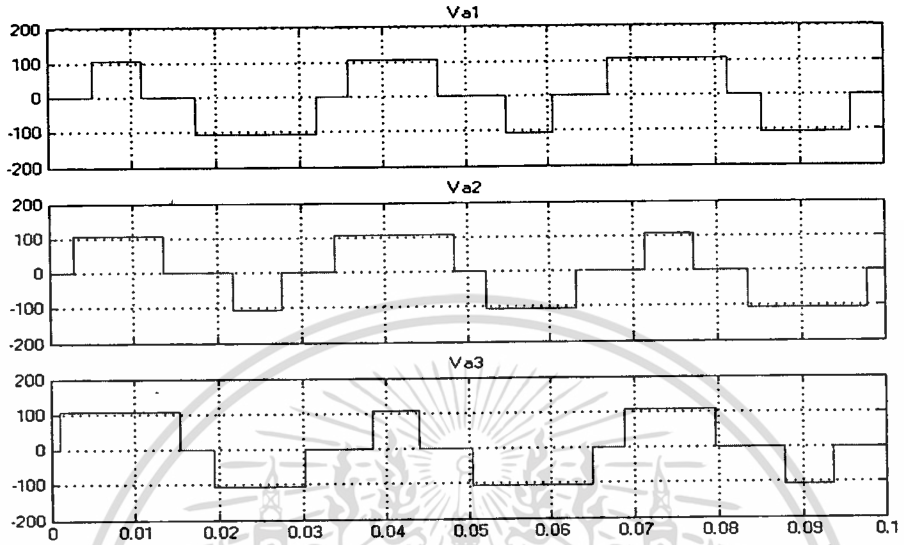


รูปที่ 4.57 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

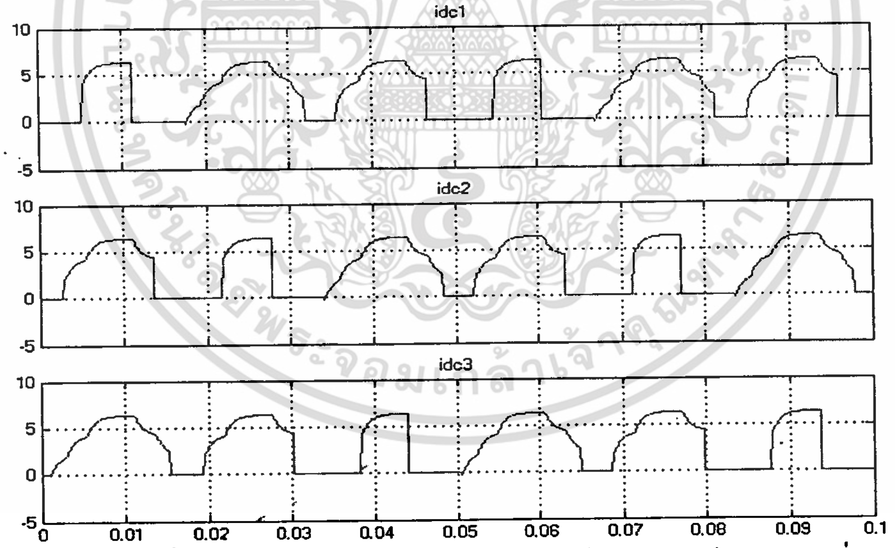
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.3 ที่ $f = 30$ Hz, $M = 1$

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ $f = 30$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิท ซึ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



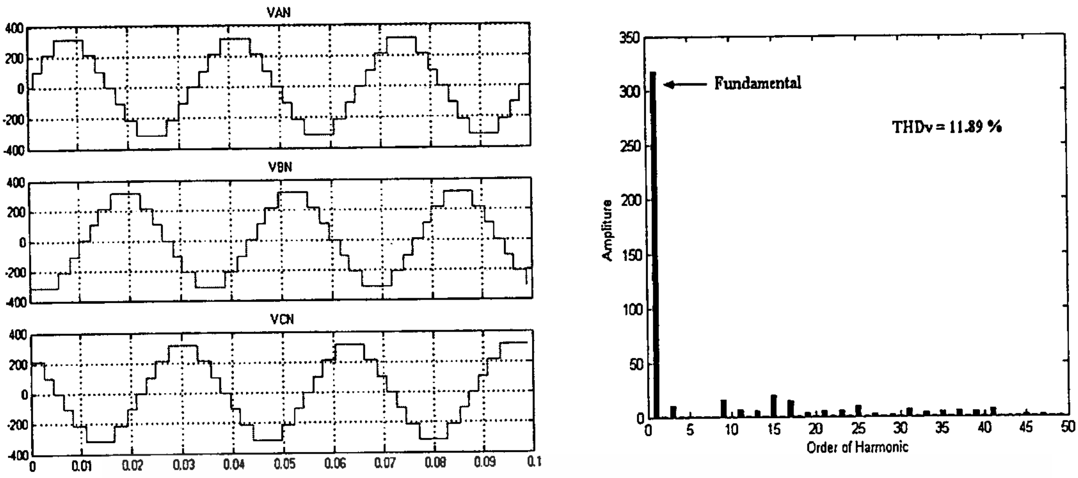
รูปที่ 4.58 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz



รูปที่ 4.59 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 30$ Hz

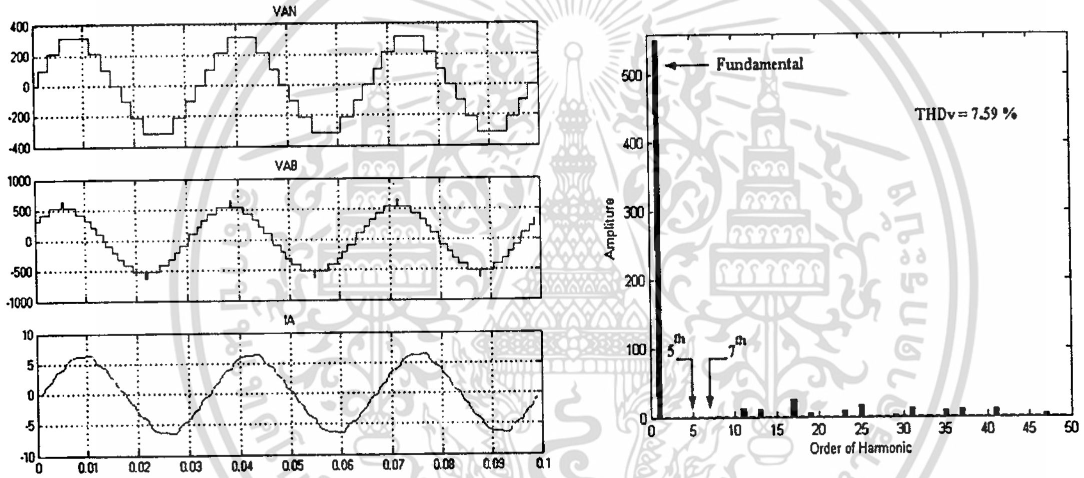
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 323 W, 323 W และ 323 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



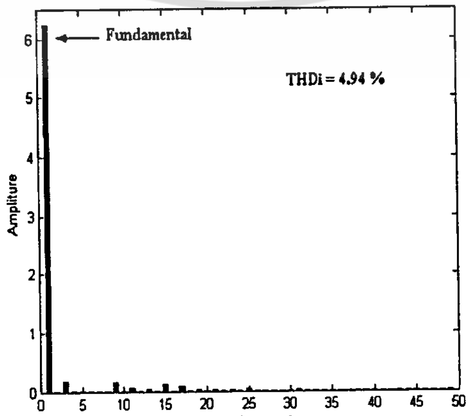
(ก) (ข)

รูปที่ 4.60 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 30 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.61 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 30 Hz

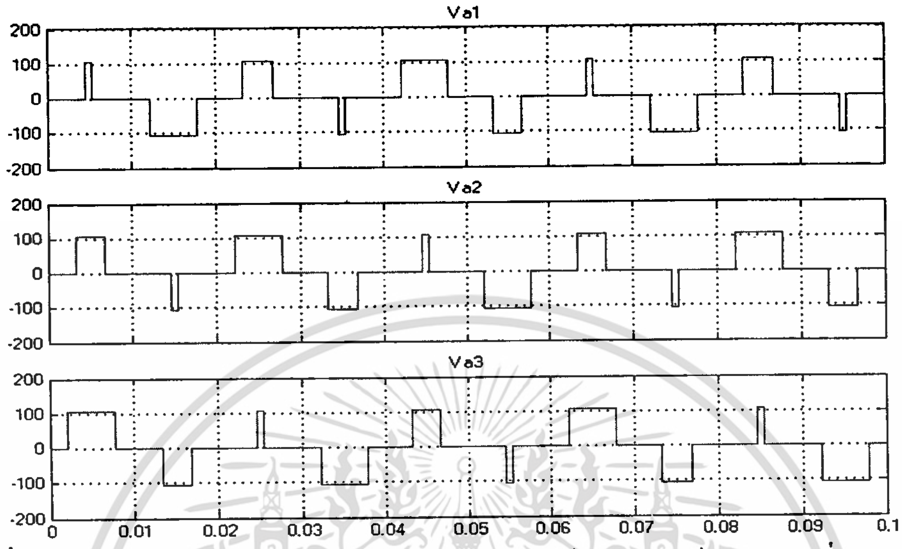


รูปที่ 4.62 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

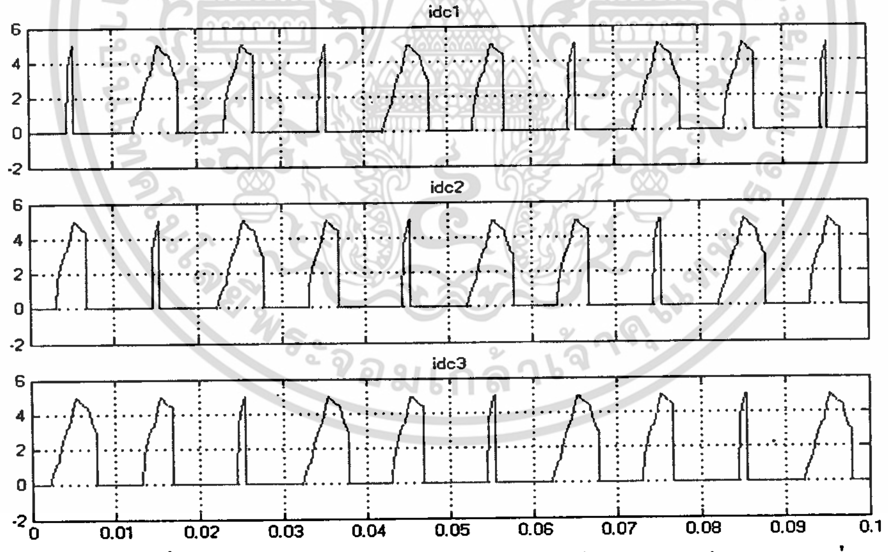
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.4 ที่ f = 50 Hz, M = 0.6

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.3876°$, $\alpha_2 = 55.5215°$ และ $\alpha_3 = 78.8979°$



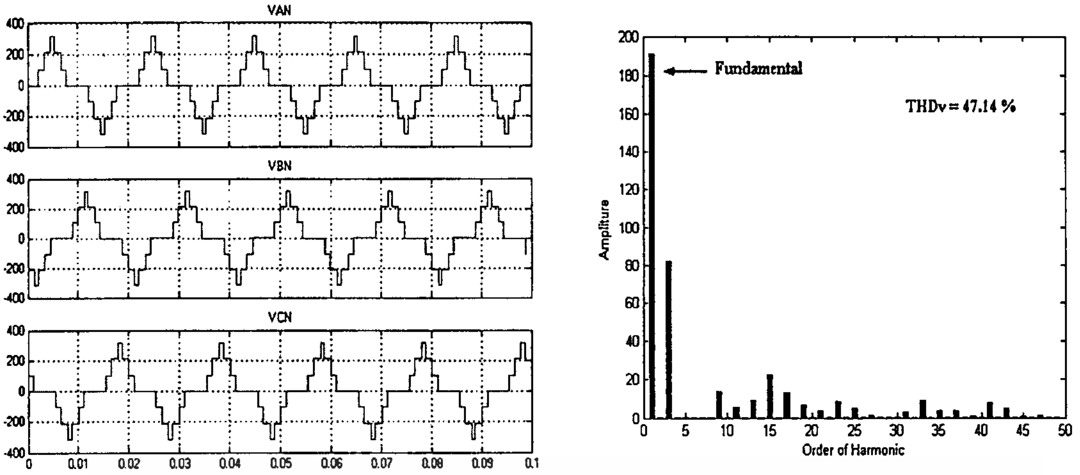
รูปที่ 4.63 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz



รูปที่ 4.64 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

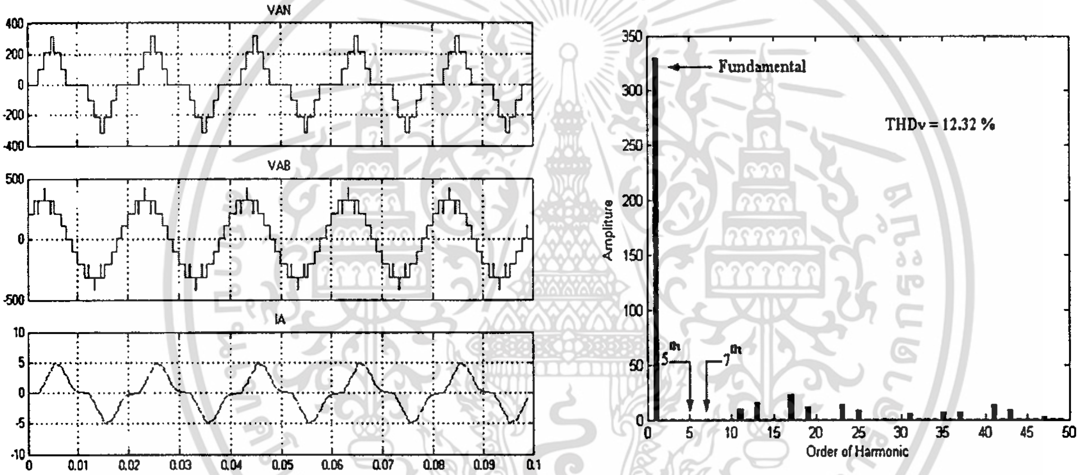
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 122.8 W, 122.8 W และ 122.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



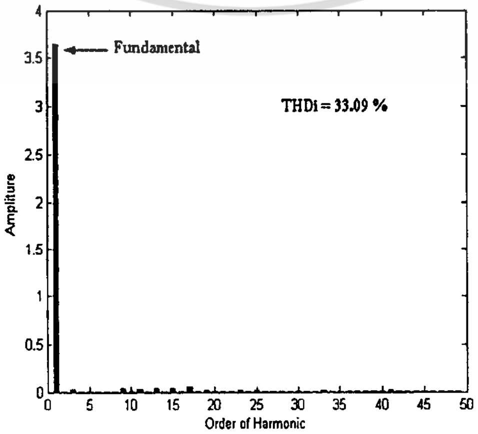
(ก) (ข)

รูปที่ 4.65 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.66 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz

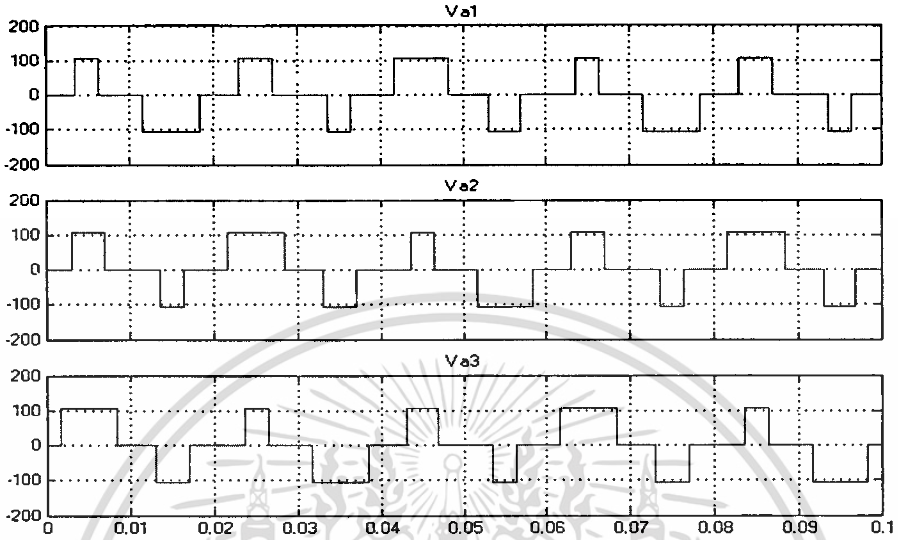


รูปที่ 4.67 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

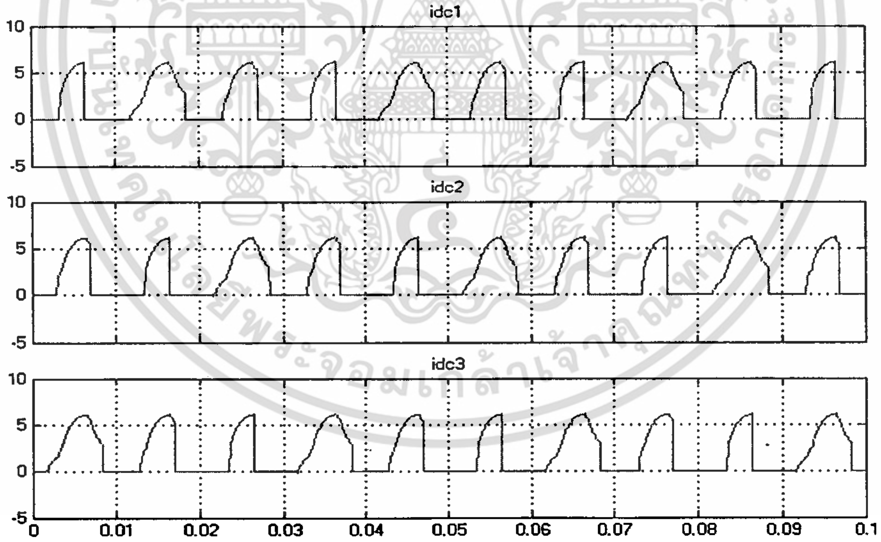
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.5 ที่ f = 50 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น α_1 = 29.2355°, α_2 = 54.4383° และ α_3 = 64.4844°



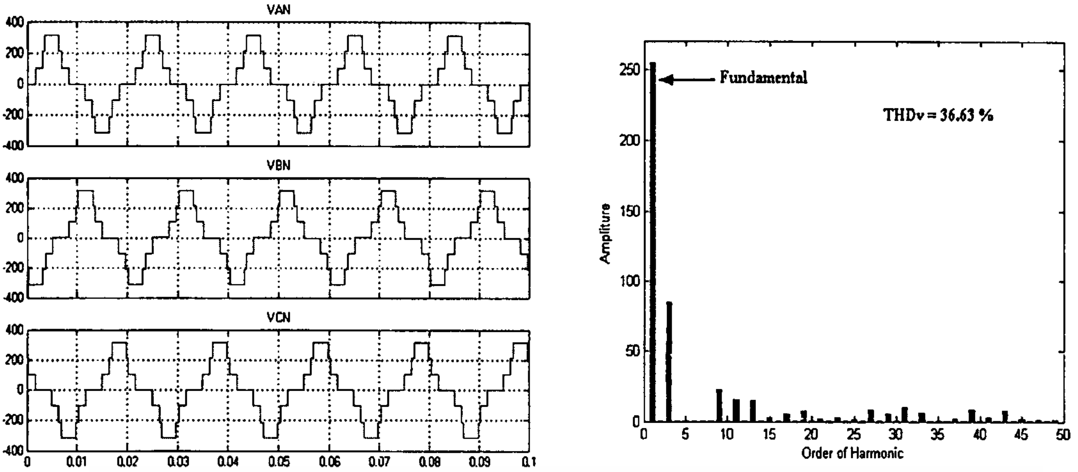
รูปที่ 4.68 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz



รูปที่ 4.69 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

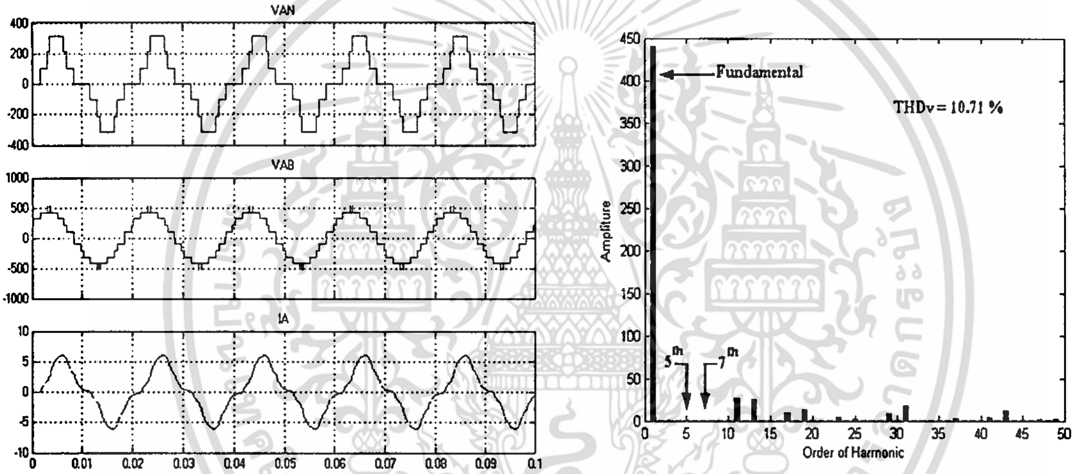
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 209.7 W, 209.7 W และ 209.7 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



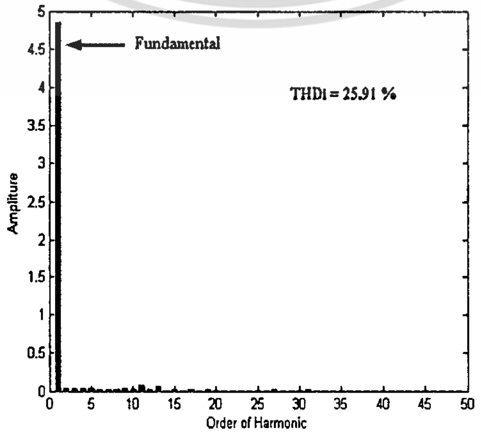
(ก) (ข)

รูปที่ 4.70 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.71 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz

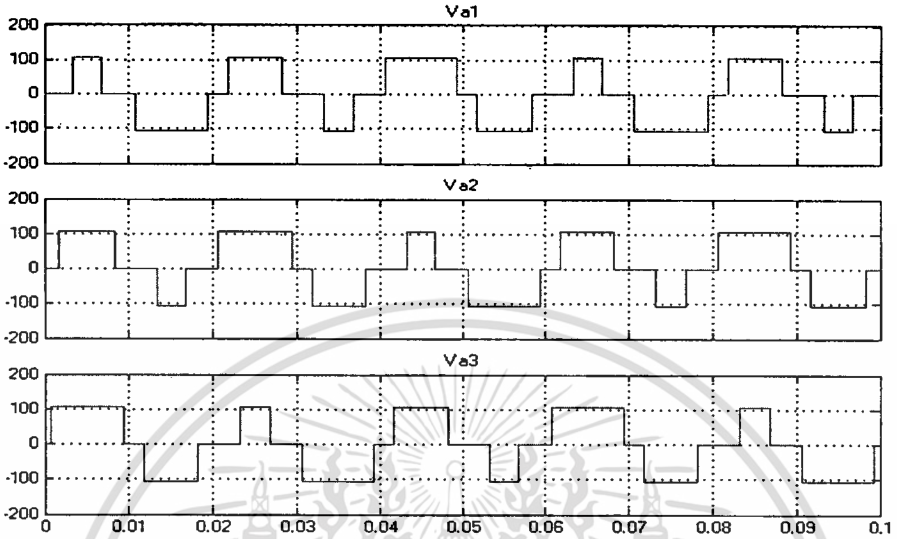


รูปที่ 4.72 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

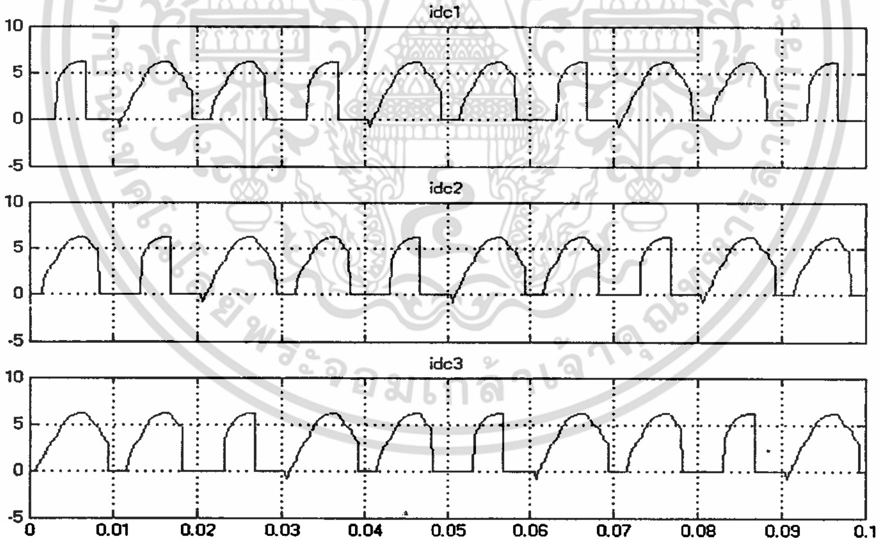
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.6 ที่ *f* = 50 Hz, *M* = 1

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ *f* = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทซึ่งเป็น α_1 = 11.6817°, α_2 = 31.1783° และ α_3 = 58.5774°



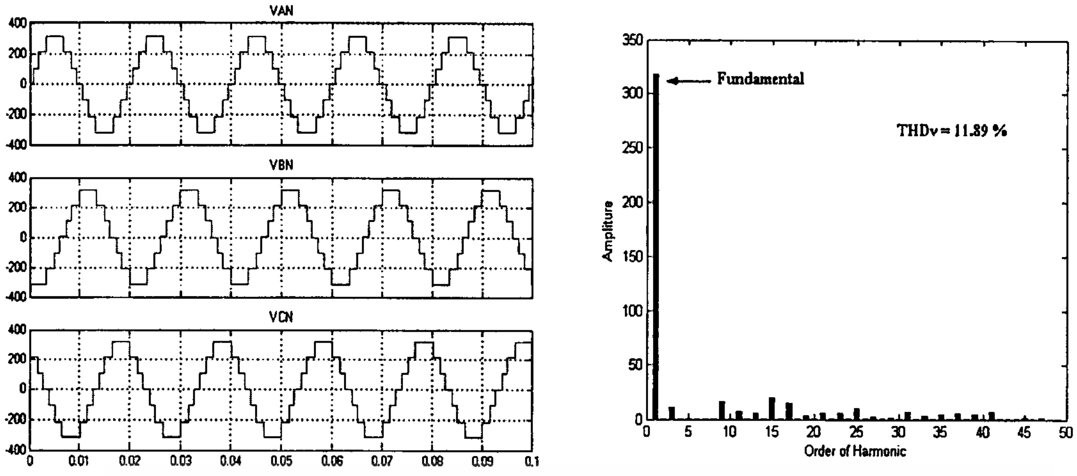
รูปที่ 4.73 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ *f* = 50 Hz



รูปที่ 4.74 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ *f* = 50 Hz

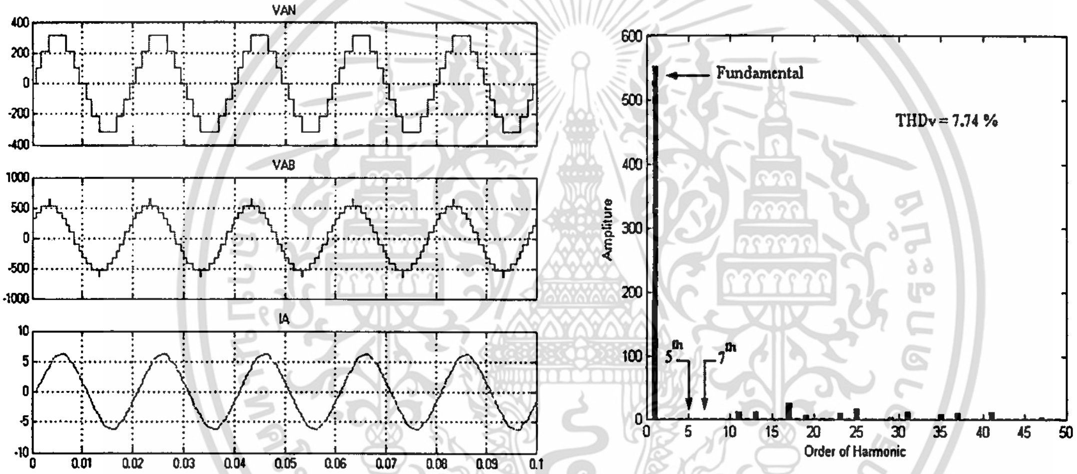
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 307.5 W, 307.5 W และ 307.5 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



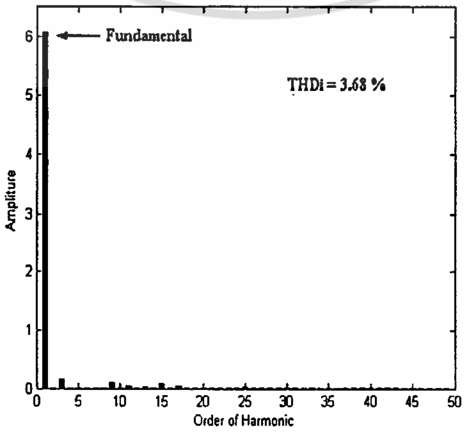
(ก) (ข)

รูปที่ 4.75 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 50 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.76 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 50 Hz

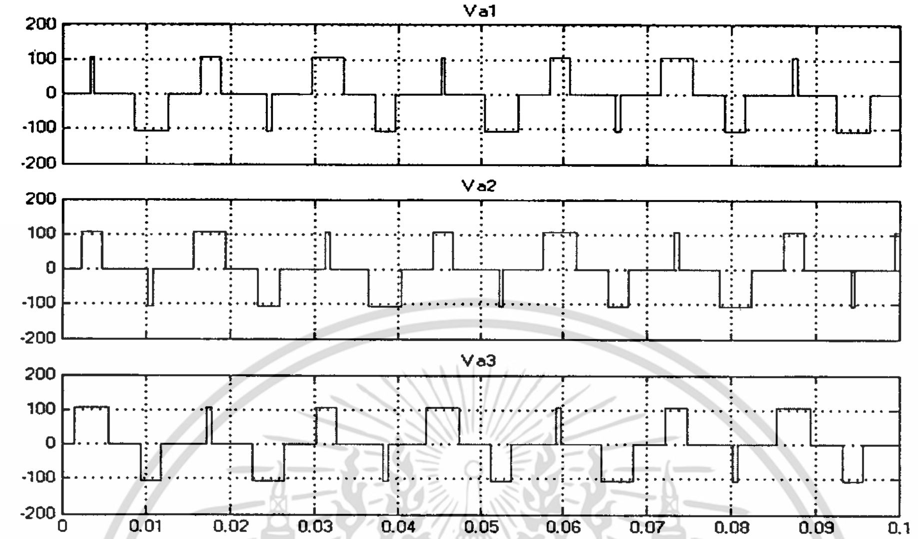


รูปที่ 4.77 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

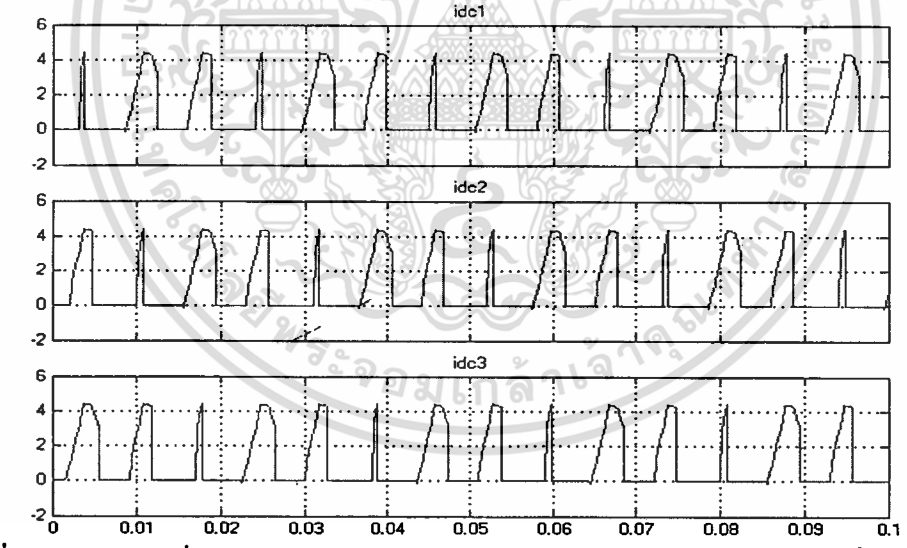
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.7 ที่ f = 70 Hz, M = 0.6

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 70 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.3876°$, $\alpha_2 = 55.5215°$ และ $\alpha_3 = 78.8979°$



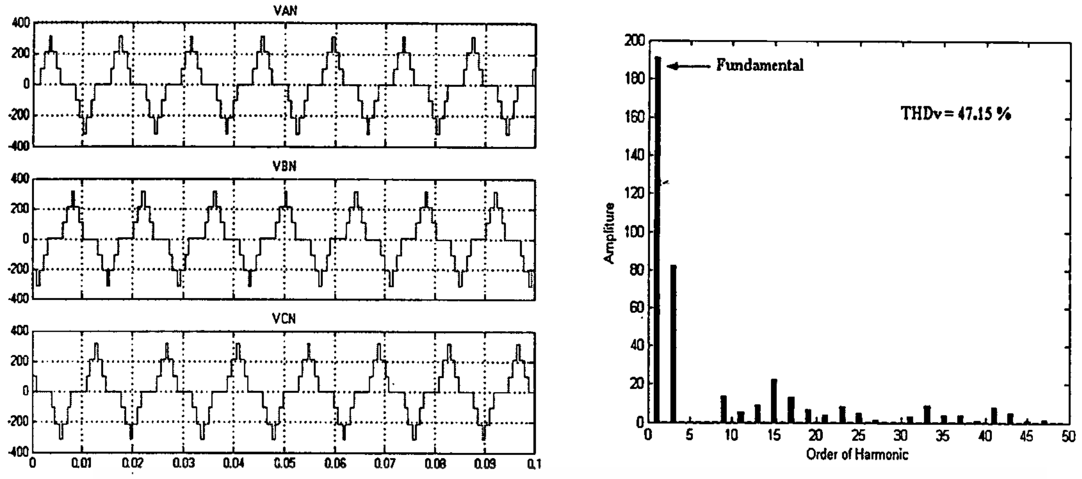
รูปที่ 4.78 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.79 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

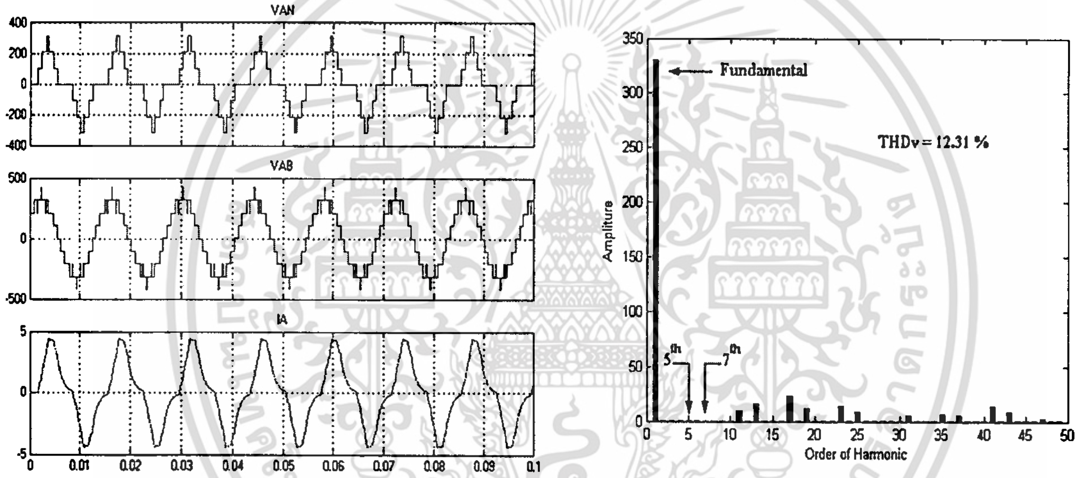
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 105.6 W, 105.6 W และ 105.6 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



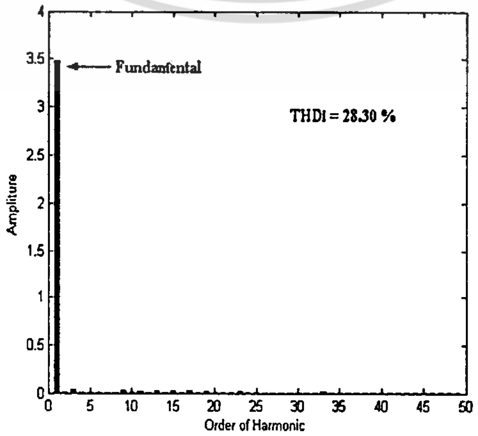
(ก) (ข)

รูปที่ 4.80 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn}, v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.81 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz

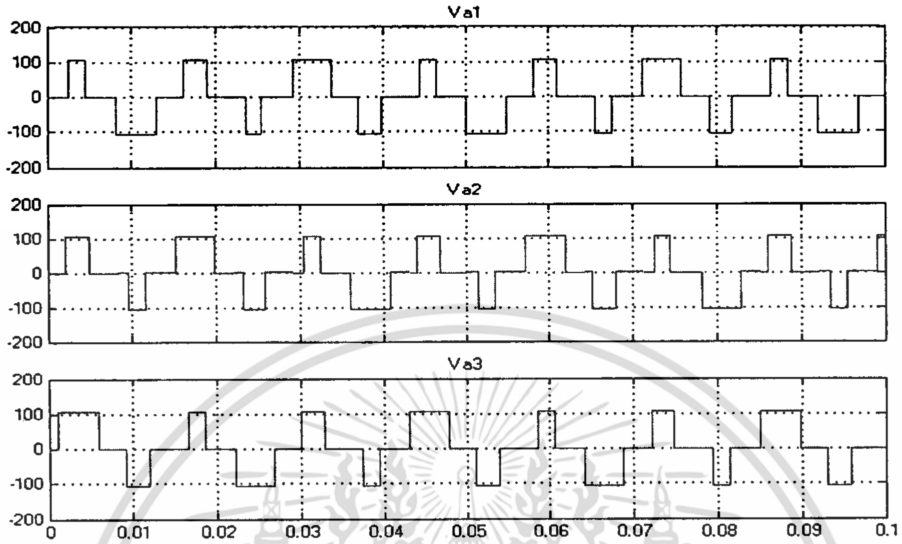


รูปที่ 4.82 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

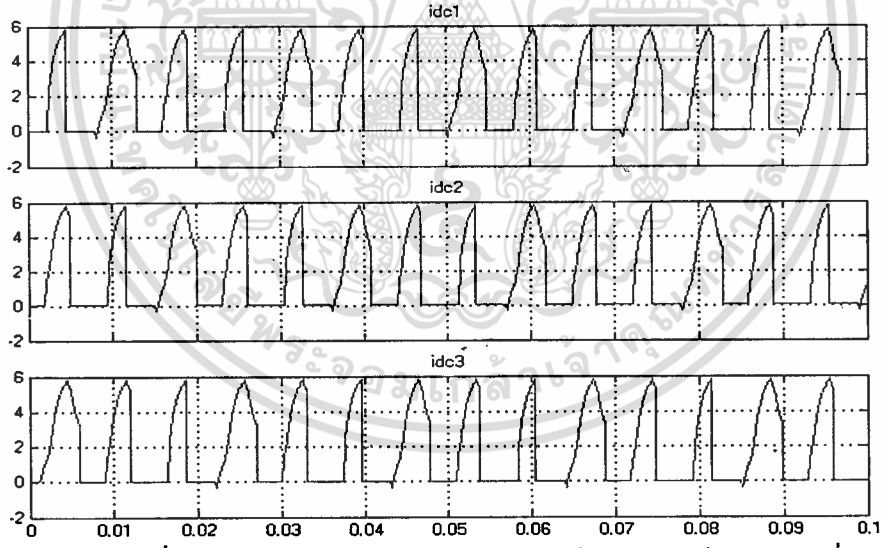
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.8 ที่ f = 70 Hz, M = 0.8

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ f = 70 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



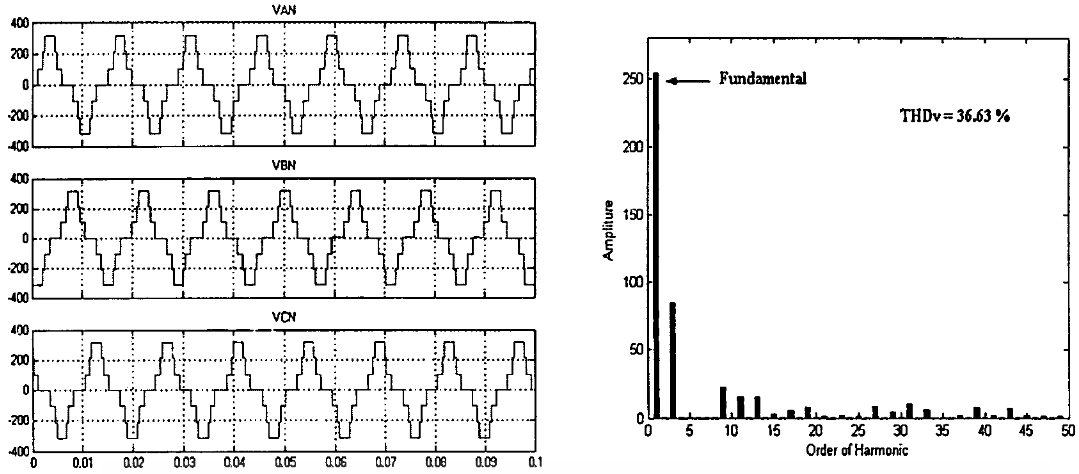
รูปที่ 4.83 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.84 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

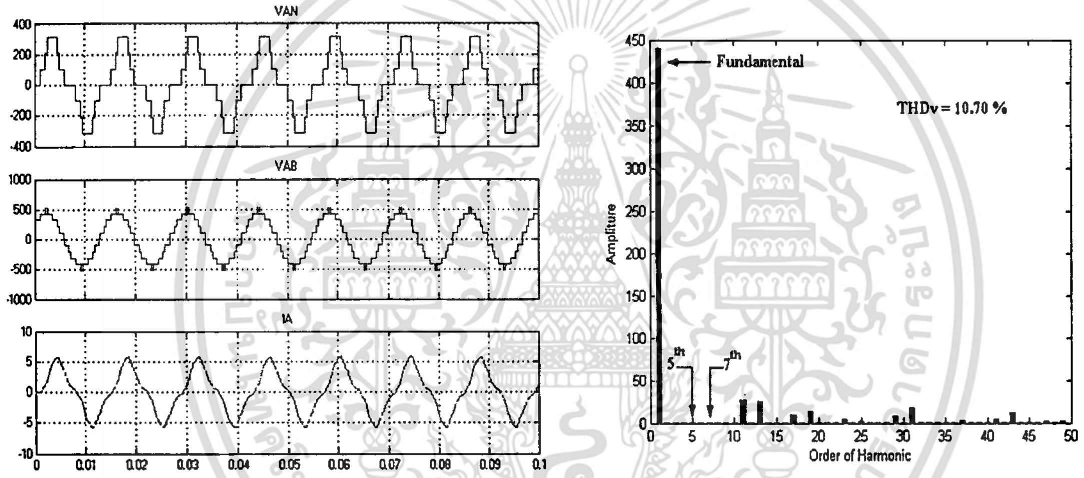
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 182.1 W, 182.1 W และ 182.1 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



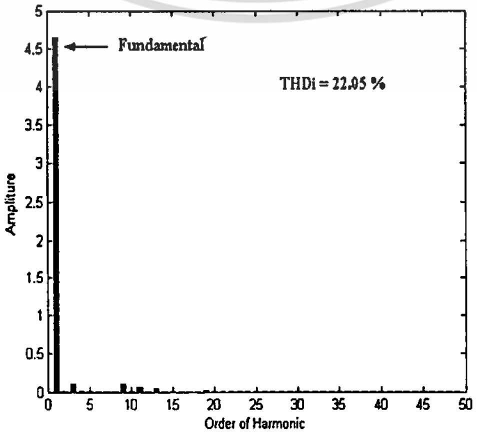
(ก) (ข)

รูปที่ 4.85 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.86 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz

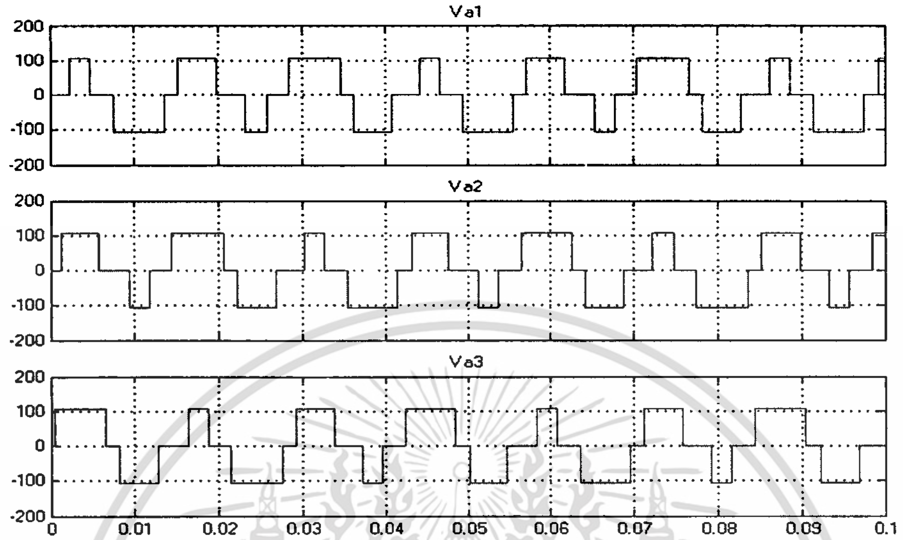


รูปที่ 4.87 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

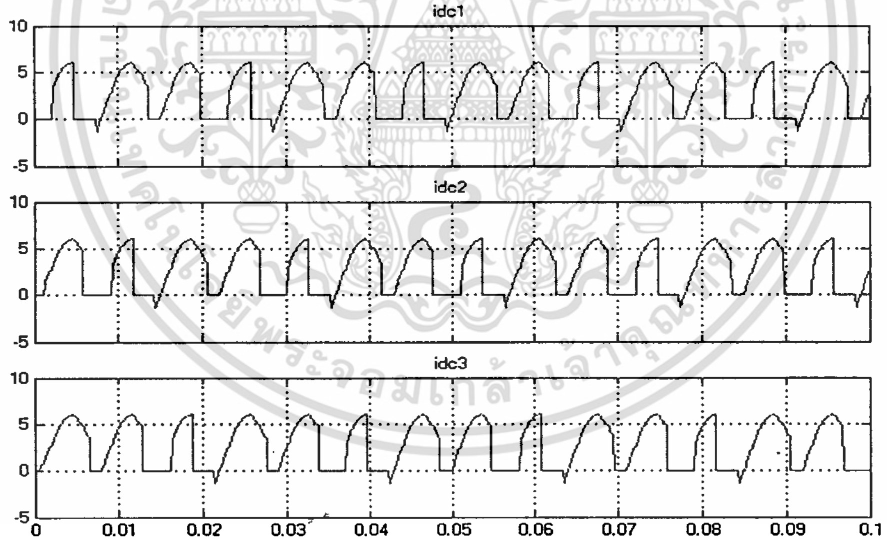
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.9 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 1$

ทำการจำลองระบบเมื่อกำหนดให้ $f = 70$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทซึ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



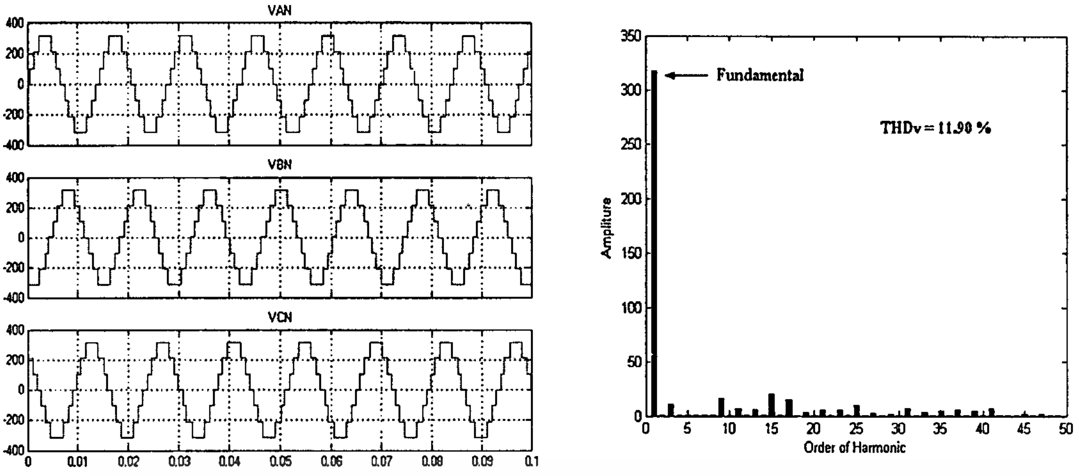
รูปที่ 4.88 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz



รูปที่ 4.89 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

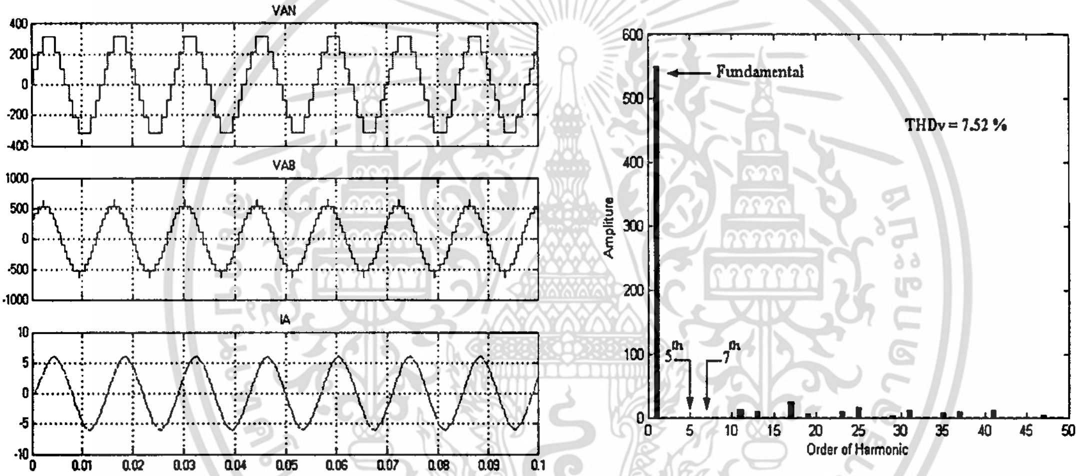
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 277.6 W, 277.6 W และ 277.6 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



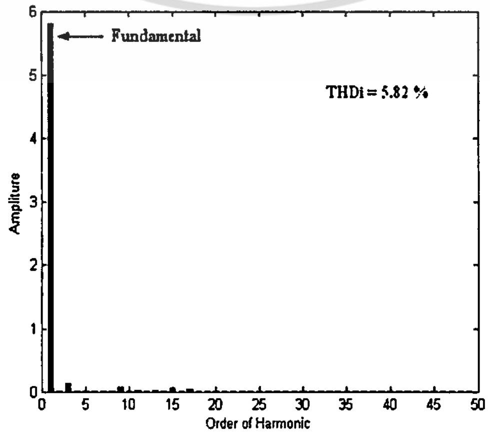
(ก) (ข)

รูปที่ 4.90 สัญญาณแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an}, v_{bn} , v_{cn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) (ข)

รูปที่ 4.91 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท v_{an}, v_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{ab} ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 4.92 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 สรุปผลการจำลอง ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

จากผลการจำลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ (% THD_V) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่น ซึ่งมีความถี่กำหนด f_1 เท่ากับ 30 Hz, f_2 เท่ากับ 50 Hz, และ f_3 เท่ากับ 70 Hz จากผลการจำลองจะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้เท่ากัน ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก ได้มีการปรับปรุงรูปแบบของการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงานนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ดัชนีมอดูเลชั่น	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 30 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
M	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	133.4	133.4	133.4	122.8	122.8	122.8	105.6	105.6	105.6
0.8	225	225	225	209.7	209.7	209.7	182.1	182.1	182.1
1	323	323	323	307.5	307.5	307.5	277.6	277.6	277.6

ส่วนในด้านของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (% THD) ของแรงดันไลน์ จากผลการจำลองจะเห็นว่า ที่ทุกค่าความถี่ที่กำหนด เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น ค่า THD ของแรงดันไลน์จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์

ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ และกระแสไลน์ (% THD)					
	30 Hz		50 Hz		70 Hz	
	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a
0.6	12.32	38.47	12.32	33.09	12.31	28.30
0.8	10.70	30.14	10.71	25.91	10.70	22.05
1	7.59	4.94	7.74	3.68	7.52	5.82

4.3 สรุป

จากผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถยืนยันการทำงานทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และในกรณีที่แหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลนั้นเป็นไปตามหลักการในบทที่ 2 และ 3 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้นค่าความผิดเพี้ยน THD_V ของแรงดันไลน์จะลดลง และเมื่อค่าความถี่ทางด้านเอาท์พุทเพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยน THD_V ของแรงดันไลน์เปลี่ยนแปลง (ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นเดียวกัน) ซึ่งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล จะเห็นว่าในกรณีนี้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่เท่ากันคือ เซลล์ที่ 1 น้อยกว่าเซลล์ที่ 2 น้อยกว่าเซลล์ที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเกิดจากรูปแบบการสวิทซ์ที่ทำให้ ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ไม่เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน ซึ่งจะส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ มีอายุการใช้งานไม่เท่ากัน ส่วนในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล จะเห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงการสวิทซ์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงานนั่นเอง และจากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงในการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะนำเสนอในบทต่อไป

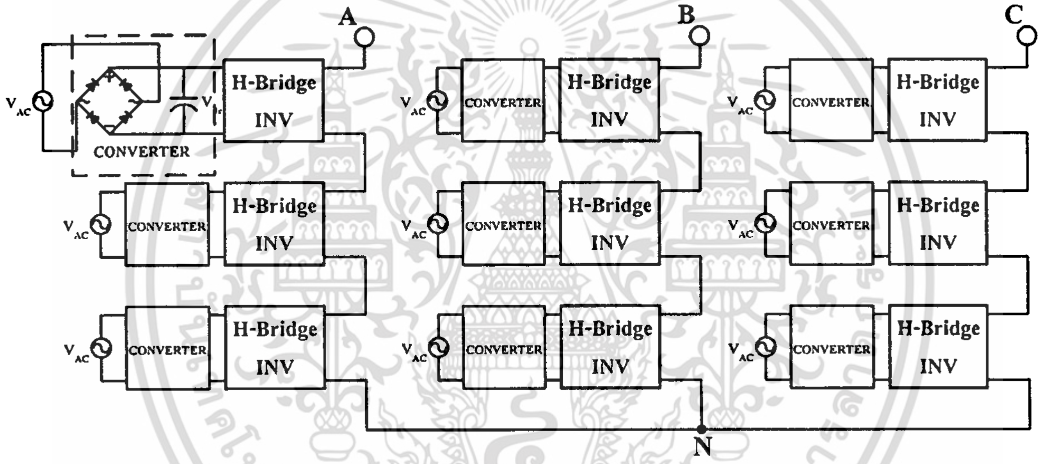
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

5.1 บทนำ

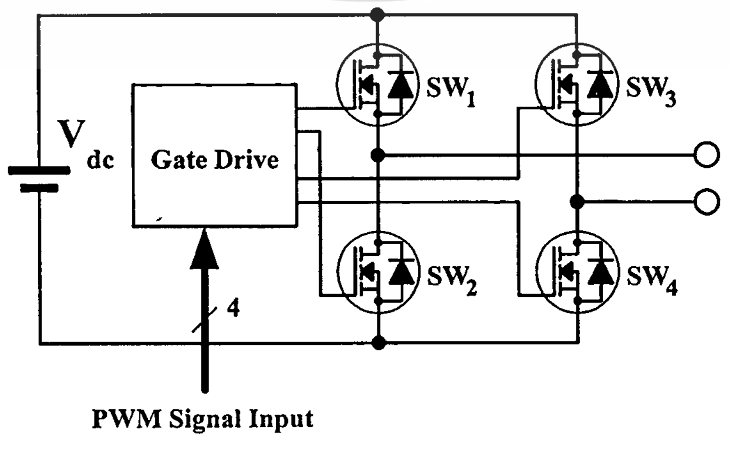
ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบ ซึ่งจะประกอบด้วย วงจรสวิทช์กำลัง, การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงให้กับอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด, วงจรขับนำเกท, วงจรควบคุม และการออกแบบโปรแกรม เพื่อสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบ

5.2 การออกแบบวงจรกำลัง



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

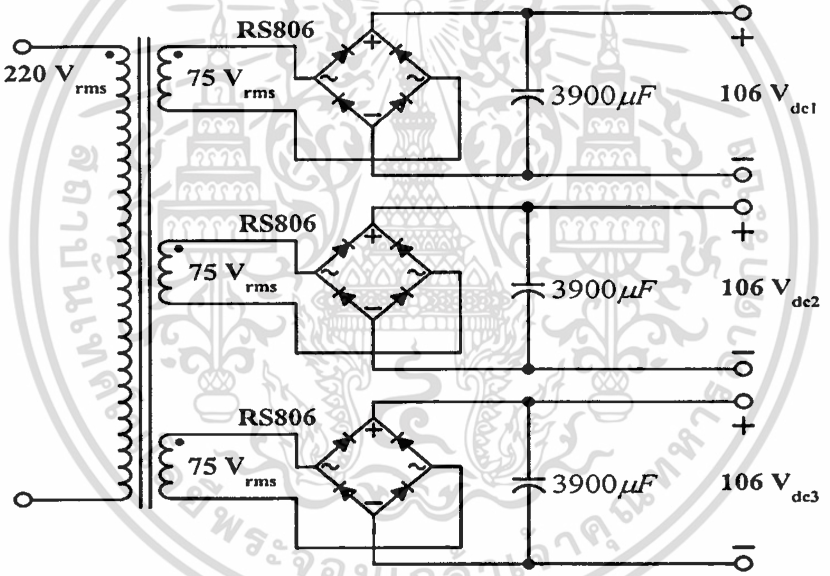
5.2.1 การออกแบบสวิทช์กำลัง



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างของวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดสอบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า 380 โวลท์ ด้วยอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด สำหรับอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดในแต่ละเฟสจะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ดังรูปที่ 5.2 จำนวน 3 ชุด (3 เฟสจะใช้ 9 ชุด) โดยนำเอาท์พุทมาทำการต่ออนุกรมกัน และได้ออกแบบให้แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดต่อเฟสมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 220 V_{rms} ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดนั้น จะได้จากแบตเตอรี่หรือเซลล์พลังงานชนิดอื่นที่สามารถแยกอิสระต่อกัน แต่เนื่องจากต้องใช้งบประมาณสูงในการจัดหา ในงานวิจัยนี้จึงได้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแยกแท็ปแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 5.3 ได้เลือกใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์เป็นบริดจ์ไดโอดเบอร์ RS806 ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีริปเปิล ใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน (Filter Capacitor) เพื่อกรองแรงดันให้เรียบ ซึ่งมีวิธีในการออกแบบดังนี้



รูปที่ 5.3 ชุดวงจรแหล่งจ่ายคอนเวอร์เตอร์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดในเฟส A

การหาค่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงในแต่ละเซลล์หาได้จาก

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{s} \tag{5.1}$$

ตัวอย่างเช่น ต้องการแรงดันเอาท์พุท 220 V_{rms} ที่อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{3}$$

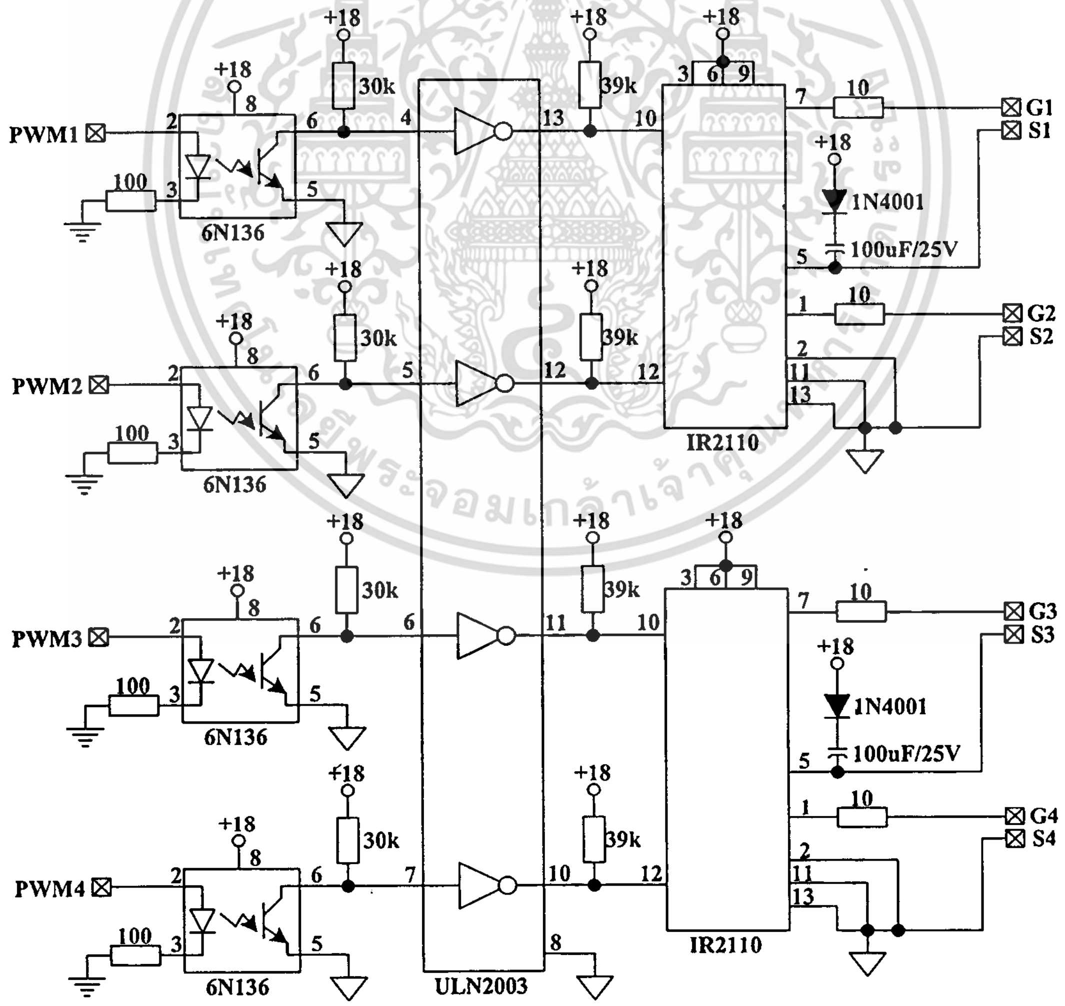
$$= 103.708 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 106 V_{dc} จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแยกแท็ปแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 V_{rms} เป็น 75 V_{rms} ทั้งหมด 9 ชุด (3 เฟส) เพื่อให้เมื่อผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์แล้วจะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 106 V_{dc} ตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และได้เลือกใช้อุปกรณ์สวิทช์เป็นมอสเฟสชนิดเอ็นเบอร์ IRFS640N ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 200 V และพิกัดกระแส 18 A เป็นอุปกรณ์ในการสวิทช์

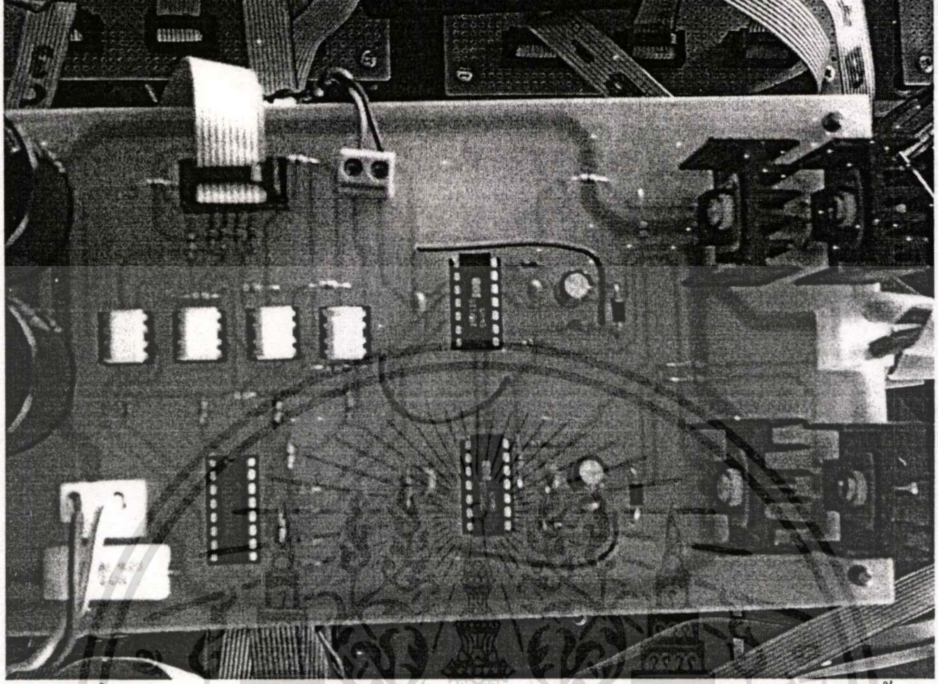
5.2.2 การออกแบบวงจรขับนำเกท

วงจรขับนำเลือกใช้ไอซีเบอร์ IR2110 เป็นตัวขับนำเพราะสามารถใช้ไฟเลี้ยงเพียงชุดเดียว ทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงและต้นทุนก็มีราคาลดลง โดยใช้ออปโต้เบอร์ 6N136 ต่อแบบกลับสัญญาณ (Invert) เพื่อแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุม และใช้ไอซีเบอร์ ULN2003 เพื่อกลับสัญญาณให้เป็นเหมือนด้านอินพุทก่อนเข้าไอซีขับนำ

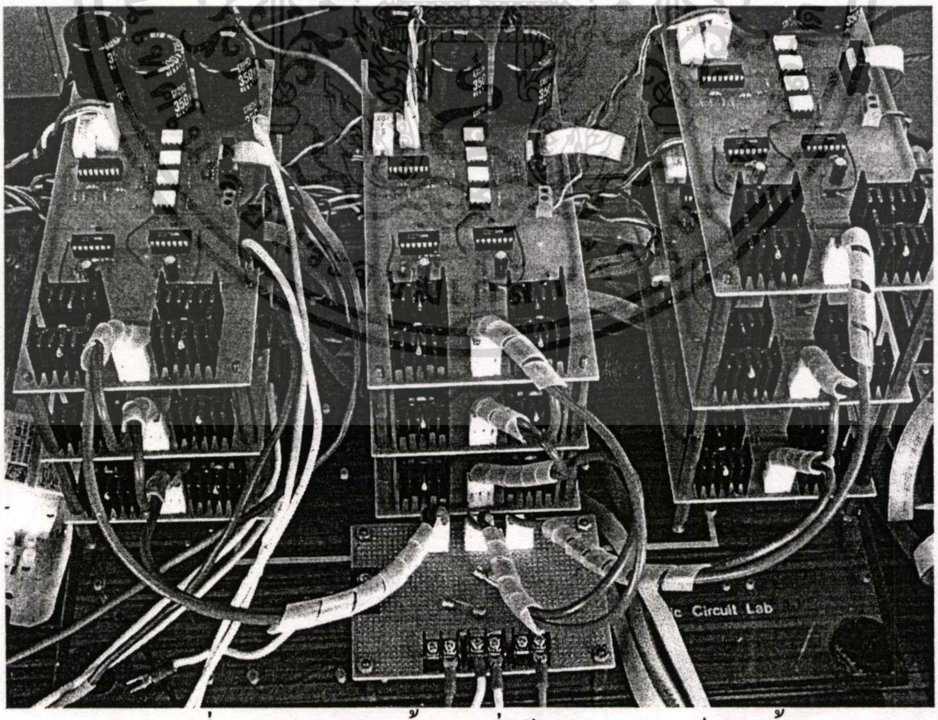


รูปที่ 5.4 วงจรขับนำเกทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 5.6 วงจรกำลังทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

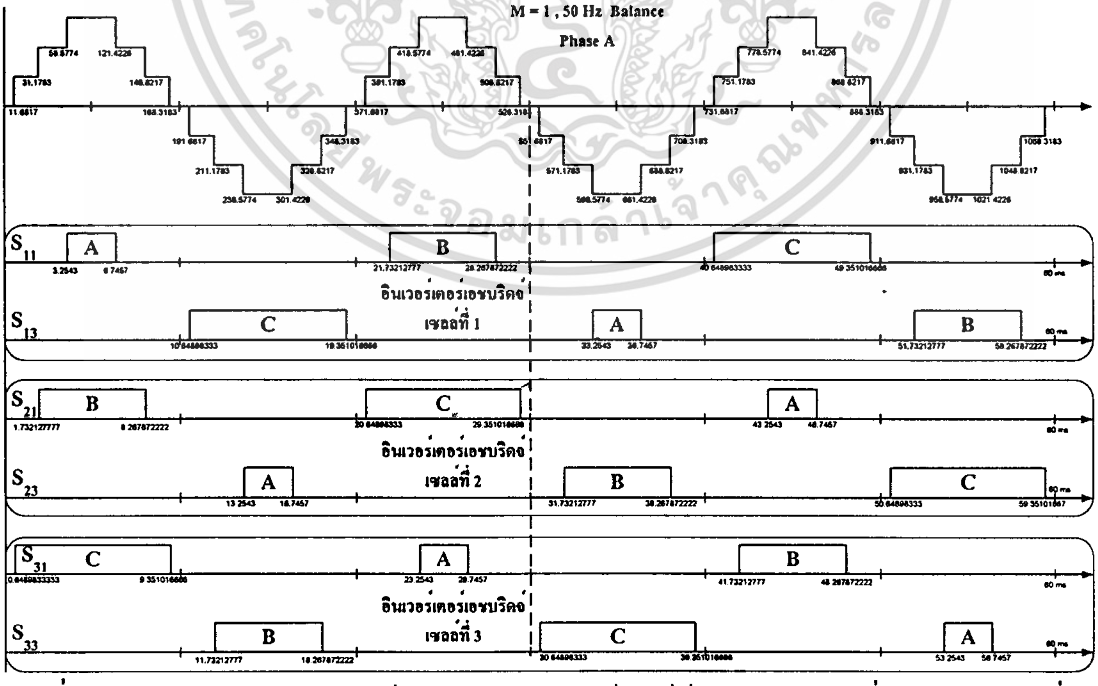
5.3 การออกแบบวงจรควบคุม

ในการออกแบบวงจรควบคุม นั้นความยุ่งยากจะทวีตามจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ เพราะนั่นหมายถึงจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากใช้ระบบการควบคุมแบบอนาล็อกจะต้องใช้ตัวคอมแพเลเตอร์หลายชุดด้วยกัน ซึ่งใช้การคอมแพเลเตอร์ในทางอนาล็อกแม้จะง่ายต่อการออกแบบหก็จริงแต่ก็จะพบความยุ่งยากในเรื่องวงจรที่ซับซ้อน และค่าออฟเซ็ททที่จะเกิดขึ้น วิธีการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ไมโครคอนโทรเลอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและควบคุมการทำงาน เพราะจะทำให้วงจรควบคุมมีขนาดเล็กลงและสามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้สะดวกกว่า

จากบทที่ 3 สามารถนำค่าของมุมสวิทชิ่งและเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) มาทำการออกแบบรูปแบบของการสวิทช์ได้ดังนี้

5.3.1 สัญญาณเกทของสวิทช์แต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันไดร่วมกับเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เป็นสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{11}, S_{13}, S_{21}, S_{23}, S_{31} และ S_{33} ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดในเฟส A ส่วนในเฟส B และเฟส C มุมระหว่างเฟสจะเป็น 120° และ 240° ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าช่วงของคาบเวลาการทำงานในหนึ่งคาบจะถูกยืดออกไปเป็น 60 ms จากเดิม 20 ms โดยจะมีหลักการอยู่ว่า จะต้องสร้างสัญญาณการสวิทช์ในหนึ่งคาบเวลาการทำงานจะต้องครบหมดทุกลักษณะ ซึ่งจะเห็นว่าจากรูปที่ 5.7 นั้น

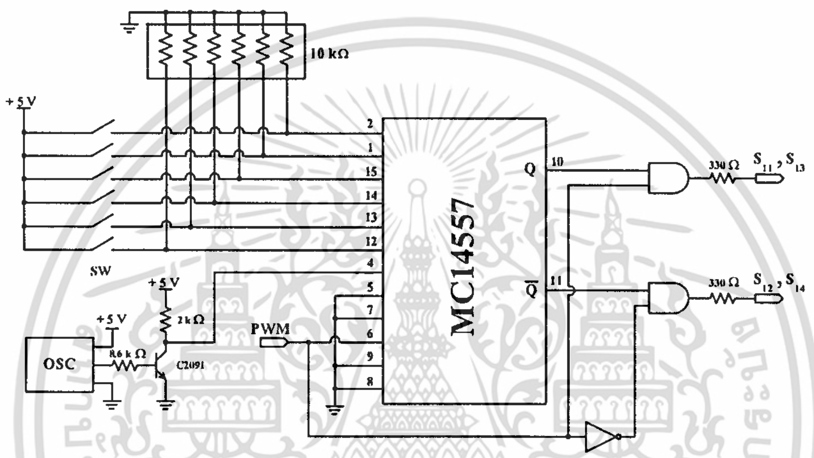


รูปที่ 5.7 สัญญาณเกทของสวิทช์แต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับเฟส A ที่ ค่าดัชนีมอดูเลชั่นเท่ากับ 1 ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบเวลาในการทำงานจะเท่ากับ 60 ms ซึ่งในช่วงเวลานี้สวิทช์แต่ละตัวจะมีลักษณะของการทำงานครบทั้ง 3 ลักษณะคือ จะมีทั้ง A, B และ C ทุกตัว และในแต่ละครึ่งของคาบเวลาการทำงานสวิทช์ S_{11}, S_{13}, S_{21}, S_{23}, S_{31} และ S_{33} ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์ จะต้องมีลักษณะการทำงานที่ไม่ซ้ำกันด้วย จึงจะส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้เท่าๆ กัน

5.3.2 วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์)



รูปที่ 5.8 วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เนื่องจากในการทำงานของมอสเฟสนั้น อาจมีการสวิทซ์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกันส่งผลให้เกิดการลัดวงจรภายในกิ่งเดียวกันและทำให้มอสเฟสกิ่งนั้นเสียหายได้ โดยวงจรที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณประวิงเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ไอจีบีทีโมดูลในกิ่งเดียวกัน เกิดการสวิทซ์พร้อมกัน โดยใช้วงจรประวิงเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 สัญญาณขับเกตกิ่งบนและกิ่งล่างต้องมีค่าเวลาหน่วงกันเล็กน้อยและเวลาในการประวิงเวลานี้จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการไต่ขึ้นและการไต่ลงของอุปกรณ์สวิทซ์แต่ละประเภท

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าสัญญาณเกทของสวิทช์จะมีเฉพาะสวิทช์ S_{11}, S_{13}, S_{21}, S_{23}, S_{31} และ S_{33} ส่วนสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{12} และ S_{14} จะได้จากการนำสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{11} และ S_{13} ผ่านวงจรวงจรประวิงเวลา สัญญาณเกทของสวิทช์ S_{22} และ S_{24} จะได้จากการนำสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{21} และ S_{23} ผ่านวงจรวงจรประวิงเวลา และสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{32} และ S_{34} จะได้จากการนำสัญญาณเกทของสวิทช์ S_{31} และ S_{33} ผ่านวงจรวงจรประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงสัญญาณเกทสวิทช์

เฟส	สัญญาณ
A	$S_{12} = \overline{S_{11}}$
	$S_{14} = \overline{S_{13}}$
	$S_{22} = \overline{S_{21}}$
	$S_{24} = \overline{S_{23}}$
	$S_{32} = \overline{S_{31}}$
	$S_{34} = \overline{S_{33}}$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าสัญญาณเกทของสวิทช์ในเฟส B และเฟส C ก็จะมีลักษณะเดียวกันกับตารางที่ 5.1

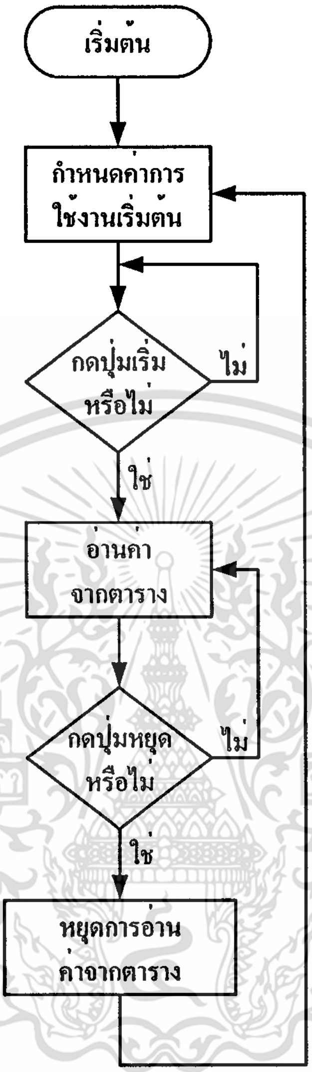
5.3.3 การออกแบบโปรแกรม

ในการออกแบบโปรแกรมจะต้องขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ที่ใช้งาน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งมีคุณสมบัติหลักๆ ดังนี้

- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มีแอคคิวมูลเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว
- มีไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต 5 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทม์เมอร์ 32 บิต
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสแซมบีมาตรฐาน
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 48 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ ROM ขนาด 2 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 กิโลไบต์ x 16 บิต
- มีวอตช์ด็อกไทม์เมอร์โปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม
- มีขาอินพุท-เอาท์พุท 30 ขา
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิตอล
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการสร้างสัญญาณเกทสวิทช์ในหัวข้อที่ 5.3.1 เมื่อนำมาเขียนเป็นโปรแกรมจะมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

โดยเทคนิคในการเขียนโปรแกรมในงานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิคการเปิดค่าในตาราง (Look Up Table) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและไม่ยุ่งยากในการเขียนโปรแกรม ซึ่งมีหลักการดังนี้

1) ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ของโปรแกรม

2) กดปุ่มเพื่อเริ่มต้นทำงาน

3) อ่านค่าจากตาราง

4) เปรียบเทียบค่าจากตารางกับค่าที่กำหนด

5) ส่งค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบไปยังบิตที่ต้องการแสดงค่า

6) กดปุ่มหยุดทำงาน

7) หยุดการอ่านค่าจากตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม ซึ่งในวงจรกำลังจะประกอบด้วยวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ, วงจรขับนำเกท, วงจรคอนเวอร์เตอร์ ส่วนวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วย วงจรประวิงเวลา (วงจรเดดไทม์) และชุดสร้างสัญญาณเกทสวิทช์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำมาควบคุมวงจรกำลังอีกทีหนึ่ง ส่วนโปรแกรมในการสร้างสัญญาณเกทสวิทช์ได้ถูกนำเสนอไว้ในภาคผนวก ง เมื่อทำการสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดได้แล้ว ในบทต่อไปจะนำเสนอการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการทดลอง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจากบทที่ 5 โดยจะทำการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทำการปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่นและความถี่มูลฐาน ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล และสรุปผลของการทดสอบ

6.2 การทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจากบทที่ 5 โดยจะทำการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งถูกต่อแบบวาย (Y) ดังรูปที่ 6.1 โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีใหญ่ๆ ด้วยกันคือ ที่กรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล ซึ่งทั้ง 2 กรณีนั้นจะทำการคงค่าดัชนีมอดูเลชั่นแล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าความถี่มูลฐาน ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นเป็น 0.6, 0.8, และ 1 ความถี่มูลฐานเป็น 40 Hz, 50 Hz, และ 70 Hz เพื่อศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นกับแรงดันเฟส, แรงดันไลน์และกระแสเอาท์พุท เมื่อความถี่มูลฐานและค่าดัชนีมอดูเลชั่นเปลี่ยนแปลง

พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดแรงดัน 220/380 Δ - Y

พิกัดกระแส 8.91/5.16 Δ - Y

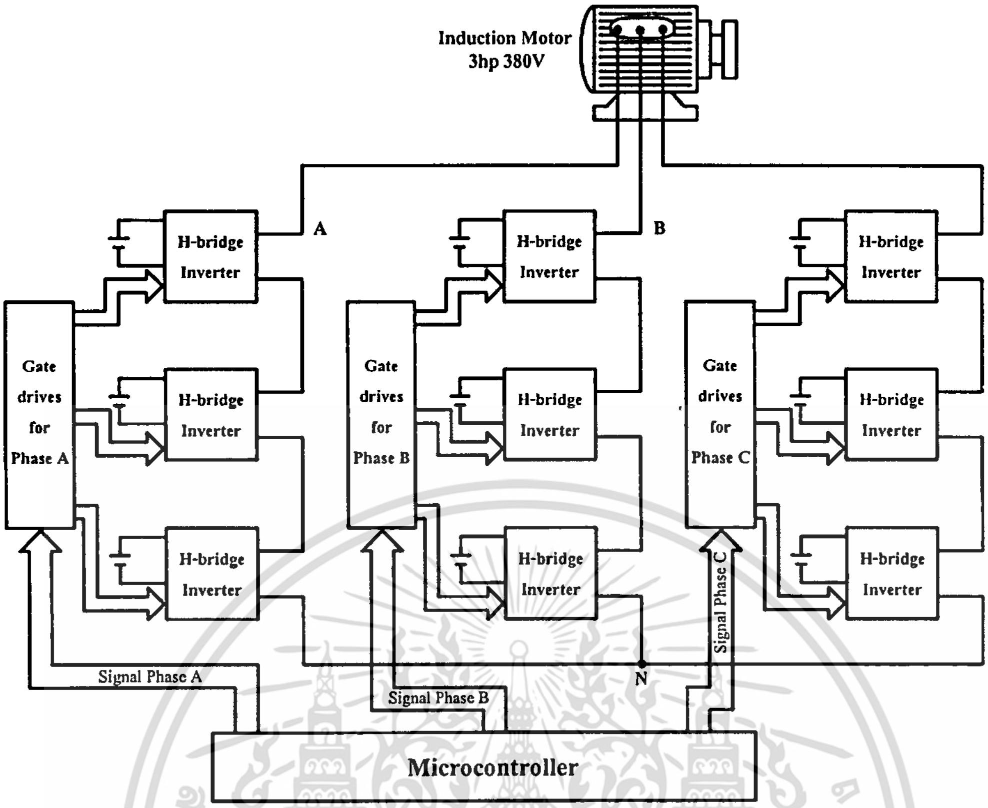
พิกัดกำลัง 3HP/2.2 kW

ความถี่ 50 Hz

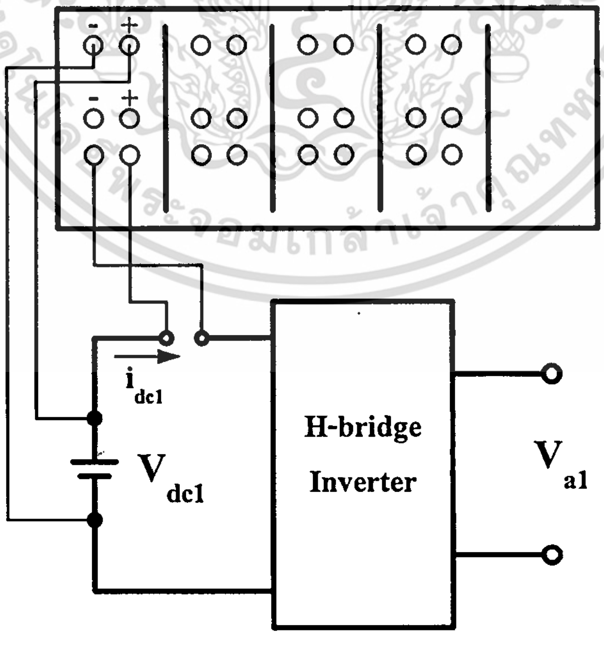
พิกัดความเร็วรอบ 1430 RPM

จำนวนขั้ว 4 POLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 วงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ใช้ในการทดสอบ



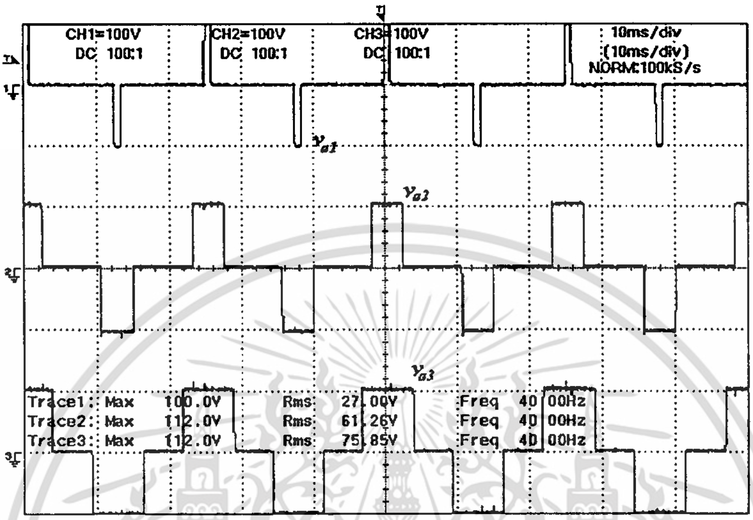
รูปที่ 6.2 แสดงการวัดกระแส, แรงดัน, และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

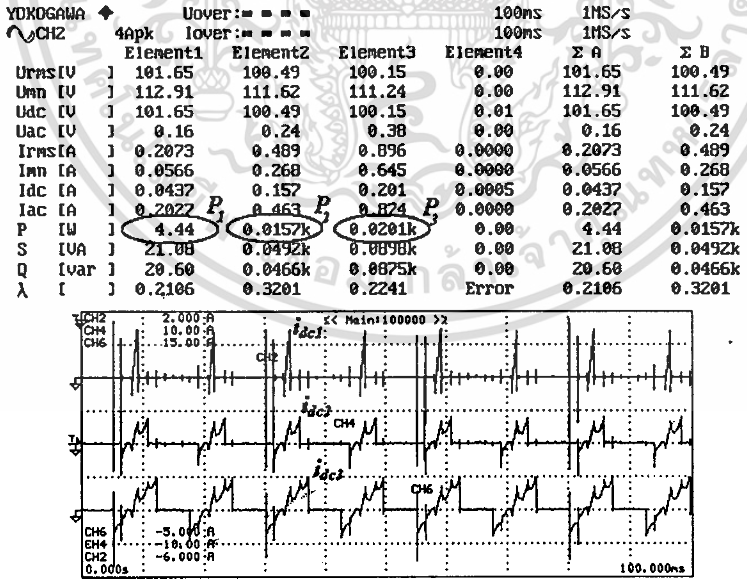
6.2.1 ทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

6.2.1.1 ที่ f = 40 *Hz*, *M* = 0.6

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 40 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



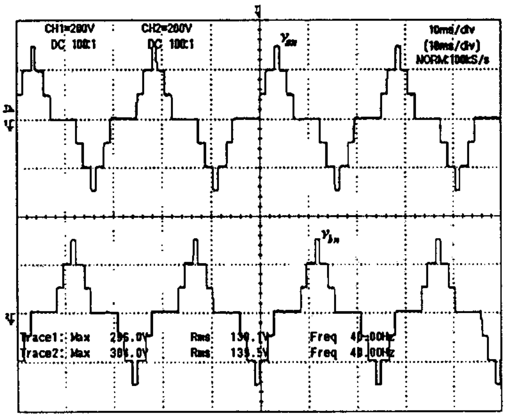
รูปที่ 6.3 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz



รูปที่ 6.4 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

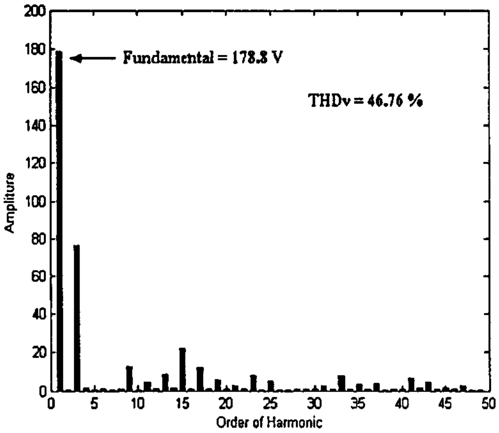
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 4.44 W, 15.7 W และ 20.1 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



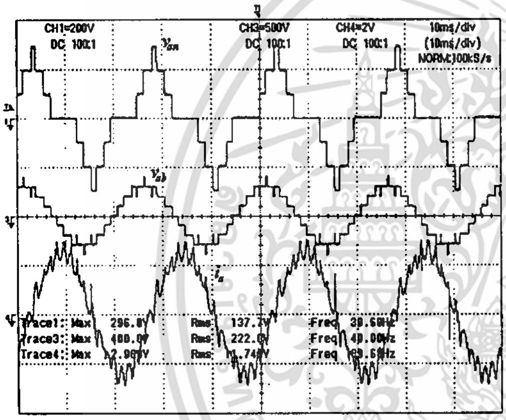
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div



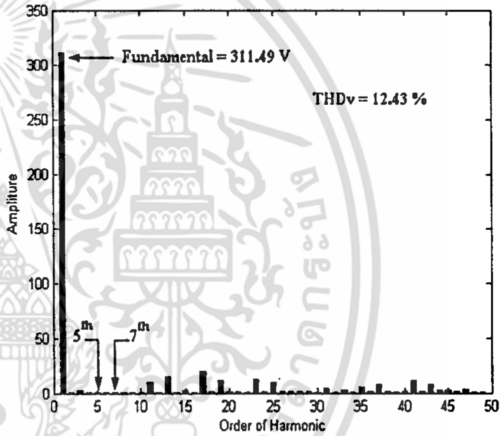
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.5 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz



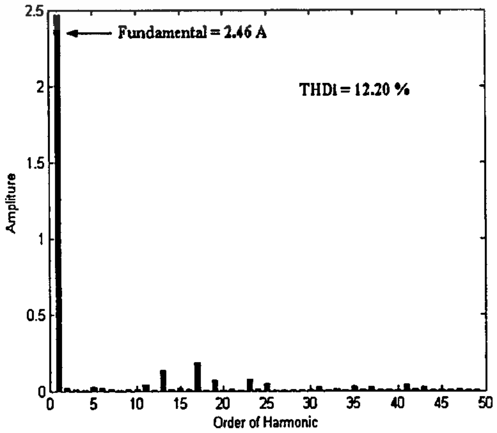
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.6 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz

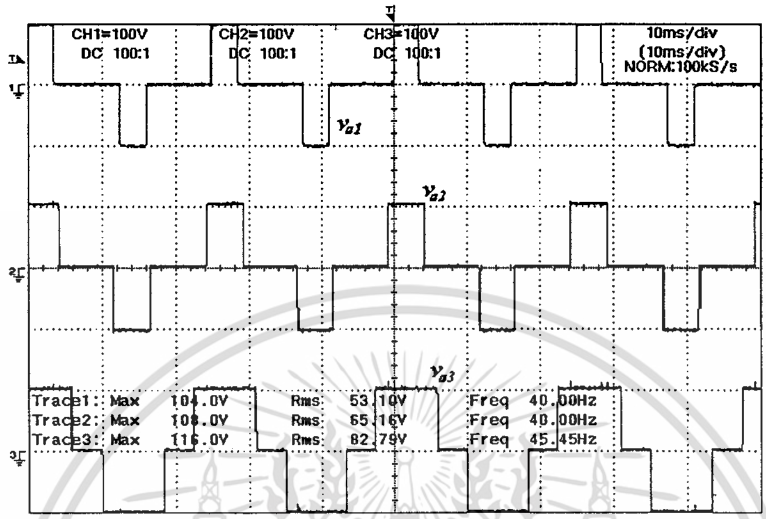


รูปที่ 6.7 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

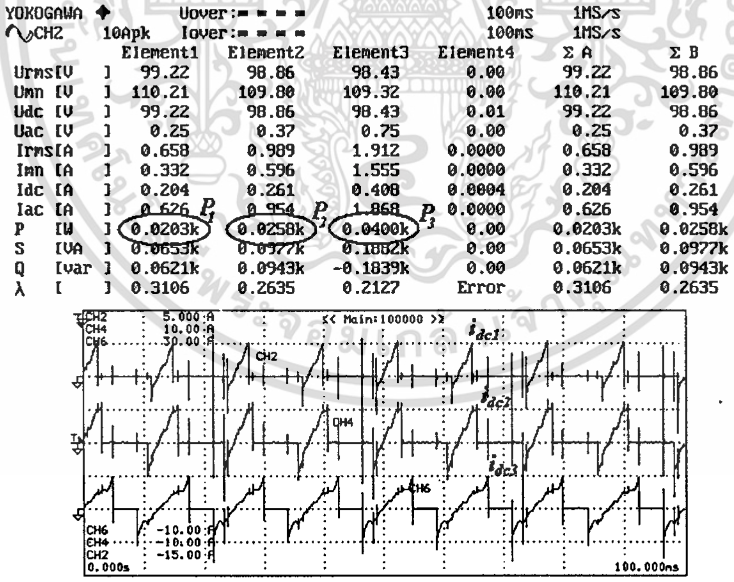
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.2 ที่ f = 40 Hz, M = 0.8

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 40 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



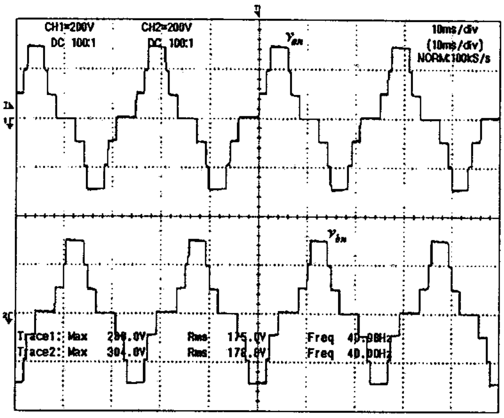
รูปที่ 6.8 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

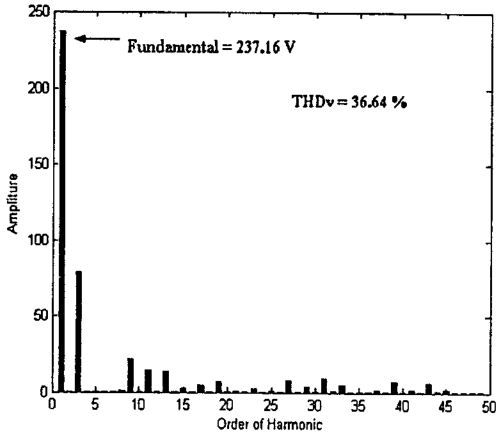


รูปที่ 6.9 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 20.3 W, 25.8 W และ 40 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

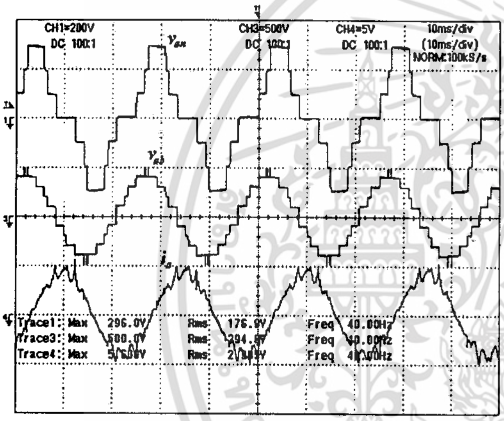


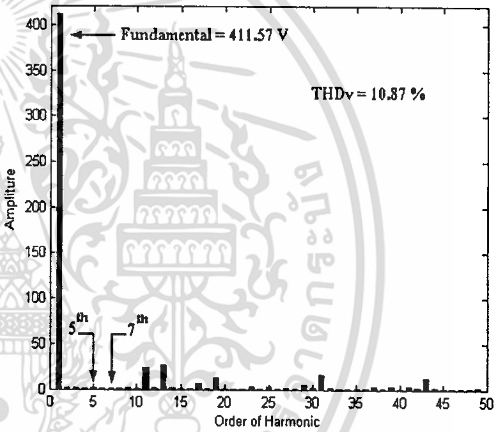


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn} (ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div

รูปที่ 6.10 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz

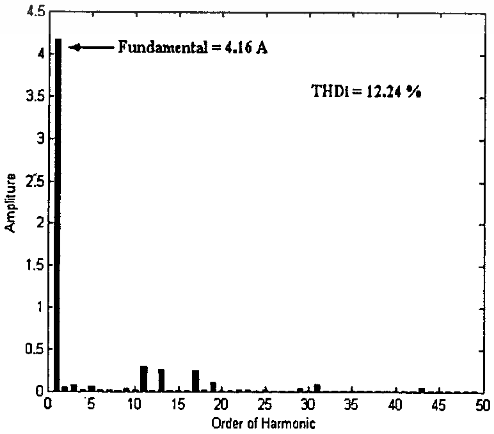




(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ (ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div

รูปที่ 6.11 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz

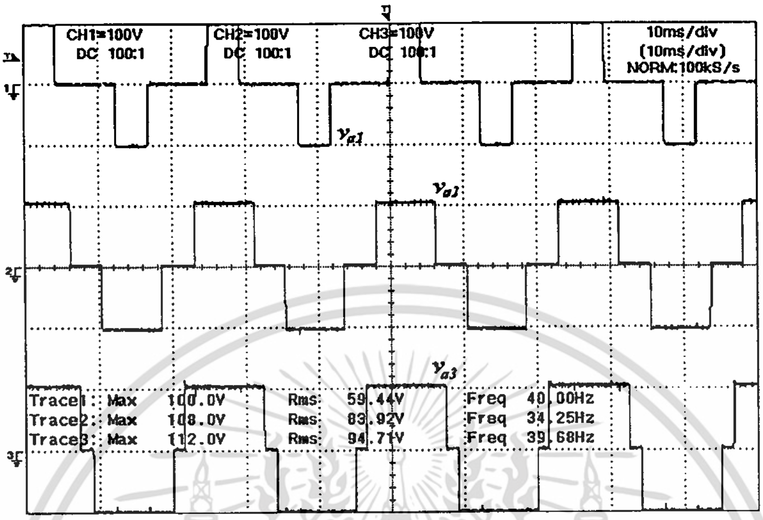


รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

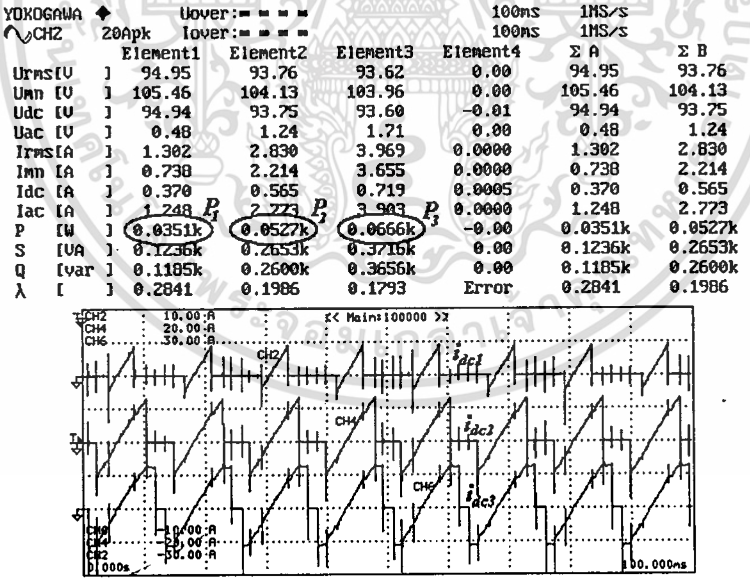
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...ญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.3 ที่ $f = 40\ Hz, M = 1$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 40 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



รูปที่ 6.13 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz



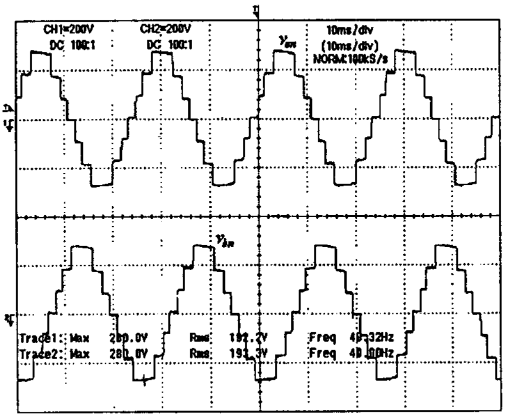
YOKOGAWA ◆ Uover: ■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s
CH2 20Apk Iover: ■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s

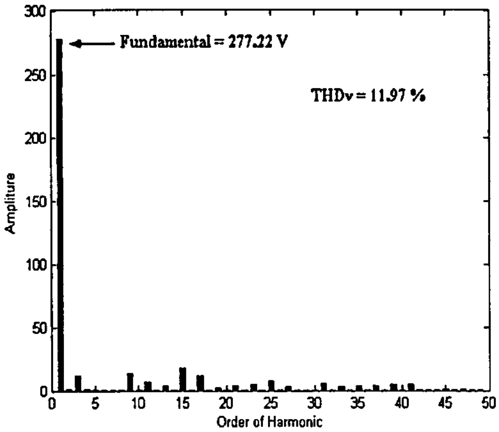
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	94.95	93.76	93.62	0.00	94.95	93.76
Umn [V]	105.46	104.13	103.96	0.00	105.46	104.13
Udc [V]	94.94	93.75	93.60	-0.01	94.94	93.75
Uac [V]	0.48	1.24	1.71	0.00	0.48	1.24
Irms[A]	1.302	2.830	3.969	0.0000	1.302	2.830
Imn [A]	0.738	2.214	3.655	0.0000	0.738	2.214
Idc [A]	0.370	0.565	0.719	0.0005	0.370	0.565
Iac [A]	1.248	2.773	3.903	0.0000	1.248	2.773
P [W]	0.0351k (P_1)	0.0527k (P_2)	0.0666k (P_3)	-0.00	0.0351k	0.0527k
S [VA]	0.1236k	0.2653k	0.3716k	0.00	0.1236k	0.2653k
Q [var]	0.1185k	0.2600k	0.3656k	0.00	0.1185k	0.2600k
λ [ ]	0.2841	0.1986	0.1793	Error	0.2841	0.1986

รูปที่ 6.14 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 35.1 W, 52.7 W และ 66.6 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



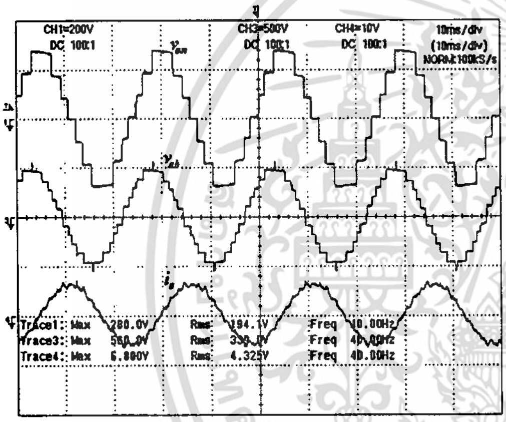


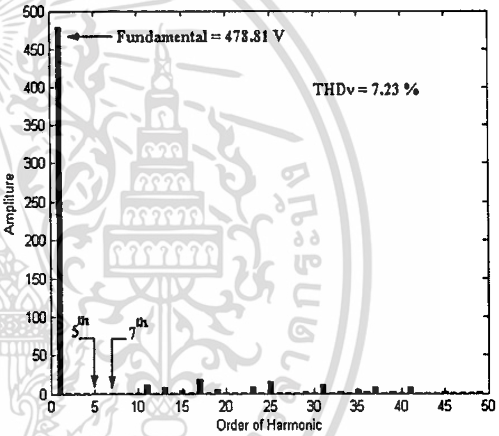
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.15 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz



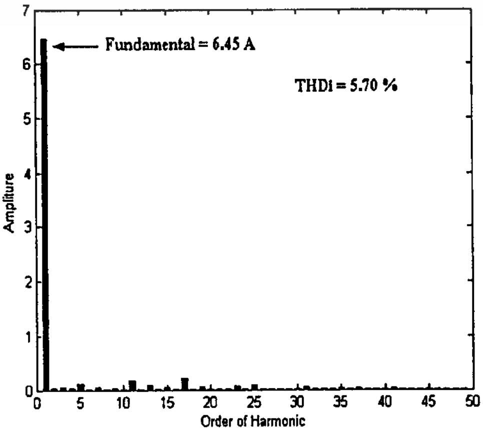


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.16 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz

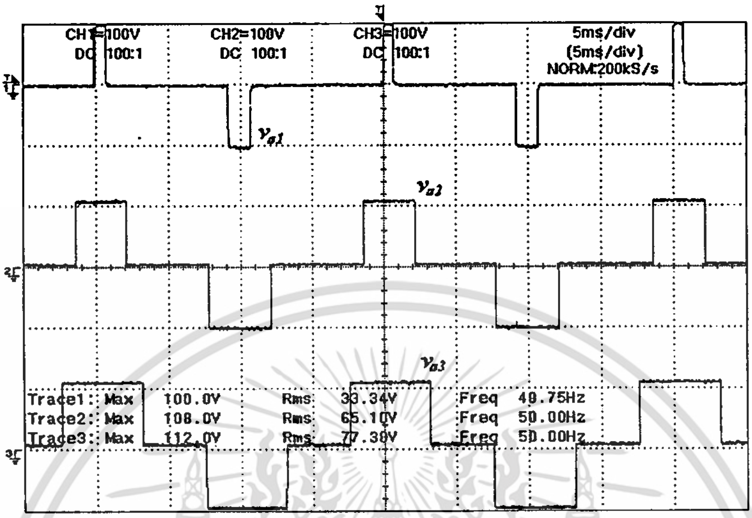


รูปที่ 6.17 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.4 ที่ $f = 50\ Hz, M = 0.6$

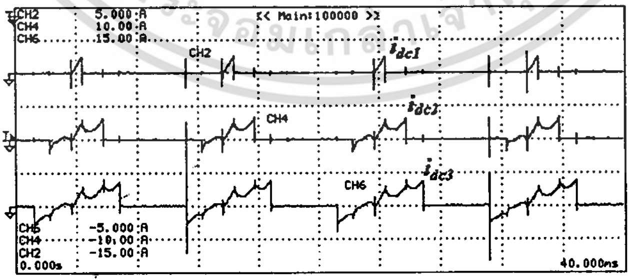
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 50\ Hz$, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



รูปที่ 6.18 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

YOKOGAWA ◆ Uover: ■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover: ■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s

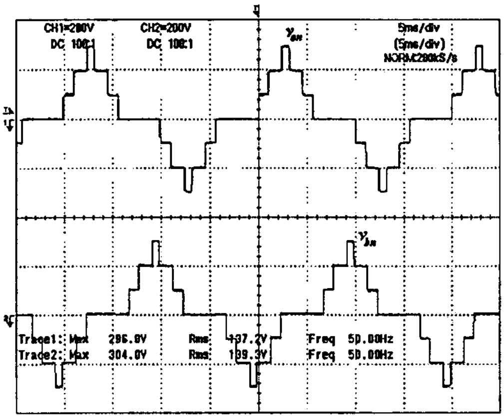
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	102.25	101.12	100.71	0.00	102.25	101.12
Umn [V]	113.57	112.31	111.86	0.00	113.57	112.31
Udc [V]	102.25	101.12	100.71	0.01	102.25	101.12
Uac [V]	0.15	0.20	0.21	0.00	0.15	0.20
Irms[A]	0.211	0.411	0.697	0.0000	0.211	0.411
Imn [A]	0.072	0.226	0.500	0.0000	0.072	0.226
Idc [A]	0.055	0.164	0.226	0.0004	0.055	0.164
Iac [A]	0.203	0.376	0.659	0.0000	0.203	0.376
P [W]	0.0057k (P_1)	0.0166k (P_2)	0.0227k (P_3)	0.00	0.0057k	0.0166k
S [VA]	0.0215k	0.0415k	0.0702k	0.00	0.0215k	0.0415k
Q [var]	0.0208k	0.0381k	-0.0664k	0.00	0.0208k	0.0381k
λ [ ]	0.2623	0.3992	0.3237	Error	0.2623	0.3992

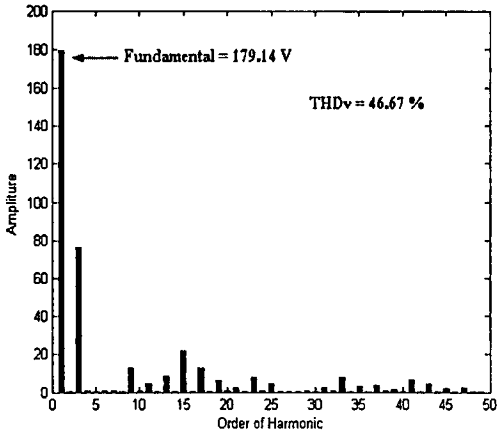


รูปที่ 6.19 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 5.7 W, 16.6 W และ 22.7 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



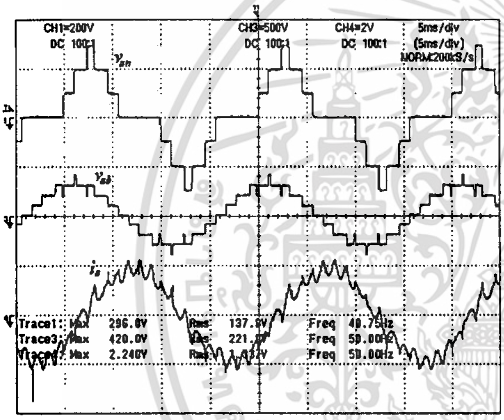


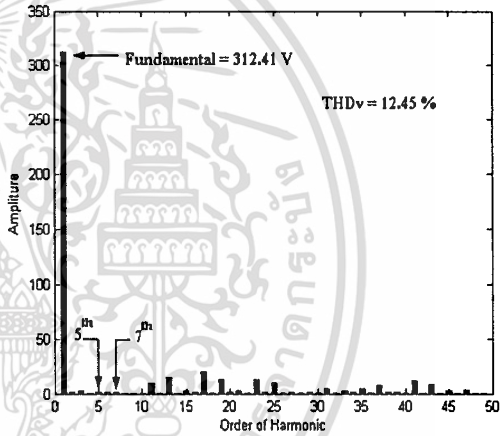
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5 ms/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.20 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



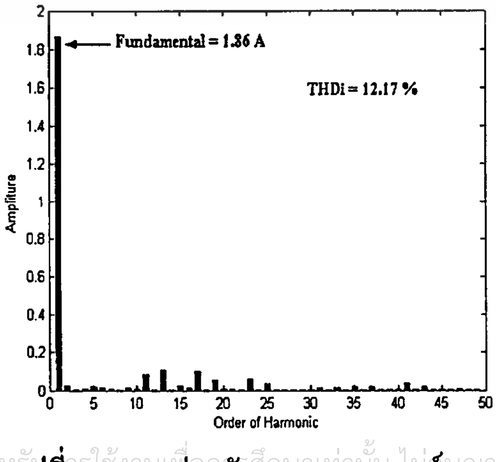


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 2 A/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.21 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

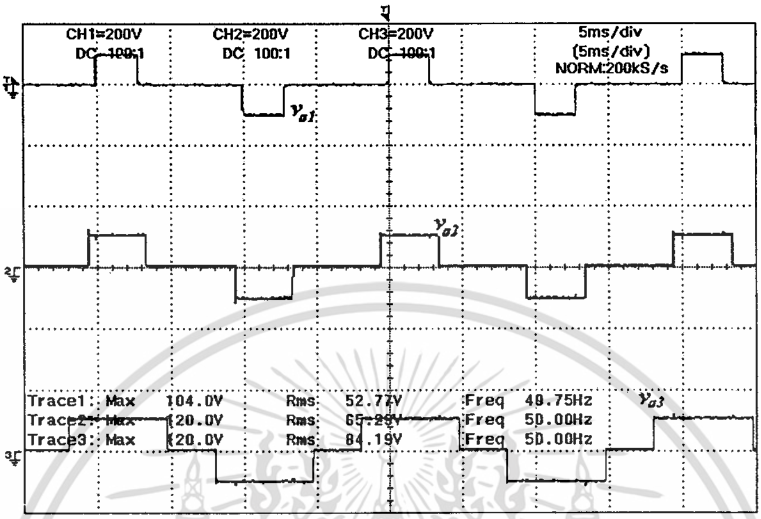


รูปที่ 6.22 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.5 ที่ $f = 50$ *Hz*, $M = 0.8$

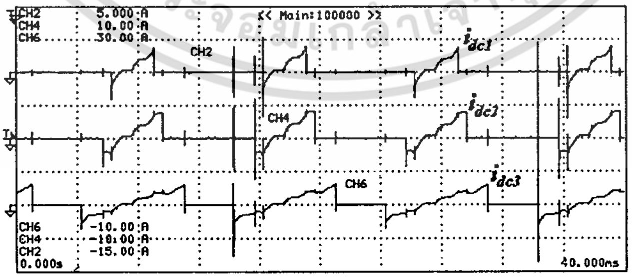
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 50$ *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



รูปที่ 6.23 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:- - - - 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:- - - - 40ms 2.5MS/s

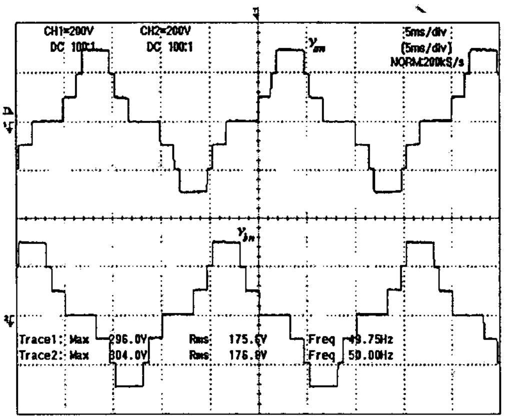
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms [V]	100.05	99.57	99.05	0.00	100.05	99.57
Umn [V]	111.13	110.60	110.02	0.00	111.13	110.60
Udc [V]	100.05	99.57	99.05	-0.01	100.05	99.57
Uac [V]	0.19	0.25	0.44	0.00	0.19	0.25
Irms [A]	0.448	0.688	1.259	0.0000	0.448	0.688
Imn [A]	0.229	0.414	1.008	0.0000	0.229	0.414
Idc [A]	0.139	0.193	0.260	0.0005	0.139	0.193
Iac [A]	0.427	0.660	1.232	0.0000	0.427	0.660
P [W]	0.0139k (P_1)	0.0192k (P_2)	0.0259k (P_3)	-0.00	0.0139k	0.0192k
S [VA]	0.0449k	0.0685k	0.1247k	0.00	0.0449k	0.0685k
Q [var]	0.0427k	0.0657k	0.1220k	0.00	0.0427k	0.0657k
λ [ ]	0.3091	0.2810	0.2074	Error	0.3091	0.2810



รูปที่ 6.24 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

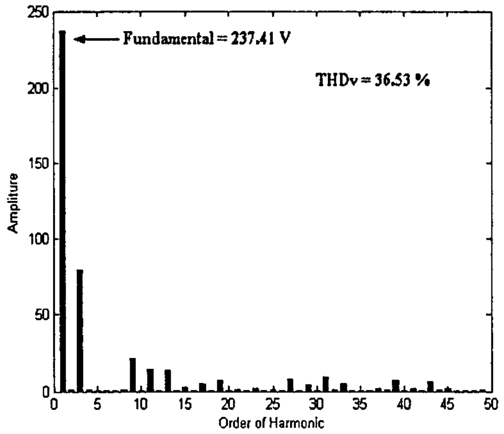
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 13.9 W, 19.2 W และ 25.9 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



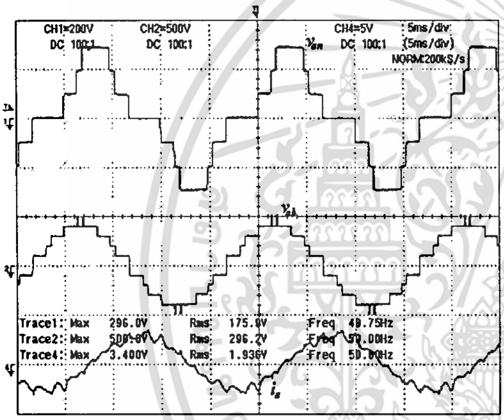
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div



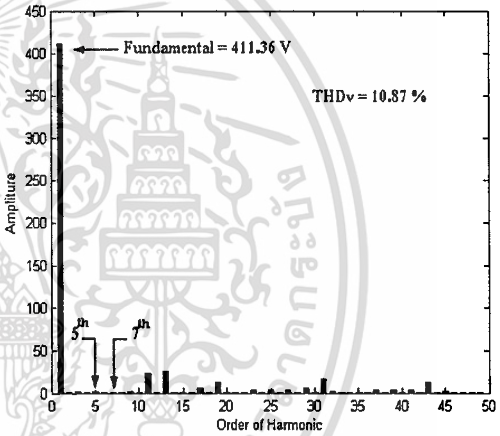
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.25 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



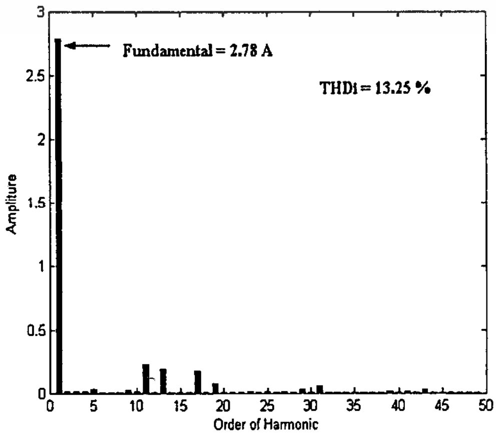
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.26 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

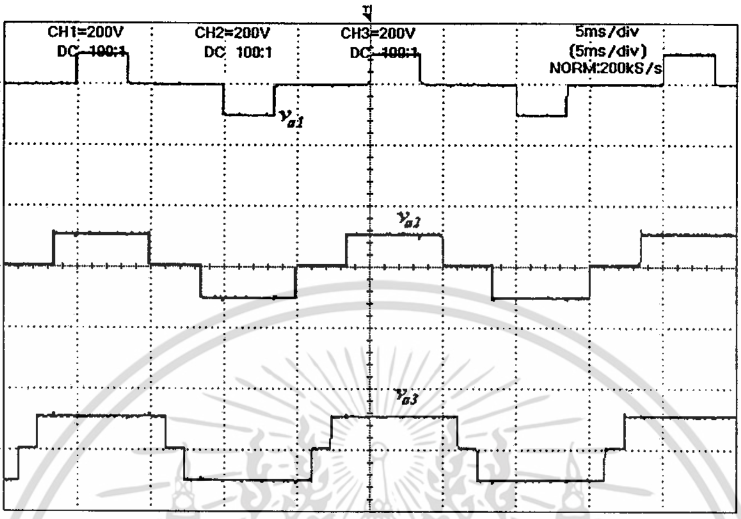


รูปที่ 6.27 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.6 ที่ $f = 50\ Hz, M = 1$

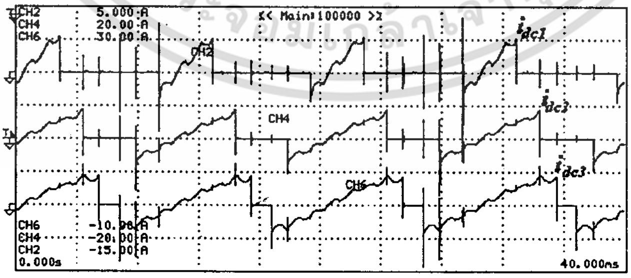
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 50\ Hz$, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



รูปที่ 6.28 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:▬ ▬ ▬ ▬ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:▬ ▬ ▬ ▬ 40ms 2.5MS/s

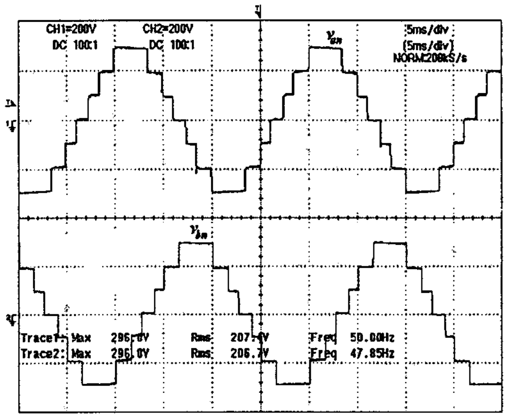
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms [V]	99.70	99.16	99.17	0.00	99.70	99.16
Umn [V]	110.74	110.14	110.14	0.00	110.74	110.14
Udc [V]	99.70	99.16	99.16	0.01	99.70	99.16
Uac [V]	0.29	0.61	0.81	0.00	0.29	0.61
Irms [A]	0.841	1.854	2.510	0.0000	0.841	1.854
Imn [A]	0.491	1.519	2.362	0.0000	0.491	1.519
Idc [A]	0.264	0.517	0.643	0.0005	0.264	0.517
Iac [A]	0.798	1.781	2.426	0.0000	0.798	1.781
P [W]	0.0263k (P_1)	0.0511k (P_2)	0.0634k (P_3)	0.00	0.0263k	0.0511k
S [VA]	0.0838k	0.1839k	0.2489k	0.00	0.0838k	0.1839k
Q [var]	0.0796k	0.1766k	0.2406k	0.00	0.0796k	0.1766k
λ [ ]	0.3140	0.2781	0.2549	Error	0.3140	0.2781

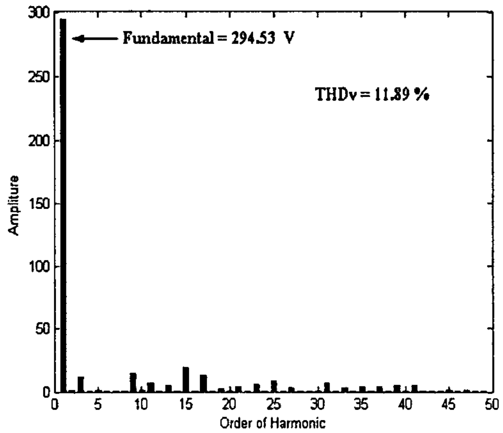


รูปที่ 6.29 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 26.3 W, 51.1 W และ 63.4 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



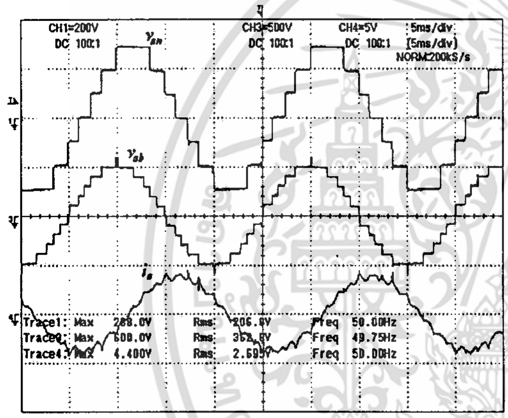


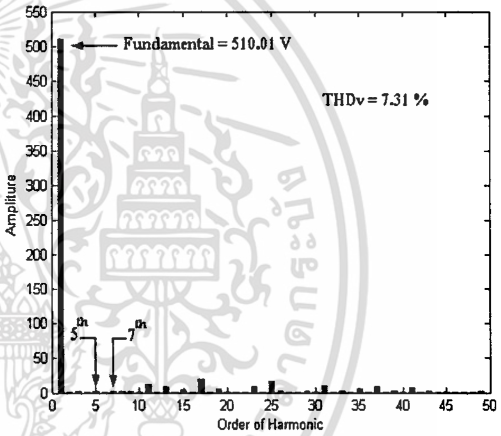
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5ms/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.30 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



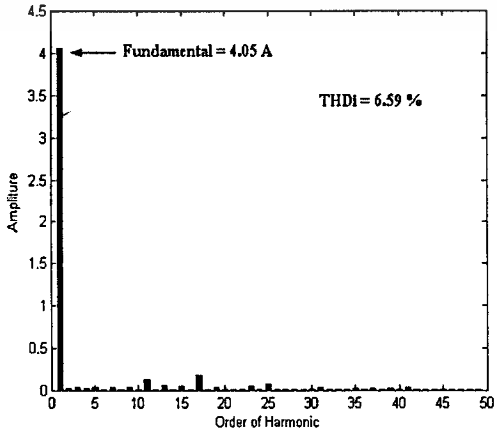


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.31 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

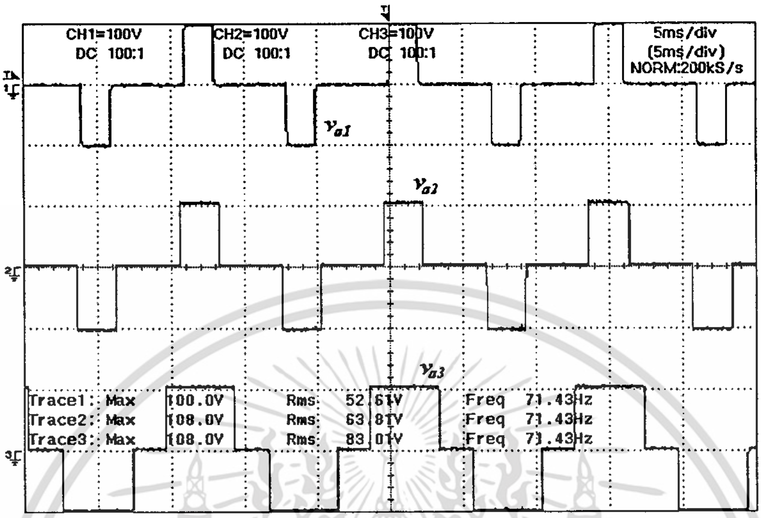


รูปที่ 6.32 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.7 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 0.6$

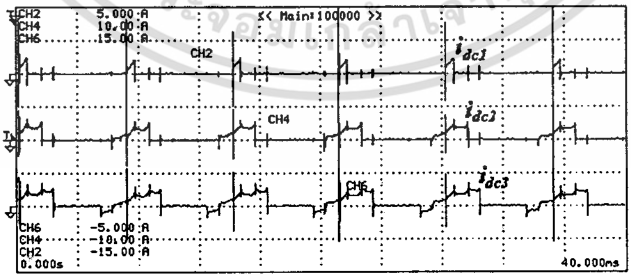
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 70$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



รูปที่ 6.33 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:- - - - 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:- - - - 40ms 2.5MS/s

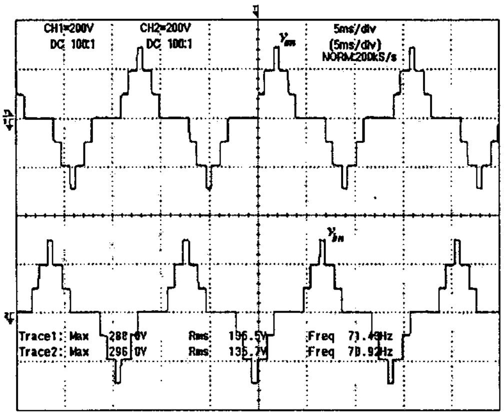
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms [V]	100.50	99.06	98.61	0.00	100.50	99.06
Umn [V]	111.63	110.03	109.53	0.00	111.63	110.03
Udc [V]	100.50	99.06	98.61	0.02	100.50	99.06
Uac [V]	0.16	0.22	0.23	0.00	0.16	0.22
Irms [A]	0.233	0.430	0.595	0.0000	0.233	0.430
Imn [A]	0.085	0.268	0.455	0.0000	0.085	0.268
Idc [A]	0.067	0.233	0.322	0.0004	0.067	0.233
Iac [A]	0.223	0.361	0.500	0.0000	0.223	0.361
P [W]	0.0068k (P_1)	0.0231k (P_2)	0.0318k (P_3)	0.00	0.0068k	0.0231k
S [VA]	0.0234k	0.0426k	0.0586k	0.00	0.0234k	0.0426k
Q [var]	0.0224k	0.0358k	0.0493k	0.00	0.0224k	0.0358k
λ [ ]	0.2893	0.5428	0.5414	Error	0.2893	0.5428



รูปที่ 6.34 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

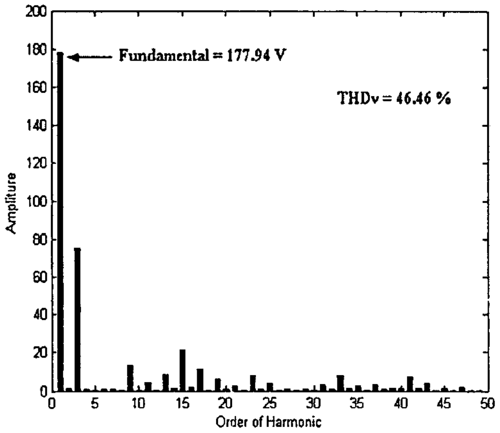
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 6.8 W, 23.1 W และ 31.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



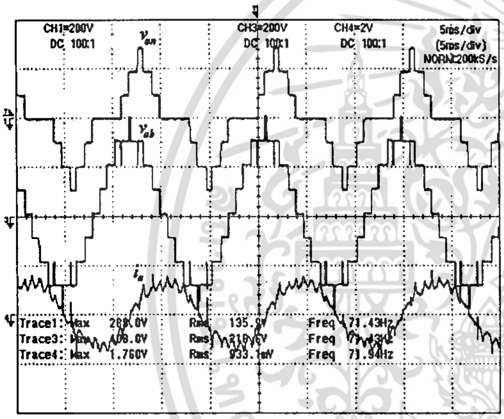
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5 ms/div



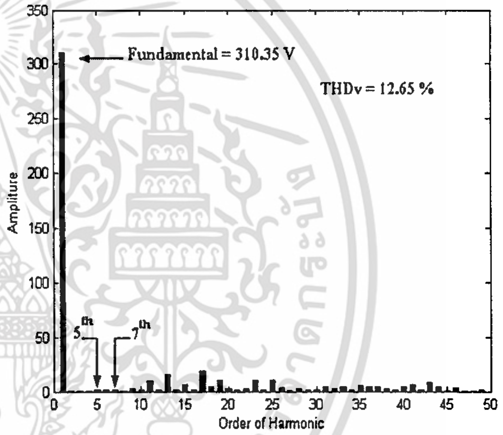
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.35 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz



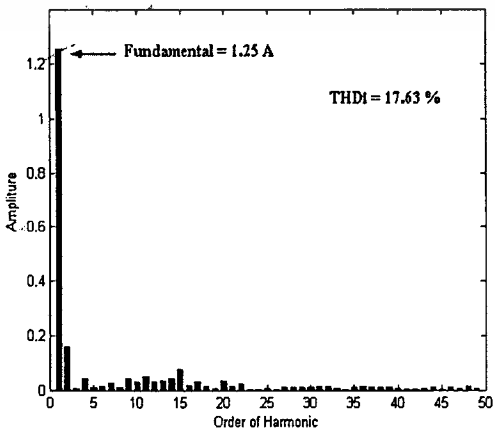
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 200V/div, i_a= 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.36 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz

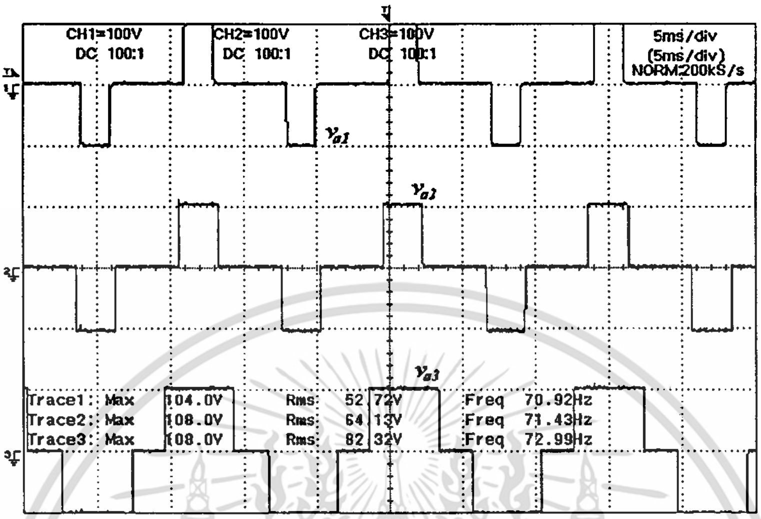


รูปที่ 6.37 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

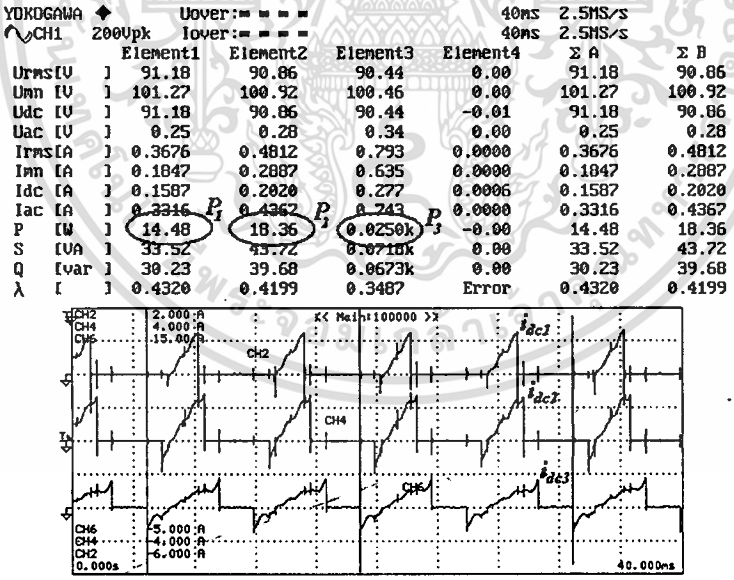
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.8 ที่ $f = 70$ Hz, $M = 0.8$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 70$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



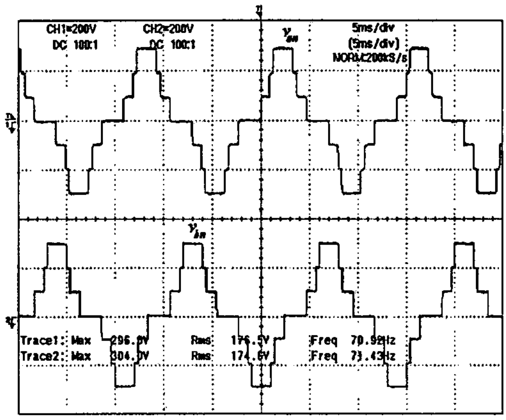
รูปที่ 6.38 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

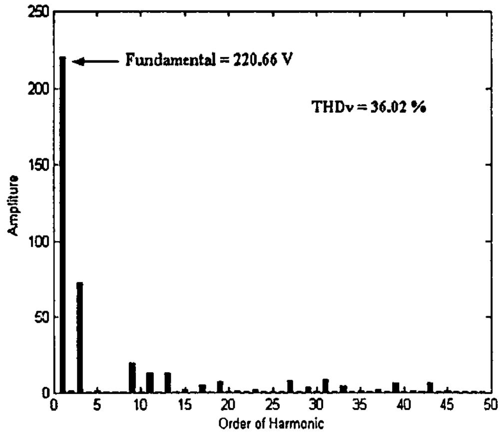


รูปที่ 6.39 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 14.48 W, 18.36 W และ 25 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



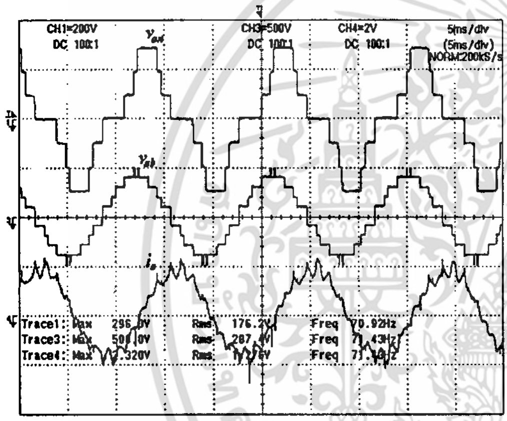


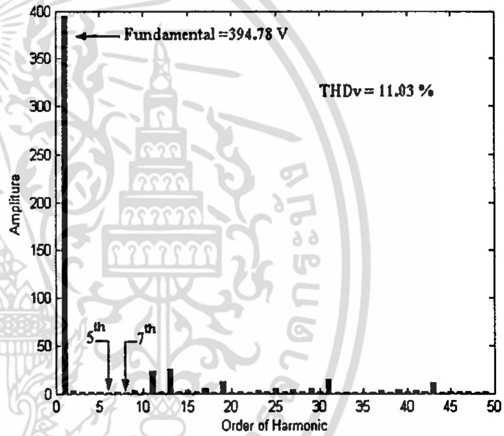
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.40 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz



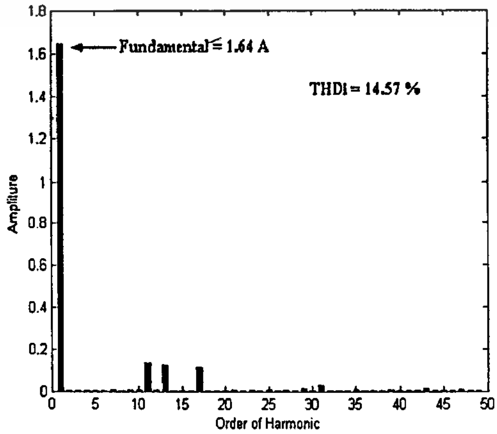


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 2 A/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.41 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz

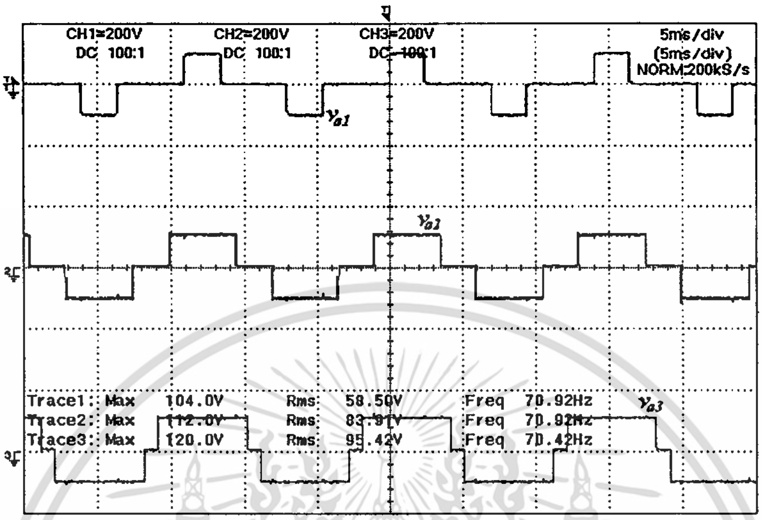


รูปที่ 6.42 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

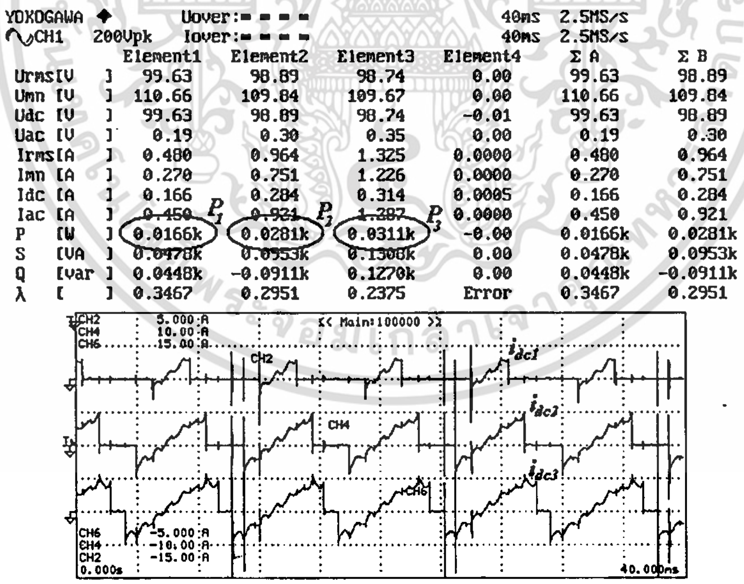
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.9 ที่ $f = 70$ *Hz*, $M = 1$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 70 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



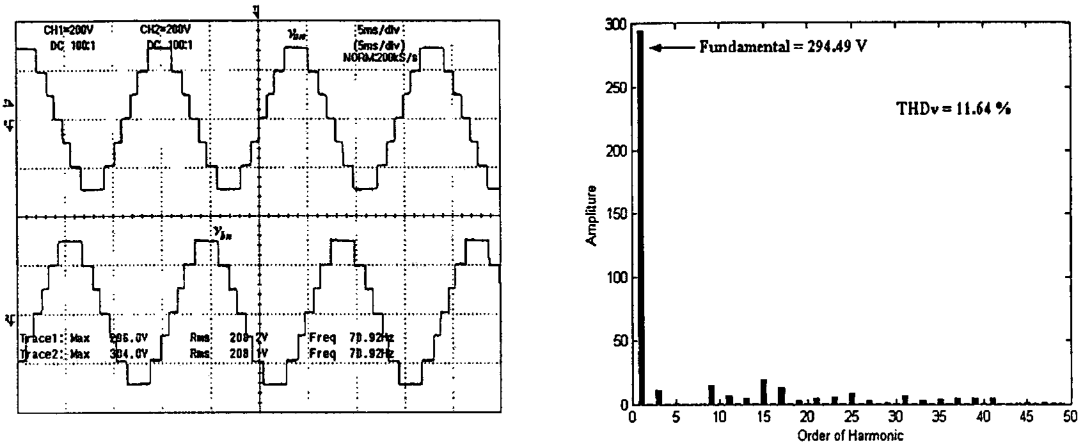
รูปที่ 6.43 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 6.44 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 16.6 W, 28.1 W และ 31.1 W ตามลำดับ

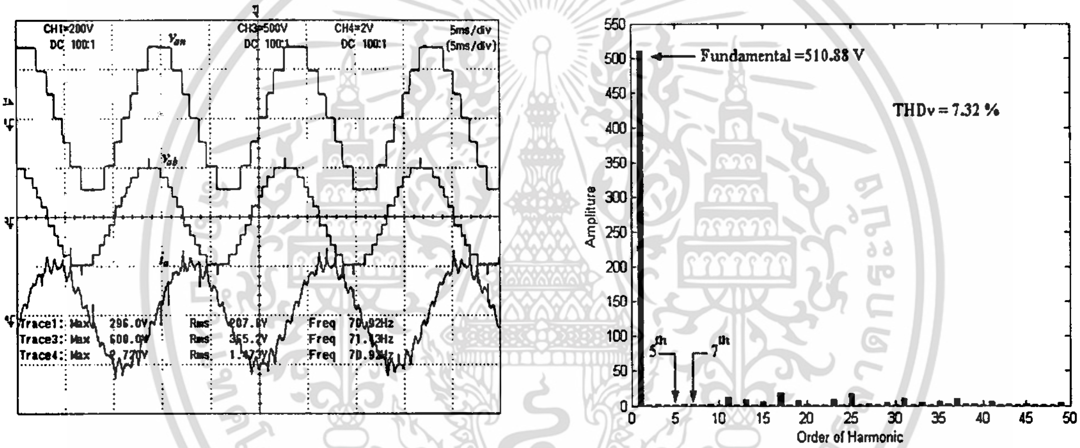
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn} (ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5ms/div

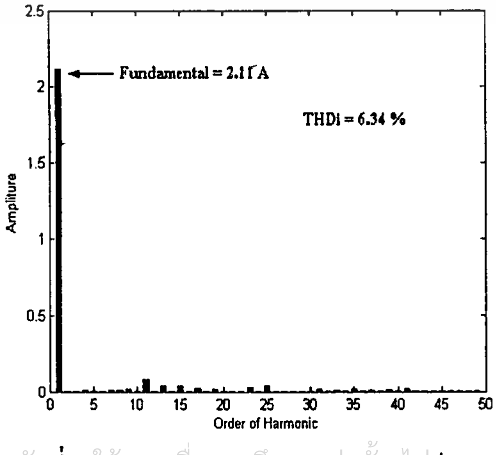
รูปที่ 6.45 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz



(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ (ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div

รูปที่ 6.46 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 6.47 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

จากผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด โดยทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ โดยปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่น ซึ่งมีความถี่กำหนด f_1 เท่ากับ 40 Hz, f_2 เท่ากับ 50 Hz, และ f_3 เท่ากับ 70 Hz จากผลการทดลองจะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่เท่ากัน ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากรูปแบบของการสวิทช์ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ไม่เหมือนกันนั่นเอง

ตารางที่ 6.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ดัชนีมอดูเลชั่น (M)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 40 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	4.44	15.7	20.1	5.7	16.6	22.7	6.8	23.1	31.8
0.8	20.3	25.8	40	13.9	19.2	25.9	14.48	18.36	25
1	35.1	52.7	66.6	26.3	51.1	63.4	16.6	28.1	31.1

ส่วนในด้านของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (% THD) ของแรงดันไลน์ จากผลการทดลองจะเห็นว่า ที่ทุกค่าความถี่ที่กำหนด เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น ค่า THD จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์

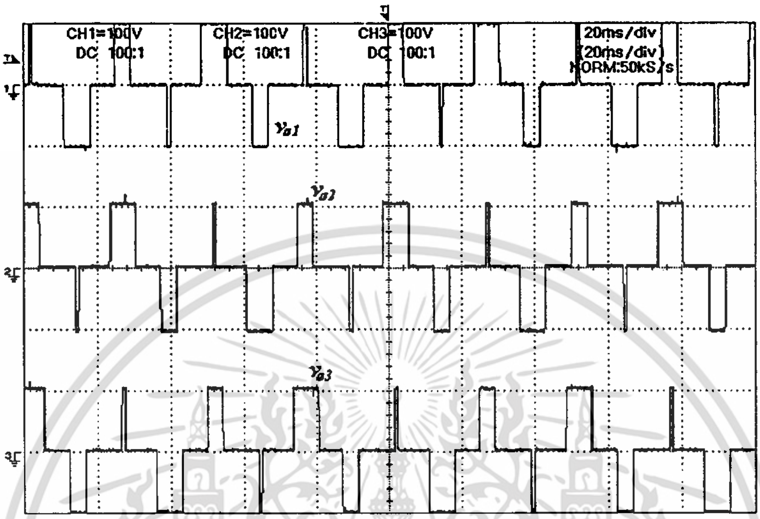
ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ และกระแสไลน์ (% THD)					
	40 Hz		50 Hz		70 Hz	
	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a
0.6	12.43	12.20	12.45	12.17	12.65	17.63
0.8	10.87	12.24	10.87	13.25	11.03	14.57
1	7.23	5.7	7.31	6.59	7.32	6.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

6.2.3.1 ที่ $f = 40\ Hz, M = 0.6$

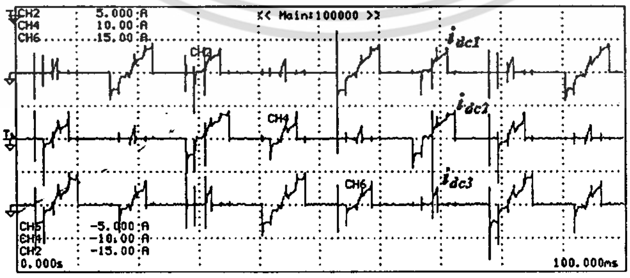
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 40 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



รูปที่ 6.48 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s
CH2 10Apk Iover:■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s

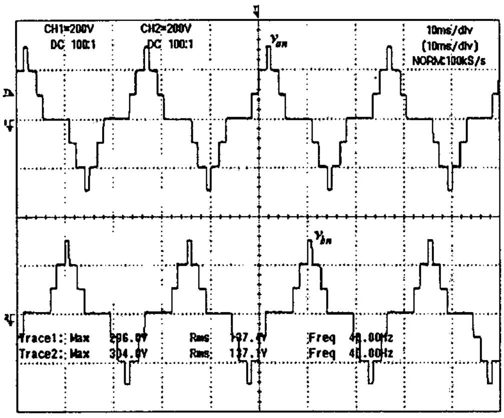
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	99.97	99.90	100.18	0.00	99.97	99.90
Umn [V]	111.04	110.96	111.27	0.00	111.04	110.96
Udc [V]	99.97	99.90	100.18	0.02	99.97	99.90
Uac [V]	0.35	0.34	0.30	0.00	0.35	0.34
Irms[A]	0.594	0.566	0.619	0.0000	0.594	0.566
Imn [A]	0.325	0.305	0.349	0.0000	0.325	0.305
Idc [A]	0.120	0.130	0.128	0.0004	0.120	0.130
Iac [A]	0.582	0.551	0.606	0.0000	0.582	0.551
P [W]	0.0120k (P_1)	0.0129k (P_2)	0.0128k (P_3)	0.00	0.0120k	0.0129k
S [VA]	0.0594k	0.0566k	0.0620k	0.00	0.0594k	0.0566k
Q [var]	0.0582k	0.0551k	-0.0607k	0.00	0.0582k	0.0551k
λ [ ]	0.2017	0.2287	0.2065	Error	0.2017	0.2287



รูปที่ 6.49 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 40 Hz

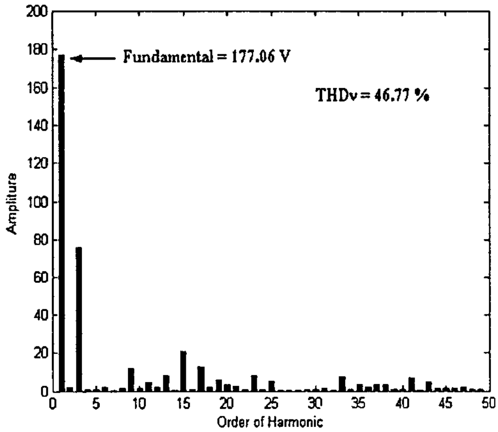
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 12 W, 12.9 W และ 12.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



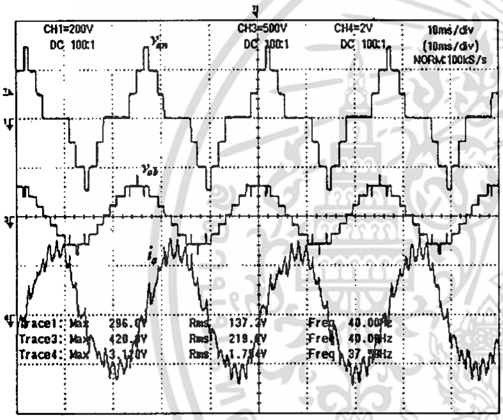
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div



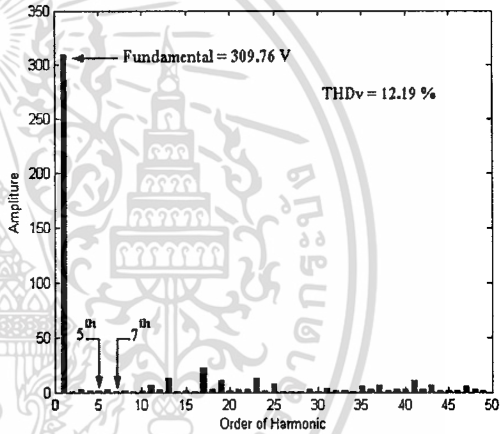
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.50 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz



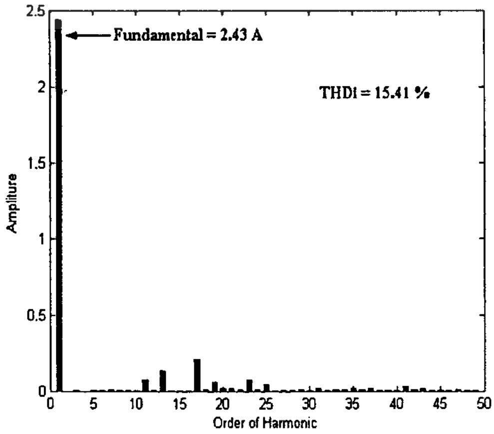
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.51 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz

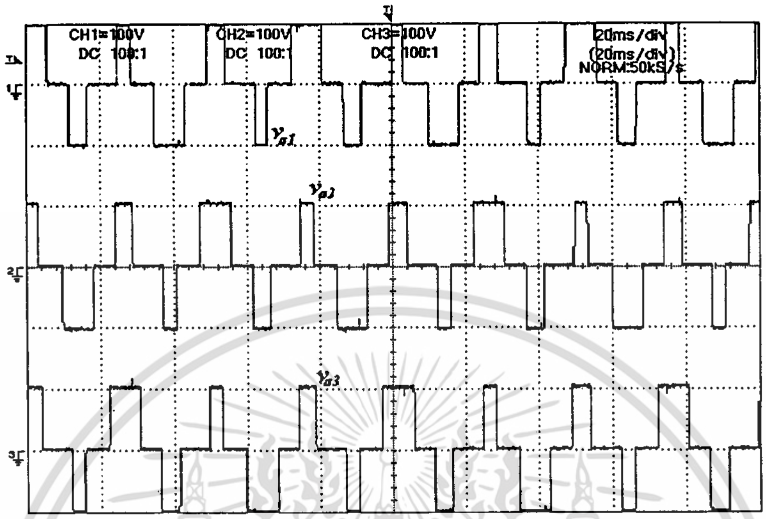


รูปที่ 6.52 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

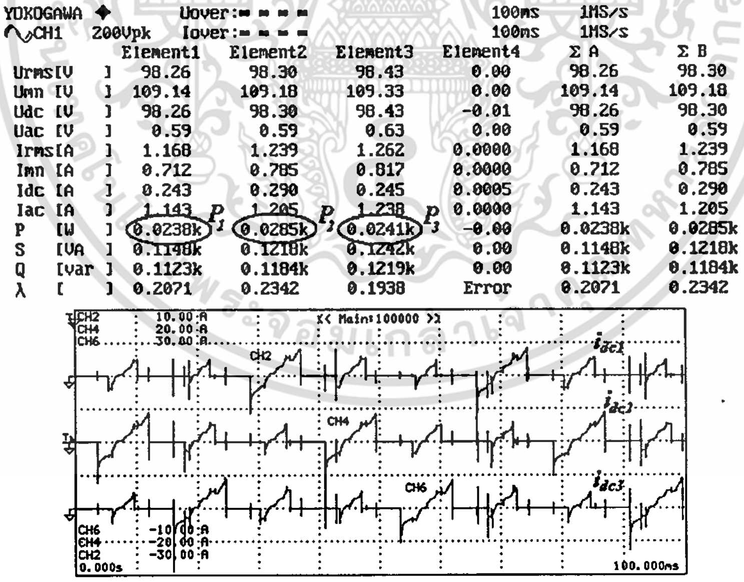
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.2 ที่ $f = 40\ Hz, M = 0.8$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 40\ Hz$, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



รูปที่ 6.53 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz



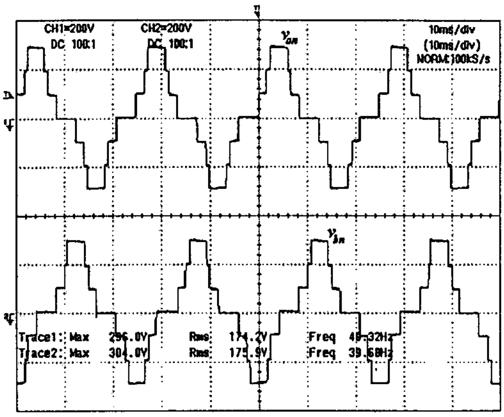
YOKOGAWA ◆ Uover:- - - - 100ms 1MS/s
CH1 200Vpk Iover:- - - - 100ms 1MS/s

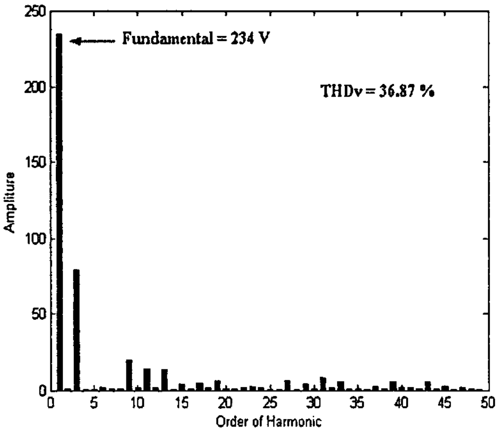
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	98.26	98.30	98.43	0.00	98.26	98.30
Umn [V]	109.14	109.18	109.33	0.00	109.14	109.18
Udc [V]	98.26	98.30	98.43	-0.01	98.26	98.30
Uac [V]	0.59	0.59	0.63	0.00	0.59	0.59
Irms[A]	1.168	1.239	1.262	0.0000	1.168	1.239
Imn [A]	0.712	0.785	0.817	0.0000	0.712	0.785
Idc [A]	0.243	0.290	0.245	0.0005	0.243	0.290
Iac [A]	1.143	1.205	1.238	0.0000	1.143	1.205
P [W]	0.0238k (P_1)	0.0285k (P_2)	0.0241k (P_3)	-0.00	0.0238k	0.0285k
S [VA]	0.1148k	0.1218k	0.1242k	0.00	0.1148k	0.1218k
Q [var]	0.1123k	0.1184k	0.1219k	0.00	0.1123k	0.1184k
λ [ ]	0.2071	0.2342	0.1938	Error	0.2071	0.2342

รูปที่ 6.54 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 23.8 W, 28.5 W และ 24.1 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

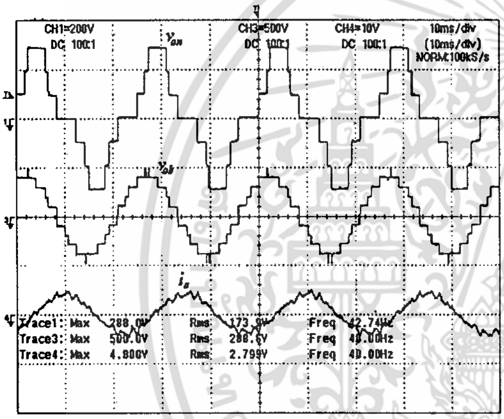


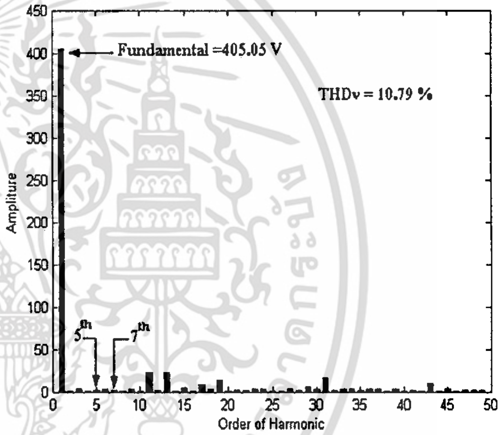


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn} (ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div

รูปที่ 6.55 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 40 Hz

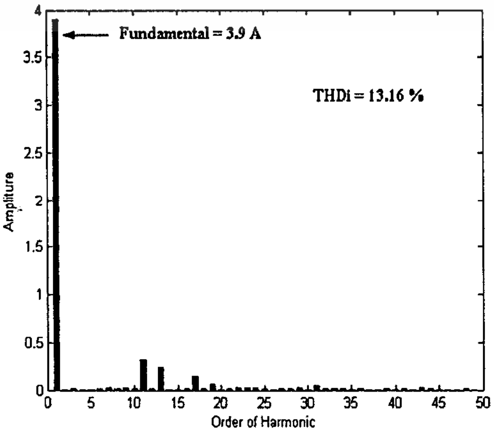




(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ (ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 10 A/div

รูปที่ 6.56 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 40 Hz

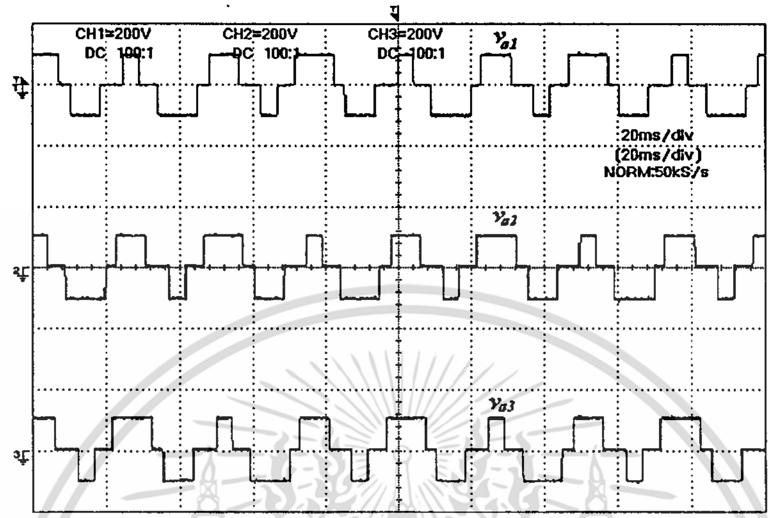


รูปที่ 6.57 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

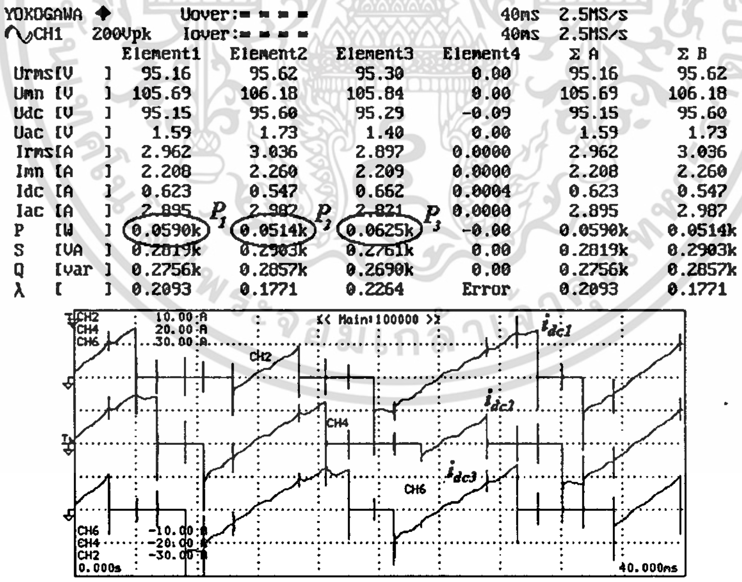
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.3 ที่ $f = 40$ *Hz*, $M = 1$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 40$ *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



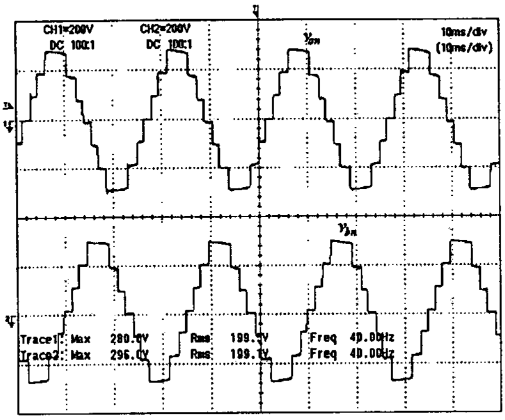
รูปที่ 6.58 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz



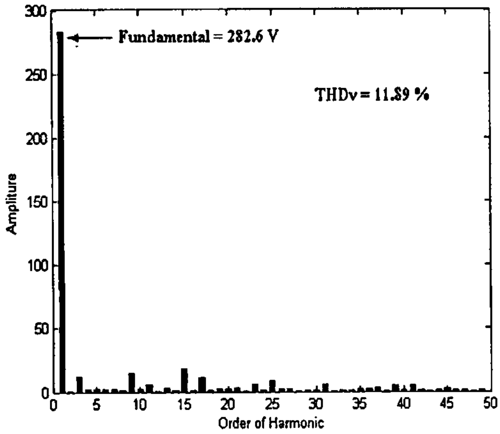
รูปที่ 6.59 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 40$ Hz

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 59 W, 51.4 W และ 62.5 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



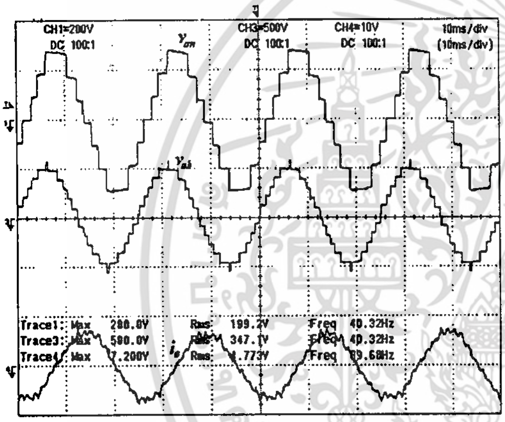
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}



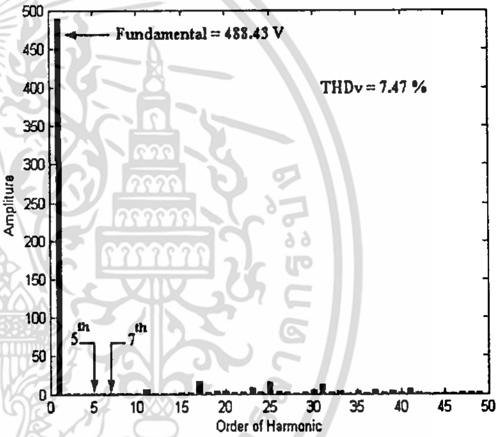
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div

รูปที่ 6.60 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 40$ Hz



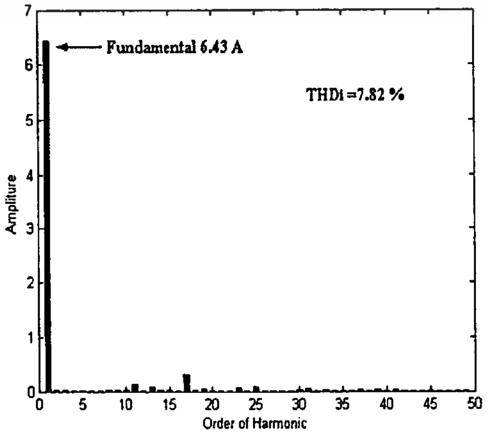
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

V_{an} = 200V/div, V_{ab} = 500V/div, i_a = 10 A/div

รูปที่ 6.61 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 40$ Hz

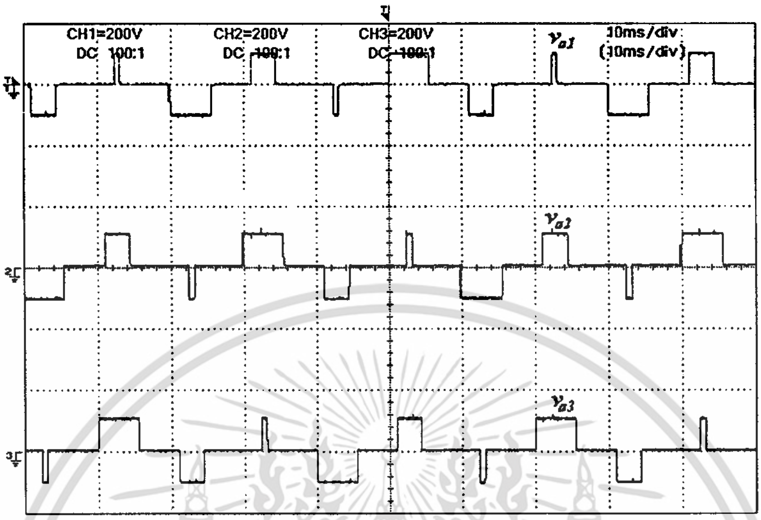


รูปที่ 6.62 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.4 ที่ f = 50 Hz, M = 0.6

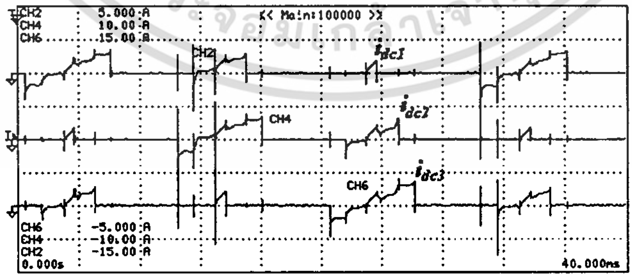
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



รูปที่ 6.63 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s

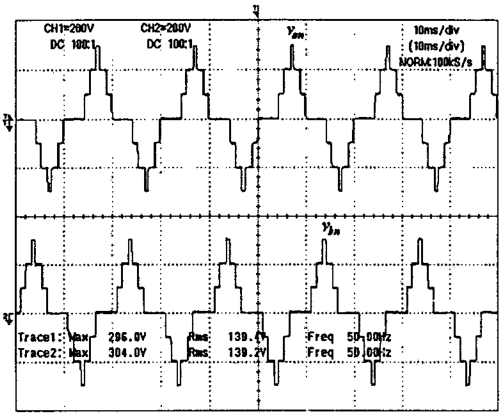
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	102.26	102.23	102.50	0.00	102.26	102.23
Umn [V]	113.59	113.54	113.85	0.00	113.59	113.54
Udc [V]	102.26	102.22	102.50	-0.02	102.26	102.22
Uac [V]	0.26	0.28	0.25	0.00	0.26	0.28
Irms[A]	0.489	0.490	0.502	0.0000	0.489	0.490
Imn [A]	0.270	0.276	0.290	0.0000	0.270	0.276
Idc [A]	0.134	0.145	0.144	0.0004	0.134	0.145
Iac [A]	0.470	0.468	0.481	0.0000	0.470	0.468
P [W]	0.0137k (P_1)	0.0149k (P_2)	0.0148k (P_3)	-0.00	0.0137k	0.0149k
S [VA]	0.0500k	0.0501k	0.0515k	0.00	0.0500k	0.0501k
Q [var]	0.0481k	0.0478k	-0.0493k	0.00	0.0481k	0.0478k
λ [ ]	0.2732	0.2968	0.2869	Error	0.2732	0.2968



รูปที่ 6.64 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

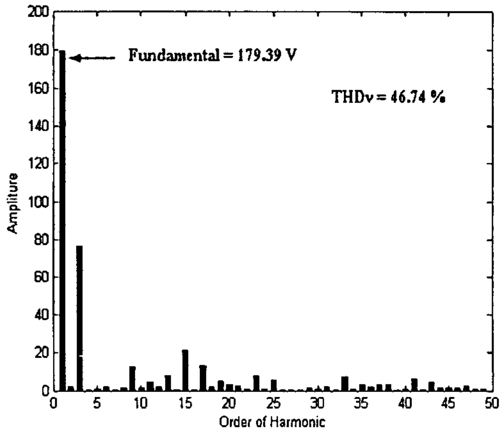
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 13.7 W, 14.9 W และ 14.8 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



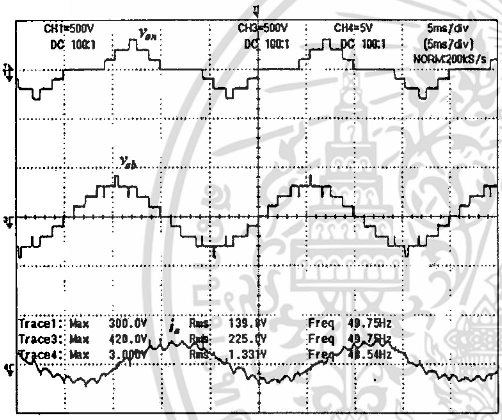
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10 ms/div



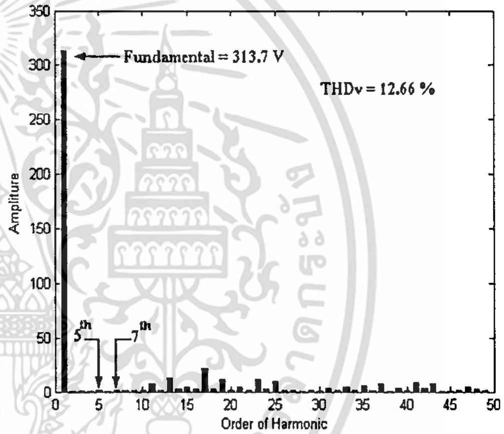
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.65 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



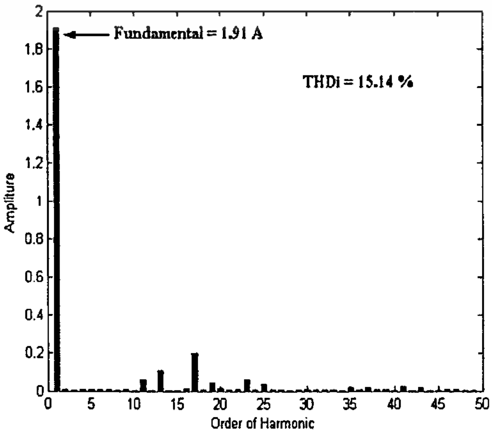
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 500V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.66 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

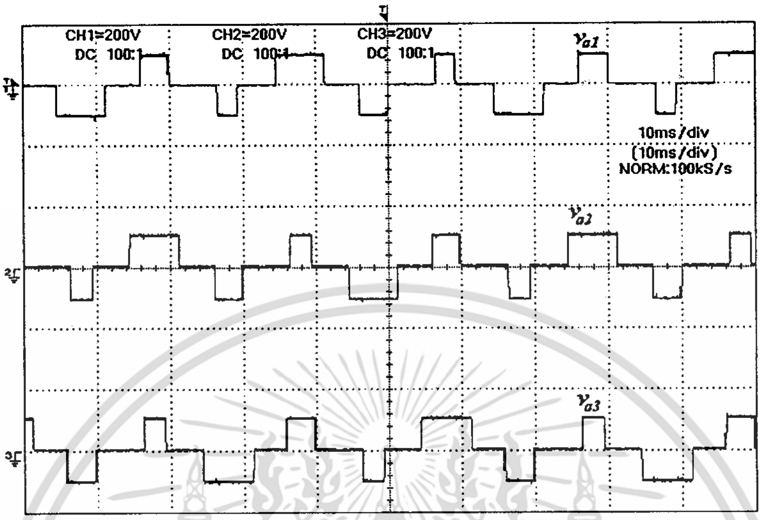


รูปที่ 6.67 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...ใช้...เพื่อการศึกษา...ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.5 ที่ $f = 50$ *Hz*, $M = 0.8$

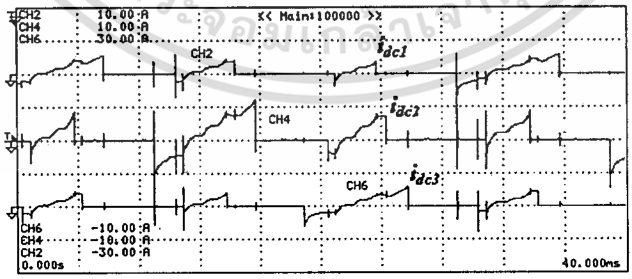
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 50$ *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



รูปที่ 6.68 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s

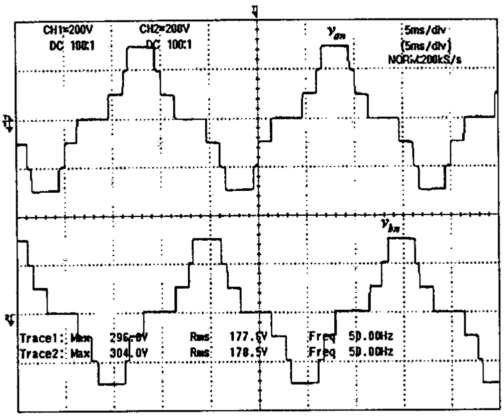
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms [V]	100.49	100.50	100.55	0.00	100.49	100.50
Umn [V]	111.62	111.63	111.68	0.00	111.62	111.63
Udc [V]	100.49	100.50	100.55	0.01	100.49	100.50
Uac [V]	0.33	0.36	0.33	0.00	0.33	0.36
Irms [A]	0.851	0.846	0.821	0.0000	0.851	0.846
Imn [A]	0.540	0.537	0.529	0.0000	0.540	0.537
Idc [A]	0.230	0.210	0.216	0.0005	0.230	0.210
Iac [A]	0.820	0.820	0.792	0.0000	0.820	0.820
P [W]	0.0230k (P_1)	0.0211k (P_2)	0.0217k (P_3)	0.00	0.0230k	0.0211k
S [VA]	0.0855k	0.0850k	0.0826k	0.00	0.0855k	0.0850k
Q [var]	0.0824k	0.0824k	0.0797k	0.00	0.0824k	0.0824k
λ [ ]	0.2694	0.2481	0.2630	Error	0.2694	0.2481



รูปที่ 6.69 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz

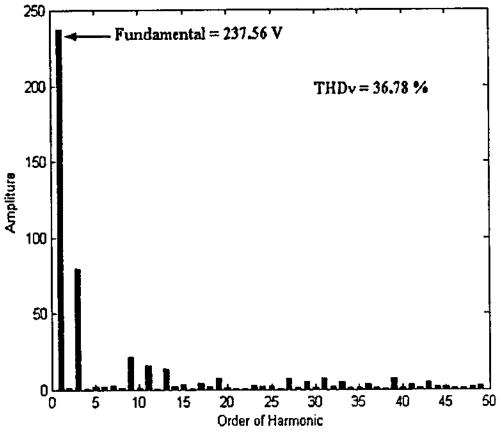
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 23 W, 21.1 W และ 21.7 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



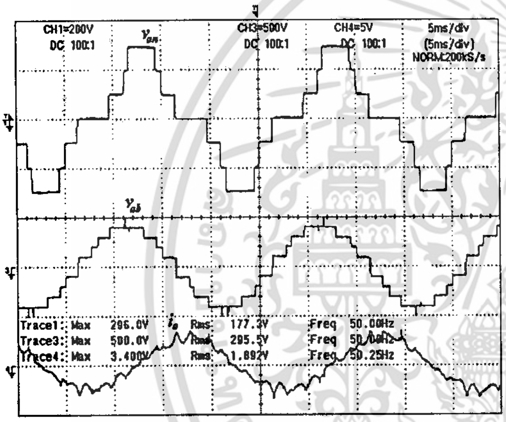
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div



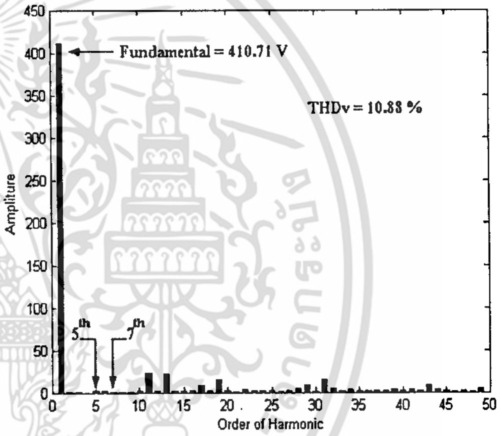
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.70 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



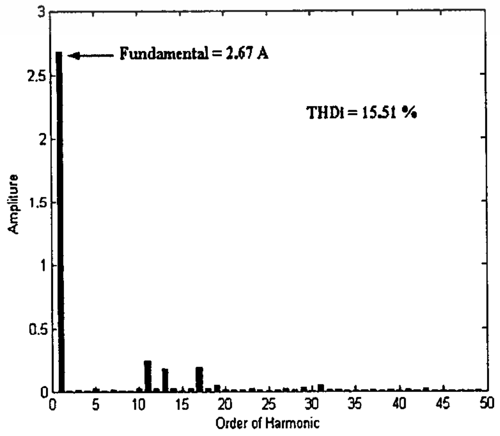
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.71 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

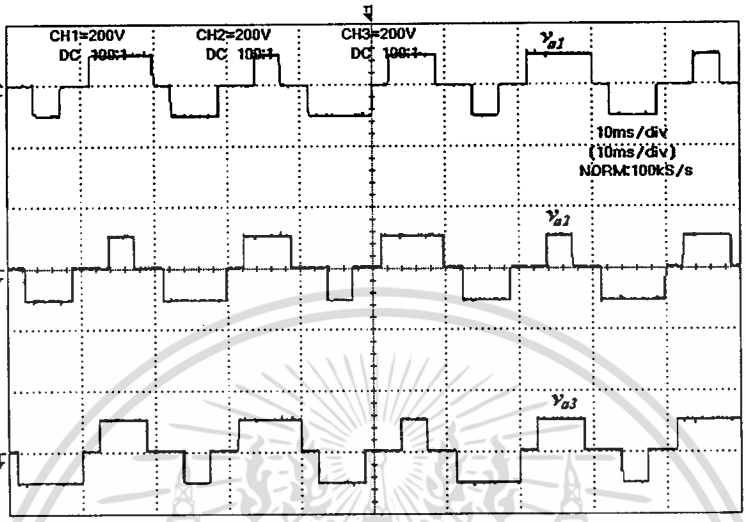


รูปที่ 6.72 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำห ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.6 ที่ $f = 50\ Hz, M = 1$

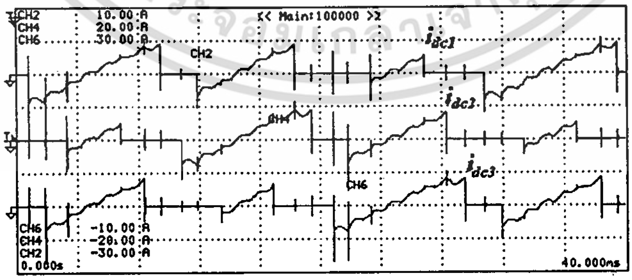
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 50 Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



รูปที่ 6.73 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s

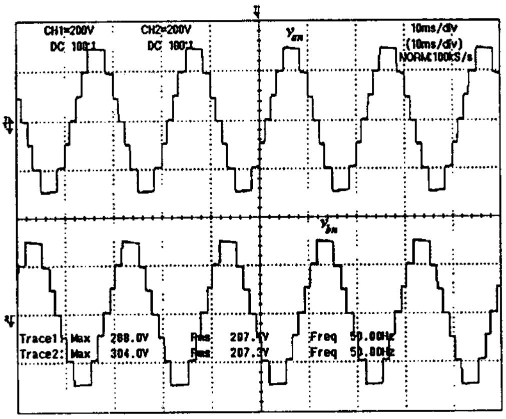
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	99.80	99.40	99.59	0.00	99.80	99.40
Umn [V]	110.85	110.40	110.62	0.00	110.85	110.40
Udc [V]	99.80	99.39	99.59	0.00	99.80	99.39
Uac [V]	0.86	0.75	0.67	0.00	0.86	0.75
Irms[A]	1.981	1.663	1.800	0.0000	1.981	1.663
Imn [A]	1.578	1.217	1.405	0.0000	1.578	1.217
Idc [A]	0.319	0.312	0.357	0.0005	0.319	0.312
Iac [A]	1.956	1.634	1.765	0.0000	1.956	1.634
P [W]	0.0315k (P_1)	0.0309k (P_2)	0.0354k (P_3)	0.00	0.0315k	0.0309k
S [VA]	0.1978k	0.1653k	0.1795k	0.00	0.1978k	0.1653k
Q [var]	0.1952k	-0.1624k	0.1758k	0.00	0.1952k	-0.1624k
λ [ ]	0.1594	0.1867	0.1973	Error	0.1594	0.1867



รูปที่ 6.74 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 50 Hz

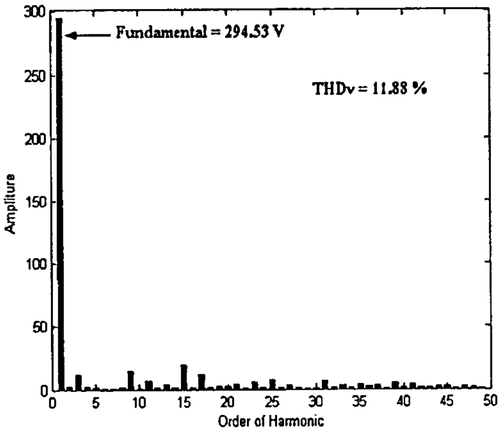
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 31.5 W, 30.9 W และ 35.4 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



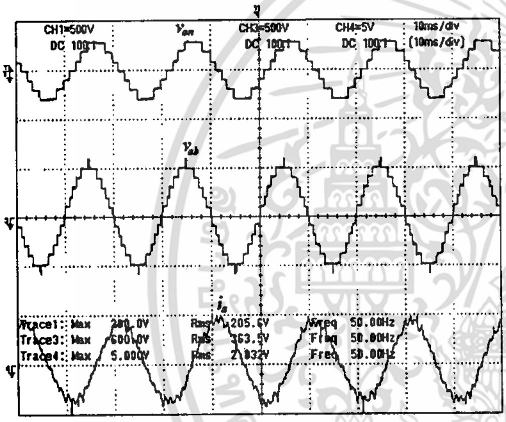
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 10ms/div



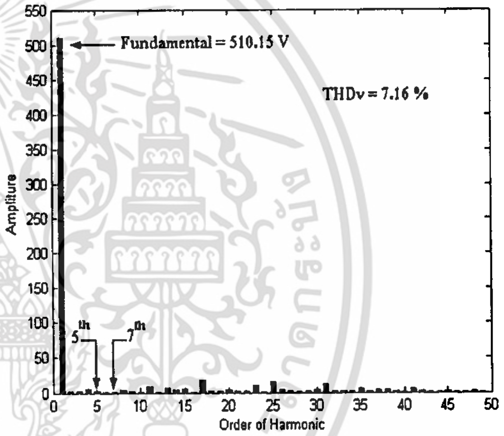
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.75 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



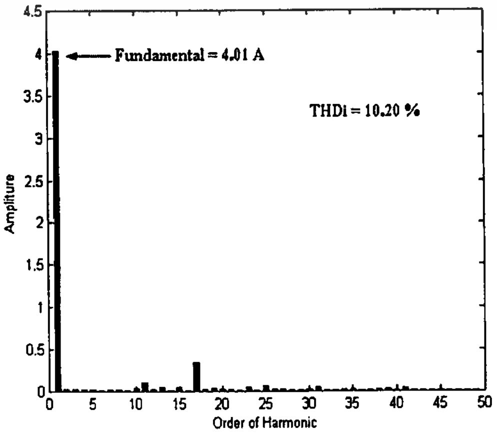
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.76 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz

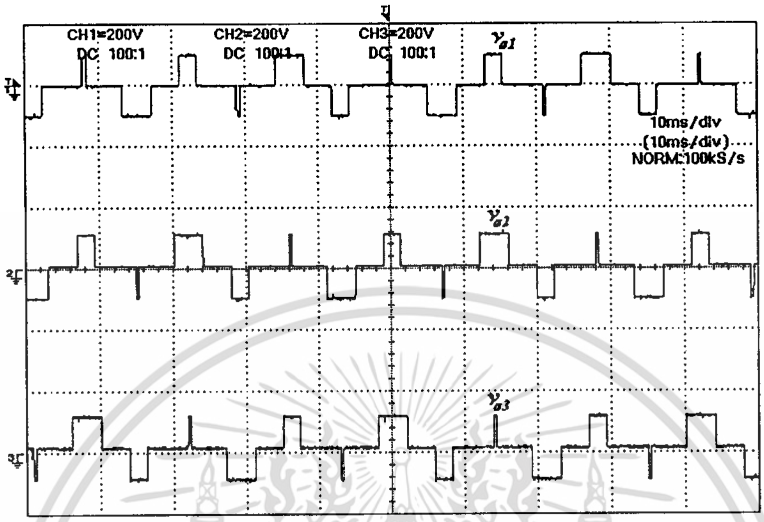


รูปที่ 6.77 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

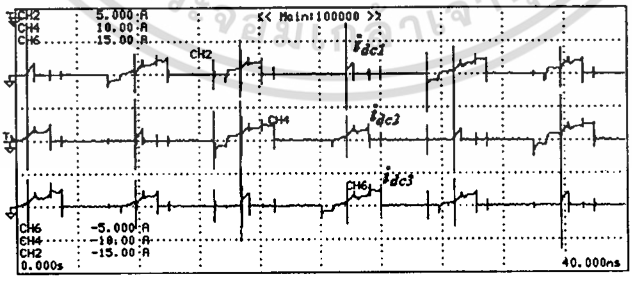
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำห ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.7 ที่ $f = 70$ *Hz*, $M = 0.6$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ $f = 70$ *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M) เท่ากับ 0.6 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 39.4298°$, $\alpha_2 = 58.5839°$ และ $\alpha_3 = 83.1042°$



รูปที่ 6.78 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz



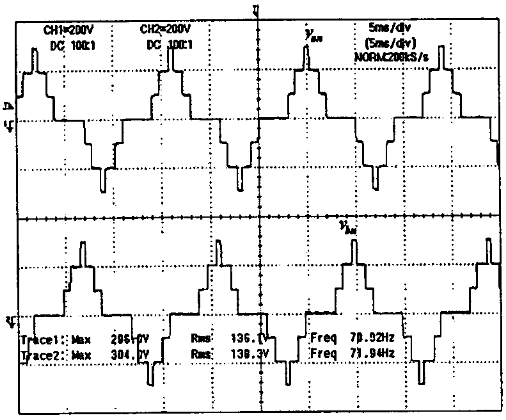
YOKOGAWA ◆ Uover:- - - - 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:- - - - 40ms 2.5MS/s

	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	100.72	100.68	100.84	0.00	100.72	100.68
Umn [V]	111.87	111.83	112.01	0.00	111.87	111.83
Udc [V]	100.72	100.68	100.84	0.01	100.72	100.68
Uac [V]	0.21	0.23	0.20	0.00	0.21	0.23
Irms[A]	0.421	0.412	0.406	0.0000	0.421	0.412
Imn [A]	0.259	0.246	0.238	0.0000	0.259	0.246
Idc [A]	0.182	0.178	0.181	0.0005	0.182	0.178
Iac [A]	0.380	0.372	0.364	0.0000	0.380	0.372
P [W]	0.0183k (P_1)	0.0179k (P_2)	0.0183k (P_3)	0.00	0.0183k	0.0179k
S [VA]	0.0424k	0.0415k	0.0410k	0.00	0.0424k	0.0415k
Q [var]	0.0382k	-0.0375k	0.0367k	0.00	0.0382k	-0.0375k
λ [ ]	0.4319	0.4306	0.4457	Error	0.4319	0.4306

รูปที่ 6.79 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 70$ Hz

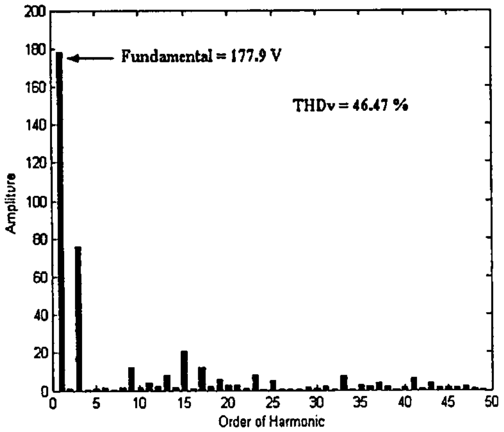
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 18.3 W, 17.9 W และ 18.3 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



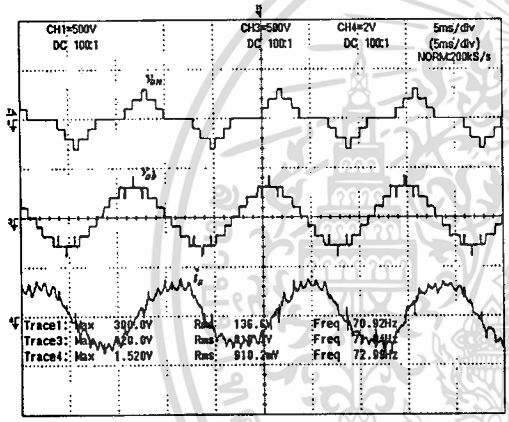
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5 ms/div



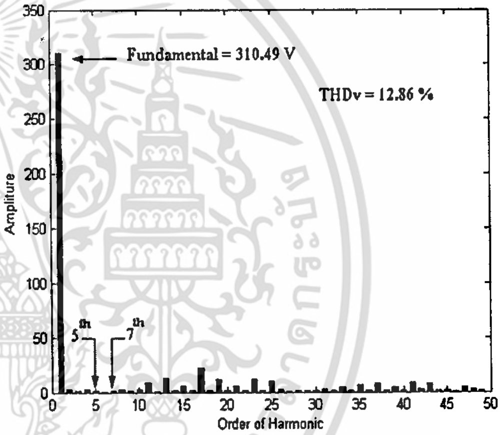
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.80 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 70$ Hz



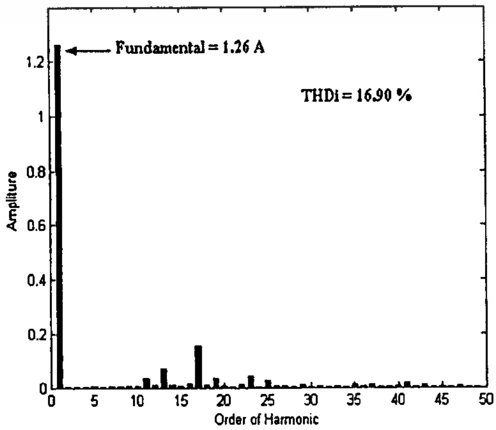
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 500V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.81 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 70$ Hz

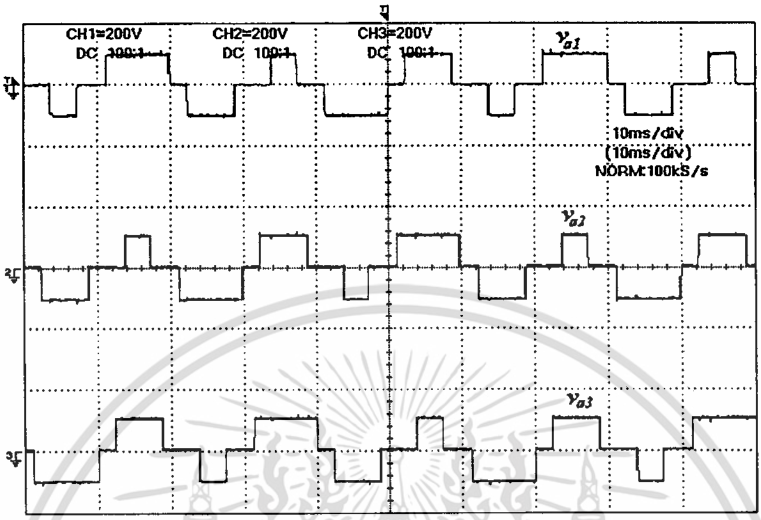


รูปที่ 6.82 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.8 ที่ $f = 70\ Hz, M = 0.8$

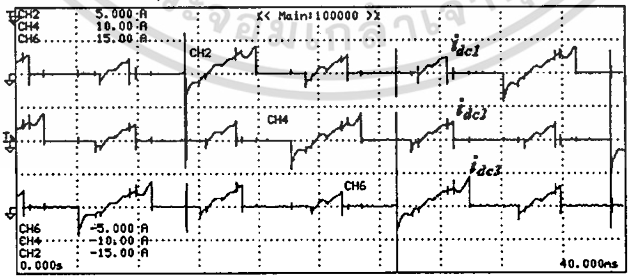
ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 70 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 0.8 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355°$, $\alpha_2 = 54.4383°$ และ $\alpha_3 = 64.4844°$



รูปที่ 6.83 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s
CH1 200Vpk Iover:■ ■ ■ ■ 40ms 2.5MS/s

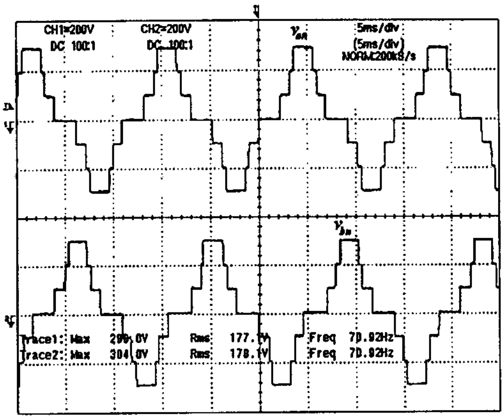
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Urms[V]	100.13	100.11	100.22	0.00	100.13	100.11
Umn [V]	111.22	111.20	111.31	0.00	111.22	111.20
Udc [V]	100.13	100.11	100.22	-0.04	100.13	100.11
Uac [V]	0.24	0.24	0.21	0.00	0.24	0.24
Irms[A]	0.567	0.534	0.567	0.0000	0.567	0.534
Imn [A]	0.356	0.337	0.368	0.0000	0.356	0.337
Idc [A]	0.186	0.201	0.189	0.0005	0.186	0.201
Iac [A]	0.536	0.495	0.534	0.0000	0.536	0.495
P [W]	0.0186k (P_1)	0.0201k (P_2)	0.0189k (P_3)	-0.00	0.0186k	0.0201k
S [VA]	0.0568k	0.0535k	0.0568k	0.00	0.0568k	0.0535k
Q [var]	0.0536k	0.0495k	0.0535k	0.00	0.0536k	0.0495k
λ [ ]	0.3283	0.3761	0.3336	Error	0.3283	0.3761



รูปที่ 6.84 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

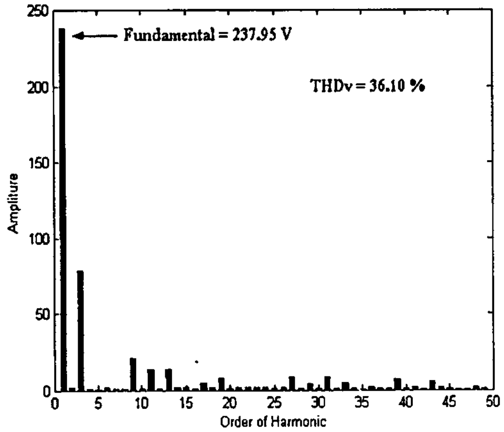
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 18.6 W, 20.1 W และ 18.9 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



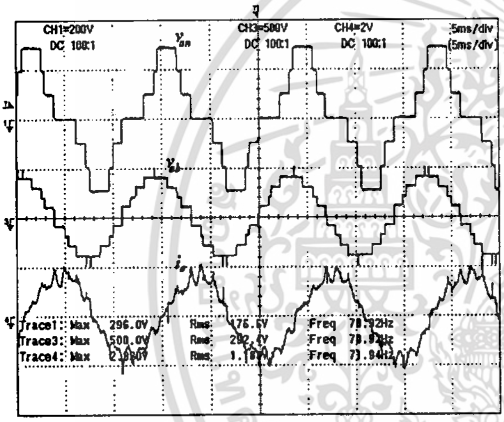
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div



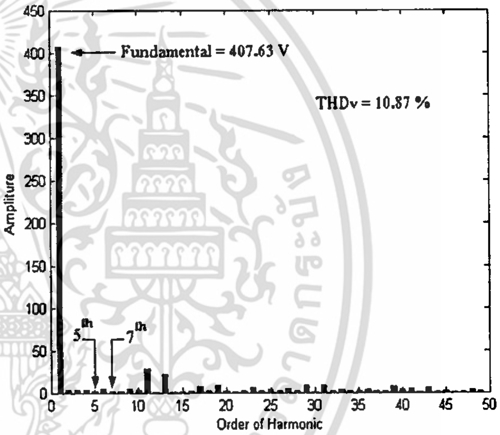
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.85 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz



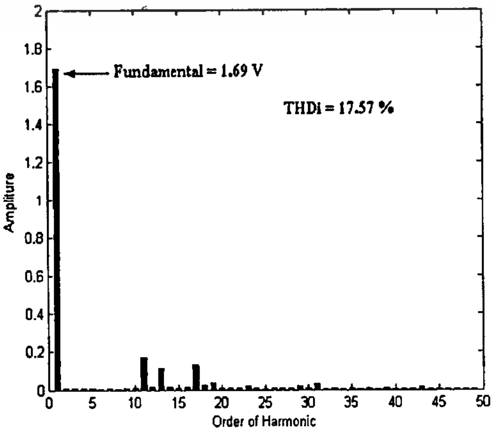
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab} = 500V/div, i_a = 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.86 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz

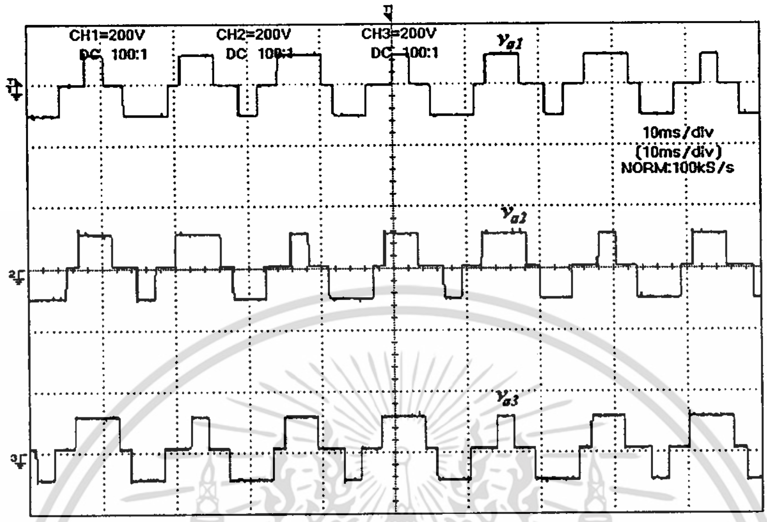


รูปที่ 6.87 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

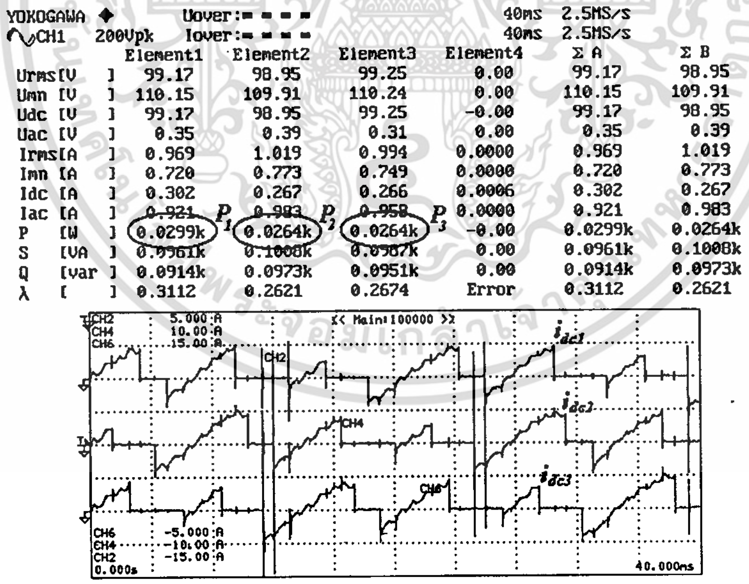
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.9 ที่ $f = 70\ Hz, M = 1$

ทำการทดลองขับมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ f = 70 *Hz*, ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (*M*) เท่ากับ 1 ค่ามุมสวิทชิ่งเป็น $\alpha_1 = 11.6817°$, $\alpha_2 = 31.1783°$ และ $\alpha_3 = 58.5774°$



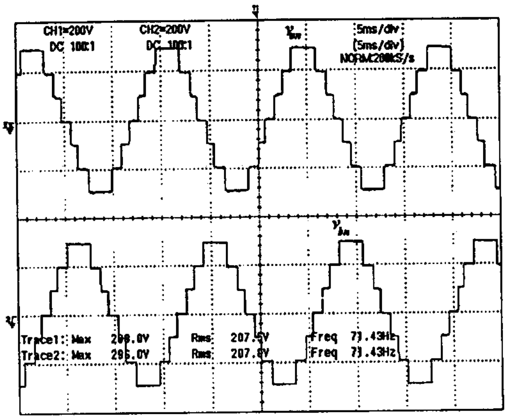
รูปที่ 6.88 ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 6.89 สัญญาณกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ f = 70 Hz

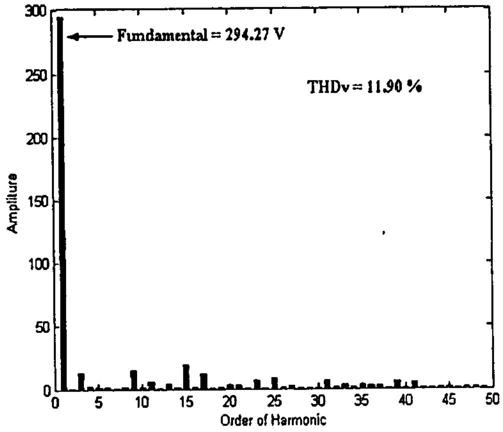
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 29.9 W, 26.4 W และ 26.4 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



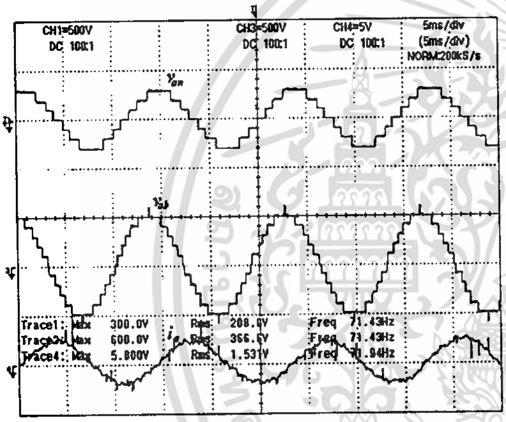
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200V/div, 5ms/div



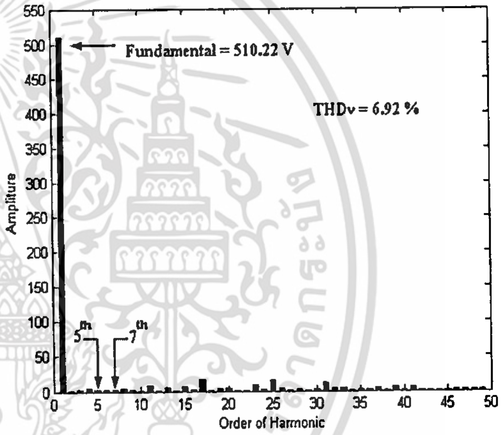
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ 6.90 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 70 Hz



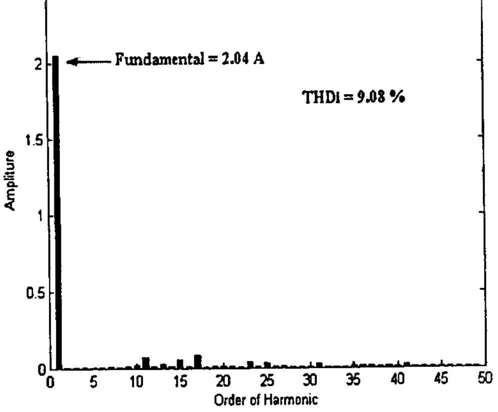
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 500V/div, V_{ab}= 500V/div, i_a= 5 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ 6.91 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 70 Hz



รูปที่ 6.92 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

จากผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด โดยทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ (% THD_v) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลชั่น ซึ่งมีความถี่กำหนด f_1 เท่ากับ 40 Hz, f_2 เท่ากับ 50 Hz, และ f_3 เท่ากับ 70 Hz จากผลการทดลองจะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก ได้มีการปรับปรุงรูปแบบของการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงานนั่นเอง

ตารางที่ 6.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ดัชนีมอดูเลชั่น (M)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 40 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	12	12.9	12.8	13.7	14.9	14.8	18.3	17.9	18.3
0.8	23.8	28.5	24.1	23	21.1	21.7	18.1	20.1	18.9
1	59	51.4	62.5	31.5	30.9	35.4	29.9	26.4	26.4

ส่วนในด้านของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (% THD) ของแรงดันไลน์ จากผลการทดลองจะเห็นว่า ที่ทุกค่าความถี่ที่กำหนด เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น ค่า THD จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดูเลชั่นกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์และกระแสไลน์

ค่าดัชนีมอดูเลชั่น (M)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไลน์ และกระแสไลน์ (% THD)					
	40 Hz		50 Hz		70 Hz	
	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a	V_{ab}	I_a
0.6	12.19	15.41	12.66	15.14	12.86	16.90
0.8	10.79	13.16	10.88	15.51	10.87	17.57
1	7.47	7.82	7.16	10.20	6.92	9.08

6.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของอัตราส่วนแรงดันและความถี่ทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากสมการที่ 3.12 ในบทที่ 3 สามารถนำมาคำนวณหาค่าขนาดของแรงดันไลน์ได้ดังนี้

$$V_{out}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^{s} \cos(\alpha_k) \sin(n\omega t) \tag{6.1}$$

$\therefore$ ขนาดของ $V_{out}(\omega t)$ เท่ากับ

$$V_{out} = \frac{4E}{\pi}\left[\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3\right] \tag{6.2}$$

ที่ $V_{out} = V_p$ คือแรงดันเฟส

$$\therefore \quad V_p = \frac{4E}{\pi}\left[\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3\right] \tag{6.3}$$

และแรงดันไลน์เท่ากับ

$$V_{LL} = \sqrt{3}V_p \tag{6.4}$$

$$V_{LL}(rms) = \frac{\sqrt{3}V_p}{\sqrt{2}} \tag{6.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าของ α_1, α_2 และ α_3 สามารถหาได้จากตารางที่ 3.3 ในบทที่ 3 และค่าแรงดันไฟตรง E = 106 V_{dc} ซึ่งจากสมการที่ 6.3 และ 6.5 สามารถคำนวณค่าของขนาดแรงดันไลน์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ค่าขนาดของแรงดันไลน์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่างๆ

ดัชนีมอดูเลชั่น (M)	แรงดันไลน์
0.55	214.20
0.6	233.68
0.65	253.15
0.7	272.62
0.75	292.10
0.8	311.56
0.85	331.04
0.9	350.52
0.95	369.99
1	389.46

หลังจากนั้นทำการทดสอบขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานกับความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการทดสอบจะตั้งค่าความถี่กำหนดไว้ 4 ค่าเพื่อปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.6 – 6.9 ซึ่งมีความถี่กำหนด f_{base1} เท่ากับ 40 Hz, f_{base2} เท่ากับ 50 Hz, f_{base3} เท่ากับ 60 Hz และ f_{base4} เท่ากับ 70 Hz และจากค่าในตารางและกราฟสังเกตเห็นได้ว่า อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่จะมีค่าคงที่ ทั้งค่าจากการคำนวณและการทดลอง ส่วนค่าของแรงดันไลน์ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 6.5 นั้น ซึ่งสาเหตุเกิดจากการสูญเสียภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ และการสูญเสียภายในตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base1} = 40 Hz

M	f (Hz)	แรงดันไลน์ที่ได้จากการคำนวณ	แรงดันไลน์ที่ได้จากการทดลอง	V/f (คำนวณ)	V/f (ทดลอง)
0.6	24	233.68	214	9.73	8.91
0.7	28	272.62	250	9.73	8.92
0.8	32	311.56	289	9.73	9.00
0.9	36	350.52	318	9.73	8.83
1	40	389.46	339	9.73	8.47

ตารางที่ 6.7 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base2} = 50 Hz

M	f (Hz)	แรงดันไลน์ที่ได้จากการคำนวณ	แรงดันไลน์ที่ได้จากการทดลอง	V/f (คำนวณ)	V/f (ทดลอง)
0.6	30	233.68	215	7.78	7.16
0.7	35	272.62	256	7.78	7.31
0.8	40	311.56	298	7.78	7.45
0.9	45	350.52	328	7.78	7.28
1	50	389.46	361	7.78	7.22

ตารางที่ 6.8 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base3} = 60 Hz

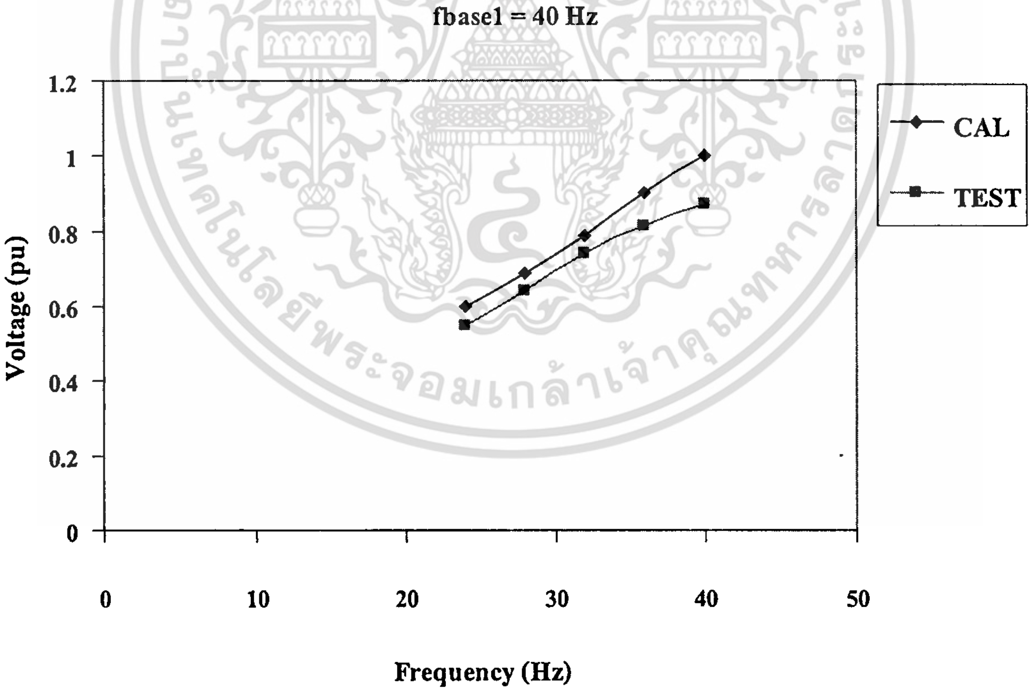
M	f (Hz)	แรงดันไลน์ที่ได้จากการคำนวณ	แรงดันไลน์ที่ได้จากการทดลอง	V/f (คำนวณ)	V/f (ทดลอง)
0.6	36	233.68	215	6.49	5.97
0.7	42	272.62	254	6.49	6.04
0.8	48	311.56	295	6.49	6.14
0.9	54	350.52	327	6.49	6.05
1	60	389.46	367	6.49	6.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.9 ค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนด f_{base4} = 70 Hz

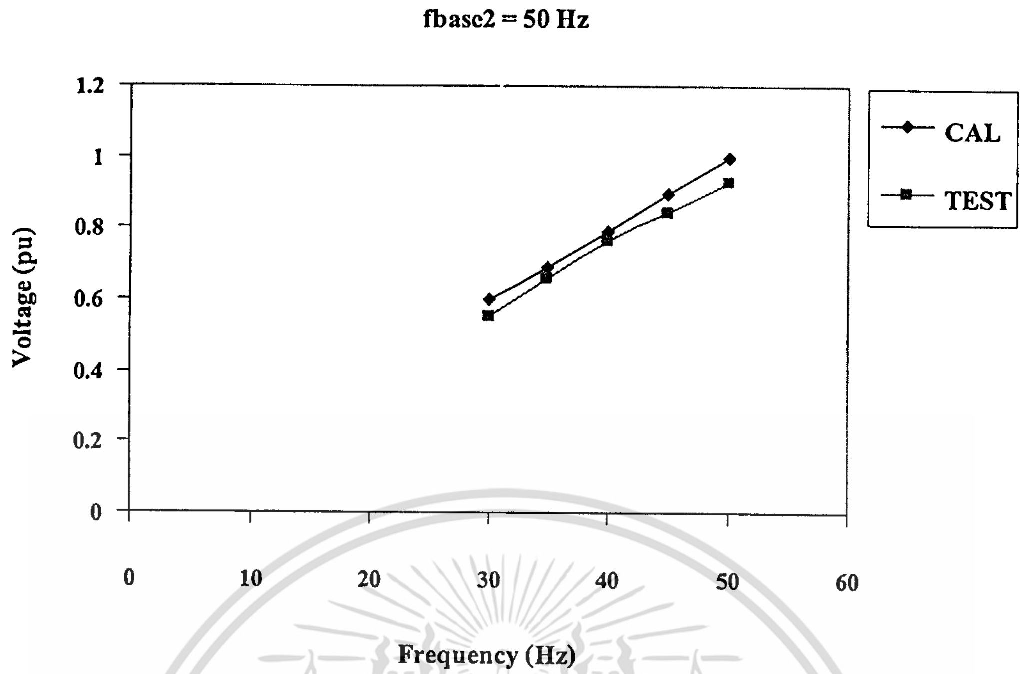
M	f (Hz)	แรงดันไลน์ที่ได้จากการคำนวณ	แรงดันไลน์ที่ได้จากการทดลอง	V/f (คำนวณ)	V/f (ทดลอง)
0.6	42	233.68	215	5.56	5.11
0.7	49	272.62	255	5.56	5.20
0.8	56	311.56	297	5.56	5.30
0.9	63	350.52	330	5.56	5.23
1	70	389.46	365	5.56	5.21

จากตารางค่าอัตราส่วนแรงดันมูลฐานต่อความถี่ ที่ความถี่กำหนดทั้งสี่ค่าสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานกับความถี่ด้านเอาท์พุท ของแต่ละความถี่กำหนดได้ดังนี้

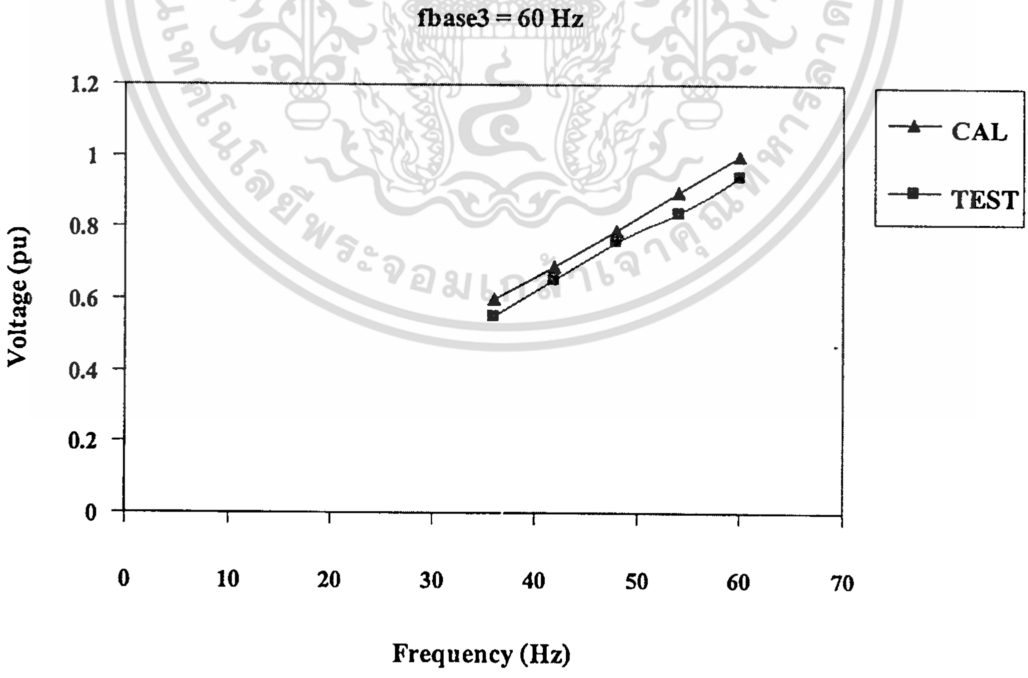


รูปที่ 6.93 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base1} = 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

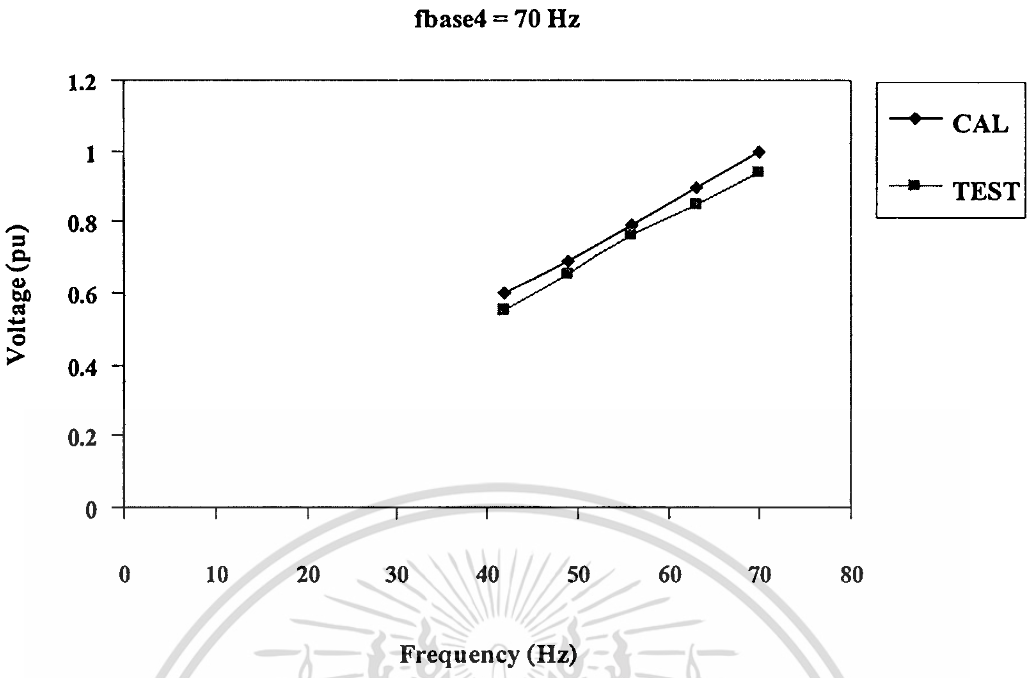


รูปที่ 6.94 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base2} = 50 Hz

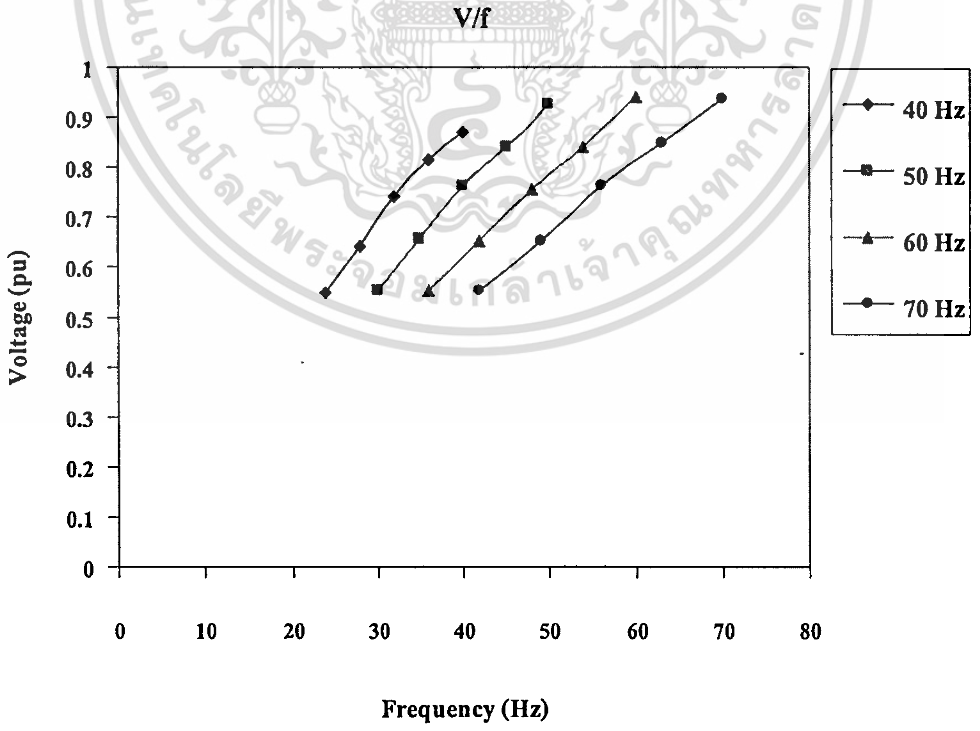


รูปที่ 6.95 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base3} = 60 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.96 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานต่อความถี่จากการคำนวณและทดลอง ที่ความถี่กำหนด f_{base4} = 70 Hz

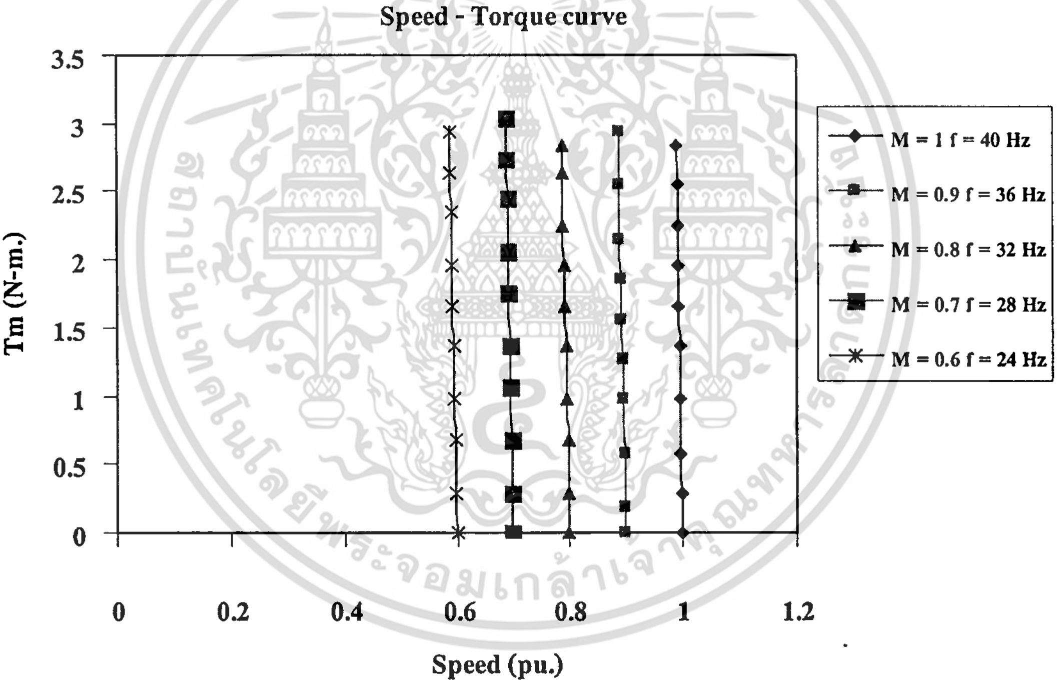


รูปที่ 6.97 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานกับความถี่ด้านเอาท์พุทที่ความถี่กำหนดต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

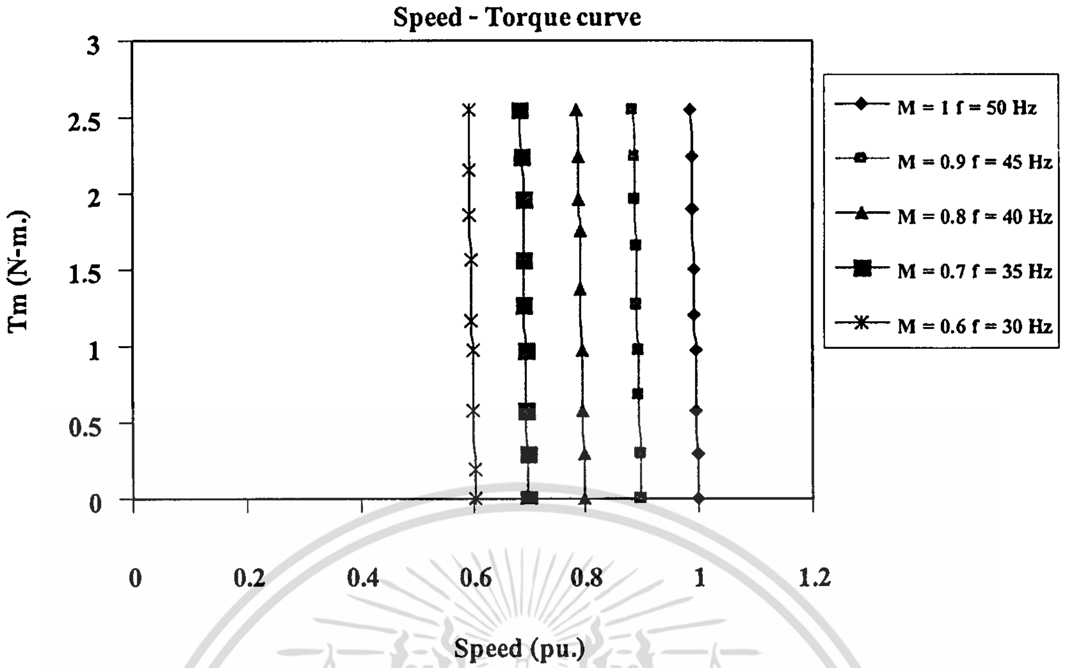
6.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติ speed – torque curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากกราฟรูปที่ 6.94 และ 6.95 แสดงผลของการทดสอบคุณสมบัติของแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ขับเคลื่อนและโหลดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบได้ใช้โหลดทางกลเป็นเหล็กถ่วงน้ำหนักที่สภาวะคงตัว ถือได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์จะเท่ากับแรงบิดของโหลด รูปที่ 6.94 ทดสอบเมื่อตั้งค่าความถี่กำหนดเท่ากับ 40 Hz และรูปที่ 6.95 ทดสอบเมื่อตั้งค่าความถี่กำหนดเท่ากับ 50 Hz จะเห็นว่า แรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์รูปที่ 6.94 จะให้ค่าแรงบิดที่สูงกว่ารูปที่ 6.95 ที่ความเร็วรอบเดียวกันหรือที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เดียวกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากมีความถี่กำหนดที่ต่ำกว่าจึงทำให้ความชันของ v/f มีค่าสูงทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในแอร์ – แก็ป (Air-gap) สูงกว่าจึงสามารถให้แรงบิดแก่โหลดได้มากกว่า



รูปที่ 6.98 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เมื่อความถี่กำหนด f = 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.99 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เมื่อความถี่กำหนด f = 50 Hz

6.5 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุท – เอาท์พุท และประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ขณะขับโหลด โดยที่โหลดของมอเตอร์ที่ใช้นี้ จะใช้โหลดทางกลเป็นเหล็กถ่วงน้ำหนัก และในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุท – เอาท์พุทได้ใช้ Power Analyzer (YAKOGAWA) รุ่น PZ4000 เป็นเครื่องมือในการวัดและทดสอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

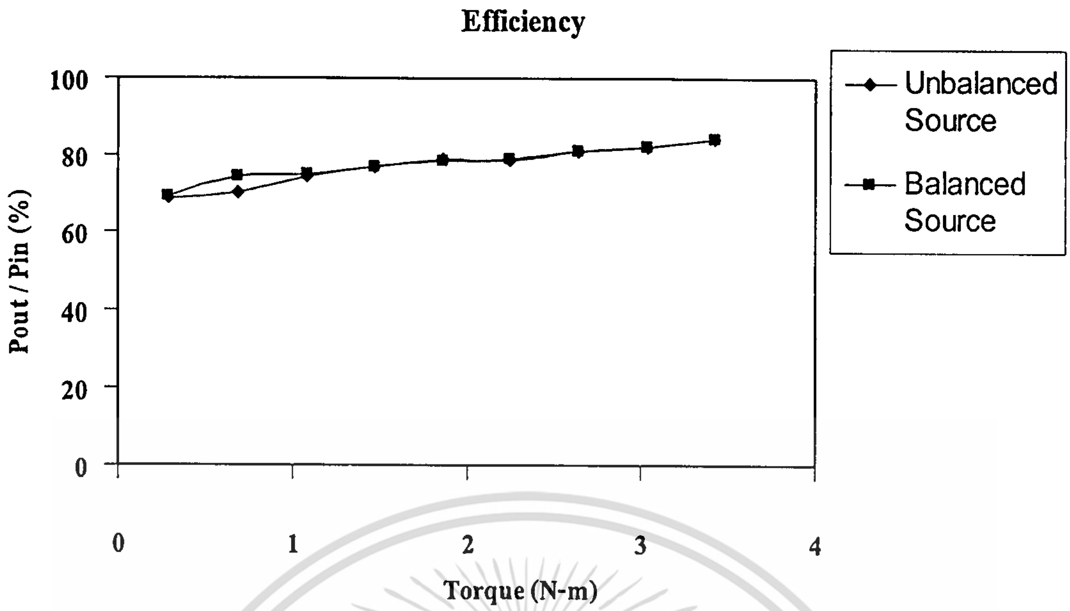
ตารางที่ 6.10 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N-m)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	ประสิทธิภาพ η (%)
1491	0.2943	507.8	349.6	68.84
1489	0.6867	587	413	70.35
1486	1.0791	660	492.5	74.62
1482	1.4715	751	577	76.83
1479	1.8639	844	668	79.14
1474	2.2563	968	763	78.82
1470	2.6487	989	801.3	81.02
1467	3.0411	1091	895	82.03
1463	3.4335	1213	1021	84.17

ตารางที่ 6.11 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N-m)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	ประสิทธิภาพ η (%)
1492	0.2943	508	351.4	69.17
1489	0.6867	581	431.9	74.33
1486	1.0791	661	494.6	74.82
1482	1.4715	748	578.2	77.29
1478	1.8639	848	666.2	78.56
1474	2.2563	967	765.3	79.14
1470	2.6487	992	806.4	81.29
1467	3.0411	1097	900	82.04
1463	3.4335	1204	1015	84.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.100 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในกรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลและสมดุล

จะเห็นว่าจากกราฟรูปที่ 6.95 แสดงถึงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่า การนำเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) มาช่วยในการออกแบบรูปแบบการสวิทช์นั้น จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ลดลง

6.6 สรุป

จากผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่สภาวะไร้โหลด ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล จะเห็นว่าในกรณีนี้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่เท่ากันคือ เซลล์ที่ 1 น้อยกว่าเซลล์ที่ 2 น้อยกว่าเซลล์ที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 ซึ่งเกิดจากรูปแบบการสวิทช์ที่ทำให้ ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ไม่เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน ซึ่งจะส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ มีอายุการใช้งานไม่เท่ากัน และในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล จะเห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.3 ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงานนั่นเอง ซึ่งทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของแรงดันไลน์จะมีค่าลดลง เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น (ที่ค่าความถี่มูลฐานเดียวกัน) ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และ 6.4 ตามลำดับ

จากผลการทดลองจะเห็นว่า ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลมีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกันมาก จะเห็นว่าผลจากการจำลองกับผลการทดลองจริงจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่าอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบที่มีการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ใหม่ที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถทำงานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด โดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมและเทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) เพื่อปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ ที่ทำให้แรงดันด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีลักษณะที่เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาเท่าๆ กัน และทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกทำการวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ที่เจ็ดระดับ โดยได้นำไปทำการทดสอบขับมอเตอร์เตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นและความถี่มูลฐานต่างๆ ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลและ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล เปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของแรงดันไลน์และกระแสไลน์ เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นและความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลง

7.1.1 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล

จากผลการทดสอบในกรณีนี้จะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่เท่ากัน คือ เซลล์ที่ 1 น้อยกว่าเซลล์ที่ 2 น้อยกว่าเซลล์ที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากรูปแบบของการสวิทช์ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ไม่เหมือนกันนั่นเอง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของแรงดันไลน์จะมีค่าลดลงเมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น (ที่ค่าความถี่มูลฐานเดียวกัน) ดังแสดงในตารางที่ 6.2

7.1.2 สรุปผลการทดสอบ ในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล

จากผลการทดสอบในกรณีนี้จะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.3 ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงานนั่นเอง ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของแรงดันไลน์จะมีค่าลดลง เมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นเพิ่มขึ้น (ที่ค่าความถี่มูลฐานเดียวกัน) ดังแสดงในตารางที่ 6.4

7.2 สรุปผลการทำงานทั้งระบบ

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่า ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุล และกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลนั้น ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ มีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกันมาก นั่นแสดงให้เห็นว่า ในการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน โดยช่วงเวลาการทำงานในหนึ่งคาบจะยืดออกไปนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ และทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้งระบบได้อีกทางหนึ่งด้วย

7.3 ข้อเสนอแนะ

7.3.1วงจรขับนำเกทในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากเมื่อทำการทดลองขับมอเตอร์ที่ค่าความถี่มูลฐานต่ำๆ จะทำให้ตัวไอซีเบอร์ IR2110 เกิดความเสียหายบ่อยมาก สำหรับงานวิจัยต่อไปควรนำเลือกใช้วงจรขับนำเกทชุดอื่นที่มีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่เป็นอิสระต่อกัน

7.3.2 เนื่องจากการเขียนโปรแกรมในการสร้างสัญญาณขับเกทสวิทช์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเปิดค่าในตาราง (Look Up Table) ซึ่งจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำที่มีขนาดใหญ่ แต่ชุดของไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ที่มีหน่วยความจำที่ 16 kBit ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมให้อ่านค่ามอดูเลชั่นได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น จึงมีความยุ่งยากที่จะเปลี่ยนค่ามอดูเลชั่นในการทดลอง จึงต้องทำการคอมไพล์ (Compile) โปรแกรมใหม่ทุกครั้งที่ต้องการเปลี่ยนค่ามอดูเลชั่น ซึ่งในงานวิจัยต่อไปควรเลือกใช้เบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดหน่วยความจำมากกว่านี้

7.3.3 วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรดังรูปที่ 5.8 มาต่อรวมกันเป็นจำนวน 18 ชุด เพื่อสร้างสัญญาณขับนำเกทสวิทช์ให้ครบ 36 ชุด (ในอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับมีสวิทช์เป็นจำนวน 36 ตัว) ซึ่งในวงจรประวิงเวลาทั้ง 18 ชุด จะมี Oscillator 1MHz ในการกำเนิดสัญญาณนาฬิกา อยู่หนึ่งตัว อาจจะทำให้วงจรประวิงเวลาในแต่ละชุดอาจจะทำงานได้ไม่พร้อมกัน ซึ่งมีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สัญญาณขับนำเกทสวิทช์ที่ได้ออกมาอาจจะมีความผิดพลาดไม่ตรงกับค่าที่ได้คำนวณไว้ สำหรับในงานวิจัยต่อไปควรใช้วงจรประวิงเวลา (เดดไทม์) ที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาจากที่เดียวกัน ซึ่งอาจจะใช้เป็นไอซี CPLD (Complex Programmable Logic Device) หรือ FPGA (Field Programmable Gate Array) ช่วยให้ประหยัด, ลดขนาดของวงจร และลดปัญหาดังกล่าวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] I. Takahashi A. Nabae and H. Akagi, "A new neutral-point clamped pwm inverter," IEEE Trans. Ind. Application, vol. IA-17, Sep-Oct. 1981, pp. 518-523

[2] S. Sirisukprasert, J.S. Lai and T.H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converter," CPES. pp. 212-217.

[3] S. Sirisukprasert, J.S. Lai and T.H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converter," IEEE Trans. On Ind. Electronics, vol. 49, No. 4, August 2002, pp. 875-881.

[4] Leon M. Tolbert, Fang Zheng Peng, Tim Cunnyngham and John N. Ciasson, "Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 49, no. 5, October 2002, pp. 1058-1064

[5] Leon M. Tolbert, Fang Zheng Peng, and Thomas G. Habetler, "Multilevel Converter for Large Electric Drives," IEEE Trans. On Ind. Applications, vol. 35, No.1, January/February 1999, pp. 36-44

[6] Leon M. Tolbert, John N. Chiasson, Zhong Du, Keith J. McKenzie,"Elimination of Harmonics in a Multilevel Converter With Nonequal DC Sources," IEEE Trans. On Ind. Applications, vol. 41, No. 1, January/February 2005, pp. 75-82

[7] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, John N. Chiasson, "Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms," IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, No. 3, September 2005, pp. 92-95

[8] เชิงชาย สมประชา "การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับควบคุม ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยเทคนิค RBM CHOPPER" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2548

[9] สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์, วิจิตร กิณเรศ "อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์" วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2546, หน้า 53-58

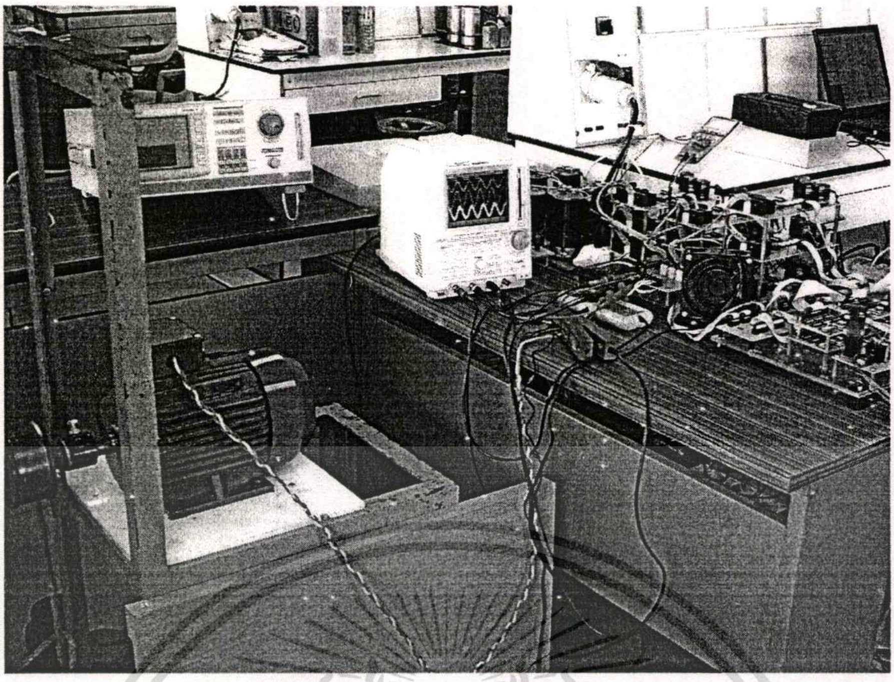
[10] สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์, วิจิตร กิณเรศ "อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม" วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน 2549, หน้า 42-47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

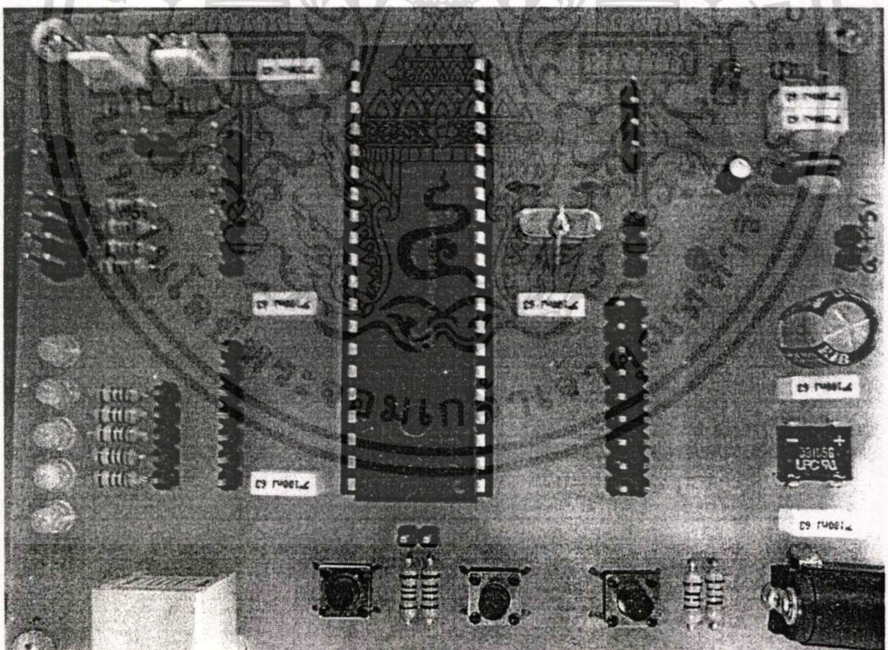
ภาคผนวก ก

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

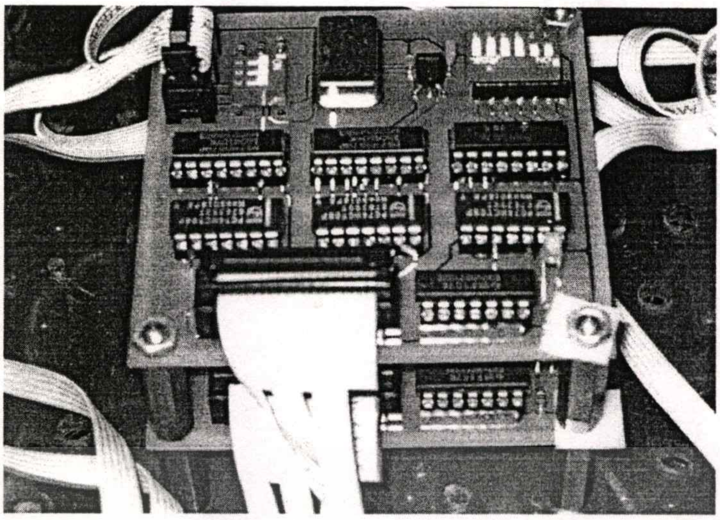


ระบบของชุดทดสอบ

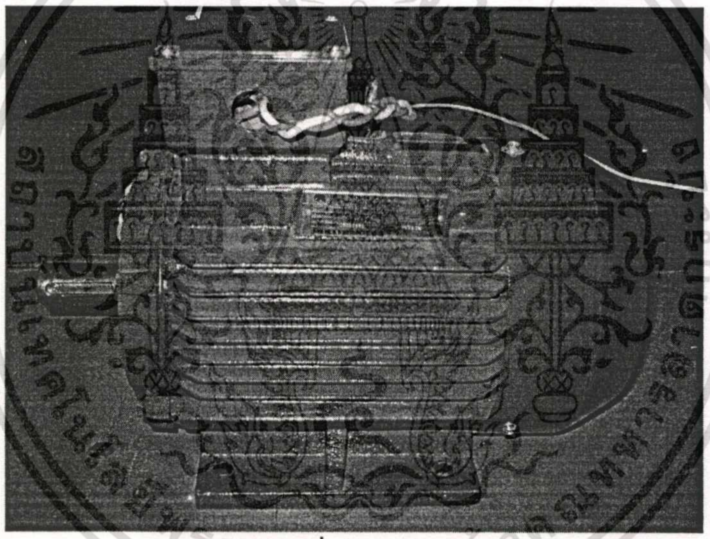


ชุดกำเนิดสัญญาณเกทสวิทช์ dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชุดวงจรเดดไทม์



รูปมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ป้ายพิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

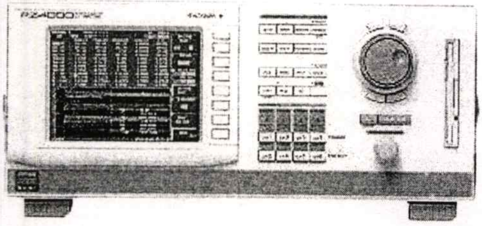
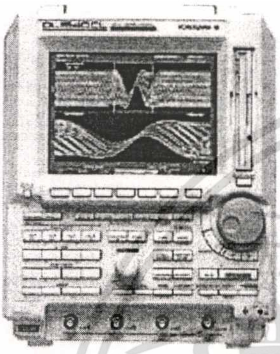
THREE PHASE INDUCTION MOTOR			
TYPE	Y2-100L_{1-4}	IP	55
Hp/kW	3/2.2	VOLTS	220/380
POLES	4	Hz	50
AMP'S	8.91/5.16	RPM	1430
FRAME	B3	INS CLASS	F
SERIAL NO.	03080692	DATE	2003.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

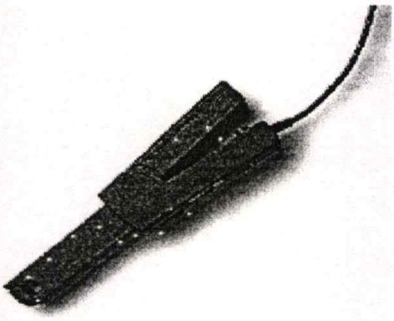
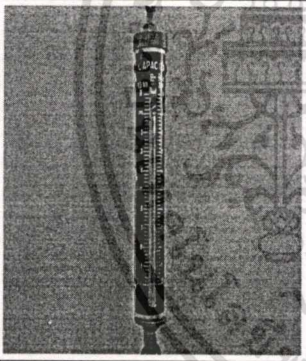
ภาคผนวก ข

เครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ผลิตภัณฑ์ Power Analyzer (YAKOGAWA) รุ่น PZ4000 รายละเอียด - Wide Measurement Bandwidth (DC to 2 MHz) - Accurately Sampling 5 MS/s - Harmonic Analysis (up to 500^{th} Order)
	ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1520/L (4 Channel) รายละเอียด - 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
	ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe รุ่น 700924 รายละเอียด - Sampling Rate 100 MHz - A Probe Lets You Make Wide-Band - Differential Input Measurements
	ผลิตภัณฑ์ Multi Meter (Hewlett Packard) รุ่น 973A รายละเอียด - True RMS 20 kHz Accuracy = 0.1% - Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts - Iac or Idc : 0 to 10 Amperes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN ARNOUX) รุ่น E3N รายละเอียด - Current Probe 10-100 Ampere/ 1Volt - Input 100 A Peak Max - Frequency: DC to 100 kHz .(@3 db) - Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III
	ผลิตภัณฑ์ TACHOMETER (LULRON) รุ่น DT-2236 รายละเอียด - Photo (rpm) - Contact (rpm)
	ผลิตภัณฑ์ ตาชั่งสปริง รายละเอียด - 0 – 10 กิโลกรัม (ขีดละ 200 กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การหาค่ามุมสวิทช์ที่ค่ามอดูเลชั่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่ามุมสวิทช์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ

ค.1 หลักการหาค่ามุมสวิทช์ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ

จากเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได ในบทที่ 3 จะเป็นการหาค่ามุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น จะเห็นว่าเมื่อค่าดัชนีมอดูเลชั่นมีค่าต่ำกว่า 0.55 จะไม่สามารถคำนวณหาค่ามุมสวิทช์ที่เหมาะสม โดยใช้สมการในรูปแบบเดิมได้ จึงได้มีการนำเสนอวิธีการหาค่ามุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ [2], [3]

จากรูปที่ ค.1 แสดงรูปคลื่นสเต็ปที่ครึ่งคาบบวกของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ซึ่งสามารถแบ่งระดับการมอดูเลชั่นออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน คือ ระดับมอดูเลชั่นสูง, ระดับมอดูเลชั่น กลาง, ระดับมอดูเลชั่นต่ำ ตามลำดับ และจากรูปที่ ค.1 สามารถหาวิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์ เพื่อหาสมการในการกำจัดฮาร์มอนิกส์ได้ดังนี้

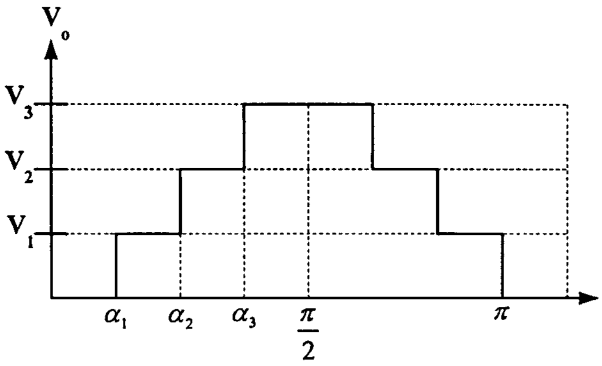
$$h_n = \frac{4}{n\pi}\left[V_1\cos(n\alpha_1) + V_2\cos(n\alpha_2) + V_3\cos(n\alpha_3)\right] \qquad \text{(ค-1)}$$

$$h_n = \frac{4}{n\pi}\left[V_1\cos(n\alpha_1) + V_2\cos(n\alpha_2) - V_3\cos(n\alpha_3)\right] \qquad \text{(ค-2)}$$

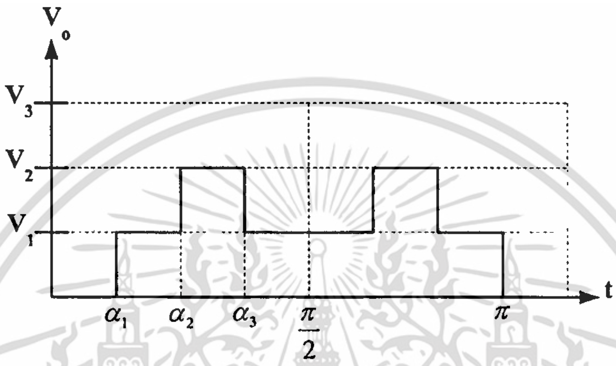
$$h_n = \frac{4}{n\pi}\left[V_1\cos(n\alpha_1) - V_2\cos(n\alpha_2) + V_3\cos(n\alpha_3)\right] \qquad \text{(ค-3)}$$

สมการ ค-1 เป็นสมการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ระดับมอดูเลชั่นสูง ซึ่งเป็นสมการที่ในงานวิจัยนี้ ส่วนสมการ ค-2 และสมการ ค-3 เป็นสมการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง และระดับมอดูเลชั่นต่ำ ตามลำดับ จากสมการทั้งสามสามารถนำไปใช้วิธีนิวตัน-ราปสัน เพื่อคำนวณหาค่ามุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ได้ดังตารางที่ ค.1

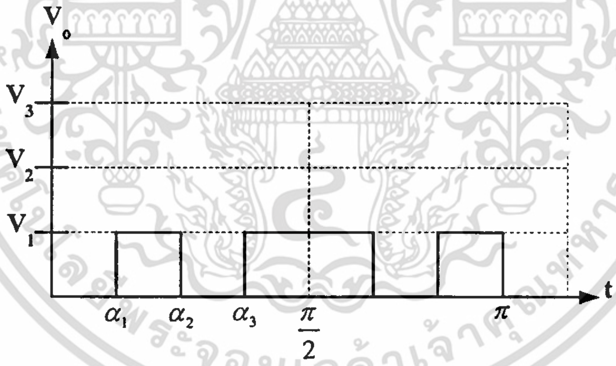
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ค.1 แสดงรูปคลื่นที่ครึ่งคาบบวกของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดที่ระดับมอดูเลชั่นต่างๆ

(ก) ระดับมอดูเลชั่นสูง

(ข) ระดับมอดูเลชั่นกลาง

(ค) ระดับมอดูเลชั่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulation Index กับมุมสวิทชิ่งของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

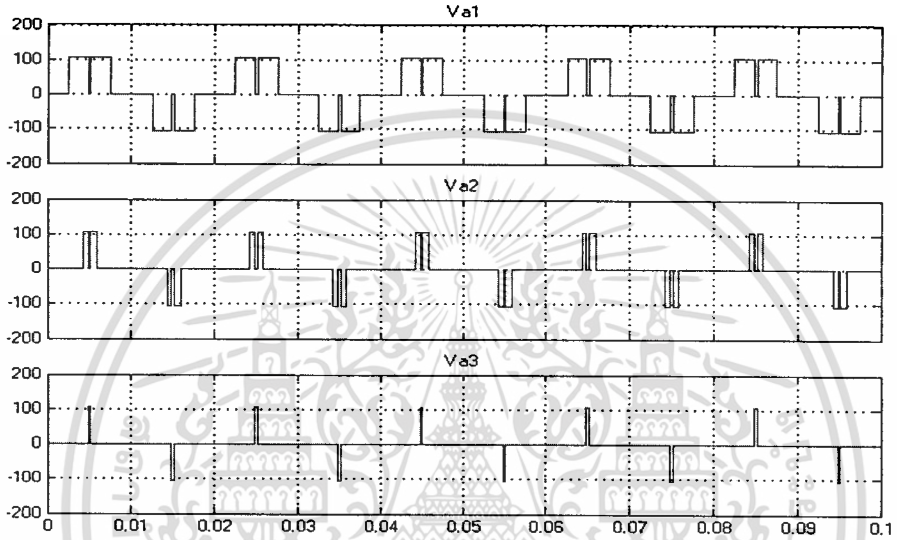
ระดับดัชนีมอดูเลชั่น	ดัชนีมอดูเลชั่น (M)	α_1	α_2	α_3
ระดับสูง	1	11.6817	31.1783	58.5774
	0.95	13.8158	37.1899	61.9216
	0.9	17.5104	43.0523	64.1395
	0.85	22.7654	49.3798	64.5562
	0.8	29.2395	54.4383	64.4844
	0.75	34.8935	54.4622	68.5500
	0.7	38.3413	53.9297	73.9648
	0.65	39.3876	55.5215	78.8979
	0.6	39.4298	58.5839	83.1042
	0.55	39.7742	62.1282	86.5693
ระดับกลาง	0.5	19.3237	66.1132	80.1832
	0.45	42.2974	69.7408	88.5307
	0.4	44.1689	74.3271	87.4234
ระดับต่ำ	0.35	22.3189	37.7252	46.3273
	0.3	29.2286	39.2439	52.5088
	0.25	43.4165	51.0234	60.5493
	0.2	50.9218	63.3639	73.1910
	0.15	53.5810	64.3754	78.9178
	0.1	55.8519	63.4311	83.0179
	0.05	57.9840	61.8571	86.5988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

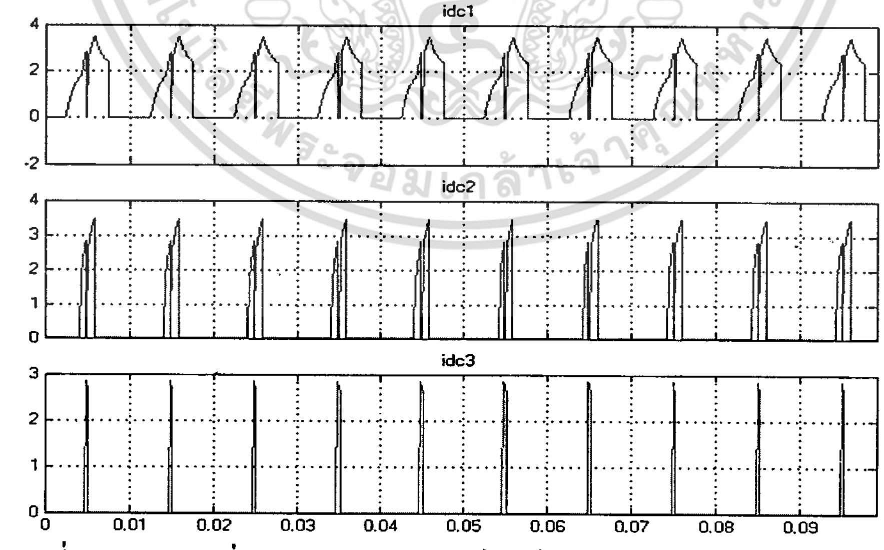
ค.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แจ็ดระดับชนิดแคสเคด ที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำ

จากตารางที่ ค.1 สามารถนำมาทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แจ็ดระดับชนิดแคสเคด โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งได้ผลการจำลองดังนี้

ค.2.1 ที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง $M = 0.4$ $f = 50$ Hz



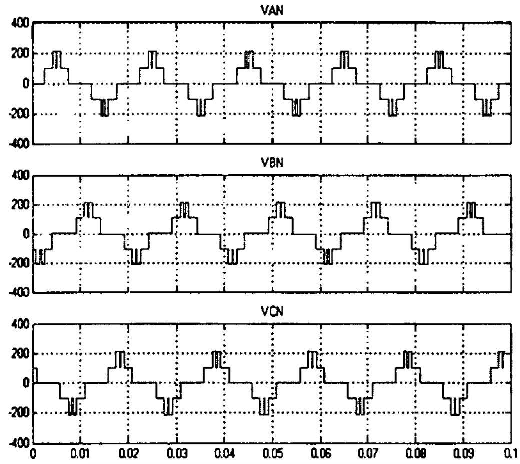
รูปที่ ค.2 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A



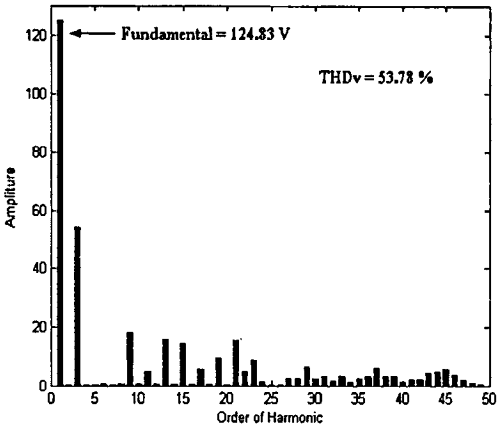
รูปที่ ค.3 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 110 W, 38.37 W และ 8.583 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

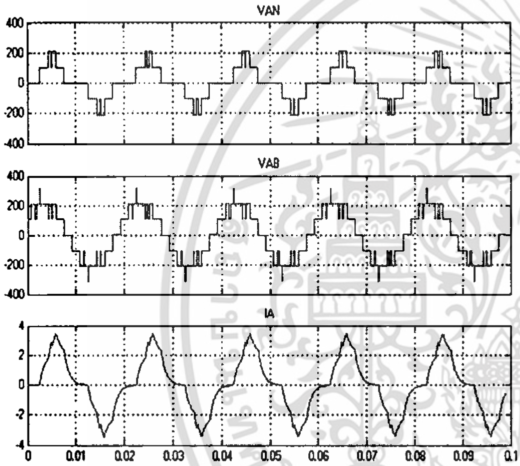


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}, V_{cn}

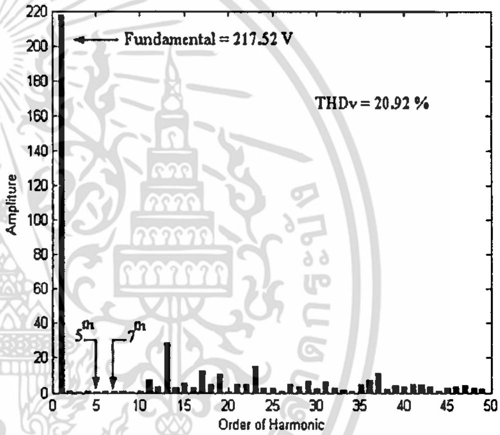


(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ ค.4 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn}, V_{cn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an}

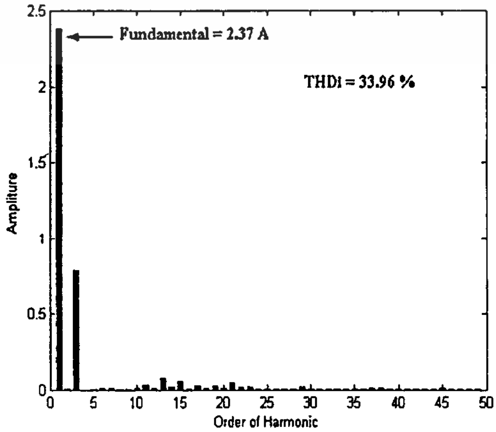


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

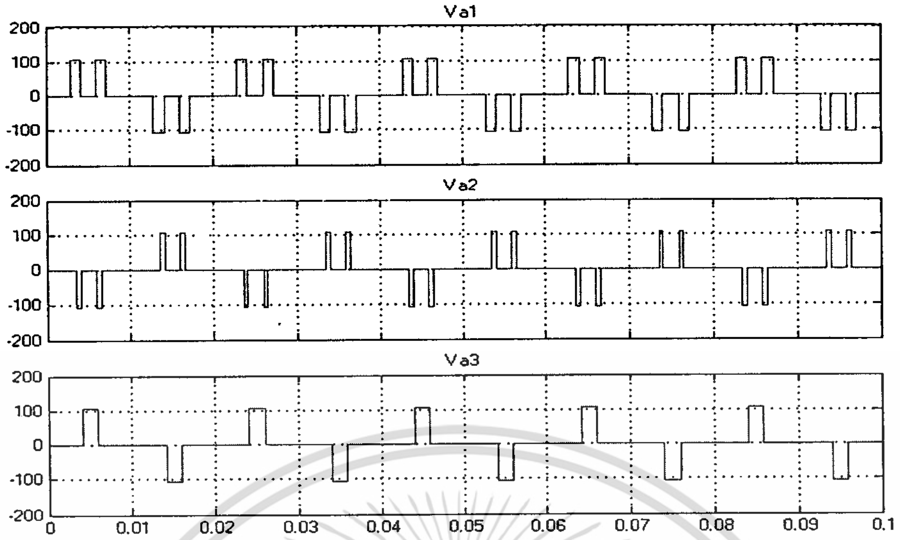
รูปที่ ค.5 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}



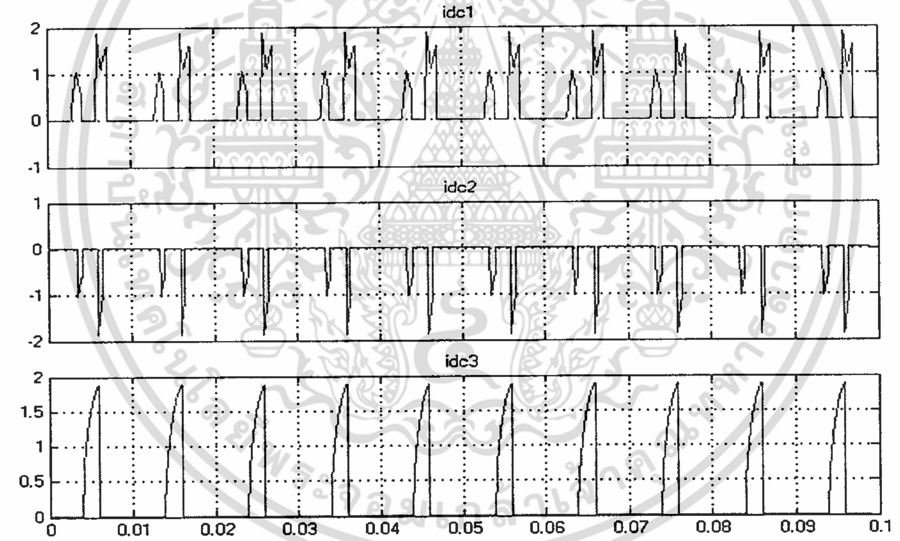
รูปที่ ค.6 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.2 ที่ระดับมอดูเลชั่นต่ำ $M = 0.2$ $f = 50$ Hz



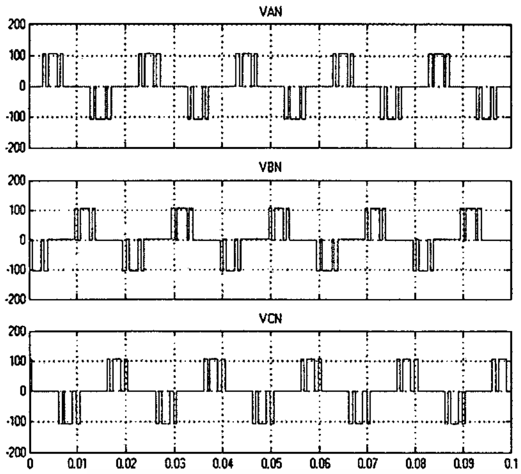
รูปที่ ค.7 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A



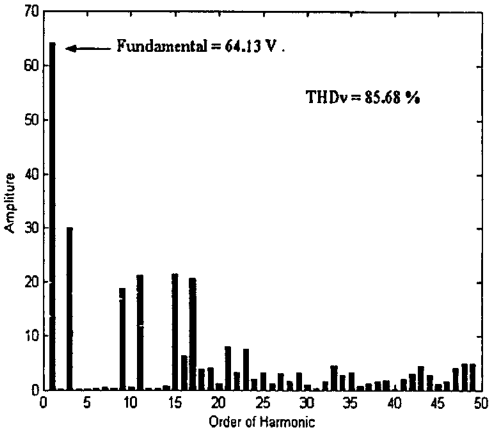
รูปที่ ค.8 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 27.76 W, -12.89 W และ 28.66 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

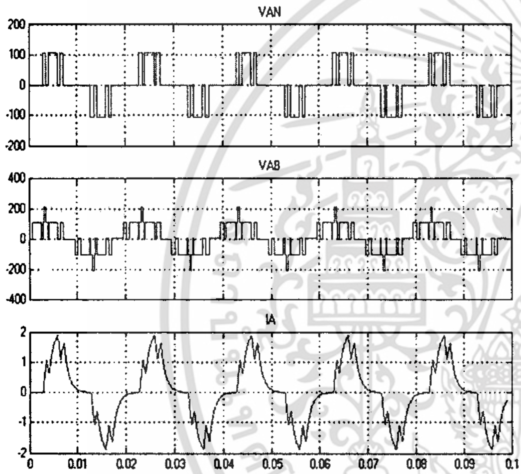


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}, V_{cn}

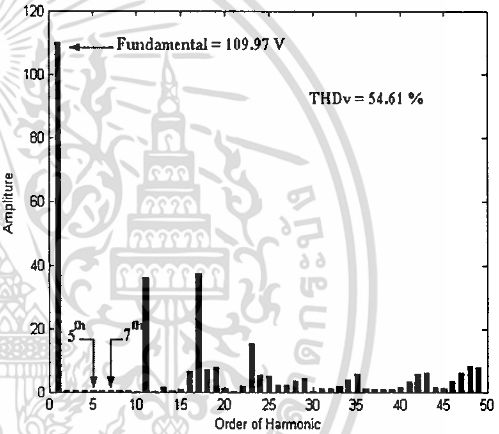


(ค) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ ค.9 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn}, V_{cn} และสเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an}

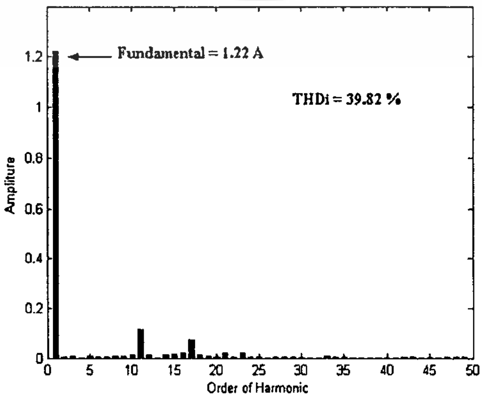


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ ค.10 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}



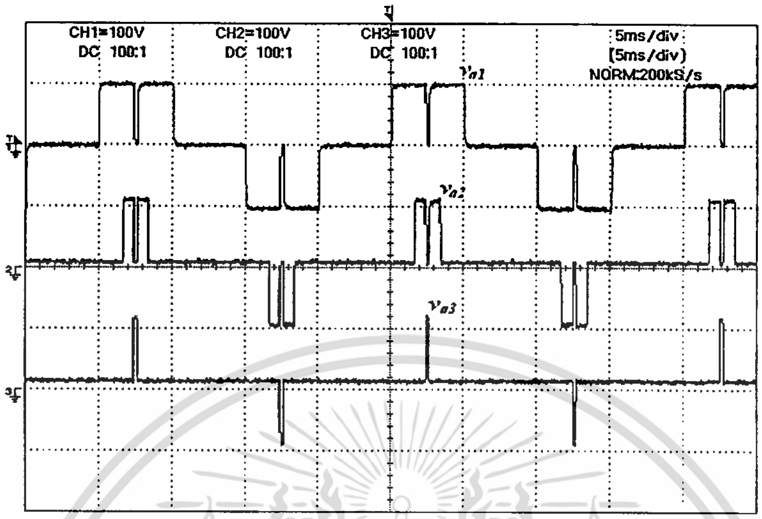
รูปที่ ค.11 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

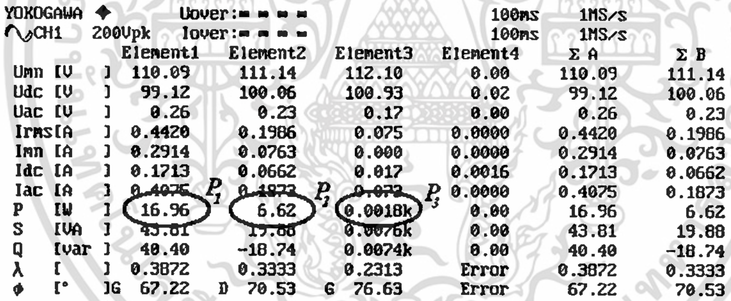
ค.3 ผลการทดสอบขับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

ค.3.1 กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง

$M = 0.4$ $f = 50$ Hz



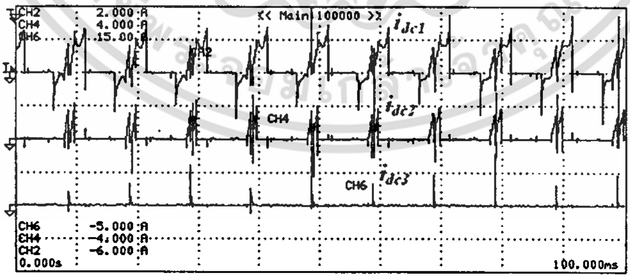
รูปที่ ค.12 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A



YOKOGAWA ◆ Uover:■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s

CH1 200Vpk Iover:■ ■ ■ ■ 100ms 1MS/s

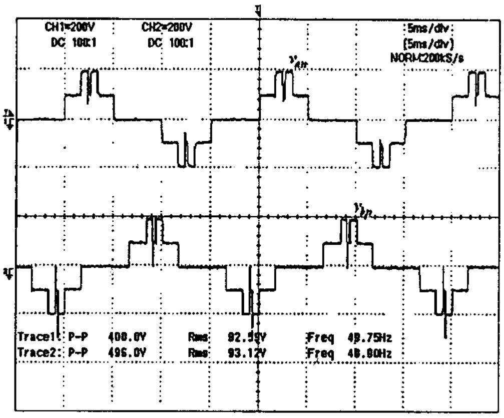
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Umn [V]	110.09	111.14	112.10	0.00	110.09	111.14
Udc [V]	99.12	100.06	100.93	0.02	99.12	100.06
Uac [V]	0.26	0.23	0.17	0.00	0.26	0.23
Irms[A]	0.4420	0.1986	0.075	0.0000	0.4420	0.1986
Imn [A]	0.2914	0.0763	0.000	0.0000	0.2914	0.0763
Idc [A]	0.1713	0.0662	0.017	0.0016	0.1713	0.0662
Iac [A]	0.4075	0.1873	0.073	0.0000	0.4075	0.1873
P [W]	16.96 (P_1)	6.62 (P_2)	0.0018k (P_3)	0.00	16.96	6.62
S [VA]	43.81	19.88	0.0076k	0.00	43.81	19.88
Q [var]	40.40	-18.74	0.0074k	0.00	40.40	-18.74
λ [ ]	0.3872	0.3333	0.2313	Error	0.3872	0.3333
φ [°]	G 67.22	D 70.53	G 76.63	Error	67.22	70.53



รูปที่ ค.13 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

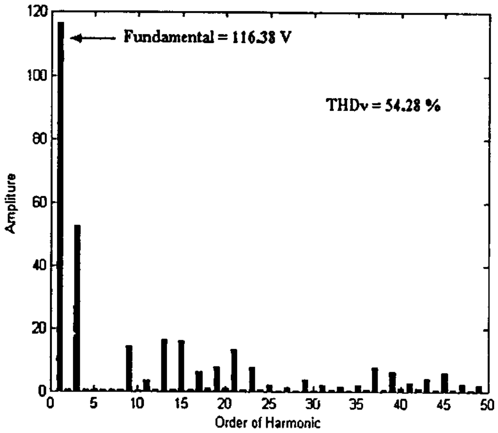
ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 16.96 W, 6.62 W และ 1.80 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



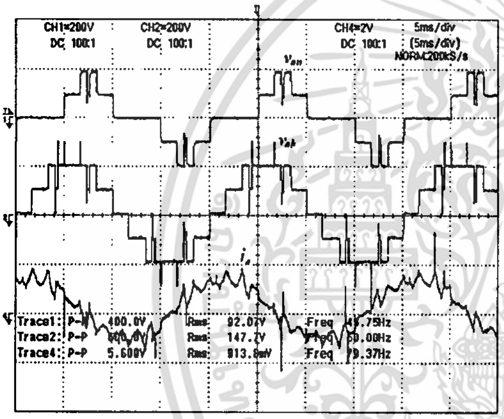
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div



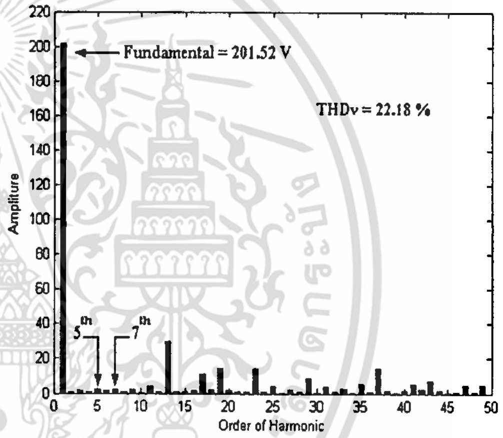
(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ ค.14 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ $f = 50$ Hz



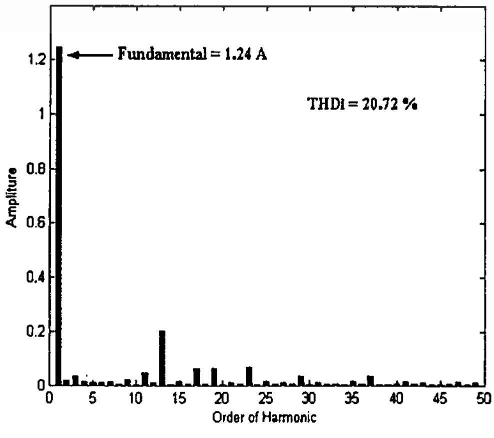
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab}= 200V/div, i_a= 2 A/div



(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ ค.15 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ $f = 50$ Hz

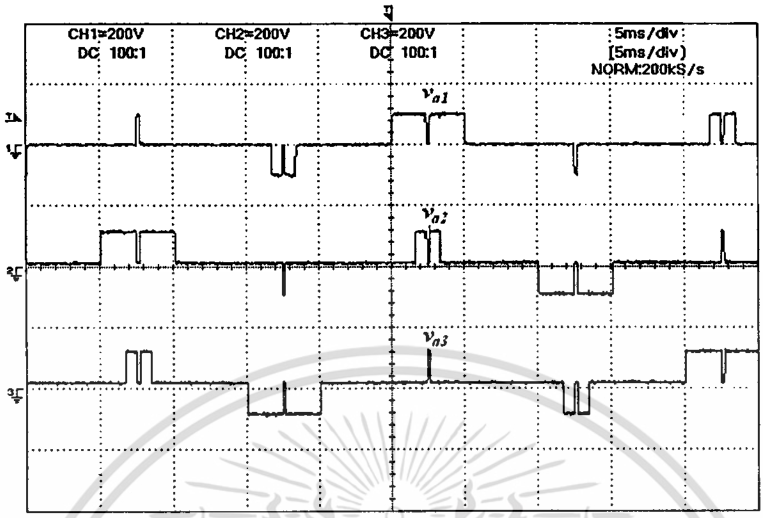


รูปที่ ค.16 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

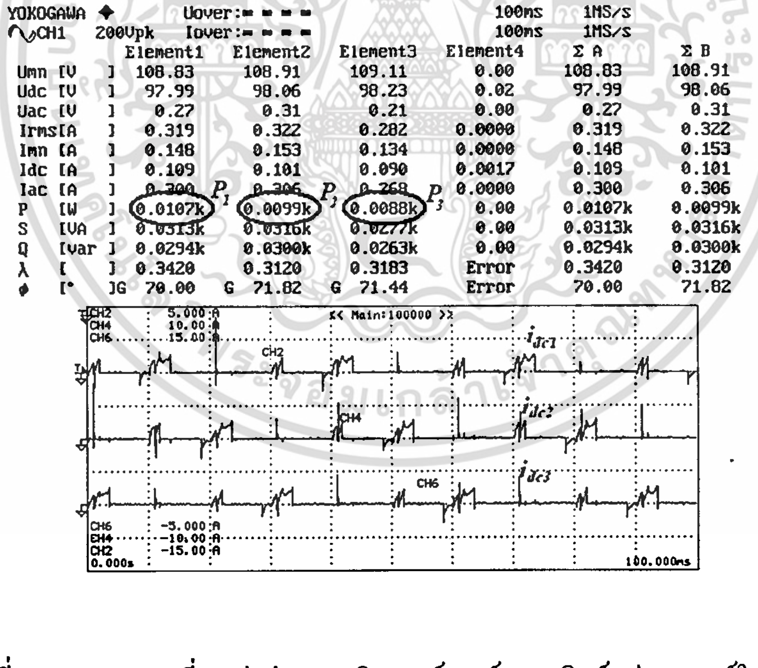
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3.2 กรณีแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลที่ระดับมอดูเลชั่นกลาง

$M = 0.4$ $f = 50$ Hz



รูปที่ ค.17 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A



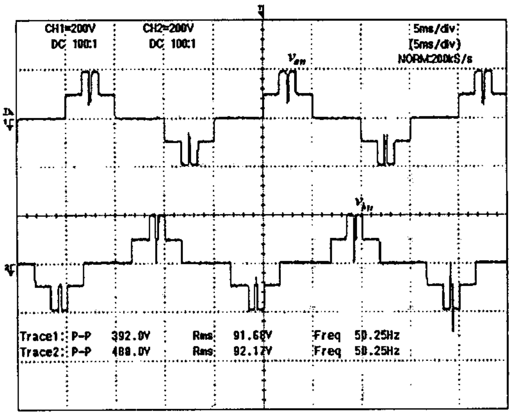
YOKOGAWA ◆ Uover:- - - - 100ms 1MS/s
CH1 200Vpk Iover:- - - - 100ms 1MS/s

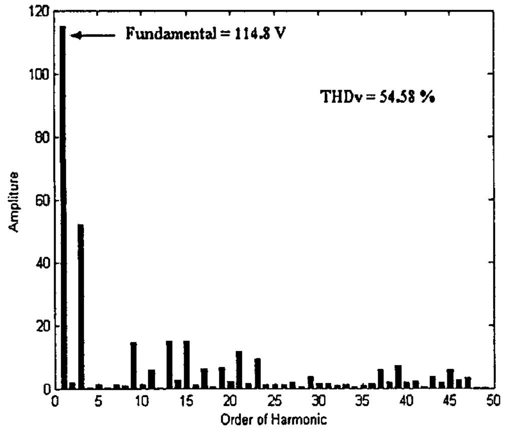
	Element1	Element2	Element3	Element4	Σ A	Σ B
Umn [V]	108.83	108.91	109.11	0.00	108.83	108.91
Udc [V]	97.99	98.06	98.23	0.02	97.99	98.06
Uac [V]	0.27	0.31	0.21	0.00	0.27	0.31
Irms[A]	0.319	0.322	0.282	0.0000	0.319	0.322
Imn [A]	0.148	0.153	0.134	0.0000	0.148	0.153
Idc [A]	0.109	0.101	0.090	0.0017	0.109	0.101
Iac [A]	0.300	0.306	0.268	0.0000	0.300	0.306
P [W]	0.0107k (P_1)	0.0099k (P_2)	0.0088k (P_3)	0.00	0.0107k	0.0099k
S [VA]	0.0313k	0.0316k	0.0277k	0.00	0.0313k	0.0316k
Q [var]	0.0294k	0.0300k	0.0263k	0.00	0.0294k	0.0300k
λ [ ]	0.3420	0.3120	0.3183	Error	0.3420	0.3120
φ [°]	G 70.00	G 71.82	G 71.44	Error	70.00	71.82

รูปที่ ค.18 กระแสที่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A

ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 10.70 W, 9.90 W และ 8.80 W ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



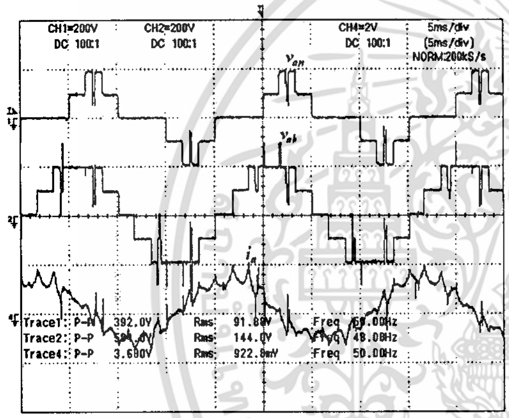


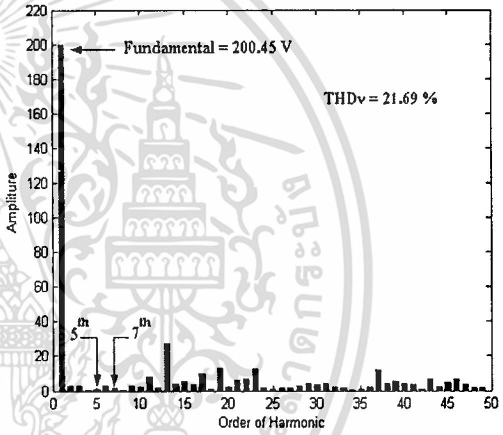
(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{bn}

V_{an}, V_{bn} = 200 V/div, 5 ms/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันเฟสเอาท์พุท V_{an}

รูปที่ ค.19 สัญญาณแรงดันเฟส V_{an}, V_{bn} และ สเปกตรัมของแรงดันเฟส V_{an} ที่ f = 50 Hz



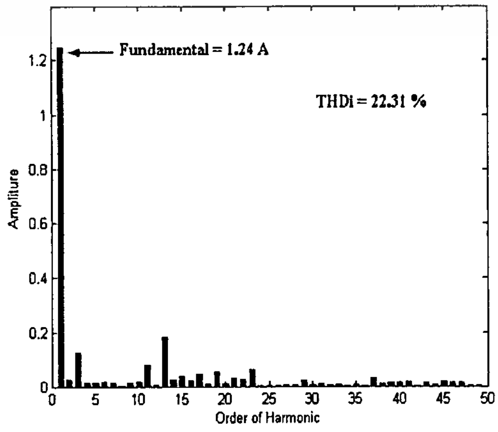


(ก) รูปสัญญาณ V_{an}, V_{ab}, i_a ตามลำดับ

V_{an} = 200V/div, V_{ab} = 200V/div, i_a = 2 A/div

(ข) สเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab}

รูปที่ ค.20 สัญญาณแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, กระแสเอาท์พุท V_{an}, V_{ab}, i_a และสเปกตรัมของแรงดันไลน์ V_{ab} ที่ f = 50 Hz



รูปที่ ค.21 สเปกตรัมของกระแสเอาท์พุท i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 สรุป

จากหลักการข้างต้น โดยทำการแบ่งระดับดัชนีมอดูเลชั่นออกเป็น 3 ระดับนั้น ทำให้สามารถหาค่ามุมสวิทชิ่งที่เหมาะสมเมื่อดัชนีมอดูเลชั่นมีค่าต่ำได้ ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะเห็นว่าเมื่อดัชนีมอดูเลชั่นมีค่าต่ำลงก็จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%THD) ของแรงดันและกระแสที่เอาท์พุทมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดสอบขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะเห็นว่ามีผลสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กล่าวคือ เมื่อดัชนีมอดูเลชั่นมีค่าลดลงก็จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%THD) ของแรงดันและกระแสที่เอาท์พุทมีค่าเพิ่มมากขึ้น และจากการทดสอบขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่าที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำกว่า 0.4 จะไม่สามารถจ่ายแรงดันขับมอเตอร์ให้หมุนได้ เนื่องจากแรงดันที่ค่าดัชนีมอดูเลชั่นต่ำกว่า 0.4 นั้นมีขนาดไม่เพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์หมุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

โปรแกรมสร้างสัญญาณเกทสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;***************************************************************************
;            Filename       : HARMONIC ELIMINATION                          *
;            Date           : 27/6/2006                                     *
;            Frequency      :  7.3728 MHz at PLL 16x                        *
;                                                                           *
;            Other Files Required: p30F4011.gld, p30f4011.inc               *
;            Tools Used: MPLAB GL: 7.22                                     *
;            Compiler: 1.30                                                 *
;            Assembler: 1.30                                                *
;            Linker   : 1.30                                                *
;                                                                           *
;            Devices Supported by this file: dsPIC 30F4011                  *
;***************************************************************************
;            Additional Notes:  Balance Source Modulation Index = 1         *
;            f = 50 Hz                                                      *
;                                                                           *
;***************************************************************************
             .equu __30F4011, 1
             .include "p30f4011.inc"
;***************************************************************************
; Configuration bits:                                                       *
; **************************************************************************
             config __FOSC, CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16
             config __FWDT, WDT_OFF
             config __FBORPOR, PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_16 & MCLR_DIS
             config __FGS, CODE_PROT_OFF
; **************************************************************************
; Global Declarations:                                                      *
; **************************************************************************
             .global   __reset              ; The label for the first line of code.
             .global   __T1Interrupt        ; Declare Timer 1 ISR name global
; **************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; ************************************************************************
;Define  Variable and Global Declaration Constants:                       *
; ************************************************************************
        .bss        COUNT_SWICTH,2
        .global     COUNT_SWICTH
        .bss        S11,2           ;RB0
        .global     S11
        .bss        S13,2           ;RB1
        .global     S13
        .bss        S21,2           ;RB2
        .global     S21
        .bss        S23,2           ;RB3
        .global     S23
        .bss        S31,2           ;RB4
        .global     S31
        .bss        S33,2           ;RB5
        .global     S33
        .bss        SB11,2          ;RB6
        .global     SB11
        .bss        SB13,2          ;RB7
        .global     SB13
        .bss        SB21,2          ;RB8
        .global     SB21
        .bss        SB23,2          ;RE0
        .global     SB23
        .bss        SB31,2          ;RE1
        .global     SB31
        .bss        SB33,2          ;RE2
        .global     SB33
        .bss        SC11,2          ;RE3
        .global     SC11
        .bss        SC13,2          ;RE4
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.global     SC13
.bss        SC21,2      ;RE5
.global     SC21
.bss        SC23,2      ;RF0
.global     SC23
.bss        SC31,2      ;RF1
.global     SC31
.bss        SC33,2      ;RF4
.global     SC33
.bss        VT_1,2      ;VARIABLE OF TABLE 1
.global     VT_1
.bss        VT_2,2      ; VARIABLE OF TABLE 2
.global     VT_2
.bss        VT_3,2      ; VARIABLE OF TABLE 3
.global     VT_3
.bss        VT_4,2      ; VARIABLE OF TABLE 4
.global     VT_4
.bss        VT_5,2      ; VARIABLE OF TABLE 5
.global     VT_5
.bss        VT_6,2      ; VARIABLE OF TABLE 6
.global     VT_6
.bss        VT_7,2      ; VARIABLE OF TABLE 7
.global     VT_7
.bss        VT_8,2      ; VARIABLE OF TABLE 8
.global     VT_8
.bss        VT_9,2      ; VARIABLE OF TABLE 9
.global     VT_9
.bss        VT_10,2     ; VARIABLE OF TABLE 10
.global     VT_10
.bss        VT_11,2     ; VARIABLE OF TABLE 11
.global     VT_11
.bss        VT_12,2     ; VARIABLE OF TABLE 12
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        .global     VT_12
        .bss        VT_13,2         ; VARIABLE OF TABLE 13
        .global     VT_13
        .bss        VT_14,2         ; VARIABLE OF TABLE 14
        .global     VT_14
        .bss        VT_15,2         ; VARIABLE OF TABLE 15
        .global     VT_15
        .bss        VT_16,2         ; VARIABLE OF TABLE 16
        .global     VT_16
        .bss        VT_17,2         ; VARIABLE OF TABLE 17
        .global     VT_17
        .bss        VT_18,2         ; VARIABLE OF TABLE 18
        .global     VT_18
;*************************************************************************
; Code Section in Program Memory                                         *
;*************************************************************************
.text                               ; Start of Code section
__reset:
        MOV   #__SP_init, W15       ; Initialize the Stack Pointer
        MOV   #__SPLIM_init, W0     ; Initialize the Stack Pointer Limit Register
        MOV   W0, SPLIM
        NOP                         ; Add NOP to follow SPLIM initialization
        CLR   W0                    ; Initialization of W registers to 0x0000
        MOV   W0,W14
        REPEAT #12
        MOV   W0,[++W14]
        CLR   W14
        CALL  Init_PORTS            ; Initialize the I/O ports
        CALL  Init_TMR              ; initialize TMR
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; ***************************************************************************
; Clear All Value of Program                                                *
; ***************************************************************************
            CLR     COUNT_SWICTH
            CLR     VT_1
            CLR     VT_2
            CLR     VT_3
            CLR     VT_4
            CLR     VT_5
            CLR     VT_6
            CLR     VT_7
            CLR     VT_8
            CLR     VT_9
            CLR     VT_10
            CLR     VT_11
            CLR     VT_12
            CLR     VT_13
            CLR     VT_14
            CLR     VT_15
            CLR     VT_16
            CLR     VT_17
            CLR     VT_18
            CLR     S11
            CLR     S13
            CLR     S21
            CLR     S23
            CLR     S31
            CLR     S33
            CLR     SB11
            CLR     SB13
            CLR     SB21
            CLR     SB23
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            CLR     SB31
            CLR     SB33
            CLR     SC11
            CLR     SC13
            CLR     SC21
            CLR     SC23
            CLR     SC31
            CLR     SC33
;**************************************************************************
; Start of Program                                                        *
;**************************************************************************
;*******************************PHASE A************************************
;**************************************************************************
BEGIN:
            MOV         #0,W1
            MOV         S11,W2
            CPSEQ       W2,W1
            BRA         S11_SET
            BRA         S11_CLR
S11_SET:    BSET        LATB,#RB0
            BRA         SW13
S11_CLR:    BCLR        LATB,#RB0

SW13:       MOV         #0,W3
            MOV         S13,W2
            CPSEQ       W2,W3
            BRA         S13_SET
            BRA         S13_CLR
S13_SET:    BSET        LATB,#RB1
            BRA         SW21
S13_CLR:    BCLR        LATB,#RB1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SW21:       MOV     #0,W1
            MOV     S21,W2
            CPSEQ   W1,W2
            BRA     S21_SET
            BRA     S21_CLR
S21_SET:    BSET    LATB,#RB2
            BRA     SW23
S21_CLR:    BCLR    LATB,#RB2

SW23:       MOV     #0,W3
            MOV     S23,W2
            CPSEQ   W3,W2
            BRA     S23_SET
            BRA     S23_CLR
S23_SET:    BSET    LATB,#RB3
            BRA     SW31
S23_CLR:    BCLR    LATB,#RB3

SW31:       MOV     #0,W1
            MOV     S31,W2
            CPSEQ   W1,W2
            BRA     S31_SET
            BRA     S31_CLR
S31_SET:    BSET    LATB,#RB4
            BRA     SW33
S31_CLR:    BCLR    LATB,#RB4

SW33:       MOV     #0,W3
            MOV     S33,W2
            CPSEQ   W3,W2
            BRA     S33_SET
            BRA     S33_CLR
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
S33_SET:    BSET    LATB,#RB5
            BRA     SWB11
S33_CLR:    BCLR    LATB,#RB5
;************************************************************************
;******************************PHASE B************************************
;************************************************************************
SWB11:      MOV     #0,W1
            MOV     SB11,W2
            CPSEQ   W1,W2
            BRA     SB11_SET
            BRA     SB11_CLR
SB11_SET:   BSET    LATB,#RB6
            BRA     SWB13
SB11_CLR:   BCLR    LATB,#RB6

SWB13:      MOV     #0,W3
            MOV     SB13,W2
            CPSEQ   W3,W2
            BRA     SB13_SET
            BRA     SB13_CLR
SB13_SET:   BSET    LATB,#RB7
            BRA     SWB21
SB13_CLR:   BCLR    LATB,#RB7

SWB21:      MOV     #0,W1
            MOV     SB21,W2
            CPSEQ   W1,W2
            BRA     SB21_SET
            BRA     SB21_CLR
SB21_SET:   BSET    LATB,#RB8
            BRA     SWB23
SB21_CLR:   BCLR    LATB,#RB8
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SWB23:      MOV     #0,W3
            MOV     SB23,W2
            CPSEQ   W3,W2
            BRA     SB23_SET
            BRA     SB23_CLR
SB23_SET:   BSET    LATE,#RE0
            BRA     SWB31
SB23_CLR:   BCLR    LATE,#RE0

SWB31:      MOV     #0,W1
            MOV     SB31,W2
            CPSEQ   W1,W2
            BRA     SB31_SET
            BRA     SB31_CLR
SB31_SET:   BSET    LATE,#RE1
            BRA     SWB33
SB31_CLR:   BCLR    LATE,#RE1

SWB33:      MOV     #0,W3
            MOV     SB33,W2
            CPSEQ   W3,W2
            BRA     SB33_SET
            BRA     SB33_CLR
SB33_SET:   BSET    LATE,#RE2
            BRA     SWC11
SB33_CLR:   BCLR    LATE,#RE2
;***************************************************************************
;*******************************PHASE C*************************************
;***************************************************************************
SWC11:      MOV     #0,W1
            MOV     SC11,W2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            CPSEQ     W1,W2
            BRA       SC11_SET
            BRA       SC11_CLR
SC11_SET:   BSET      LATE,#RE3
            BRA       SWC13
SC11_CLR:   BCLR      LATE,#RE3

SWC13:      MOV       #0,W3
            MOV       SC13,W2
            CPSEQ     W3,W2
            BRA       SC13_SET
            BRA       SC13_CLR
SC13_SET:   BSET      LATE,#RE4
            BRA       SWC21
SC13_CLR:   BCLR      LATE,#RE4

SWC21:      MOV       #0,W1
            MOV       SC21,W2
            CPSEQ     W1,W2
            BRA       SC21_SET
            BRA       SC21_CLR
SC21_SET:   BSET      LATE,#RE5
            BRA       SWC23
SC21_CLR:   BCLR      LATE,#RE5

SWC23:      MOV       #0,W3
            MOV       SC23,W2
            CPSEQ     W3,W2
            BRA       SC23_SET
            BRA       SC23_CLR
SC23_SET:   BSET      LATF,#RF0
            BRA       SWC31
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SC23_CLR:   BCLR     LATF,#RF0

SWC31:      MOV      #0,W1
            MOV      SC31,W2
            CPSEQ    W1,W2
            BRA      SC31_SET
            BRA      SC31_CLR
SC31_SET:   BSET     LATF,#RF1
            BRA      SWC33
SC31_CLR:   BCLR     LATF,#RF1

SWC33:      MOV      #0,W3
            MOV      SC33,W2
            CPSEQ    W3,W2
            BRA      SC33_SET
            BRA      SC33_CLR
SC33_SET:   BSET     LATF,#RF4
            BRA      BEGIN
SC33_CLR:   BCLR     LATF,#RF4

            BRA      BEGIN
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;*************************************************************************
; Timer 1 Interrupt Service Routine                                      *
;*************************************************************************
 __T1Interrupt:
        BCLR      IFS0,#T1IF       ; Clear the Timer1 Interrupt flag Status bit.
                                   ;<<insert user code here>>
        CALL      LOOK_UP
        BTG       LATD,#RD0
        RETFIE                     ; Return from Interrupt Service routine
;*************************************************************************
; End of AllTimer 1 Interrupt Service Routine                            *
;*************************************************************************
; ***************************End of All Code Sections*********************
.end                               ; End of program code in this file
;*************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;***************************************************************************
;Subroutine:Init_PORTS                                                     *
;***************************************************************************
            .global         Init_PORTS
Init_PORTS:
            CLR             LATB                    ; clear LATB
            MOV             #0x0000,W0              ; set is inputs
            MOV             W0,TRISB

            CLR             LATC                    ; clear LATC
            MOV             #0xFF00,W0              ; set is outputs
            MOV             W0,TRISC

            CLR             LATD                    ; clear LATD
            MOV             #0x0000,W0              ; set is outputs
            MOV             W0,TRISD

            CLR             LATE                    ; clear LATE
            MOV             #0x0000,W0              ; set is outputs
            MOV             W0,TRISE

            CLR             LATF                    ; clear LATF
            MOV             #0x0000,W0              ; set is outputs
            MOV             W0,TRISF

            RETURN


;***************************************************************************
;***************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;*************************************************************************
;Subrotuinte to Init TMR                                                 *
;*************************************************************************
        .global     Init_TMR
Init_TMR:

        CLR         T1CON           ; Stops the Timer1 and reset control reg.
        CLR         TMR1            ; Clear contents of the timer register
        MOV         #0x0030,W0      ; 1:256
        MOV         W0,T1CON        ;
        MOV         #3540,W0        ; Load the Period register
        MOV         W0,PR1          ; Sampling 120 us = 8.333 kHz
        MOV         #0x6000,W0
        MOV         W0,IPC0
        BCLR        IFS0,#T1IF      ; Clear the Timer1 interrupt status flag
        BSET        IEC0,#T1IE      ; Enable Timer1 interrupts
        BSET        T1CON,#TON      ; Start Timer1
                                    ;  the internal instruction cycle
              RETURN
;*************************************************************************
;*************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;**************************************************************************
; Subroutine: LOOK_UP_S11
;**************************************************************************
          .global             LOOK_UP
LOOK_UP:
          CP0       COUNT_SWICTH
          BRA       Z,INTI_TABLE1
          BRA       SEND_S11
INTI_TABLE1:
          MOV       #tblpage(S11_TABLE),W4          ;TABLE 1
          MOV       W4,TBLPAG
          MOV       #tbloffset(S11_TABLE),W4
          MOV       W4,VT_1

          MOV       #tblpage(S13_TABLE),W4          ;TABLE 2
          MOV       W4,TBLPAG
          MOV       #tbloffset(S13_TABLE),W4
          MOV       W4,VT_2

          MOV       #tblpage(S21_TABLE),W4          ;TABLE 3
          MOV       W4,TBLPAG
          MOV       #tbloffset(S21_TABLE),W4
          MOV       W4,VT_3

          MOV       #tblpage(S23_TABLE),W4          ;TABLE 4
          MOV       W4,TBLPAG
          MOV       #tbloffset(S23_TABLE),W4
          MOV       W4,VT_4

          MOV       #tblpage(S31_TABLE),W4          ;TABLE 5
          MOV       W4,TBLPAG
          MOV       #tbloffset(S31_TABLE),W4
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV     W4,VT_5

MOV     #tblpage(S33_TABLE),W4          ;TABLE 6
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(S33_TABLE),W4
MOV     W4,VT_6

MOV     #tblpage(SB11_TABLE),W4         ;TABLE 7
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB11_TABLE),W4
MOV     W4,VT_7

MOV     #tblpage(SB13_TABLE),W4         ;TABLE 8
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB13_TABLE),W4
MOV     W4,VT_8

MOV     #tblpage(SB21_TABLE),W4         ;TABLE 9
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB21_TABLE),W4
MOV     W4,VT_9

MOV     #tblpage(SB23_TABLE),W4         ;TABLE 10
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB23_TABLE),W4
MOV     W4,VT_10

MOV     #tblpage(SB31_TABLE),W4         ;TABLE 11
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB31_TABLE),W4
MOV     W4,VT_11
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV     #tblpage(SB33_TABLE),W4        ;TABLE 12
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SB33_TABLE),W4
MOV     W4,VT_12

MOV     #tblpage(SC11_TABLE),W4        ;TABLE 13
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SC11_TABLE),W4
MOV     W4,VT_13

MOV     #tblpage(SC13_TABLE),W4        ;TABLE 14
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SC13_TABLE),W4
MOV     W4,VT_14

MOV     #tblpage(SC21_TABLE),W4        ;TABLE 15
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SC21_TABLE),W4
MOV     W4,VT_15

MOV     #tblpage(SC23_TABLE),W4        ;TABLE 16
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SC23_TABLE),W4
MOV     W4,VT_16

MOV     #tblpage(SC31_TABLE),W4        ;TABLE 17
MOV     W4,TBLPAG
MOV     #tbloffset(SC31_TABLE),W4
MOV     W4,VT_17

MOV     #tblpage(SC33_TABLE),W4        ;TABLE 18
MOV     W4,TBLPAG
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV       #tbloffset(SC33_TABLE),W4
        MOV       W4,VT_18

SEND_S11:
        MOV       VT_1,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 1
        MOV       W11,S11
        MOV       W4,VT_1

        MOV       VT_2,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 2
        MOV       W11,S13
        MOV       W4,VT_2

        MOV       VT_3,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 3
        MOV       W11,S21
        MOV       W4,VT_3

        MOV       VT_4,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 4
        MOV       W11,S23
        MOV       W4,VT_4

        MOV       VT_5,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 5
        MOV       W11,S31
        MOV       W4,VT_5

        MOV       VT_6,W4
        TBLRDL    [W4++],W11                 ;OPEN TABLE 6
        MOV       W11,S33
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV       W4,VT_6

MOV       VT_7,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 7
MOV       W11,SB11
MOV       W4,VT_7

MOV       VT_8,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 8
MOV       W11,SB13
MOV       W4,VT_8

MOV       VT_9,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 9
MOV       W11,SB21
MOV       W4,VT_9

MOV       VT_10,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 10
MOV       W11,SB23
MOV       W4,VT_10

MOV       VT_11,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 11
MOV       W11,SB31
MOV       W4,VT_11

MOV       VT_12,W4
TBLRDL    [W4++],W11        ;OPEN TABLE 12
MOV       W11,SB33
MOV       W4,VT_12
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV      VT_13,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 13
        MOV      W11,SC11
        MOV      W4,VT_13

        MOV      VT_14,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 14
        MOV      W11,SC13
        MOV      W4,VT_14

        MOV      VT_15,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 15
        MOV      W11,SC21
        MOV      W4,VT_15

        MOV      VT_16,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 16
        MOV      W11,SC23
        MOV      W4,VT_16

        MOV      VT_17,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 17
        MOV      W11,SC31
        MOV      W4,VT_17

        MOV      VT_18,W4
        TBLRDL   [W4++],W11        ;OPEN TABLE 18
        MOV      W11,SC33
        MOV      W4,VT_18

CT:     INC      COUNT_SWICTH
        MOV      #500,W0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     COUNT_SWICTH,W1
        CPSEQ   W0,W1
        BRA     EXIT_SWICTH
        CLR     COUNT_SWICTH

EXIT_SWICTH:
        RETURN

;***************************************************************************
; DATA  TABLE  OF  SWITCH S11                                              *
;***************************************************************************
S11_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;40
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0    ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;220
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0    ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0    ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1    ;340
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;360
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;380
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1    ;400
```

เอกสาร ... การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;500

;***************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH S13                                                  *
;***************************************************************************
S13_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;100
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;120
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;140
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1          ;280
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;300
.WORD 1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;440
```

...การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;480
.WORD 1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500

;***************************************************************************
; DATA TABLE OF SWICTH S21                                                  *
;***************************************************************************
S21_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1          ;20
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;40
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;60
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;220
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;240
.WORD 1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1          ;360
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;380
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500

;*************************************************************************
; DATA  TABLE  OF  SWITCH S23                                            *
;*************************************************************************
S23_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;120
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;280
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;300
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;440
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;480
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0          ;500
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;************************************************************************
; DATA TABLE OF SWICTH S31                                              *
;************************************************************************
S31_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;20
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;40
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;60
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0        ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1        ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;220
.WORD 1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;360
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;380
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1        ;400
.WORD 1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0        ;500
;************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH S33                                              *
;************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
S33_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1          ;100
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;120
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;140
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1          ;260
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;280
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;300
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500
;***************************************************************************
; DATA  TABLE  OF  SWITCH SB11                                              *
;***************************************************************************
SB11_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;100
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1          ;240
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;260
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;280
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1          ;400
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;420
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;440
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500
;****************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SB13                                                   *
;****************************************************************************
SB13_TABLE:
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;20
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
```

เอกสาร... การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;160
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1          ;340
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;360
.WORD 1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;500
;***************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SB21                                                *
;***************************************************************************
SB21_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;80
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;100
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;120
.WORD 1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
```

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;240
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;260
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;280
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1          ;420
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;440
.WORD 1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500
;*************************************************************************
; DATA  TABLE  OF  SWITCH SB23                                            *
;*************************************************************************
SB23_TABLE:
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;20
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;40
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1     ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;340
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;360
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0     ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1     ;480
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;500
;********************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SB31                                                      *
;********************************************************************************
SB31_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;60
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;80
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;100
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;120
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0     ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0     ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1     ;260
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0     ;280
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;400
.WORD 0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;420
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;440
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0                ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;500
;*****************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SB33                                                   *
;*****************************************************************************
SB33_TABLE:
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;20
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1                ;160
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0                ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1                ;340
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;360
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;380
.WORD 1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1          ;500
;****************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SC11                                                   *
;****************************************************************************
SC11_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;140
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;160
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;300
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;340
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;480
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;500
;**************************************************************************
; DATA  TABLE  OF  SWITCH SC13                                               *
;**************************************************************************
SC13_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1          ;40
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;60
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;80
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;100
.WORD 1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;240
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1          ;380
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;400
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;420
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;460
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;500
;*************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SC21                                               *
;*************************************************************************
SC21_TABLE:
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1          ;120
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;140
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;160
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;180
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;300
.WORD 0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0          ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;480
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;500
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;***************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SC23                                                 *
;***************************************************************************
SC23_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1            ;60
.WORD i,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;80
.WORD 1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;220
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;240
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;260
.WORD 1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;380
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;400
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1            ;420
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0            ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0            ;500
;***************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SC31                                                 *
;***************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SC31_TABLE:
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;20
.WORD 1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;60
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;80
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1          ;140
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;160
.WORD 1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;200
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;220
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;240
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;260
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;300
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;320
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;340
.WORD 1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;400
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;460
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;480
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1          ;500
;****************************************************************************
; DATA TABLE OF SWITCH SC33                                                  *
;****************************************************************************
SC33_TABLE:
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;20
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          ;40
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.WORD 0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;60
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;80
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0      ;100
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;120
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;140
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;160
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;180
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1      ;200
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;220
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;240
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;260
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;280
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;300
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;320
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;340
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;360
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;380
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1      ;400
.WORD 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0      ;420
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;440
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;460
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;480
.WORD 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      ;500
;**************************************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2546

1. วงจรบูตสแตรปไบซีมอสอินเวอร์เตอร์แบบป้องกันไฟฟ้าสถิตย์โดยใช้ไดโอดแฝง 1
ศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์ กอบชัย เดชหาญ วิจิตต์ แก้วไทรเทียม วิษณุ กอพยัคฆินทร์

2. วงจรความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดันแบบมอสชนิดต่อกราวด์ที่มีการชดเชยอุณหภูมิ 6
พิพัฒน์ พรหมมี เนรมิต หว้ามุข กอบชัย เดชหาญ มนตรี สมดุลยกนก

3. วงจรสายพานกระแสชนิดขั้วอินพุทเป็นแรงดันความแตกต่างโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส 12
มนตรี คำเงิน พิพัฒน์ พรหมมี กองสิทธิ์ ฉุปรี กอบชัย เดชหาญ

4. วงจรถอดรากที่สองโหมดกระแส 18
อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ ธนิตา จันทร์ตรี สมเกียรติ เพรียงพรานทอง

5. การประยุกต์ใช้การจำลองแบบหนึ่งมิติกับทรานซิสเตอร์รอยต่อแบบไบโพล่าร์ 23
โสภณ พรหมชัย โยธิถิ ยาชูมูระ เติมพงษ์ เพ็ชรกูล

6. การตัดสินใจแฮนด์ออฟเพื่อใช้ในการแบ่งโหลดด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค 29
ประทีป ยิ่นประเสริฐ พิเชฐ ม่วงนวล

7. การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร FH-CDMA ด้วยเทคนิคการแปรเปลี่ยนความถี่เชิงเส้นแบบหลายเส้นความถี่ 35
สมยศ หรรษาสุขสิน สมยศ จุณณะปิยะ พิเชฐ ม่วงนวล

8. การศึกษาและพัฒนาของระบบสถาคาโดยใช้ตัวควบคุมพีซี 41
พรเทพ รัตนกำพล ประภาษ ไพรสุวรรณา

9. การจัดสัมพันธ์การฉนวนสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย 47
พรทิพา สร้างคอมพัฒนา มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

10. อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ 53
สิทธิพร เจียรมันพพิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ

11. การประมาณค่ากระแสลัดวงจรเนื่องจากกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม 59
วัลลภ สุวรรณเวช อานันทวัฒน์ คุณากร

12. การออกแบบและวิเคราะห์สวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส 65
ราชา อารีหะหมัด วิจิตร กิณเรศ

13. การป้องกันสายส่งโดยอาศัยการวัดระยะทางแบบปรับเปลี่ยนได้สำหรับสายส่งวงจรขนาน 71
ไพโรจน์ เทียนทอง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

14. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมสองชนิดสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์บนสายส่ง 77
อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล ศุลี บรรจงจิตร บุญเลิศ สื่อเฉย

15. การวางแผนโดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟ 83
วราวุธ จิตตพันธ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

16. จลนพลศาสตร์ของการเติมไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา $Rh-Fe/SiO_2$ 89
เทอดไทย วัฒนธรรม ศิริพันธ์ บุรฉาธัญลักษณ์

17. การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระบบต่อเนื่องแบบท่อ 94
อนวัช ดุรงค์ภิญโญ ประกอบ กิจไชยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์

A Three-Level Inverter Based on Harmonic Elimination Method

สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ 3 ϕ พีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์สามระดับ หรือ นิวตรอลพอยท์แคลมป์อินเวอร์เตอร์ (NPC) ซึ่งในแต่ละกิ่งของวงจรหลักประกอบด้วยสวิทช์หลักสองตัว, สวิทช์ช่วยสองตัว และไดโอดช่วยสองตัว ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ โดยการใช้เทคนิค PWM ที่กำจัดฮาร์มอนิคที่ไม่ต้องการออกไป ในบทความนี้ได้นำเสนอหลักการทำงาน และ การวิเคราะห์เทคนิคพีดับบลิวเอ็มอย่างละเอียด, มีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันความถูกต้องของวงจรซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

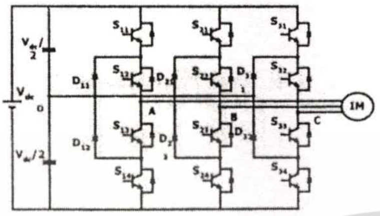
This paper presents a three-phase three level PWM Inverter so-called Neutral-Point-Clamped Inverter. Each branch of the main power circuit consists of two main switches , two auxiliary switches and two auxiliary diodes. This is controlled by a microprocessor using a harmonic elimination method. The principle and analysis of PWM technique are fully given. Also simulation using PSPICE program is included in order to verify correct operation of the circuit.

1.บทนำ

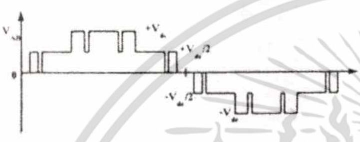
จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะนำอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป (อินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีระดับแรงดันระหว่างไลน์ เป็น 0 กับ $+V_{dc}$ หรือ 0 กับ $-V_{dc}$) มาใช้งานในระบบขับเคลื่อนกำลังและแรงดันสูง แต่ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิทชิ่ง และตัวเก็บประจุในด้านระดับของแรงดันที่รับได้ และกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ความถี่สวิทชิงสูงขึ้นเพื่อลดฮาร์โมนิค ทำให้ไม่สามารถนำอินเวอร์เตอร์สองระดับไปใช้งานที่มีกำลังสูงได้ [2]

ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นอินเวอร์เตอร์สามระดับขึ้น โดยมีวงจรสมมูล ดังรูปที่ 1 (a) ส่วนรูปที่ 2 (b) แสดงแรงดันระหว่างไลน์เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์สามระดับ ที่มีระดับแรงดันเป็น $+V_{dc}$, $+V_{dc}/2$ และ 0 หรือ $-V_{dc}$, $-V_{dc}/2$ และ 0 ทำให้รูปคลื่นเอาท์พุทมีฮาร์โมนิคต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ความถี่สวิทชิ่งเดียวกันเนื่องจากระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากที่ระดับกำลังสูง ๆ นั้นจะมีปัญหาที่ความถี่สวิทชิ่งสูง ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอ เทคนิค PWM แบบการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ต้องการ มาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ เพื่อลดปัญหาทางด้านความถี่ สวิทชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

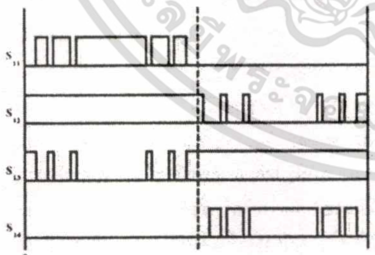


(b)

รูปที่ 1 (a) วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ
(b) แรงดันระหว่างไลน์เอาท์พุท

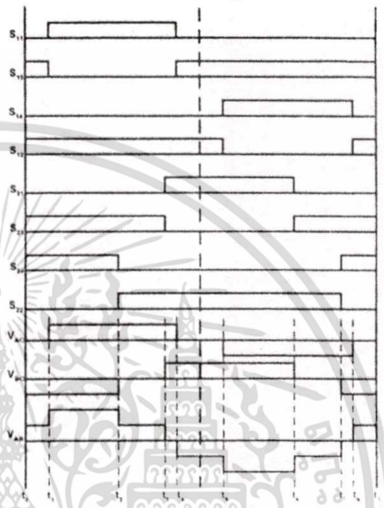
2. หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากรูปที่ 1 (a) จะเห็นว่าในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะประกอบด้วย สวิทช์หลัก S_{11} กับ S_{14} ทำหน้าที่เหมือนในอินเวอร์เตอร์สองระดับ ส่วนสวิทช์ช่วย S_{12} กับ S_{13} ทำหน้าที่แคลมป์แรงดันเทียบกับจุดนิวทรัลที่ขั้วเอาท์พุทร่วมกับไดโอดช่วย D_{11} กับ D_{12} ส่วนแหล่งจ่ายไฟตรงเกิดจากตัวเก็บประจุทั้งสองตัว แบ่งแรงดันที่บัสไฟตรงตัวละครึ่งส่วนสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมสวิทช์แต่ละตัวในหนึ่งกิ่งนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



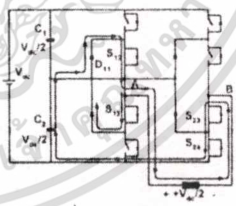
รูปที่ 2 สัญญาณ PWM ของ $S_{11}-S_{14}$

รูปที่ 2 แสดงสัญญาณ PWM ของ S_{11}- S_{14} จะเห็นว่าสัญญาณของ สวิทช์ S_{13} นั้นได้จากการนำสัญญาณของ สวิทช์ S_{11} มาทำการอินเวอร์ส (inverse) ส่วนสัญญาณสวิทช์ S_{12} ได้จากการนำสัญญาณของ สวิทช์ S_{14} มาทำการอินเวอร์ส (inverse)



รูปที่ 3 สัญญาณสวิทช์ในแต่ละกิ่ง

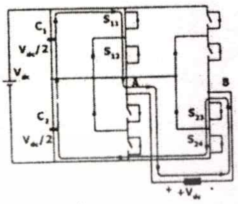
จากรูปที่ 3 ในภาคผนวกสามารถแบ่งโหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลของแรงดัน V_{AB} ออกเป็น 9 โหมด ดังนี้



รูปที่ 4 โหมด 1 (t_0-t_1)

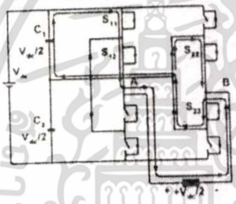
โหมด 1 (t_0-t_1) : ที่เวลา t_0 สวิทช์ S_{12} , S_{13} , S_{23} , S_{24} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก D_{11} , S_{12} เข้าโหลดผ่าน S_{23} , S_{24} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_2 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $+V_{dc}/2$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_1 ดังรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



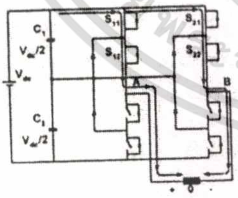
รูปที่ 5 โหมด 2 (t_1-t_2)

โหมด 2 (t_1-t_2) : ที่เวลา t_1 สวิทช์ S_{13} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{11} ; S_{12} , S_{23} , S_{24} จะนำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก S_{11} , S_{12} ผ่านโหลด S_{23} , S_{24} กลับไปยัง C_2 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $+V_{dc}$ การทำงานของโหมดนี้สิ้นสุดลงที่เวลา t_2 ดังรูปที่ 5



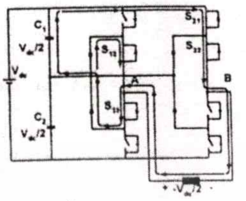
รูปที่ 6 โหมด 3 (t_2 – t_3)

โหมด 3 (t_2 – t_3) : ที่เวลา t_2 สวิทช์ S_{24} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{23} จะนำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน S_{11} , S_{12} ผ่านโหลด S_{23} , D_{22} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_1 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $+V_{dc}/2$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_3 ดังรูปที่ 6



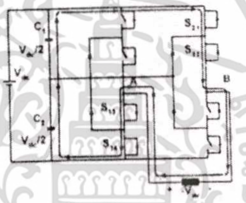
รูปที่ 7 โหมด 4 (t_3 – t_4)

โหมด 4 (t_3 – t_4) : ที่เวลา t_3 สวิทช์ S_{23} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} นำกระแส ทำให้กระแสที่ไหลจากเฟส A มาหักล้างกันกับเฟส B ทำให้ระดับแรงดัน V_{AB} เป็นศูนย์ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_4 ดังรูปที่ 7



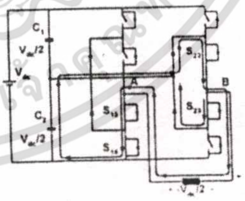
รูปที่ 8 โหมด 5 (t_4 – t_5)

โหมด 5 (t_4 – t_5) : ที่เวลา t_4 สวิทช์ S_{11} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{12} , S_{13} , S_{21} , S_{22} จะนำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน S_{21} , S_{22} ผ่านโหลด S_{13} , D_{12} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_1 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $-V_{dc}/2$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_5 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 9 โหมด 6 (t_5 – t_6)

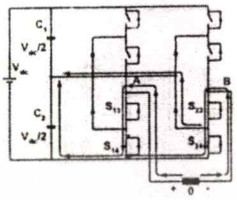
โหมด 6 (t_5 – t_6) : ที่เวลา t_5 สวิทช์ S_{12} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{13} , S_{14} , S_{21} , S_{22} จะนำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน S_{21} , S_{22} ผ่านโหลด S_{13} , S_{14} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_2 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $-V_{dc}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_6 ดังรูปที่ 9



รูปที่ 10 โหมด 7 (t_6 – t_7)

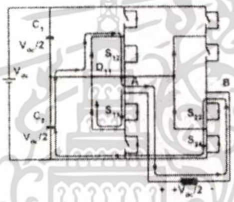
โหมด 7 (t_6 – t_7) : ที่เวลา t_6 สวิทช์ S_{21} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{13} , S_{14} , S_{22} , S_{23} จะนำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน D_{21} , S_{22} ผ่านโหลด S_{13} , S_{14} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_2 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $-V_{dc}/2$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_7 ดังรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 โหมด 8 ($t_7 - t_8$)

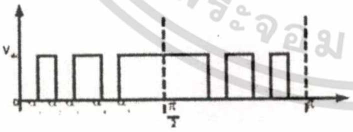
โหมด 8 ($t_7 - t_8$) : ที่เวลา t_7 สวิทช์ S_{12} จะหยุดนำกระแส ส่วนสวิทช์ S_{13} , S_{14} , S_{23} , S_{24} จะนำกระแสจึงทำให้กระแสจากเฟส A และเฟส B หักล้างกัน ทำให้ระดับแรงดันที่ V_{AB} เป็นศูนย์ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_8 ดังรูปที่ 11



รูปที่ 12 โหมด 9 ($t_8 - t_9$)

โหมด 9 ($t_8 - t_9$) : ที่เวลา t_8 สวิทช์ S_{12} , S_{13} , S_{23} , S_{24} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก D_{11} , S_{12} เข้าโหลดผ่าน S_{23} , S_{24} กลับไปยังตัวเก็บประจุ C_2 สร้างระดับแรงดัน V_{AB} เป็น $+V_{dc}/2$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_9 และที่เวลานี้แรงดัน V_{AB} ครบรอบหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 12

3.การวิเคราะห์สัญญาณ PWM



รูปที่ 13 สัญญาณ PWM

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าสัญญาณ PWM เป็นสมมาตรฟังก์ชั่นคี่ ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \qquad (1)$$

ที่

$$a_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sum_{k=1}^{N} (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \qquad (2)$$

N คือ จำนวนมุมสวิทชิ่ง

α_k คือ มุมสวิทชิ่ง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \ldots\ldots < \alpha_N < \frac{\pi}{2}$$

V_{dc} คือ แรงดันไฟตรง

n คือ อันดับฮาร์โมนิก

จากสมการที่ (2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$h_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi}[\cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \ldots \pm \cos(n\alpha_N)] \qquad (3)$$

ซึ่งจากสมการนี้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิคที่ไม่ต้องการได้ โดยกำหนดให้สมการที่มีฮาร์มอนิคอันดับที่ไม่ต้องการนั้นเป็นศูนย์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \ldots\ldots \pm \cos(\alpha_N) &= \frac{M\pi}{4} \\ \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \ldots\ldots \pm \cos(5\alpha_N) &= 0 \\ \cos(N\alpha_1) - \cos(N\alpha_2) + \ldots\ldots \pm \cos(N\alpha_N) &= 0 \end{aligned} \qquad (4)$$

ที่ $M = Modulation\ Index = \frac{h_1}{V_{dc}}$

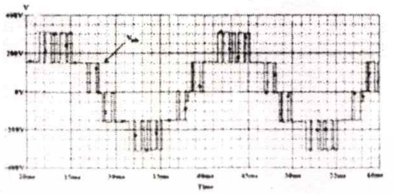
h_1 คือ ขนาดของค่าประกอบมูลฐาน

จากนั้นใช้หลักการของ Newton-Raphson กับสมการ (4) เพื่อแก้สมการหาค่ามุม สวิทชิ่ง (α) ซึ่งในบทความนี้จะยกตัวอย่างการกำจัดฮาร์มอนิคอันดับที่ 5 , 7 , 11 , 13 โดยใช้ค่า M เท่ากับ 0.8 สามารถแก้สมการหาค่า α ได้ดังนี้ α_1 = 10.6000 , α_2 = 17.2762 , α_3 = 22.4262 α_4 = 35.0244 , α_5 = 38.0223

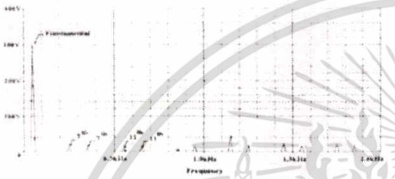
4.การ จำลองด้วยโปรแกรม Pspice

กำหนดให้สวิทช์ทุกตัวเป็นสวิทช์ทางอุดมคติ แหล่งจ่ายไฟเป็นแหล่งจ่ายไฟตรงที่ไม่มีริปเปิล 311 V จ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับซึ่งต่ออยู่กับโหลดจำลองมอเตอร์ต่อเป็นวงจรสมมูล R - L ที่ต่อแบบ Y ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

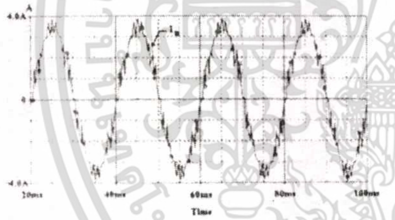


(a)

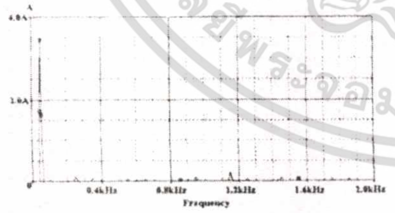


(b)

รูปที่ 14 (a) แสดงรูปคลื่นแรงดันระหว่างไลน์ V_{AB} (b) สเปคตรัมแรงดัน V_{AB} ที่สอดคล้องกับรูป (a) ค่า THDv = 20.38 %



(a)

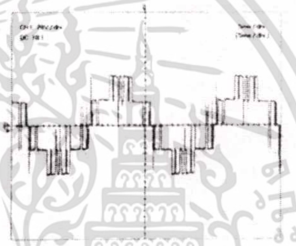


(b)

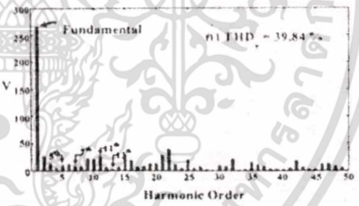
รูปที่ 15 (a) แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์ I_a (b) สเปคตรัมกระแส I_a ที่สอดคล้องกับรูป (a)

5.ผลการทดลอง

จากหลักการและค่าของมุมสวิทชิ่งที่ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาสามารถนำมาสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับที่เป็นเครื่องต้นแบบได้ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์สร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิทชิ่งแต่ละตัว ซึ่งจะต้องนำมุมสวิทชิ่งที่ได้จากการคำนวณนั้นมาทำการปรับค่าให้เป็นจำนวนเต็ม จากนั้นจึงนำค่ามุมที่ได้มาแปลี่ยนเป็นข้อมูลในเลขฐานสิบหก แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปเก็บไว้ในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะทำการทดลองขับมอเตอร์ที่มีขนาด 2.2 kW , 220/380 V , 8.5/5 A ,Δ/Y, 1420 rpm , cosφ = 0.82 ต่อแบบ Y ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

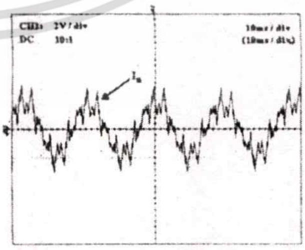


(a)



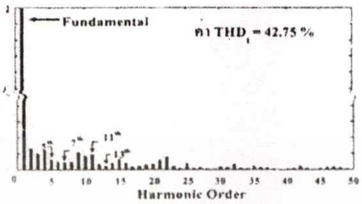
(b)

รูปที่ 16 (a) แสดงรูปคลื่นแรงดันระหว่างไลน์ V_{AB} (b) สเปคตรัมแรงดัน V_{AB} ที่สอดคล้องกับรูป (a) ค่า THD_V = 39.84 %



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 17 (a) แสดงรูปคลื่นกระแส I_a
(b) สเปคตรัมกระแส I_a ที่สอดคล้องกับรูป (a) ค่า THD$_i$ = 42.75 %

6.สรุป

จากผลการใช้โปรแกรม Pspice จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับในการกำจัดฮาร์มอนิคอันดับที่ 5^{th}, 7^{th}, 11^{th}, 13^{th} จะเห็นว่าสามารถลดขนาดของฮาร์มอนิคที่ไม่ต้องการให้มีขนาดน้อยลงได้ ส่วนผลการทดลองจะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามระดับเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำมาขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดลองมีลักษณะที่แตกต่างกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice ซึ่งในการทดลองนั้นค่า THD$_v$ ของแรงดันระหว่างไลน์ V_{AB} จะมีค่าใกล้เคียงกับผลในการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice ส่วนค่า THD$_i$ ของกระแสไลน์ I_a ในการทดลองจะมีค่าแตกต่างจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice เนื่องจากในการทดลองนั้นไม่สามารถนำค่าจริงของมุมสวิทซ์ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถอ่านค่าที่เป็นทศนิยมได้ จึงต้องทำการปรับค่ามุมที่คำนวณได้ให้เป็นจำนวนเต็มเสียก่อน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และประกอบกับอินเวอร์เตอร์สามระดับเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นนั้น ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิทซ์ ซึ่งทรานซิสเตอร์ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สวิทซิ่งสูง ๆ ได้ และวงจรขับเบสเองก็มีอุปกรณ์มากเกินไป ซึ่งทำให้เกิดค่าความสูญเสียในวงจรขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่า THD$_i$ ของกระแสไลน์ I_a และรูปคลื่นของกระแสไลน์ I_a รวมทั้งรูปคลื่นแรงดันระหว่างไลน์ V_{AB} ในผลการทดลองมีความแตกต่างไปจากผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice ซึ่งทางผู้วิจัยได้กำลังดำเนินการปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว ซึ่งสามารถนำอินเวอร์เตอร์สามระดับมาประยุกต์ใช้งานทางด้าน Active Power Filter เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor) ให้ดีขึ้น และลดฮาร์มอนิคในกระแสของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non linear load) ให้น้อยลง ช่วยให้คุณภาพของกระแสดีขึ้น

7.เอกสารอ้างอิง

[1] A. Nabae, I. Takahashi, H. Agaki, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," IEEE Trans. Ind. Appl. Vol.IA-17,No.5, Sep./Oct., 1981, pp. 518-523.

[2] S. Sirisukprasert, J.S. Lai, T.-H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converters," CPES. pp. 212-217.

[3] สุชี ริ้วเจริญ "วิธีปรับความกว้างพัลส์อย่างง่ายสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.

[4] M.H. Rashid. "Power Electronics Handbook." Academic Press, 2001. pp. 619-622.

[5] S. Mouttou, E. Ngandui, P. Sicard "A novel PWM Current Control Method for AC Harmonic Elimination by Active Power Filter," Hydro-Quebec Research Chair on Power and Electrical Energy, pp. 793-797.

[6] J. Chiasson, L. Tolbert, K. McKenzie and Z. Du, "Real-Time Computer Control of a Multilevel Converter using the Mathematical Theory of Resultants," Electrimacs 2002, August 18-21, pp.1-6.

[7] L. Salazar, G. Joos, "PSPICE Simulation of Three-Phase Inverters by Means of Switching Functions." IEEE Trans. Power Electronics. Vol. 9,No. 1, Jan. 1994, pp. 35-42.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISSN 0125-1724

วิศวสาร
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน 2549

1. ข้อมูลสมดุลของการสกัดน้ำมันงาโดยใช้นอร์มอลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1

รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ

2. การกำจัดสีย้อมฟาสบลูบีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีโอโซเนชัน 7

สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์ อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์

3. การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผลของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ 13

คงศักดิ์ อิ่มอุไร สมเกียรติ ศุภเดช

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง 18

เอก เอื้อตระการวิวัฒน์ วิฆิชัย ชูรักษ์ วิจิตร กิณเรศ

5. วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์หลายเฟสแบบปรับค่าด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โอทีเอแบบหลายเอาต์พุท 24

สดุดี จินตนปัญญา กอบชัย เดชหาญ

6. การพยากรณ์ความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุดระยะยาวของระบบ กฟน. โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 30

จตุพร ธรรมเจริญ สมชาติ จิริวิภากร

7. การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ 36

นุชทิดา สุทธิสินทอง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

8. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม 42

สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ

9. การศึกษาเชิงตัวเลขของผลของการปรับแต่งฟันเฟืองตรงโดยวิธีเฉือนหน้าฟันต่อการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิคส์ 48

อานันทพล แสนคำ มนต์ศักดิ์ พิมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม

A Balanced Source Power Transfer Cascade Multilevel Inverter Based on an Optimized Stepped-Waveform Harmonic Elimination Technique

สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์และการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันไดที่แหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุล มีจุดประสงค์เพื่อทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว มีอายุการใช้งานใกล้เคียงกัน ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณมุมสวิทซ์ซึ่งโดยใช้หลักการของนิวตัน-ราปสันอย่างละเอียด และมีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK นอกจากนี้ยังได้ทดสอบเครื่องต้นแบบเพื่อตรวจสอบการทำงานเทียบกับการจำลอง ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

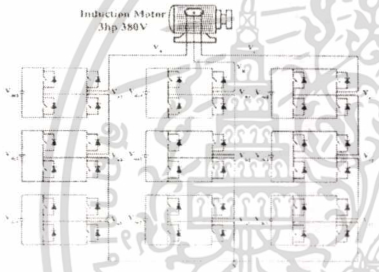
This paper presents analysis and operation of a cascade multilevel inverter for three phase induction motor drives using an optimized stepped-waveform harmonic elimination technique which provides balanced source power transfer. The objective of this technique is to offer similarly useful life time of each dc supply of the H-bridge inverter. This paper gives detail of switching angle calculation based on a Newton-Raphson method. Simulation using MATLAB/SIMULINK program is also included. Additionally, testing of the prototype for verifying operation compared with simulation was conducted. The result appears satisfactory.

1.บทนำ

ในปัจจุบันงานทางด้านอุตสาหกรรม ได้มีการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำกันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากลักษณะของแรงดันด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ที่ไม่เหมือนกันตลอดการทำงานในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งเกิดจากลักษณะการสวิทช์ภายในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์เอช

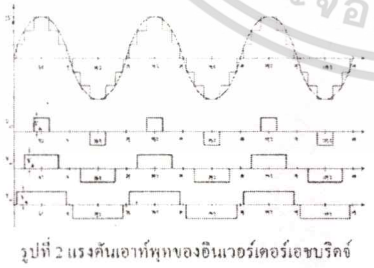
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริดจ์ตัวที่ 1 จะทำงานนานกว่าอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์อีกสองตัว ทำให้แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ตัวที่ 1 จะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดมากกว่าอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์อีกสองตัว ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (แบตเตอรี่หรือหม้อแปลงแยกแท็ป) ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ตัวที่ 1 จะจ่ายพลังงานมากกว่า (เกิดความร้อนสะสมในกรณีที่แหล่งจ่ายเป็นหม้อแปลงแยกแท็ป) แหล่งจ่ายพลังงานของอินเวอร์เตอร์ตัวอื่นๆ และมีผลให้อุปกรณ์สวิทซ์ภายในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ตัวที่ 1 ทำงานนานกว่าอุปกรณ์สวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์ตัวอื่นๆ จึงเกิดความร้อนสะสมและอายุการใช้งานอาจสั้นลงเร็วกว่าตัวอื่นๆ



รูปที่ 1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

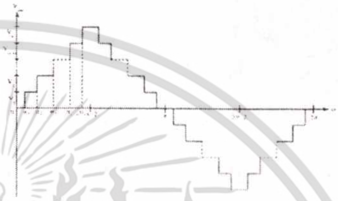
ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการปรับปรุงรูปแบบการสวิทซ์ที่จะทำให้เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละระดับมีลักษณะที่เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาทำงาน เพื่อช่วยทำให้แหล่งจ่าย จ่ายพลังงานได้ใกล้เคียงกัน และลดปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวมา โดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได



รูปที่ 2 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

2.เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได

จากรูปที่ 3 และ 4 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นเป็นแบบสมมาตรคี่ ดังนั้นสามารถทำการวิเคราะห์รูปคลื่นแบบฟูเรียร์ของฟังก์ชันคาบใด ๆ ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

รูปที่ 4 ควอเตอร์แรกของแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

$$b_n = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\omega t)\sin(n\omega t)d(\omega t) \qquad (1)$$

$$f(\omega t) = V_{out}(\omega t) \qquad (2)$$

ดังนั้น

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \qquad (3)$$

สุดท้ายแล้วอนุกรมฟูเรียร์ของรูปคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

$$V_{out}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k)\right]\sin(n\omega t) \qquad (4)$$

ที่ α_k คือ ค่าของมุมสวิทซ์ภายใต้เงื่อนไข

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \ldots < \alpha_s < \frac{\pi}{2}$$

s คือ จำนวนของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

n คือ ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์

จากสมการที่ (4) ขนาดของ $V_{out}(\omega t)$ คือ

$$h_n = \frac{4E}{n\pi}\sum_{k=1}^{s}\cos(n\alpha_k) \qquad (5)$$

การควบคุมขนาดของความถี่มูลฐาน พิจารณาให้อยู่ในรูปของดัชนีมอดูเลชั่น

$$M = \frac{h_1}{sE} \qquad (6)$$

ที่ h_1 คือ ขนาดของความถี่มูลฐาน

s คือ จำนวนอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์

จากสมการที่ (5) สามารถนำขนาดของ $V_{out}(\omega t)$ มาวิเคราะห์หามุมสวิทช์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ โดยนำวิธีนิวตัน-ราปสัน มาใช้ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

$$\alpha^j = \begin{bmatrix}\alpha_1^j & \alpha_2^j & \dots & \alpha_s^j\end{bmatrix}^T \qquad (7)$$

เมตริกซ์ของสมการ Nonlinear เป็น

$$F^j = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1^j)+\cos(\alpha_2^j)+\dots+\cos(\alpha_s^j) \\ \cos(5\alpha_1^j)+\cos(5\alpha_2^j)+\dots+\cos(5\alpha_s^j) \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \\ \cos(n\alpha_1^j)+\cos(n\alpha_2^j)+\dots+\cos(n\alpha_s^j) \end{bmatrix} \qquad \dots(8)$$

และ

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^j = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_1^j) & -\sin(\alpha_2^j) & \cdots & -\sin(\alpha_s^j) \\ -5\sin(5\alpha_1^j) & -5\sin(5\alpha_2^j) & \cdots & -5\sin(5\alpha_s^j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -n\sin(n\alpha_1^j) & -n\sin(n\alpha_2^j) & \cdots & -n\sin(n\alpha_s^j) \end{bmatrix} \qquad \dots(9)$$

เมตริกซ์ของขนาดของฮาร์มอนิกส์เป็น

$$T = \begin{bmatrix}\frac{sM\pi}{4} & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}^T \qquad (10)$$

จากสมการที่ (8) - (10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$F(\alpha) = T \qquad (11)$$

โดยมีขั้นตอนการหาค่ามุม α ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของ α^j ที่ j = 0

$$\alpha^0 = \begin{bmatrix}\alpha_1^0 & \alpha_2^0 & \cdots & \alpha_s^0\end{bmatrix}^T \qquad (12)$$

2) คำนวณค่าของ

$$F(\alpha^0) = F^0 \qquad (13)$$

3) ทำสมการที่ (11) ให้เป็นสมการเชิงเส้น

$$F^0 + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0 d\alpha^0 = T \qquad (14)$$

และ

$$d\alpha^0 = \begin{bmatrix}d\alpha_1^0 & d\alpha_2^0 & \cdots & d\alpha_s^0\end{bmatrix}^T \qquad (15)$$

4) หาค่า $d\alpha^0$ จากสมการที่ (14)

$$d\alpha^0 = INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0 \left(T - F^0\right) \qquad (16)$$

ที่ $INV\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0$ เป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์ $\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right]^0$

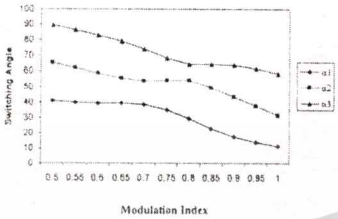
5) นำค่า $d\alpha^0$ ที่ได้จากสมการที่ (16) มาบวกกับค่า α^0 เริ่มต้น

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j \qquad (17)$$

6) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 ใหม่จนกระทั่งค่าของ α ทำให้สมการที่ (11) เป็นจริง

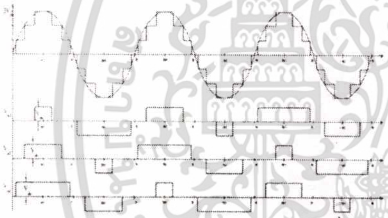
จากขั้นตอนการหาคำตอบข้างต้น สามารถหาค่ามุมสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดได้ดังรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulation Index กับมุมสวิทชิ่ง ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

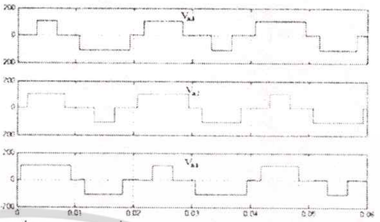
จากค่ามุมสวิทช์ที่คำนวณได้ สามารถนำมาทำการออกแบบสัญญาณการสวิทชิ่งให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริจด์ในแต่ละระดับ เพื่อให้มีลักษณะแรงดันเอาท์พุทในหนึ่งคาบเวลาที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



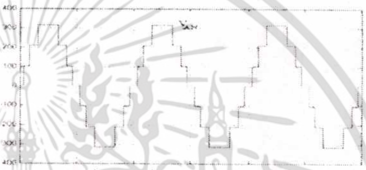
รูปที่ 6 แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริคจ์เมื่อมีการปรับปรุง

3. การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

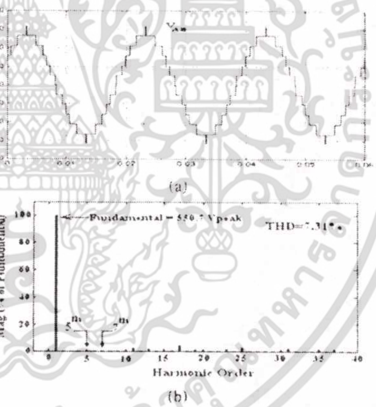
กำหนดให้สวิทช์ทุกตัวเป็นสวิทช์ในทางอุคมคติ แหล่งจ่ายไฟเป็นแหล่งจ่ายไฟตรงที่ไม่มีริปเปิลขนาด 106 V 3 ชุดแฟส จ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว ที่ค่า M = 1 ซึ่งต่ออยู่กับโหลด R, L ที่ต่ออนุกรมกันเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์ ที่ต่อแบบ Y ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว ที่เฟส A



รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุท

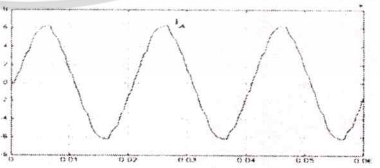


(a)

(b)

รูปที่ 9 (a) รูปคลื่นแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{AB}

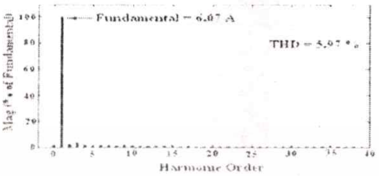
(b) สเปคตรัมแรงดันไลน์ v_{AB} ที่สอดคล้องกับรูป (a)



(a)

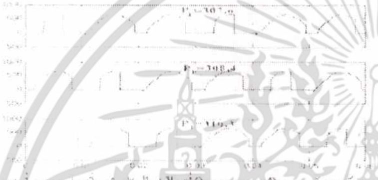
รูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

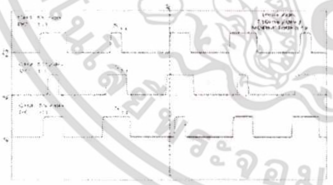
รูปที่ 10 (ต่อ) (a) รูปคลื่นกระแสไลน์ i_A
(b) สเปกตรัมกระแสไลน์ i_A ที่สอดคล้องกับรูป (a)



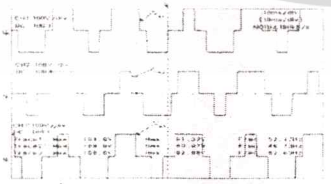
รูปที่ 11 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว ที่เฟส A

4. ผลการทดลอง

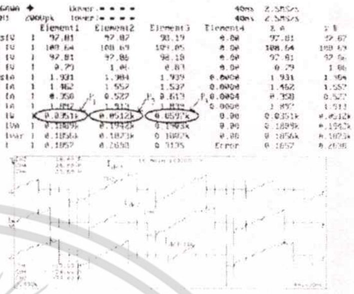
จากหลักการและผลจากการจำลองการทำงานข้างต้นนั้น สามารถสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเครื่องต้นแบบได้ และได้ทำการทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 HP, 380 V เพื่อพิสูจน์กับผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 12 สัญญาณควบคุมสวิทช์ S_{11}, S_{21} และ S_{31} ของเฟสA



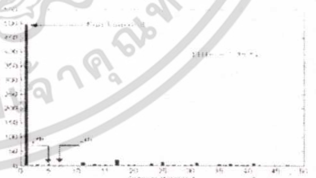
รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวในเฟส A



รูปที่ 14 แสดงกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว

รูปที่ 15 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุท v_{AN}

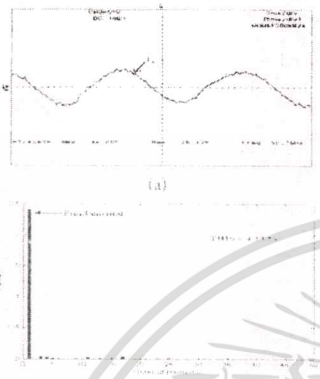
(a)



(b)

รูปที่ 16 (a) รูปคลื่นแรงดันไลน์เอาท์พุท v_{AB}
(b) สเปกตรัมแรงดันไลน์ v_{AB} ที่สอดคล้องกับรูป (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 17 (a) รูปคลื่นกระแสไลน์ i_A

(b) สเปคตรัมกระแสไลน์ i_A ที่สอดคล้องกับรูป (a)

5. สรุป

จากผลการทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณต่างๆ มีลักษณะคล้ายกันกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งเป็นไปตามหลักการข้างต้น ซึ่งในรูปที่ 11 เกิดจากการนำสัญญาณแรงดันไฟตรงและกระแสด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวมาคูณกันและจากผลการทดลองนั้นเมื่อได้ทำการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ใหม่แล้ว จะเห็นว่าในรูปที่ 13 นั้นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวในหนึ่งคาบเวลา จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัวนั้นมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 14 ส่วนในรูปที่ 15 และ 16 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟส v_{AN} และแรงดันไลน์ v_{AB} ตามลำดับนั้น ยังคงมีลักษณะที่เหมือนเดิมอยู่ถึงแม้จะมีการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ใหม่แล้วก็ตาม รวมถึงยังสามารถลดค่า THD_V ของแรงดันไลน์ได้ตามทฤษฎีข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์นั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์ และกระแสที่เอาท์พุท จึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดได้อีกทางหนึ่ง

หมายเหตุ : บทความนี้ใช้เครื่อง PZ4000 Power Analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละตัว

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Sirisukprasert, J.S. Lai, T.-H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converters," CPES, vol. 49, no. 4, pp. 212-217, August 2002.

[2] J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Z. Du, "Real-Time Computer Control of a Multilevel Converter using the Mathematical Theory of Resultants," Electrimacs 2002, pp 1-6, August 18-21.

[3] J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Z. Du, "Control of a Multilevel Converter Using Resultant Theory," IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 11, no.3, pp. 345-354, May 2003.

[4] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, T. Cunnyngham and J. N. Chiasson, "Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 49, no. 5, pp. 1058-1064, October 2002.

[5] L. M. Tolbert, J. N. Chiasson, Z. Du, K. J. McKenzie," Elimination of Harmonics in a Multilevel Converter With Nonequal DC Sources," IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 41, No. 1, pp. 75-82, January/February 2005.

[6] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, J. N. Chiasson, "Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms," IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, Semtember 2005.

[7] สิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์, วิจิตร กิณเรศ "อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์" วิศวสารลาดกระบัง หน้า 53-58, ปีที่ 20 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสิทธิพร เจียรนันทพิสุทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับ 2 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยสยาม ปีการศึกษา 2540

ปี 2542 ได้เข้าทำงานในบริษัท เดอะมอลล์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่ง ช่างไฟฟ้า (2)

ปี 2546 – 2548 ได้เข้าทำงานที่ บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่ง ผู้ช่วยหัวหน้าแผนกซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้