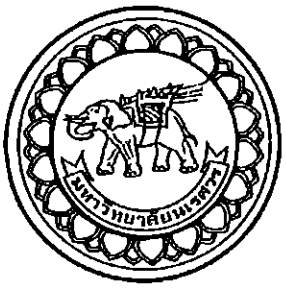


การศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในเอซีไดร์ฟ

Study and Analysis Harmonic in AC Drive

นายเอกชัย เครือคำ รหัส 46380185

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 25 / W.A. 2553 /
เลขทะเบียน 15001249
เลขเรียกหนังสือ บร. 88730 ส550
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2550

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน	**การศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในเอซีไดร์ฟ**
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายเอกชัย เครือคำ รหัส 46380185
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ

(ดร. ชัยรัตน์ พินทอง)

.....กรรมการ

(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

หัวข้อโครงงาน	การศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในเอซีไดร์ฟ
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายเอกชัย เครือคำ รหัส 46380185
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ ฮาร์โมนิกส์ในระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับเพื่อต้องการทราบถึงลักษณะของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นกับระบบ รวมไปถึงตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้เกิดการฉีดฮาร์โมนิกส์เข้าสู่วงจรของการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส โดยมีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้ในการวิเคราะห์ กับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับจริง ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ต้องให้ความสนใจก็คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสาย แหล่งจ่ายไฟค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และค่าพารามิเตอร์ตัวไดร์ฟ

Project Tile	Study and Harmonic Analysis in AC Drive.
Name	Mr. Ekkachai Kaurkom ID. 46380185
Project Adviser	Dr. Somporn Ruangsinchaiwanich.
Major	Electrical Engineering.
Department	Electrical and computer Engineering.
Academic Year	2007

.....

Abstract

This project is the analysis of Harmonic in AC drive system for want to know Harmonics form in AC drive.Harmonic analysis is the study of functions on general topological groups which are invariant under a subgroup. This includes topics of varying level of specificity, including analysis on Lie groups or locally compact abelian groups.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมพร เรืองสินชัยวานิช เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา รวมไปถึงช่วยชี้แนะแนวทางต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในการทำโครงงานในครั้งนี้เป็นอย่างดีตลอดจนให้ความกรุณาช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องและปัญหาต่างๆ ในการทำโครงงานในครั้งนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่งจนทำให้การศึกษาหัวข้อโครงงานในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วง ไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกคนเป็นอย่างสูงที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาและสนับสนุนในด้านการศึกษามาเป็นอย่างดี รวมถึงคอยให้ความรักความเข้าใจและความปรารถนาดีตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

นายเอกชัย เครือคำ รหัส 46380185

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล 1

1.2 ส่วนประกอบโครงงาน 2

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 3

1.4 ขอบข่ายของโครงงาน 3

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ 3

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.7 งบประมาณ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า (Harmonic in Power System) 5

2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิก 10

2.3 การวัดฮาร์มอนิก 17

2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 20

2.5 มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก 22

2.6 ขนาดของภาระส่งผลต่อกระแสอินพุต 23

2.7 ผลกระทบของ Voltage Sag (Dip) ต่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ 24

2.8 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ 27

2.9 การควบคุมมอเตอร์ 28

บทที่ 3 หลักการดำเนินงาน

3.1 อุปกรณ์และหลักการทำงาน 35

3.2 ลำดับขั้นการทดลอง 38

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบ

4.1 ค่าแรงดันเฟสของการทดสอบความเร็วมอเตอร์ในแต่ละแบบ..... 48

4.2 ค่ากระแสของการทดสอบความเร็วมอเตอร์ในแต่ละแบบ..... 54

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1 ผลการดำเนินงาน..... 61

5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงงาน..... 61

5.3 ข้อเสนอแนะ..... 61

เอกสารอ้างอิง 62

ภาคผนวก 63

ประวัติผู้เขียนโครงงาน 72

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงาน 3
2.1 ค่าพิกัดสูงสุดในการใช้งานคาปาซิเตอร์ 13
2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก แรงดัน 120-69 kV 22
2.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก 23
2.4 ตารางความสัมพันธ์ของความเร็วรอบมอเตอร์ 28
2.5 ตารางการแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 31
2.6 รูปแบบการควบคุม 32

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ไดอะแกรมวงจรตัวอย่าง 2

1.2 ตัวอย่างวงจรทดสอบ 2

2.1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ต่างๆ 5

2.2 กราฟของสัญญาณฮาร์มอนิก 6

2.3 กราฟของสมการฮาร์มอนิก (+) 7

2.4 กราฟของสมการฮาร์มอนิก (-) 7

2.5 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์ 8

2.6 การเปรียบเทียบค่า THDv ของแต่ระบบและสถานที่ 9

2.7 ลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ขนาน และอนุกรมในระบบ 10

2.8 ตำแหน่งค่าลำดับที่เกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ 12

2.9 ลำดับความถี่ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์กับความสัมพันธ์ของขนาดคาปาซิเตอร์ 12

2.10 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่ไหลรวมอยู่ในสายนิวตรอล 14

2.11 จุดต่อร่วมทางด้านแรงสูง 17

2.12 กระแสฮาร์มอนิกทางด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบ Y 18

2.13 กระแสฮาร์มอนิกทางด้านปฐมภูมิที่ต่อแบบ Delta 18

2.14 จุดต่อร่วมด้านแรงต่ำ 19

2.15 การแสดงผลแบบ Time Trend ของ %THDv ใน 1 สัปดาห์ 19

2.16 โครงสร้างของวงจรกำลัง 4 Quart rant Thyristor DC Drive 20

2.17 โครงสร้างของวงจรกำลัง Standard AC Drive Power Factor 21

2.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแส 21

2.19 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วมตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 22

2.20 รูปกระแสอินพุต 5A/div และ Spectrum ของระบบขับเคลื่อน 24

2.21 เปอร์เซ็นต์จำนวนผู้ประกอบการที่ได้รับผลกระทบจาก Voltage Sag 24

2.22 วงจร AC Drive แบบ PWM 25

2.23 แสดง VSI Drive และ CSI Drive 26

2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ แรงดัน และความเร็วรอบของการ Drive 27

2.25 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 29

2.26 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์ 29

2.27 การเปิด-ปิด สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ 30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.28 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตซ์ 30

2.29 วงจรจำกัดกระแสอินรัช 32

2.30 การลดความเร็วของอินเวอร์เตอร์ 33

3.1 ชุดการทดสอบ..... 35

3.2 เครื่องควบคุมมอเตอร์ DC Brushless 35

3.3 DC Brushless motor 36

3.4 ชุด Drive Motor 36

3.5 ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์ 36

3.6 ออสซิลโลสโคป..... 37

3.7 สายโพรบ..... 37

3.8 แรงดันV(ab)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 38

3.9 แรงดันV(bc)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 38

3.10 แรงดันV(ac)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 39

3.11 แรงดันV(ab)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 39

3.12 แรงดันV(bc)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 40

3.13 แรงดันV(ac)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 40

3.14 แรงดันV(ab)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 41

3.15 แรงดันV(bc)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 41

3.16 แรงดันV(ac)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 42

3.17 กระแสI(a)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 42

3.18 กระแสI(b)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 43

3.19 กระแสI(c)ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที 43

3.20 กระแสI(a)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 44

3.21 กระแสI(b)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 44

3.22 กระแสI(c)ที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที 45

3.23 กระแสI(a)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 45

3.24 กระแสI(b)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.25 กระแสI(c)ที่ความเร็ว 15,000 รอบ/นาที 46

4.1 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 48

4.2 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 49

4.3 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 49

4.4 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส ที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 50

4.5 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 50

4.6 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 51

4.7 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 51

4.8 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส ที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 52

4.9 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 52

4.10 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 53

4.11 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 53

4.12 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดัน ที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 54

4.13 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 54

4.14 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 55

4.15 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 55

4.16 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที..... 56

4.17 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 56

4.18 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 57

4.19 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที.....57

4.20 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 58

4.21 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 58

4.22 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 59

4.23 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที..... 59

4.24 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที..... 60

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

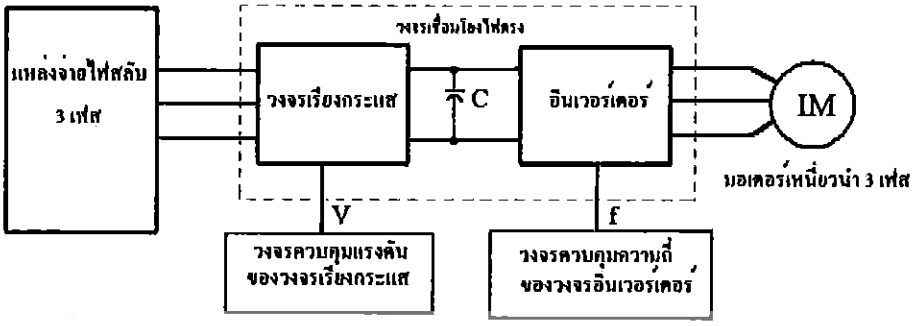
ในปัจจุบันนี้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องมีเครื่องมือในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อควบคุมระบบการผลิตให้ได้ตามต้องการ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีความเร็วต่างๆ กัน อินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องผกผัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้ หรือเพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาต์พุตให้มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือให้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ และการนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในงานนั้นๆ บางครั้งก็ทำให้เกิดปัญญาหาที่ตามมาก็คือ ปัญญาของ ฮาร์มอนิก (Harmonic)

จากปัญหาของฮาร์มอนิกนี้ ผลกระทบของมันก็คือ ทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างเพี้ยน(Distortion) ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้ แต่อินเวอร์เตอร์ก็ยังเป็นที่นิยมใช้ในการขับมอเตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างจากแหล่งจ่ายไฟทั่วไป

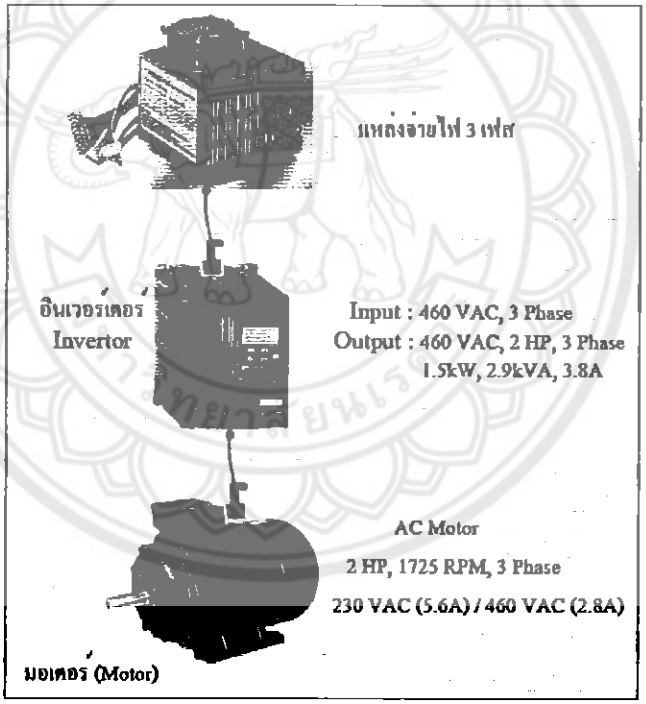
ดังนั้น โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของฮาร์มอนิกในการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive Motor) ซึ่งมีชุด Driver เป็นตัวควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์แล้วจึงทำการวัดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในการทดสอบ มาเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการ Simulate จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีการ Set ค่าต่างๆให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบขับเคลื่อนจริงๆ แล้วมาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ

โดยมอเตอร์ที่เราใช้จะเป็นมอเตอร์กระแสกระแสตรงแบบไม่มีแปลงถ่าน (Dc Brushless) สามารถแปรค่าความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ลดกระแสสตาร์ทและมีฟังก์ชั่นในการควบคุมมอเตอร์มากมาย ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวก

1.2 ส่วนประกอบโครงงาน



รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมวงจรตัวอย่างที่จะทดสอบ



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างวงจรที่จะทำการทดสอบ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาที่มาความสำคัญ และการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิก
2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ข้างเคียง
3. เพื่อศึกษา Software ที่ใช้สำหรับจำลองการ Drive Motor รวมไปถึงค่าพารามิเตอร์ในวงจร
4. เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับฮาร์มอนิคมากยิ่งขึ้น
5. เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฮาร์มอนิกว่าจะเกิดขึ้นตามทฤษฎีหรือเปล่า

1.4 ขอบข่ายของโครงงาน

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ กับการฉีดสัญญาณฮาร์มอนิคเข้าสู่ระบบ โดยการนำมอเตอร์มาทำการทดสอบขับเคลื่อนร่วมกับชุด Drive แล้วจึงนำ Scope มาวัดเพื่อหาสัญญาณกระแสและแรงดัน

นำค่าที่เป็น DATA ของสัญญาณกราฟที่ได้จาก Scope มา Prot ใหม่ในโปรแกรม เพื่อนำมา Simulateวิเคราะห์ทาง Fourier transform ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Mate lab ที่สามารถนำค่าพารามิเตอร์จาก Scope มา Plot เป็นสัญญาณกระแสเทียบกับเวลา แล้วจึงนำมาวิเคราะห์โดยใช้ Fourier series เพื่อแปลงสัญญาณจากแกนเวลามาเป็นแกนความถี่ เพื่อหาฮาร์มอนิกลำดับที่ต่างๆที่ทำให้สัญญาณของกระแสที่ได้จากการวัดผิดเพี้ยนไปจากกระแส Fundamental รวมถึงผลกระทบที่มีต่ออุปกรณ์ข้างเคียง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

กิจกรรม	ปี พ.ศ. 2550			ปี พ.ศ. 2551				
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. รวบรวมข้อมูลและเอกสาร	*----------*							
2. ออกแบบการทดลองและจัดหา				*---------*				
3. วางแผนการดำเนินการ				*----------*				
4. จัดรูปแบบเนื้อหารายงาน				*----------*				
5. ทดลองและแก้ไขงาน						*----------*		
6. สรุปผลการทดลอง และวิจารย์						*----------*		

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องของฮาร์มอนิคมากขึ้น
2. สามารถนำความรู้นี้ไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม
3. มีทักษะในการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา
4. ช่วยให้เรารู้จัก คิด และแก้ไขปัญหาอย่างมีระบบ

1.7 งบประมาณของโครงงาน

1. ค่าถ่ายเอกสารและค่าเข้าเล่มโครงงาน	900	บาท
2. ค่าแผ่นซีดี	20	บาท
3. ค่าหนังสือข้อมูลเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ฯลฯ	380	บาท
4. ค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์	400	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	1,700	บาท (หนึ่งพันเจ็ดร้อยบาทถ้วน)

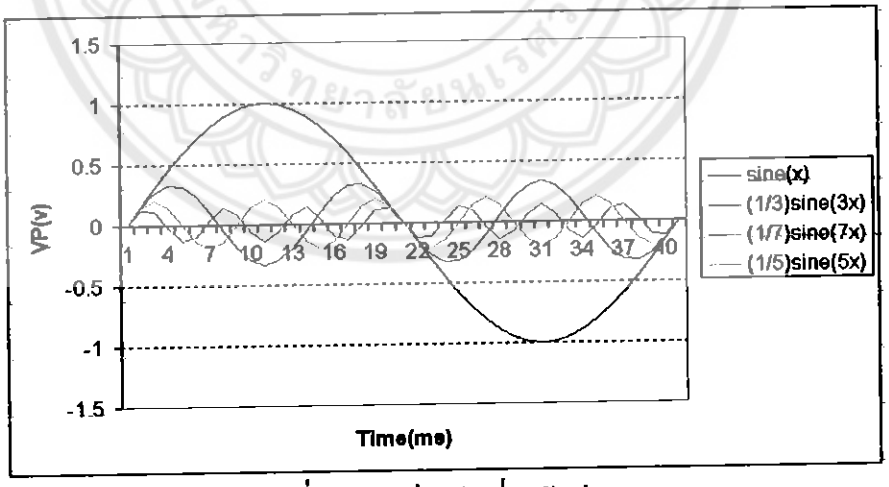
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1) ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า (Harmonic in Power System)

โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง หรือไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง ไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ และอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ จากผลกระทบของฮาร์มอนิคทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างเพี้ยน (Distortion) ไป ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้

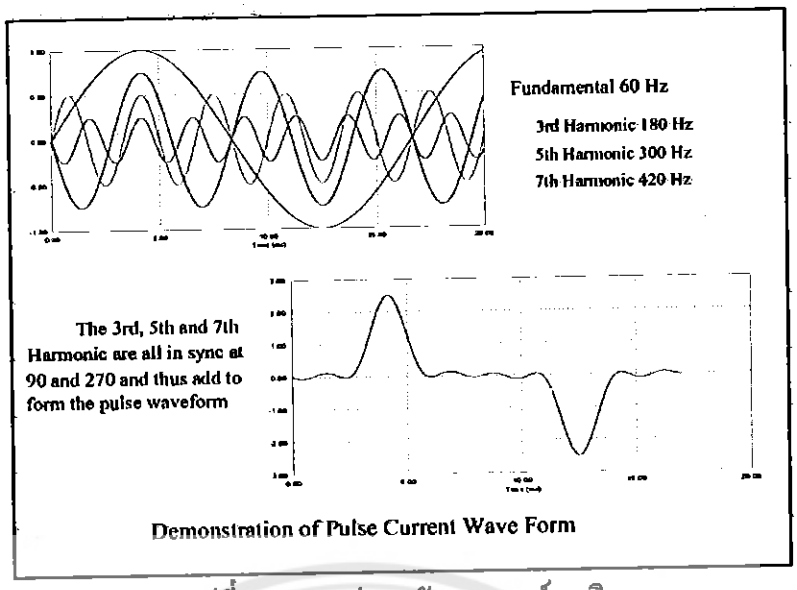
2.1.1 คำนิยามฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonic) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (ในระบบไฟฟ้าเรามีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่นฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความพี่เป็น 150 Hz และฮาร์มอนิคลำดับที่ 5 มีค่าความพี่เป็น 250 Hz แสดงดังรูป



รูปที่ 2.1 ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ

ผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความพี่หลักมูลด้วยขทางขนาดและมุม ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์



รูปที่ 2.2 กราฟของสัญญาณฮาร์มอนิก

ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชั่นที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนดังสมการ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n Cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n Sin(n\omega_0 t) \quad (1)$$

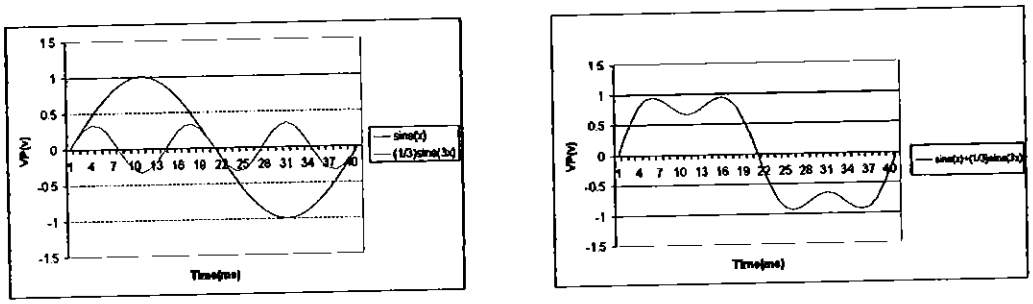
$$a_0 = \frac{1}{T}\int f(t)dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int f(t)Cos \;\; n\omega_0 t.dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int f(t)Sin \;\; n\omega_0 t.dt \quad (4)$$

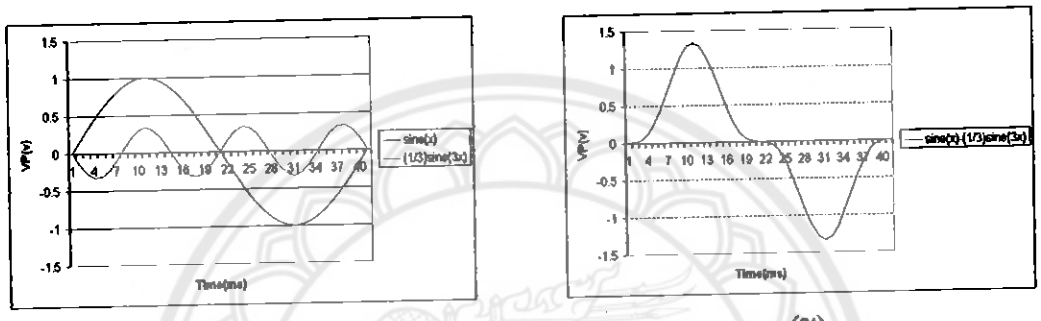
เมื่อ T คือหนึ่งคาบของสัญญาณและ n คือเลขจำนวนเต็มบวก

ในกรณีที่ n = 0 จะเป็นความถี่มูลฐาน หรือกรณีที่ n มีค่ามากกว่าศูนย์ เราเรียกความเพี้ยนนี้ว่าฮาร์มอนิคลำดับที่ n ซึ่งเป็นได้ทั้งลำดับคู่และคี่



(ก) (ข)

รูปที่ 2.3 กราฟของสมการ $f(t) = \sin(x) + \frac{1}{3}\sin(3x)$



(ก) (ข)

รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมการ $f(t) = \sin(x) - \frac{1}{3}\sin(3x)$

2.1.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

มาตรฐานสากล IEC และ IEEE ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิค %THD เป็นค่าบอกระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิกโดยเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่าของส่วนประกอบความถี่หลักมูลเทียบเป็นร้อยละ ซึ่งจะแยกออกเป็นค่าความเพี้ยน กระแสฮาร์มอนิกรวม (THDi) และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THDv)

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2(rms)}}{I_{1(rms)}} \times 100\% \qquad (5)$$

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2(rms)}}{V_{1(rms)}} \times 100\% \qquad (6)$$

โดยที่

$V_h^2(rms)$ คือค่า RMS ของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่

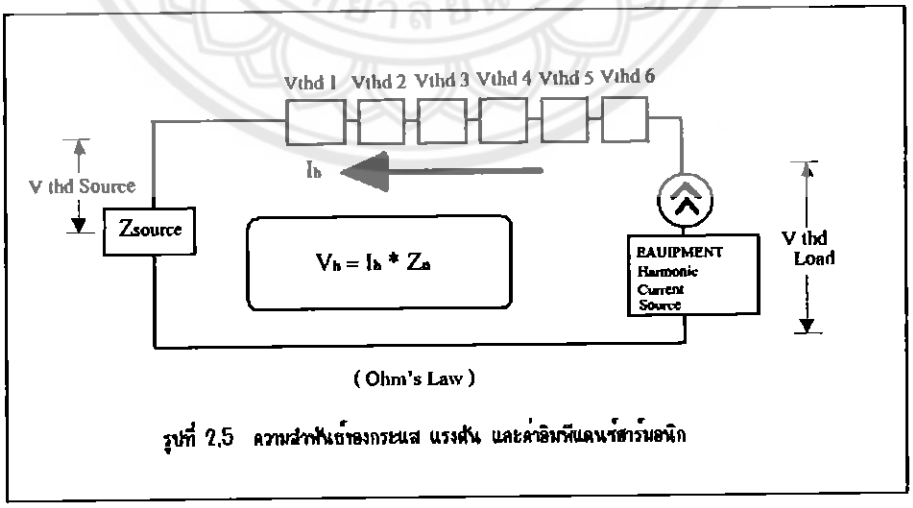
$h, I_{h(rms)}$ คือค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่

$h, V_{1(rms)}$ คือค่า RMS ของแรงดันที่ความถี่หลักมูล

$I_{1(rms)}$ คือค่า RMS ของกระแสที่ความพี่หลักมูล

2.1.3 ความสำพันธ์ของ %THDI %THDv และ MVAsc

ในบางครั้งค่าของ %THDi ที่มีค่าสูงๆ ในระบบไฟฟ้านั้นอาจจะไม่เกิดผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกได้ เพราะค่า %THDi จะเป็นเพียงค่าที่บอกถึงคุณลักษณะของกระแสฮาร์มอนิคของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่ละชนิด แต่ไม่สามารถที่จะบอกถึงความรุนแรงของระดับฮาร์มอนิคได้อย่างสมบูรณ์ดังในกรณีขนาดพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่งตัวเดียวกันที่ค่าพิกัดกำลังมากหรือน้อย ค่า %THDi ของโหลดดังกล่าวก็จะเป็นค่าเดียวกัน แต่ระดับความรุนแรงที่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าเราจะพิจารณาค่าของ %THDi ควรที่จะพิจารณาถึงพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบกันด้วย เราสามารถที่จะพิจารณาถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิคในระดับหนึ่งได้ ส่วนค่า %THDv นั้นสามารถที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกในระบบได้ซึ่งจะต่างจากค่า %THDi โดยจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันฮาร์มอนิค และค่าพิกัดกำลังวงจรของระบบ (MVAsc)



รูปที่ 2.5 ความสำพันธ์ของกระแส แรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก

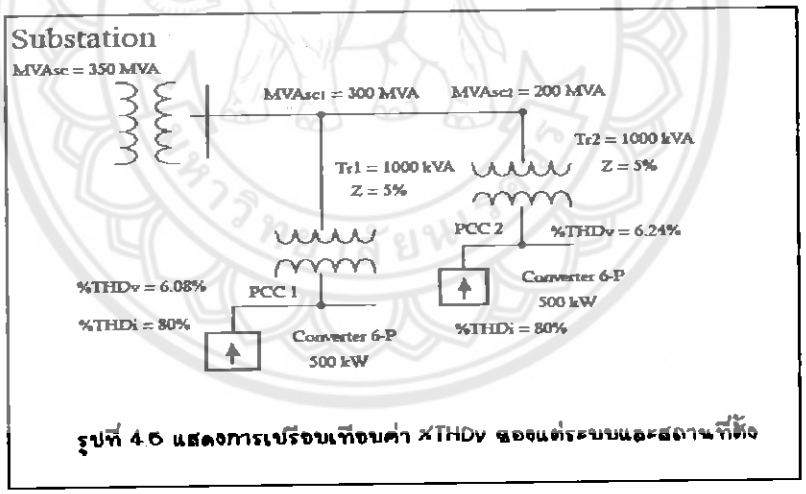
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์

([2.2.3] จากหนังสือ Power Electronic)

จากรูปที่ 2.5 ที่แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า จะมีค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเพี้ยนของผู้ใช้ไฟเมื่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำงานจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ (I_h) เข้าสู่ระบบและผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ (Z_h) ของระบบทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ทำให้สัญญาณแรงดันในระบบมีขนาดและสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากแหล่งจ่ายเดิมตามสมการ

$$V_h = I_h \times Z_h . \tag{7}$$

จากสมการทำให้เราสามารถพิจารณาได้ว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบหนึ่งนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดและพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (I_h) และค่าพิกัดกำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (Z_h) นั้นคือกรณีสถานที่ตั้งของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ใกล้สถานีไฟฟ้า ซึ่งมีค่าพิกัดลัดวงจรสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่ำ แต่ถ้าอยู่ไกลสถานีไฟฟ้า ค่าพิกัดลัดวงจรสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูง ดังนั้น โรงงานที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกน้อยกว่าโรงงานที่อยู่ไกลสถานีไฟฟ้าในกรณีที่ระบบภายในโรงงานเหมือนกันดังรูป



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า %THDv ของแต่ระบบและสถานที่ตั้ง

รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า THDv ของแต่ระบบและสถานที่ตั้ง

2.1.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกจะเกิดมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear Load) ซึ่งถ้าแบ่งตามคุณลักษณะการทำงานจะมีดังต่อไปนี้

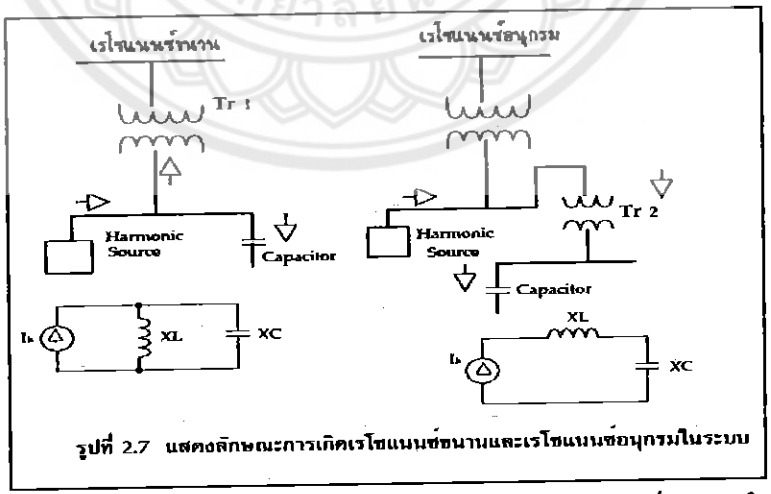
1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตัวเรียงกระแสกำลัง ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ ลิฟต์ในอาคาร และ PLC
3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ก เช่น เตาหลอมแบบอาร์ก เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ และ เครื่องเชื่อมแบบอาร์ก
4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องกลไฟฟ้า

2.2) ผลกระทบของฮาร์มอนิก

2.2.1 ปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

เนื่องจากในระบบไฟฟ้ามีการใช้คาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เพื่อทำให้การจ่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ขึ้นระหว่างค่าคาปาซิตีฟรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์กับค่ารีแอกแตนซ์ของระบบการไฟฟ้าและของหม้อแปลงที่ความถี่หนึ่งและถ้าในระบบมีกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบแล้วจะเป็นผลทำให้เกิดการขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ผลจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์และคาปาซิเตอร์ทริปโดยไม่ทราบสาเหตุ หรืออาจทำความเสียหายให้คาปาซิเตอร์เกิดการชำรุดได้ ปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขนานและฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์อนุกรมซึ่งพิจารณาได้จากตำแหน่งการติดตั้งคาปาซิเตอร์และแหล่ง กำเนิดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 4.7 ซึ่งการเกิดเรโซแนนซ์โดยส่วนใหญ่จะเกิดได้ที่บัสของผู้ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ขนานและเรโซแนนซ์อนุกรมในระบบ

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ขนานและ เรโซแนนซ์อนุกรมในระบบ

จากวงจรดังกล่าว ความถี่รีโซแนนซ์ของระบบ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LsC}} \quad (8)$$

เมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบและค่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่จุดต่อร่วม (PCC) ได้ค่าลำดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

$$h_r = \sqrt{\frac{MVAsc}{MVARcap}} \quad (9)$$

และเมื่อทราบค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์และหม้อแปลงได้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{KVAt \times 100}{KVAcap \times X(\%)}} \quad (10)$$

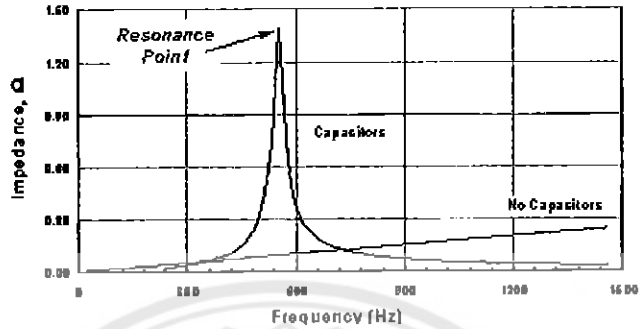
ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ในระบบ จะได้

$$f_r \approx f \times \sqrt{\frac{KVAt \times 100}{KVAcap \times X(\%)}} \quad (11)$$

โดยที่ค่า

h_r	คือ ลำดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
f_r	คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
Xc	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (โอห์ม)
Xsc	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจรของระบบ (โอห์ม)
MVAscc	คือ ค่าพิกัดกำลังลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้า (MVA)
MVAsc	คือ ค่าพิกัดกำลังลัดวงจรที่บัสของระบบ (MVA)
MVAcap	คือ ค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ (MVar)
KVAt	คือ ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลง (kVA)
KVAcap	คือ ค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ (kVar)
Xt	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง (%) และ
f	คือ ความถี่ของระบบ 50 Hz

ถ้าระบบดังกล่าวมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 อยู่ด้วย อาจจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขึ้นได้ ส่วนการแก้ไขที่นิยมในปัจจุบันคือ ติดตั้งฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกลำดับที่จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์นั้นหมดไป หรือเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบ

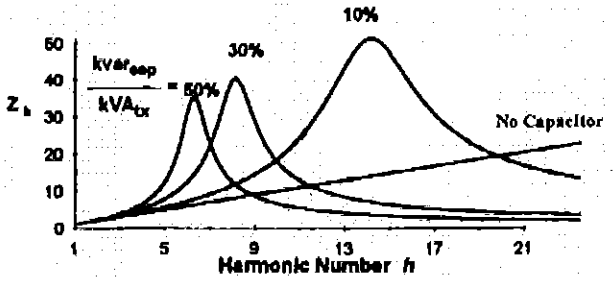


รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งค่าลำดับที่เกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

เราสามารถที่จะทำการประเมินการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์กับระบบไฟฟ้าแรงต่ำในระบบที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ได้ โดยพิจารณาตามขนาดของโหลดฮาร์มอนิก ขนาดหม้อแปลง และขนาดของคาปาซิเตอร์ได้ ซึ่งมีข้อพิจารณาดังนี้

- ถ้าขนาดของโหลดฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า 10 % ของขนาดหม้อแปลงจะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
- ถ้าขนาดของโหลดฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า 30 % และขนาดของคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยกว่า 20 % ของขนาดหม้อแปลง จะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
- ถ้าขนาดโหลดฮาร์มอนิกมีค่ามากกว่า 30 % ขนาดหม้อแปลง และมีการติดตั้งฟิลเตอร์จะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

ได้มีการประเมินลำดับความถี่เรโซแนนซ์และขนาดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบโดยมีการเทียบขนาดค่าคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลงในระบบ เมื่อพิจารณาชนิด 6 พัลส์ ซึ่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2.9 ลำดับความถี่ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์สัมพันธ์กับขนาดของคาปาซิเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นจึงควรระวังสำหรับระบบที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์และมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย อาจจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์และคาปาซิเตอร์เกิดการชำรุดได้ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992 ได้มีการกำหนดค่าใช้งานของคาปาซิเตอร์ดังตารางที่2 เพื่อการใช้งานคาปาซิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานนาน

Maximum Operating Voltage	110% of Rated RMS Voltage
Maximum Peak Voltage	120% of Rated Peak Voltage
Total RMS Current	180% of Rated RMS Current
Total kVar	135% of Rated kVar

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดสูงสุดการใช้งานของคาปาซิเตอร์

2.2.2 ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง

ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่า RMS ของกระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้นตามสมการ

$$P_n = \sum_{h=2}^{\infty} I_{h(rms)}^2 \times R_n \qquad (12)$$

โดยที่ P_n คือกำลังสูญเสียในสาย

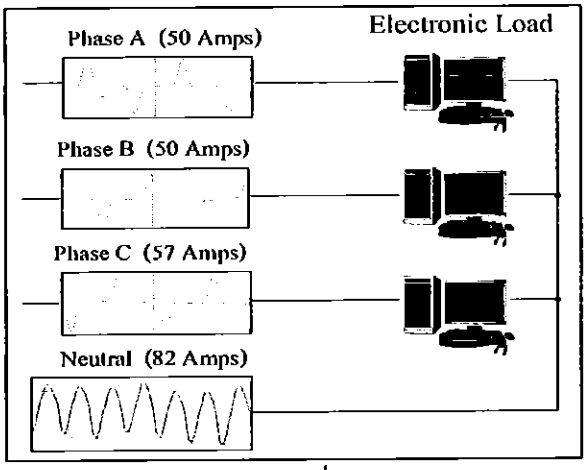
I_n คือกระแสฮาร์มอนิก (RMS) ลำดับที่ n

R_n คือความต้านทานของสายที่ความถี่ฮาร์มอนิก

และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านสายเคเบิล ทำให้เกิดความร้อนสูงในสายเคเบิลเนื่องจากผลของ Skin Effect และ Proximity Effect คือเกิดการไหลผ่านบริเวณใกล้ผิวของสายไฟฟ้า ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่ดับขนาดสาย ระยะห่างระหว่างสาย และความถี่ของสายเคเบิล ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น

2.2.3 ปัญหาฮาร์มอนิก Triple n (ลำดับที่ 3, 6, 9)

จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ (zero sequence) ในระบบ 3 เฟส 4 สาย และเป็นโหลดประเภทที่มีการใช้อุปกรณ์แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (Switching Mode Power Supply: SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ จะมีค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 สูงซึ่งโดยทั่วไปแล้วปัญหาฮาร์มอนิก Triple n พิจารณาถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เป็นสำคัญ ซึ่งแต่ละเฟสจะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอล อาจทำให้สายนิวตรอลทำงานเกินพิกัดได้หากไม่มีการออกแบบรองรับไว้ ดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลรวมอยู่ในสายนิวตรอล

จะเห็นว่าสำหรับการออกแบบสายนิวตรอล เราสามารถคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่สายนิวตรอลจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้จากสมการ

$$I_{phase} = 3\sqrt{\frac{0.56\,p_{nl}^2}{1+0.56\,p_{nl}^2}}\,I_{phase(rms)} \qquad \textbf{(13)}$$

การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 วิธีที่นิยมใช้กันคือ การเพิ่มขนาดพิกัดสายนิวตรอลในกรณีที่สายนิวตรอลไม่สามารถรองรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่ในกรณีที่กระแสฮาร์มอนิกในสายนิว ตรอลไปรบกวนการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่มีการตรวจจับกราวด์ อาจทำให้เซอร์กิตเบรอเกิดร์ดังกล่าวทำงานผิดพลาดได้ การแก้ไขอาจติดฟิลเตอร์ลำดับที่ 3 เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลเข้าสายนิวตรอล

2.2.4 ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง

กำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไป (Derating) ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮีสเตอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น ทำให้พิจารณาถึงการใช้หม้อแปลงที่มีการใช้โหลดฮาร์มอนิคตามมาตรฐาน IEEE Std.C57.110-1986 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่แนะนำวิธีการประเมินการใช้งานลดพิกัดหม้อแปลงที่มีใช้อยู่แล้วในระบบหรือสำหรับการออกแบบสเปคในการจัดซื้อหม้อแปลงที่จ่ายให้กับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วยหรือสำหรับการออกแบบ แบบสเปคในการจัดซื้อหม้อแปลงที่จ่ายให้กับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วยเพื่อป้องกันหม้อแปลงเกิดความร้อนเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก

ซึ่งอาจทำให้หม้อแปลงเสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง โดยมีการกำหนดค่ากระแสของหม้อแปลงที่มีการประสิทธิภาพในการรับโหลดลดลง(Derated) ตามสมการ

$$I_{rms(derated)} = \sqrt{\frac{1+P_{EC-R}}{1+K\times P_{EC-R}}}(pu) \qquad (14)$$

PEC-R คือ Eddy Current Loss Factor

Ih คือ ลำดับกระแสฮาร์มอนิก

h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

K คือ $K-factor=\sum\frac{I_h^2\times h^2}{\sum I_h^2}$

สำหรับค่า K-factor เป็นค่าที่มาตรฐาน UL 1561 (Underwriter Laboratories) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ K เป็นตัวบอกถึงความสามารถของหม้อแปลงในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

2.2.5 ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริกกับตัวคาปาซิเตอร์ และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ

ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ตามสมการ

$$P_L=\sum_{n=1}^{\infty}C(\tan\delta)\omega_n V_n^2$$
$$Loss_factor:\tan\delta=\omega RC \qquad (16)$$

และผลจากภาวะ เรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดการขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ที่ผู้ผลิตออกแบบสร้างต้องได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992

2.2.6 ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น

ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส(Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไปกรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำเกิดขึ้นฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนดหรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุอาจเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกในกรณีเกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

2.2.7 ผลของฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาด

ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงานของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิด Electromagnetic ขึ้นอยู่ดับค่ากระแสและแรงดัน RMS ส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการสุ่มเก็บตัวอย่าง(Sampling) และตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์ ถ้ามีฮาร์มอนิกเข้ามารบกวนการทำงานของรีเลย์ ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้

- ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่า (Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
- กรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก Triple n มากพอ อาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด
- ทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ทำงานผิดพลาด ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการเซตติงที่ความถี่หลักมูล
- ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Under frequency Relay) มีความไวกว่าปกติ อาจทำให้เกิดการทริป ผิดพลาด
- ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Over Current and Over Voltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้
- ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

2.2.8 ผลของกระแสฮาร์มอนิค ต่อความสามารถในการตัดกระแส

ของอุปกรณ์สวิตซ์เกียร์ คือ ทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา di/dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

2.2.9 ผลของฮาร์มอนิก ต่อมิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt-Hour Meter)

ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ทำให้การวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล

2.2.10 ผลของฮาร์มอนิค ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเกิดปรากฏการณ์ ค็อกกิ้ง (Cogging คือ เกิดการสั่น) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิเลส ทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

2.2.11 ผลของฮาร์มอนิค ต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร

คือจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด และมีอายุการใช้งานน้อยลง หรือเกิดการชำรุดเสียหาย ด้วยผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป หรือมีสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร เช่น ระบบโทรศัพท์

2.3) การวัดฮาร์มอนิก

ในการวัดค่าระดับฮาร์มอนิกเพื่อตรวจสอบค่าตามขีดจำกัดของมาตรฐานหรือวิเคราะห์ระบบ เช่น การออกแบบฟิลเตอร์สำหรับกำจัดหรือลดฮาร์มอนิก เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องควรมีการพิจารณาถึง เครื่องมือวัด วิธีการวัด และจุดตรวจวัด ให้เหมาะสมสอดคล้องกับระบบและชนิดของฮาร์มอนิกที่ทำการตรวจวัด

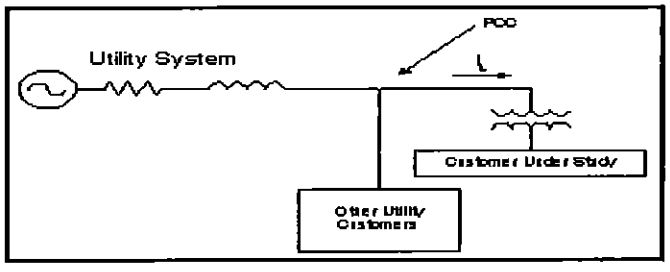
2.3.1 เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันโดยทั่วไป เป็นลักษณะเครื่องมือวัดแบบ Time-Domain คือทำการวัด Sample สัญญาณในช่วงเวลาสั้น ๆ มาวิเคราะห์ตามวิธี DFT (Digital Fourier-Transform Technique) มาตรฐาน IEC 1000-4-7 ได้มีการกำหนดค่า Sample ของเครื่องมือวัดฯ ที่ 10 Cycle ของระบบที่มีความถี่หลักมูล 50 Hz และ 12 Cycle ที่ 60Hz คือ เครื่องมือวัด ฯ จะนำคุณลักษณะของกระแสหรือแรงดันทุก ๆ 200 ms มาทำการวิเคราะห์ และค่าผิดพลาดในการ Sample แต่ละครั้งต้องมีค่าไม่เกิน 0.03% ของจำนวน Cycle ที่กำหนดไว้

2.3.2 จุดตรวจวัดฮาร์มอนิก

จะพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของการตรวจวัดว่าต้องการนำค่าที่วัดได้ไปใช้งานในลักษณะใด จุดต่อร่วม (PCC) คือจุดซื้อขายไฟฟ้า เป็นจุดสำหรับวัดเพื่อตรวจสอบค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิคของผู้ใช้ไฟที่อาจไหลเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดตามมาตรฐานที่กำหนดในระบบของการไฟฟ้า จะมีจุดต่อร่วมอยู่ 2 ลักษณะคือ

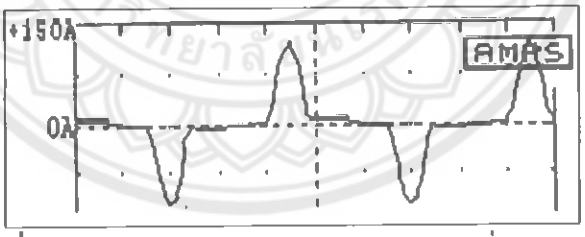
1. จุดต่อร่วมที่อยู่ทางด้านหน้าหม้อแปลง จุดต่อร่วมนี้จะใช้กับผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดแรงดัน 22, 33 และ 115 kV ที่มีหม้อแปลงเฉพาะราย และจุดต่อร่วมดังกล่าวนี้ โดยทั่วไปจะอยู่ทางด้านแรงสูง



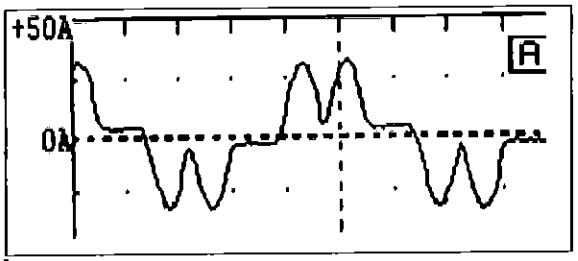
รูปที่ 2.11 จุดต่อร่วมทางด้านแรงสูง

ในการวัดค่าฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมนี้ ต้องทำการวัดผ่านหม้อแปลงแรงดัน (PT) และหม้อแปลงกระแส (CT) ซึ่งต้องมีคุณสมบัติการตอบสนองได้อย่างถูกต้องในความถี่ช่วงกว้าง ควรมีคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ได้ดีที่ความถี่มากกว่า 3 kHz และค่าความถูกต้อง(Accuracy) ควรอยู่ในช่วงไม่เกิน 3% ที่ความถี่มากกว่า 5 kHz และข้อแนะนำในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกนั้น ไม่ควรวัดผ่านหม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิเตอร์ (CVT) เพราะอาจทำให้เกิดการวัดที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากตัว CVT ไม่สามารถตอบสนองความถี่ได้ดีที่ความถี่สูง ๆ และอาจเกิดปัญหาเรโซแนนซ์ภายในตัวมันเองได้ในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจวัด

ส่วนการวัดกระแสต้องทำการวัดผ่านหม้อแปลงกระแส (CT) นั้นควรมีค่าความถูกต้องอยู่ในช่วงไม่เกิน 3% ที่ความถี่มากกว่า 10 kHz และผลจากการใช้หม้อแปลงกระแสช่วยในการวัด ทำให้ค่ามุมของกระแสฮาร์มอนิกที่วัดได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากลักษณะจริง ซึ่งจะมีผลต่อการนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป แต่ในบางครั้งอาจมีความจำเป็นที่ไม่สามารถวัดที่จุดต่อร่วมดังกล่าวได้ โดยต้องไปทำการวัดทางด้านหลังของหม้อแปลง และต้องทำการแปลงค่าที่วัดได้ไปทางด้านแรงสูงซึ่งเป็นจุดตรวจสอบดังกล่าว โดยการแปลงค่าผ่านอัตราส่วนของหม้อแปลง และยังต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะการต่อหม้อแปลงด้วย เพราะจะมีผลต่อค่ากระแสฮาร์มอนิกบางลำดับ เช่น หม้อแปลงที่ต่อแบบ เดลต้า-วาย ฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ที่มีอยู่ด้านหลังหม้อแปลง ไม่สามารถไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงออกไปที่จุดร่วมดังกล่าวได้ ดังรูปจะแสดงความแตกต่างของกระแสฮาร์มอนิกด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ จากผลการต่อหม้อแปลงแบบ เดลต้า-วาย

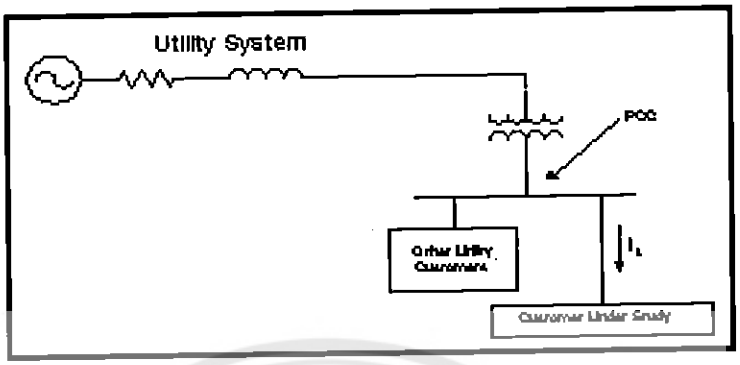


รูปที่ 2.12 กระแสฮาร์มอนิกทางด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบ Y



รูปที่ 2.13 กระแสฮาร์มอนิกทางด้านปฐมภูมิต่อแบบ Delta

2. จุดต่อร่วมที่อยู่ด้านหลังหม้อแปลง จุดต่อร่วมนี้จะใช้กับผู้ใช้ไฟขนาดแรงดันไม่เกิน 400V ซึ่งเป็นผู้ไฟขนาดเล็ก ไม่มีหม้อแปลงเฉพาะราย โดยใช้หม้อแปลงในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า



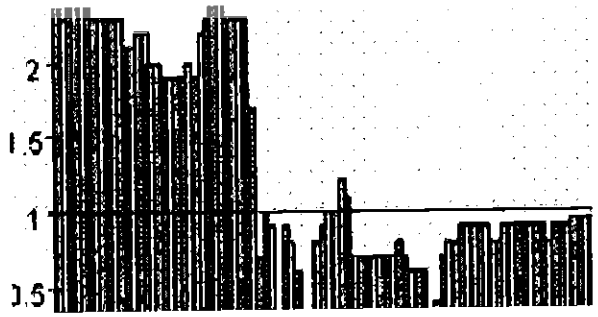
รูปที่ 2.14 จุดต่อร่วมทางด้านแรงต่ำ

2.3.3 การนำเสนอการตรวจวัด

1. Snapshots คือการนำเสนอรูปคลื่น ขนาด และมุมเฟสของฮาร์มอนิกของแต่ละลำดับในขณะเวลาที่ทำการตรวจวัด โดยใช้ตรวจสอบระดับฮาร์มอนิกในสถานะปัจจุบันของระบบ

2. Time Trend คือการนำเสนอค่าระดับฮาร์มอนิกที่เวลาต่าง ๆ ตลอดช่วงการวัด โดยสามารถพิจารณาถึงการเปลี่ยนระดับฮาร์มอนิกในช่วงระยะเวลาที่นาน ๆ ซึ่งบอกถึงระดับค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย ของระดับฮาร์มอนิก

3. Probability Histograms คือการนำเสนอค่าแต่ละครั้งจากการวัด มาทำเป็นสถิติเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในรูปแบบของกราฟแท่ง เช่น การนำการค่า %THDv แต่ละช่วงเวลาต่าง ๆ ของทุก ๆ ค่า มาทำการเปรียบเทียบกับขีดจำกัดมาตรฐานฮาร์มอนิกที่สามารถยอมรับได้ดังรูป



รูปที่ 2.15 การแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันต่างๆ กับขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก

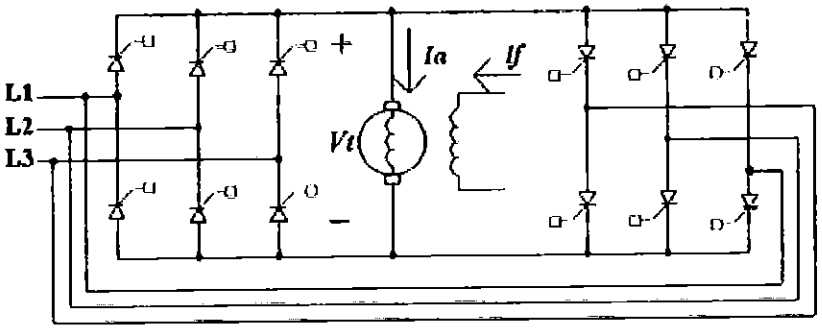
2.4) ผลกระทบของฮาร์มอนิคของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แหล่งจ่ายอินพุต

คุณภาพของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญต่อโหลดชนิดต่างๆ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งเป็นโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของแหล่งจ่ายไฟอินพุตด้อยลง ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และได้นำมาใช้ในการควบคุมแทนสวิตซ์ในทางไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลายเพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีกว่าสวิตซ์ในทางไฟฟ้าหลายประการ เช่นยืดหยุ่นในการควบคุมแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้า มีขนาดเล็ก เที่ยงตรง และมีความแม่นยำสูง

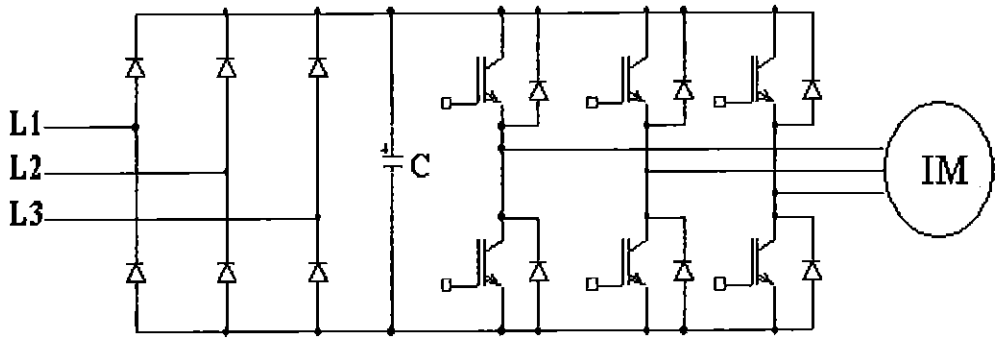
ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการนำเอาข้อดีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานที่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง ๆ เช่น กระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่นำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งเป็นระบบที่นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มาใช้ในการควบคุมการถ่ายเทกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเข้าสู่มอเตอร์ สามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบใหญ่ๆ คือ

1. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drives)
2. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drives)

การนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ระบบ นอกจากข้อดีที่ได้กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีข้อเสียบางประการที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบอื่นๆ ด้วย กล่าวคือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะผลิตฮาร์มอนิกและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา โดยที่ระบบขับเคลื่อนทั้ง 2 นั้นเป็นภาระแบบไม่เชิงเส้น (Non linear Load) เป็นผลมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากภาระแบบไม่เชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและจะฉีกฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ซึ่งถ้าหากฮาร์มอนิกที่ฉีดเข้าสู่แหล่งจ่ายสูงมาก ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆ ทำงานไม่เป็นปกติ

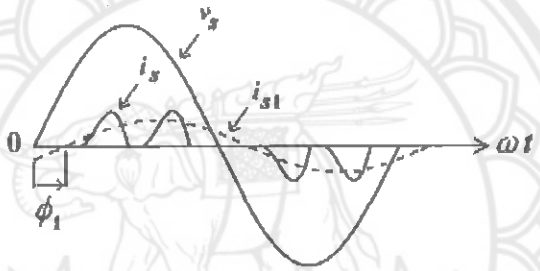


รูปที่ 2.16 โครงสร้างของวงจรกำลัง 4 Quadrant Thyristor DC Drive



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของวงจรกำลัง Standard AC Drive Power Factor

จากรูป ได้แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ AC Drive และ DC Drive ที่นิยมใช้กันถือได้ว่าเป็นแบบมาตรฐานซึ่งต่างก็ได้รับกำลังงานจากแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเกิดการไหลของพลังงานเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนซึ่งแสดงผลให้เป็นในรูปแรงดันและกระแสโดยที่มุมต่างเฟสของรูปคลื่นแรงดันและกระแสของระบบขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแส

ซึ่งปกติแล้ว Power Factor ของทั้ง 2 ระบบ จะแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างและการทำงานกล่าวคือ ในระบบ DC Drives ค่า Power factor จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-0.9 ขึ้นอยู่กับมุมจุดฉนวนของไทยริสเตอร์ตามสมการ

$$PF = \frac{I_{S1}}{I_S}\cos\phi_1 \qquad (17)$$

ϕ_1 = มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่ความถี่หลักมูล

I_S = กระแสอินพุต RMS

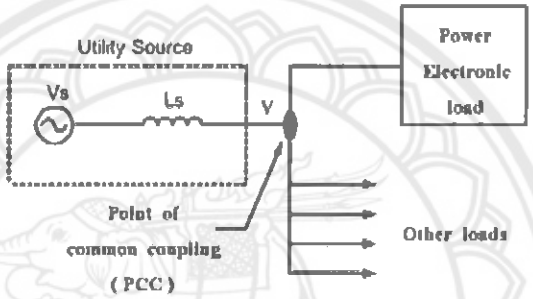
I_{S1} = กระแสอินพุต RMS ที่ความถี่หลักมูล

โดยจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ เช่น ที่ความเร็วรอบต่ำๆ ค่า Power Factor จะมีค่าต่ำ และถ้าความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นค่า Power factor ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในระบบ DC Drives ค่า Power Factor จะแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์

ในขณะที่ระบบ AC Drives ซึ่งใช้ Diode Bridge Rectifier 3 เฟส ค่า Power factor จะมีค่าประมาณ 0.95 และจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยที่ตัวเก็บประจุจะเป็นตัวจ่าย Reactive Power ให้กับมอเตอร์ซึ่งผลจาก Power factor ที่สูงขึ้นจะเป็นส่วนสำคัญทำให้ประสิทธิภาพของระบบจ่ายสูงขึ้น

2.5) มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่บอกถึงขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด ระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (PCC) ได้แก่มาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด ทั้งขีดจำกัดแรงดันและขีดจำกัดกระแสที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC ดังรูป



รูปที่ 2.19 รูปไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

เมื่อ

Isc คือ กระแสลัดวงจรที่จุด PCC

Il คือ ความต้องการกระแสสูงสุดที่ความถี่หลักมูล

I_{sc}/I_L	Odd Harmonic Order h (%)					Total Harmonic Distortion (%)
	h <11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤ h	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 – 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 – 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 -1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)

	69 kV	69 – 138 kV	> 138 kV
Maximum for Individual Harmonic	3.0	1.5	1.0
Total Harmonic Distortion	5.0	2.5	1.5

ตารางที่ 3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก

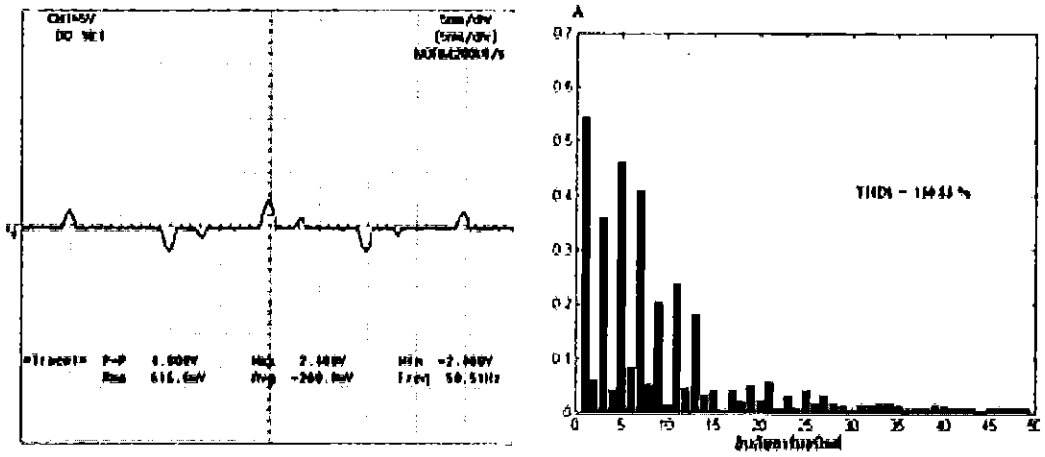
จากตาราง เป็นขีดจำดัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดของระบบซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ที่จุด PCC จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่ที่ว่าอัตราส่วน I_{SC} / I_1 ของระบบอยู่ระดับใด ในขณะที่ Isc คือค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Ls) เมื่อตรวจสอบสามารถบอกเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆได้ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3,5,7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7 %
2. เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11,13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5 %
3. เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 17,19 และ 21 จะต้องไม่เกิน 2.5%
4. เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 23,25,27, และ 33 จะต้องไม่เกิน 1 %
5. เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 35 จะต้องไม่เกิด 0.5 %
6. แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมจาก 1-5 จะต้องไม่เกิน 8 %

การหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิคที่ระดับแรงดัน 120 V – 69 kV เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิค สูงสุดแต่ละอันดับจะต้องไม่เกิน 3% แต่รวมทุกอันดับจะต้องไม่เกิด 5%

2.6) ขนาดของภาระส่งผลต่อกระแสอินพุต

ขนาดภาระของระบบ DC Drive และ AC Drive จะมีผลต่อรูปคลื่นกระแสอินพุต กล่าวคือ ในขณะที่มีภาระหรือภาระต่ำๆ รูปคลื่นของกระแสจะมีความไม่ต่อเนื่อง แต่เมื่อเพิ่มภาระให้กับระบบขับเคลื่อนรูปคลื่นกระแสจะมีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในขณะที่ไม่มีภาระหรือภาระต่ำๆ กระแสที่อินพุตก็จะต่ำ แต่เมื่อภาระเพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสอินพุตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจึงทำให้กระแสความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น เป็นผลทางปฏิบัติที่ทำการเปรียบเทียบกระแสอินพุตและ Spectrum เมื่อภาระต่างกันของระบบ AC Drive

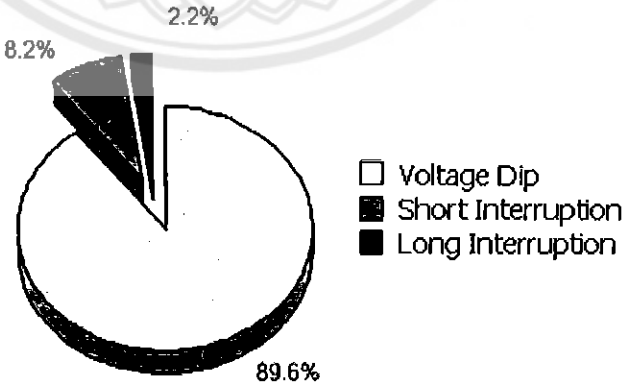


รูปที่ 2.20 รูปกระแสอินพุต 5 A/div และ Spectrum ของระบบขับเคลื่อนขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 2.25 (ก) แสดงรูปกระแสอินพุตในขณะที่ระบบขับเคลื่อนไม่มีภาระจะพบว่าค่า THDi สูงถึง 150.85 % แต่เมื่อเพิ่มภาระให้กับระบบขับเคลื่อนทำให้ค่า THDi จะลดลงนั้นก็แสดงว่าเมื่อภาระของระบบขับเคลื่อนสูงขึ้นก็จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุตมีการผิดเพี้ยนลดลง แต่ก็ยังคงสูงกว่าขีดจำกัดของมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.7) ผลกระทบของ Voltage Sag (Dip) ต่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ปัญหาส่วนใหญ่ที่ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลงนั้น จะมีสาเหตุมาจาก Voltage Sag ซึ่งผลของ Voltage Sag ที่เกิดขึ้นและเป็นประเด็นหลักที่ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลง ก็เกิดจากการที่อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ทั้งแบบ AC และ DC (Adjustable Speed AC–DC Drives) มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับตั้งแต่เป็นมิลลิวินาทีเป็นต้นไป



รูปที่ 2.21 แสดงเปอร์เซ็นต์จำนวนผู้ประกอบกิจการที่ได้รับผลกระทบต่อ Voltage Sag

2.7.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjustable Speed Drives: ASD)

ปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ มาใช้กันอย่างกว้างขวางเจ้าตัว Drive นี้ส่วนใหญ่ก็จะเป็นที่ทราบและรู้จักกันเป็นอย่างดีแล้ว เนื่องจากปัจจุบันในโรงงานทั่วไป

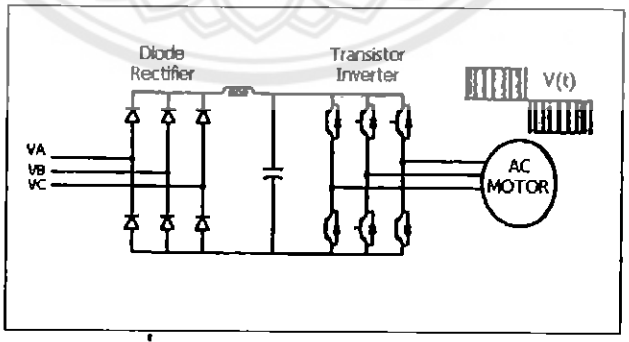
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
W 15004249
วธ. 08730 2550

ก็จะมี Drive ทั้งแบบ AC และ DC เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยเฉพาะโรงงานที่ใช้มอเตอร์จำนวนมาก เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนสายพาน หรือกระบวนการผลิตเช่น โรงงานกระดาษ, โรงงานทอผ้า หรือโรงงานที่ประกอบกิจการประเภทโรงงานน้ำแข็ง ฯลฯ ทั้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเร็วรอบที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตจริง ๆ หรือมีวัตถุประสงค์เพื่อการประหยัดพลังงานก็ตาม

2.7.2 ลักษณะโดยทั่วไปของ Drive แบบต่าง ๆ

AC Drive วงจร Rectifier ที่เรียงกระแสให้เป็น DC จะถูกเปลี่ยนให้เป็น AC ที่ความถี่ต่าง ๆ และถูกส่งออกไปทางด้าน Output สำหรับการควบคุมมอเตอร์ วงจรแปลงกระแส DC เป็นกระแส AC (Inverter) ในตัว AC Drive สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Voltage Source Inverter (VSI) และ Current Source Inverter (CSI) ชุด Inverter แบบ VSI นั้นจะต้องการความราบเรียบของ DC ทางด้าน Input ของ Inverter มากกว่า ดังนั้นวงจร LC Filter ใน DC Bus หรือ DC Link ของ Inverter แบบ VSI จึงมีความจำเป็น แต่สำหรับชุด Inverter แบบ CSI จะต้องการความคงที่ของกระแส (Constant Current) ด้าน Input ของ Inverter มากกว่า ดังนั้น Series Inductor ใน DC Link จึงต้องถูกบรรจุไว้สำหรับ AC Drive แบบที่ใช้ชุด Inverter แบบ CSI ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้ว AC Driveจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Motor) ในงานที่ไม่ต้องการความเร็วรอบที่คงที่มากนัก ขณะเดียวกันมอเตอร์แบบนี้ จะมีราคาที่ค่อนข้างถูก และ AC Driveจะถูกนำมาใช้กับซิงโครนัสมอเตอร์ ในกรณีที่งานต้องการความเร็วรอบที่คงที่

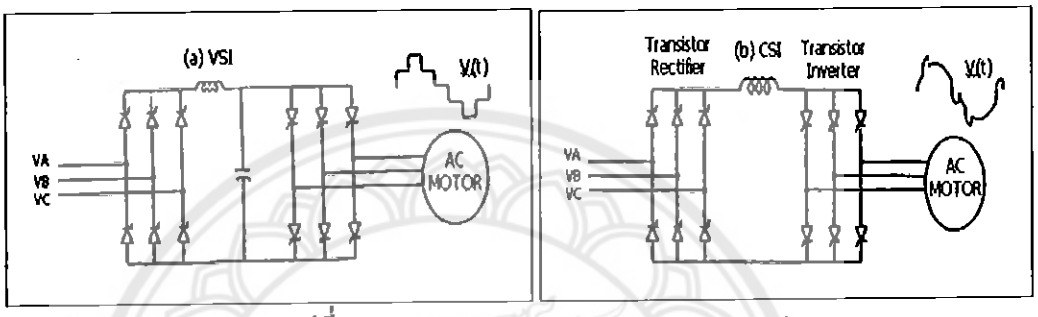


รูปที่ 2.22 แสดงรูปวงจร AC Drive แบบ PWM

AC Drive ส่วนใหญ่จะเป็น Inverter แบบ VSI โดยใช้เทคนิค PWM (Pulse–Width Modulation) ในการจัดการแรงดันกระแสสลับด้าน Output ของ Drive ให้เป็นความถี่ต่าง ๆ ในการควบคุมมอเตอร์ (ตามรูปที่ 3) โดย Inverter จะใช้ SCR หรือ Gate Turn Off Thyrister

(GTO Thyrister) หรือ Power Transistor ในการจัดการ นอกจากนั้นวงจร VSI PWM ยังมีคุณสมบัติเด่นด้านการประหยัดพลังงาน และความสามารถในการควบคุมความเร็วรอบได้อย่างหลากหลาย แต่ใน AC Drive ที่มีขนาดใหญ่นั้น วงจร Rectifier จะใช้ SCR แบบ 6 Pulse เป็นตัวควบคุม จากรูปเป็น VSI Drive ที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากนัก

สำหรับ CSI Drive เหมาะสำหรับโหลดที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบบ่อยครั้ง และเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม CSI Drive นั้นก็ยังคงต้องการการติดตั้ง Inductive เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินชั่วขณะ (Voltage Spike) ซึ่งก็จะทำให้ราคาสูงขึ้นไปอีก



รูปที่ 2.23 แสดง VSI Driveและ CSI Drive

2.7.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่อ Drive

โดยส่วนใหญ่คุณลักษณะของDriveโดยทั่วไปจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟ ฟ้าสูงโดยเฉพาะเรื่อง Voltage Sag เมื่อเกิดเหตุการณ์ Voltage Sag ขึ้นก็จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้ Drive หยุดการทำงานลงดังนี้

- ชุด Controller หรือชุด Voltage Protection ของ Drive สามารถตรวจจับสภาวะผิดปกติของแรงดัน (Voltage Sag) ได้และตัดไฟเลี้ยงด้าน Input ออกทันทีเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์ Power Electronics

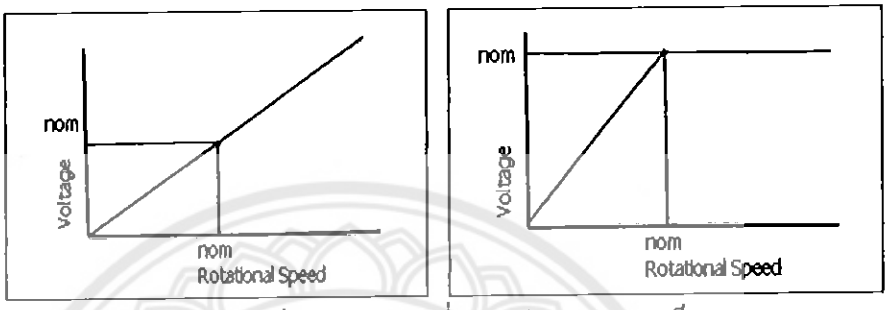
- ขณะเกิด Voltage Sag จะทำให้แรงดันกระแสตรงภายใน (DC Bus) ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด ส่งผลให้ชุด Controller เองหรือวงจรชุด PWM Inverter ทำงานผิดพลาด

- การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้าน Input ขณะเกิด Voltage Sag (AC Current) หรือกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดสูงเกิน ซึ่งเป็นกระแสชาร์จของ Capacitor ภายในตัว Drive (Over Currents Charging DC Capacitor) หลังจากแรงดันกลับสู่สภาวะ (Post-Sag) จะทำให้เกิดสภาวะกระแสสูงเกินจนทำให้ฟิวส์ป้องกันชุด Power Electronics ขาด และทำให้ Drive หยุดการทำงานลง

- เกิดสภาวะความเร็วรอบตกต่ำหรือทอร์กของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงมากจนไม่สามารถทำงาน ต่อไปได้ ความเร็วของมอเตอร์จะถูกควบคุมจากขนาดของแรงดัน และความถี่ที่ถูกส่งมาจาก Out Put ของตัว Drive ซึ่งเรียกว่า Voltage Source Converter (VSC) สำหรับ AC มอเตอร์นั้น

ความเร็วรอบจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่สเตเตอร์ที่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง โดยความเร็วของมอเตอร์และทอร์กจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่มีความสัมพันธ์กันตามรูปที่ 5 และตามสมการ

$$T_{\max} \approx \frac{V^2}{f^2} \qquad (18)$$



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่, แรงดัน และความเร็วรอบของ Drive

กรณีที่ถ้าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากันจะทำให้ค่าทอร์กมีค่าสูงมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีความต้องการเพิ่มความเร็ว จะทำให้ค่าทอร์กลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน

2.8) การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

เนื่องจากความเร็วรอบของอินดัคชั่นมอเตอร์ หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการซิงโครนัส-สปีดดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous speed (Ns)} = (120 * f) / P \qquad (22)$$

โดยกำหนดให้: f = ความถี่กระแสไฟฟ้า

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทางคือ เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) และเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (f)

ดังนั้นหากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่คือ 50 Hz. (หรือ 60 Hz.ในบางประเทศ เช่นอเมริกา) ความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ละตัวก็จะมีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางดังนี้

จำนวนขั้วแม่เหล็ก(P)	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 Hz. (RPM)	3000	1500	1000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 Hz. (RPM)	3600	1800	1200	900	720	600

ตารางที่ 4 ตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์

จากตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกันจะเห็นว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาที หรือจาก 1500 รอบต่อนาที ไปเป็น3000 รอบต่อนาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด ,ทำได้เฉพาะในขณะที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับความต้องการของงานในหลาย ๆประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบ คุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

2.9) การควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้า ไปเป็นพลังงานกล โดยนำพลังงานที่ได้นี้ไปทำ การขับเคลื่อนเครื่องจักร อื่นๆต่อไป ความเร็วของมอเตอร์ สามารถกำหนดได้โดย

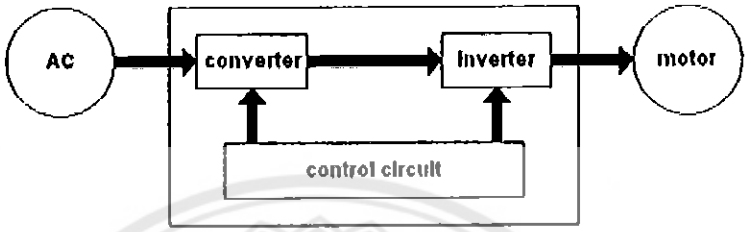
1. แรงบิดของโหลด
2. จำนวนขั้วของมอเตอร์
3. ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้กับมอเตอร์
4. แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วรอบ } N = \{[120 * \text{ความถี่ } f\,(Hz)] / \text{จำนวนขั้ว } P\} * (1-S) \qquad (23)$$

* โดยเทอม 1-S กำหนดโดยโหลด

จากสูตรข้างต้นจะพบว่า ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เปลี่ยนแปลงไปก็มีผลทำให้มอเตอร์ มีความเร็วเปลี่ยนแปลงได้ด้วย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ โดยให้แรงดันคงที่ จะมีผลทำให้เกิดฟลักส์ แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยน แรงดันควบคู่ไปกับความถี่ด้วย และการที่จะเปลี่ยนแปลง ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสามารถทำได้โดย การใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีหลักในการทำงานดังรูป

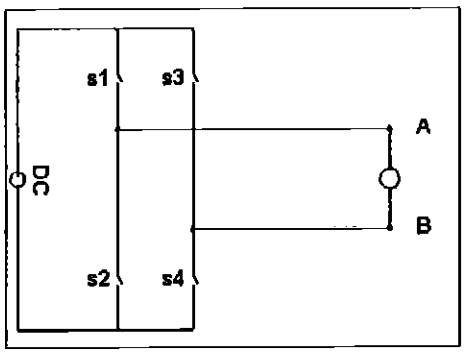


รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปข้างต้น แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้า กระแสสลับให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ต่อเป็นอินพุตเข้าไป ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแส ตรงนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเลือกความถี่ได้ เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ ให้มีความเร็วตามต้องการได้ หลักการทำงานของส่วนอินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

2.9.1 ส่วนของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยจะนำไฟฟ้ากระแสตรงต่อเข้ากับสวิตช์ 4 ตัว และทำการเปิด-ปิด สวิตช์ทั้ง 4 เป็นจังหวะทำให้ เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป

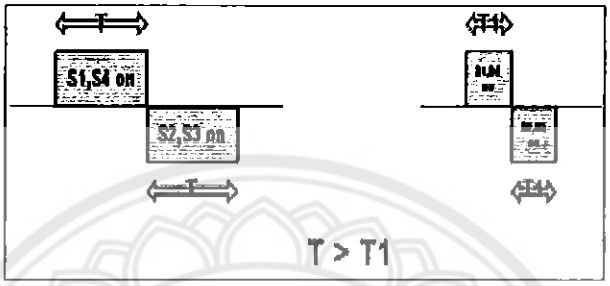


รูปที่ 2.26 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์

จากรูป

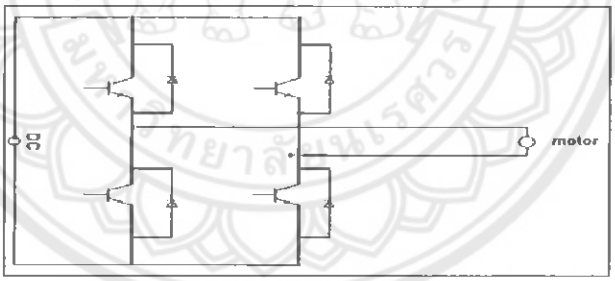
- เมื่อปิดสวิตช์ S1 และ S4 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด A ไปยังจุด B
- เมื่อปิดสวิตช์ S2 และ S3 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด B ไปยังจุด A

ดังนั้นถ้าเปิด-ปิดสวิตช์ S1 และ S4 สลับกับสวิตช์ S2 และ S3 จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นนั่นเอง โดยถ้ามีการควบคุมเวลา ในการเปิด-ปิดสวิตช์ ที่ต่างกัน ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.27 การเปิดปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

ในความเป็นจริงแล้ว อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์ เนื่องจากทรานซิสเตอร์สามารถ เปิด-ปิดได้ในความถี่ที่สูงกว่าสวิตช์ ดังรูป



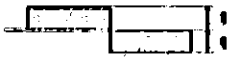
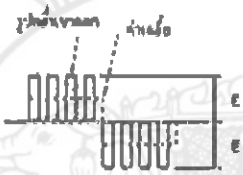
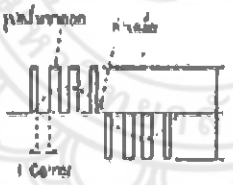
รูปที่ 2.28 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์

การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยการแปรรูปคลื่นของแรงดันสามารถ ทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM: Pulse Amplitude Modulation)
2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation)
   - เป็น Square Wave
   - เป็น Sine Wave

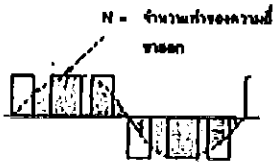
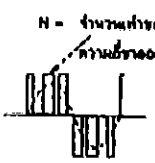
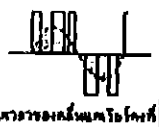
โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ดังตาราง

(E : แรงดันไฟตรง)

วิธีควบคุม	ความถี่ต่ำ (แรงดันต่ำ)	ความถี่สูง (แรงดันสูง)	จุดเด่น
วิธี PAM PULSE AMPLITUDE MODULATION			- เสียงมอเตอร์เบา - ประสิทธิภาพดี - ควบคุมขนาดแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ - ผลตอบช้า
วิธี PWM PULSE WIDTH MODULATION			- อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมความถี่และแรงดันได้ทั้งหมด - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์
วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปซายน์			- เดินมอเตอร์ได้เรียบที่ความเร็วต่ำ - อาร์โมนิคความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์

ตารางที่ 5 ตารางการแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์

วิธี PWM แบบ Sine Wave นั้นจะมีการเปิด-ปิดทรานซิสเตอร์หลายๆครั้งในหนึ่งไซเคิล และการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบ ดังตาราง

รูปแบบการควบคุม		ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	จุดเด่น
แบบซิงโครนัส (SYNCHRONEOUS)	ความถี่แคเรียร์ แปรตามความถี่ขาออก			• สามารถควบคุมฮาร์โมนิคได้ • แรงดันขาออกสูงสุดเกือบเท่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
แบบอะซิงโครนัส (ASYNCHRONEOUS)	ความถี่แคเรียร์คงที่ ไม่สัมพันธ์กับความถี่ขาออก			• เสียงรบกวนจากมอเตอร์ จะเป็นเสียงเดียว ไม่น่ารำคาญ
แบบผสม	ย่านความถี่ต่ำเป็น อะซิงโครนัส และ ย่านความถี่สูงเป็นซิงโครนัส			• สามารถควบคุมได้ดีทั้งย่านความถี่ต่ำตลอดจนถึงความถี่สูง

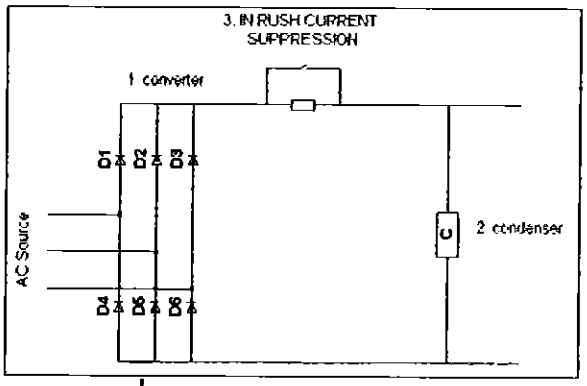
ตารางที่ 6 ตารางรูปแบบการควบคุม

2.9.2 ส่วนคอนเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วย

1. ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยกลุ่ม ของไดโอด

2. ส่วนของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่กรองกระแส (ลด Ripple) โดยใช้ตัวเก็บประจุ

3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช (In rush current suppression) ทำหน้าที่จำกัดกระแสขณะที่มีการเปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็นครั้งแรก ดังรูป



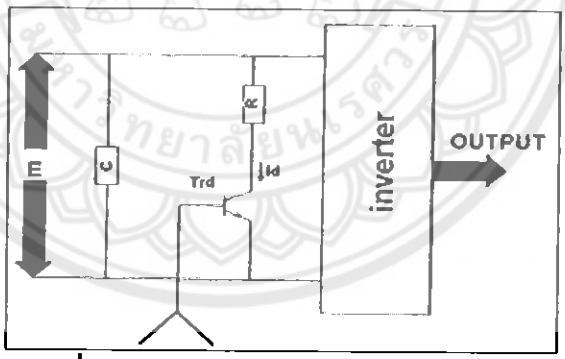
รูปที่ 2.29 วงจรจำกัดกระแสอินรัช

2.9.3 การควบคุมมอเตอร์

1. การสตาร์ท ทำได้โดยให้สัญญาณตั้งความถี่แก่อินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สตาร์ท มอเตอร์ก็จะผลิตแรงบิด จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะค่อย ๆ เพิ่มความถี่ขึ้นไปจนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์สูงกว่าแรงบิดของ โหลด มอเตอร์จึงเริ่มหมุน

2. การเร่งความเร็วและความเร็วคงที่ หลังจากสตาร์ทอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ ความถี่ขาออกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเพิ่มความถี่นี้คือเวลาการเร่งความเร็ว และเมื่อความ ถี่ขาออกเท่ากับความถี่ที่ต้องการ การเร่งความเร็วก็จบ อินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่การทำงานในช่วงเวลาการเดินเครื่อง ด้วยความเร็วคงที่

3. การลดความเร็ว ทำได้โดยตั้งความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่ขาออก อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงมาเรื่อย ๆ ตามช่วง เวลาการลดความเร็วที่ได้ตั้งไว้ ในขณะลดความถี่ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่ามากกว่าความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์จะทำงาน เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตไฟจ่ายกลับไปให้อินเวอร์เตอร์ (regeneration) ทำให้แรงดันไฟตรง (แรงดัน คร่อม คอนเดนเซอร์) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นภายในอินเวอร์เตอร์จะมีวงจรที่ทำหน้าที่รับพลังงานที่เกิดจากการ regeneration ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบรคมอเตอร์ วงจรนี้เรียกว่า วงจรเบรคคืนพลังงาน ดังรูป



รูปที่ 2.30 การลดความเร็วของอินเวอร์เตอร์

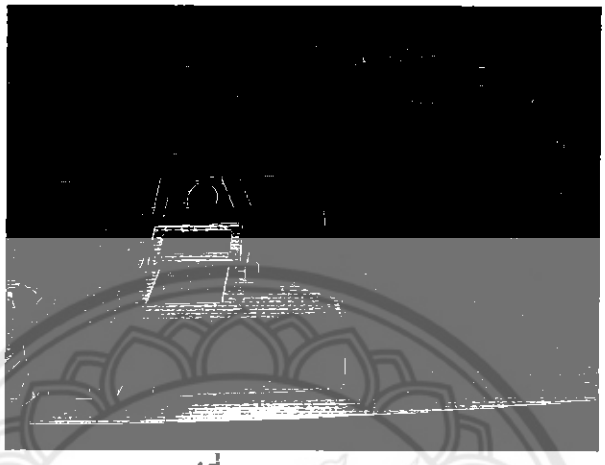
พลังงานที่เกิดจากการ regeneration จะป้อนกลับมาชาร์จประจุที่คอนเดนเซอร์ C ทำให้แรงดัน E มีค่าสูงขึ้น ถ้าแรงดันสูงกว่าค่าที่กำหนด ทรานซิสเตอร์ T ในวงจรเบรคจะทำงาน ทำให้มีกระแส I ไหล ผ่านตัวต้านทานเบรค R ทำให้ตัวต้านทานร้อน เป็นการเผาผลาญพลังงานที่เกิดจากการ regeneration และพลังงานที่เก็บสะสมใน คอนเดนเซอร์ C ก็จะถูกคายออกมาด้วย ทำให้แรงดัน E มีค่าลดลง เมื่อลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด ทรานซิสเตอร์ T จะหยุดทำงาน กระแสเบรคก็จะหยุดไหลในช่วงการลดความเร็วจะทำงานในลักษณะนี้หลาย ๆ ครั้ง ถ้าพลังงานมีค่าน้อย อัตราการใช้งานวงจรเบรคก็จะต่ำ บางครั้งอาจจะไม่ทำงานเลยก็มี อัตราการใช้งานวงจรเบรคนี้ ได้รับการ

ออกแบบโดยการพิจารณาในแง่ของการระบายความร้อนไว้ที่ 2-3 % เท่านั้น ถ้ามีการใช้เบรคบ่อย หรือใช้เบรคนานเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาการระบายความร้อนของตัวต้านทานและอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เสื่อมได้

4. การหยุด อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงจนถึงระดับหนึ่ง และจะผลิตไฟตรงเข้าไปในมอเตอร์เพื่อทำงานเป็นเบรค จนมอเตอร์หยุด เรียกว่า การเบรคด้วยไฟตรง แนวคิดในการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ ถ้าคิดว่าอินเวอร์เตอร์เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จ่ายพลังงานเพื่อขับมอเตอร์ ก็จะคิกว่ายิ่งเลือกอินเวอร์เตอร์ ขนาดยิ่งใหญ่เท่าใดก็ยิ่งดี สามารถติดตั้งสวิทช์ ที่เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปิดปิดจ่ายกระแส ให้มอเตอร์ได้ทันที เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟ แต่แนวความคิดนี้ไม่ถูกต้องเนื่องจาก ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง และอินเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่ เกินความจำเป็น

บทที่ 3
หลักการดำเนินงาน

3.1 อุปกรณ์และหลักการทำงาน

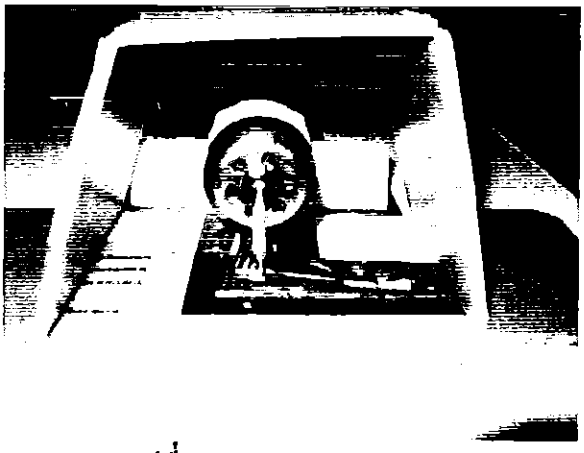


รูปที่3.1 ชุดการทดสอบ

3.1.1 เครื่องควบคุมมอเตอร์ DC Brushless มีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

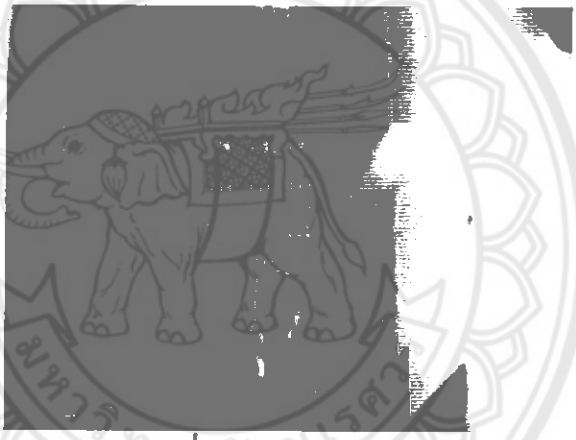
รูปที่3.2 เครื่องควบคุมมอเตอร์ DC Brushless

- DC Brushless motor คือมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน มีแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์และขดลวดที่สเตเตอร์แม่เหล็กถาวรจะสร้างฟลักซ์ที่โรเตอร์ ส่วนขดลวดที่สเตเตอร์จะสร้างขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ จะถูกดึงดูดด้วยเฟสจากสเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนด้วยการจัดลำดับการจ่ายไฟให้กับเฟสของสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์จะถูกสร้างขึ้นและคง อยู่ด้วยหลักการที่ว่าโรเตอร์หมุนตามสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์



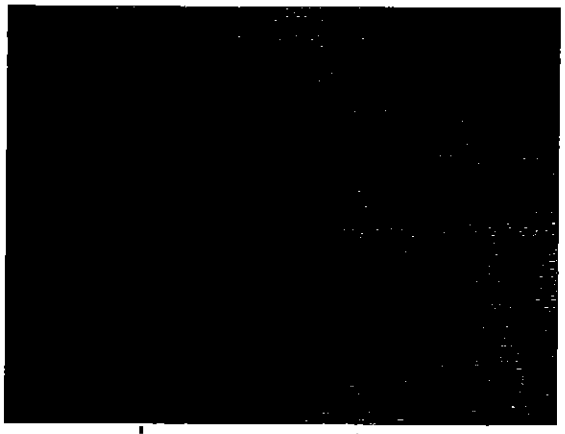
รูปที่3.3 DC Brushless motor

- **ชุด Drive Motor** เป็นชุดไดร์ฟสามเฟส



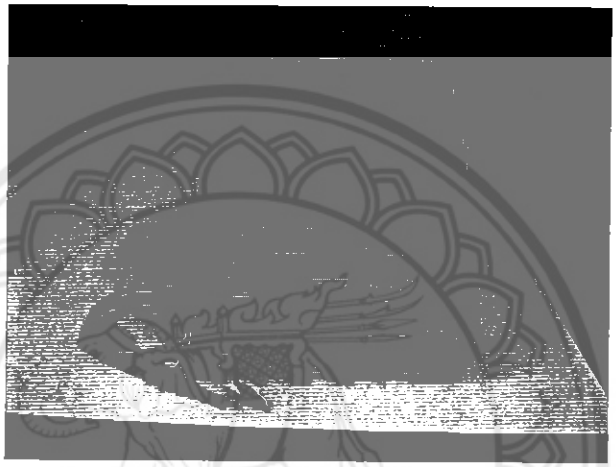
รูปที่3.4 ชุด Drive Motor

- **ระบบ Sensor** ทำหน้าที่จับความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบ
- **ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์** ทำหน้าที่ไว้ปรับความเร็วมอเตอร์ตามความต้องการ



รูปที่3.5 ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์

3.1.2 ออสซิลโลสโคป (Cathode ray oscilloscope : CRO) หมายถึง ออสซิลโลสโคปใช้หลอดรังสีแคโทด สโคปเป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดงรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ ออกมาเป็นภาพปรากฏบนจอหลอดภาพให้เห็นได้ เช่น การวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า(ที่เป็นไฟ AC หรือ DC) การวัดความถี่ของ สัญญาณ การวัดเฟสของสัญญาณ และรวมถึงการวัดสัญญาณพัลส์การอ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะเป็น พีค-ทู-พีค หรือค่าพีคและค่าเวลาเป็นวินาที หน้าที่หลักของออสซิลโลสโคป คือ1. รับสัญญาณ 2. แสดงภาพของสัญญาณที่รับ 3. วิเคราะห์สัญญาณ



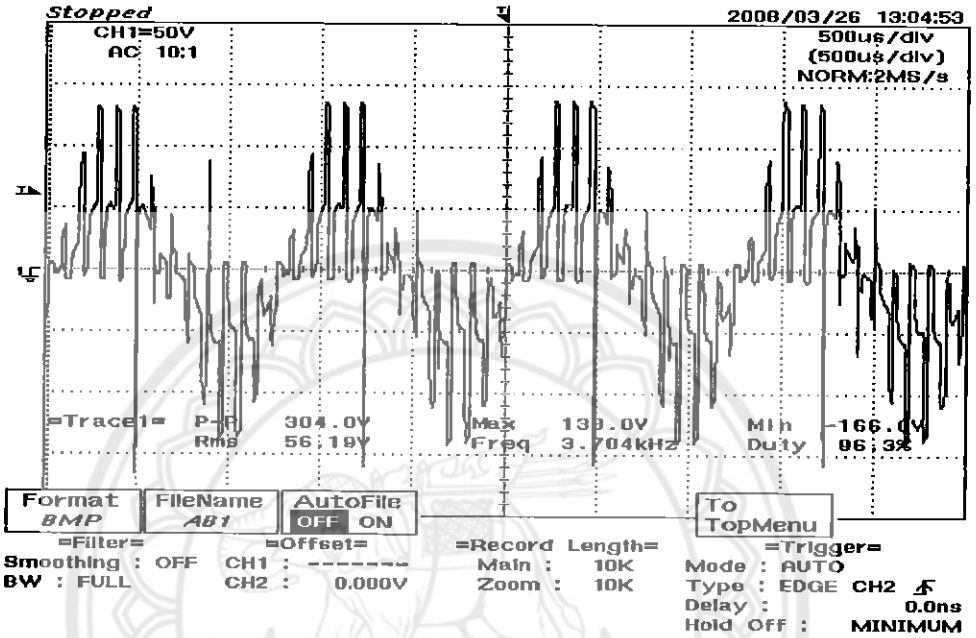
รูปที่3.6 ออสซิลโลสโคป

รูปที่3.7 สายโพรบ

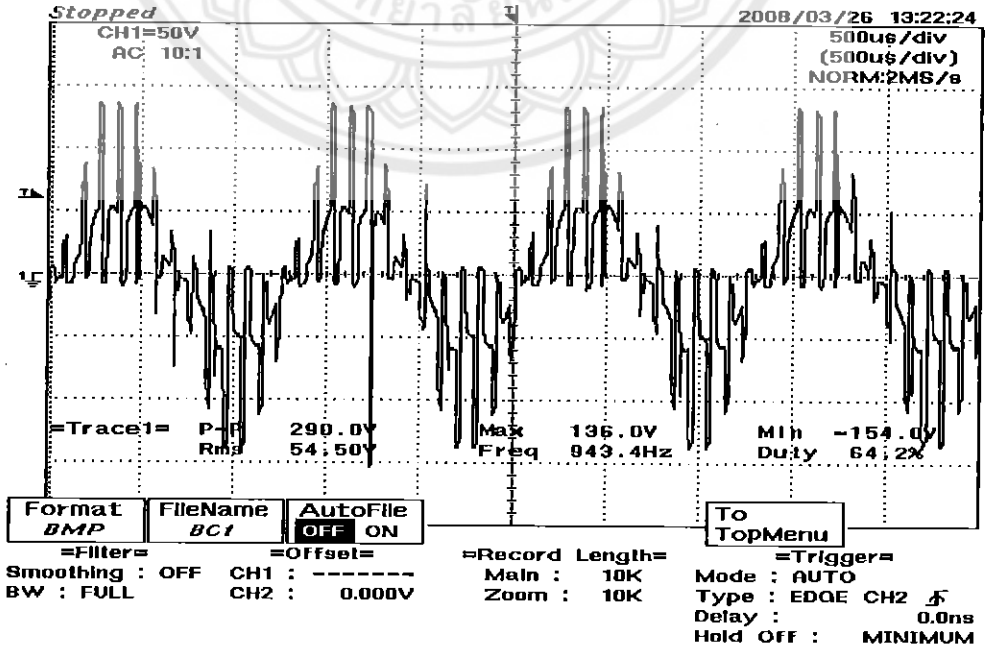
3.2 ลำดับขั้นการทดลอง

3.2.1 วัดค่าแรงดัน V(ab), V(bc), V(ac)

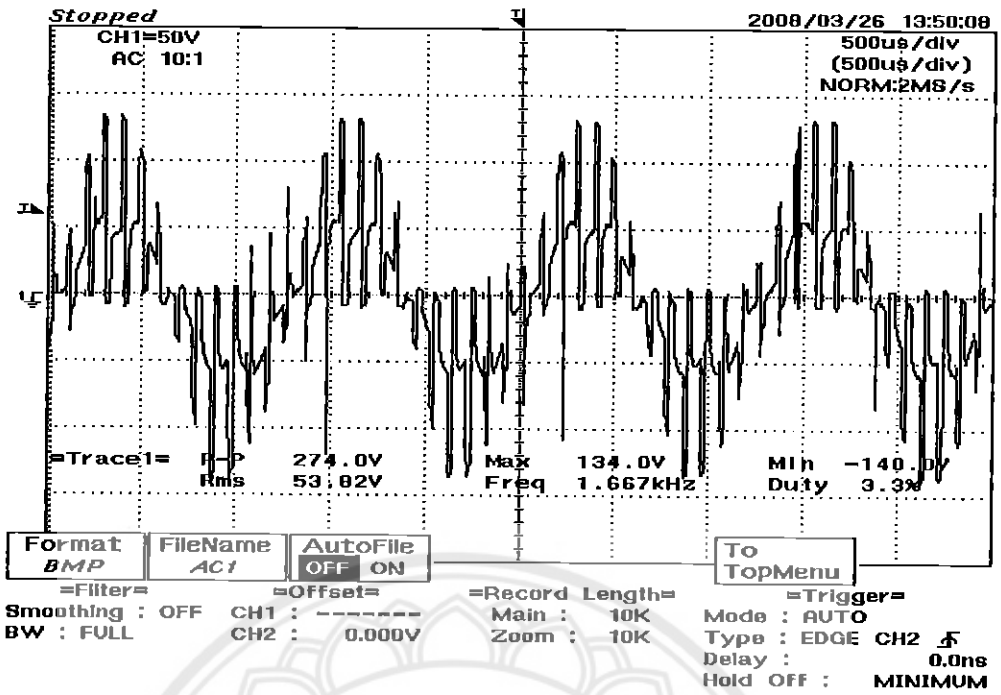
1. ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 8,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่3.8 แรงดันV(ab)

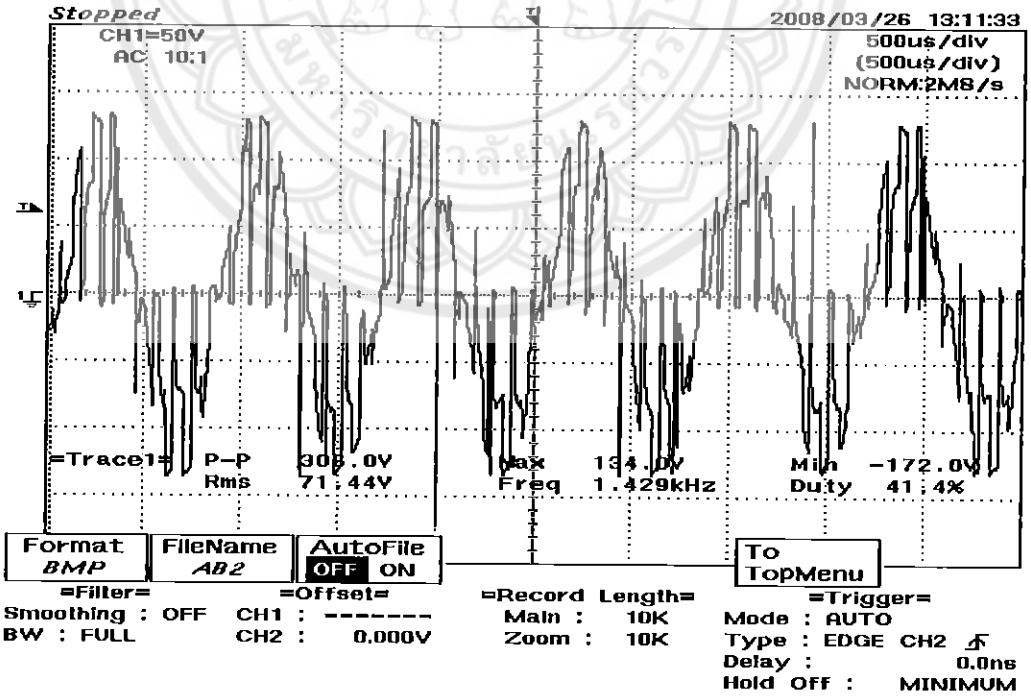


รูปที่3.9 แรงดันV(bc)

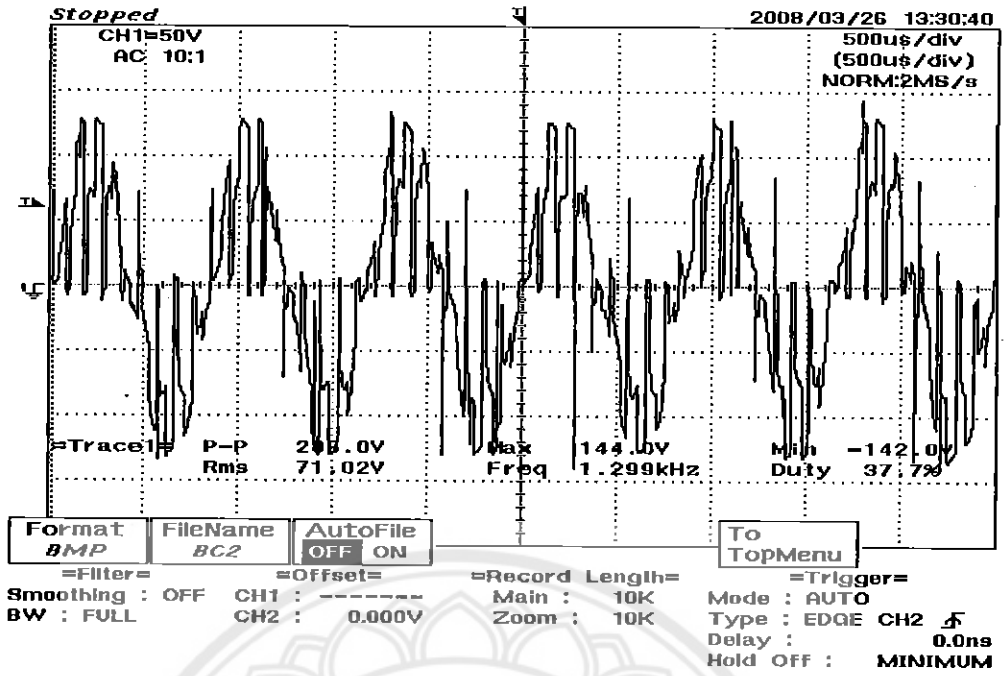


รูปที่3.10 แรงดันV(ac)

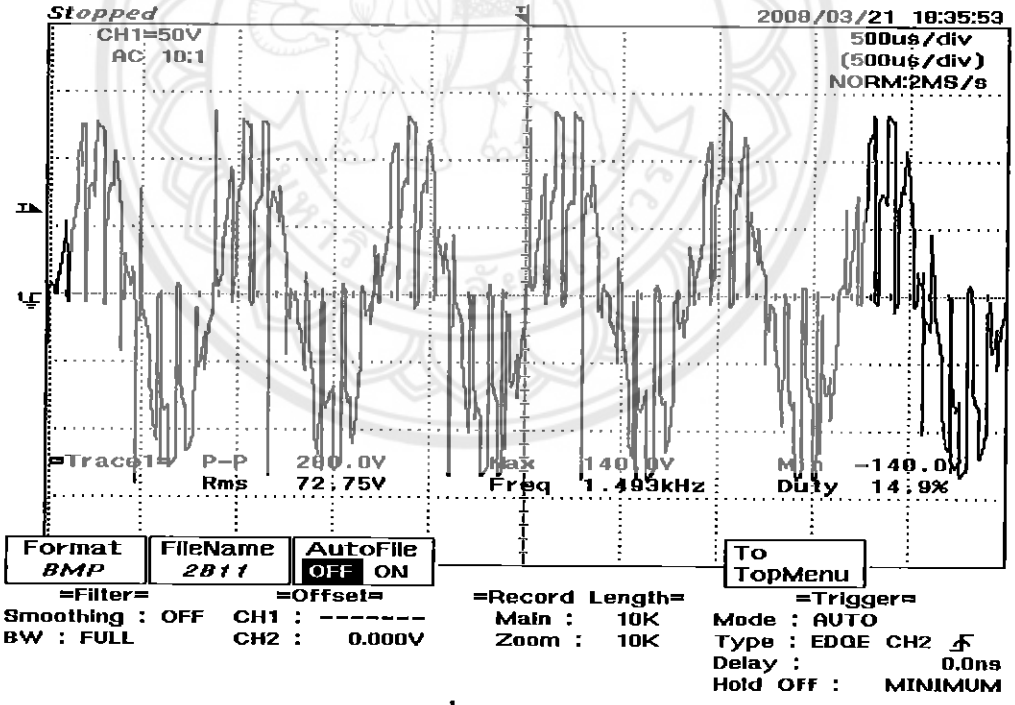
2.ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 12,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่11 แรงดันV(ab)

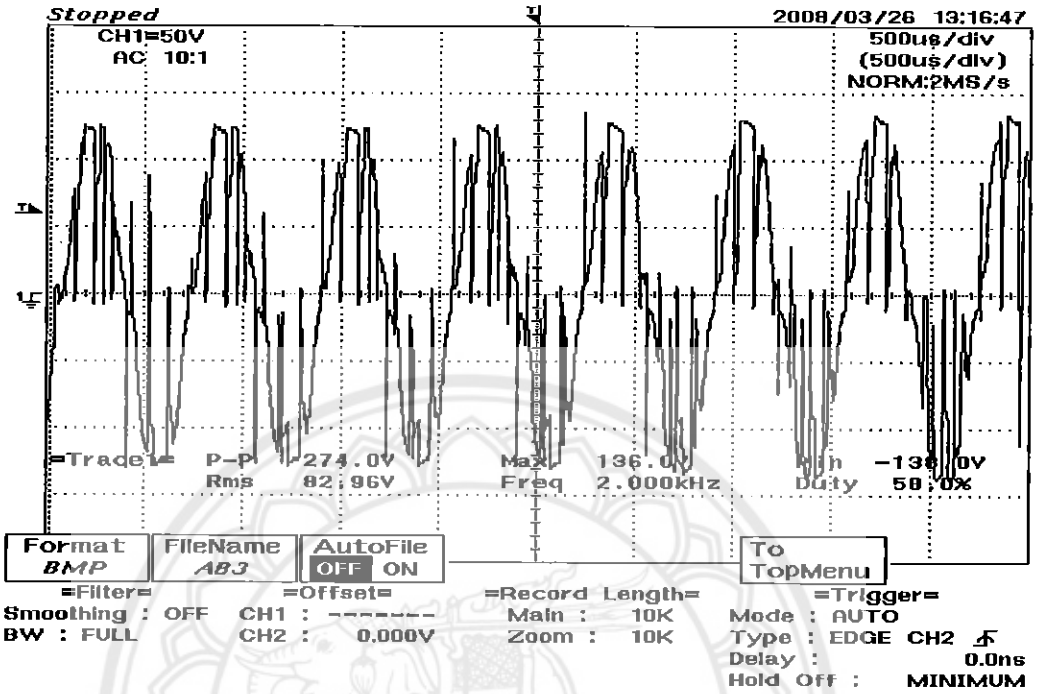


รูปที่12 แรงดันV(bc)

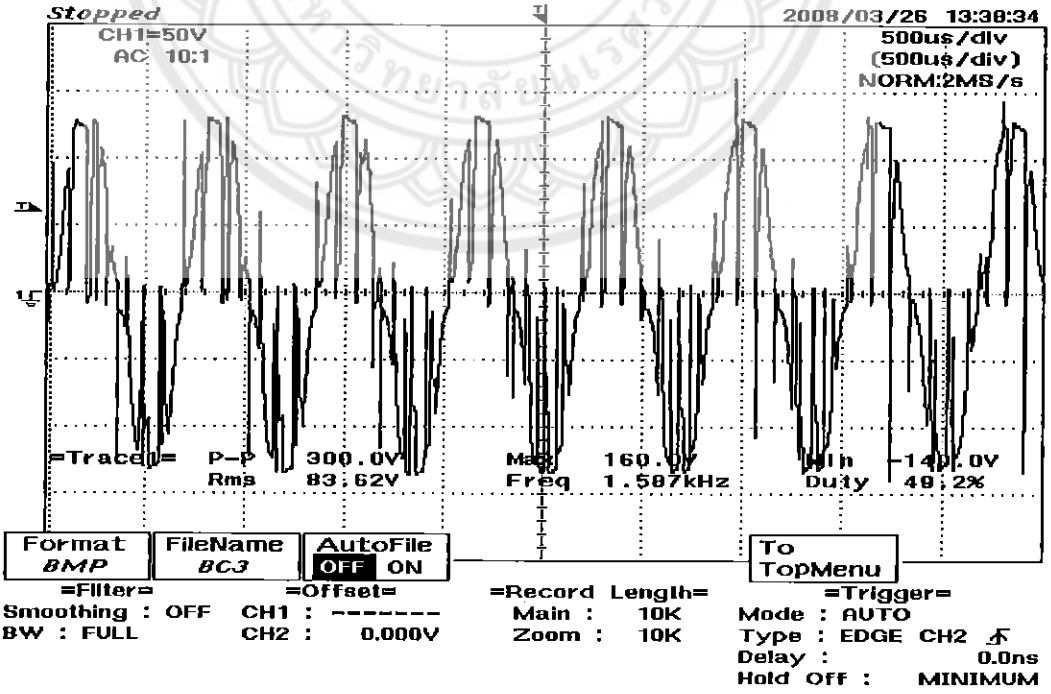


รูปที่13 แรงดันV(ac)

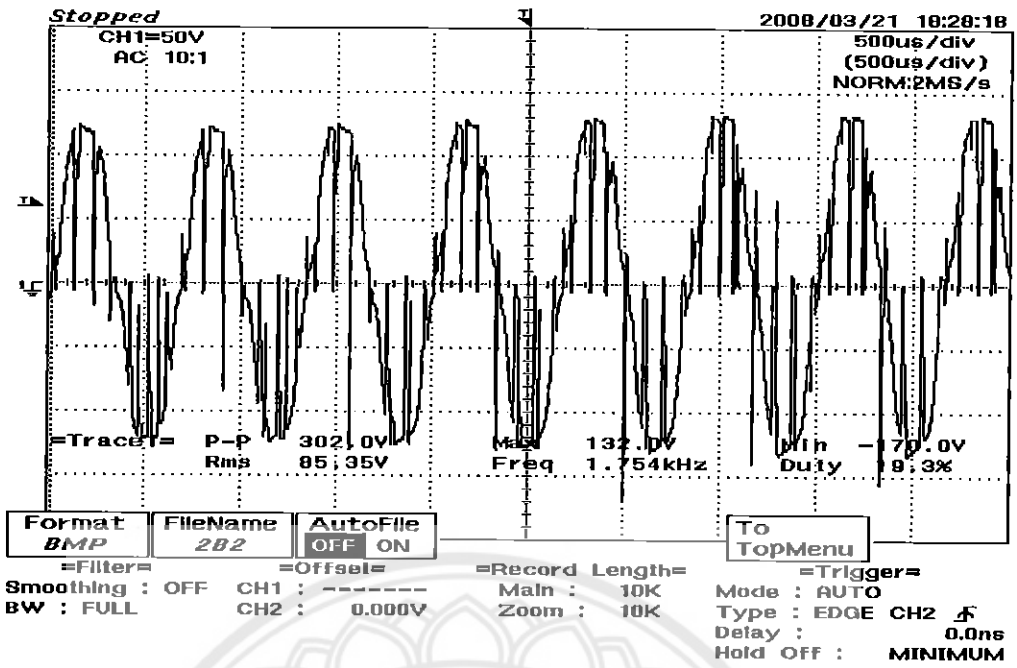
3.ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 15,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่14 แรงดันV(ab)



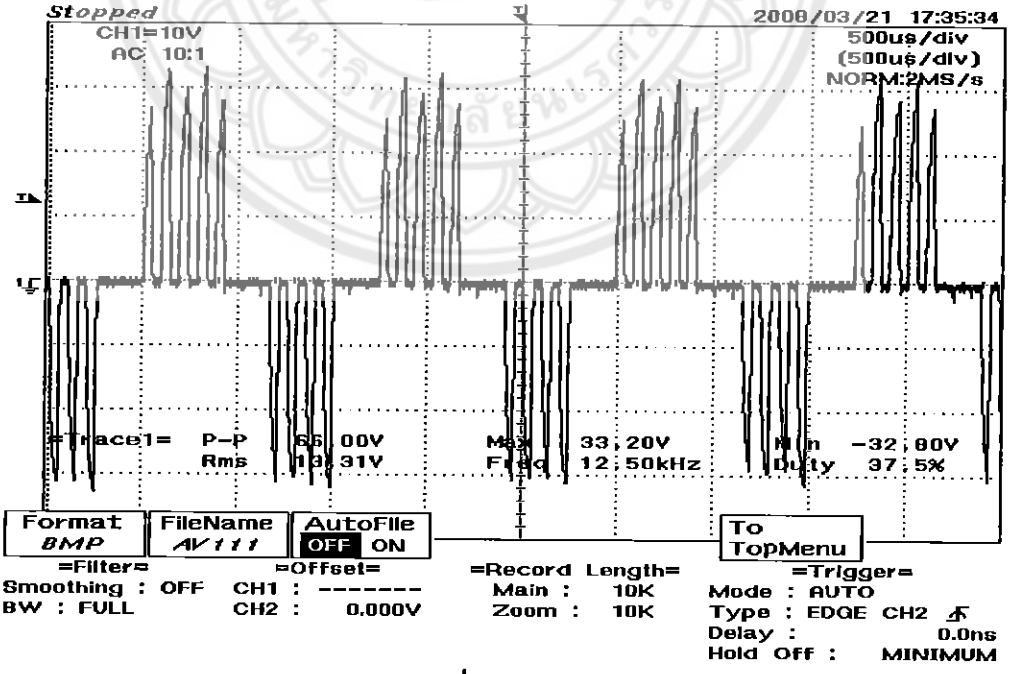
รูปที่15 แรงดันV(bc)



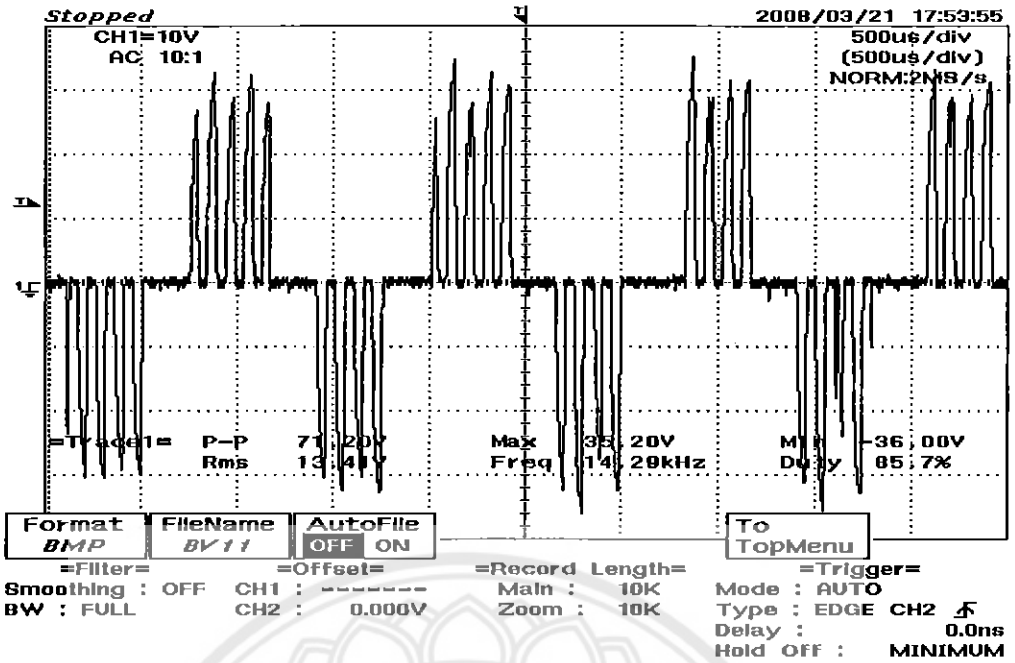
รูปที่16 แรงดันV(ac)

3.2.2 วัดค่า I(a),I(b),I(c)

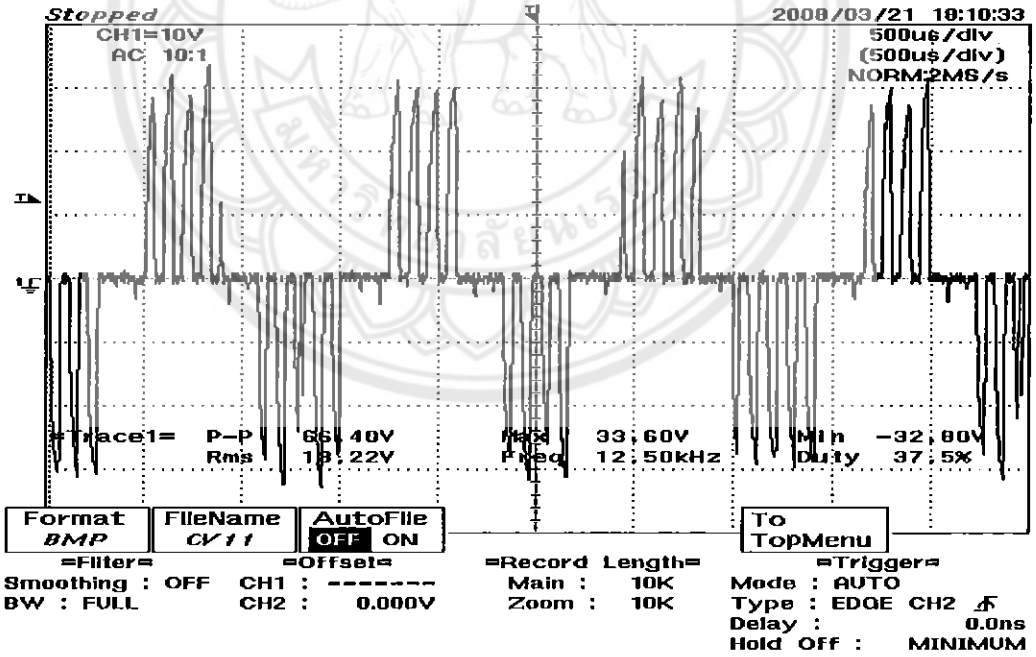
1. ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 8,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่17 กระแสI(a)

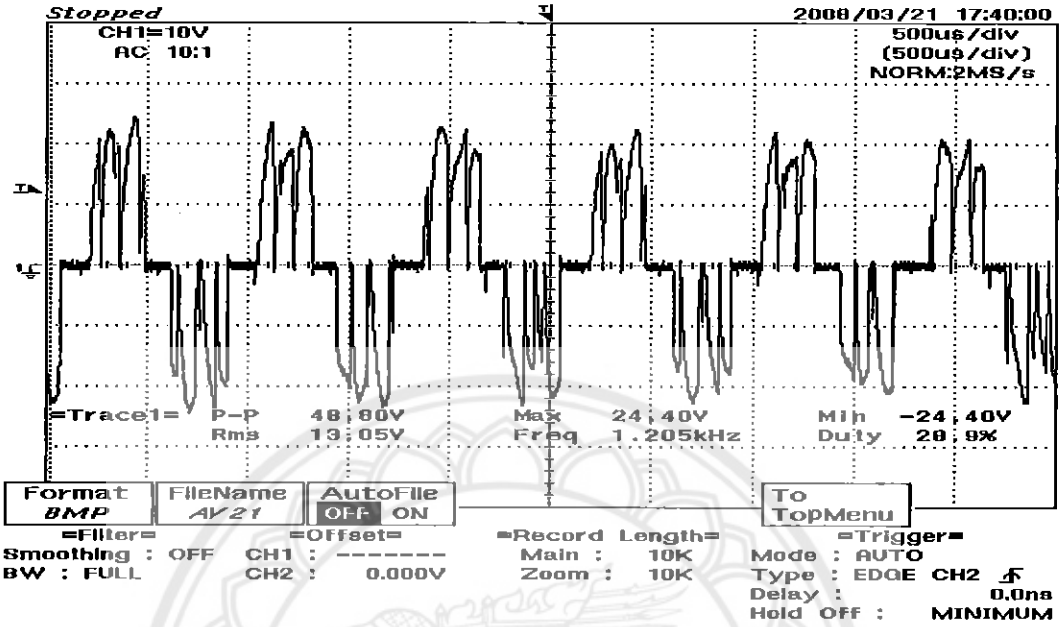


รูปที่18 กระแสI(b)

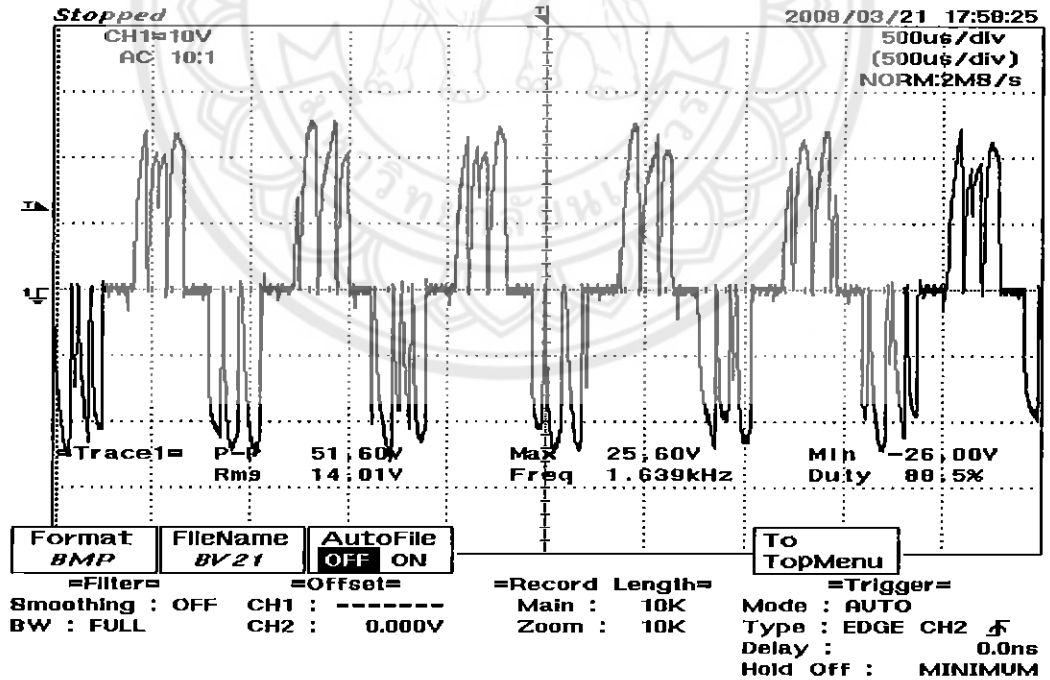


รูปที่19 กระแสI(c)

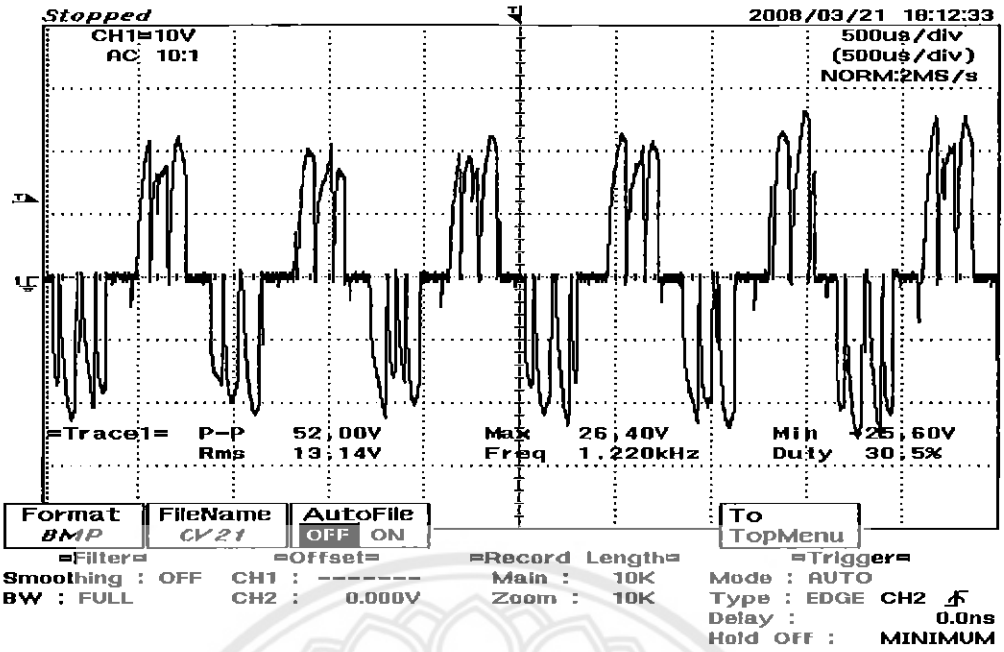
2.ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 12,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่20 กระแสI(a)

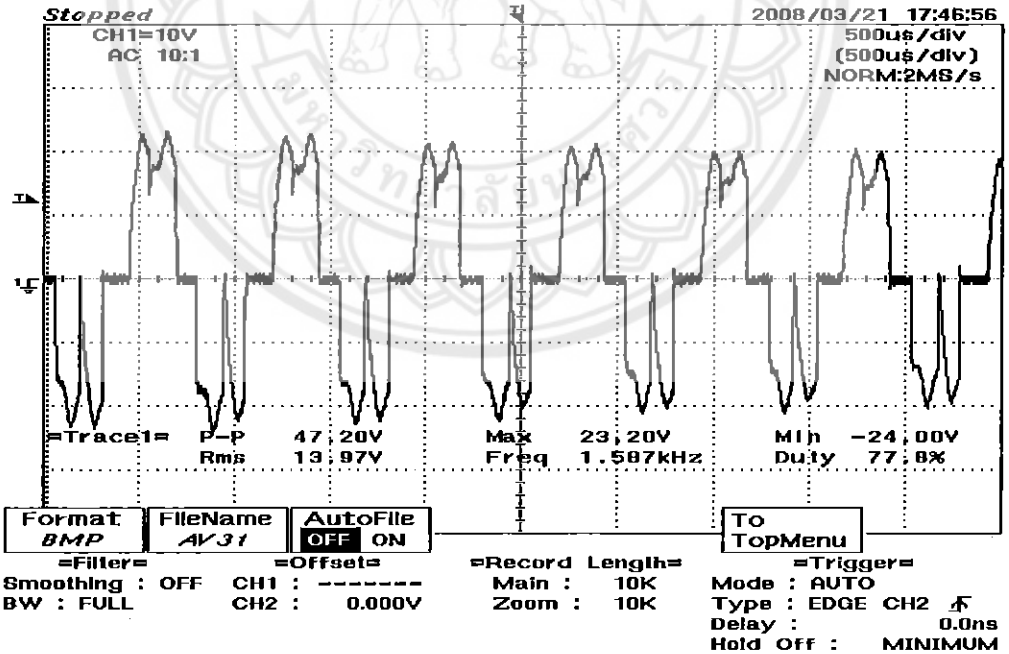


รูปที่21 กระแสI(b)

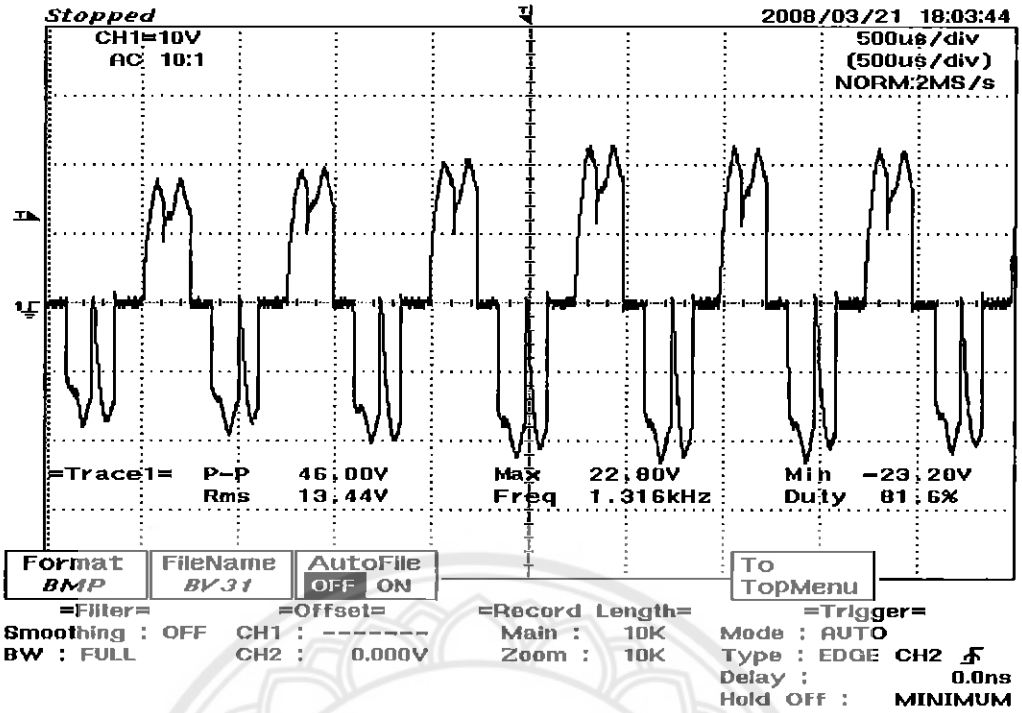


รูปที่22 กระแสI(c)

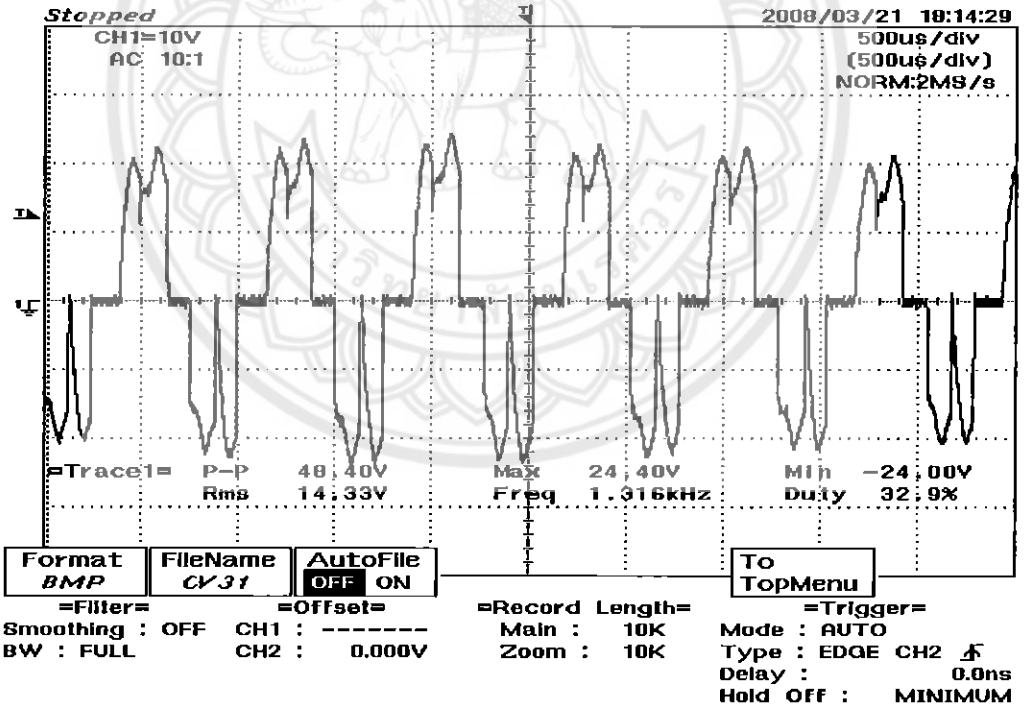
3.ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปที่ 15,000 รอบ/นาที แล้วจับสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ได้



รูปที่23 กระแสI(a)



รูปที่24 กระแสI(b)



รูปที่25 กระแสI(c)

3.2.3 โปรแกรม Matlab

นำค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้ตาม ข้อ 3.2.1 , 3.2.2 มาหาค่าลำดับฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรม Matlab โดยมี Code Matlab ดังต่อไปนี้

```
>> move1[ข้อมูลที่ได้จากกราฟตาม scope];
>> X=move1;
>> H=abs(fft(X));
>> stem(H(0:30));
>>ylabel('Amplitude spectrum[X(f)]');Xlabel('Frequency(f)');
```

3.2.4 สรุปผล

บทที่ 4

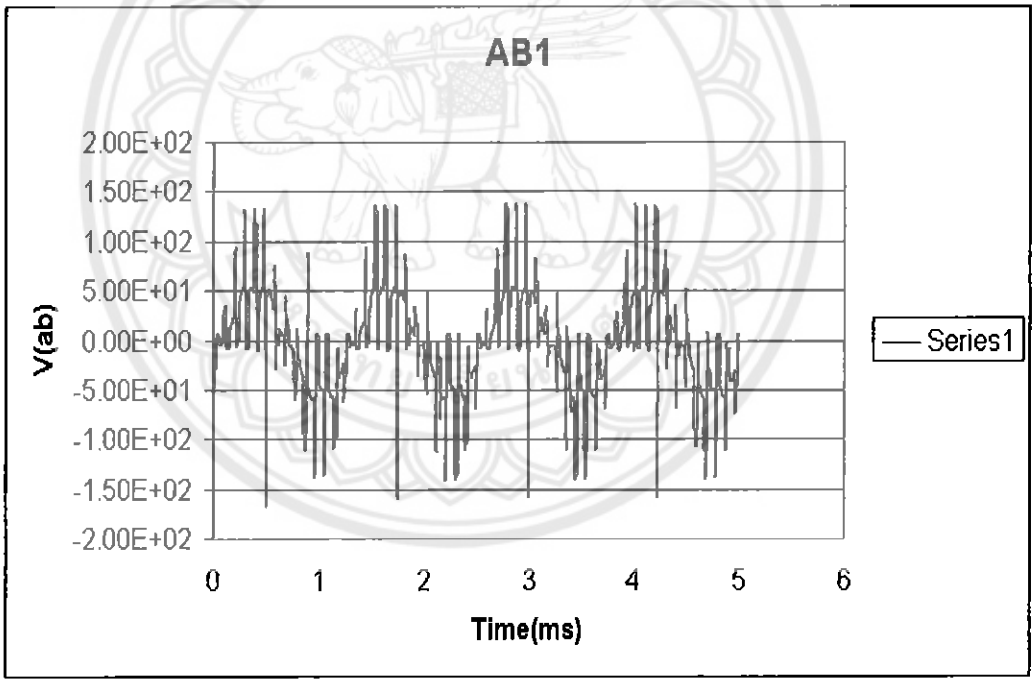
ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะทำการเกี่ยวกับการ drive motor และนำข้อมูลจากการไดร์ฟจริงมาวิเคราะห์หาค่าลำดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบที่ทำการไดร์ฟ คือ ไดร์ฟที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000รอบ/นาที 12,000รอบ/นาที และ 15,000รอบ/นาที

การทดสอบ

4.1 ค่าแรงดันเฟสของการทดสอบความเร็วมอเตอร์ในแต่ละแบบ

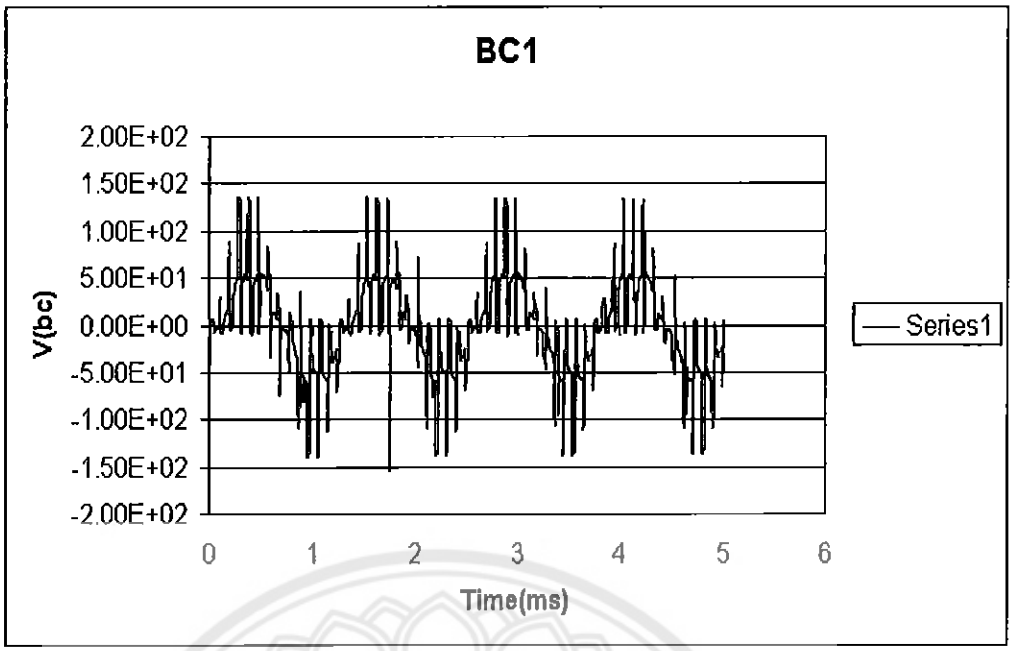
กรณีที่ 1 ทอสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที



รูปที่4.1 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดัน V(ab) มีค่า P-P = 30.40 V Max =13.30V Min = -16.60V

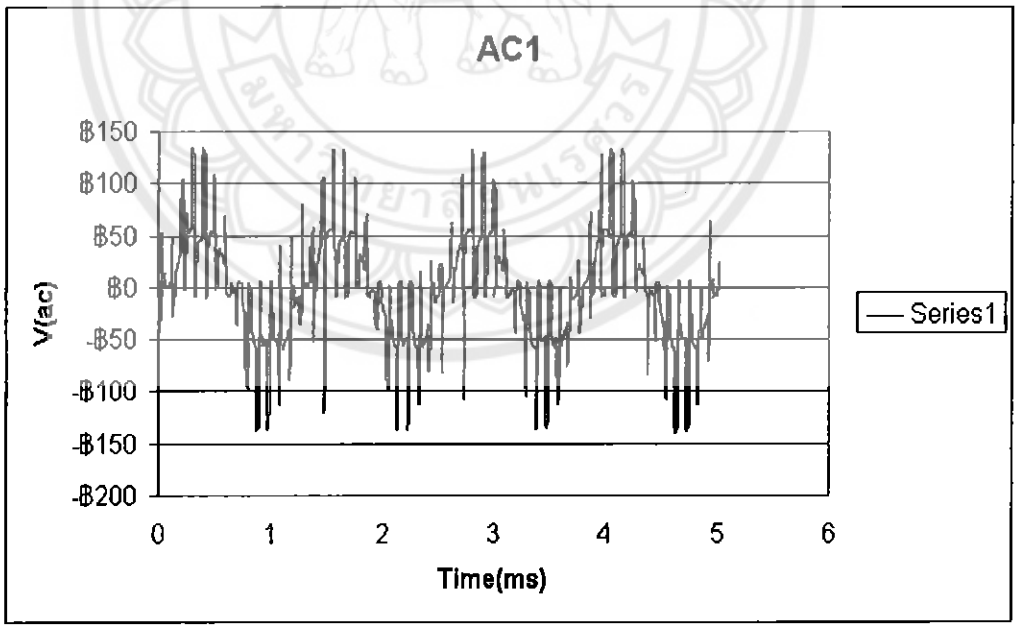
Rms =5.619V Freq =3.704kHz



รูปที่4.2 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดัน V(bc) มีค่า P-P = 29.00 V Max =13.60V Min = -15.40V

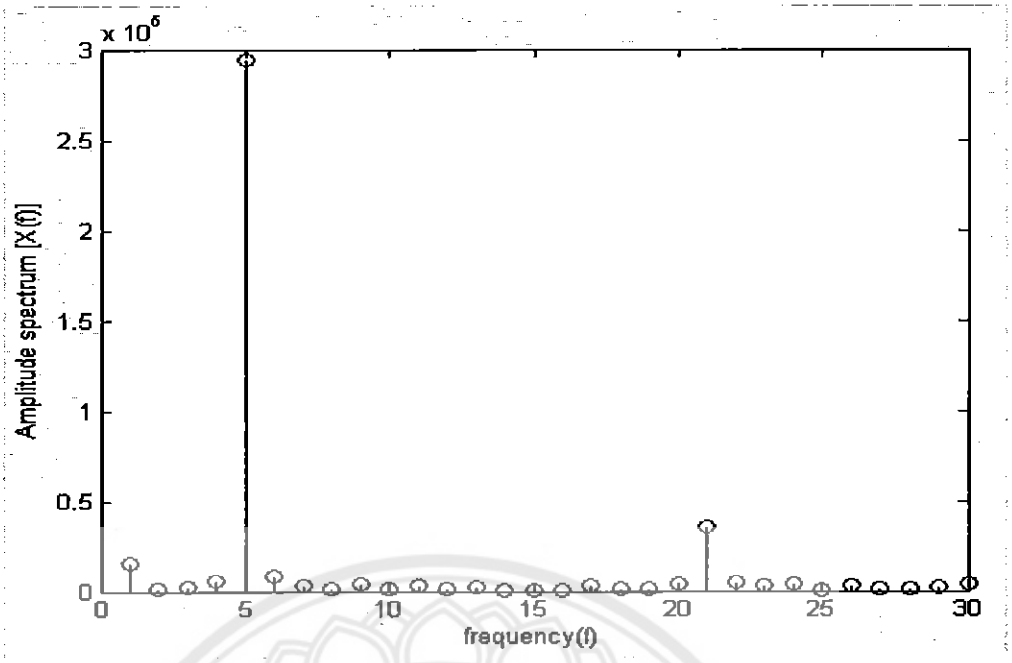
Rms =5.450V Freq =1.590kHz



รูปที่4.3 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

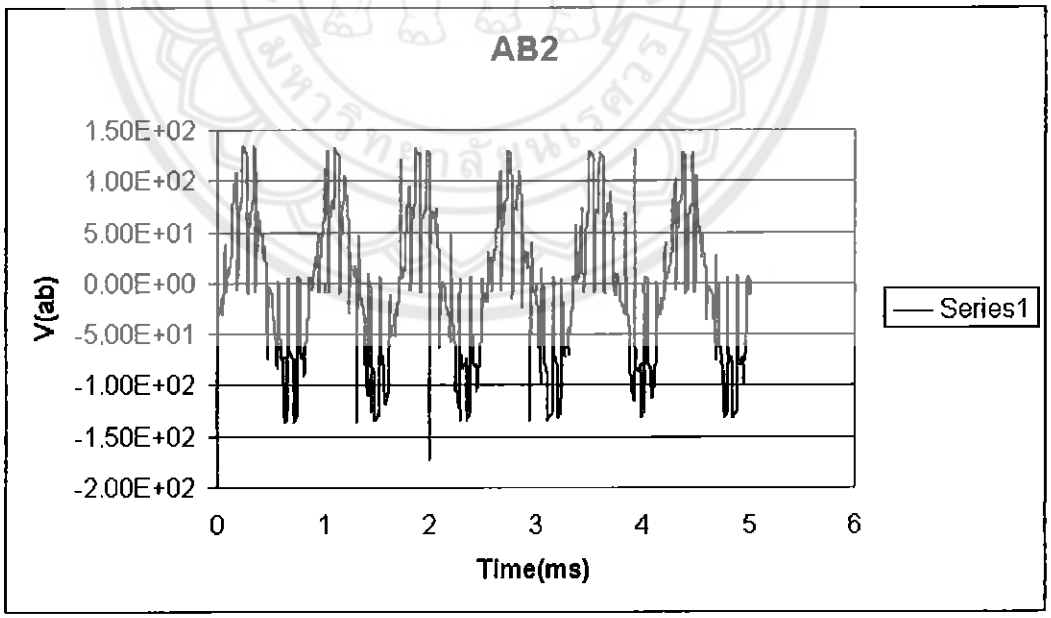
จากรูปแรงดัน V(ac) มีค่า P-P = 27.40 V Max =13.40V Min = -14.00V

Rms =5.382V Freq =1.667kHz



รูปที่4.4 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

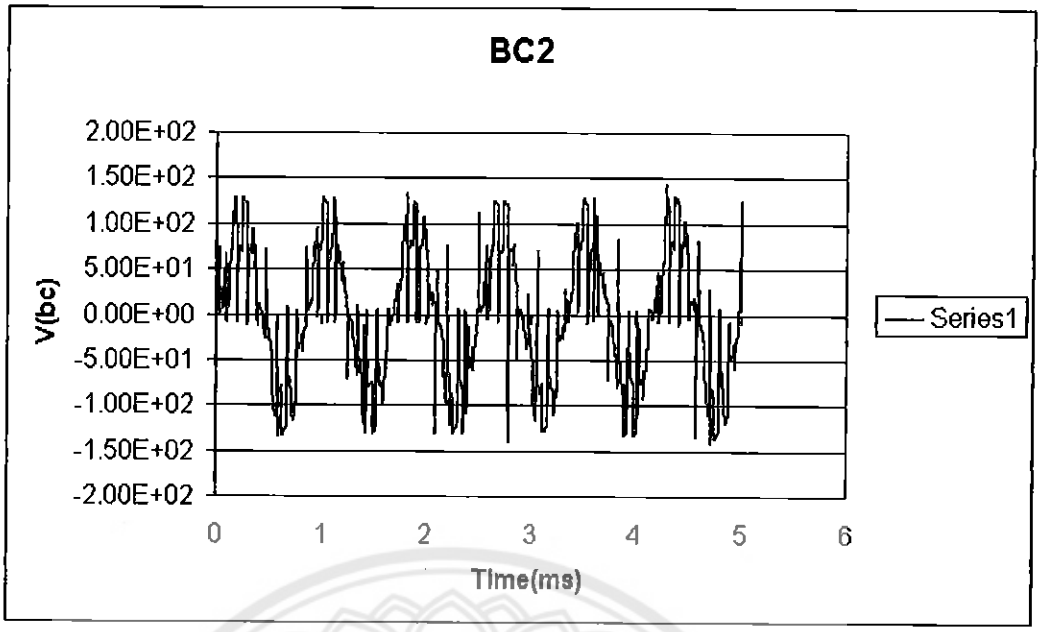
กรณีที่ 2 ทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที



รูปที่4.5 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดัน V(ab) มีค่า P-P = 30.30 V Max =13.40V Min = -17.20V

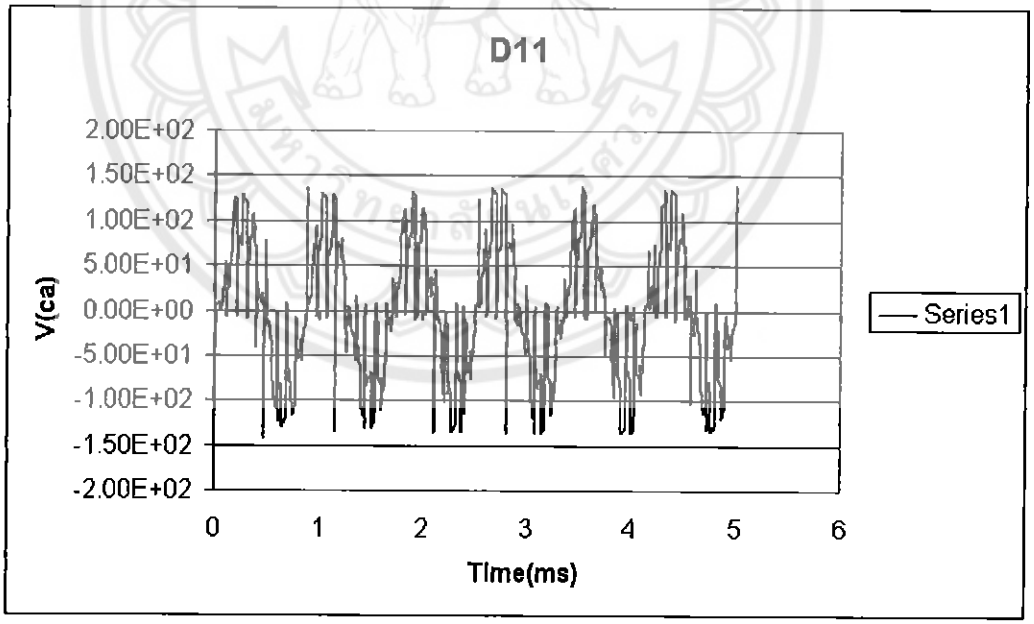
Rms =7.144V Freq =1.429kHz



รูปที่4.6 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดัน V(bc) มีค่า P-P = 28.60 V Max =14.40V Min = -14.20V

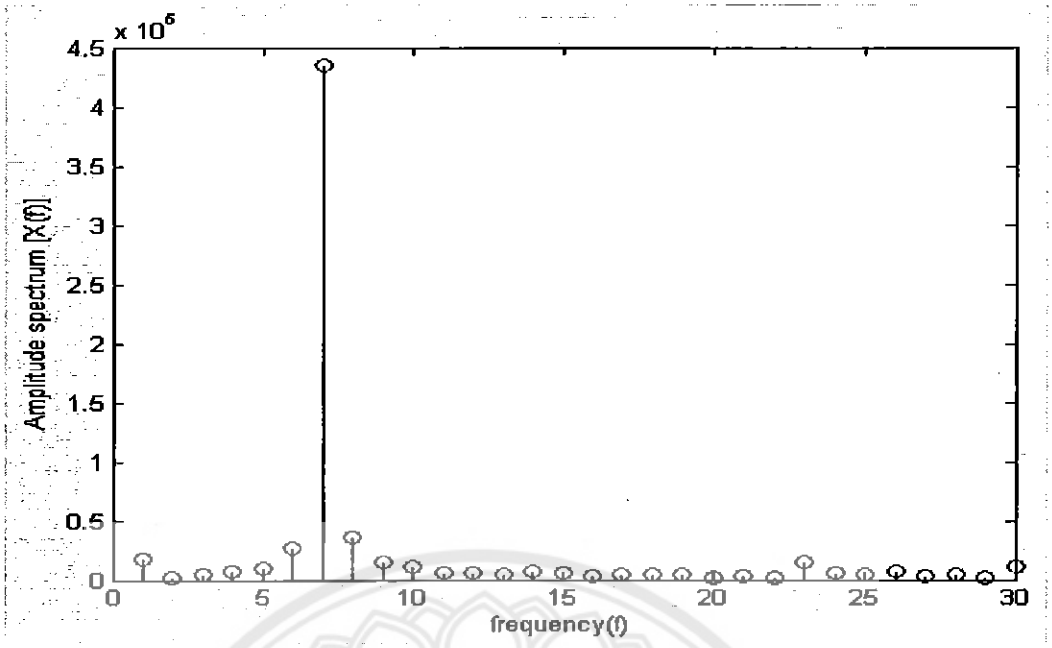
Rms =7.102V Freq =1.299kHz



รูปที่4.7 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

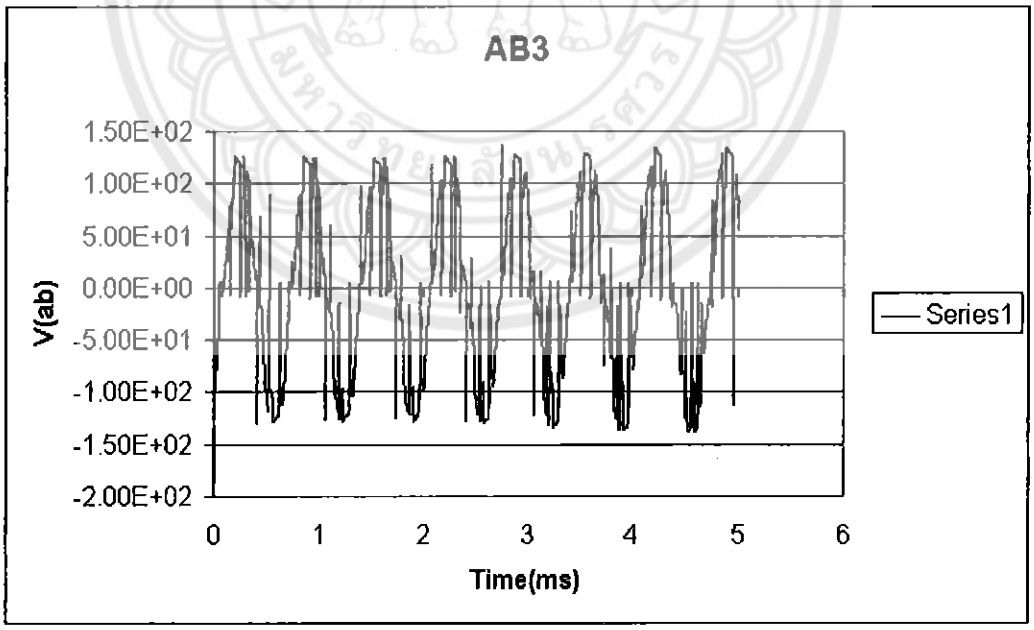
จากรูปแรงดัน V(ac) มีค่า P-P = 28.00 V Max =14.00V Min = -14.00V

Rms =7.275V Freq =1.493kHz



รูปที่4.8 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันเมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

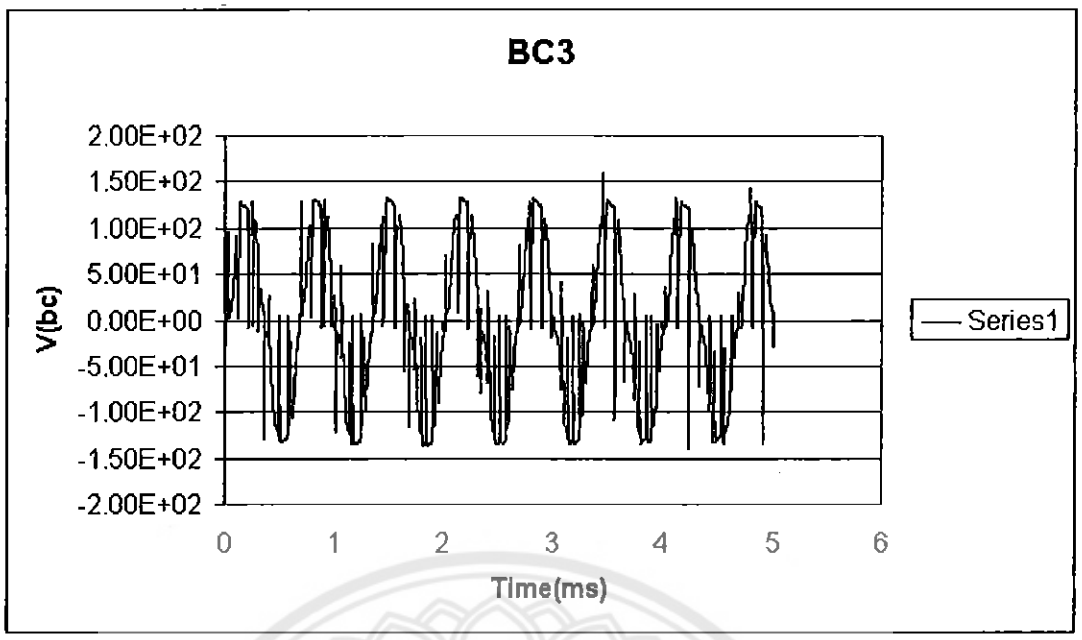
กรณีที่ 3 ทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที



รูปที่4.9 แรงดัน V(ab) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดันV(ab) มีค่า P-P = 27.40 V Max =13.60V Min = -13.80V

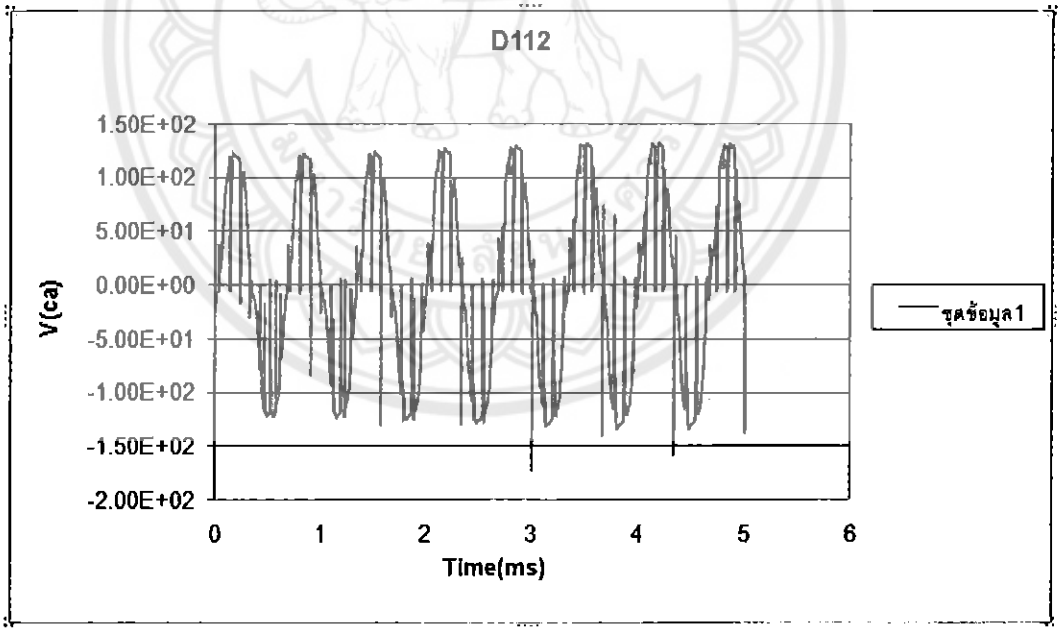
Rms =8.296V Freq =2.000kHz



รูปที่4.10 แรงดัน V(bc) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 **รอบ/นาที**

จากรูปแรงดัน V(bc) มีค่า P-P = 30.00 V Max =16.00V Min = **-14.90V**

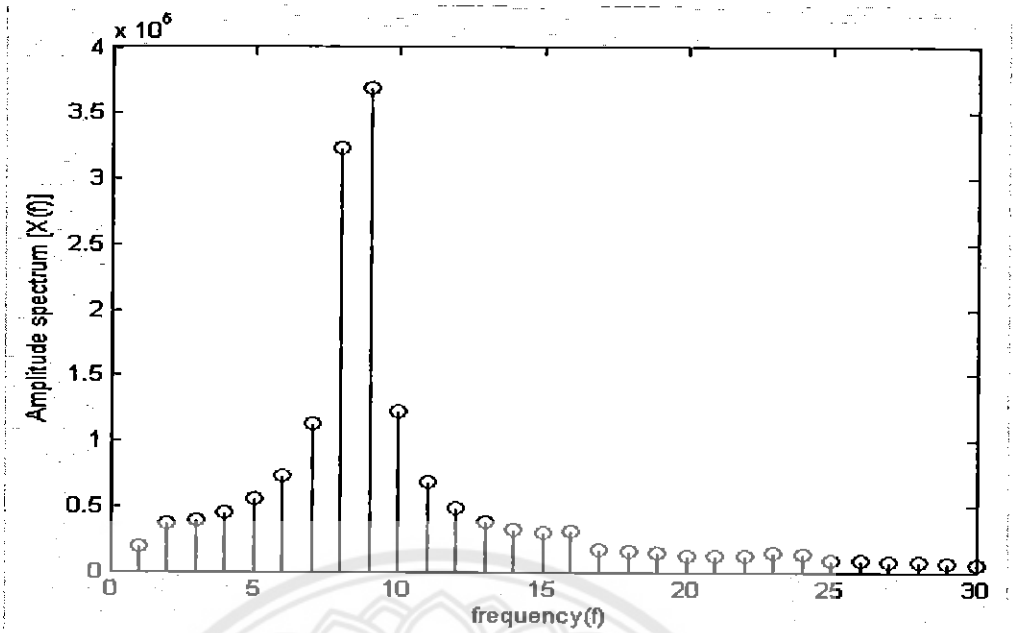
Rms =8.362V Freq =1.587kHz



รูปที่4.11 แรงดัน V(ac) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

จากรูปแรงดัน V(ac) มีค่า P-P = 30.20 V Max =13.20V Min = -17.00V

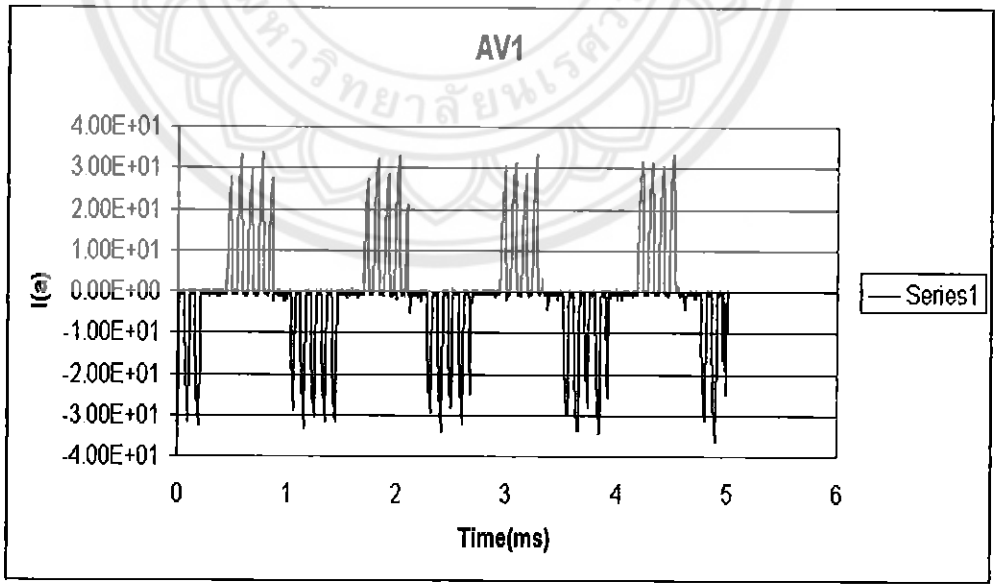
Rms =8.535V Freq =1.754kHz



รูปที่4.12 ลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันเมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์ เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

4.2 ค่ากระแสของการทดสอบความเร็วมอเตอร์ในแต่ละแบบ

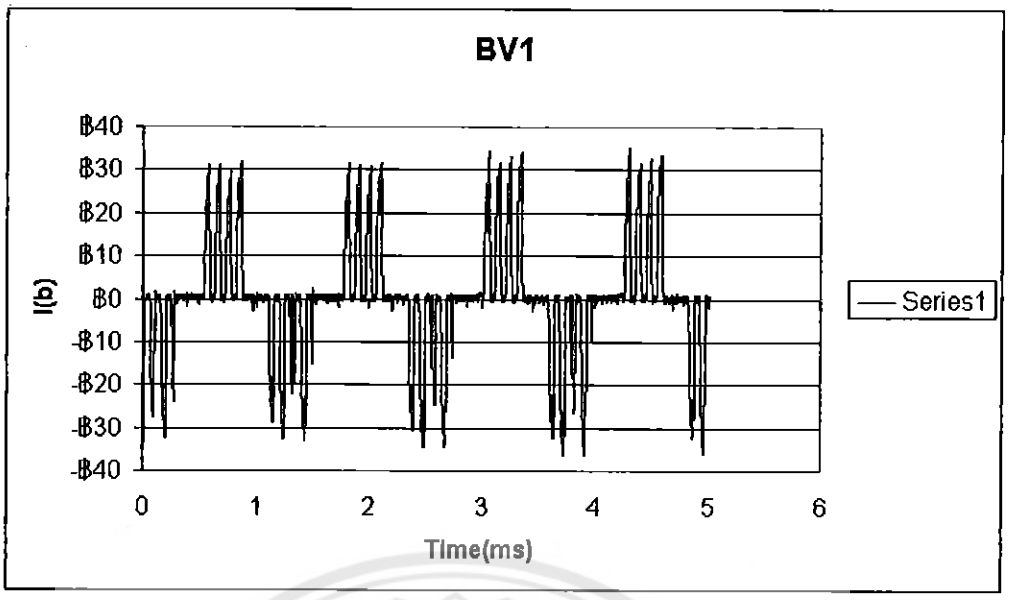
กรณีที่ 1 ทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที



รูปที่4.13 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(a) มีค่า P-P = 6.600 A Max =3.320A Min = -3.280A

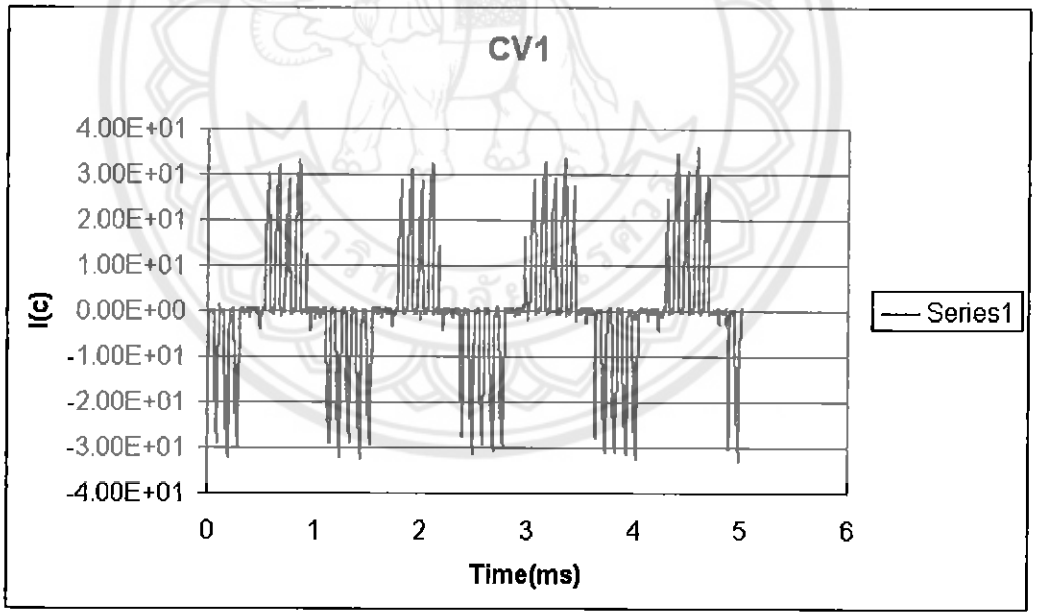
Rms =1.331A Freq =12.50kHz



รูปที่4.14 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(b) มีค่า P-P = 7.120 A Max =3.520A Min = -3.600A

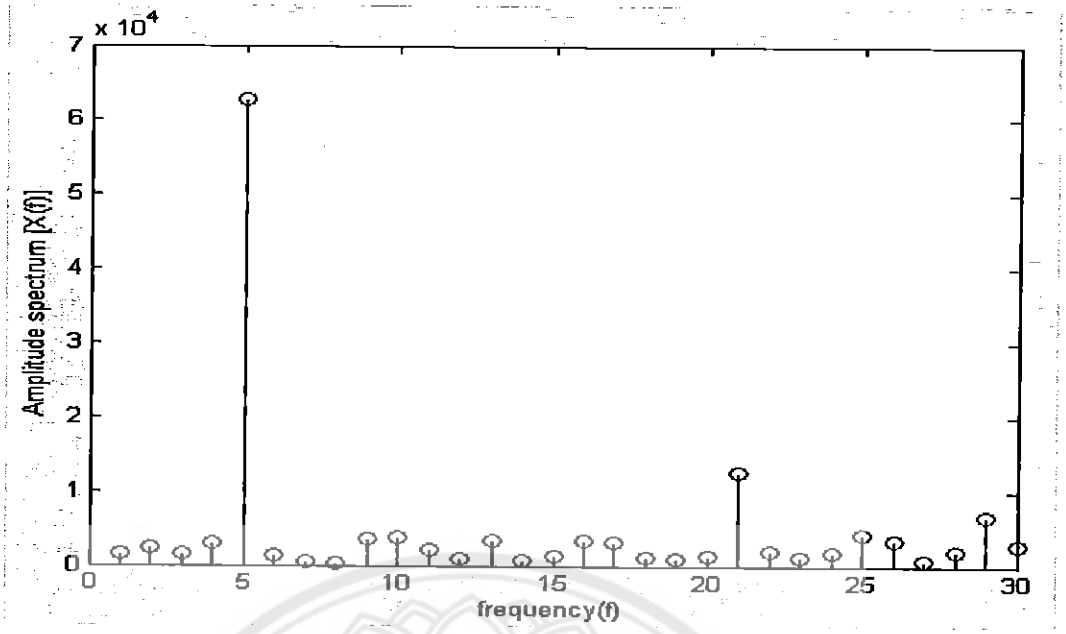
Rms =1.341A Freq =14.29kHz



รูปที่4.15 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

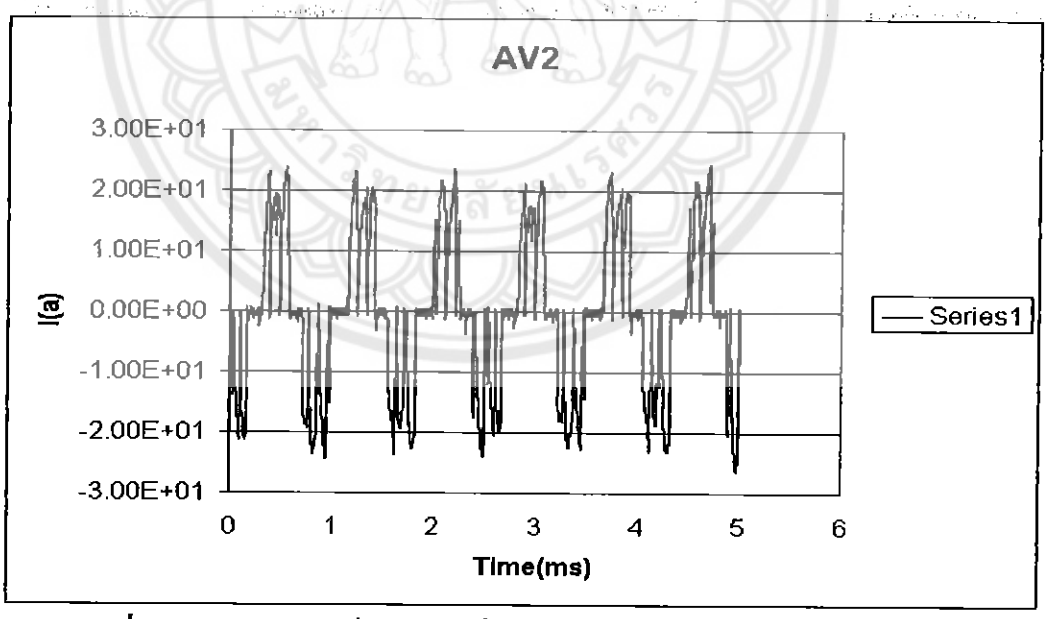
จากรูปกระแส I(c) มีค่า P-P = 6.640 A Max =3.360A Min = -3.280A

Rms =1.322A Freq =12.50kHz



รูปที่4.16 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสเมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 8,000 รอบ/นาที

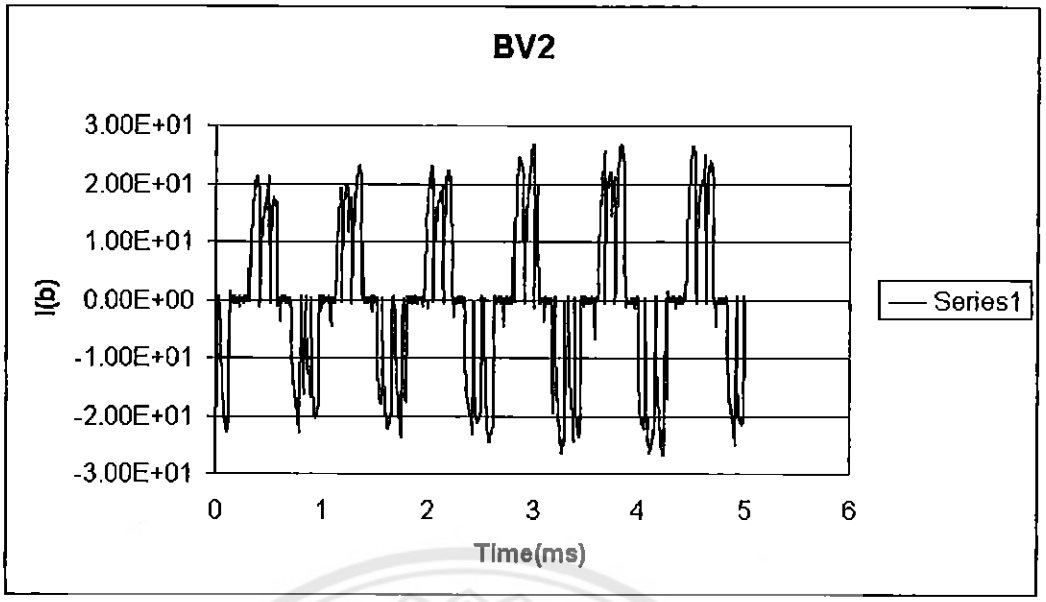
กรณีที่ 2 ทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที



รูปที่4.17 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(a) มีค่า P-P = 4.880 A Max =2.440A Min = -2.440A

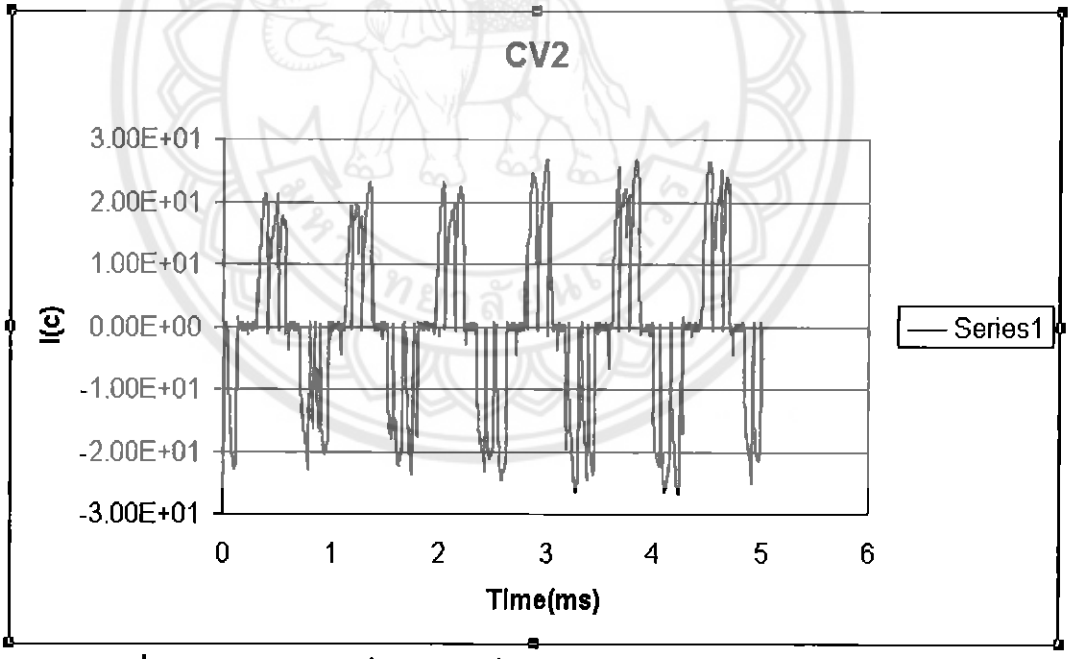
Rms =1.305A Freq =1.205kHz



รูปที่4.18 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(b) มีค่า P-P = 5.160 A Max =2.560A Min = -2.600A

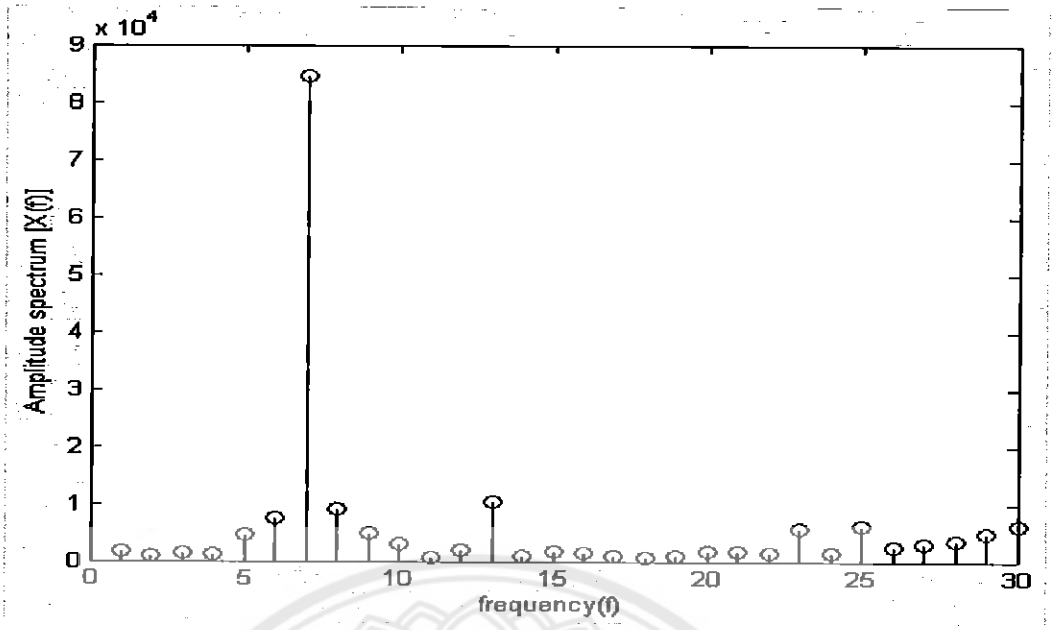
Rms =1.401A Freq =1.639kHz



รูปที่4.19 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

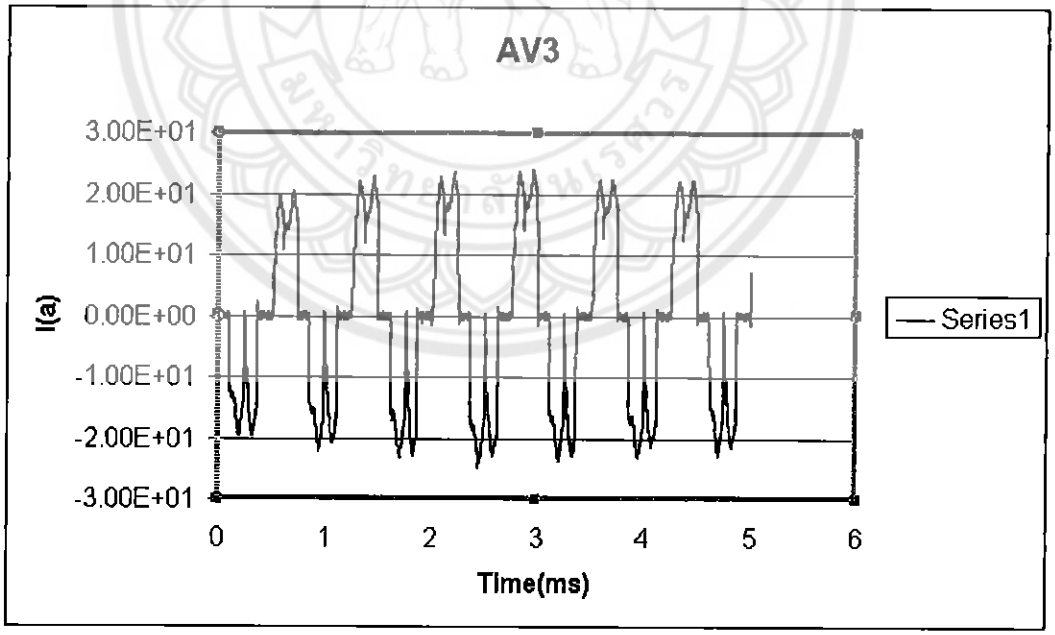
จากรูปกระแส I(c) มีค่า P-P = 5.200 A Max =2.640A Min = -2.560A

Rms =1.314A Freq =1.220kHz



รูปที่4.20 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสเมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 12,000 รอบ/นาที

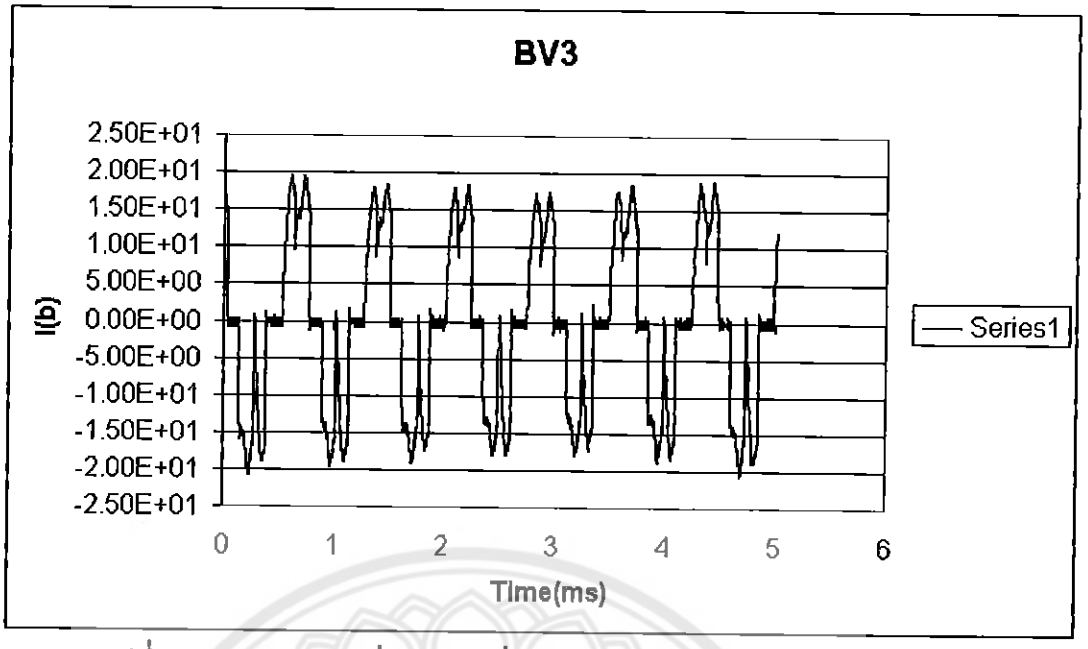
กรณีที่ 3 ทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที



รูปที่4.21 กระแส I(a) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(a) มีค่า P-P = 4.720 A Max =2.320A Min = -2.400A

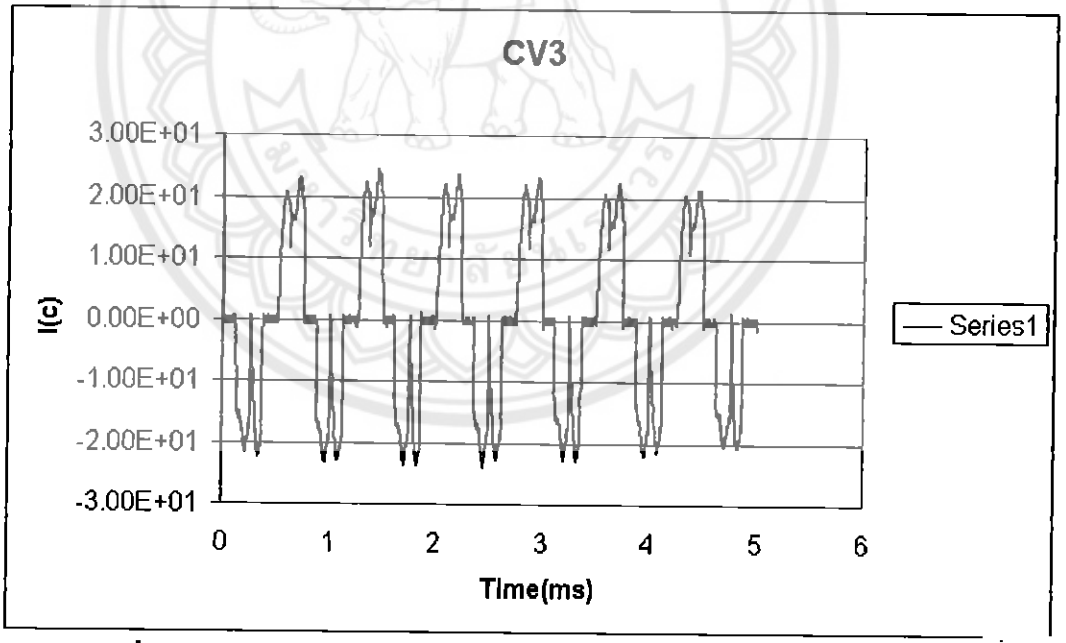
Rms =1.397A Freq =1.587kHz



รูปที่4.22 กระแส I(b) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(b) มีค่า P-P = 4.600 A Max =2.280A Min = -2.320A

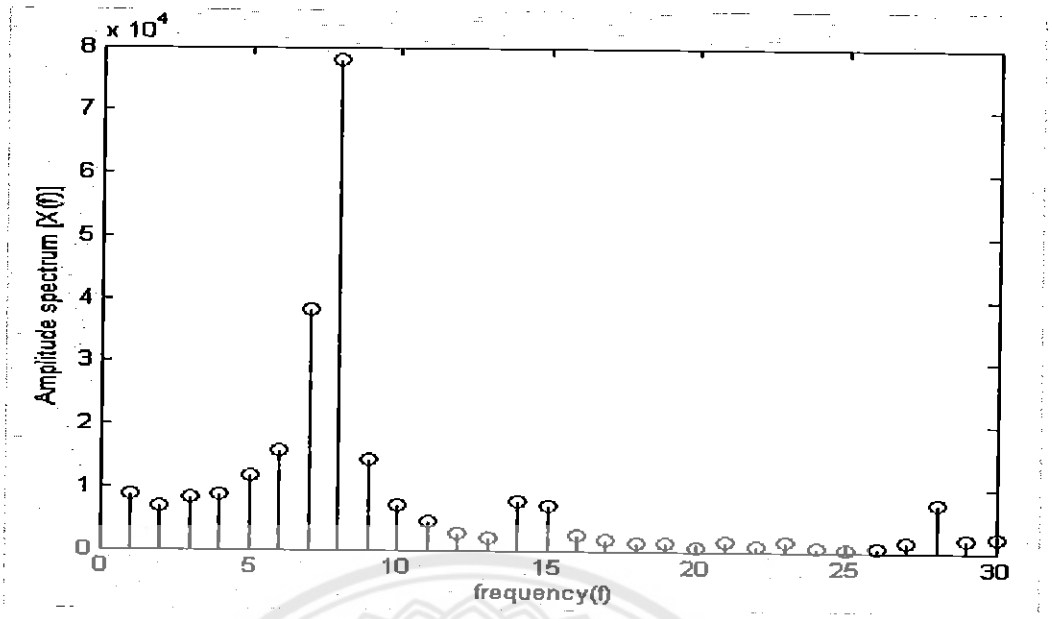
Rms =1.344A Freq =1.316kHz



รูปที่4.23 กระแส I(c) เมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

จากรูปกระแส I(c) มีค่า P-P = 4.800 A Max =2.440A Min = -2.400A

Rms =1.433A Freq =1.316kHz



รูปที่4.24 ลำดับฮาร์มอนิกของกระแสเมื่อทดสอบที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 15,000 รอบ/นาที

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินโครงงาน

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงงานนี้ พร้อมเสนอแนะแนวทางในการนำโครงงานนี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น

5.1 สรุปผล

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบเอซีไดร์ฟ โดยใช้เครื่องควบคุมมอเตอร์ Dc Brushless มาทำการทดสอบโดยทำการวัดค่ากระแสและแรงดัน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าลำดับฮาร์มอนิก ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขณะสตาร์ทมอเตอร์กระแสจะมีค่าสูง เมื่อปรับความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 12,000 รอบ/นาที จะเกิดฮาร์มอนิกลำดับคี่ และเมื่อปรับความเร็วไปที่ 15,000 รอบ/นาที จะพบว่ากระแสลดลงนั่นแสดงว่ามอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ สำหรับอาร์มอนิกก็จะเกิดลำดับคู่และลำดับคี่

5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงงาน

1.ไม่สามารถไดร์ฟมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ได้เนื่องจากชุดไดร์ฟและมอเตอร์มีราคาแพง

2.การจับสัญญาณข่อนข้างยากเนื่องจากสัญญาณไม่นิ่ง

3.ไม่สามารถทดสอบที่ความรอบต่ำๆได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1.ควรระมัดระวังในการทดลองอาจเกิดอันตรายได้

2.ควรศึกษาวิธีใช้อุปกรณ์และเช็คอุปกรณ์ก่อนทดลองทุกครั้ง

3.ควรไดร์ฟมอเตอร์ ที่มีขนาดใหญ่จะได้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] กองบรรณาธิการซีเอ็ด. **ไฟฟ้าอุตสาหกรรม เรื่องน่ารู้สำหรับวิศวกร.** บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ , พ.ศ. 2549

[2] ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. **MATHLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2547

[3] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงินและวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic)** พิมพ์ครั้งที่ 2. สถาบันพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2547

[4] Engineering Recommendation G.5/3 September 1976 The Electricity Council Chief Engineer Conference "Limits for Harmonics in The Electricity Supply System"

[5] IEC 1000-3-6 Assessment of emission limit for distoring loads in MV and HV power system

[6] IEEE Std. 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants

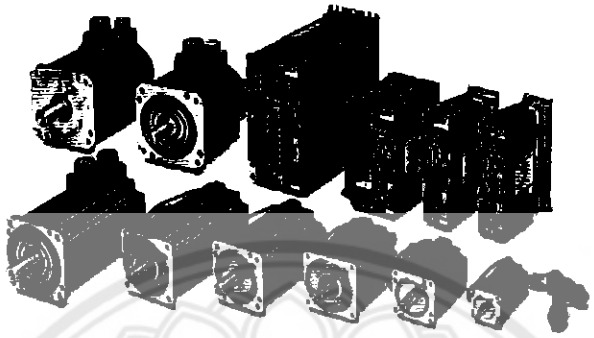
[7] http:// www.thailandindustry.com สื่ออุตสาหกรรมออนไลน์เพื่อนักอุตสาหกรรม

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ระบบขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo Drive System)

เซอร์โวมอเตอร์คืออะไร มีดีอย่างไร ทำไมต้องใช้เซอร์โว

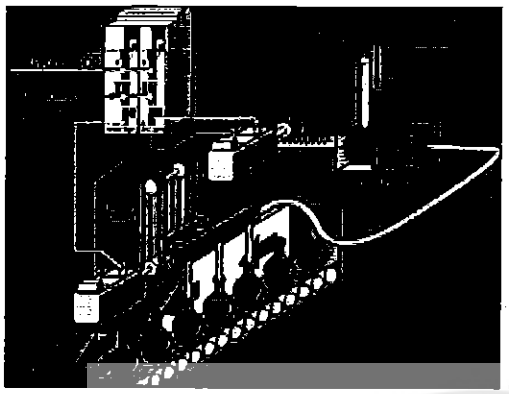


ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาคำว่า"เซอร์โวมอเตอร์" อาจจะเป็นคำศัพท์ที่ไม่ค่อยเป็นที่คุ้นเคยกันสักเท่าไหร่ บางท่านอาจจะคุ้นหูและจำฝังใจดีในเรื่องราคา เนื่องจากราคาในอดีตก็ค่อนข้างสูงมากเมื่อเปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกทั้งจำนวนการใช้งานก็ค่อนข้างจำกัดอยู่ในกลุ่มของเครื่องจักรบางประเภทเท่านั้น

แต่ปัจจุบันซึ่งเป็นยุคของความเร็ว(speed) สินค้ามีการแข่งขันสูง นอกเหนือจากคุณภาพและราคาซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานในการแข่งขันแบบเดิมๆแล้ว อุตสาหกรรมยุคใหม่ยังต้องแข่งขันกันในเรื่องความรวดเร็วในการตอบสนองต่อลูกค้าอีกด้วย ดังนั้นอุตสาหกรรมยุคใหม่จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้อง พึ่งพาเทคโนโลยีที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

จากเหตุผลและความต้องการในการแข่งขันดังกล่าวทำให้ชื่อของเซอร์โวมอเตอร์ได้รับการกล่าวขานมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม นวตกรรมใหม่และเครื่องจักรรุ่นใหม่ๆก็มีการออกแบบใช้เซอร์โวแทนที่ระบบขับเคลื่อนอื่นๆมากขึ้น ราคาก็ลดลงตามปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ทำให้เครื่องจักรอัตโนมัติและเครื่องจักรในกระบวนการผลิตมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เครื่องบรรจุภัณฑ์ Bagging or Packaging	เครื่องเติมหรือบรรจุขวด Bottle Filling
เครน Crane	เครื่องพิมพ์ต่างๆ Offset Printing
เครื่องซีเอ็นซี CNC machine	หุ่นยนต์อุตสาหกรรม Industrial Robot
เครื่องจักรกลในอุตสาหฯยาง Rubber Machine	เครื่องจักรกลในอุตสาหฯกระดาษ Paper
Rolling Mill	Converting Line
Composite Drilling	iber Line



ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เซอร์มอเตอร์กับระบบ Bottle Filling

ระบบเซอร์โวคืออะไร

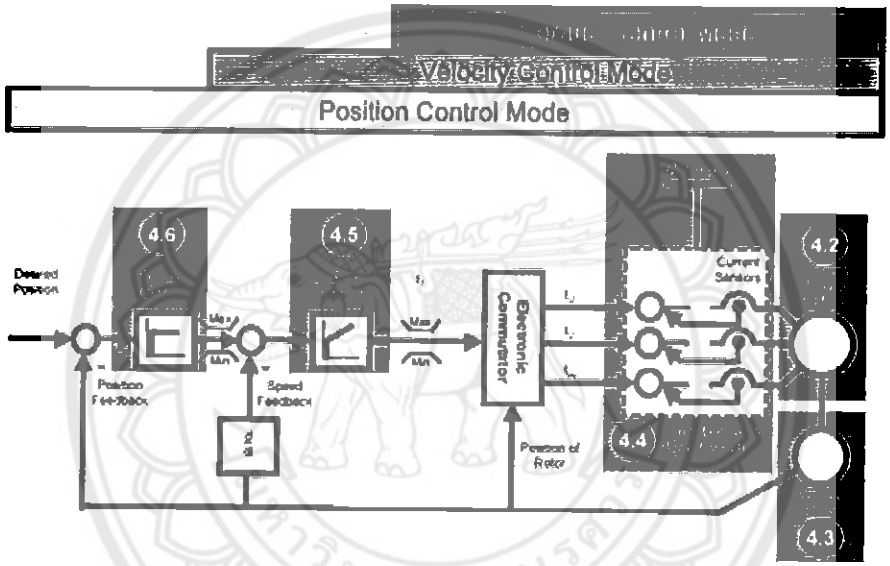
ตามนิยามของวิศวกรรมการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control)หรือระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ(Feedback Control System)สามารถจำแนกระบบควบคุมแบบลูปปิด(Closed loop control) ได้เป็นสาขาต่างๆดังตาราง

ระบบไฟฟ้า	ระบบไดนามิคส์(ระบบเซอร์โว)	ระบบกระบวนการ(Process)
โวลท์เตจและกระแสเร็คกูเลเตอร์ ฟีดแบ็คแอมปลิไฟเออร์	ควบคุมความเร็ว (Speed Control) ควบคุมแรงบิด (Torque Control) ควบคุมตำแหน่ง (Position Control) ควบคุมอัตราเร่ง (Velocity Control)	ควบคุมอุณหภูมิ(Temp. Control) ควบคุมแรงดัน(Pressure Control) ควบคุมการไหล(Flow Control) ควบคุมความหนาแน่น(density Control)

จากตารางสารมารถสรุปได้ว่าระบบเซอร์โว คือการควบคุมเครื่องจักรกลให้ทำงานตอบสนองด้านไดนามิคส์(Dynamic Response)เช่นความเร็ว อัตราเร่ง แรงบิด และตำแหน่ง ให้ได้ดีที่สุด(Optimum Solution)และใช้เวลาน้อยที่สุด(Time Optimum)

โครงสร้างระบบควบคุมเซอร์โวเป็นอย่างไร

ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นระบบควบคุมแบบลูปปิด(Closed loop control) ประกอบด้วย 3 โหมดการควบคุมคือ โหมดการควบคุมแรงบิด(Torque Control Mode) ซึ่งอยู่วงรอบหรือลูปในสุด โหมดการควบคุมอัตราเร่ง(Velocity Control Mode) และโหมดการควบคุมตำแหน่ง(Position Control Mode) ซึ่งอยู่ลูปด้านนอกสุด โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญๆดังรูป



1) »» เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) (4.2)

2) »» ชุดควบคุมการขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo Drive or Servo Amplifier) (4.4,4.5,4.6)

3) »» อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device เช่น Speed encoder และ Position Sensor) (4.3)

เซอร์โวมอเตอร์มีการแยกประเภทอย่างไร ?

เซอร์โวมอเตอร์ที่มีใช้ในงานทั่วไปจะมีทั้งดีซีและเอซีเซอร์โว ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา DC Servo Motor จะมีการใช้งานมากกว่า โดยเฉพาะเครื่องจักรรุ่นเก่าๆ เนื่องจากช่วงที่ผ่านมาการควบคุมกระแสกระแสสูงๆนั้นจะต้องใช้ SCRs แต่ปัจจุบันทรานซิสเตอร์ได้พัฒนาขึ้นมาให้มีขีดความสามารถในการควบคุมกระแสสูงเพิ่มขึ้น และใช้งานได้ที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นจึงทำให้เอซีเซอร์โวได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้นโดยเฉพาะเครื่องจักรรุ่นใหม่ล้วนแล้วแต่ใช้เอซีเซอร์โว

เซอร์โวมอเตอร์สามารถแยกประเภทเป็นกลุ่มต่างๆได้ดังนี้ (นิยามตามคู่มืออ้างอิงเซอร์โวฉบับภาษาเยอรมัน) เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน (Brush Type = mit Bursten)

เซอร์โวมอเตอร์ชนิดนี้ที่สเตเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตอร์เรียงกระแสเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ เหมือนกับดีซีมอเตอร์ทั่วไป

เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Type =Ohne Bursten)

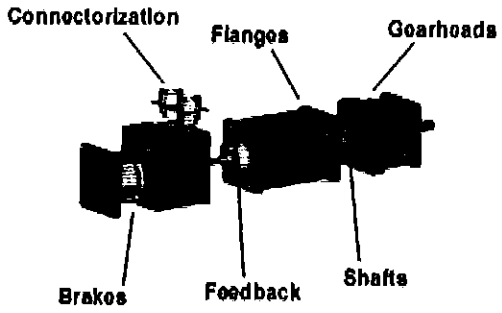
เซอร์โวมอเตอร์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยดีซีเซอร์โว (dc brushless servo โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร) เอซีเซอร์โว (AC Servo) ซึ่งมีทั้งแบบซิงโครนัสเซอร์โว

อะซิงโครนัสเซอร์โว (การนำอินดัคชั่นมอเตอร์มาใช้ทำเป็นระบบขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์) และ สเต็ปปิง เซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์มีโครงสร้างเป็นอย่างไร

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะเอซีเซอร์โวมอเตอร์ หรือซิงโครนัสเซอร์โวมอเตอร์ก่อน เนื่องจากเป็นชนิดที่กำลังมีบทบาทสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรม ส่วนเซอร์โวมอเตอร์ชนิดอื่นๆจะกล่าวถึงในตอนต่อๆไป (หากเพื่อนสมาชิกให้ความสนใจ)

ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์โดยทั่วไปจะต้องใช้งานในระบบ closed loop เท่านั้น ไม่สามารถเลือกให้เป็น open Loop หรือ closed loop เหมือนกันระบบเอซีไดรฟ์ เซอร์โวมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมการทำงานได้ดีหากไม่มีสัญญาณจาก encoder ป้อนกลับไปยังชุดขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo drive) ระบบจำเป็นต้องใช้ Encoder เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในระบบควบคุมเสมอเสมือนกับเป็นของคู่กันระหว่างเซอร์โวมอเตอร์และEncoder ขาดซึ่งกันและกันไม่ได้ จึงทำให้บริษัทผู้ผลิตออกแบบคิดสร้างเซอร์โวมอเตอร์และEncoderรวมไว้เป็นตัวเดียวกัน จึงทำให้ลักษณะโครงสร้างโดยรวมของเซอร์โวมอเตอร์ที่เราพบเห็นในเชิงพานิชย์ทั่วไป จึงมีลักษณะเป็นแพคเกจ (package) ซึ่งประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์และEncoder (ติดอยู่ที่ส่วนท้ายของมอเตอร์) รวมไว้เป็นชุดเดียวกันดังรูป



Gearheads = เกียร์สำหรับลดความเร็วรอบเพื่อเพิ่มแรงบิด

Shafts = แกนเพลาของมอเตอร์

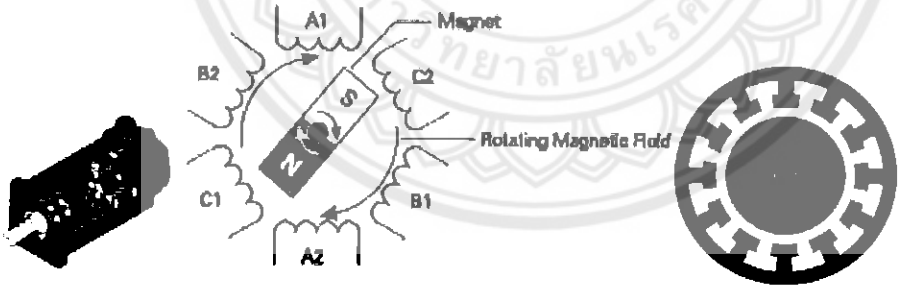
Flanges = หน้าแปลนสำหรับติดตั้งมอเตอร์

Feed back = อุปกรณ์ป้อนกลับเช่น encoder

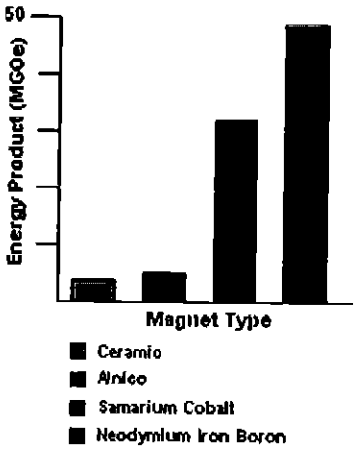
Connectorization = ขั้วต่อสายไฟเข้ามอเตอร์ และขั้วต่อสายสำหรับ encoder

Breakes = เบรค

โครงสร้างของ AC servo Motor จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งคล้ายกับมอเตอร์ 3 เฟสทั่ว ๆ ไป โดยสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดที่สมดุลย์ ขดลวดภายในจะต่อเป็นแบบสตาร์ (Star หรือ WYE) และมีสายต่อมาที่ขั้วต่อสายด้านนอก 3 เส้น (จุดนิวทรอลจะอยู่ด้านใน) ส่วนโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร(Permanent Magnet) ไม่มีขดลวดพัน, ไม่มีคอมมิวเตเตอร์ และไม่มีแปรง (Brushless)



จากลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์และหลักการทำงาน (เมื่อป้อนไฟ 3 เฟสเข้าขดลวด จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน และส่งผลให้โรเตอร์ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรวิ่งตาม) ดังที่กล่าวมาจึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกขานแตกต่างกันไป เช่น Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM) , AC Servo motor, AC Brushless, หรือ Brushless Motor เป็นต้น



สำหรับวัสดุที่นำมาสร้างแม่เหล็กถาวรนี้จะแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับราคาและเทคโนโลยีของบริษัทผู้ผลิตนั้นๆ ซึ่งมีตั้งแต่ชนิดที่ราคาถูกเช่น เซรามิก(เฟอไรต์) จนถึงการใช้วัสดุที่มีราคาแพงอย่างเช่น ซามาเรียม โคบอลต์ หรือ นีโอไดเมียม เป็นต้น (ปัจจุบันเอซีเซอร์โวมอเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุสารแม่เหล็กแบบ นีโอไดเมียม เนื่องจากมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และความเหมาะสมเรื่องราคาดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสารแม่เหล็กแบบอื่นๆ)

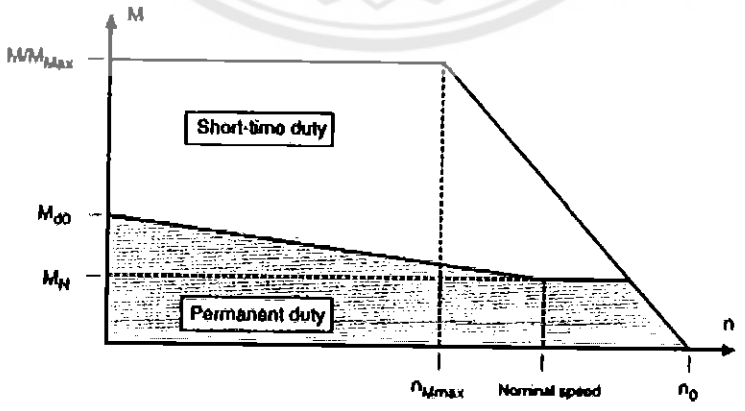
เซอร์โวมอเตอร์แตกต่างกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆอย่างไร

เซอร์โวมอเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้กับงานที่มีการควบคุมตำแหน่ง (Position Control)เป็นหลัก ซึ่งต้องการคุณสมบัติการตอบสนองด้านไดนามิคส์สูง(high dynamics response) ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงในการควบคุมสูง

ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว ผู้ผลิตจึงได้พยายามออกแบบให้โรเตอร์มีเส้นผ่าสูนย์กลางและรัศมีเล็กๆ รวมถึงการทำให้โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร เพื่อเป็นการลดแรงเฉื่อยของโรเตอร์(Rotor moment of inertia) และชดเชยแรงบิดหรือทอร์คที่หายไปเนื่องจากโรเตอร์มีขนาดเล็กลงด้วยการเพิ่มความยาวโรเตอร์ ดังนั้นรูปร่างโครงสร้างทางกายของเซอร์โวมอเตอร์ ที่เราพบเห็นทั่วไปจึงมีลักษณะผอมบางและมีความยาวมากกว่ามอเตอร์ที่ใช้งานทั่วไป นอกจากนั้นยังมีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ทั่วไปอีกด้วย (หากพิจารณาที่พิกัดกำลังเท่าๆกัน) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้คล้ายกับคนที่มีรูปร่าง " สูง ผอมบาง แต่แรงดี " เป็นต้น

คำอธิบาย	Asynchronous	Permanent Magnet Synchronous Servo
เปรียบเทียบที่พิกัดกำลังเท่าๆกัน (Rated power)	0.75 kW	0.75 kW
ความเร็วพิกัด (Rated speed)	2825 min^{-1}	3000 min^{-1}
แรงบิดพิกัด (Rated torque)	2,5 Nm	2.4 Nm
แรงบิดสูงสุด (Max. torque)	6,6 Nm	12.0 Nm
***** แรงเฉื่อยของโรเตอร์ (Rotor moment of inertia)	5.7 x 10^{-4} kgm^2	2.7 x 10^{-4} kgm^2
เปรียบเทียบเวลาที่ใช้เร่งความเร็วไปที่ 3000 รอบต่อนาที (ตามทฤษฎี) (Theor. acceleration time to 3000 min^{-1})	27 ms	7 ms
กระแสพิกัด (Rated current)	3.0 A	2.6 A
แรงดันพิกัด (Rated voltage)	230 V	190 V
ประสิทธิภาพ (Efficiency)	77 %	88 %

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วๆไปของอินดัคชั่นมอเตอร์กับ(Asynchronous) กับเซอร์โวมอเตอร์ P.M.Synchronous Servo motor



กราฟแสดงคุณสมบัติด้านความ – แรงบิดของเซอร์โวมอเตอร์

Servo Motor: xx.SM.000-yyyy										
Size (x)		C1						C2		
Speed and voltage variant (y)		3200	3400	4200	4400	6200	6400	3200	3400	4200
Stall torque M_{d0}	Nm	0,95						2,7		
Ratings										
Rated torque M_{dN}	Nm	0,8		0,75		0,7		2,4		2,2
Rated speed n_N	min^{-1}	3000		4000		6000		3000		4000
Voltage constant k_E	$V/1000min^{-1}$	36,5	66,5	27,5	50,2	18,3	33,6	45,5	78,8	34,3
Winding resistance $R_{25°}$	Ohm	20,5	74,9	12,1	39,4	5,1	18,9	4,2	13,1	2,3
Winding inductivity $L_{25°}$	mH	30,5	101	17,1	57,6	7,6	25,9	11,4	34,4	6,5
Mechanical specifications										
Rotor moment of inertia J_L	$kgcm^2$	1,2						2,7		
Overall length l [1]	mm	156						180		
Partial length r [2]	mm	85						110		
Mass m	kg	2,7						3,9		

ตัวอย่าง ตารางคุณสมบัติที่สำคัญๆของเซอร์โวมอเตอร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นายเอกชัย เครือคำ

รหัสนิสิต 46380185

วันเกิด 26 มีนาคม 2527

ภูมิลำเนา 126 หมู่ 1 ต.บ้านเหล่า อ.แม่ใจ จ.พะเยา 56130

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่ใจวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

E-mail : Eak.ee@hotmail.com