

การทำงานของเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ในสถานะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย

OPERATION OF ADJUSTABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE
WITH BALANCED AND UNBALANCED SUPPLY VOLTAGES

วีระ ธานยภักดิ์

VEERA THANYAPHIRAK

วิทยานิพนธ์เสนอแก่ส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1300-3

การทำงานของเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย

OPERATION OF ADJUSTABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE
WITH BALANCED AND UNBALANCED SUPPLY VOLTAGES

วีระ ถันยาภิรักษ์

VEERA THANYAPHIRAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

ISBN 974-15-1300-3

OPERATION OF ADJUSTABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE
WITH BALANCED AND UNBALANCED SUPPLY VOLTAGES

VEERA THANYAPHIRAK

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

2004

ISBN 974-15-1300-3

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำงานของเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำใน	
	สภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย	
นักศึกษา	นายวีระ รัตนภักดิ์	
รหัสประจำตัว	44611009	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
พ.ศ.	2547	
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทำงานของเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันจากแหล่งจ่ายโดยทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขีดฮาร์มอนิกซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และผลกระทบต่อสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำและประสิทธิภาพของระบบเมื่อเครื่องปรับความเร็วรอบทำงานที่ภาระต่างๆ โดยในวิทยานิพนธ์ได้ทำการสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องปรับความเร็วรอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ และนอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการติดตั้งใช้ค (choke) ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบในเรื่องของการลดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องดังกล่าวให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2

Thesis Title	Operation of Adjustable Speed Induction Motor Drive With Balanced and Unbalanced Supply Voltages
Student	Mr. Veera Thanyaphirak
Student ID.	44611009
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn
Thesis Co.Advisor	Assist.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents an operation of an adjustable speed induction motor drive with balanced and unbalanced supply voltages. This is for studies of factors which contribute to the harmonic injection, causing distortion in the current waveforms of a main supply. In addition the performance of induction motor and efficiency of the system at various load levels are consideration. The adjustable speed induction motor drive is modelled using MATLAB / Simulink, and the simulation results are compared with experimental measurements. The effects due to line reactors (choke) connected in series with the adjustable speed drive are also investigated so that the reduction of harmonic contents according to IEC standard 61000-3-2 can be obtained.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของอาจารย์ที่ปรึกษาทั้ง 2 ท่าน คือ ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอบคุณห้องปฏิบัติการ Power Electronics and Machine Control ที่ให้ทั้งคำแนะนำ, กำลังใจ ,ร่วมทุกข์,ร่วมสุข และช่วยพยุงให้ก้าวเดินต่อมาเรื่อยในทุกๆสถานที่

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ร่วมถึงญาติพี่น้องทุกๆคน

วีระ อัญยาภิรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก.....	6
2.1 ลักษณะของฮาร์มอนิก.....	6
2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก.....	9
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	10
2.3.1 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	10
2.3.2 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก.....	10
2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค.....	11
2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า.....	11
2.4.1 ตัวเก็บประจุ.....	11
2.4.2 เซอร์คิตเบรกเกอร์และฟิวส์.....	12
2.4.3 ตัวนำ.....	12
2.4.4 หลอดไฟฟ้า.....	12
2.4.5 รีเลย์ป้องกัน.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.6 เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุน	12
2.4.7 หม้อแปลง	13
2.4.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	13
2.4.9 การรบกวนโทรศัพท์	13
2.5 มาตรฐานฮาร์โมนิก.....	13
2.5.1 มาตรฐาน มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 (2000-08)	14
2.5.2 มาตรฐาน IEEE 519-1992	15
2.5.2.1 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแส	15
2.5.2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน.....	16
2.6 สรุป	17
บทที่ 3 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน.....	18
3.1 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18
3.1.1 หลักการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	18
3.1.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	19
3.1.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูล	20
3.2 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	22
3.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด.....	24
3.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด	24
3.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก	25
3.3 ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	25
3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส	26
3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน	27
3.4 เทคนิคการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	28
3.4.1 เทคนิค Sinusoidal Pulse Wide Modulation	28
3.4.2 เทคนิค Space Vector Pulse Modulation	29
3.5 สรุป	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 หลักการทำงานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	31
4.1 หลักการทำงานของเครื่องปรับความเร็วรอบ	31
4.1.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล	34
4.1.2 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล	36
4.2 การติดตั้งใช้คด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	38
4.3 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink.....	40
4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	41
4.4.1 ค่าพิกัดของเครื่องปรับความเร็วรอบ	42
4.4.2 ค่าพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	43
4.5 สรุป	47
บทที่ 5 ผลการจำลองและทดสอบ.....	48
5.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล.....	49
5.1.1 เมื่อไม่มีการติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD	49
5.1.2 เมื่อมีการติดตั้งใช้ค 3 % ด้านหน้า ASD	53
5.1.3 เมื่อมีการติดตั้งใช้ค 5 % ด้านหน้า ASD	56
5.1.4 เมื่อมีการติดตั้งใช้ค 7 % ด้านหน้า ASD	59
5.2 กรณีแรงดันอินพุทอยู่ในสภาวะไม่สมดุล.....	70
5.2.1 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	71
5.2.2 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	77
5.2.3 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	83
5.2.4 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	85
5.2.5 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	87
5.2.6 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	89
5.2.7 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	91
5.2.8 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	93
5.2.9 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.10 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	97
5.2.11 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค	99
5.2.12 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค	101
5.3 สรุป	111
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	112
6.1 สรุปผลการวิจัย	112
6.2 ข้อเสนอแนะ	113
เอกสารอ้างอิง	115
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	128
ประวัติผู้เขียน	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน Class A	15
2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสสำหรับระบบจำหน่ายที่แรงดัน 120 V ถึง 69,000 V.....	16
2.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน	17
4.1 แรงดันไฟฟ้าในสถานะต่างที่ใช้ในการทดสอบกรณีไม่สมดุล 1 เฟส	38
5.1 ค่าอินดักแตนซ์ของใช้ที่เปอร์เซ็นต์แรงดันต่างๆ	49
5.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบ.....	68
5.3 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของระบบ	68
5.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ	69
5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	69
5.6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล	107
5.7 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล.....	108
5.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล.....	109
5.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสอินพุท rms และกระแสอินพุท rms ที่ความถี่หลักมูล	7
2.2 รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัม.....	9
2.3 การต่อคาร์ปาซีเตอร์ขนานกับระบบและเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	11
2.4 รูปคลื่นกระแสสำหรับการพิจารณาของ Class D.....	14
3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
3.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
3.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่.....	24
3.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	25
3.5 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	27
3.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	27
3.7 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM	28
3.8 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SVPWM.....	29
4.1 โครงสร้างของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	32
4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุท ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	32
4.3 รูปคลื่นแรงดันของ ASD ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	32
4.4 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล	33
4.5 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์	34
4.6 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง	35
4.7 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล	36
4.8 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง	37
4.9 การติดตั้งไช้ค (L_{S2}) ด้านหน้า ASD	39
4.10 ระบบ ASD ที่ใช้ในการจำลอง	40
4.11 แบบจำลองของ ASD	40
4.12 แบบจำลองการกำเนิดสัญญาณควบคุมโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์	41
4.13 เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไลน์.....	42
4.14 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงดันไลน์.....	42
4.15 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ.....	43
4.16 แบบจำลองการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีแรงดันเป็นไซน์	43
4.17 เปรียบเทียบกระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์	44

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 เปรียบเทียบเพาเวอร์แฟคเตอร์ของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	45
4.19 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	45
4.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	46
4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์.....	46
5.1 test rig ที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
5.2 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด.....	50
5.3 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด.....	51
5.4 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด.....	52
5.5 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด.....	53
5.6 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด.....	54
5.7 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด.....	55
5.8 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด.....	56
5.9 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด.....	57
5.10 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด.....	58
5.11 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด.....	59
5.12 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด.....	60
5.13 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด.....	61
5.14 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทเมื่อไม่ติดตั้งใช้คและติดตั้งใช้คที่ 5 %.....	62
5.15 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทเมื่อติดตั้งใช้ค 3% และ 7%	62
5.16 เปรียบเทียบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเมื่อไม่ติดตั้งใช้คและติดตั้งใช้คที่ 5 %	63
5.17 เปรียบเทียบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเมื่อติดตั้งใช้ค 3% และ 7%	63
5.18 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของระบบเมื่อไม่ติดตั้งใช้คและติดตั้งใช้คที่ 5 %	64
5.19 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของระบบเมื่อติดตั้งใช้ค 3% และ 7	64
5.20 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อไม่ติดตั้งใช้คและติดตั้งใช้คที่ 5 %	65
5.21 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อติดตั้งใช้ค 3% และ 7%	65
5.22 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD	66
5.23 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD	66

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ10 %	71
5.25 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	72
5.26 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B.....	72
5.27 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C.....	72
5.28 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ50 %	73
5.29 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	74
5.30 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B.....	74
5.31 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C.....	74
5.32 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ90 %	75
5.33 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	76
5.34 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B.....	76
5.35 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C.....	76
5.36 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ10 %	77
5.37 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	78
5.38 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	78
5.39 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	78
5.40 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ50 %	79
5.41 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	80
5.42 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	80
5.43 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	80
5.44 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ90 %.....	81
5.45 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	82
5.46 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	82
5.47 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	82
5.48 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ภาวะ90 %	83
5.49 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	84
5.50 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	84
5.51 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	84
5.52 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ภาวะ90 %.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.53 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	86
5.54 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	86
5.55 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	86
5.56 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ภาระ90 %	87
5.57 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	88
5.58 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	88
5.59 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	88
5.60 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ภาระ90 %.....	89
5.61 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	90
5.62 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	90
5.63 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	90
5.64 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ภาระ90 %	91
5.65 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	92
5.66 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	92
5.67 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	92
5.68 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ภาระ90 %	93
5.69 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	94
5.70 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	94
5.71 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	94
5.72 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาระ90 %	95
5.73 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	96
5.74 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	96
5.75 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	96
5.76 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาระ90 %.....	97
5.77 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	98
5.78 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	98
5.79 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	98
5.80 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่ภาระ90 %	99
5.81 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	100

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.82 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	100
5.83 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	100
5.84 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาระ 90 %	101
5.85 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส A	102
5.86 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส B	102
5.87 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทเฟส C	102
5.88 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over Voltage จากการจำลอง.....	103
5.89 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over Voltage จากการทดสอบ.....	103
5.90 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการจำลอง.....	104
5.91 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการทดสอบ	104
5.92 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการจำลอง	105
5.93 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการทดสอบ	105
5.94 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการจำลอง	106
5.95 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการทดสอบ	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีในปัจจุบันนี้จะพบว่ามีการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานไปสู่พลังงานรูปอื่นได้สะดวกยิ่งขึ้นเนื่องจากขีดความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในทุกวันนี้สามารถตอบสนองได้รวดเร็วและแน่นอนมากยิ่งขึ้น เช่น การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมแทนสวิตช์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะมีจำนวนมากขึ้นในทุกๆปี แต่ข้อเสียของการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมในทางไฟฟ้าก็คือ จะผลิตฮาร์มอนิกแบบต่างๆออกมารบกวนต่อระบบอื่นๆที่ทำงานร่วมกันที่จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling : PCC) [1,2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาระแบบไม่เชิงเส้น (Non linear load) ซึ่งคุณสมบัติของภาระชนิดนี้จะทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เช่น เครื่องปรับความเร็วรอบ (Adjustable Speed Drives : ASD) [3] มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส หรือ 3 เฟสที่ใช้ไดโอดเป็นอุปกรณ์ในการเรียงกระแสจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงซึ่งการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวในการกรองกระแสและไม่มีการใช้เทคนิคเพิ่มเติมในการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินพุททำให้ราคาของเครื่องปรับความเร็วรอบต่ำซึ่งตรงกับความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิตจึงทำให้จำนวนเครื่องปรับความเร็วรอบชนิดนี้มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก นั้นย่อมส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆที่ต่ออยู่ที่จุดต่อร่วมทำงานไม่เป็นปกติคือได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าและสายนิวทรัลร้อนมากกว่าปกติ, เซอร์คิตเบรกเกอร์ทำงานก่อนถึงพิกัด เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ถือว่าเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น [3,4] แต่เนื่องจากว่าในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดที่ชัดเจนในการกำหนดให้แต่ละโรงงานลดปริมาณฮาร์มอนิกที่จะฉีดเข้าสู่ระบบ ในปัจจุบันนี้จึงมีเพียงโรงงานที่ได้รับผลกระทบดังกล่าวแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ แต่ในการติดตั้งตัวกรองดังกล่าวนั้นมีราคาค่อนข้างแพง อีกทั้งต้องทำการออกแบบโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญโดยเฉพาะและความยากลำบากในการบำรุงรักษาและตรวจสอบ

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของ ASD ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) [3,6] ซึ่งใช้ไดโอดในการเรียงกระแสที่มีผลทำให้รูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายอินพุทผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์, สมรรถนะของระบบและมอเตอร์ เมื่อ ASD ทำงานที่ภาระต่างๆ ทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายอินพุทอยู่ในสถานะสมดุลและไม่สมดุล [5,6,7] โดยใช้การ

จำลองจากโปรแกรม MATLAB / Simulink เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่ฉีดออกมาจาก ASD ที่มีใช้ในทางอุตสาหกรรม รวมถึงทำการออกแบบ series line reactor หรือ choke ติดตั้งด้านหน้า ASD ให้มีความเหมาะสม เพื่อลดผลกระทบในเรื่องความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุทให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิก มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 [8] ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่ฉีดออกมาจากภาระแบบไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ ลดลงและยังเป็นการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบให้ดียิ่งขึ้น ทำให้พลังงานที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบลดลงในขณะที่มอเตอร์ยังคงทำงานได้ตามปกติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาจากจำลองการทำงานของเครื่องปรับความเร็วรอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วรอบที่มีต่อการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล

1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบ series line reactor หรือ choke ติดตั้งด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบให้มีความเหมาะสมเพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิกให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิก มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องปรับความเร็วรอบใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาดประมาณ 1-5 แรงม้า จะใช้เครื่องที่มีราคาค่อนข้างถูกจึงทำให้โครงสร้างภายในไม่มีวงจรเพิ่มเติมในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุท จึงทำให้มีการฉีดฮาร์มอนิกออกมารบกวนระบบอื่นที่ทำงานรวมกันที่จุดต่อรวม เมื่อจำนวนเครื่องปรับความเร็วรอบมีจำนวนมากนั้นย่อมส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นระบบรวมสูงขึ้นเกิดข้อกำหนด

1.3.2 การใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ช่วยในการสร้างแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบและแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อนำแบบจำลองทั้งสองเข้าด้วยกันทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการฉีดฮาร์มอนิกและสมรรถนะของมอเตอร์ เมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลรวมถึงการจำลองการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมของค่าอินดักแตนซ์ของใช้คก่อนติดตั้งใช้คในระบบจริงที่ใช้ในการศึกษา

1.3.3 ข้อมูลที่ได้ทั้งจากการจำลองและจากการทดสอบจะใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ เอกสารและตำราที่ใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในด้านต่างๆ รวมถึงมาตรฐานและข้อกำหนดเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

1.4.2 ทดสอบหาค่าต่างๆเกี่ยวกับเครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.4.3 ศึกษาการสร้างแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink

1.4.4 ทำการจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบที่จ่ายกำลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ภาระต่างๆเมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสถานะสมดุลและไม่สมดุล รวมถึงการออกแบบติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบโดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและจากการทดลอง

1.4.5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

จากปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่รบกวนระบบอื่นๆที่ใช้ไฟฟ้าร่วมกันที่จุดต่อร่วมซึ่งเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่ต้องมีการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งภาระที่ไม่เชิงเส้นประเภทเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ไดโอดในการเรียงกระแสซึ่งมีใช้อยู่เป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆไปเพราะมีราคาถูก แต่ปัญหาที่ตามมาคือ เครื่องชนิดดังกล่าวจะไม่มีปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุตจึงทำให้เกิดมีฮาร์มอนิกที่สูงเกินมาตรฐานฉีดเข้าสู่ระบบทำให้ระบบอื่นๆทำงานผิดพลาดไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกจากเครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้อยู่ในทางอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาดพิกัด 5.5 kW. แรงดันอินพุต 380-400 V. กระแส 12 A. โดยทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 2.2 kW. แรงดัน 220/380 V. กระแส 8.6/5.0 A. 4 pole 50 Hz. ความเร็วรอบที่พิกัด 1,420 rpm

โดยทำการศึกษาจากแบบจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบและแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ทำการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากระบบจริงเพื่อศึกษาการฉีดฮาร์มอนิก ,ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนรวมของกระแส ,เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ ,กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบ ,กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ,ประสิทธิภาพของมอเตอร์

และของระบบเมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล จากนั้นจะทำการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในเรื่องการลดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุตให้เป็นไปตามข้อกำหนด มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทๆได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา วิธีการวิจัย ขอบเขตของการศึกษา เนื้อหาโดยย่อในแต่ละบท และประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ลักษณะ, ประเภทและแหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิก รวมถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและมาตรฐานฮาร์มอนิกในเรื่องของขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน ซึ่งจะอธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้เครื่องปรับความเร็วรอบแบบต่างๆรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

บทที่ 4 กล่าวถึงเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการวิจัยซึ่งจะอธิบายถึงความแตกต่างกรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบเมื่อมีการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ รวมถึงการจำลองระบบเครื่องปรับความเร็วรอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการจำลองและทดสอบระบบเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลที่เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระต่างๆรวมถึงผลกระทบเมื่อติดตั้ง series line reactor หรือ choke ค่าต่างๆด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยการศึกษาการทำงานของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายรวมถึงข้อเสนอนะที่จะใช้ในการวิจัยลำดับต่อไป

1.7 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.7.1 เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วรอบเมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล

1.7.2 เป็นการจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบทำให้แนวทางในการศึกษาในด้านต่างๆก่อนนำผลดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบ

1.7.3 เป็นการออกแบบ series line reactor หรือ choke ที่ติดตั้งด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบให้มีความเหมาะสมเพื่อลดผลกระทบจากเครื่องดังกล่าว

1.7.4 มีการเปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 เมื่อทำการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ

บทที่ 2

พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าถือว่าเป็นหนึ่งในหลายๆปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าซึ่งในปัจจุบันนี้กำลังได้รับกล่าวถึงเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้อย่างแพร่หลายซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมและการเติบโตตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกเข้าไปรบกวนระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆให้ทำงานผิดพลาดไป โดยที่แต่ละหน่วยงานที่มีการใช้ภาระประเภทดังกล่าวมักจะเลือกใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายซึ่งจะตรงกับความต้องการของหน่วยงานคือมีต้นทุนต่ำโดยไม่คำนึงถึงปัญหาที่ตามมา ในขณะที่กฎหมายหรือข้อกำหนดทางด้านฮาร์มอนิกในประเทศไทยยังไม่ได้มีการบังคับใช้ที่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาลักษณะและการเกิดฮาร์มอนิกจากภาระที่ไม่เชิงเส้นเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลจากฮาร์มอนิกจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เป็นภาระแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาวิธีการที่ง่าย และสะดวกในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกให้ลดลง

2.1 ลักษณะฮาร์มอนิก [9]

องค์ประกอบฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบที่รวมอยู่ในสัญญาณที่มีความถี่ต่างจากความถี่หลักมูล เช่น สัญญาณใดๆที่มีความถี่หลักมูลเท่ากับ 50 Hz ดังนั้นสัญญาณอื่นๆที่รวมอยู่ในสัญญาณดังกล่าวที่มีความถี่ไม่เท่ากับความถี่ดังกล่าวจะเรียกว่า องค์ประกอบฮาร์มอนิก รูปคลื่นสัญญาณรายคาบใดๆ ที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ [1] ดังสมการที่ (2.1)

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) \quad (2.1)$$

- $f(t)$ = ฟังก์ชันของรูปคลื่นรายคาบใดๆ
- F_0 = ค่าเฉลี่ยหรือองค์ประกอบไฟตรงของ $f(t)$
- $f_h(t)$ = ฟังก์ชันฮาร์มอนิกของรูปคลื่นรายคาบใดๆ
- h = อันดับฮาร์มอนิก

จากสมการที่ (2.1) $F_0 = \frac{1}{2} a_0$ ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{ a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t) \} \quad (2.2)$$

$$F_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \quad (2.3)$$

$$a_h = \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad (2.4)$$

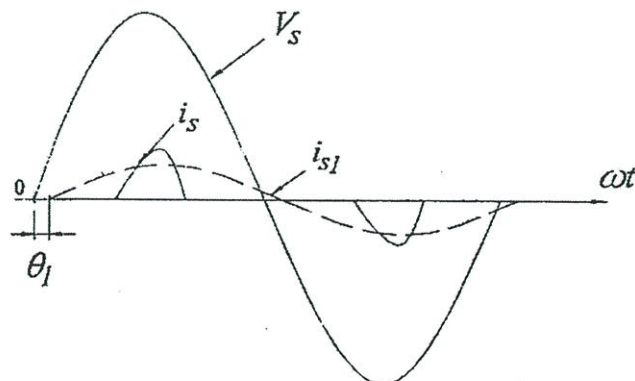
$$b_h = \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (2.5)$$

ในขณะที่ค่าที่ใช้บ่งชี้ว่าสัญญาณหนึ่งๆ มีปริมาณฮาร์มอนิกอยู่มากหรือน้อยจะบอกในรูปเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลเรียกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนรวม (Total Harmonic Distortion : %THD) ดังสมการที่ 2.6

$$\% THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2}}{A_1} \times 100 \quad (2.6)$$

A_1 = องค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล

A_h = องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสอินพุท และกระแสอินพุท ที่ความถี่หลักมูล

จากรูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุทที่จ่ายให้กับภาระที่ไม่เชิงเส้น ดังนั้นค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor : PF) หาได้ดังนี้

จากนิยามของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p(t) d(t) \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} v_s(t) i_s(t) d(t) \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \quad (2.9)$$

และ

$$i_s = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_1) \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ 2.9 และ 2.10 ลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \cdot \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_1) d(t) \quad (2.11)$$

จะได้

$$P = V_s I_{s1} \cos \phi_1 \quad (2.12)$$

ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power : S) คือผลคูณระหว่างค่าแรงดัน rms กับ กระแส rms ดังสมการที่ 2.13

$$S = V_s I_s \quad (2.13)$$

ซึ่งจากนิยามของเพาเวอร์แฟคเตอร์ คือ อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยต่อค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ หรือเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังสมการที่ 2.14

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.14)$$

แทนค่าสมการที่ 2.12 และ 2.13 ลงในสมการที่ 2.14 จะได้

$$PF = \frac{V_s I_{s1} \cos \phi_1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (2.15)$$

หรือ

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \quad (2.16)$$

$DPF = \cos \phi_1$, displacement power factor ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าเฟาเวอร์เฟคเตอร์ในวงจร
เชิงเส้นที่รูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นไซน์

I_{s1} = กระแสอินพุท ที่ความถี่หลักมูล

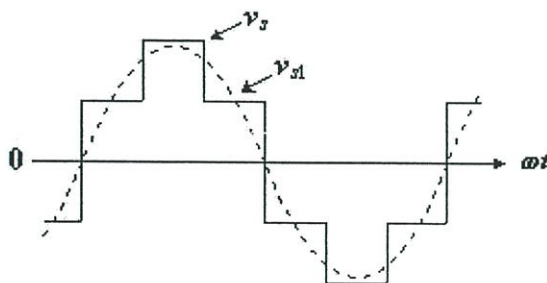
I_s = กระแสอินพุท

2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก [9,10]

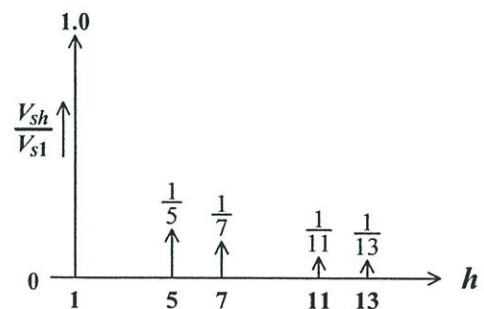
ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่หลายชนิดด้วยกันซึ่งถ้าแบ่งออกตามลักษณะของการเกิดและจำนวนเท่าของฮาร์มอนิก แบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.1.1 Harmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณที่องค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล (Fundamental component) ดังรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 6-Step และองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล ในขณะที่รูปที่ 2.2 (ข) แสดงค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกซึ่งเป็นจำนวนเท่าที่เป็นจำนวนเต็มขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล

2.1.2 Interharmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณที่ความถี่หลักมูล



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัม

(ก) สัญญาณ 6-Step และองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ 6-Step

2.1.3 Characteristic Harmonic เป็นฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้นมาจากอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า เช่น วงจรเรกติไฟเออร์ ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ชนิดของพัลส์จะเป็นตัวบอกให้ทราบถึงฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ที่ฉีดออกมาซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.17

$$h = kq \pm 1 \quad (2.17)$$

h = อันดับของฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็ม (1, 2, 3, ...)

q = จำนวนพัลส์

2.1.4 Noncharacteristic Harmonic เป็นฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้นมาจากอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า แต่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่ฉีดออกมาจะไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.17

2.1.5 Triplen Harmonic เป็นฮาร์มอนิกกลุ่มที่หารด้วย 3 ลงตัว เช่น 3, 6, 9,... ซึ่งในระบบสามเฟสสมดุลฮาร์มอนิกกลุ่มนี้มักจะรวมกันอยู่ในสายนิวทรัล

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก [2]

ระบบไฟฟ้าในอุดมคตินั้นจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่าในปัจจุบันนี้ได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคเอกชน ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้จะมีคุณสมบัติทำให้รูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์โดยจะมีปริมาณความผิดเพี้ยนมากขึ้นทุกๆปี

โดยทั่วไปแล้วเรามักเรียกกภาวะที่ทำให้รูปคลื่นทั้งแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปว่า ภาวะไม่เชิงเส้น ซึ่งเราสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ๆดังนี้คือ

2.3.1 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic devices)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เครื่องแปลงผันที่สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่น ตัวเรียงกระแส (Rectifier) , เครื่องปรับความเร็วรอบ, แหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง (Uninterruptible Power Supply : UPS) และอินเวอร์เตอร์ (Inverters) เป็นต้น ตัวอย่างรูปคลื่นและสเปกตรัมของอุปกรณ์ประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 2.2

2.3.2 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Ferromagnetic devices)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ หม้อแปลง , เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนและตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่ออุปกรณ์ประเภทนี้ได้รับแรงดันสูงเกินพิกัดจะทำให้กระแสแม่เหล็กสูงขึ้นจนทำให้แกนเหล็กของอุปกรณ์อิ่มตัวจึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นมา

2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ก (Arcing devices)

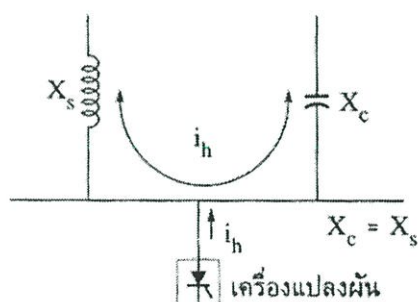
อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เต้าหอลอม และเครื่องเชื่อมไฟฟ้า อุปกรณ์พวกนี้จะเกิดฮาร์มอนิกเป็นจำนวนมากเพราะมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์ก ลักษณะการเกิดฮาร์มอนิกประเภทนี้จะไม่สามารถคาดเดาได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของลำอาร์ก และนอกจากนี้ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีทั้งที่เป็นฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม (Harmonic) และแบบไม่เป็นจำนวนเต็ม (Interharmonic)

2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า [2]

อุปกรณ์หรือเครื่องมือไฟฟ้าทุกชนิดจะถูกออกแบบมาให้ทำงานโดยได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์บริสุทธิ์ แต่ถ้าหากแหล่งจ่ายมีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนอยู่ทำให้รูปคลื่นไซน์มีการผิดเพี้ยนก็จะทำให้เกิดผลกระทบจากฮาร์มอนิกขึ้นกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่รับปริมาณฮาร์มอนิกเข้าไปซึ่งมีดังต่อไปนี้

2.4.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุหรือคาร์ปาซิเตอร์ที่ต่อเข้าไปในระบบส่วนมากจะใช้ในการแก้ไขหรือปรับปรุงเพาเวอร์แฟคเตอร์และแรงดันให้ดีขึ้น แต่ถ้าหากระบบมีฮาร์มอนิกอยู่ด้วยจะทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (parallel resonance) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อตัวเก็บประจุขนานกับระบบและเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

เมื่อพิจารณาภาวะไม่เชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งถ้าหากเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นจะทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลผ่านรีแอคแตนซ์ของระบบและตัวเก็บประจุ ซึ่งกระแสนี้จะไหลรวมกับกระแสฮาร์มอนิกของเครื่องแปลงผันด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบจึงทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนมาก ดังนั้นการเลือกขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องคำนึงถึงการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานด้วย

2.4.2 เซอร์คิตเบรกเกอร์และฟิวส์

กระแสที่มีความผิดปกติหรือกระแสที่มีฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดและต่อวงจรของเซอร์คิตเบรกเกอร์ เมื่อฮาร์มอนิกมีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูลจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ตัดวงจรด้วยความร้อน ในขณะที่ฟิวส์จะนำมาใช้สำหรับป้องกันกระแสเกินโดยจะตัดวงจรด้วยความร้อน ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ขึ้นที่ผิวฟิวส์จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมมากขึ้นจนฟิวส์หลอมละลาย

2.4.3 ตัวนำ

การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในตัวนำไฟฟ้าเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนในสายตัวนำเพิ่มขึ้นซึ่งความร้อนนี้จะมากกว่ากรณีกระแสที่เป็นไซน์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะในระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งที่ความถี่หลักมูลถ้าระบบมีความสมดุลก็จะมีกระแสไหลในสายนิวทรัล แต่ถ้าในระบบมีแหล่งจ่ายไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นแหล่งผลิตฮาร์มอนิก จะทำให้มีกระแสไหลในสายนิวทรัลซึ่งก็คือกระแสฮาร์มอนิกนั่นเอง ทำให้สายนิวทรัลมีกระแสสูงเกินที่ออกแบบที่มักจะให้สายนิวทรัลเล็กกว่าสายเมนประมาณ 1-2 เท่า ซึ่งเป็นสาเหตุให้สายนิวทรัลร้อนมากกว่าปกติ

2.4.4 หลอดไฟฟ้า

เมื่อใช้งานหลอดไฟแบบเผาไส้ (incandescent lamp) ด้วยแรงดันที่มีฮาร์มอนิกจะทำให้อายุการใช้งานของหลอดไส้สั้นลง เพราะไส้หลอดจะมีความไวต่อระดับแรงดันที่ใช้งานซึ่งถ้าหากแรงดันอาร์เอ็มเอสมีค่าสูงเกินเนื่องจากฮาร์มอนิกปะปนอยู่ในรูปคลื่นแรงดันหรือแรงดันมีความผิดปกติก็จะส่งผลกระทบต่อไส้หลอดเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานลดลง

2.4.5 รีเลย์ป้องกัน

รูปคลื่นที่มีความผิดปกติเนื่องจากฮาร์มอนิกจะมีผลต่อสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน คือ ทำให้รีเลย์ทำงานไม่ถูกต้องหรือมีความผิดพลาดในการทำงานสูง เช่น หม้อแปลงกระแสจะเป็นตัวส่งสัญญาณความผิดปกติของฮาร์มอนิกเข้าสู่รีเลย์ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รีเลย์สั่งตัดวงจรผิดพลาดไป

2.4.6 เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุน

เมื่อจ่ายแรงดันที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ให้กับเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุนจะเป็นสาเหตุให้ความร้อนสูงเกิน , เกิดการ pulsation torque ขึ้นและกำลังสูญเสียในเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งความผิดปกติของแรงดันทำให้โรเตอร์เกิดความร้อนสูงมากเกินเป็นสาเหตุที่ให้อายุการใช้งานของ

เครื่องกลไฟฟ้าสั้นลง ในขณะที่การสั้นของแรงบิดเกิดจากการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กที่ความถี่หลักมูลในช่องว่างอากาศกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกในโรเตอร์

2.4.7 หม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่มีต่อหม้อแปลง คือ มีการเพิ่มความร้อนในรูปของกำลังสูญเสียมากขึ้น เช่น กำลังสูญเสียของขดลวด , กระแสไหลวนซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสภาระและกำลังสองของความถี่ และกำลังสูญเสีย stray loss ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ ซึ่งเมื่อหม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้นมากกว่าที่พิกัดก็จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง และนอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของระบบ

2.4.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

รูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การตรวจจับแรงดันเป็นศูนย์ (zero crossing) ของความถี่หลักมูล เมื่อเกิดฮาร์มอนิกที่มีความถี่มากกว่าความถี่หลักมูลจะทำให้วงจรเหล่านี้ทำงานผิดพลาด หรือกรณีแหล่งจ่ายกำลังอิเล็กทรอนิกส์ (electronic power supplies) ที่ใช้ยอดคลื่นของแรงดันในการอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์ในส่วนของการกรอง แต่ความถี่ของฮาร์มอนิกและความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างแรงดันที่ความถี่หลักมูลและฮาร์มอนิกจะทำให้ยอดคลื่นสูงขึ้นหรือแบนราบด้วยเหตุนี้แหล่งจ่ายกำลังจึงมีแรงดันขาออกไม่คงที่หรือต่ำกว่าแรงดันที่ต้องการ

2.4.9 การรบกวนโทรศัพท์

สายโทรศัพท์ที่ติดตั้งใกล้กับสายไฟฟ้าจะมีโอกาสให้เกิดการรบกวนระบบการสื่อสารได้ถ้าหากสายไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย เนื่องจากความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงๆที่มากับสายไฟฟ้าจะมีความไวต่อการได้ยินและการตอบสนองต่อสัญญาณโทรศัพท์

2.5 มาตรฐานฮาร์มอนิก

ปัจจุบันปัญหาฮาร์มอนิกเป็นปัญหาที่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างต่อเนื่องเพราะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อระบบมีฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ด้วยเหตุนี้ทำให้ในปัจจุบันจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ IEEE 519-1992 [11] และ IEC 61000-3-2 [8] เป็นต้น

2.5.1 มาตรฐาน มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 (2000-08)

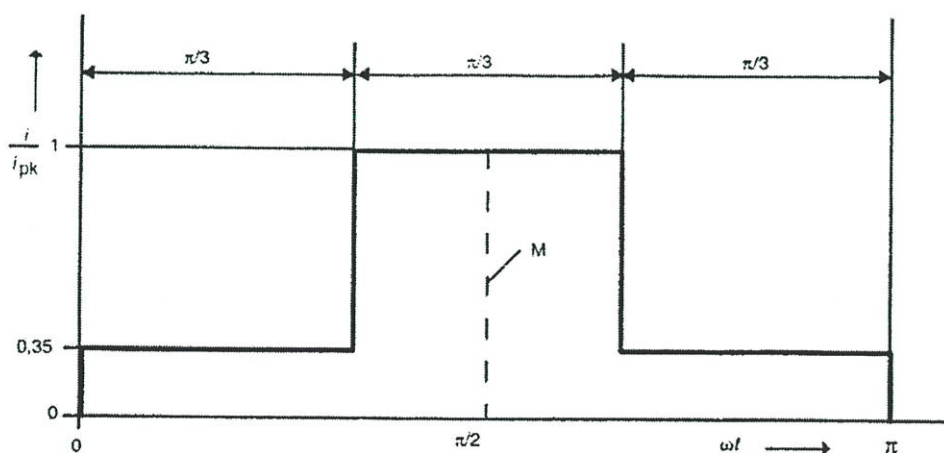
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้นโดยรับมาตรฐาน IEC 61000-3-2 (2000-08) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2 : Limits-Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A. per phase) [8] มาใช้ในระดับเหมือนกันทุกประการ (identical) โดยใช้ IEC ฉบับภาษาอังกฤษเป็นหลัก มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้เกี่ยวข้องกับขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบจ่ายไฟฟ้าสาธารณะ โดยกำหนดขีดจำกัดของส่วนประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าเข้า ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยบริษัทที่ถูกทดสอบ ภายใต้สภาวะที่ระบุมาตรฐานนี้ใช้ได้กับบริษัทที่ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส และประสงค์ให้ต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสาธารณะ ในมาตรฐานได้แบ่งระดับของภาระในการพิจารณาเพื่อจำกัดฮาร์มอนิกดังต่อไปนี้

Class A : อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลหรืออุปกรณ์อื่นที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้

Class B : อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแบบพกพาได้และมีลักษณะใกล้เคียง เช่น อุปกรณ์ในการเชื่อมต่อ

Class C : อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทให้แสงสว่างรวมทั้งตัวควบคุมการปรับแสงสว่าง

Class D : อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำให้รูปร่างกระแสผิดเพี้ยนไปเป็นพิเศษ (Special Wave Shape) ดังรูปที่ 2.4 และกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 วัตต์



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นกระแสสำหรับการพิจารณาของ Class D

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้มาตรฐานฮาร์มอนิก มอก.1448-2544 Class A ซึ่งสามารถพิจารณาค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน Class A

ฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่		ฮาร์มอนิกลำดับเลขคู่	
ลำดับฮาร์มอนิก	ค่ากระแสสูงสุด (A)	ลำดับฮาร์มอนิก	ค่ากระแสสูงสุด (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq n \leq 40$	0.23 (8/n)
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq n \leq 39$	0.15 (15/n)		

2.5.2 มาตรฐาน IEEE 519-1992

มาตรฐานฮาร์มอนิก IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System [11] เป็นฉบับที่ปรับปรุงมาจาก IEEE 519-1981 โดยมีส่วนสำคัญที่เพิ่มขึ้นมาคือข้อกำหนดของปริมาณฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้แต่ละราย (Individual Consumer) จะสามารถจ่ายกลับคืนสู่ระบบได้ที่จุดต่อร่วมของทั้งสองฝ่าย ซึ่งมีขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมระหว่างแหล่งจ่ายและภาระอื่นๆ หรืออาจใช้ในความหมายอื่นๆ เช่น จุดที่มีการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณฮาร์มอนิกกับจุดอื่นๆในระบบที่ต้องการพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิก หรือในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมนิยมใช้ในความหมายของจุดต่อร่วมระหว่างภาระแบบไม่เชิงเส้นกับภาระชนิดอื่น ทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะคงตัว (Steady State) [2] ปริมาณความผิดเพี้ยนรวมเนื่องจากฮาร์มอนิกตามมาตรฐานฮาร์มอนิก IEEE 519-1992 ได้กำหนดขีดจำกัด 2 ข้อ คือ ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสและขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันที่จุด PCC

2.5.2.1 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแส (Current Distortion Limits)

เป็นการใช้ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบของการไฟฟ้าได้ โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแส คือ เปอร์เซนต์ความต้องการความผิดเพี้ยนรวม (Total Demand Distortion : TDD) ดังสมการที่ 2.18 ซึ่งหมายถึง ค่าเปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกต่อความต้องการกระแสของภาระสูงสุด (ในช่วงเวลา 15 หรือ 30 นาที) [2] โดยที่ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายที่ 120 – 69,000 โวลต์ แสดงดังตารางที่ 2.2

$$\% TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (2.18)$$

I_h = กระแสฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ

I_L = ความต้องการกระแสของภาระสูงสุด (ที่ความถี่หลักมูล) ที่จุด PCC

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสสำหรับระบบจำหน่ายที่แรงดัน 120 V ถึง 69,000 V [11]

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_h/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<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

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

2.5.2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน (Voltage Distortion Limits)

เป็นการตรวจกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าสู่ระบบ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนเกินขีดจำกัดที่ระบุในตารางที่ 2.3 ซึ่งขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันตามตารางนี้จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้อง และควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้การทำงานที่มีคาบเวลาน้อยกว่านี้ขีดจำกัดสามารถเพิ่มถึง 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน (Total

Harmonic Voltage Distortion : THD_v) ซึ่งจะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่ความถี่หลักมูลหาได้จากสมการที่ 2.19

$$\% THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.19)$$

V_h = แรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ

V_1 = แรงดันที่ความถี่หลักมูล

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน

Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

2.6 สรุป

ในบทนี้มีเนื้อหาส่วนใหญ่เกี่ยวกับลักษณะของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ในระบบและสมการที่ใช้ในการหาค่าต่างๆเมื่อรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิก ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม ,กำลังไฟฟ้า และ เพาเวอร์แฟคเตอร์ เป็นต้น และนอกจากนี้ยังกล่าวถึงประเภทของฮาร์โมนิกและผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งในลำดับต่อไปจะได้กล่าวถึงหลักการการทำงานของเครื่องปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในแบบต่างๆ

บทที่ 3

ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน

ในปัจจุบันนี้จะพบว่าในโรงงานอุตสาหกรรมมีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟสมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติ รวมถึงข้อดีของมอเตอร์ดังกล่าว เช่น ราคาต่ำ, แข็งแรง, ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย เป็นต้น ซึ่งในบางลักษณะงานมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สามารถปรับได้ต่ำหรือสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นจึงได้มีการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นมาเรียกว่า “เครื่องปรับความเร็วรอบ” ซึ่งในปัจจุบันจะมีการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปีและจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบอื่นๆ จากหัวข้อในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงอุปกรณ์ดังกล่าวมาแล้วในเรื่องของการกำเนิดฮาร์มอนิกและในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

3.1 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้จะยุบและพองตัวตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่เคลื่อนที่ไปตัดกับตัวนำในโรเตอร์เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไปสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์นี้จะไปดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (synchronous speed : ω_s , N_s) หรือที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัสซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\omega_s = \frac{2\omega}{P} \quad \text{rad / s.} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนให้อยู่ในหน่วยของรอบต่อนาที (rpm) จะได้ดังสมการที่ 3.2

$$N_s = 60 \cdot \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad \text{rpm} \quad (3.2)$$

- N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)
 ω_s = ความเร็วซิงโครนัส (rad / s)
 ω = ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (rad / s)
 f = ความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

สลลิป (Slip, S) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความเร็วสลลิป (ω_{sl}) ต่อความเร็วซิงโครนัส (ω_s) เขียนดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (3.3)$$

$$S = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (3.2)$$

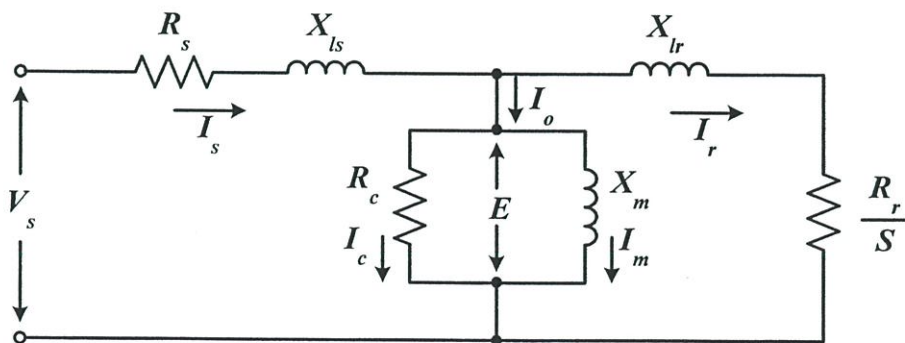
S = สลลิป

ω_{sl} = ความเร็วสลลิป (rad / s)

ω_r = ความเร็วโรเตอร์ (rad / s)

3.1.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นจะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงแต่จะต่างกันตรงขดลวดทุติยภูมิ กล่าวคือ ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่แต่กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นขดลวดทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ซึ่งก็คือโรเตอร์ของมอเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.1 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

- V_s = ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส
 R_s = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
 R_r = ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
 R_c = ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
 X_m = ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก
 X_{ls} = ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
 X_{lr} = ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
 I_s = กระแสสเตเตอร์
 I_r = กระแสโรเตอร์
 I_c = กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
 I_m = กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

3.1.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้าอินพุต} \quad P_{in} = 3 V_s I_s \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์} \quad P_{ls} = 3 I_s^2 R_s \quad (3.4)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap)} \quad P_g = 3 I_r^2 \frac{R_r}{S} \quad (3.5)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์} \quad P_{lr} = 3 I_r^2 R_r \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าทางกล} \quad P_{em} &= P_g - P_{lr} \\ &= \frac{3 I_r^2 R_r (1 - S)}{S} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่เพลลา} \quad P_{sh} = P_{em} - P_{fw} \quad (3.8)$$

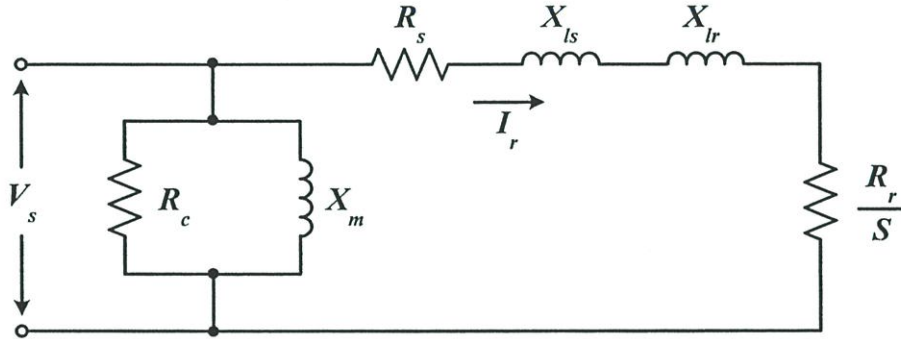
P_{fw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม

$$\text{แรงบิดของมอเตอร์} \quad T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3 I_r^2 R_r}{S \omega_s} \quad (3.9)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P} \quad (3.10)$$

แทนค่าสมการที่ 3.10 ลงในสมการที่ 3.9 จะได้

$$\text{แรงบิดของมอเตอร์} \quad T_{em} = \frac{3I_r^2 R_r P}{4\pi f S} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.1 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 3.2 ซึ่งค่ากระแส I_r สามารถหาได้ดังนี้

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (3.12)$$

เมื่อค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดหาได้จากสมการที่ 3.13

$$S_m = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (3.13)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (R_s, X_{ls}) ซึ่งไม่มีผลต่อกำลังทางด้านเอาต์พุตของมอเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$I_r = \frac{SV_s}{\sqrt{R_r^2 + S^2 X_{lr}^2}} \quad (3.14)$$

$$S_m = \frac{R_r}{X_{lr}^2} \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการที่ 3.14 และ 3.15 ลงในสมการที่ 3.11 จะได้สมการแรงบิดสูงสุดดังสมการ 3.16

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi fX_{lr}} \quad (3.16)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ และ $X_{lr} = 2\pi fL_{lr}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.16 จะได้

$$T_m = \frac{3P\left(\frac{V_s}{f}\right)^2}{16\pi^2 L_{lr}} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อ อัตราส่วน $\left(\frac{V_s}{f}\right)$ มีค่าคงที่ด้วย

3.2 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปที่ 3.1 ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ (B) จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสรอบขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage : E) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่ายและเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (3.18)$$

e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s = จำนวนรอบของขดลวด

ϕ = ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_m \sin \omega t$ (3.19)

แทนค่าสมการที่ 3.19 ลงในสมการที่ 3.18 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 3.20

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (3.20)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ เมื่อแทนค่า $\cos \omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการที่ 3.14 เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E = 4.44 N_s \phi f k_w \quad (3.21)$$

k_w = winding factor

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การปรับเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่แตกต่างกันมากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ในการปรับความถี่ของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่ละเอียดมากกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่ทั้งนี้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย ซึ่งจากรูปที่ 3.1, สมการที่ 3.17 และ 3.21 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, E, ϕ และ T ดังนี้

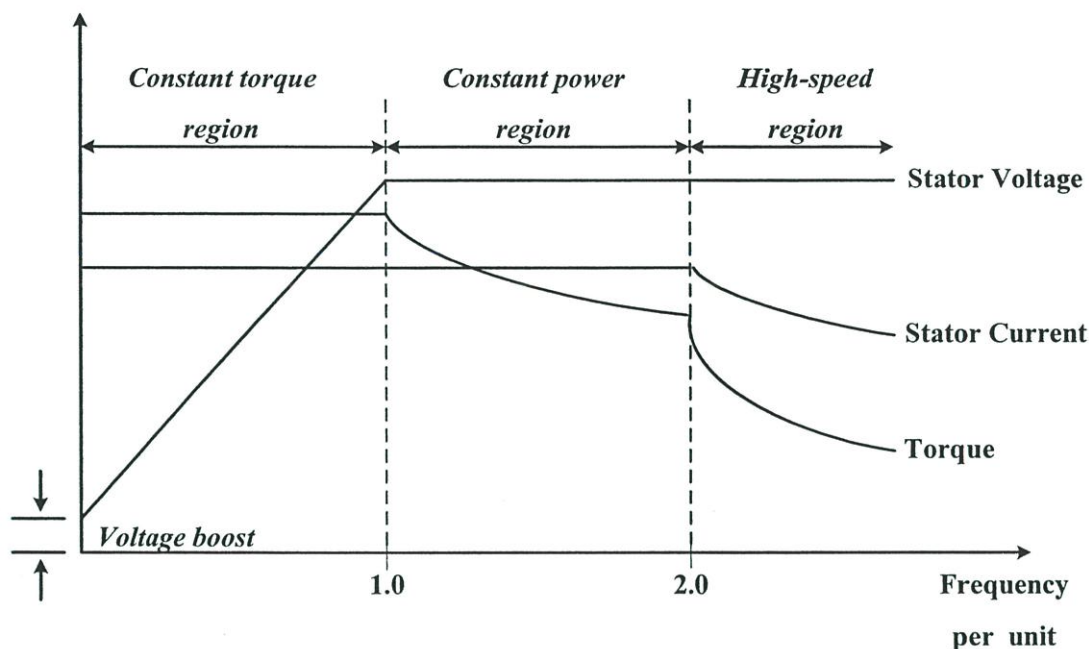
$$V_s \approx E \quad (3.22)$$

$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2, \left(\frac{E}{f}\right)^2 \quad (3.23)$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \quad (3.24)$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ $\left(\frac{V_s}{f}\right), \left(\frac{E}{f}\right)$ มีค่าคงที่ จึงจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ตั้งแต่ที่ระดับความถี่ต่ำถึงความถี่ที่พิกัดเราเรียกการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบนี้ว่า " การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage Variable Frequency : VVVF) " ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยสามารถแบ่งช่วงของการควบคุมความเร็วได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

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



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสมอเตอร์กับความถี่

3.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจะต้องทำให้ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าช่วงดังกล่าวขนาดของแรงดันสเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆค่าของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ เนื่องจาก ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ และในช่วงการทำงานนี้ค่ากระแสมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่า ช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

3.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัดได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่มีค่าลดลง จะเป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงด้วยและขีดจำกัดกระแสโรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่ช่วงนี้ค่าแรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 3.25

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} \cdot T_{rated} \quad (3.25)$$

$$P_{em,max} = \omega_r \cdot T_{em,max} \quad (3.26)$$

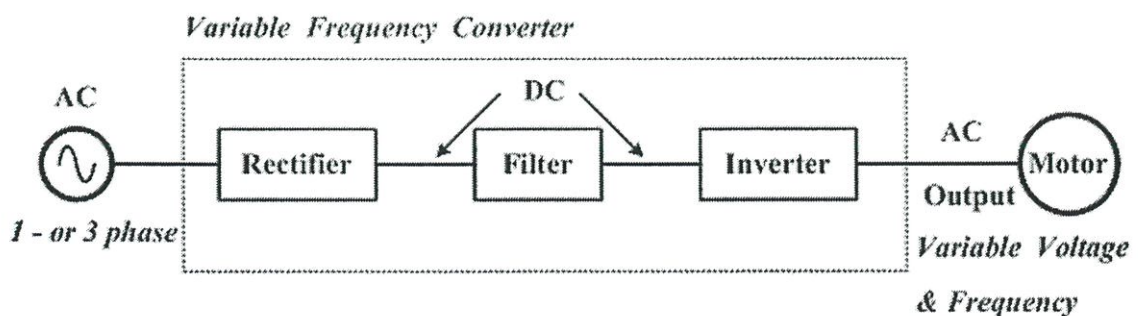
สมการที่ 3.26 จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกลซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เราเรียกช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังคงที่ (Constant Power Region)

3.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตมีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่มีความถี่ที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่นั่นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

3.3 ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ระบบเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับซึ่งอาจจะเป็น 1 เฟส หรือ 3 เฟส จ่ายไฟฟ้าเข้าเครื่องปรับความเร็วรอบโดยผ่านการแปลงผันสัญญาณจากไฟฟ้ากระแสลับเป็นกระแสตรงเราเรียกววงจรในส่วนนี้ว่าวงจรแปลงผัน แต่สัญญาณไฟตรงที่ได้จากวงจรดังกล่าวยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณ (Ripple) จึงต้องมีการกรองสัญญาณที่มีการกระเพื่อมให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้นเรียกววงจรส่วนนี้ว่าวงจรกรอง (Filter) หลังจากนั้นจะเป็นหน้าที่ของวงจรที่แปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในส่วนนี้จะมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และในส่วนสุดท้ายจะเป็นมอเตอร์ที่ถูกควบคุม



รูปที่ 3.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ

เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะต้องมีความสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ ดังนั้นเครื่องปรับความเร็วรอบที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

- สามารถปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
- สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
- สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดที่ต้องการ

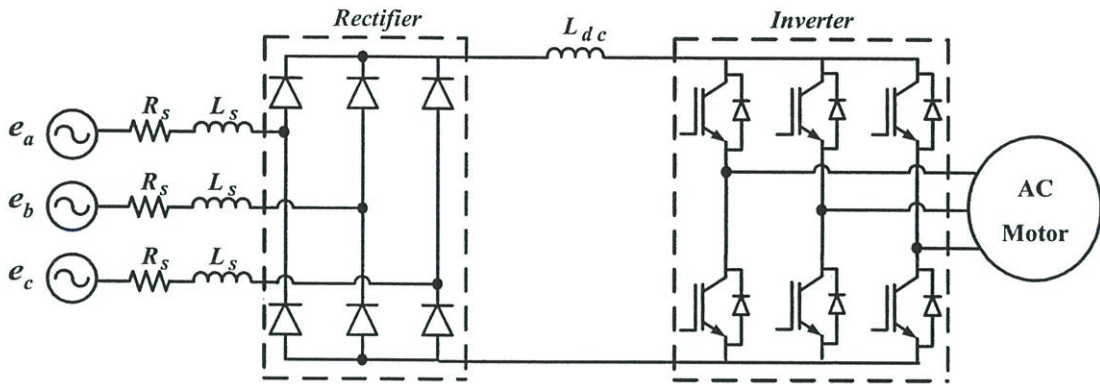
ภายในโครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบในส่วนของกรรกรองและการแปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับ ซึ่งสามารถจำแนก ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)
2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

โดยการบอกชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบก็จะบอกตามประเภทของอินเวอร์เตอร์ ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)

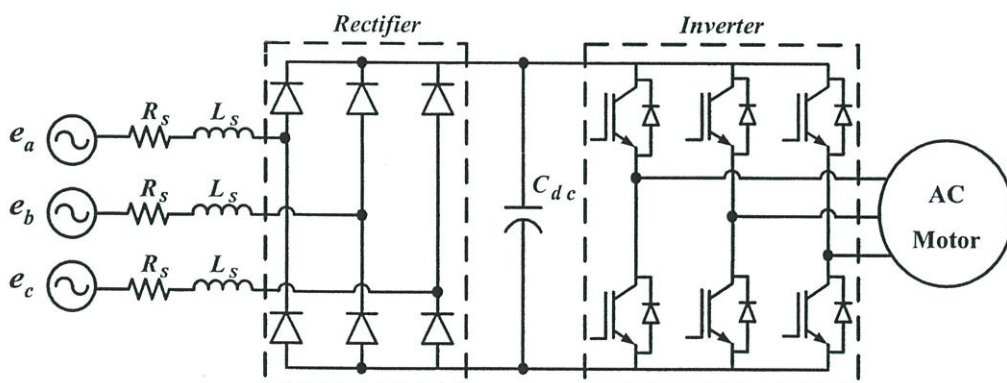
วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสแสดงดังรูปที่ 3.5 จะประกอบด้วย ไดโอด แบบ 6 พัลส์ ทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรงที่มีการกระเพื่อมและมีอินดักเตอร์ต่ออนุกรมใช้ในการกรองสัญญาณไฟตรงให้เรียบขึ้นและในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะใช้ไอจีบีทีเพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ รูปคลื่นกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที เช่น เทคนิค 6 Step หรือ PWM ซึ่งข้อดีของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวก็คือรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์แต่จะมีการเกิดสไปคขึ้นเนื่องจากการคอมมิวเตท และนอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงความถี่เอาต์พุตที่ปรับค่าได้ในช่วงแคบๆและที่สำคัญจะต้องทำงานในสภาวะที่มีภาระเท่านั้น โดยส่วนมากแล้วอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขนาดแรงม้าสูงๆ



รูปที่ 3.5 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

โครงสร้างทางด้านวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะมีลักษณะคล้ายๆ กับแบบแหล่งจ่ายกระแส แต่จะแตกต่างกันตรงในส่วนของการกรองสัญญาณไฟตรง กล่าวคือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะใช้คาร์ปาซิเตอร์ที่มีค่าความจุสูงๆมาใช้ในการกรองสัญญาณ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับภาระ และโดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์แบบนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6 Step Inverter และ PWM Inverter ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน คือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย และปรับความถี่ได้ในย่านกว้างๆ ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาลัดวงจรของสวิตช์ในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะแก้ไขโดยใช้วงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว และลักษณะของวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter มากกว่าแบบ 6 Step ทั้งนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบบ 6 Step จะมีปัญหาในเรื่องฮาร์มอนิก

นิกอันดับต่ำที่เกิดขึ้นทั้งจากรูปคลื่นแรงดันและกระแสนั่นเองในขณะที่อินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ และในลำดับต่อไปในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter ทั้งนี้เพราะในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบ

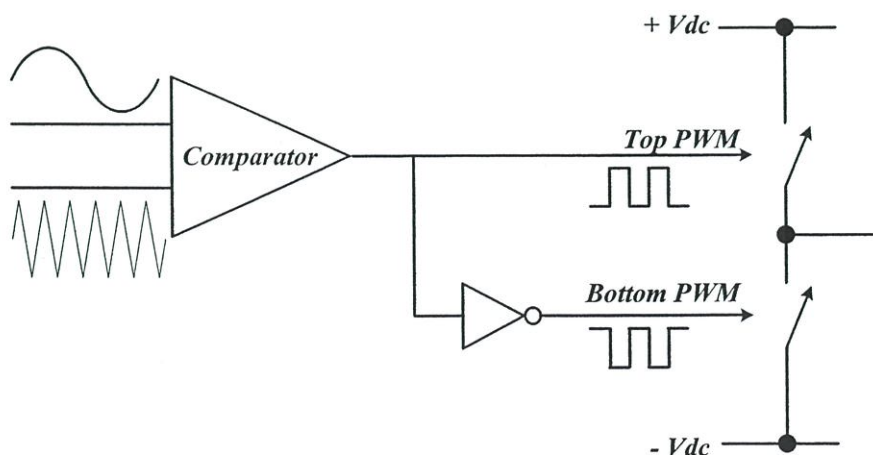
3.4 เทคนิคการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบ

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงชนิดและประเภทของเครื่องปรับความเร็วรอบแบบต่างๆและในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมเปิด-ปิด สวิตซ์ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ซึ่งมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกันและแต่ละเทคนิคก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุม 2 ชนิด ได้แก่

- เทคนิค Sinusoidal Pulse Wide Modulation (SPWM)
- เทคนิค Space Vector Pulse Wide Modulation (SVPWM)

3.4.1 เทคนิค Sinusoidal Pulse Wide Modulation (SPWM)

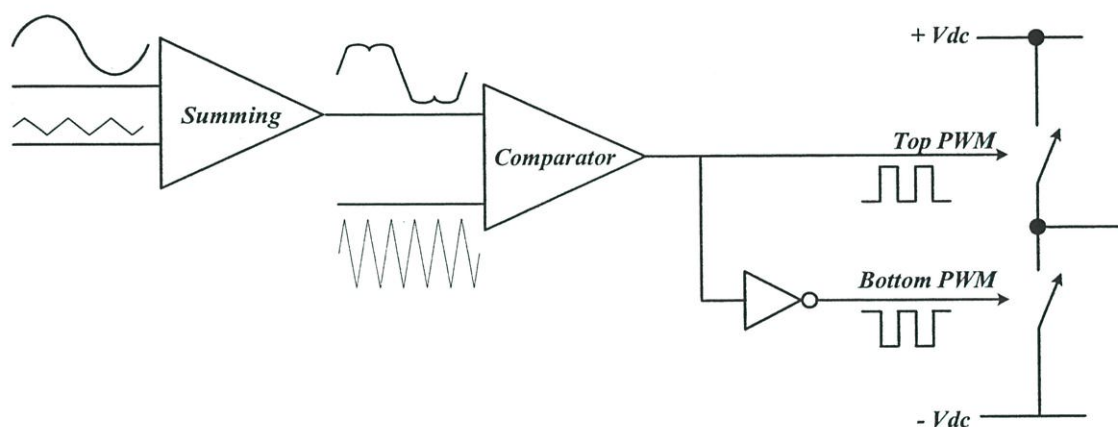
เทคนิคนี้จะใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของแรงดันที่จ่ายให้กับ มอเตอร์ที่ต้องการควบคุมความเร็วมาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เรียกว่าสัญญาณพาหะ ซึ่งผลของการเปรียบเทียบจะเกิดจุดตัดกันของสัญญาณทั้งสองและจุดตัดนี้จะทำให้ได้สัญญาณที่นำไปใช้ในการควบคุมสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นตัวอย่างหลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์ 1 กิ่ง และเมื่อจะนำไปทำการควบคุมทั้ง 3 กิ่ง จะต้องใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงอีก 2 สัญญาณที่มีเฟสล่าหลังเฟสแรก 120 และ 240 องศาทางไฟฟ้า ตามลำดับ ในขณะที่สัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะใช้สัญญาณเดียวกัน



รูปที่ 3.7 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM

3.4.2 เทคนิค Space Vector Pulse Wide Modulation (SVPWM)

เทคนิค SVPWM นี้จะอธิบายหลักการพื้นฐานการสร้างจากแบบอนาล็อกเพื่อให้ง่ายในการเข้าใจอีกทั้งมีคุณสมบัติเหมือนกันกับแบบดิจิทัล โดยที่เทคนิคนี้สัญญาณไซน์อ้างอิงจะนำไปรวมกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เป็น 3 เท่า และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณไซน์อ้างอิง ทำให้ได้สัญญาณที่นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะและได้สัญญาณที่นำไปควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SVPWM

ในปัจจุบันเทคนิคนี้จะเป็นเทคนิคที่นำมาใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเมื่อนำมาเขียนเป็นคำสั่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สะดวก และนอกจากนี้เทคนิคดังกล่าวยังมีข้อดีในเรื่องการแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่หลักมูลสูงกว่าเทคนิคแบบ SPWM เช่น ถ้าเปรียบเทียบเทคนิคทั้งสองเมื่อแรงดันดีซีเท่ากันโดยให้มีดัชนีการมอดดูเลทเท่ากับ 1 แล้ว เทคนิค SVPWM จะได้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าเทคนิค SPWM ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้งานจริงในทางอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาดพิกัด 5.5 kW. แรงดันอินพุต 380-400 V. กระแส 12 A. ซึ่งใช้เทคนิคแบบ SVPWM มาใช้ในการควบคุมการสวิตช์ในส่วนของวงจรมอเตอร์ โดยเครื่องปรับความเร็วรอบดังกล่าวจะใช้ในการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.2 kW. แรงดัน 220/380 V. กระแส 8.6/5.0 A. 4 Pole , 50 Hz และความเร็วรอบที่พิกัด 1,420 rpm.

3.5 สรุป

ในบทนี้จะมีเนื้อหาเกี่ยวกับหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่างๆ โดยใช้เครื่องปรับความเร็วรอบประเภทต่างๆ รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบซึ่งในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคแบบ SPWM และ SVPWM ซึ่งจะใช้ในการสร้างระบบจำลองโดยจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 4

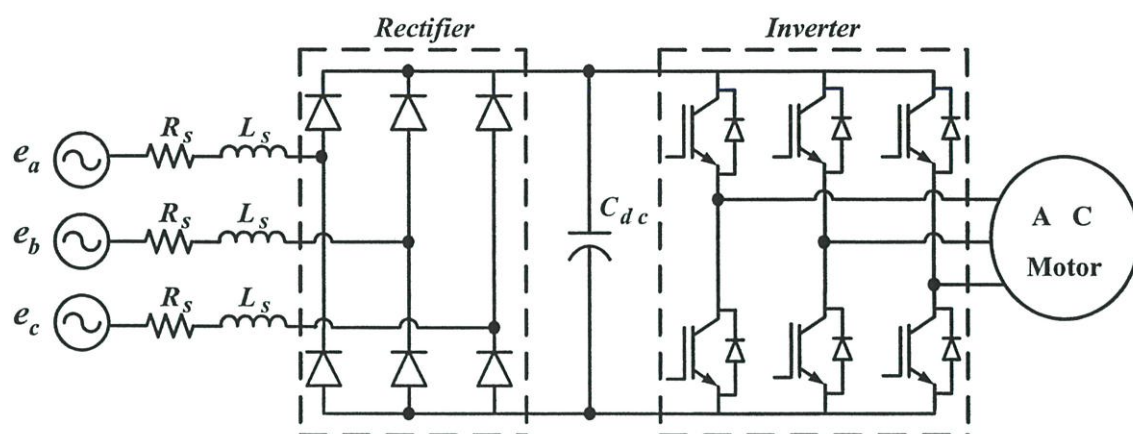
หลักการงานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับ เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงฮาร์มอนิกที่เกิดจากภาระที่ไม่เชิงเส้นและทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส รวมถึงชนิดและเทคนิคที่ใช้ในการควบคุม ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบต่างๆ แต่ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการงานของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ไดโอดในการกรองแรงดันและต่อแบบ 6 พัลส์ โดยจะกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทั้งจากกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล รวมถึงการติดตั้งใช้ค่าน้ำ ASD โดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีภาระที่ระดับต่างๆ

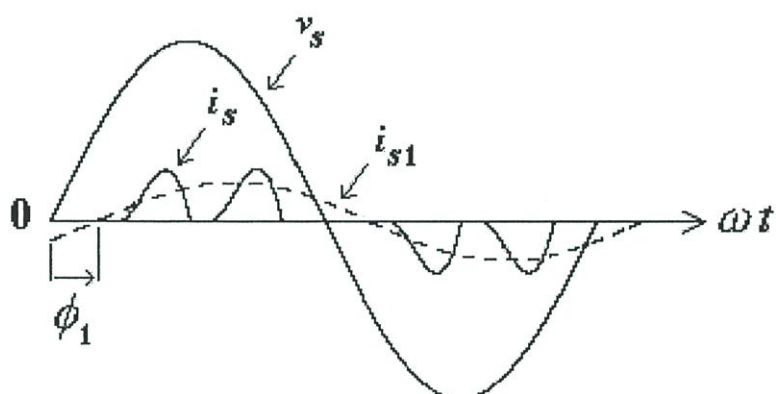
4.1 หลักการงานของเครื่องปรับความเร็วรอบ [1]

จากโครงสร้างของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายพลังงานให้กับระบบ ASD โดยผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ 3 เฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุทเป็นไฟตรง แต่สัญญาณไฟตรงที่ได้ยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณจึงต้องกรองสัญญาณดังกล่าวให้เป็นไฟตรงโดยใช้คาร์ปาซิเตอร์ และสัญญาณที่ได้จะเป็นแรงดันไฟตรงที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรในสวิตเซอร์เตอร์ซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟตรงให้เป็นสัญญาณไฟสลับโดยอาศัยการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยที่เทคนิคที่ใช้ควบคุมให้สวิตซ์ดังกล่าวทำงานนั้นจะมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ จะทำให้ได้สัญญาณไฟสลับที่สามารถควบคุมความถี่ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการขับภาระแบบต่างๆ จากการทำงานของ ASD จะพบว่าระบบ ASD จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกออกมา 2 ส่วนได้แก่ ในส่วนของแหล่งจ่ายอินพุท คือ กระแสอินพุทที่จ่ายเข้าไปในระบบจะไม่ใช่สัญญาณไซน์เนื่องจากไดโอดเรกติไฟเออร์และคาร์ปาซิเตอร์จะเป็นตัวกำหนดให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุทแสดงดังรูปที่ 4.2 ในขณะที่ฮาร์มอนิกในส่วนของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเกิดจากการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณแรงดันที่ได้จะประกอบด้วยแรงดันที่ความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิก แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแรงดันไลน์ที่จ่ายเข้าไปยังมอเตอร์นี้จะทำให้การสูญเสียที่เกิดจากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นจากกรณี

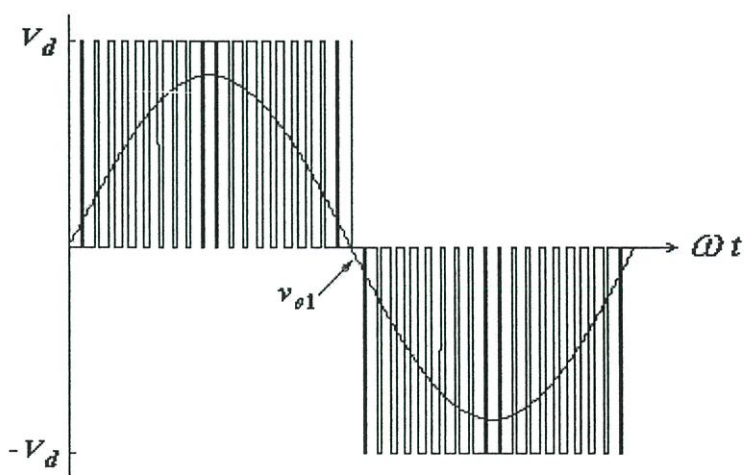
แรงดันเป็นไซน์ จากรูปที่ 4.2 กระแสอินพุท (i_s) เป็นรูปกระแสต่อเฟสซึ่งเกิดจากกระแสไหลเข้าแต่ละขั้วเซลล์ไดโอดจะมีการนำกระแส 2 ครั้ง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุทของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันของ ASD ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

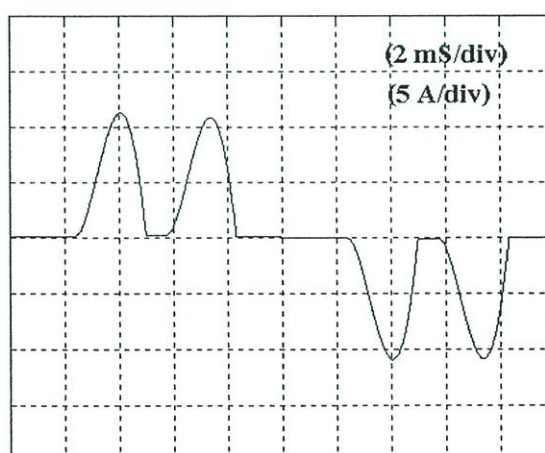
รูปคลื่นกระแสอินพุทจากรูปที่ 4.2 นั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่ความถี่และองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ของวงจรเรกติไฟเออร์ดังสมการที่ 2.17

ดังนั้นจากโครงสร้างของวงจรเรกติไฟเออร์ดังรูปที่ 4.1 และ รูปคลื่นกระแสอินพุทดังรูปที่ 4.2 องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่ฉีดออกมาสู่ระบบได้แก่ อันดับที่ 5, 7, 11, 13, ... เป็นต้น ในขณะที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 และนอกจากนี้ค่า %THDi กระแสอินพุทที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ในขณะที่ค่า %THDv ของแรงดันจากรูปที่ 4.3 คำนวณได้จากสมการที่ 2.19

$$\% THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (4.1)$$

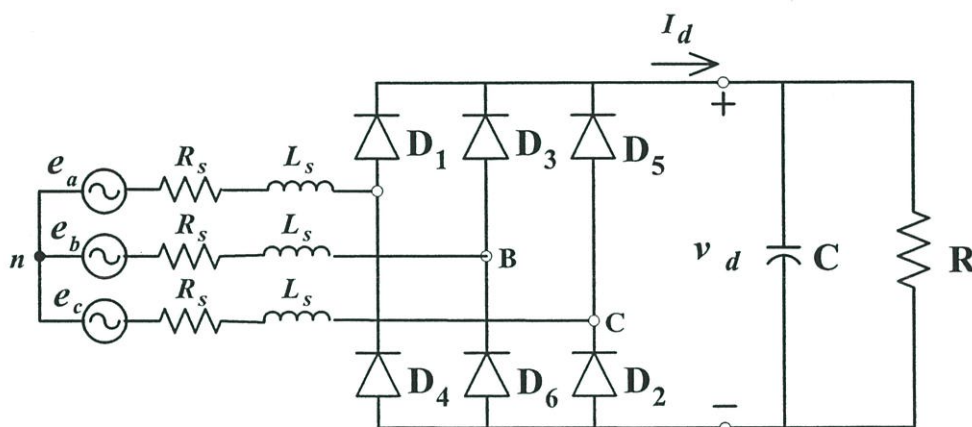
4.1.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุท 3 เฟส อยู่ในสภาวะสมดุลรูปคลื่นกระแสอินพุทของ ASD แสดงดังรูปที่ 4.4 และองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆจะเป็นไปตามสมการที่ 4.1 ดังนั้นจากโครงสร้างของ ASD กรณีดังกล่าวอันดับฮาร์มอนิกที่ฉีดออกมาสู่ระบบได้แก่ 5, 7, 11, 13, ... เป็นต้น ในขณะที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์คำนวณได้จากสมการ 2.15 และ 2.16



รูปที่ 4.4 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าลักษณะของรูปคลื่นกระแสอินพุตต่อเฟสในไซเคิลบวกจะมีการนำกระแส 2 ครั้ง และไซเคิลลบก็มีการนำกระแสอีก 2 ครั้ง แต่ทั้งนี้กระแสเฟสดังกล่าวจะมีช่วงการทำงานทั้งหมด 6 ช่วงเวลาซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไปซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของวงจรไดโอดแบบ 6 พัลส์ ,คาร์ปาทิเตอร์กรองแรงดันและภาวะ เพื่อเป็นตัวอย่างที่ง่ายในการวิเคราะห์ห้ถึงการการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุต

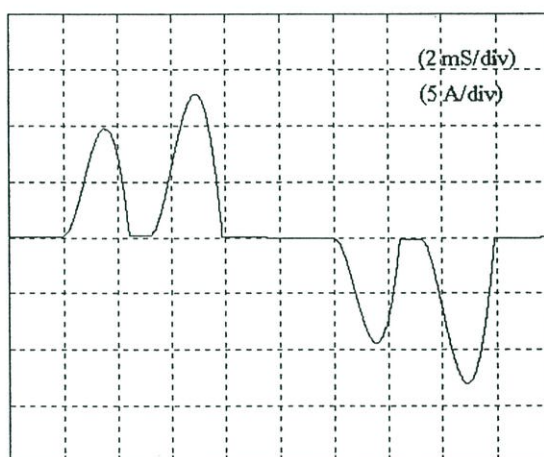


รูปที่ 4.5 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์

ให้ได้รูปคลื่นเหมือนไฟตรงจำนวน 2 รูปคลื่น แต่ทิศทางจะเป็นลบ จึงทำให้ได้รูปคลื่นกระแสอินพุทเฟส A ดังรูปที่ 4.4

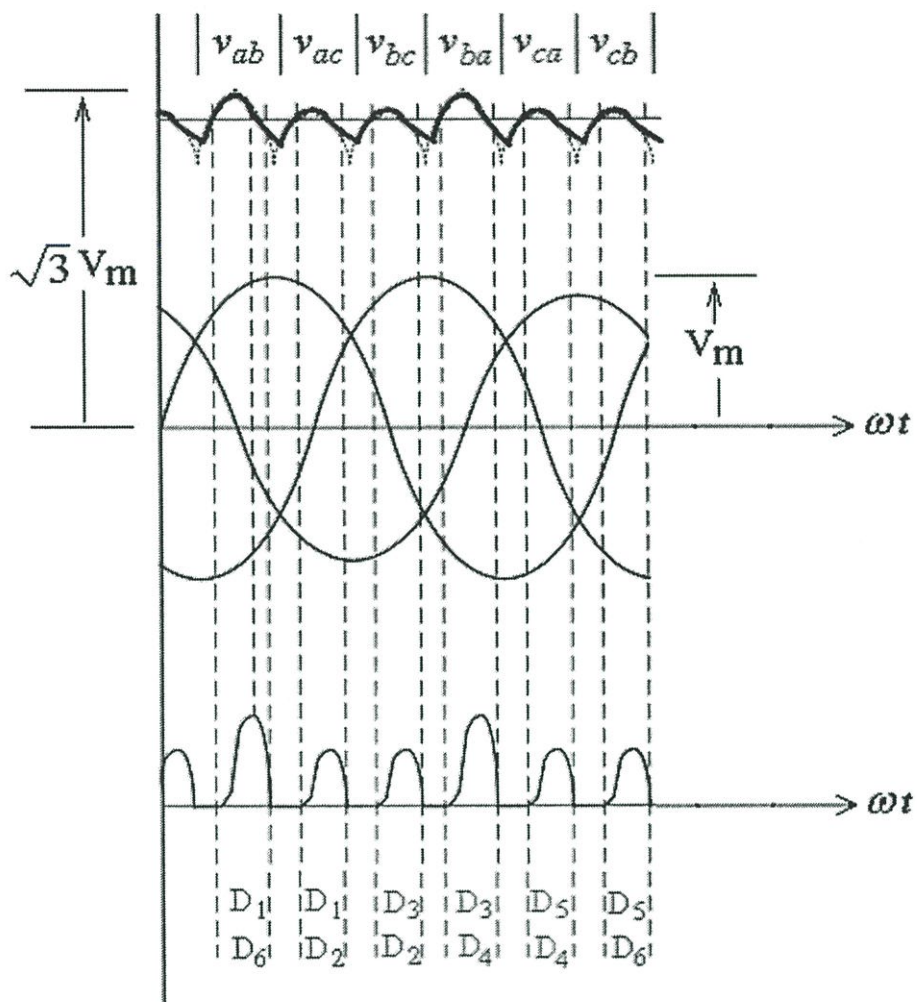
4.1.2 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล

เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุทอยู่ในสภาวะไม่สมดุล รูปคลื่นกระแสอินพุททั้ง 3 เฟสจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าแอมพลิจูดของกระแสทั้ง 2 รูปคลื่นในแต่ละไซเคิลจะมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้ค่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่ฉีดออกมาจะไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.17 แต่จะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกกลุ่มที่หารด้วย 3 ลงตัว (triplen harmonic) ออกมาด้วย เช่น 3, 6, 9, ... เป็นต้น และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดฮาร์มอนิกเลขคู่ด้วยแต่มีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้นำมาพิจารณา



รูปที่ 4.7 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล

โหมดการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์ในกรณีดังกล่าวจะยังคงเหมือนกับกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าต่ำหรือสูงกว่าเฟสอื่นๆที่เหลือจะทำให้แรงดันไฟตรงมีการกระเพื่อม จึงทำให้ช่วงเวลาของกระแสอินพุทไหลผ่านไดโอดแต่ละช่วงนานหรือสั้นแล้วแต่กรณีแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุลและลำดับเฟสทำให้แอมพลิจูดทั้ง 2 รูปคลื่น ของรูปคลื่นกระแสเฟสในไซเคิลบวกหรือลบไม่เท่ากัน จากรูป 4.8 แสดงโหมดการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์ กรณีแรงดันเฟส C ต่ำกว่าแรงดันเฟส A, B จะพบว่าแอมพลิจูดของกระแสไฟตรงที่ได้ในแต่ละช่วงการนำกระแสของไดโอดจะสูงและต่ำไม่เท่ากันดังนั้นจึงทำให้กระแสอินพุทแต่ละเฟสแตกต่างกันด้วย และส่งผลต่อค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบลดต่ำลงจากกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลย์ของแรงดัน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.2



รูปที่ 4.8 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง

$$\%PVUR = \frac{\text{MAX} \left\{ |V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}| \right\}}{V_{avg}} \quad (4.2)$$

$\%PVUR$ = เปอร์เซนต์แรงดันไม่สมดุลต่อเฟส

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

V_a, V_b, V_c = แรงดันแต่ละเฟส

ในทางปฏิบัตินั้นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสจะต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 1-2 โวลต์) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบการไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่าย 6 สภาวะเพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่แหล่งจ่ายสมดุล โดยมีค่าตามตารางที่ 4.1

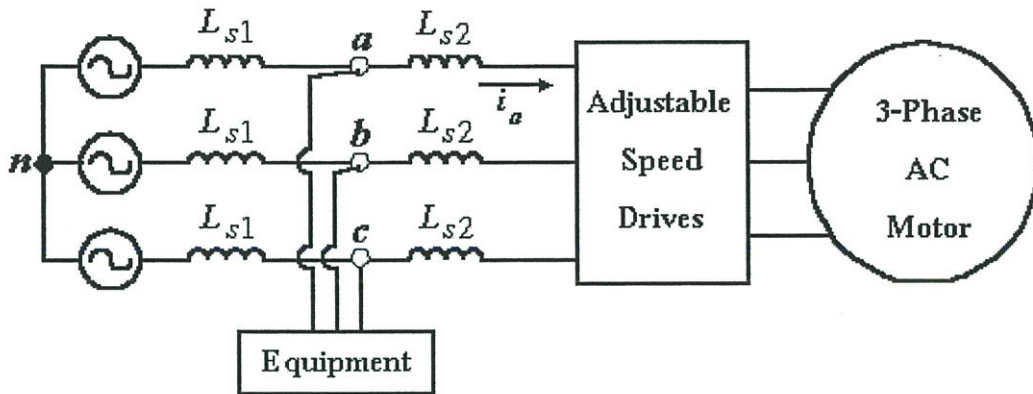
ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าในสภาวะต่างที่ใช้ในการทดสอบกรณีไม่สมดุล 1 เฟส

%PVUR	V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์	ความหมาย
0	220	220	220	B	แรงดันสมดุล
1	220	220	223.5	1%-O	แรงดันไม่สมดุล 1%แบบ over voltage
1	220	220	216.5	1%-U	แรงดันไม่สมดุล 1%แบบ under voltage
3	220	220	230	3%-O	แรงดันไม่สมดุล 3%แบบ over voltage
3	220	220	210	3%-U	แรงดันไม่สมดุล 3%แบบ under voltage
5	220	220	237	5%-O	แรงดันไม่สมดุล 5%แบบ over voltage
5	220	220	204	5%-U	แรงดันไม่สมดุล 5%แบบ under voltage

โดยทั่วไปแล้วในการควบคุมกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ แต่ทางศูนย์ควบคุมจะพยายามให้เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกการทดสอบกรณีแรงดันไม่สมดุลที่ระดับสูงสุดที่ $\pm 5\%$

4.2 การติดตั้งใช้คัตหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ

จากรูปคลื่นกระแสอินพุทจะพบว่ารูปคลื่นจะอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องซึ่งค่า %THDi จะค่อนข้างสูง ระบบ ASD ที่จ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ค่า %THDi ขึ้นอยู่กับภาระของมอเตอร์ด้วย กล่าวคือเมื่อมอเตอร์มีภาระหนักค่า %THDi จะต่ำกว่าเมื่อมอเตอร์มีภาระเบา แต่ก็ยังมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูง ซึ่งจากคุณสมบัติของอินดักเตอร์นั้นจะทำให้กระแสไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดทำให้กระแสอินพุทมีความต่อเนื่องซึ่งเมื่อนำอินดักเตอร์(ใช้ค) มาติดตั้งด้านหน้า ASD จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทมีความต่อเนื่องมากขึ้นทำให้ค่า %THDi และกระแสอาร์เอ็มเอสลดลง และยังเป็นการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบให้สูงขึ้น โดยการติดตั้งใช้ค(L_{S2}) ด้านหน้า ASD แสดงดังรูปที่ 4.9 และ L_{S1} หมายถึงอินดักเตอร์ของแหล่งจ่ายและจุด a,b และ c หมายถึงจุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้ไฟรายอื่นๆ



รูปที่ 4.9 การติดตั้งใช้ค (L_{s2}) ด้านหน้า ASD

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษารณที่มี การติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD โดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในส่วนของคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุท, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุท, ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบและมาตรฐานฮาร์มอนิกโดยในการออกแบบใช้คที่จะทำการติดตั้งด้านหน้า ASD นั้นจะออกแบบโดยอ้างอิงจากค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล ทั้งจากการจำลองและการทดสอบในสภาวะที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะที่สมดุล ทั้งนี้จะพิจารณาถึงค่าอินดักแตนซ์ของใช้คที่เหมาะสมโดยทำการปรับค่าแรงดันตกคร่อมใช้คที่ค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆของแรงดันไลน์ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 [1]

$$\omega L_{s2} I_{a1} \geq (\%V) \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

(%V) = ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมใช้ค

ω = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)

L_{s1} = อินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย

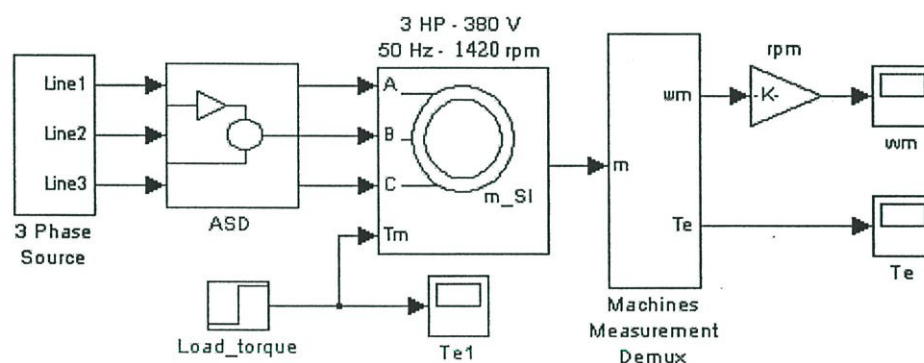
L_{s2} = ใช้คที่ติดตั้งด้านหน้า ASD

I_{a1} = กระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล

V_{LL} = แรงดันไลน์ ที่จุด PCC

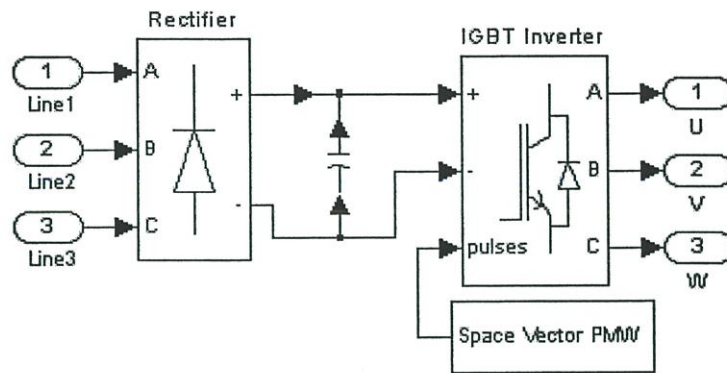
จากสมการที่ 4.3 ในการคำนวณหาค่าอินตีกแตนซ์ของใช้ค อธิบายได้ดังนี้คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมใช้ค (% V) หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของแรงดันแหล่งจ่ายต่อเฟสที่จุดต่อร่วม ซึ่งกำหนดให้ตกคร่อมใช้คที่ความถี่หลักมูล โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดค่าไว้ คือ 3% , 5% และ 7% เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทที่ลดลง , เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ , กำลังไฟฟ้าอินพุท และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุท รวมถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์และของระบบ ในขณะที่ I_{a1} คือค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล ที่ยังไม่ได้มีการติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD ซึ่งได้จากการทดสอบเมื่อมอเตอร์มีภาระสูงสุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกทดสอบภาระสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งค่ากระแสอินพุทที่ได้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณหาค่าอินตีกแตนซ์ของใช้คที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆดังที่กล่าวไว้แล้ว โดยค่าอินตีกแตนซ์ของใช้คที่คำนวณได้จะแสดงในบทต่อไป

4.3 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink

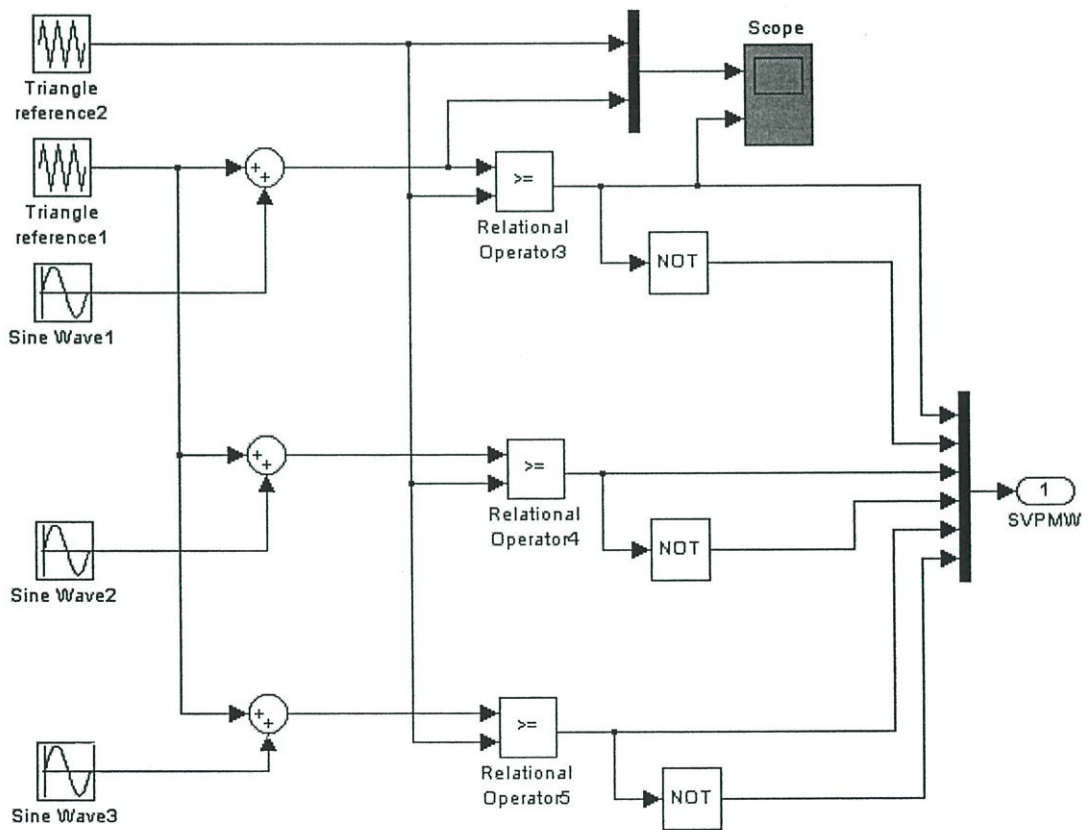


รูปที่ 4.10 ระบบ ASD ที่ใช้ในการจำลอง

วงจรที่ใช้ในการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งแบ่งโมดูลออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 380 V. 50 Hz ส่วนที่ 2 เป็นแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบ ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ใช้ไดโอดต่อแบบบริดจ์ชนิด 6 พัลส์ และใช้คาปาซิเตอร์ขนาด $1,500 \mu\text{F}$ กรองให้ได้ไฟตรงเพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสใช้เทคนิคการมอดดูเลชันแบบ สเปซเวกเตอร์ ความถี่สวิตช์ 3 kHz ซึ่งภายในแบบจำลอง ASD แสดงดังรูปที่ 4.11 ส่วนที่ 3 เป็นแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดกรงกระรอกซึ่งมีพิกัด แรงดัน 380 V , 5 A , 50 Hz , 4 Pole , 3 HP และ ความเร็วรอบ 1,420 rpm ที่พิกัด และในส่วนที่ 4 เป็นแบบจำลองของเครื่องมือวัดที่แสดงผลของความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 4.11 แบบจำลองของ ASD



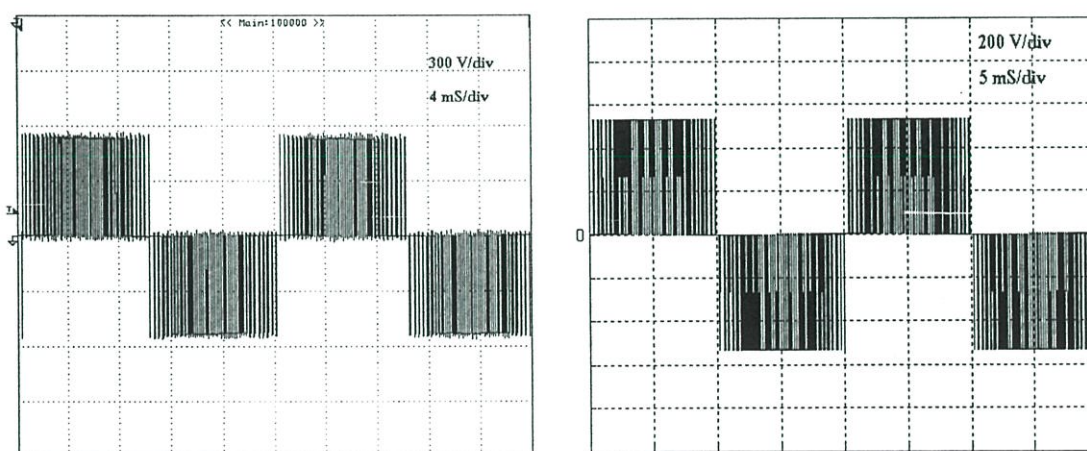
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการกำเนิดสัญญาณควบคุมโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์

4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าที่อ้างอิงมาจากระบบจริงเสียก่อน เช่น ค่าพิกัดต่างๆของเครื่องปรับความเร็วรอบ และ ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แล้วนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้ไปใส่ในระบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของใช้คที่จะนำไปติดตั้งด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านต่างๆ เช่น คุณภาพของรูปคลื่นทางด้านอินพุท, เพาเวอร์แฟคเตอร์ และ ประสิทธิภาพของระบบ โดยทำการศึกษาทั้งในกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งจะได้ทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ในงานจริง

4.4.1 ค่าพิกัดของเครื่องปรับความเร็วรอบ

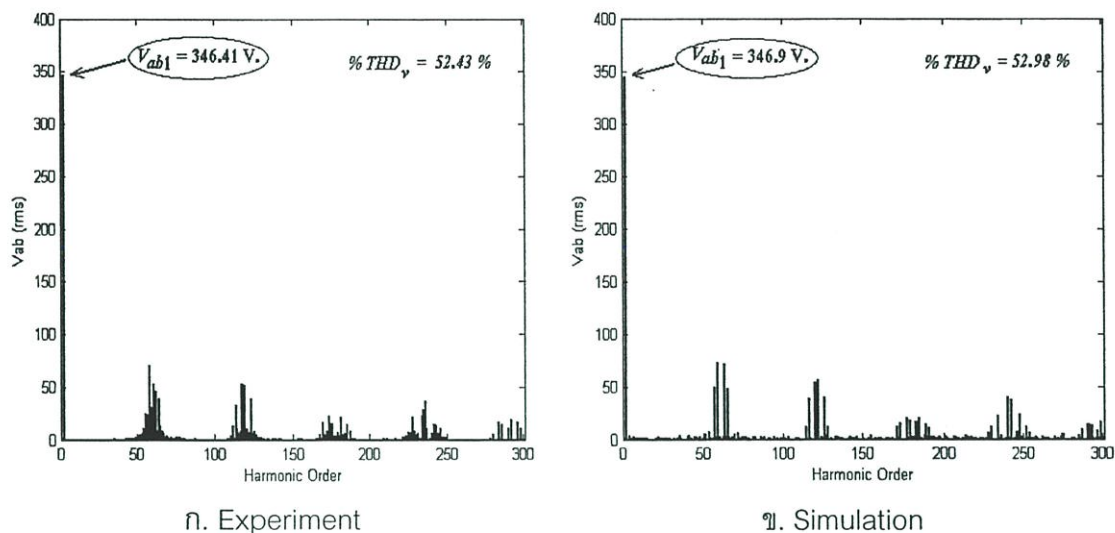
ระบบจำลองที่สร้างขึ้นจะต้องพิจารณาจากค่าแรงดันเอาท์พุทของเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบจริงซึ่งมีความถี่สวิตซ์ที่ 3 kHz และใช้เทคนิคการควบคุมสวิตซ์แบบ สเปซเวกเตอร์ จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 ได้ทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไลน์จากการทดสอบและการจำลอง และสเปกตรัมของแรงดันดังกล่าวซึ่งจะพบว่าองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลจะใกล้เคียงกันหลังจากนั้นจึงนำพารามิเตอร์ของเครื่องปรับความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองนำไปใช้ในระบบเครื่องปรับความเร็วรอบทั้งหมด



ก. Experiment

ข. Simulation

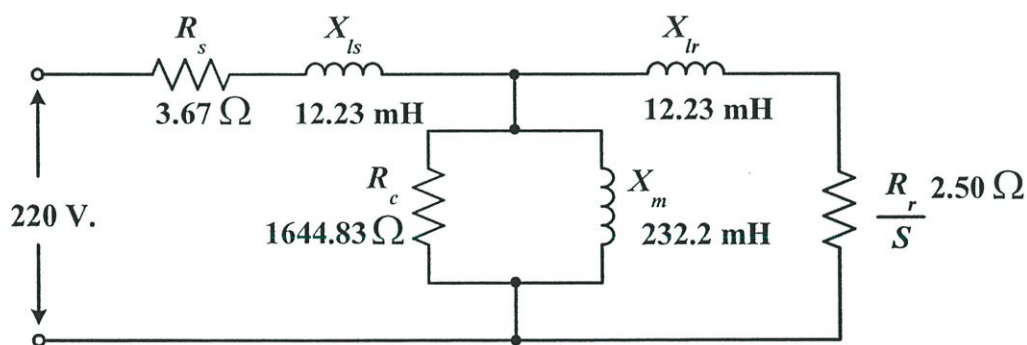
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไลน์



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงดันไลน์

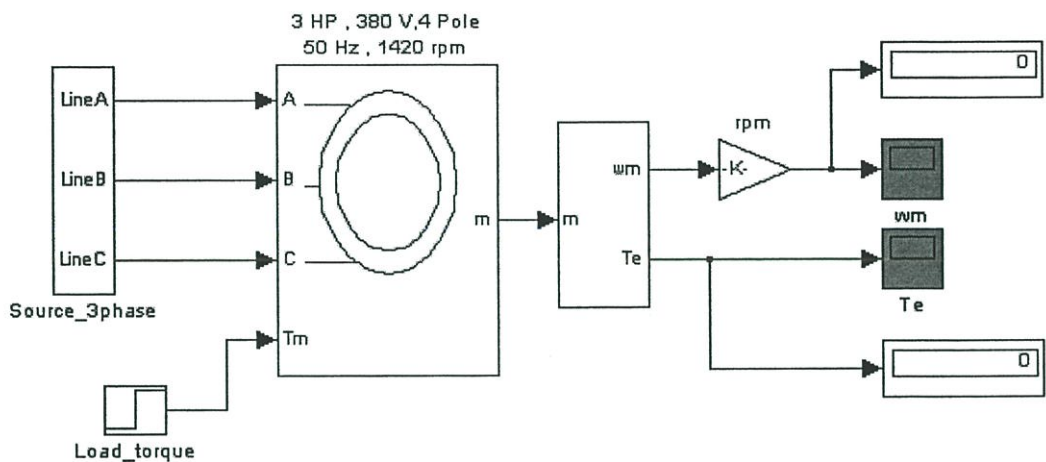
4.4.2 ค่าพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำไปใช้ในการจำลองได้มาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ทดสอบมีขนาดพิกัด 2.2 kW., 220/380 V., 8.7/5.0 A., 4 pole, 50 Hz และ 1,420 rpm ซึ่งจากการทดสอบได้รับค่าพารามิเตอร์ดังนี้

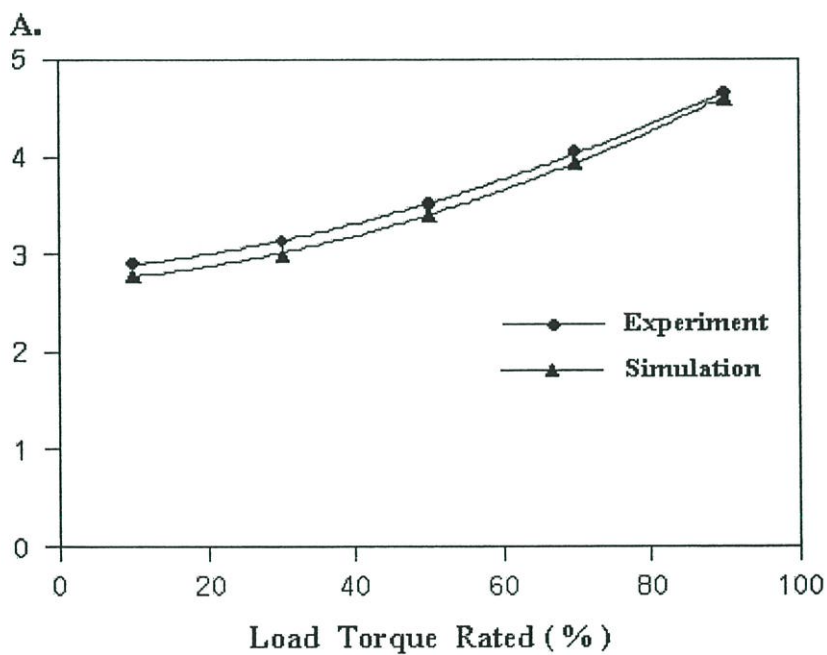


รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

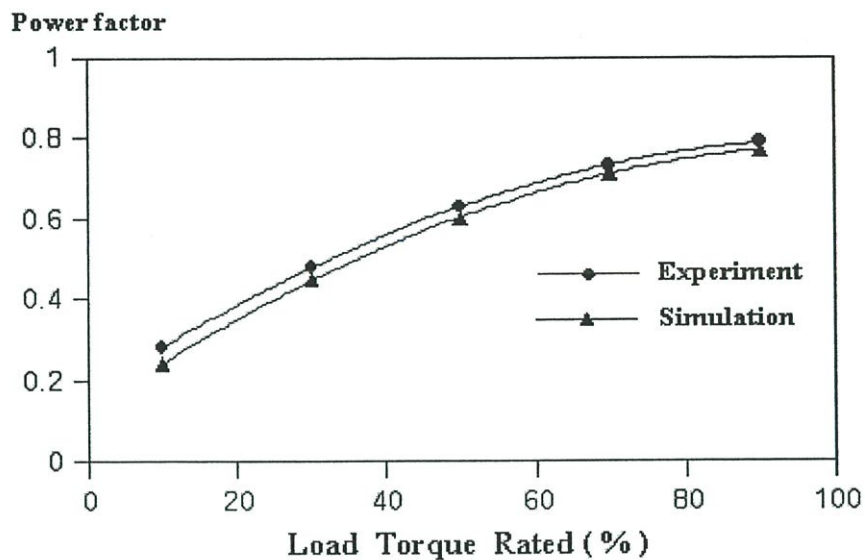
พารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปทำการคำนวณหาค่าแรงบิดที่เพลา รวมถึงค่าต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่สร้างจากแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบทั้งจากการวัด และจากการจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.20



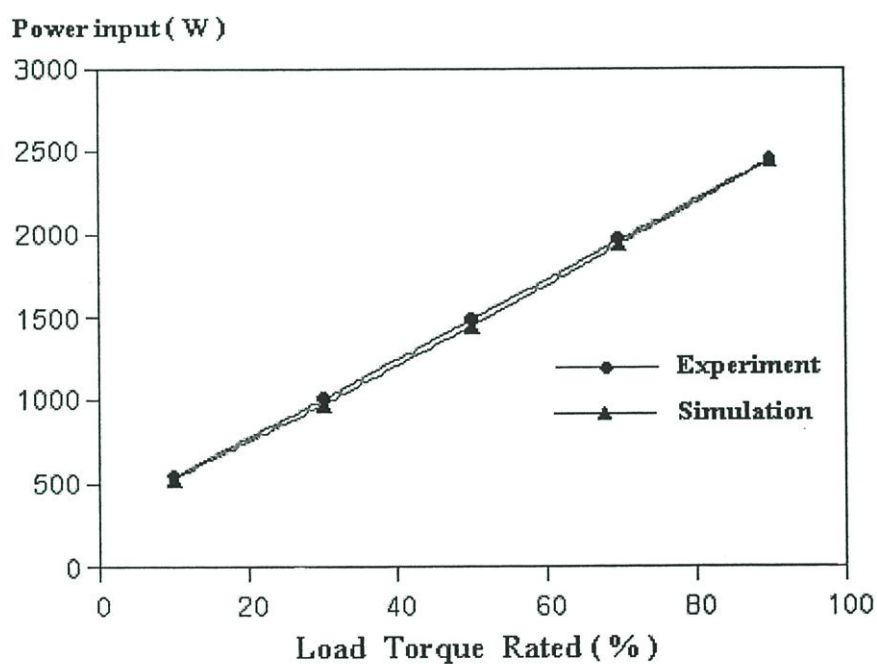
รูปที่ 4.16 แบบจำลองการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีแรงดันเป็นไซน์



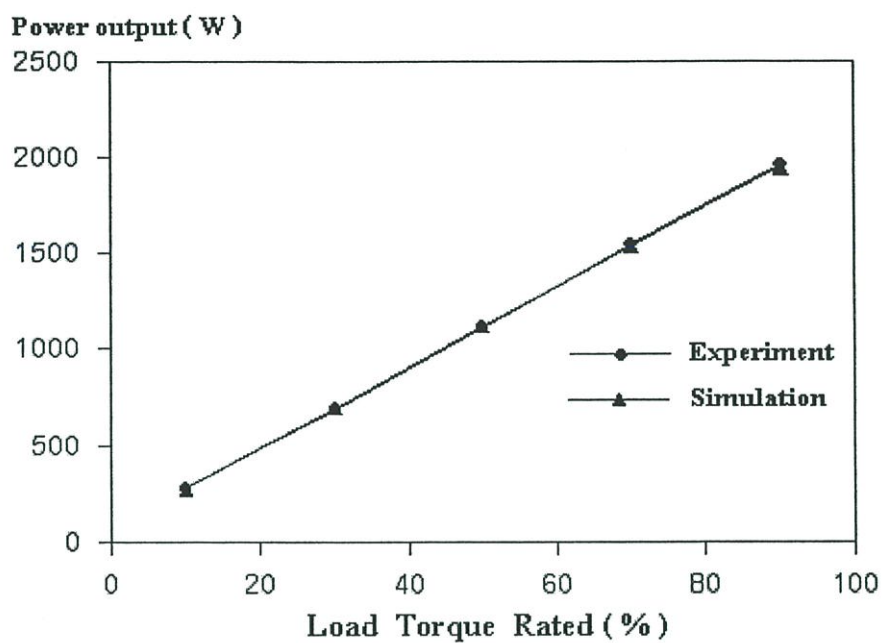
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์



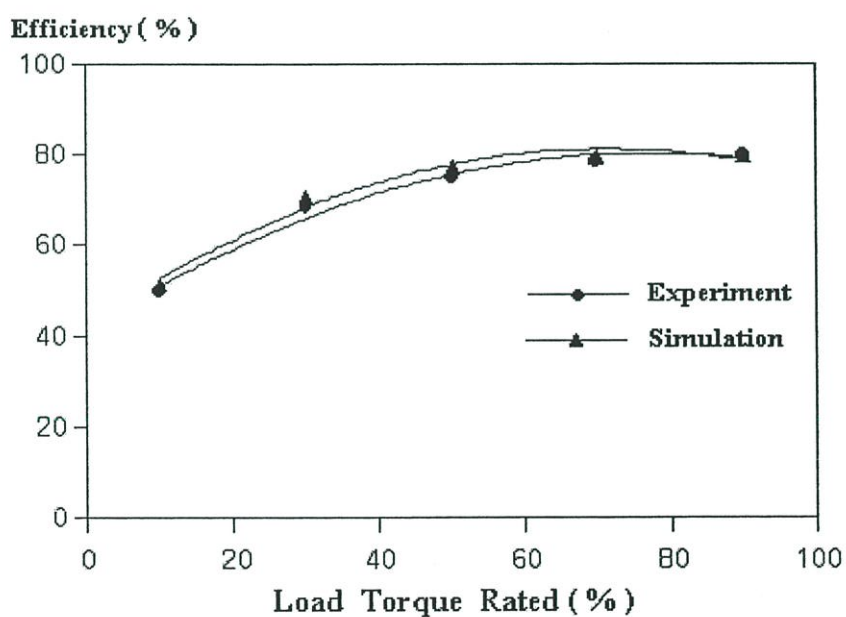
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบเพาเวอร์แฟคเตอร์ของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไซน์

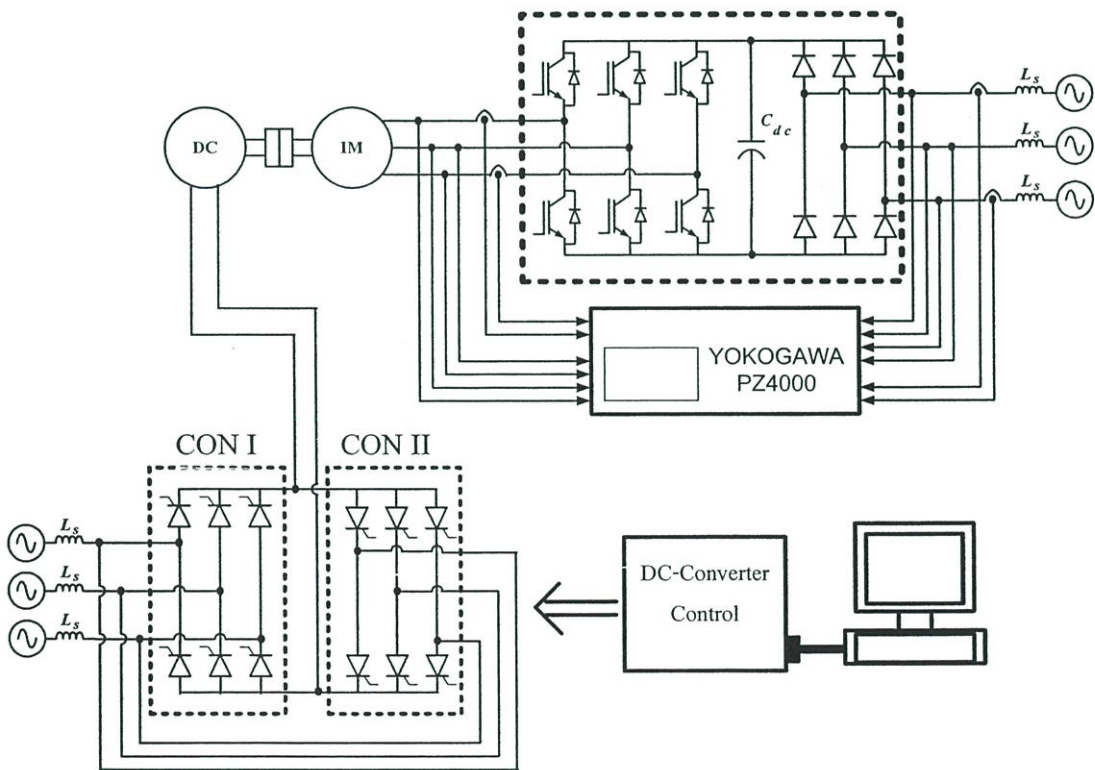
4.5 สรุป

บนนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องปรับความเร็วรอบ โดยในส่วนของหลักการทำงานนั้นได้อธิบายถึงโครงสร้างภายในของ ASD ซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุตผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทั้งในสถานะที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสถานะที่สมดุลและไม่สมดุลที่ระดับต่างๆ และได้อธิบายถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของ series line reactance หรือ choke ที่นำมาติดตั้งด้านหน้า ASD เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น และในส่วนของการทำงานจำลองการทำงานของ ASD นั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ทำการจำลองทั้งในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนของ ASD ที่ใช้ในการทดสอบ โดยการนำค่าพารามิเตอร์จริงที่ได้จากการทดสอบไปใส่ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งผลที่ได้ทั้งในส่วนของแรงดันไลน์จาก ASD จากการทดลองและจำลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในขณะที่เปรียบเทียบผลจากการจำลองและทดสอบเมื่อแรงดันเป็นไซน์จะพบว่าค่ากระแสอินพุต, เพาเวอร์แฟคเตอร์, กำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต และประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ได้จะมีทิศทางเดียวกันและในบทต่อไปได้ทำการจำลองโดยนำส่วนของการจำลองทั้งหมดมารวมเป็นระบบเดียวกันเปรียบเทียบกับระบบจริงใช้ในการทดสอบ

บทที่ 5

ผลการจำลองและทดสอบ

จากบทที่ผ่านมาได้ทำการสร้างระบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink แทนระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ และในบทนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมต่างๆของระบบและมอเตอร์ รวมถึงทำการออกแบบใช้คที่ทำการติดตั้งด้านหน้า ASD เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล และนอกจากนี้เนื่องจากระบบจริงคุณลักษณะของเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบนั้นค่าแรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูลของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้ค่าแรงดันประมาณ 346 โวลต์ ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบระบบเมื่อมอเตอร์มีภาระที่พิกัดได้เพราะจะทำให้กระแสเกิน ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบระบบเมื่อมอเตอร์มีภาระที่ 90 % ของพิกัด เป็นภาระสูงสุดของการทดสอบ



รูปที่ 5.1 test rig ที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.1 จะแสดงระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนแรกจะเป็น AC Drive ซึ่งก็คือเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสโดยใช้ variac 1 เฟส จำนวน 3 ตัวแบบสตาร์เพื่อใช้ในการปรับแรงดันแหล่งจ่ายให้อยู่ใน

สภาวะสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งในตอนนี้จะใช้เครื่อง Power Analyzer PZ4000 ใช้ในการวัดค่าแรงดัน, กระแส, เพาเวอร์แฟคเตอร์ และค่ากำลังไฟฟ้าทั้งทางด้านอินพุทของเครื่องปรับความเร็วรอบและอินพุทของมอเตอร์ และส่วนที่สองจะเป็น DC drive ซึ่งจะต่ออยู่กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยที่ในตอนนี้จะทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมภาระที่ระดับต่างๆ

5.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

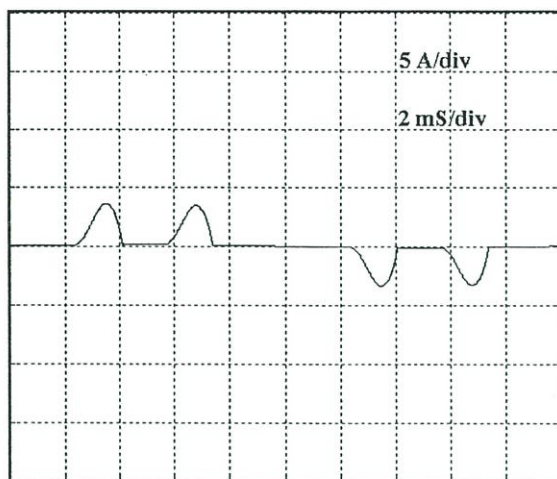
ในกรณีนี้จะแสดงค่ากระแสอินพุทและค่าอื่นๆเพียง 1 เฟส เนื่องจากกรณีนี้ค่ากระแสทั้ง 3 เฟส ในการจำลองค่าจะเท่ากันแต่ในระบบจริงจะต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการทดสอบได้อ้างอิงค่ากระแสจากเฟส A ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าจำลอง ซึ่งการทดสอบในกรณีนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ กรณีที่ไม่มีและมีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD ซึ่งในกรณีที่มีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD นั้น จะแบ่งตามลักษณะของระดับค่าอินดักแตนซ์ของใช้ค้ดที่ติดตั้งตามสมการที่ 4.5 มี 3 ระดับ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ใช้ค้ดที่ 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ทั้งนี้ในการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของใช้ค้ดจะใช้ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลของการทดสอบสูงสุด (มอเตอร์มีภาระ 90%) ในสภาวะที่ไม่มีมีการติดตั้งใช้ค้ด มาใช้ในการคำนวณหาค่าดังสมการที่ 4.5 ซึ่งค่าที่ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าอินดักแตนซ์ของใช้ค้ดที่เปอร์เซ็นต์แรงดันต่างๆ

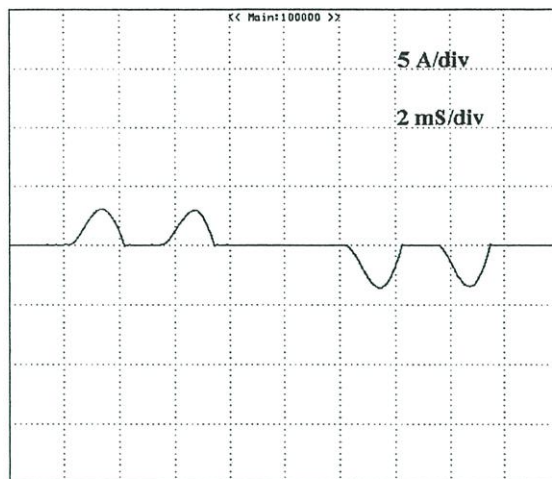
เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมใช้ค้ด (%)	ค่าอินดักแตนซ์ของใช้ค้ด (mH)
3	5.4
5	9.1
7	12.7

5.1.1 เมื่อไม่มีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD

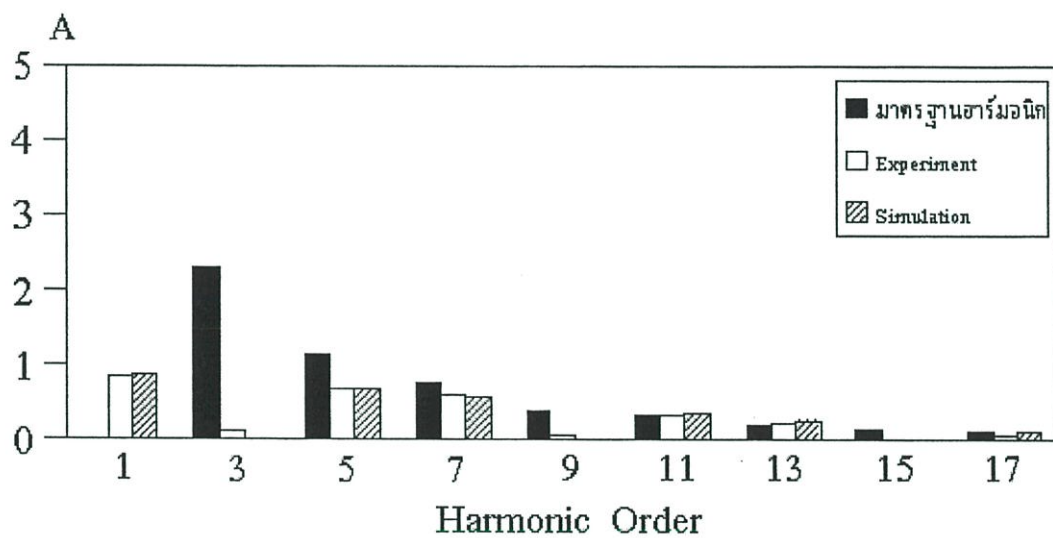
กรณีที่ไม่มีมีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD นี้จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยจะให้ระบบมีภาระตั้งแต่ 10-90% ของพิกัด จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.4 ซึ่งจะพบว่ารูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสอินพุทจะให้ผลที่สอดคล้องกัน และทั้งนี้จะเลือกค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูลของการทดสอบที่ภาระสูงสุดมาใช้ในการออกแบบใช้ค้ดที่จะทำการติดตั้งด้านหน้า ASD ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในหัวข้อต่อไป ในส่วนของการเปรียบเทียบองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆทั้งจากการจำลองและทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับขีดจำกัดมาตรฐานฮาร์มอนิกตาม มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 ซึ่งแสดงไว้ตามตารางที่ 2.1



(ก) Simulation

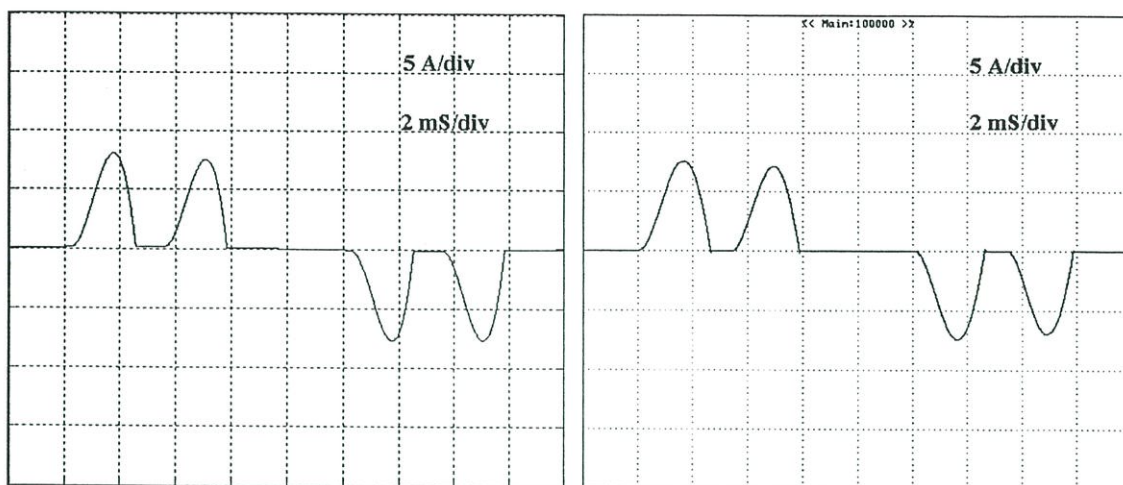


(ข) Experiment



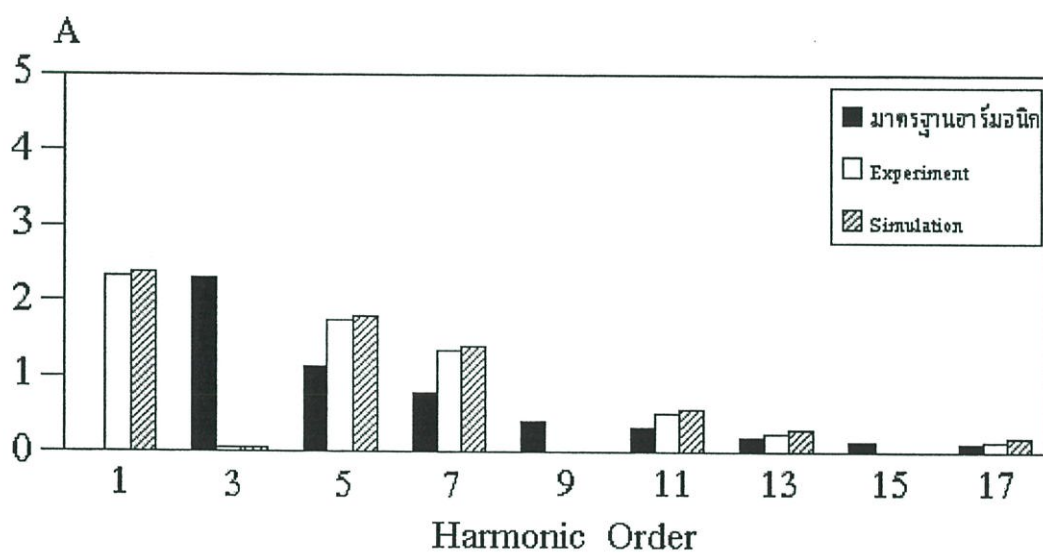
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์โมนิก

รูปที่ 5.2 รูปคลื่น, สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด



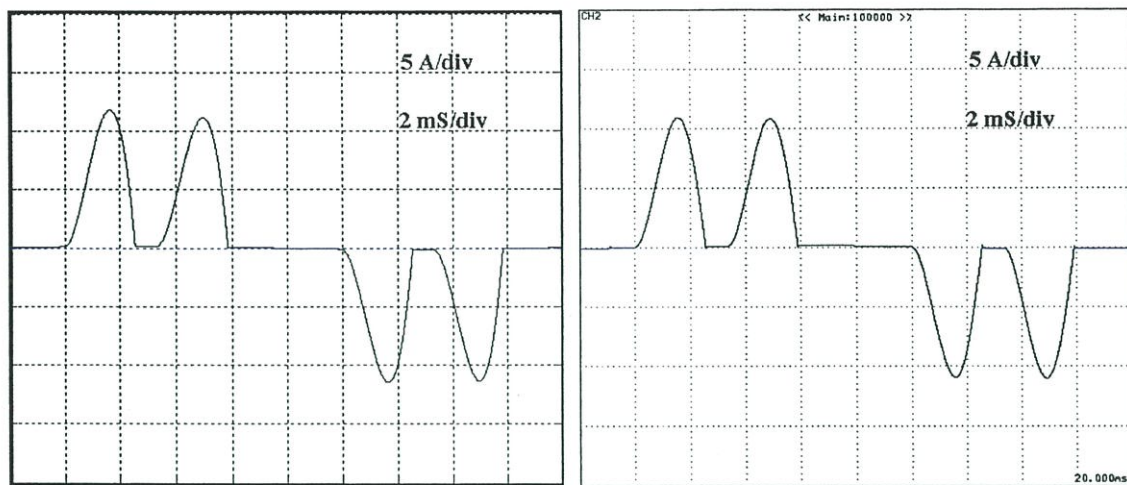
(ก) Simulation

(ข) Experiment



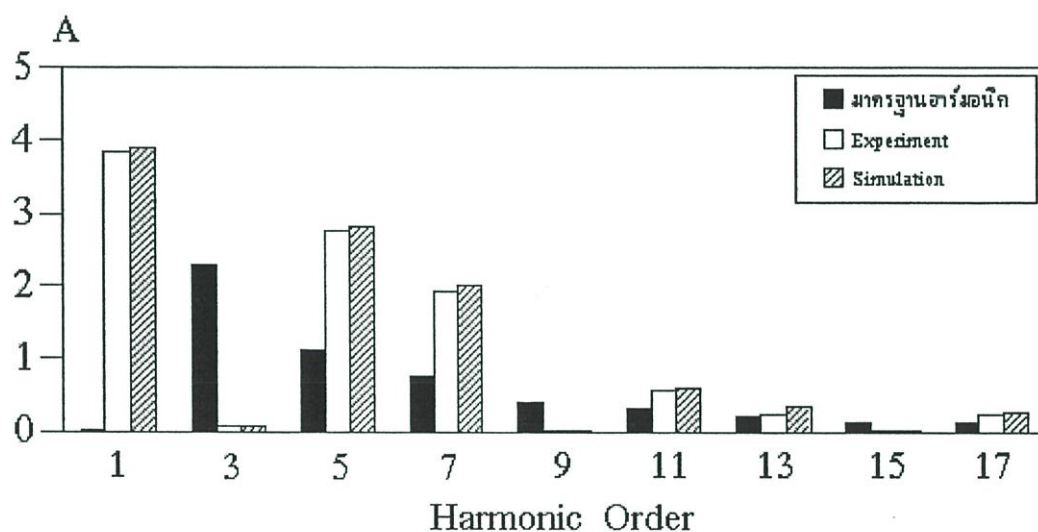
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์มอนิก

รูปที่ 5.3 รูปคลื่น, สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด



(ก) Simulation

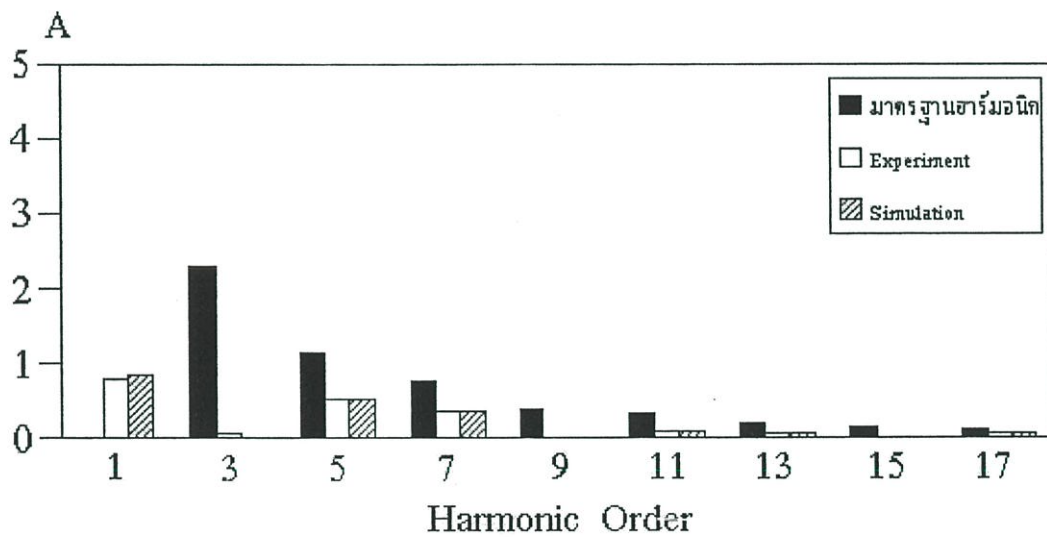
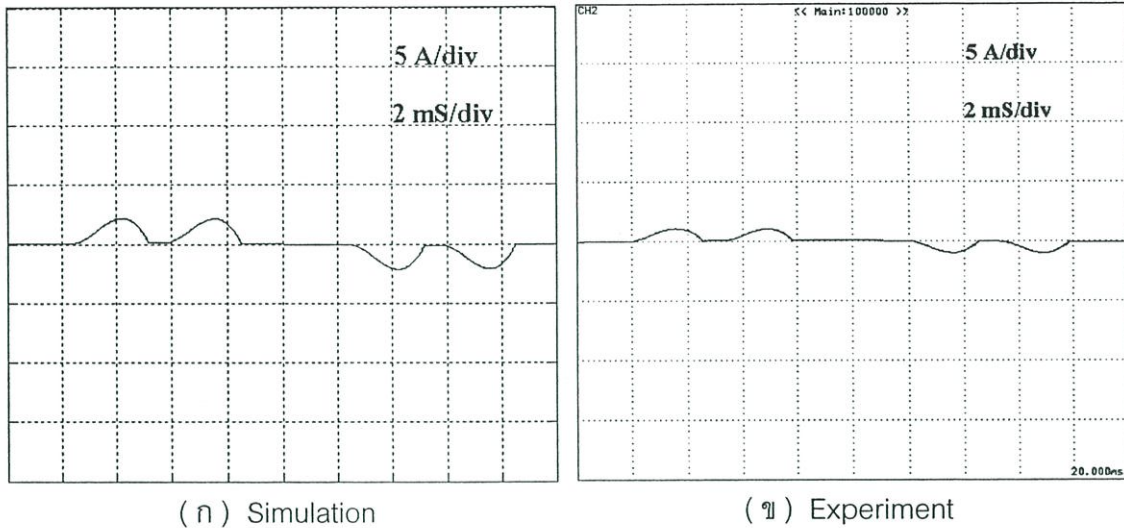
(ข) Experiment



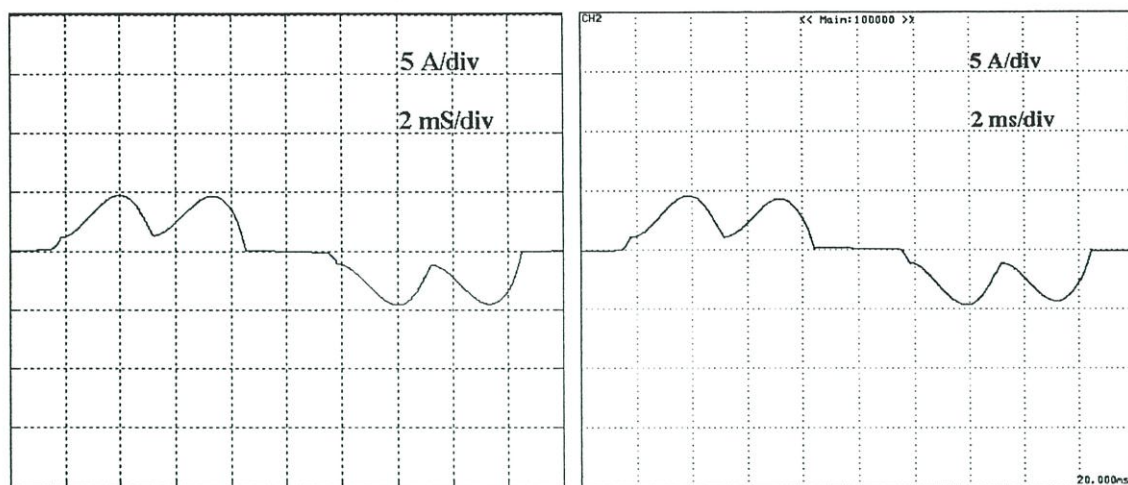
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์มอนิก

รูปที่ 5.4 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด

5.1.2 เมื่อมีการติดตั้งใช้ค 3 % ด้านหน้า ASD

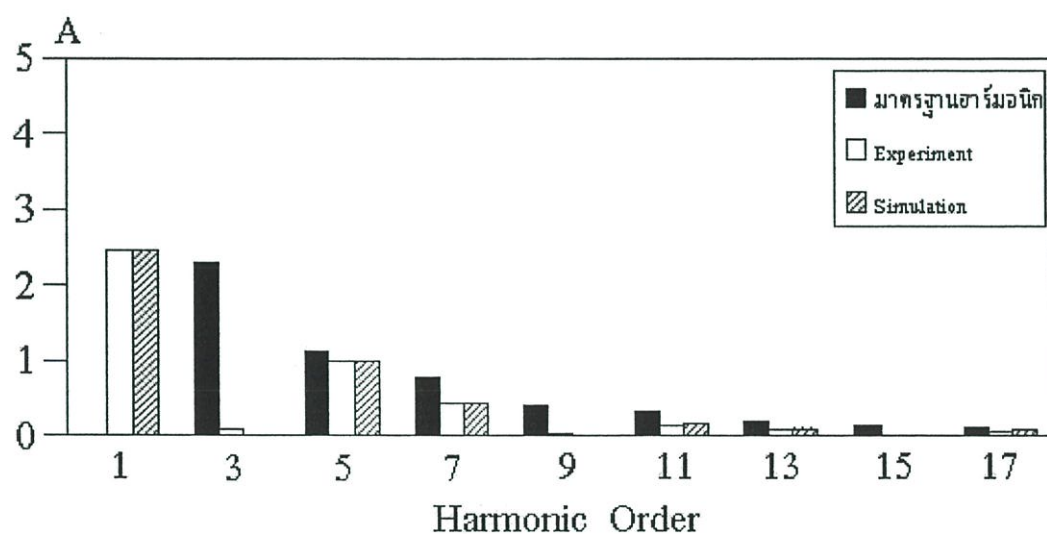


(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทกับมาตรฐานฮาร์มอนิก
รูปที่ 5.5 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด



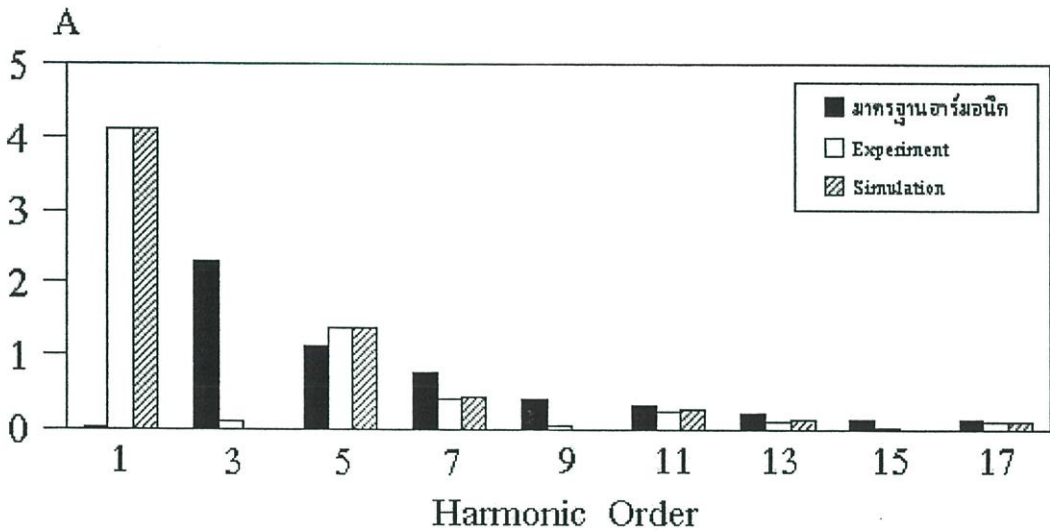
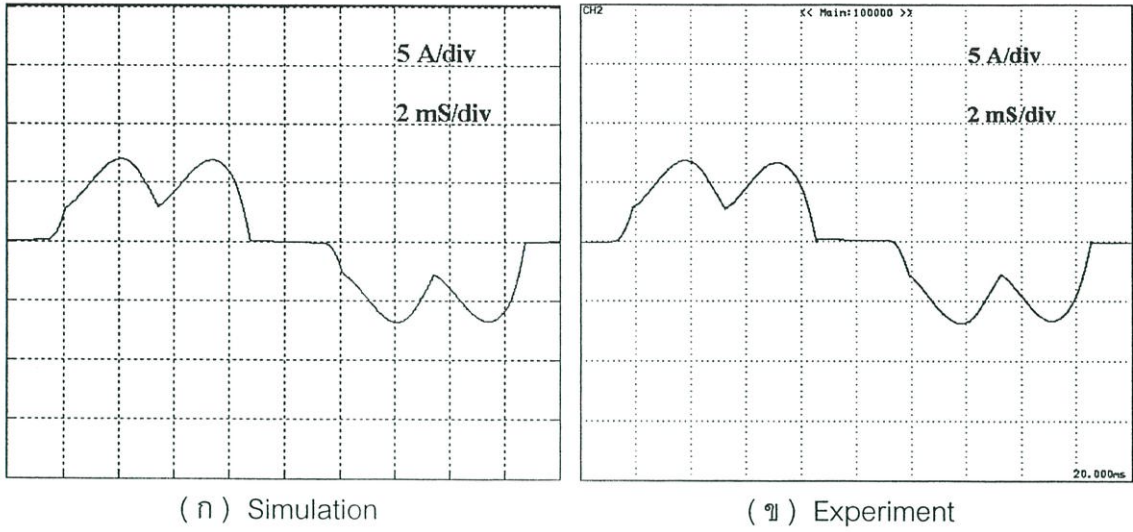
(ก) Simulation

(ข) Experiment



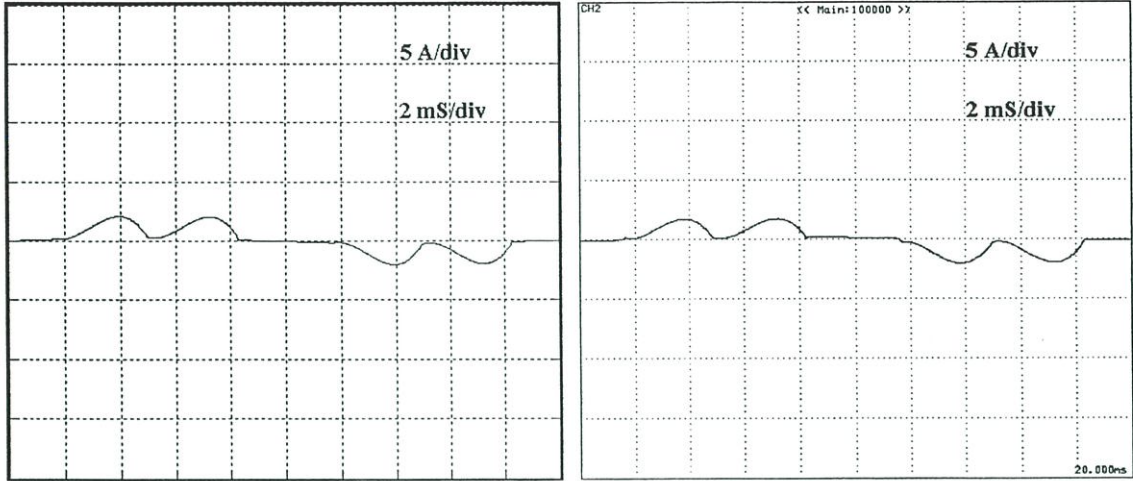
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์มอนิก

รูปที่ 5.6 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด



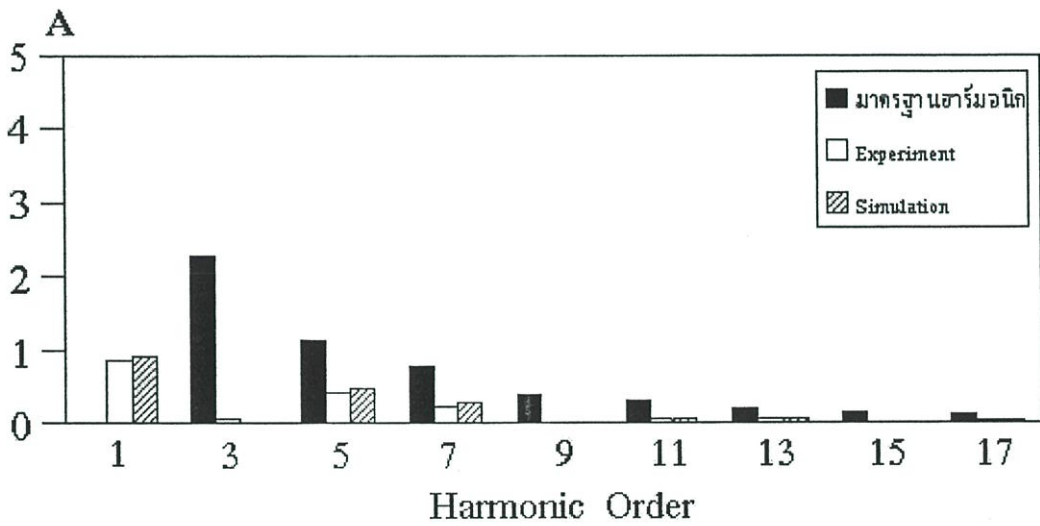
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทกับมาตรฐานฮาร์มอนิก
รูปที่ 5.7 รูปคลื่น, สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด

5.1.3 เมื่อมีการติดตั้งโหลด 5 % ด้านหน้า ASD

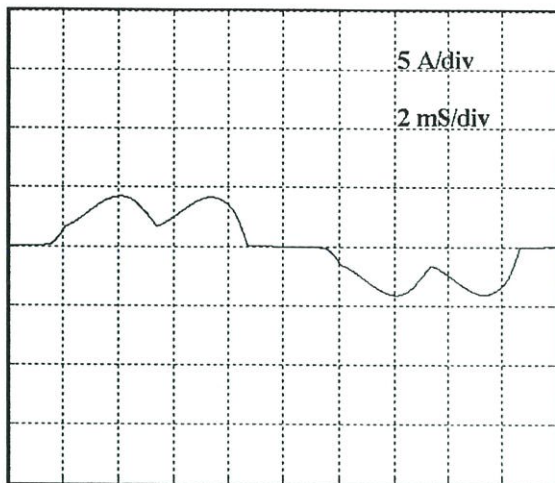


(ก) Simulation

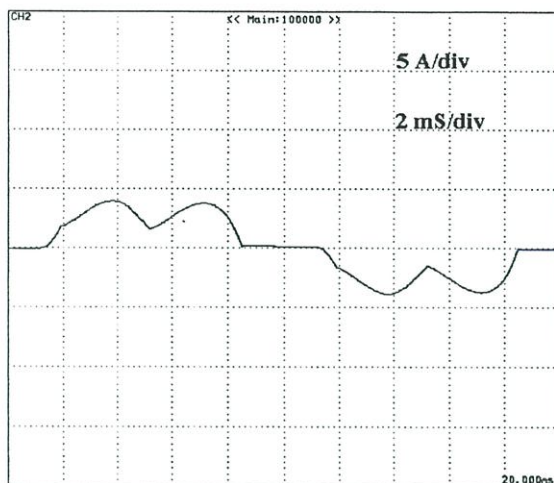
(ข) Experiment



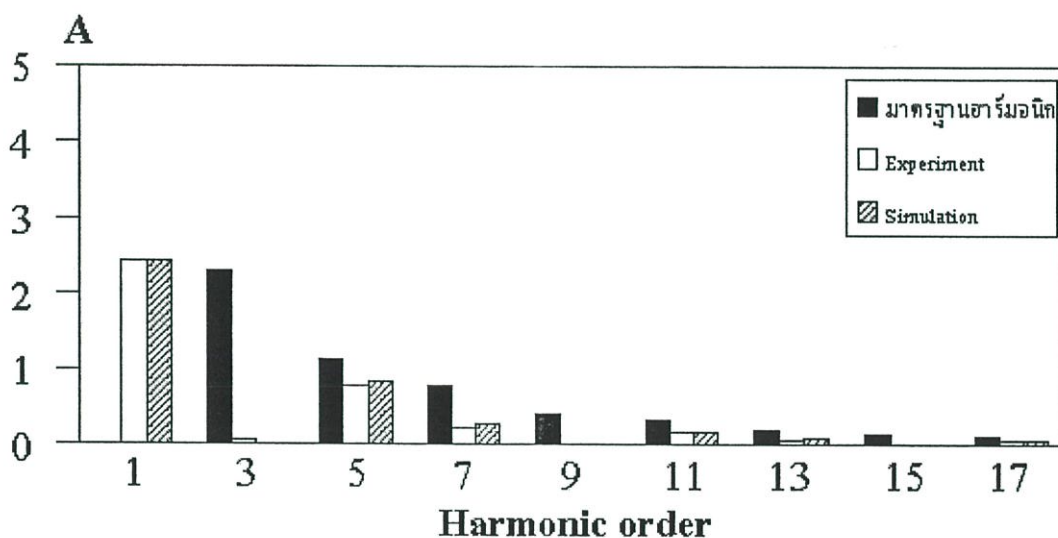
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทกับมาตรฐานฮาร์มอนิก
รูปที่ 5.8 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด



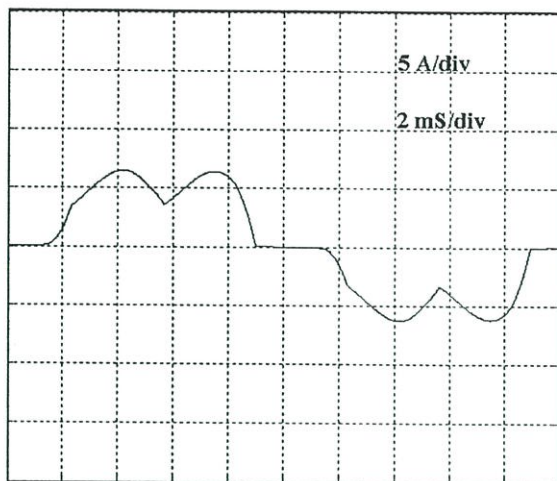
(ก) Simulation



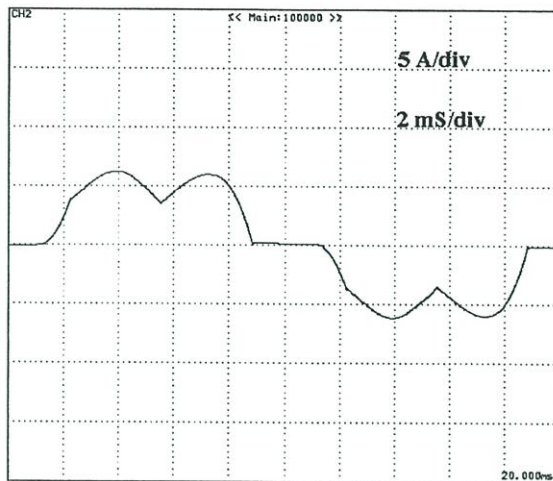
(ข) Experiment



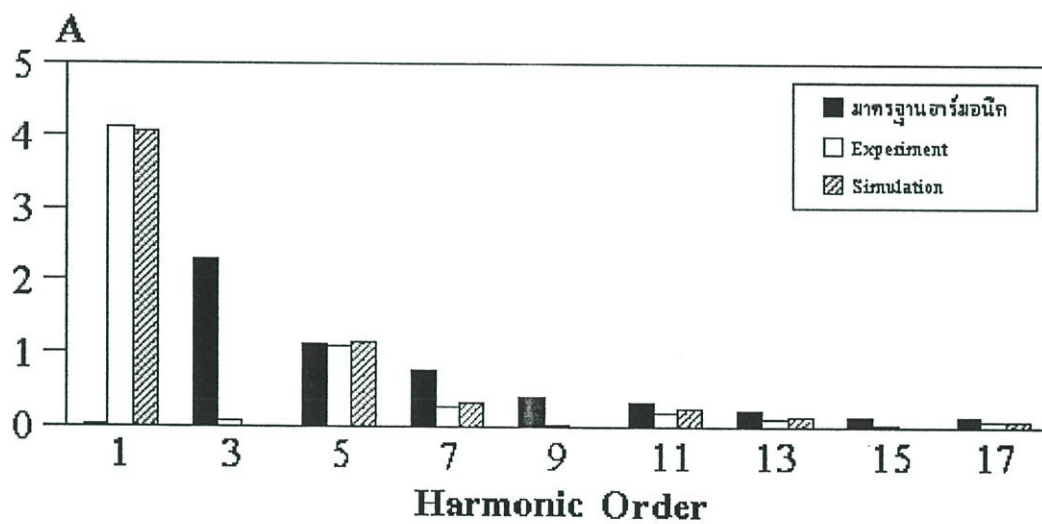
(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์โมนิก
รูปที่ 5.9 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด



(ก) Simulation



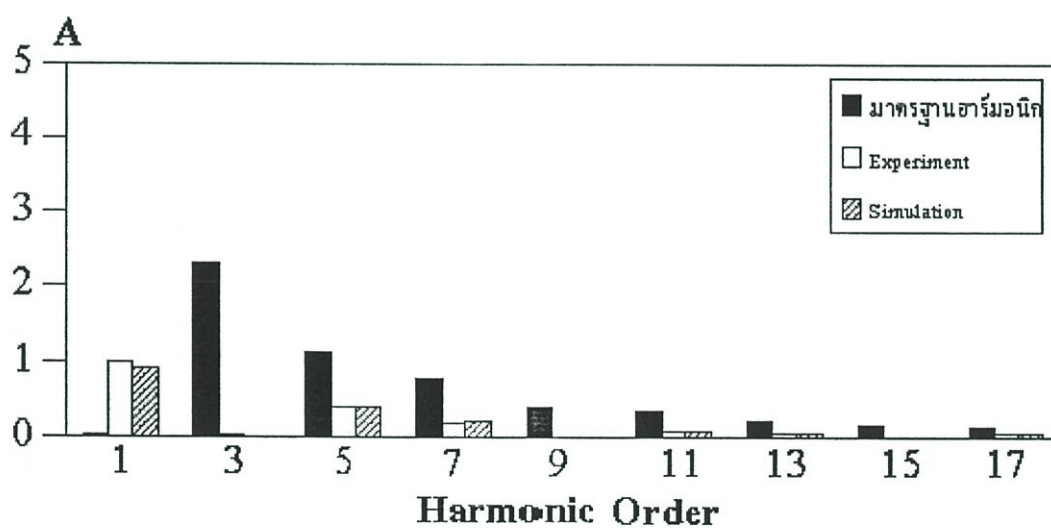
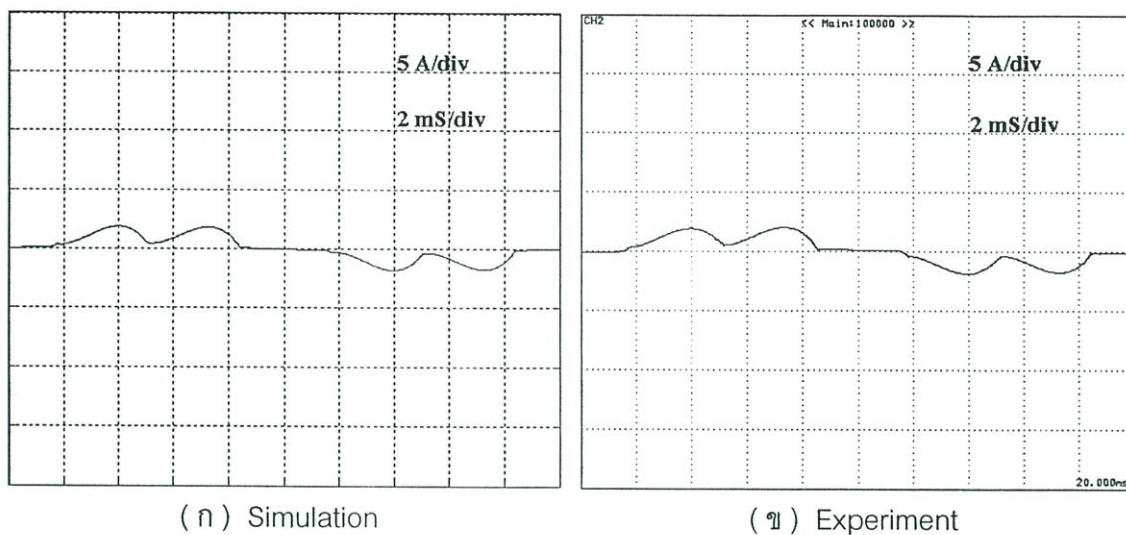
(ข) Experiment



(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์มอนิก

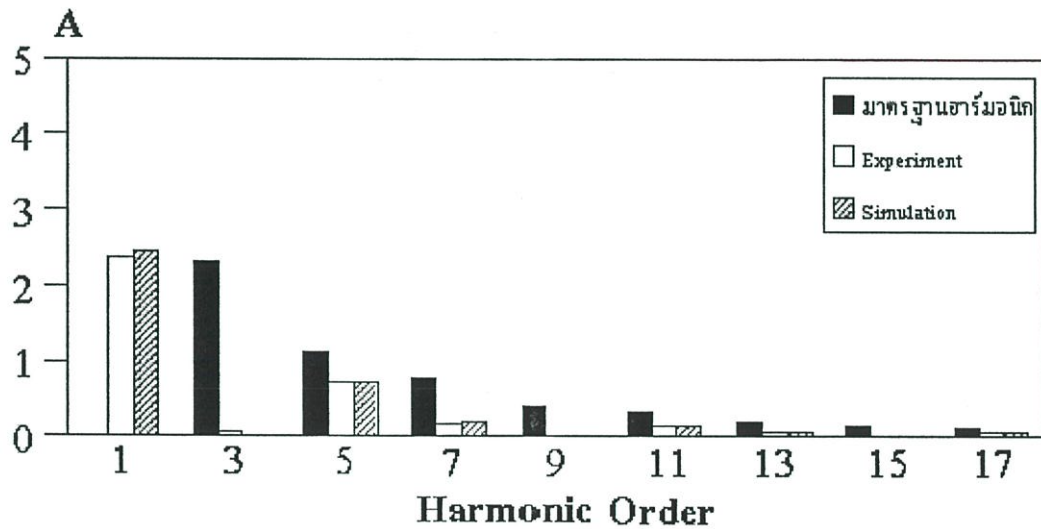
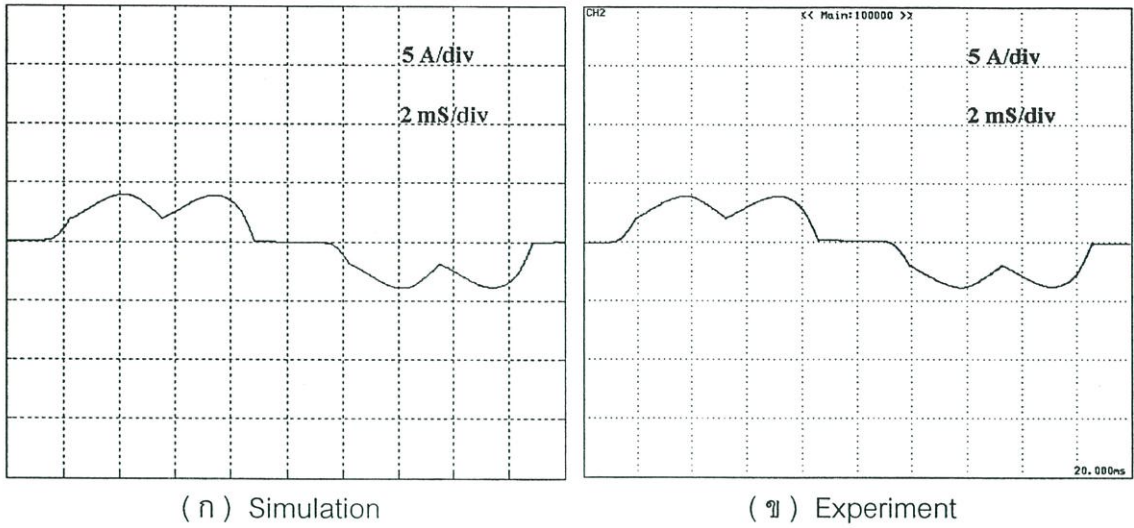
รูปที่ 5.10 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด

5.1.3 เมื่อมีการติดตั้งใช้ค 7 % ด้านหน้า ASD

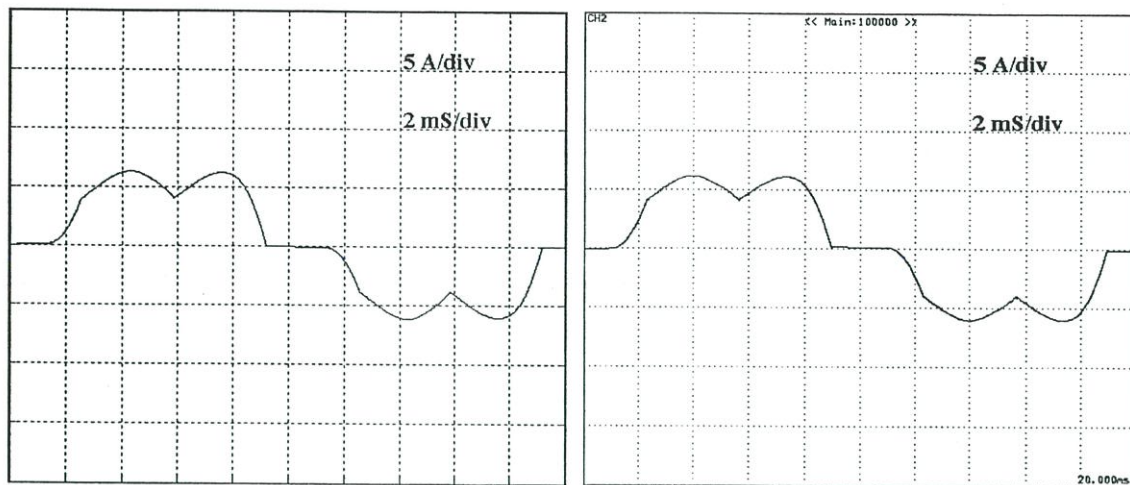


(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุทกับมาตรฐานฮาร์มอนิก

รูปที่ 5.11 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 10 % ของพิกัด

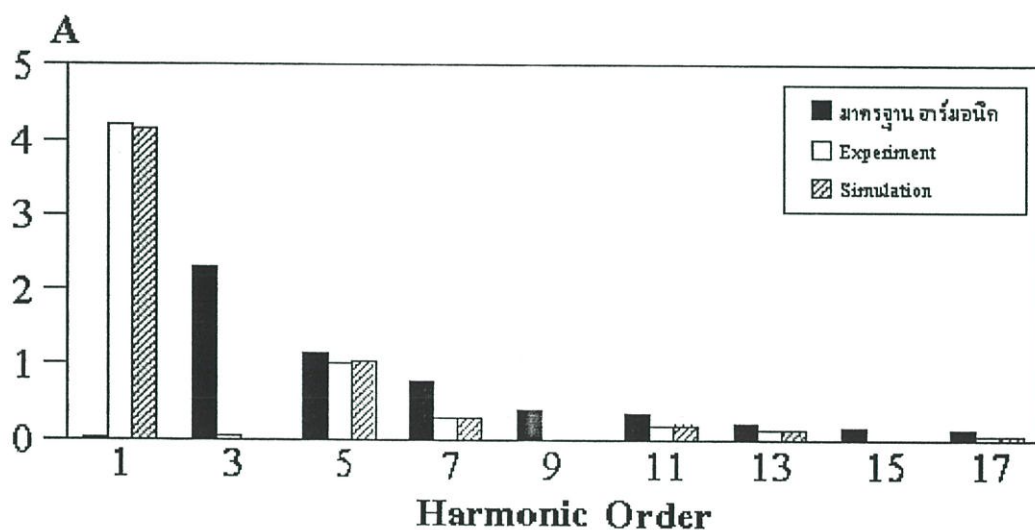


(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์โมนิก
รูปที่ 5.12 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 50 % ของพิกัด



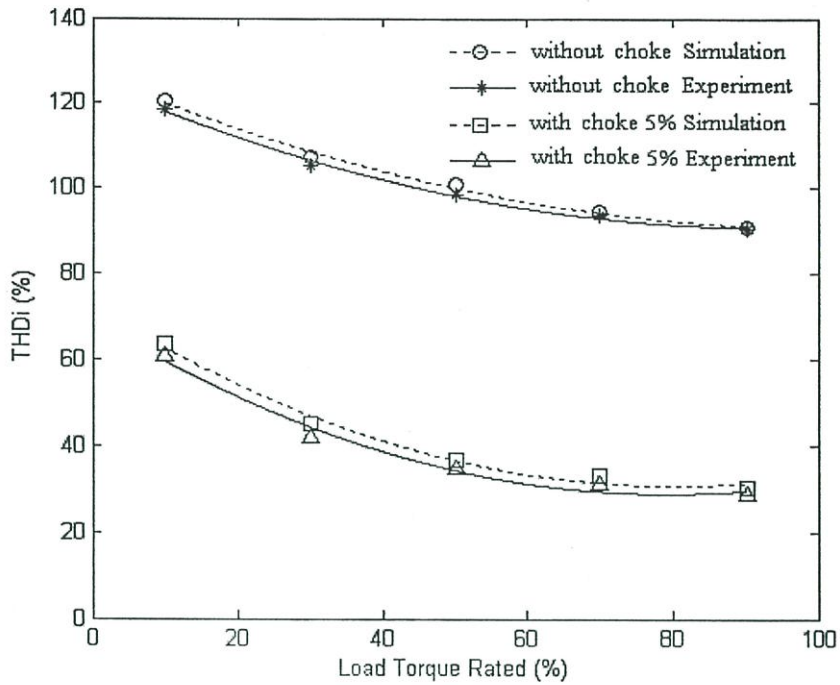
(ก) Simulation

(ข) Experiment

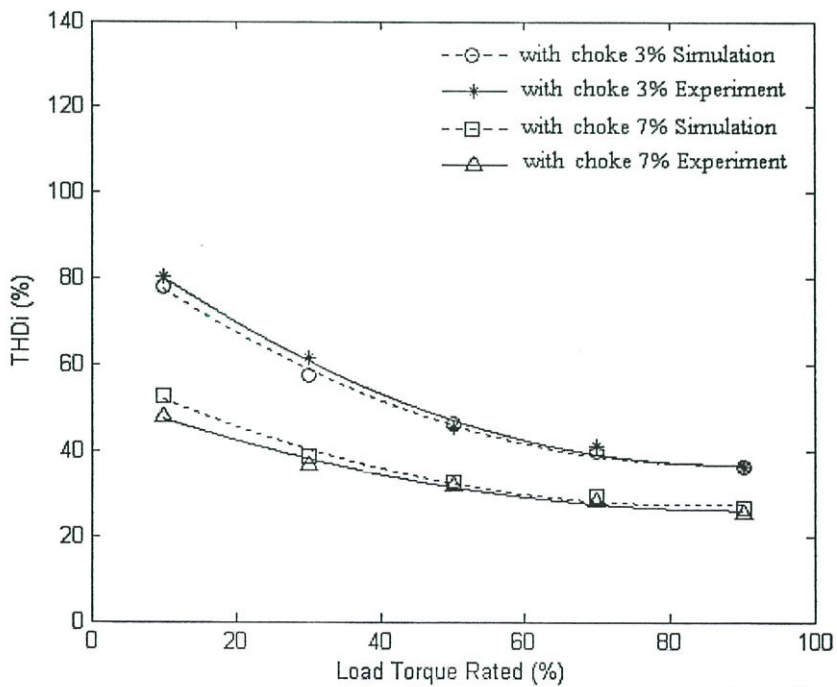


(ค) เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตกับมาตรฐานฮาร์โมนิก

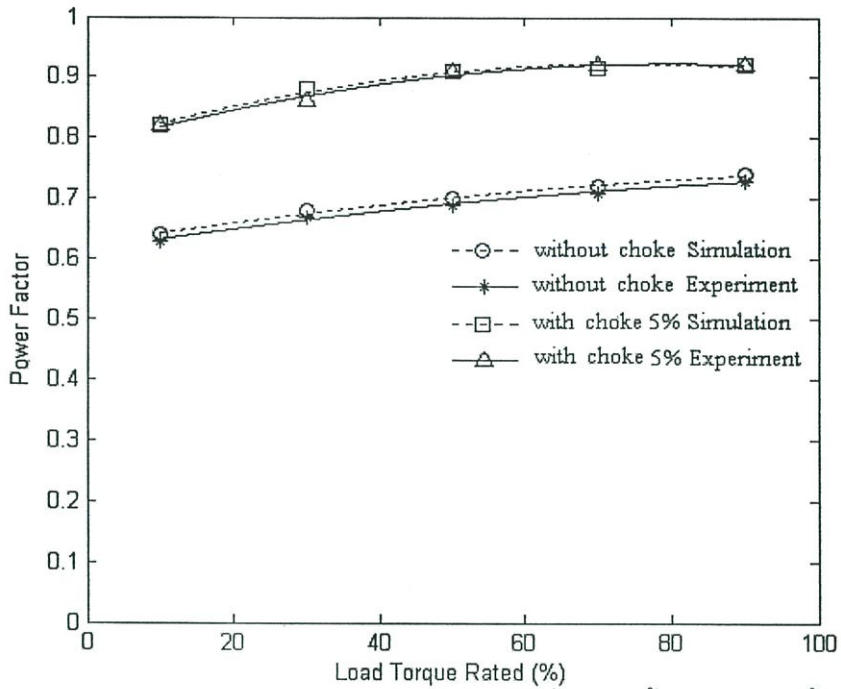
รูปที่ 5.13 รูปคลื่น,สเปกตรัมกระแสอินพุตเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 90 % ของพิกัด



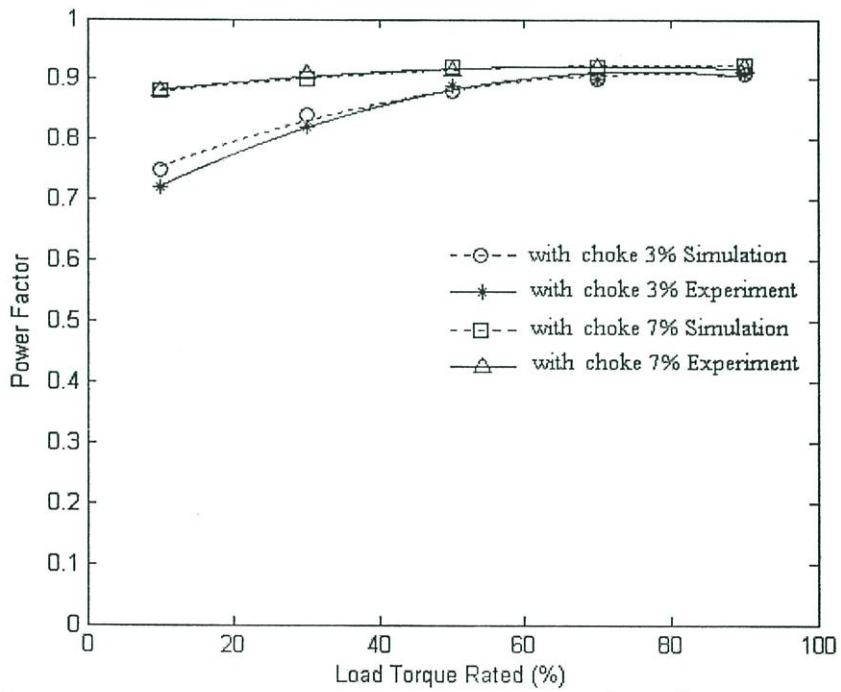
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทเมื่อไม่ติดตั้งโช้คและติดตั้งโช้คที่ 5 %



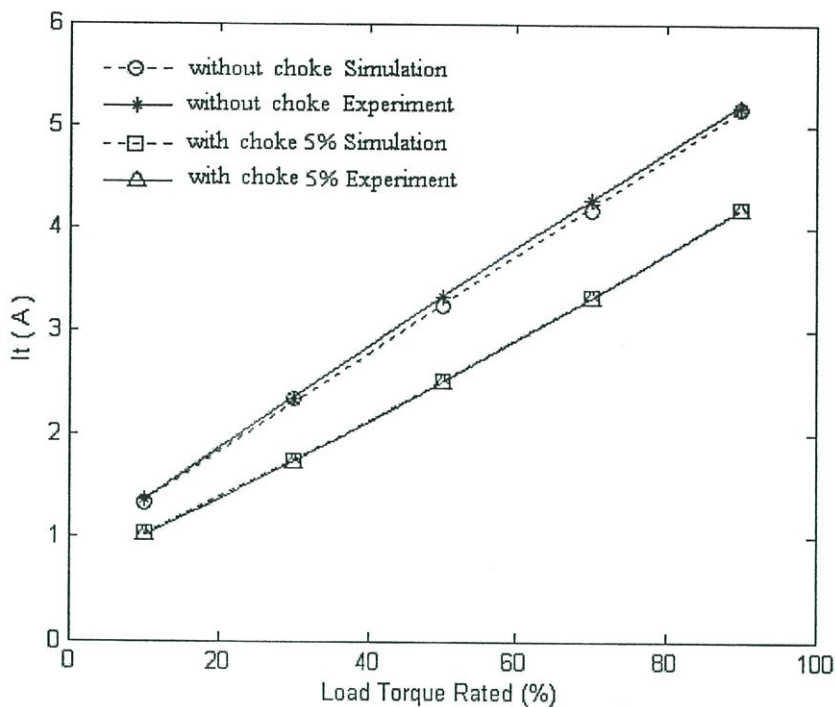
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทเมื่อติดตั้งโช้ค 3% และ 7%



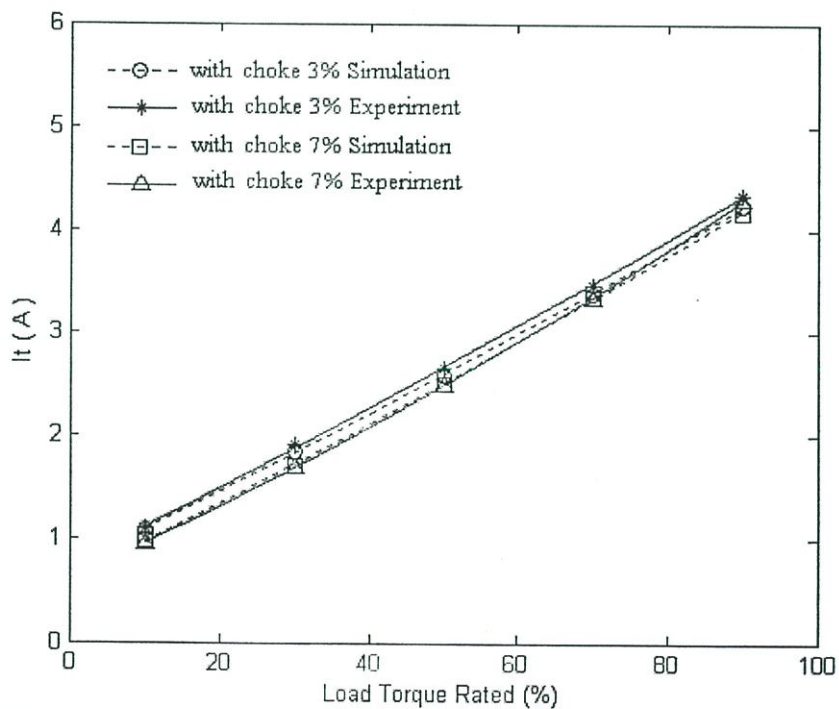
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเมื่อไม่ติดตั้งโช้คและติดตั้งโช้คที่ 5 %



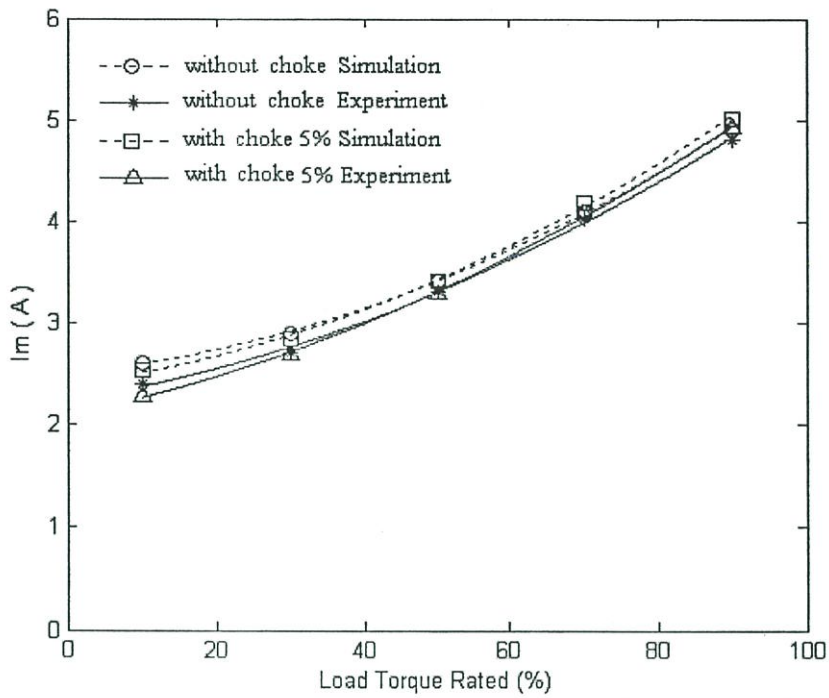
รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเมื่อติดตั้งโช้ค 3% และ 7%



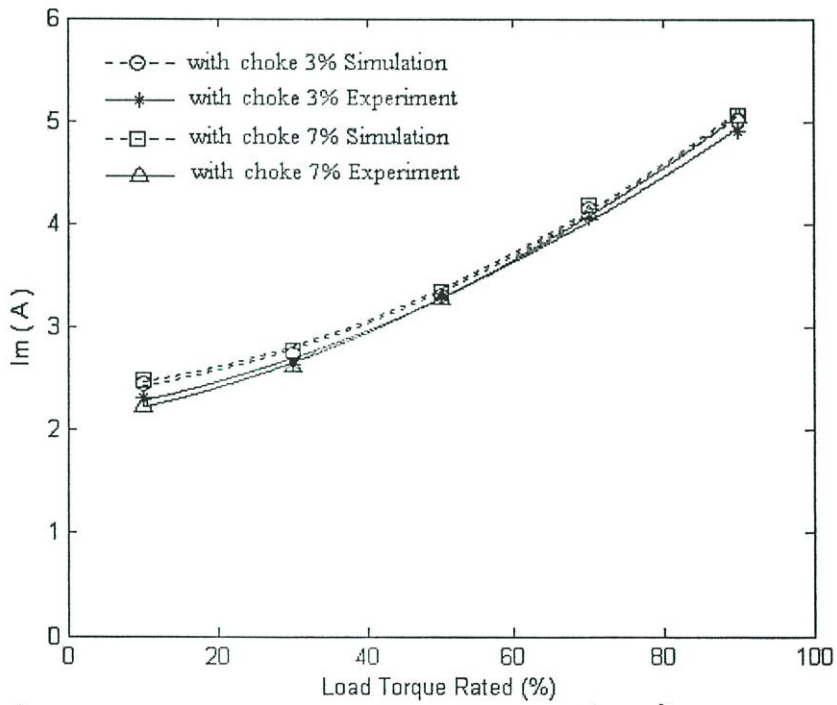
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของระบบเมื่อไม่ติดตั้งโช๊คและติดตั้งโช๊คที่ 5 %



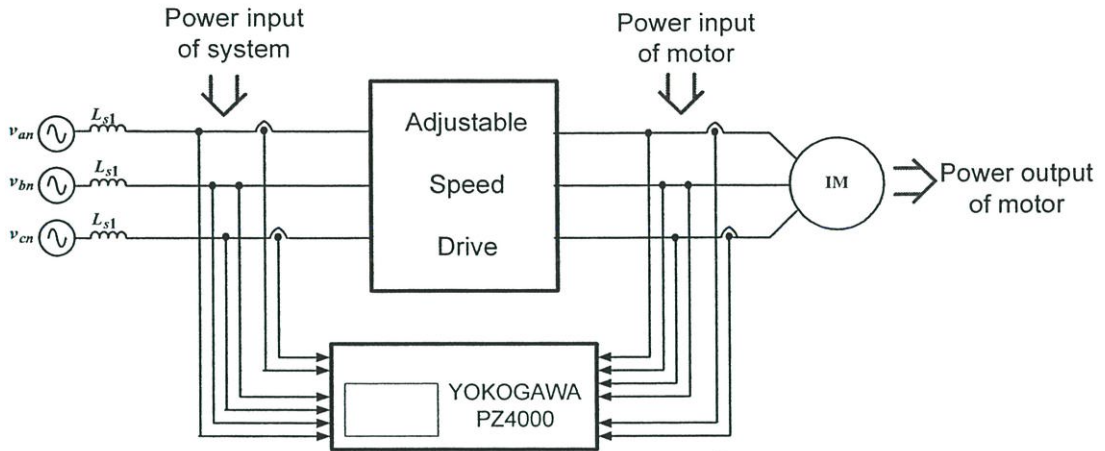
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของระบบเมื่อติดตั้งโช๊ค 3% และ 7%



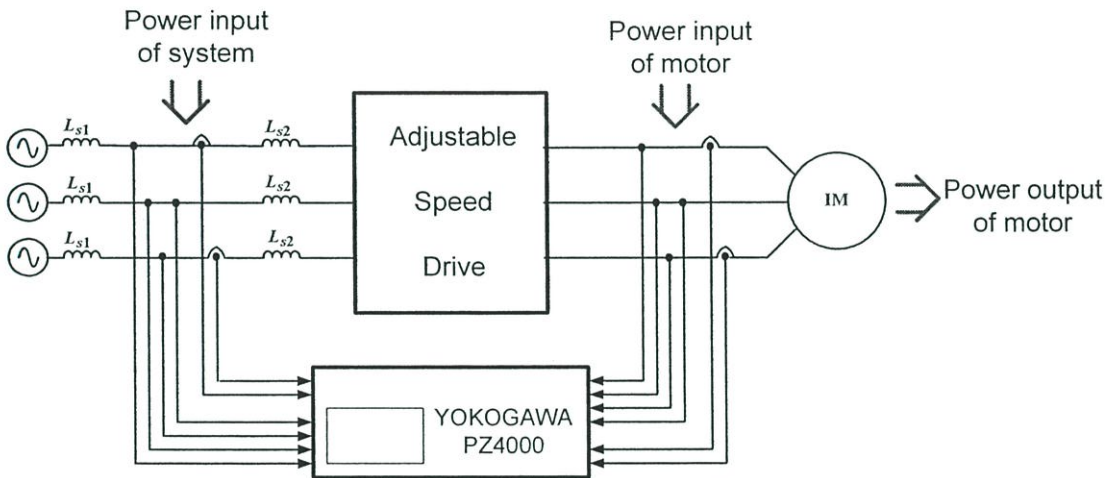
รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อไม่ติดตั้งโช้คและติดตั้งโช้คที่ 5 %



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบค่ากระแสอินพุทของมอเตอร์เมื่อติดตั้งโช้ค 3% และ 7%



รูปที่ 5.22 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD



รูปที่ 5.23 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งใช้ค้ดด้านหน้า ASD

จากรูปที่ 5.22 และ 5.23 ได้แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบ, กำลังอินพุทของมอเตอร์ และ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของระบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอประสิทธิภาพ 2 ส่วน คือ ประสิทธิภาพของระบบ และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$\eta_{system} = \frac{P_{om}}{P_{is}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\eta_{motor} = \frac{P_{om}}{P_{im}} \times 100 \quad (5.2)$$

$$P_{om} = P_{em} - P_{fv} \quad (5.3)$$

P_{is} = กำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบ (W)

P_{im} = กำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์ (W)

P_{om} = กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของมอเตอร์ (W)

P_{em} = กำลังไฟฟ้าทางกลของมอเตอร์ (W)

P_{fw} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงลม (W)

η_{system} = ประสิทธิภาพของระบบ (%)

η_{motor} = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบ

Load Torque Rated (%)		Power input of system (W)			
		Without choke	With choke 3 %	With choke 5 %	With choke 7 %
10	Experiment	583	570	565	545
	Simulation	568.8	558.6	551.2	547.3
30	Experiment	1062	1037	1030	1026
	Simulation	1055.1	1033.1	1030.8	1031.7
50	Experiment	1538	1531	1534	1521
	Simulation	1523.2	1516.8	1515.1	1513.3
70	Experiment	2033	2047	2055	2058
	Simulation	2031.3	2038.1	2040.2	2042.5
90	Experiment	2580	2594	2610	2611
	Simulation	2570.4	2574.2	2575.6	2579.2

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของระบบ

Load Torque Rated (%)		Power output of system (W)			
		Without choke	With choke 3 %	With choke 5 %	With choke 7 %
10	Experiment	273.95	273.94	272.16	272.17
	Simulation	273.93	273.71	272.18	272.17
30	Experiment	705.59	692.40	692.30	691.93
	Simulation	704.70	691.45	691.46	692.47
50	Experiment	1092.90	1116.25	1115.52	1107.89
	Simulation	1115.13	1113.93	1114.05	1112.57
70	Experiment	1519.05	1521.33	1519.26	1521.89
	Simulation	1520.42	1533.26	1533.41	1535.75
90	Experiment	1918.48	1918.52	1909.99	1901.07
	Simulation	1912.63	1910.82	1897.95	1887.63

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ

Load Torque Rated (%)		Efficiency of System (%)			
		Without choke	With choke 3 %	With choke 5 %	With choke 7 %
10	Experiment	46.99	48.06	48.17	49.94
	Simulation	48.16	49.00	49.38	49.73
30	Experiment	66.44	66.77	67.22	67.44
	Simulation	66.79	66.93	67.08	67.12
50	Experiment	71.06	72.91	72.72	72.84
	Simulation	73.21	73.44	73.53	73.52
70	Experiment	74.72	74.32	73.93	73.95
	Simulation	74.84	75.23	75.16	75.19
90	Experiment	74.36	73.96	73.18	72.81
	Simulation	74.41	74.23	73.69	73.15

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์

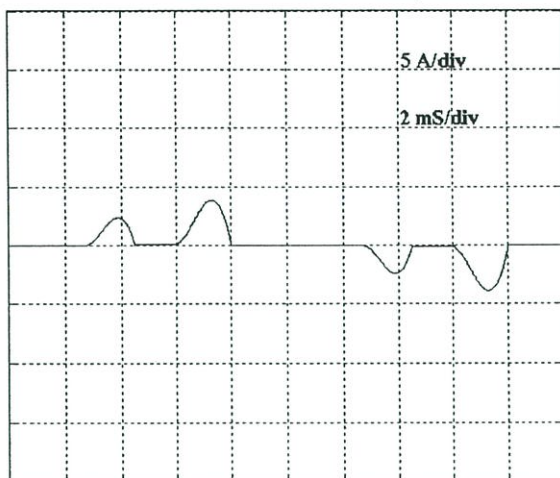
Load Torque Rated (%)		Efficiency of motor (%)			
		Without choke	With choke 3 %	With choke 5 %	With choke 7 %
10	Experiment	54.57	56.13	56.41	57.06
	Simulation	53.38	55.75	55.88	56.72
30	Experiment	71.20	72.27	72.96	73.22
	Simulation	72.01	73.52	73.86	74.80
50	Experiment	77.57	77.46	77.86	78.85
	Simulation	77.84	78.25	78.41	78.50
70	Experiment	78.37	78.01	77.23	76.33
	Simulation	78.75	77.92	76.84	75.77
90	Experiment	78.12	77.75	76.20	75.69
	Simulation	78.52	77.97	76.93	75.73

5.2 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสถานะไม่สมดุล

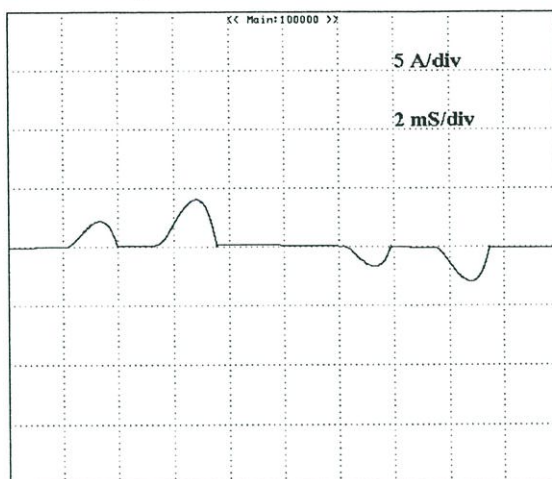
เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสถานะไม่สมดุลจะทำให้กระแสทั้ง 3 เฟสจะไม่เท่ากันดังนั้นในกรณีนี้จึงจะแสดงค่ากระแสอินพุทและค่าอื่น ๆ ทั้ง 3 เฟส โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและทดสอบทั้งในส่วนค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ, ประสิทธิภาพของระบบและของมอเตอร์ แต่ในส่วนความผิดพลาดของรูปคลื่นกระแสจะใช้กระแสเฟส A ใช้ในการศึกษา โดยจะทำการพิจารณาทั้งกรณีที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำด้านหน้า ASD โดยทั้งนี้ใช้ค้ำที่ติดตั้งนั้นจะเป็นใช้ค้ำที่ได้ทำการติดตั้งเหมือนกับกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายอยู่ในสถานะสมดุลซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ใช้ค้ำที่เหมาะสมจะเป็นค่าใช้ค้ำที่ 5% ดังนั้นการทดสอบในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุลนี้จะทดสอบโดยการติดตั้งใช้ค้ำค่าดังกล่าว โดยที่สถานะของการไม่สมดุลของแรงดันที่แหล่งจ่ายนี้ระดับค่าแรงดันที่ใช้ในการจำลองและทดสอบจะเป็นไปตามตารางที่ 4.1 แบ่งได้ดังนี้

- แรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(1%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (1%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(1%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (1%-U with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(3%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (3%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(3%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (3%-U with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(5%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (5%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งใช้ค้ำ
(5%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage และมีการติดตั้งใช้ค้ำ (5%-U with choke)

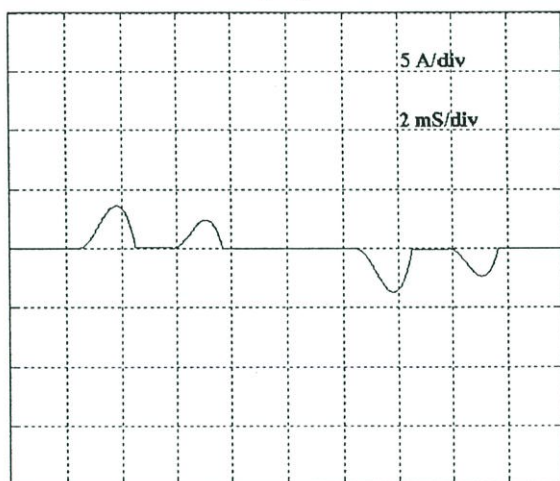
5.2.1 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค



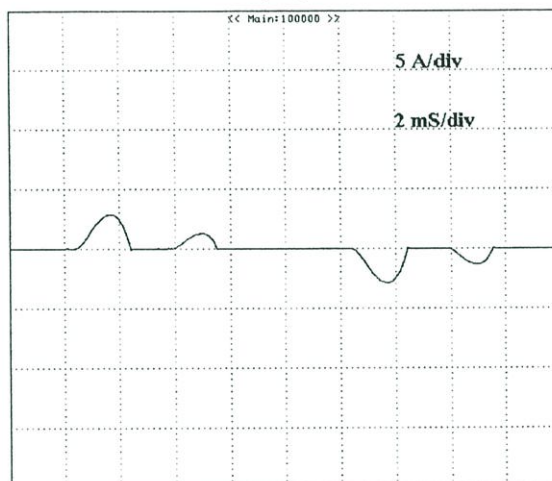
(ก)



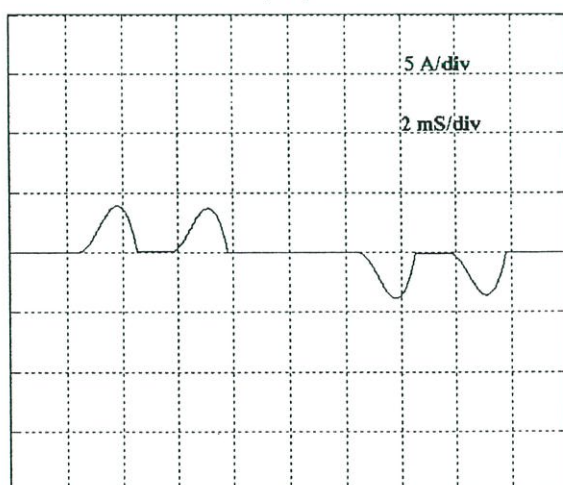
(ข)



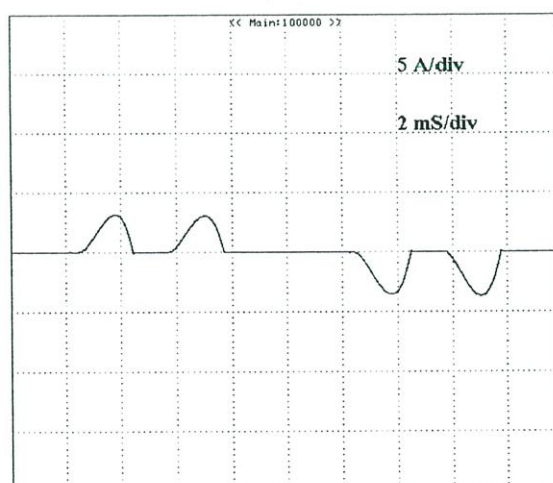
(ค)



(ง)



(จ)

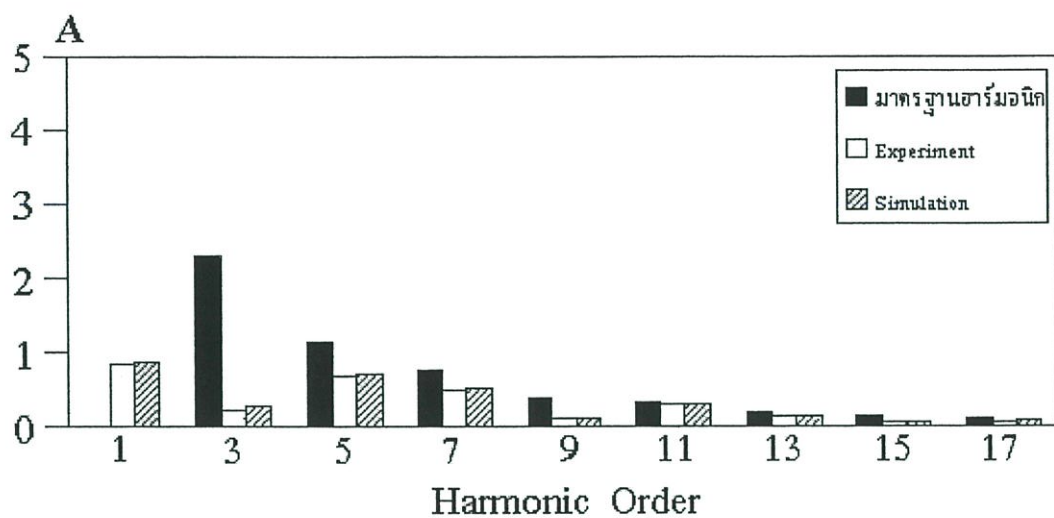


(ฉ)

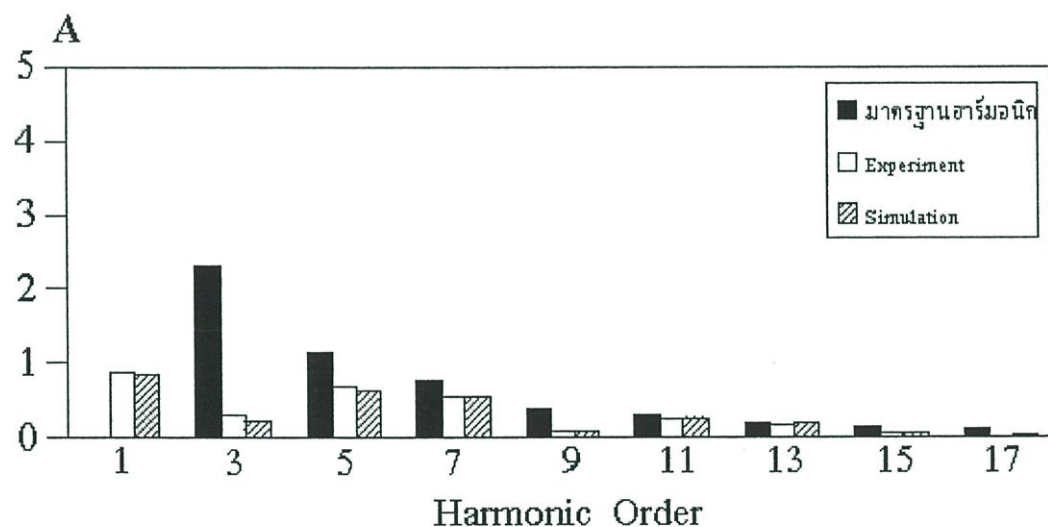
รูปที่ 5.24 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 10 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

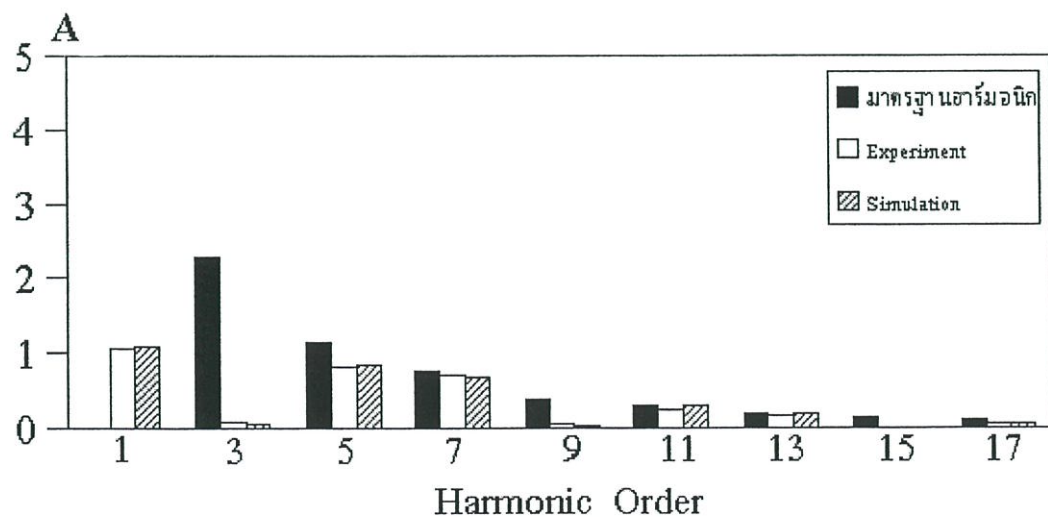
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



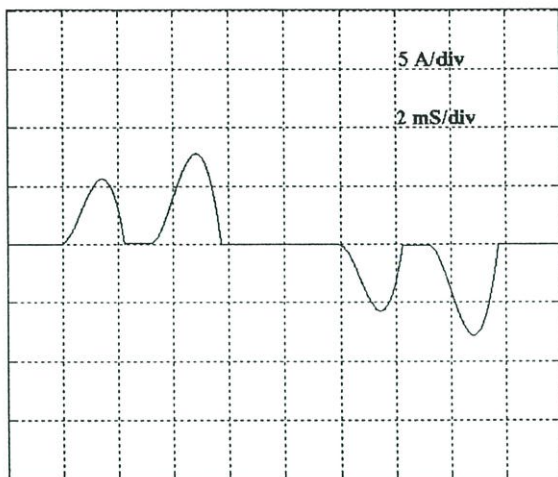
รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A



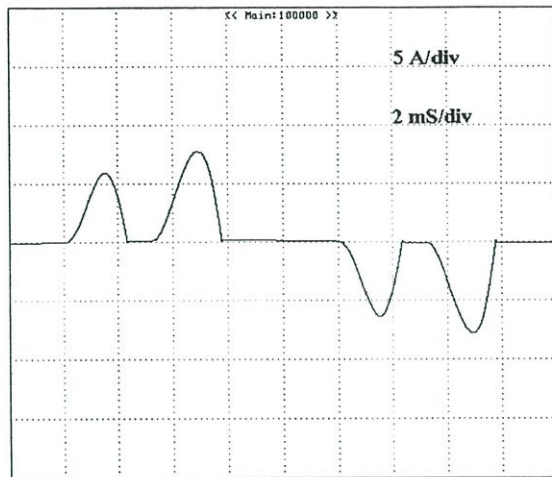
รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B



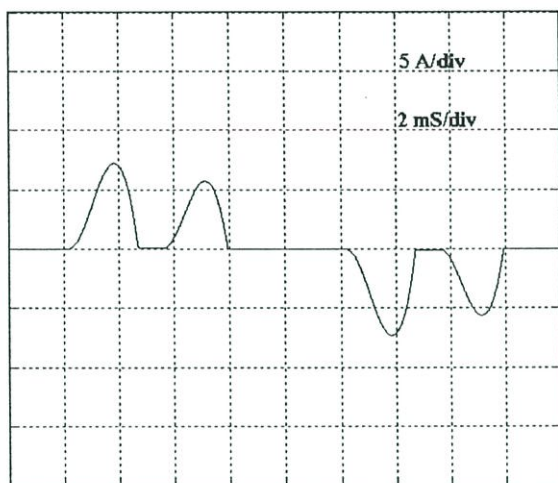
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C



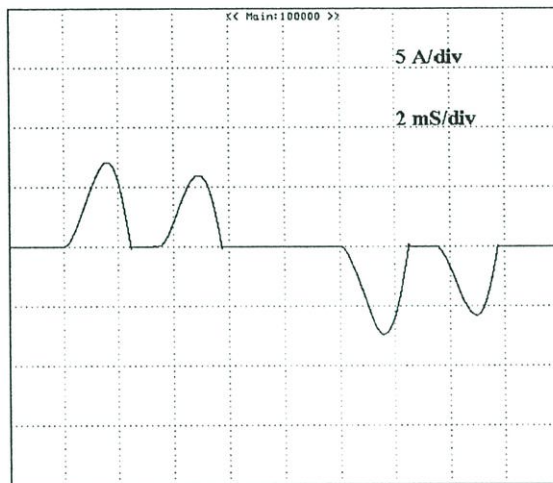
(ก)



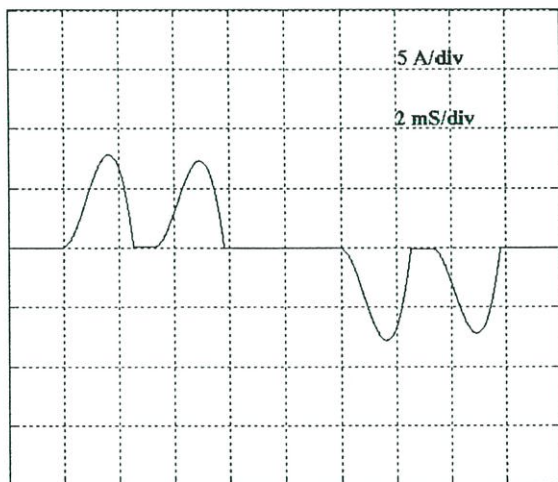
(ข)



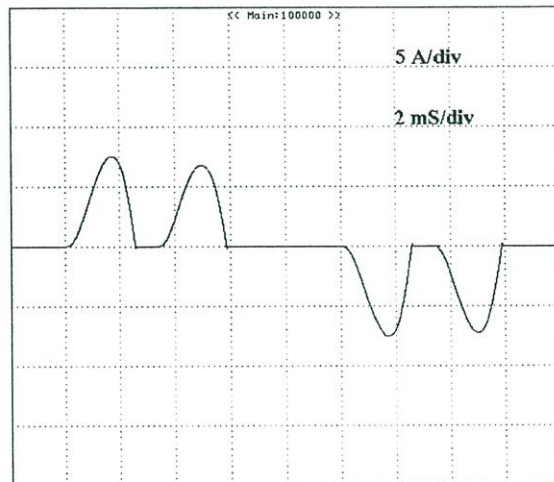
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.28 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 50 %

(ก) เฟส A Simulation

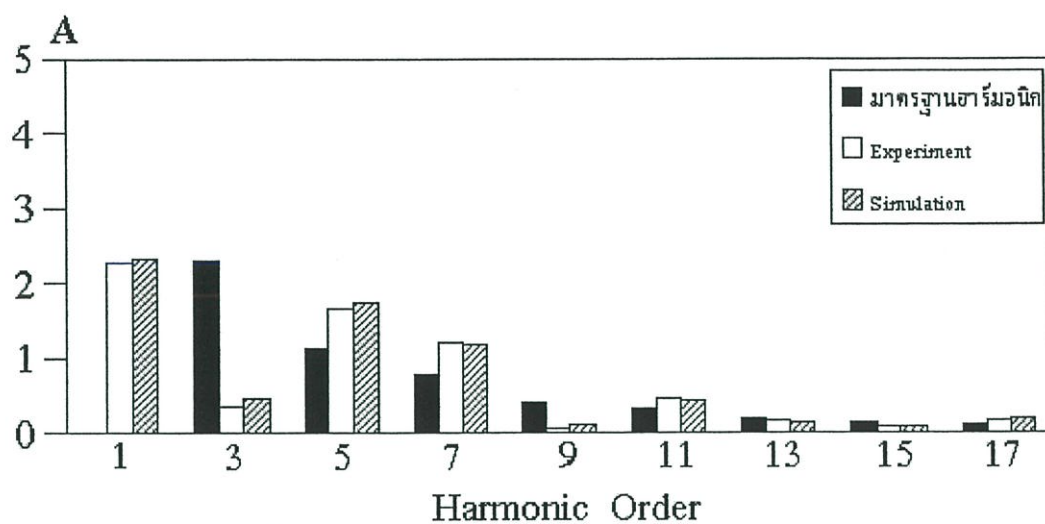
(ข) เฟส A Experiment

(ค) เฟส B Simulation

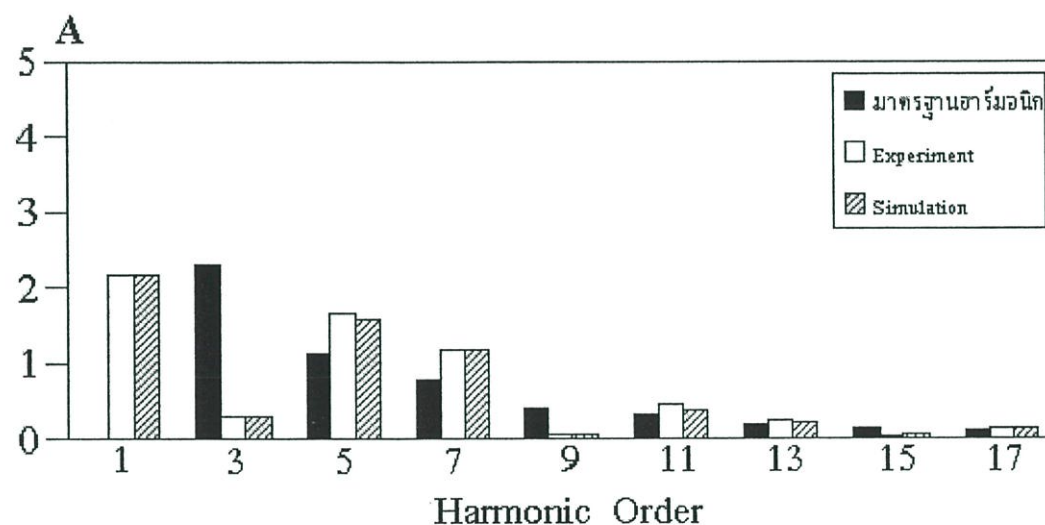
(ง) เฟส B Experiment

(จ) เฟส C Simulation

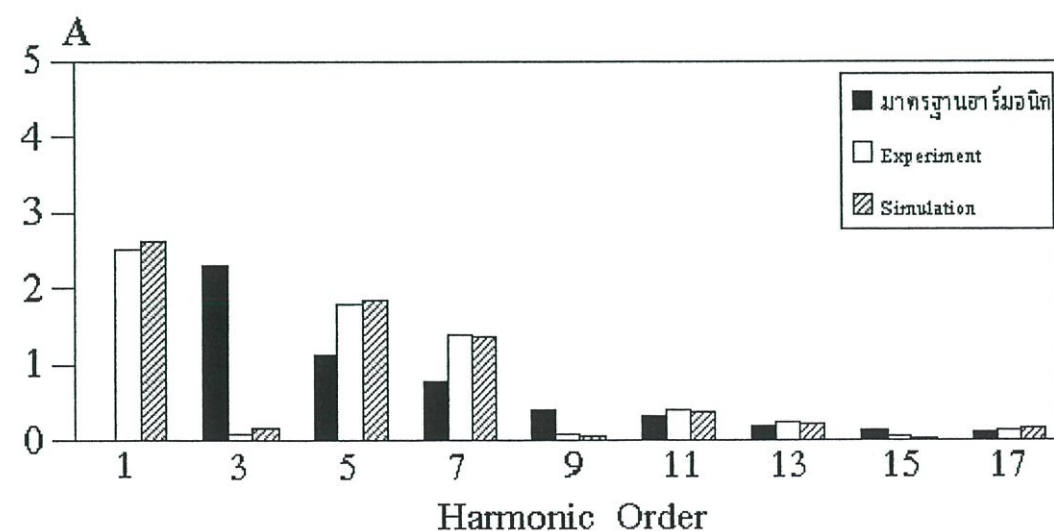
(ฉ) เฟส C Experiment



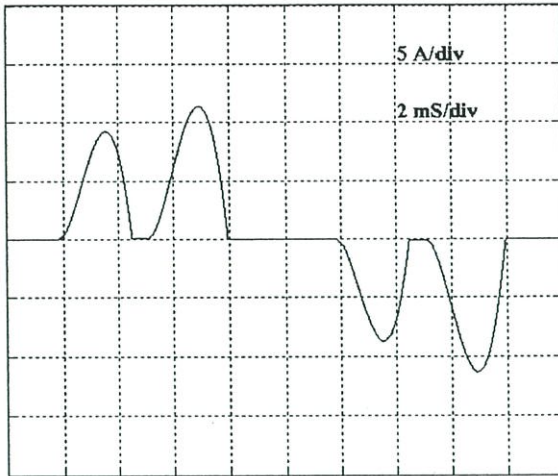
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A



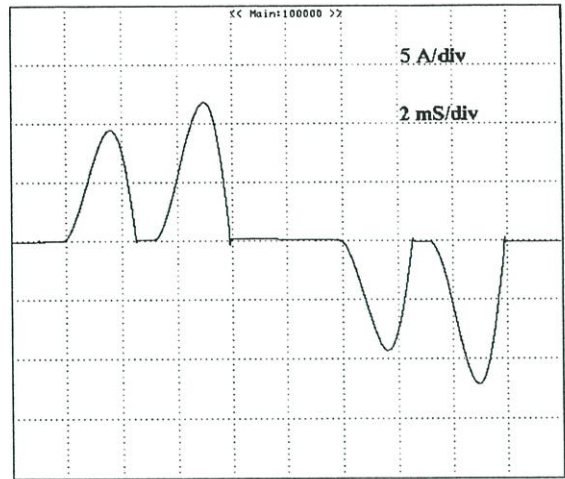
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B



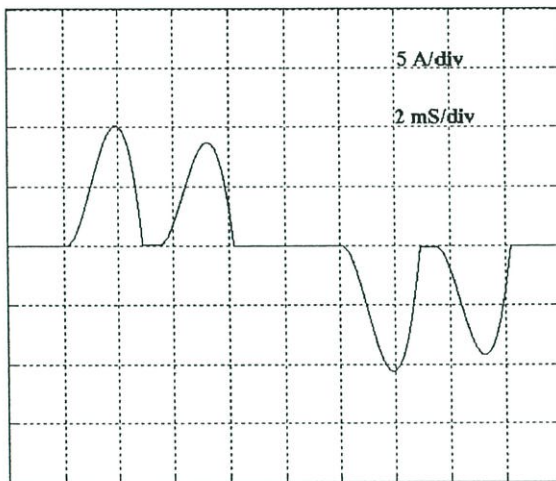
รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C



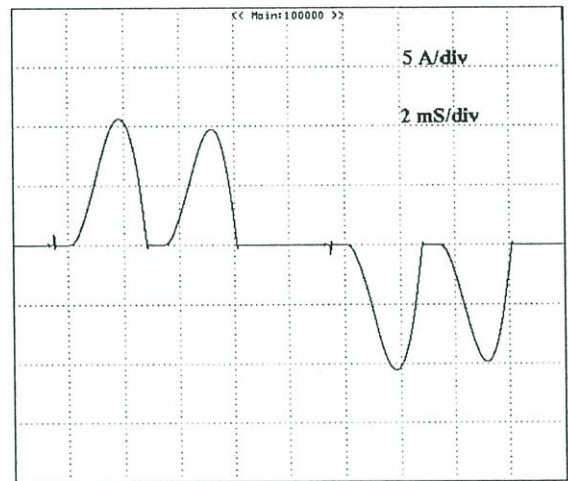
(ก)



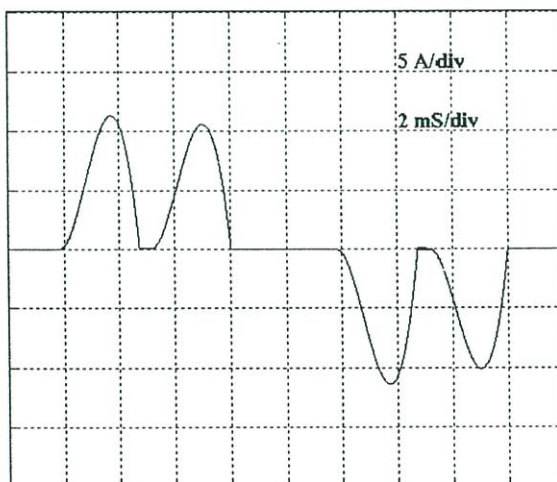
(ข)



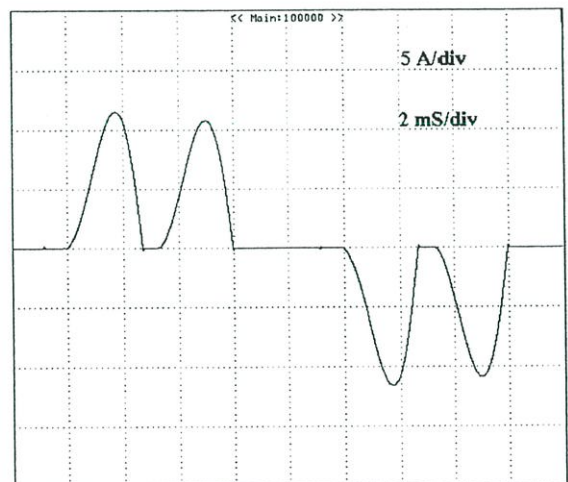
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.32 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation

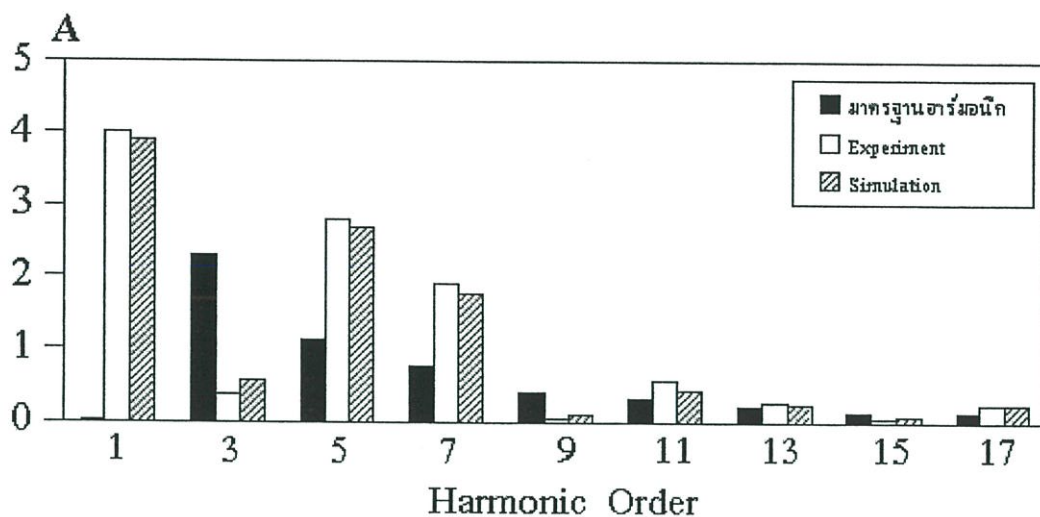
(ข) เฟส A Experiment

(ค) เฟส B Simulation

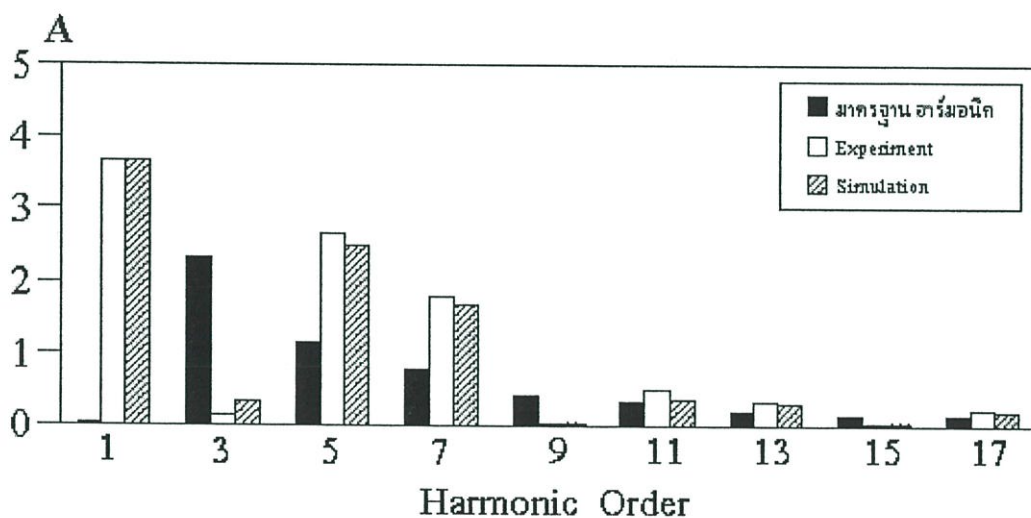
(ง) เฟส B Experiment

(จ) เฟส C Simulation

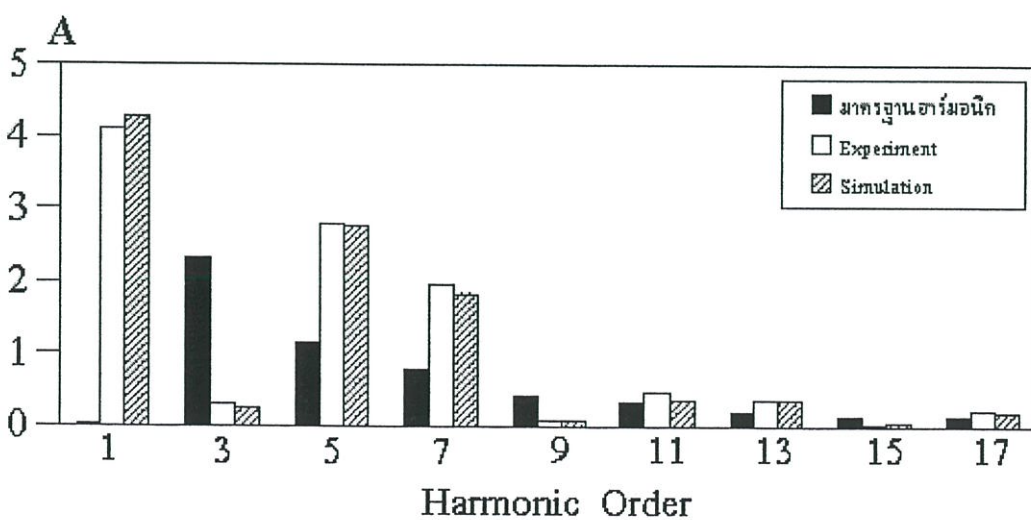
(ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

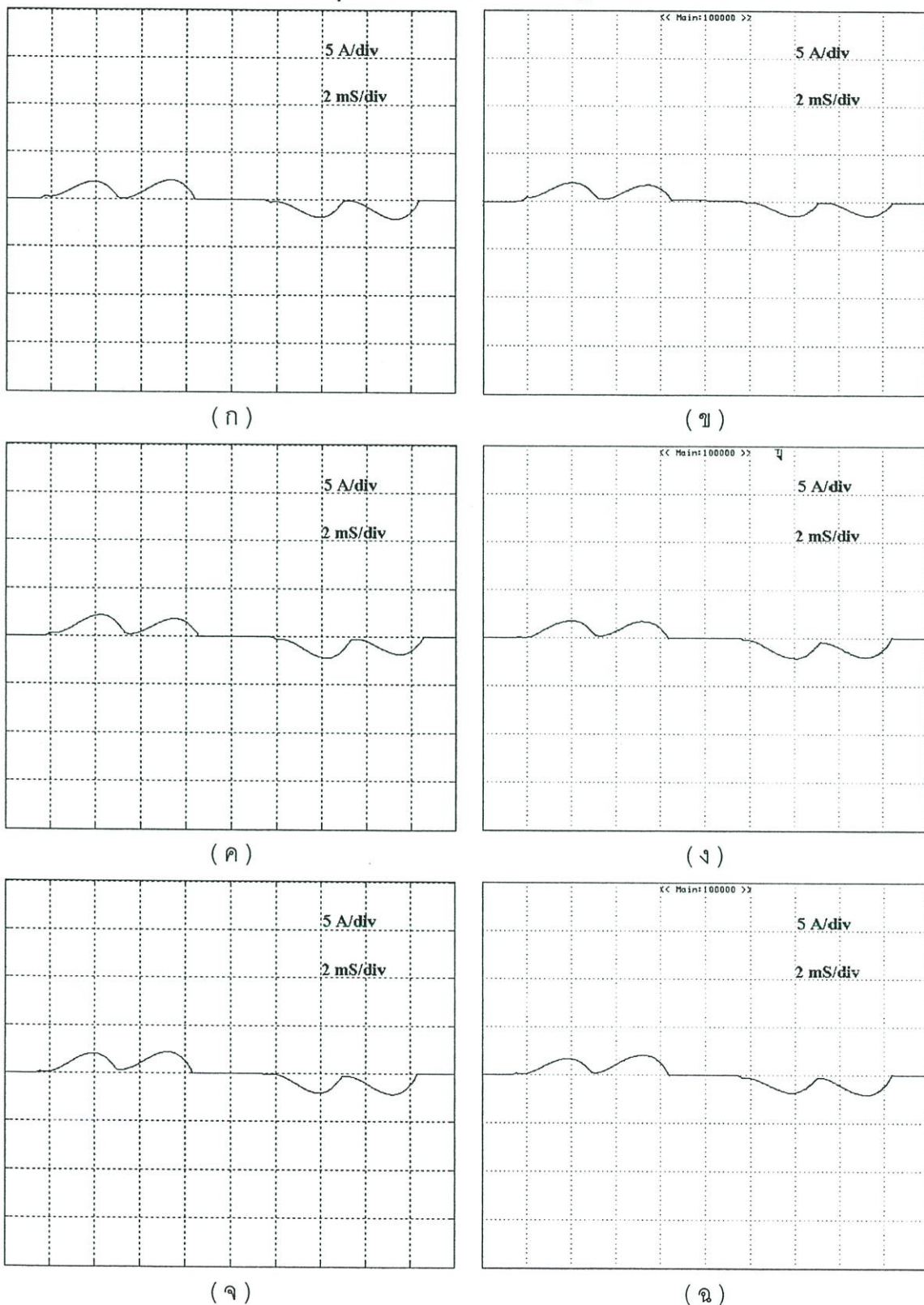


รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

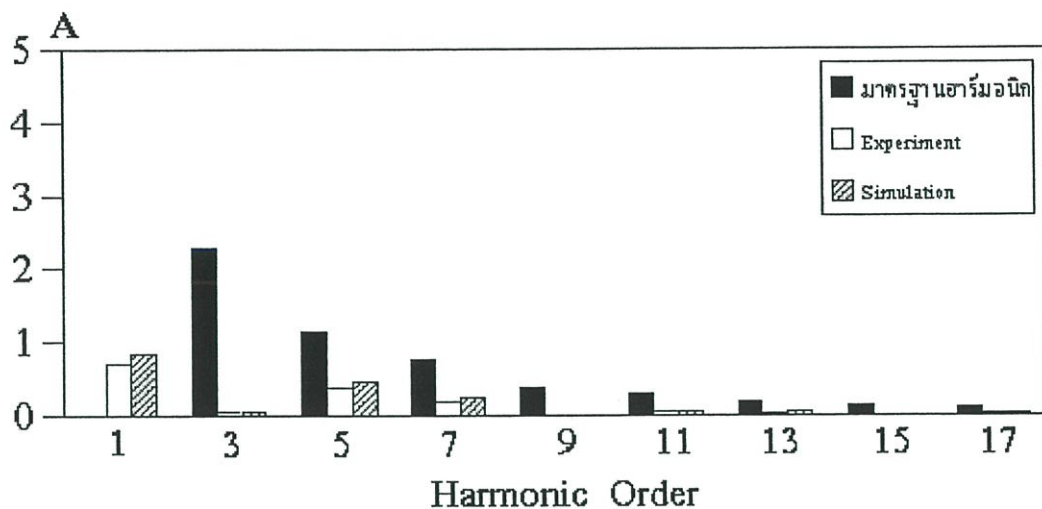
5.2.2 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งไข้ค



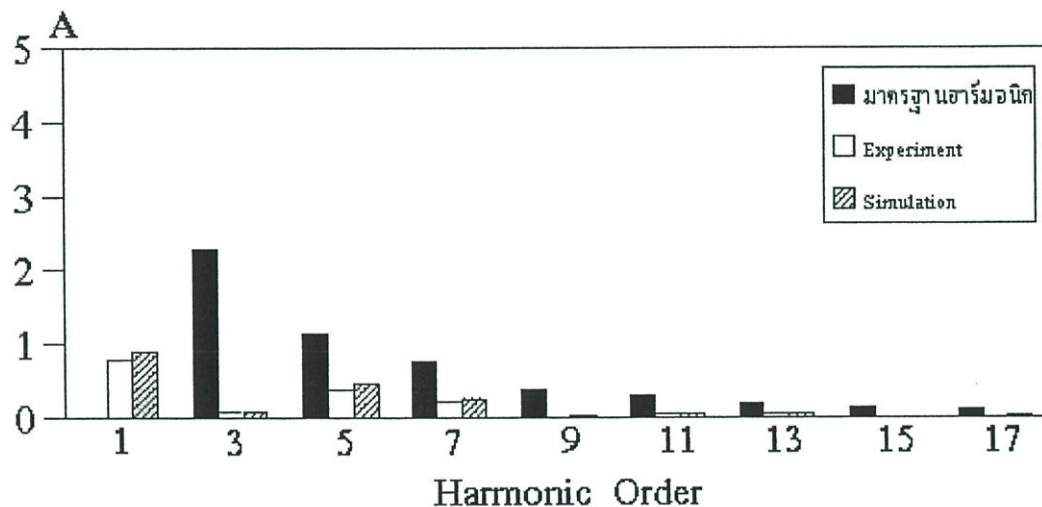
รูปที่ 5.36 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 10 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

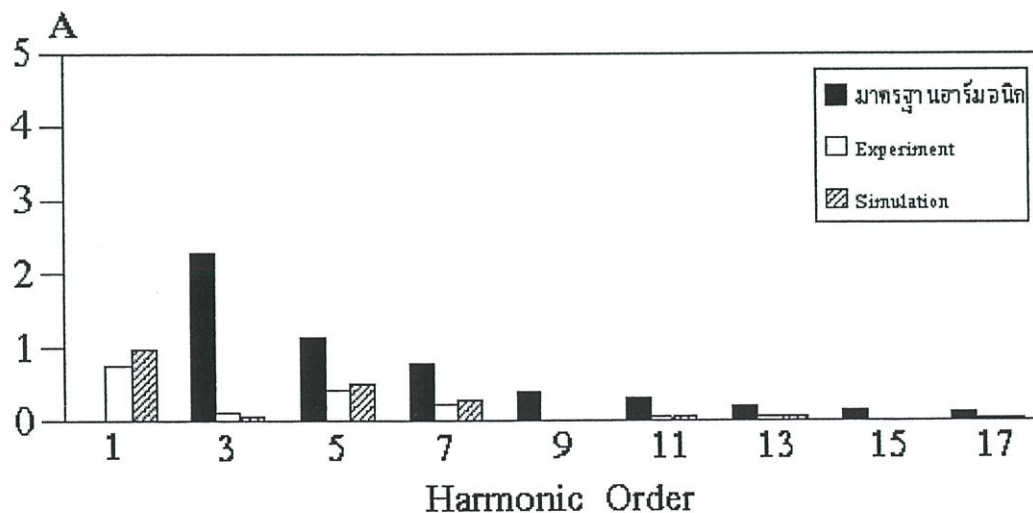
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



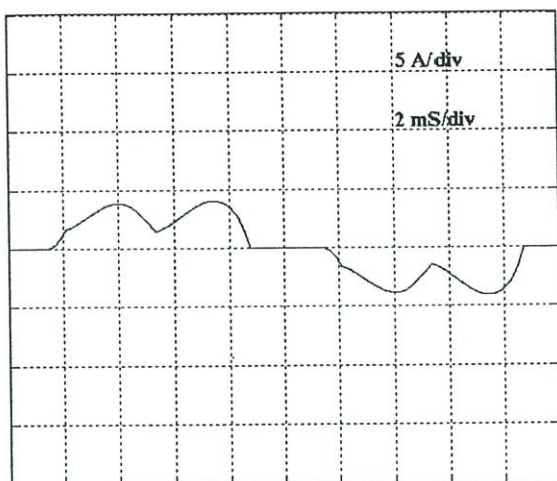
รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A



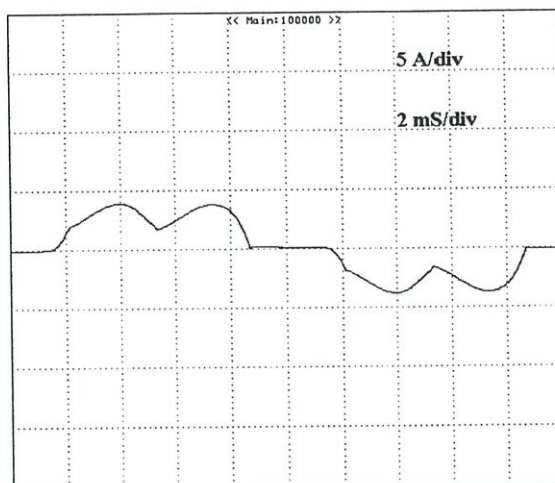
รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B



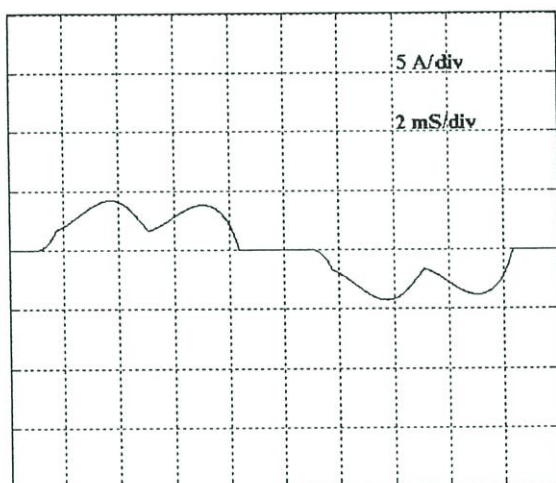
รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C



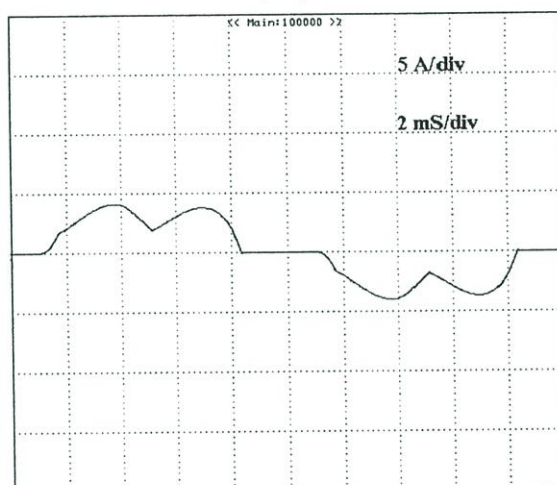
(ก)



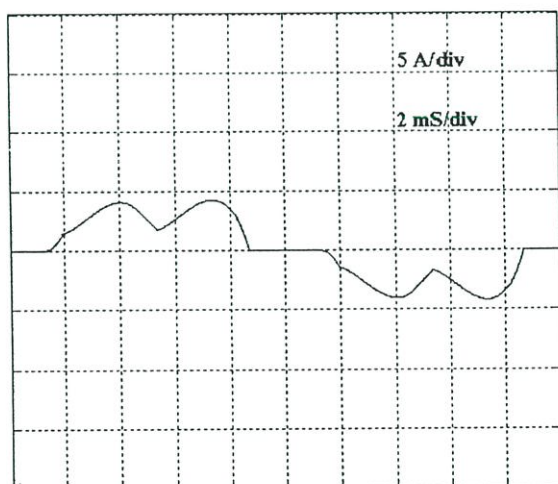
(ข)



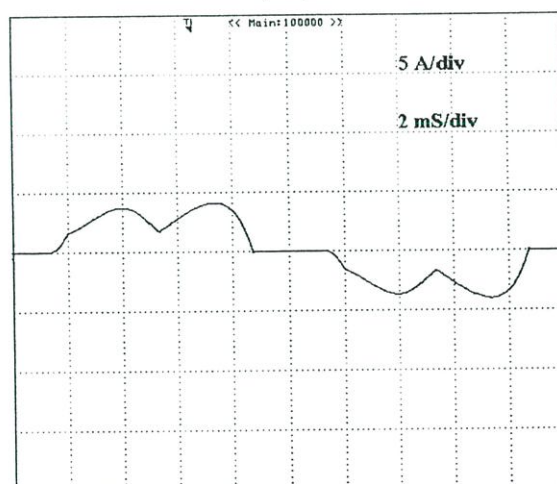
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.40 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาระ 50 %

(ก) เฟส A Simulation

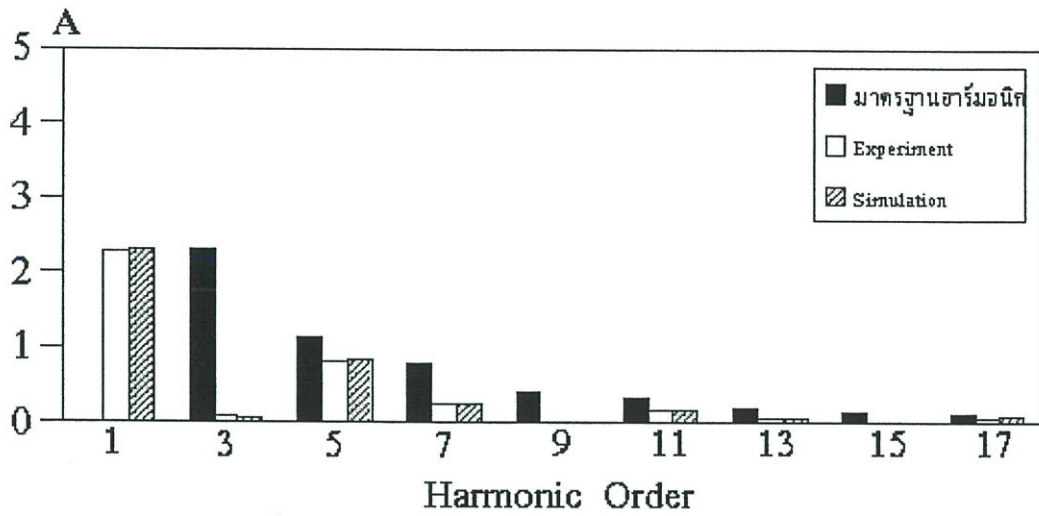
(ข) เฟส A Experiment

(ค) เฟส B Simulation

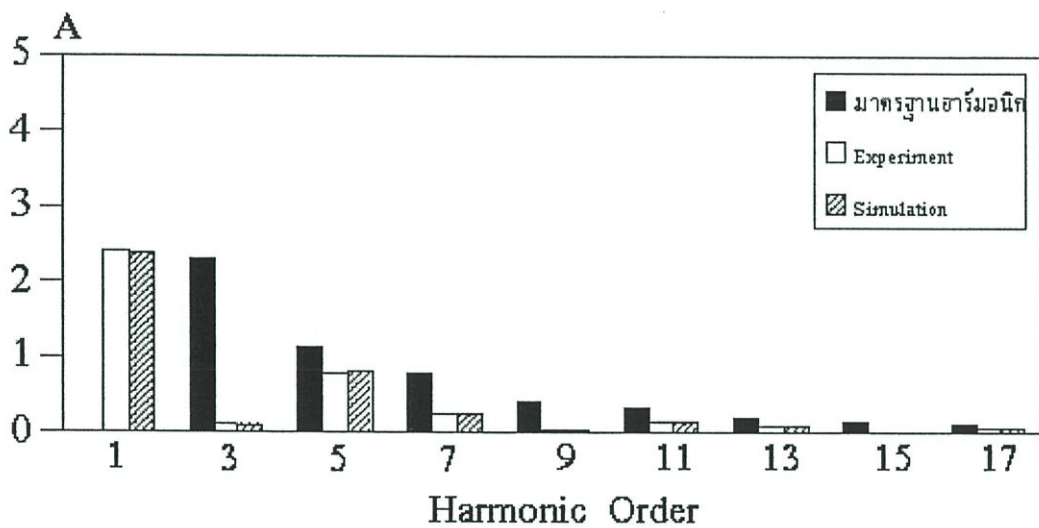
(ง) เฟส B Experiment

(จ) เฟส C Simulation

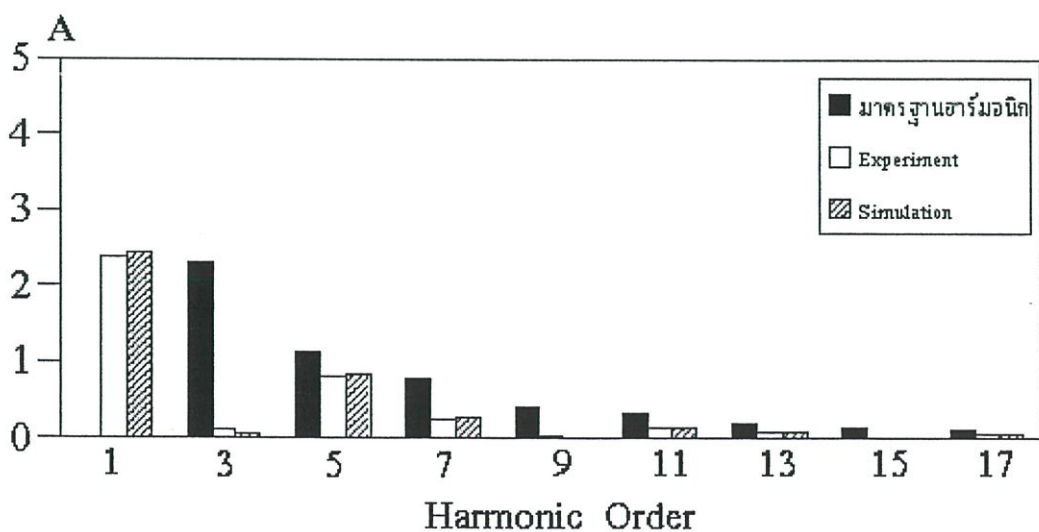
(ฉ) เฟส C Experiment



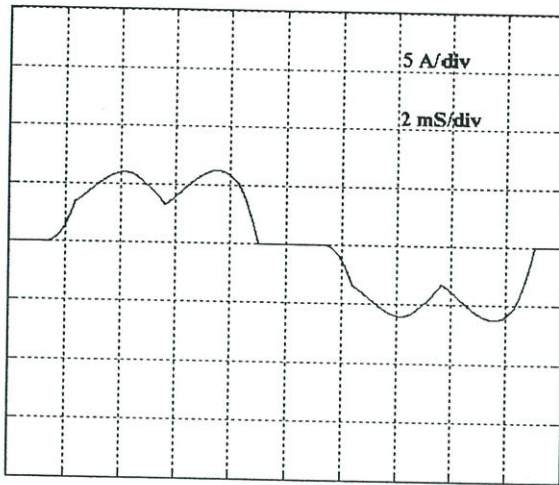
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A



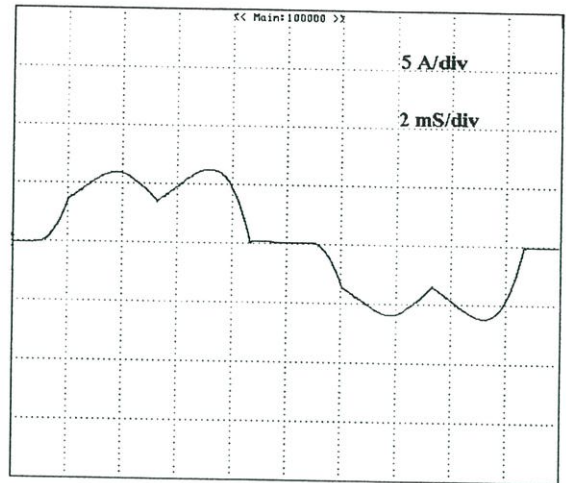
รูปที่ 5.42 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B



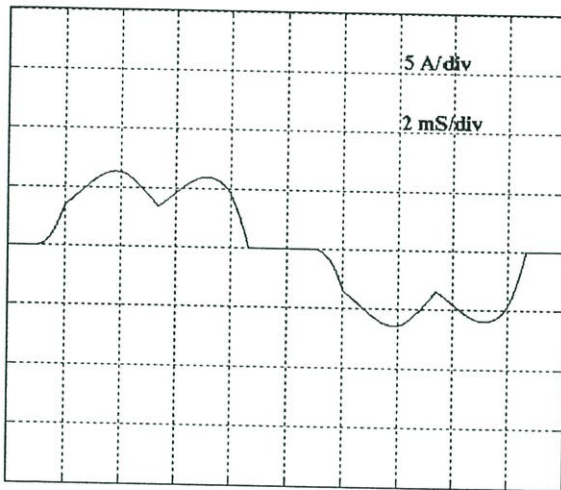
รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C



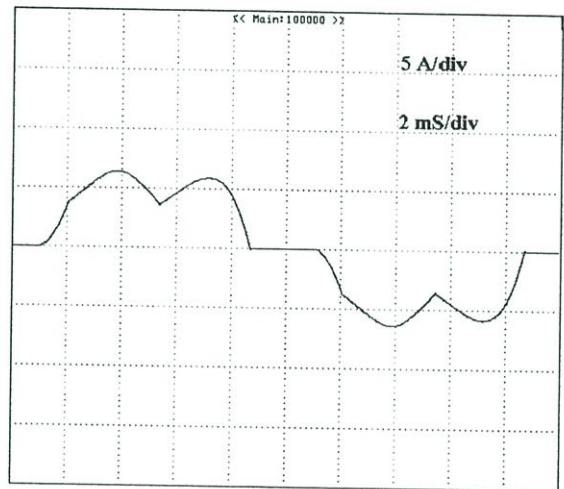
(ก)



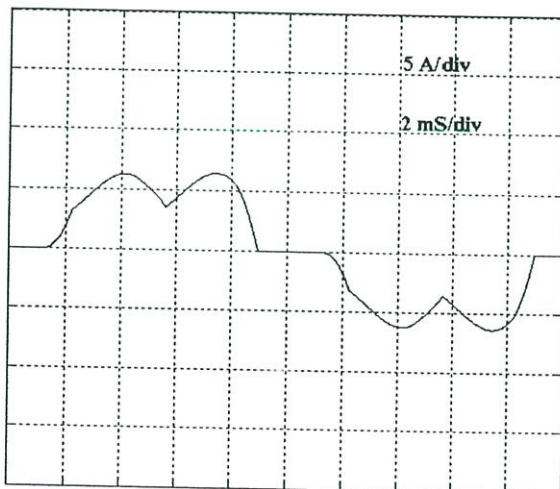
(ข)



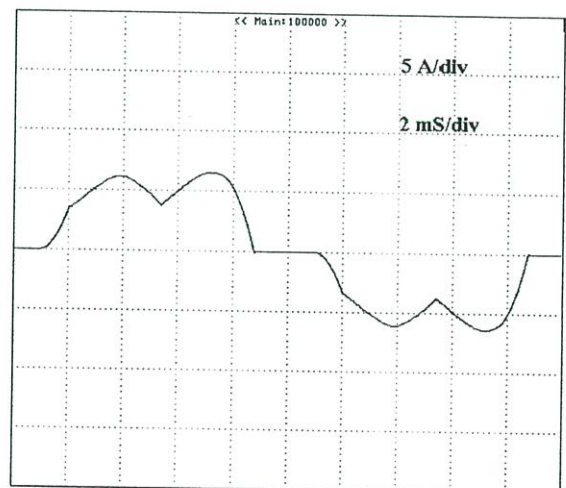
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.44 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ over voltage ที่ภาระ 90 %

(ก) เฟส A Simulation

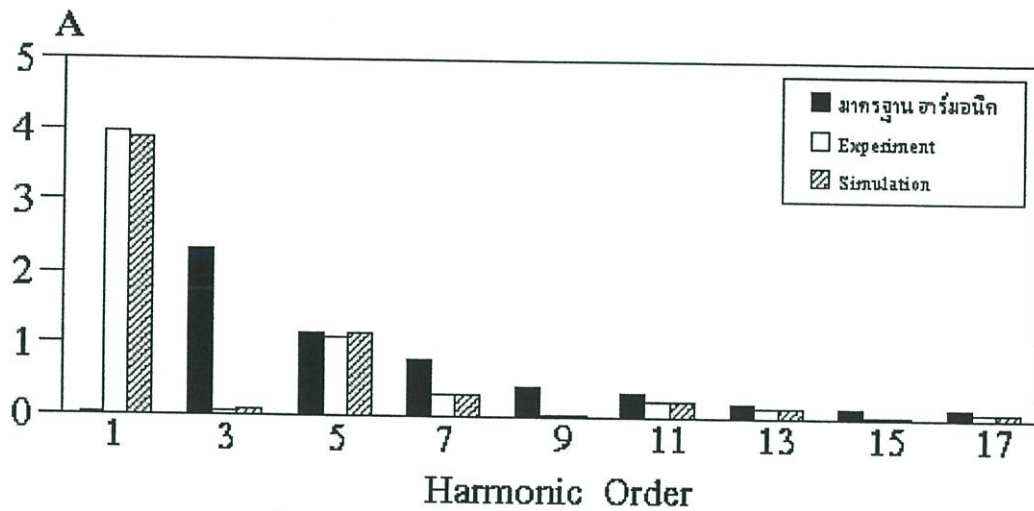
(ข) เฟส A Experiment

(ค) เฟส B Simulation

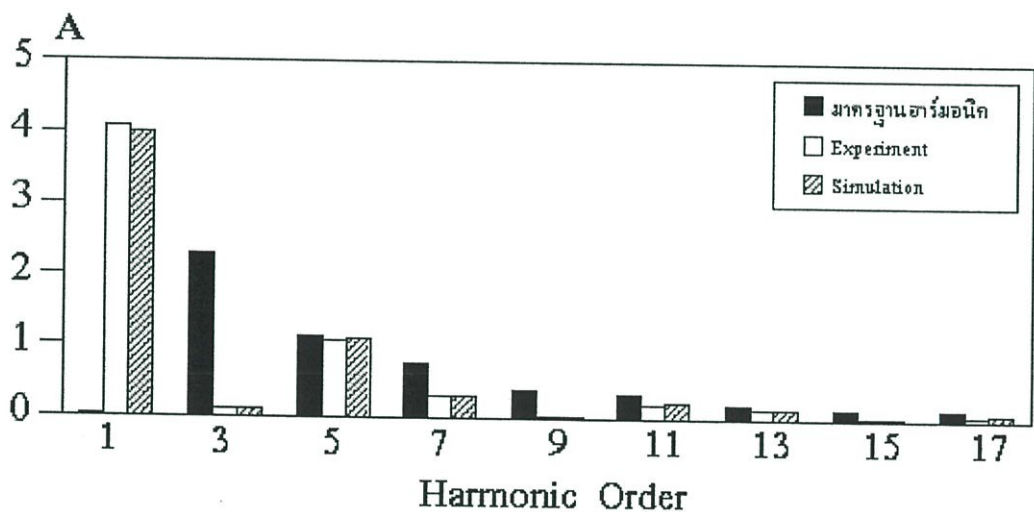
(ง) เฟส B Experiment

(จ) เฟส C Simulation

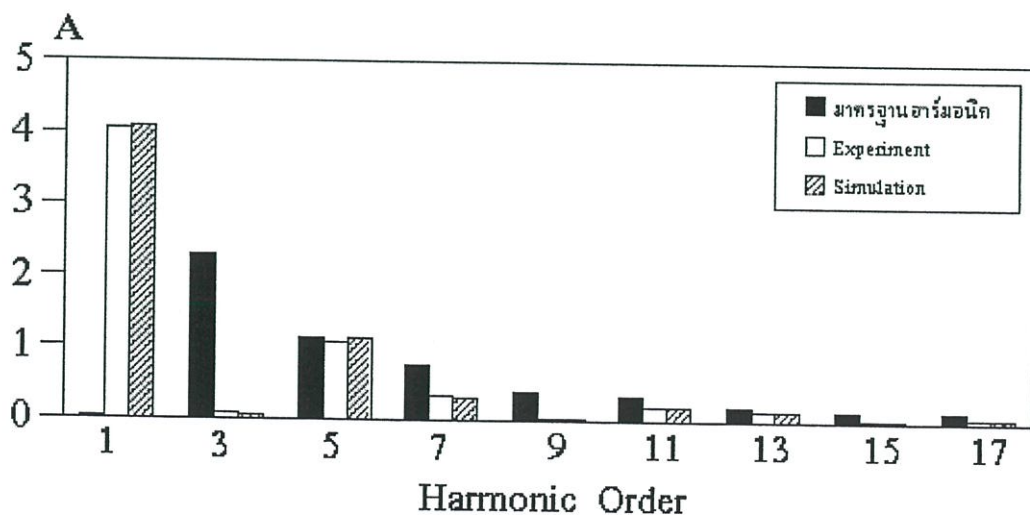
(ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.45 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

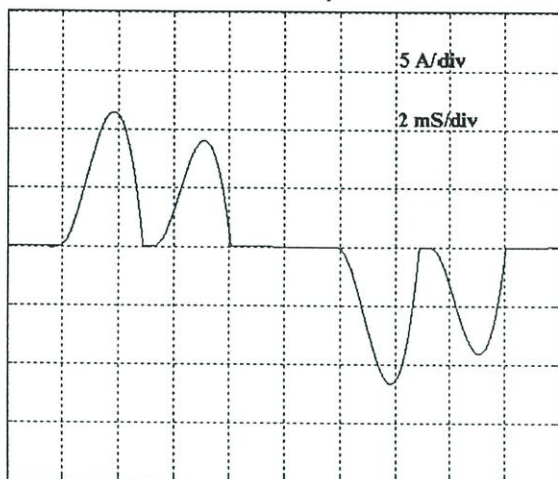


รูปที่ 5.46 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

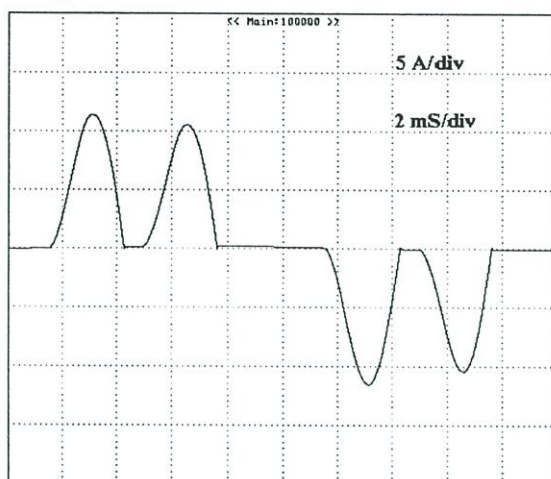


รูปที่ 5.47 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

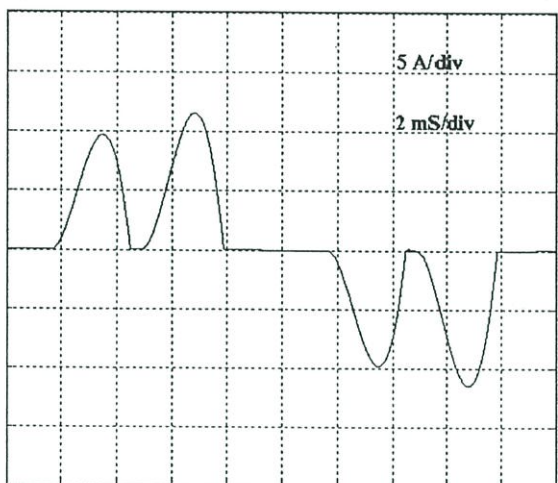
5.2.3 กรณีแรงดัน ไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้



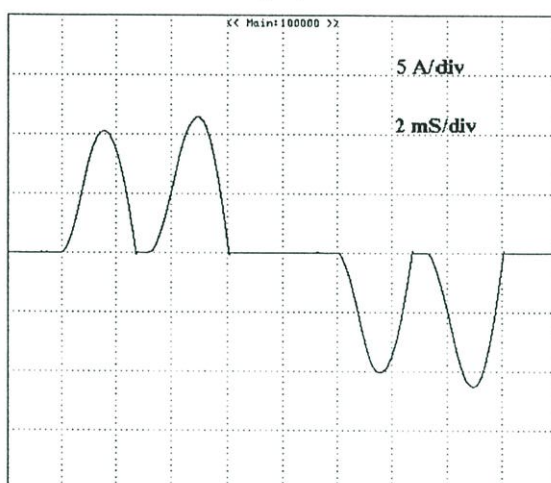
(ก)



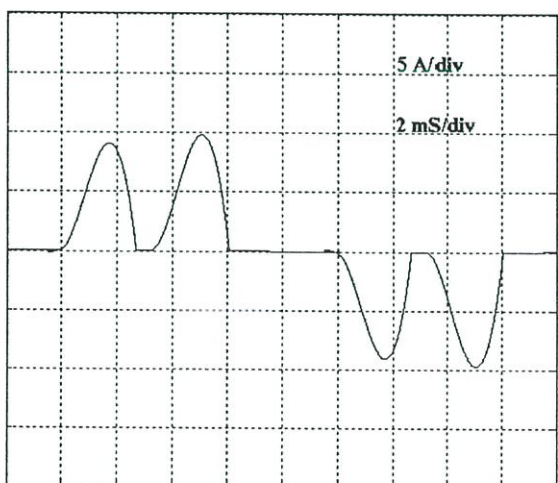
(ข)



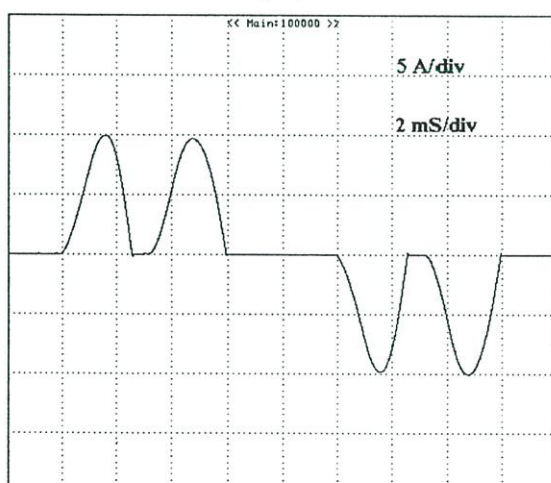
(ค)



(ง)



(จ)

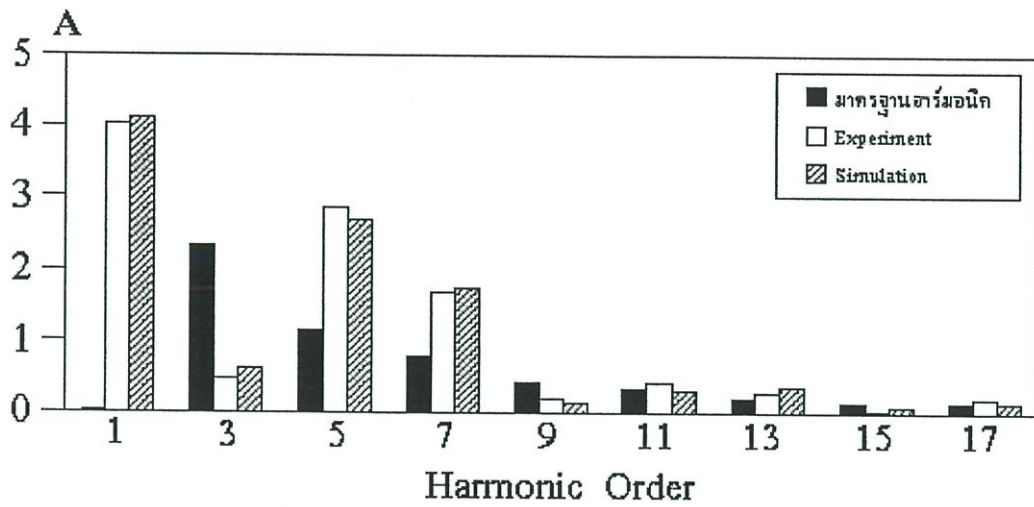


(ฉ)

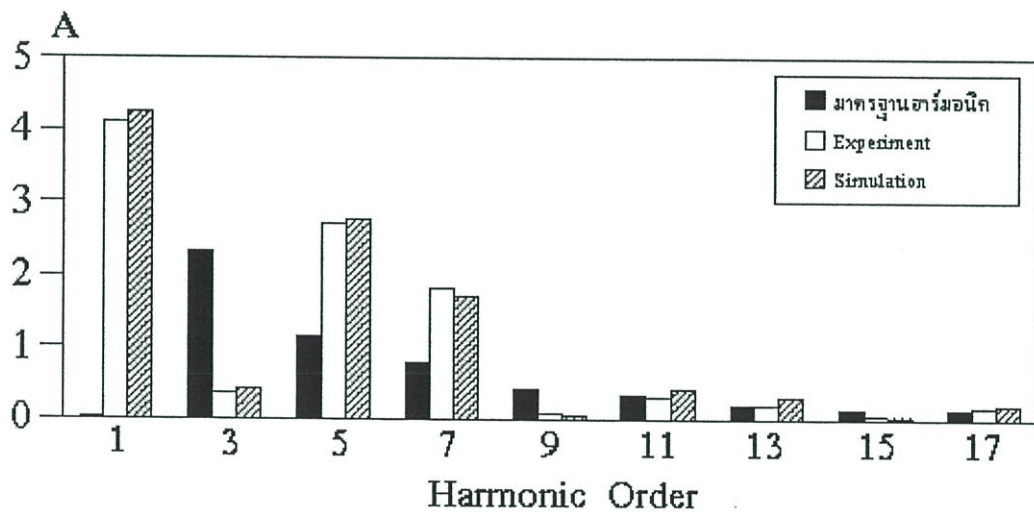
รูปที่ 5.48 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

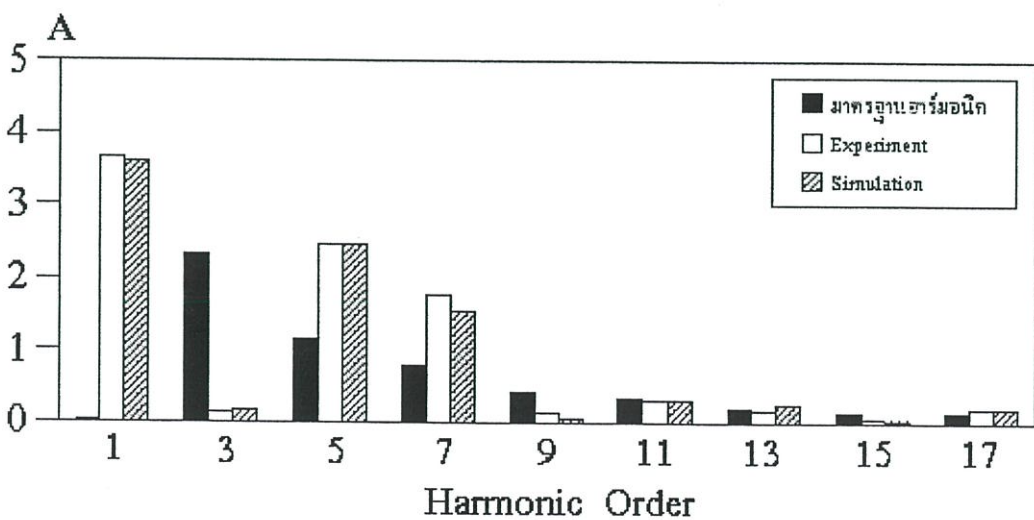
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

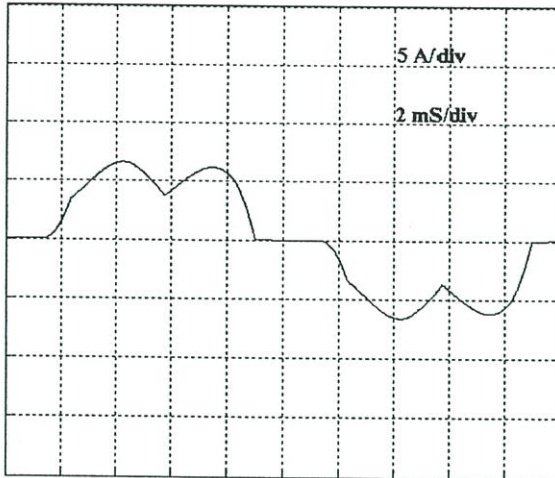


รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

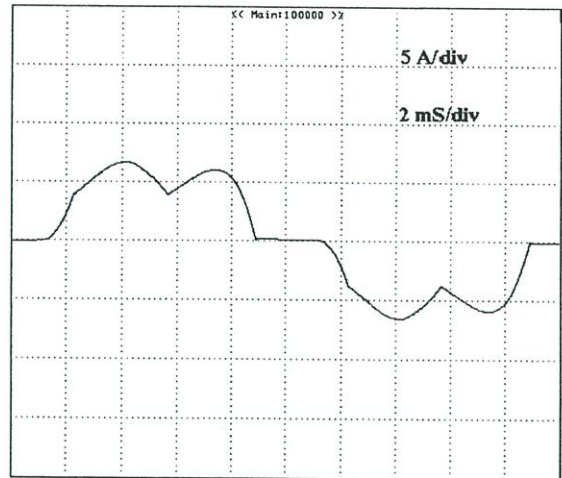


รูปที่ 5.51 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

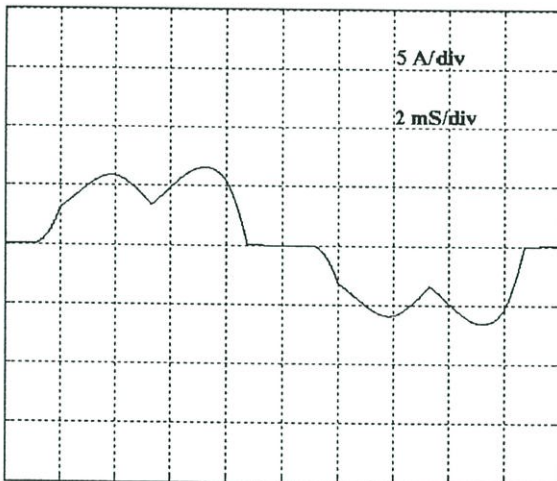
5.2.4 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโซ้ค



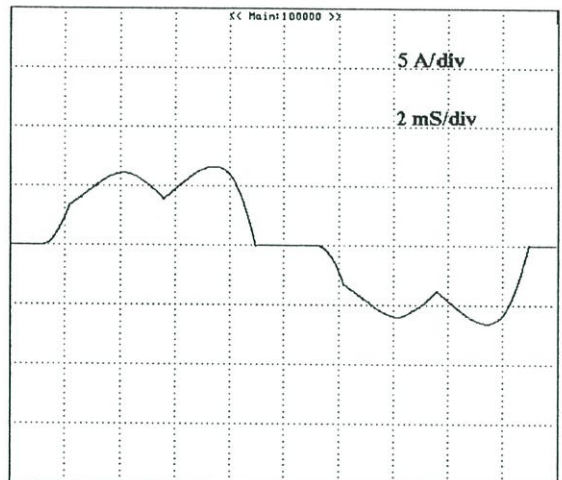
(ก)



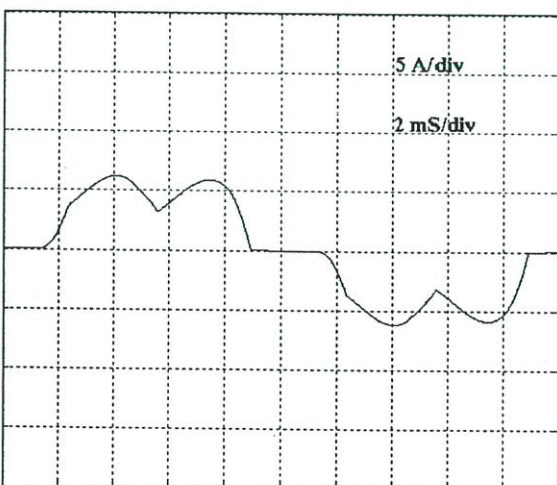
(ข)



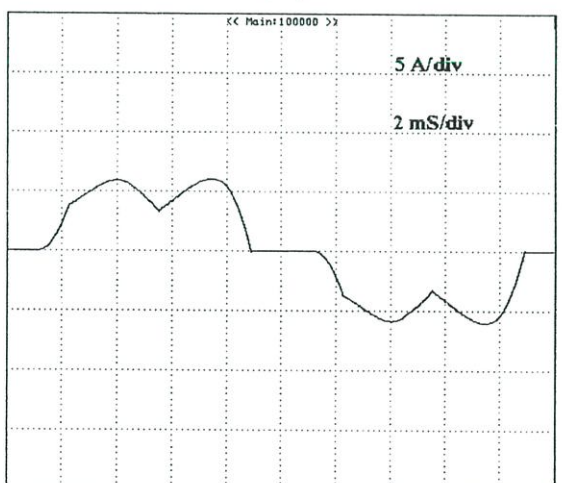
(ค)



(ง)



(จ)

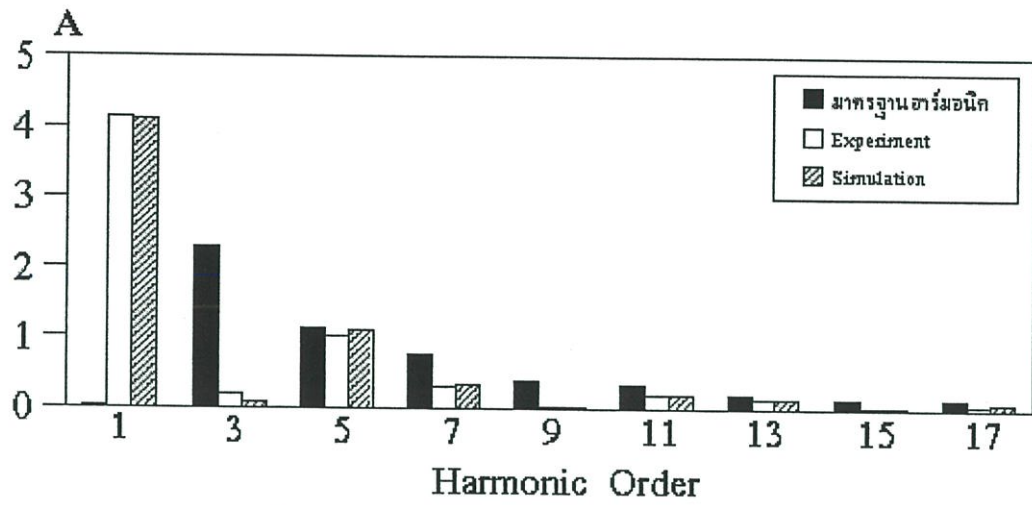


(ฉ)

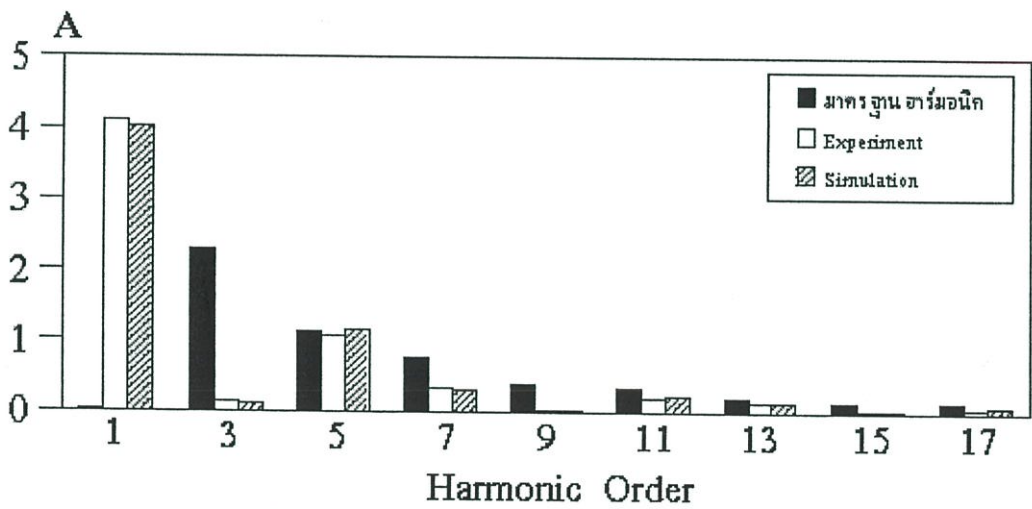
รูปที่ 5.52 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1 % แบบ under voltage ที่ภาระ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

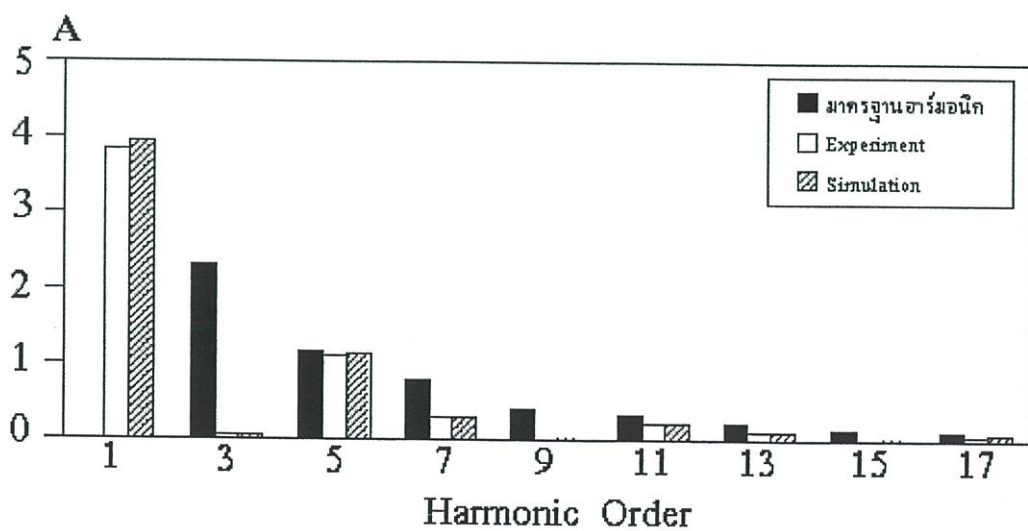
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.53 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

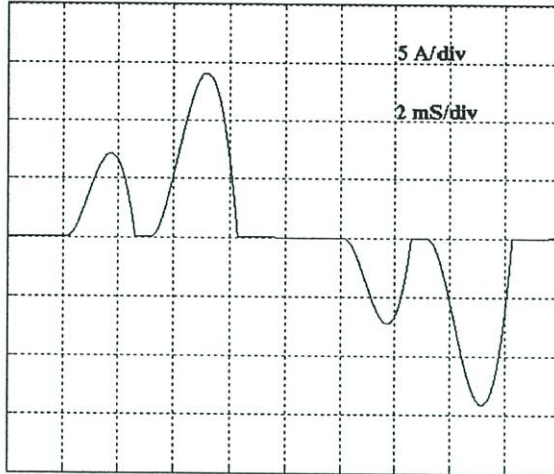


รูปที่ 5.54 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

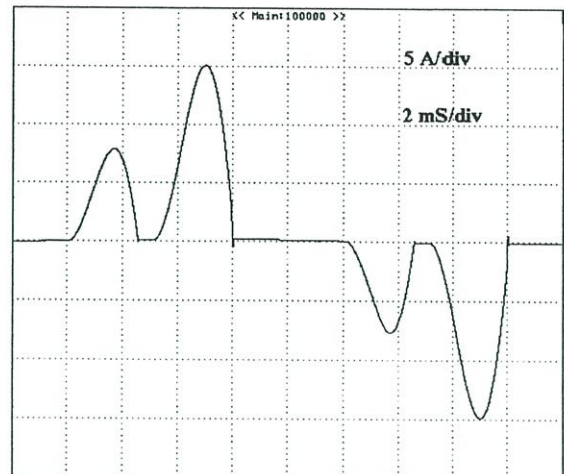


รูปที่ 5.55 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

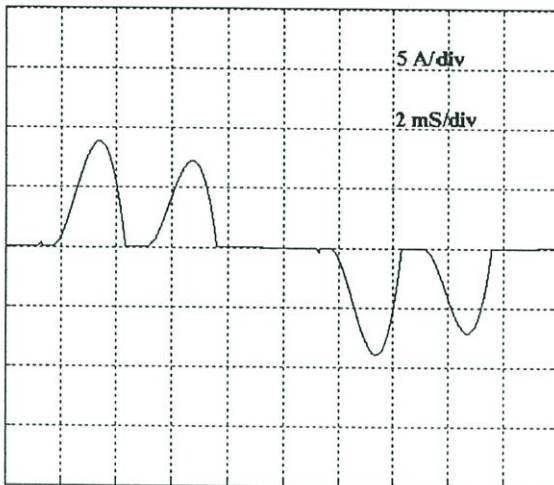
5.2.5 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโช้ค



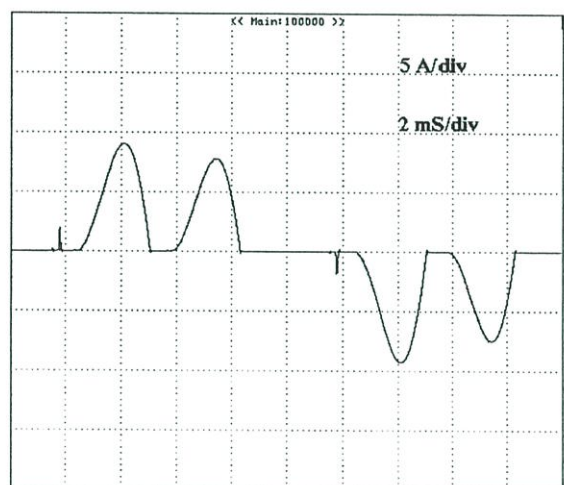
(ก)



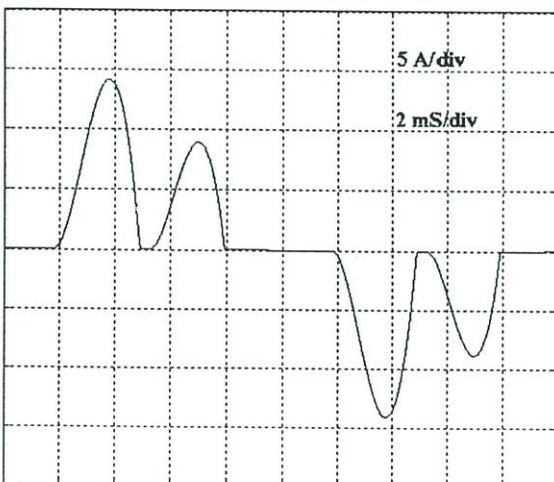
(ข)



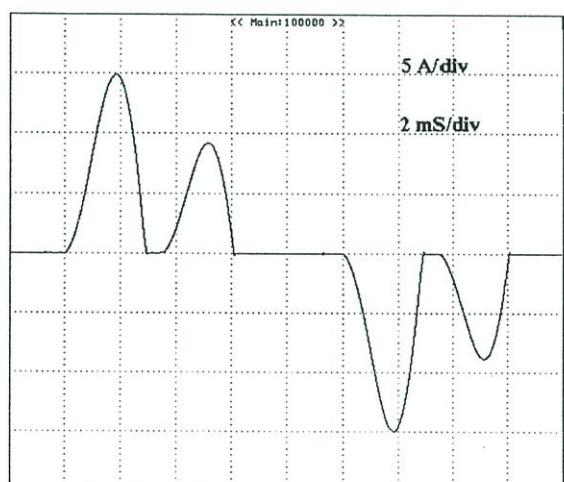
(ค)



(ง)



(จ)

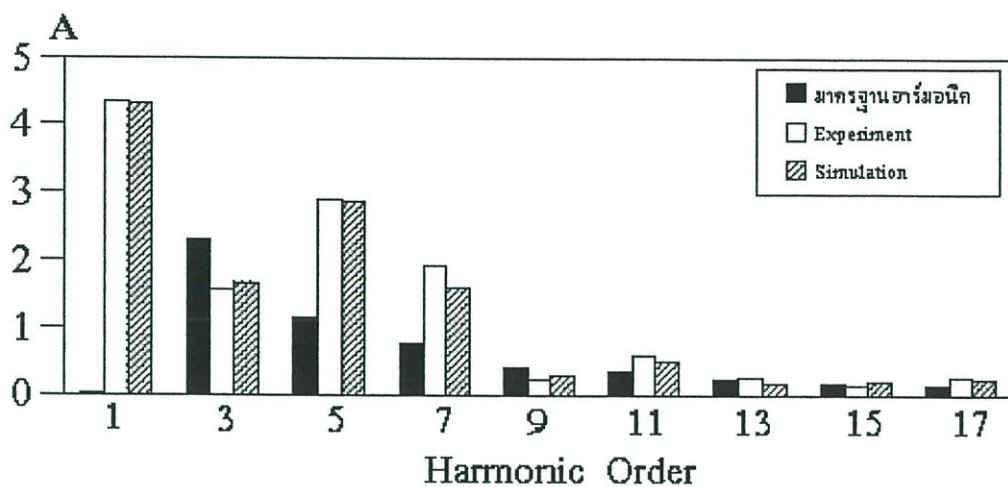


(ฉ)

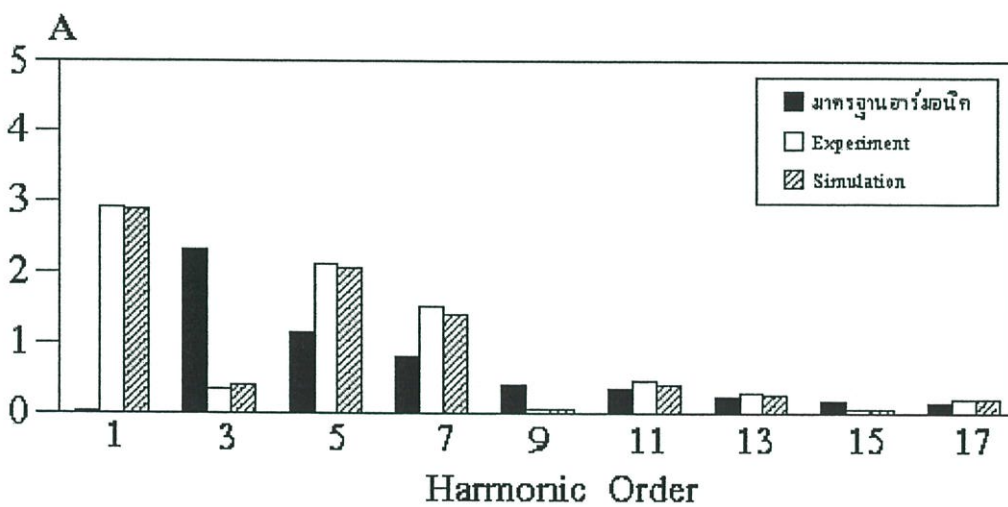
รูปที่ 5.56 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

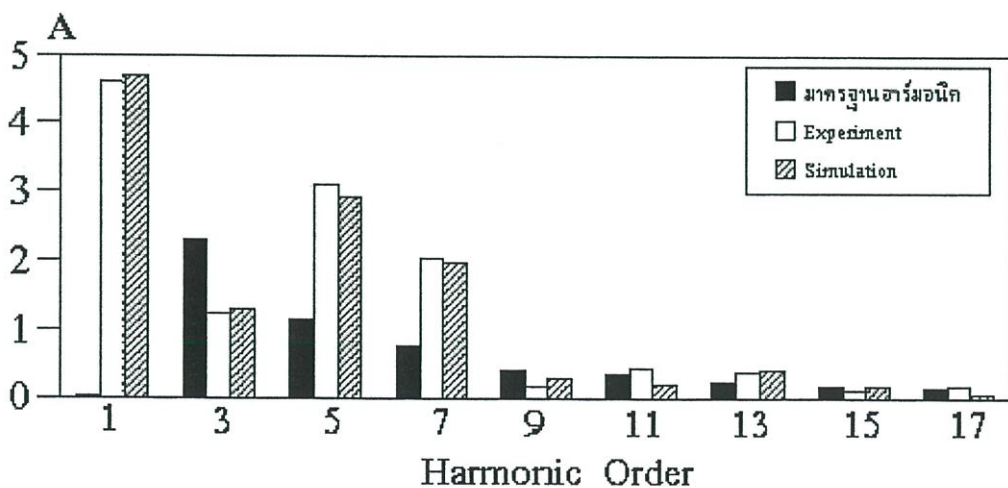
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.57 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

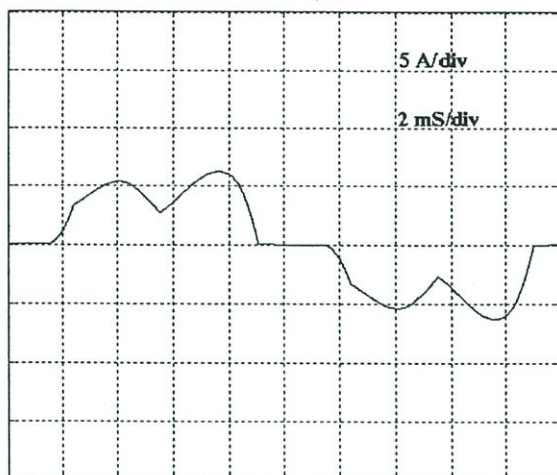


รูปที่ 5.58 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

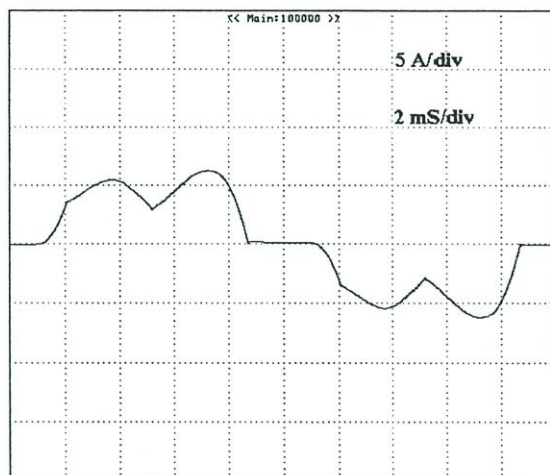


รูปที่ 5.59 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

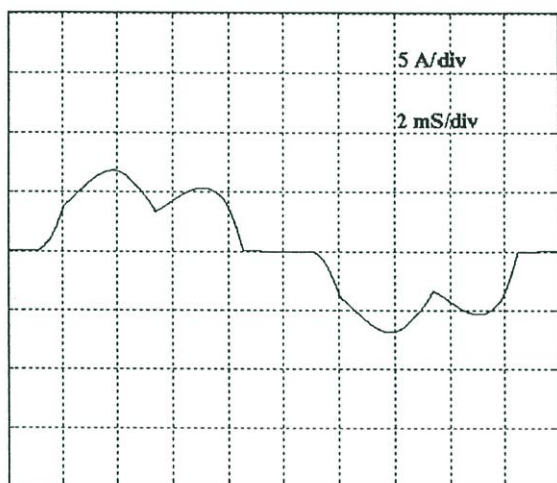
5.2.6 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งโซ่ค



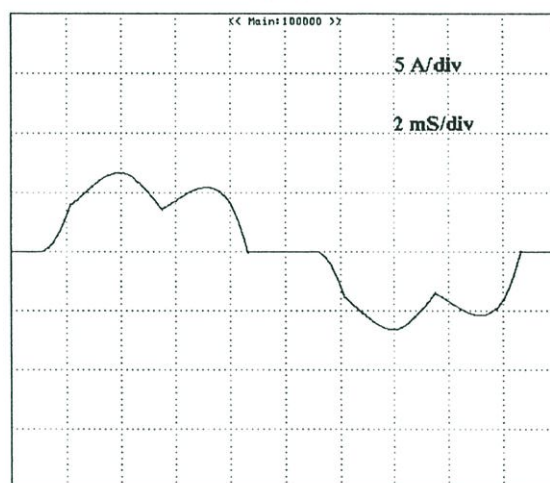
(ก)



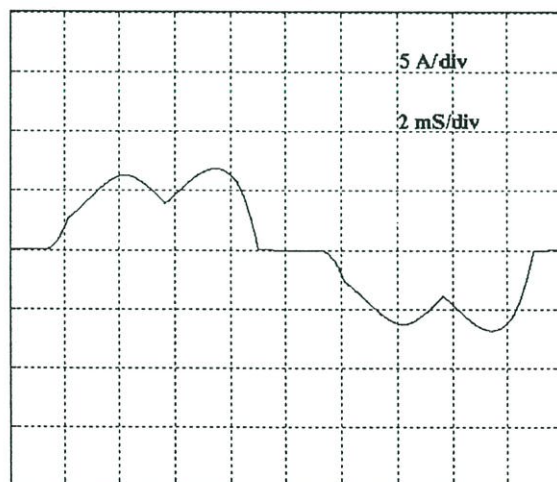
(ข)



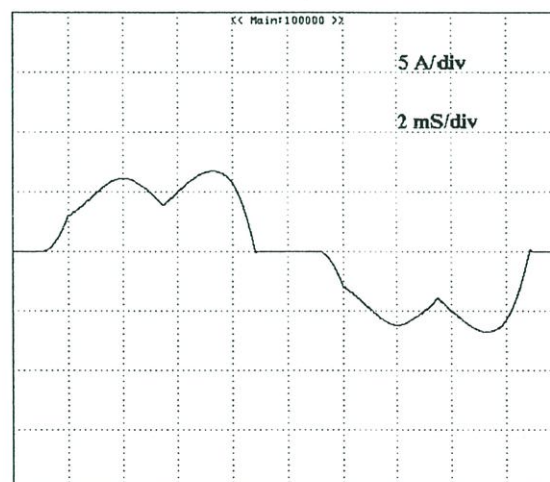
(ค)



(ง)



(จ)

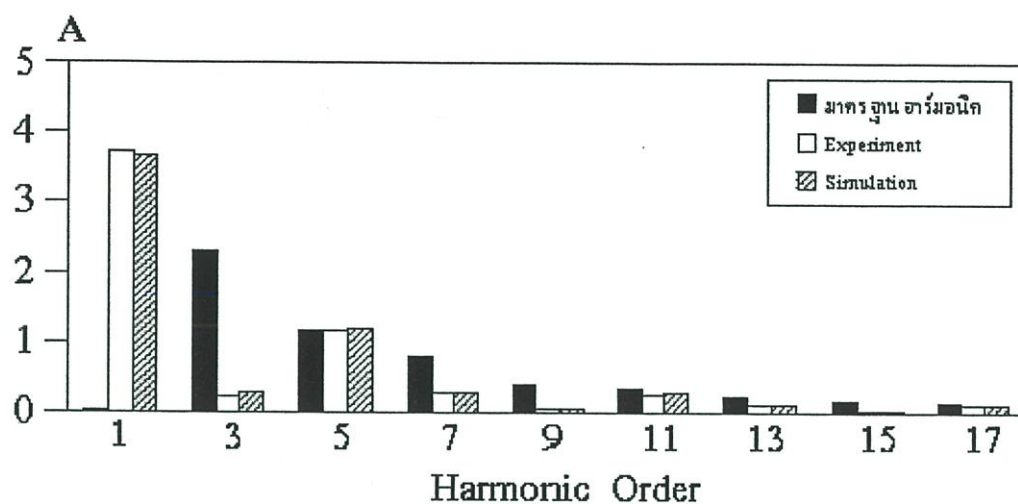


(ฉ)

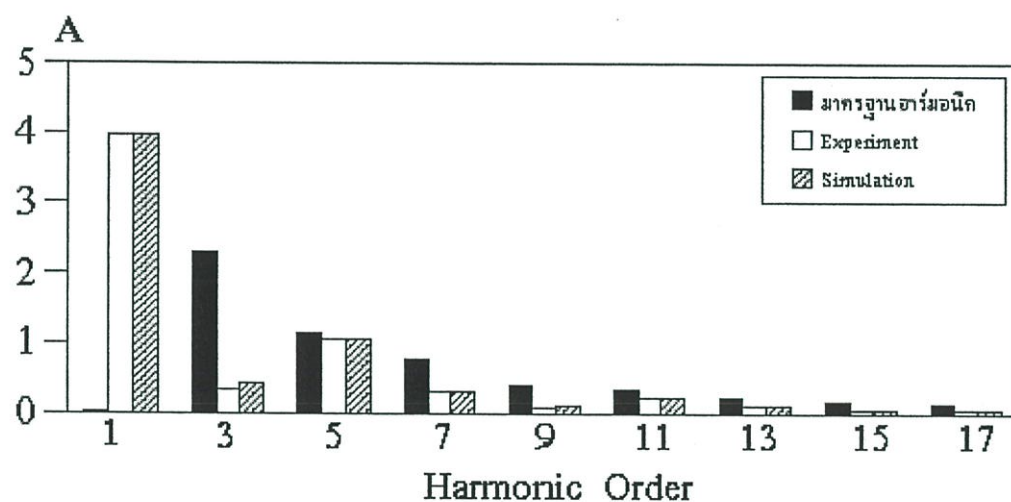
รูปที่ 5.60 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

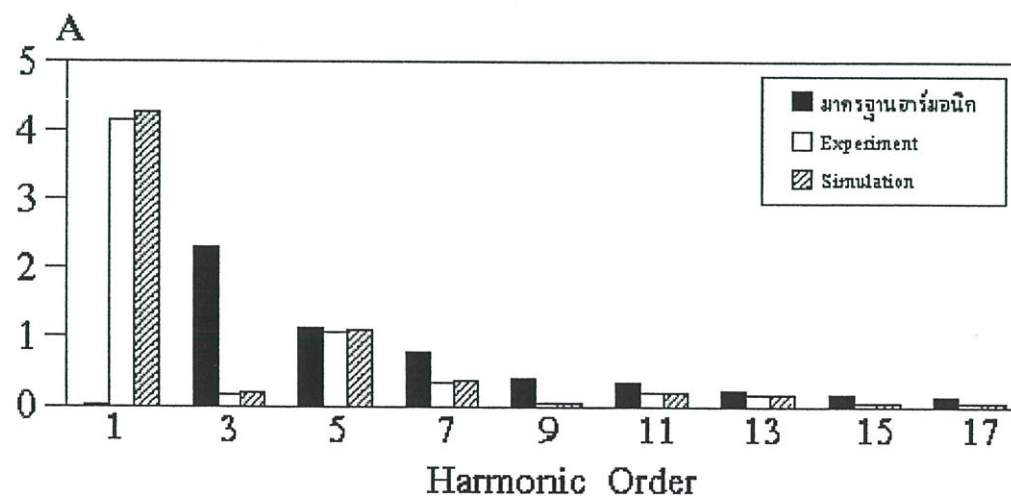
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.61 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

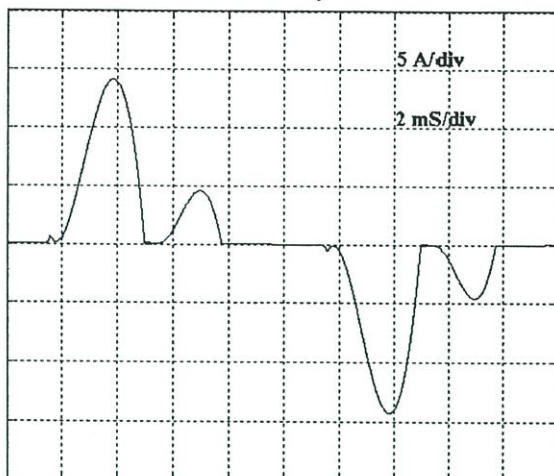


รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

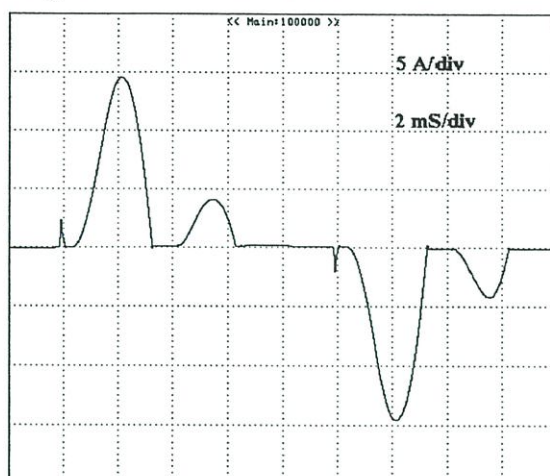


รูปที่ 5.63 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

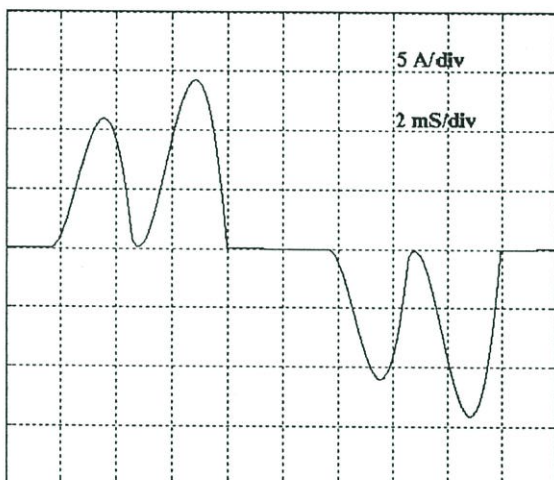
5.2.7 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโช้ค



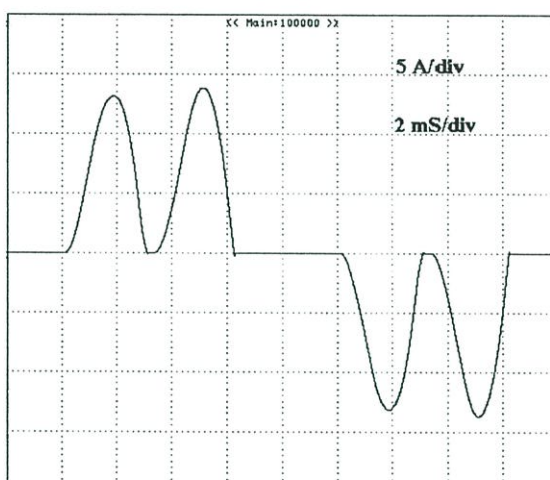
(ก)



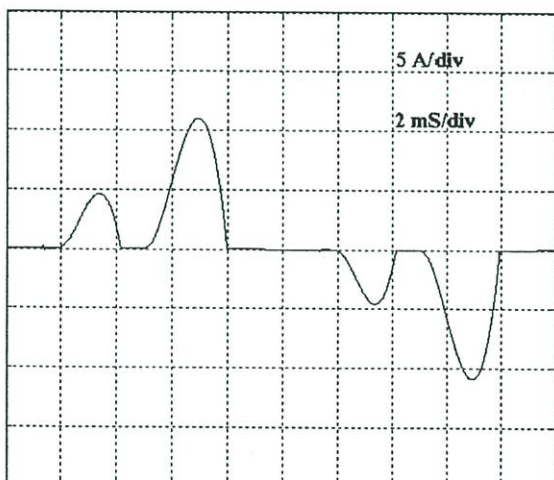
(ข)



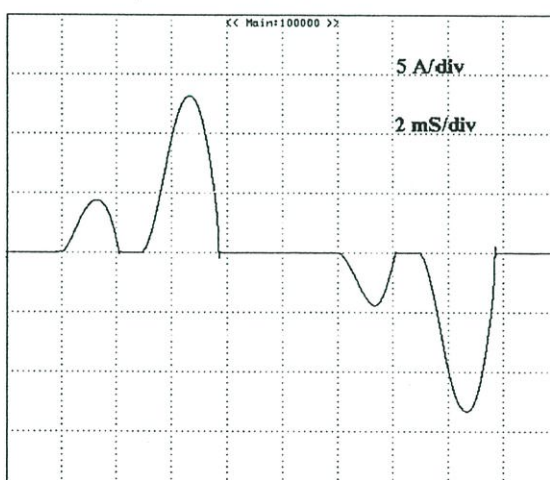
(ค)



(ง)



(จ)

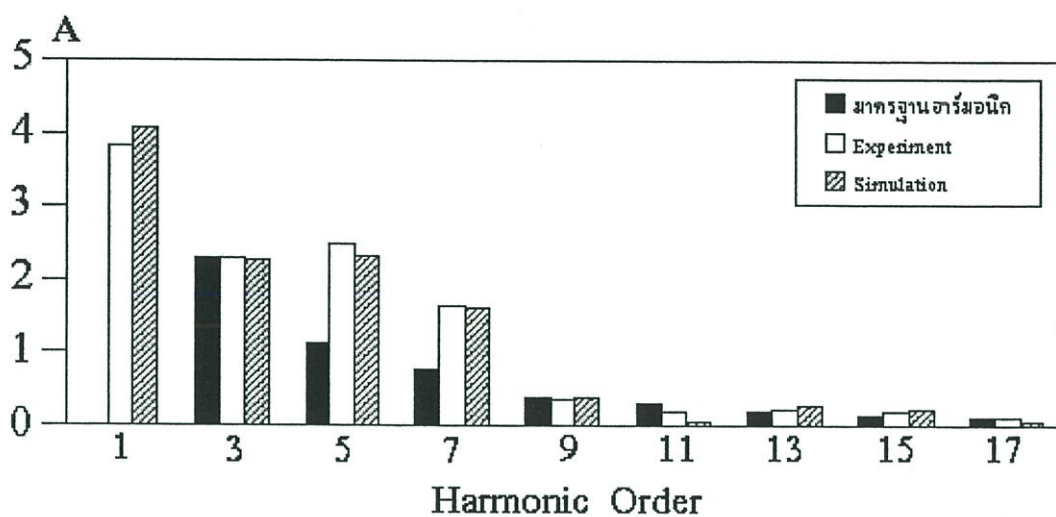


(ฉ)

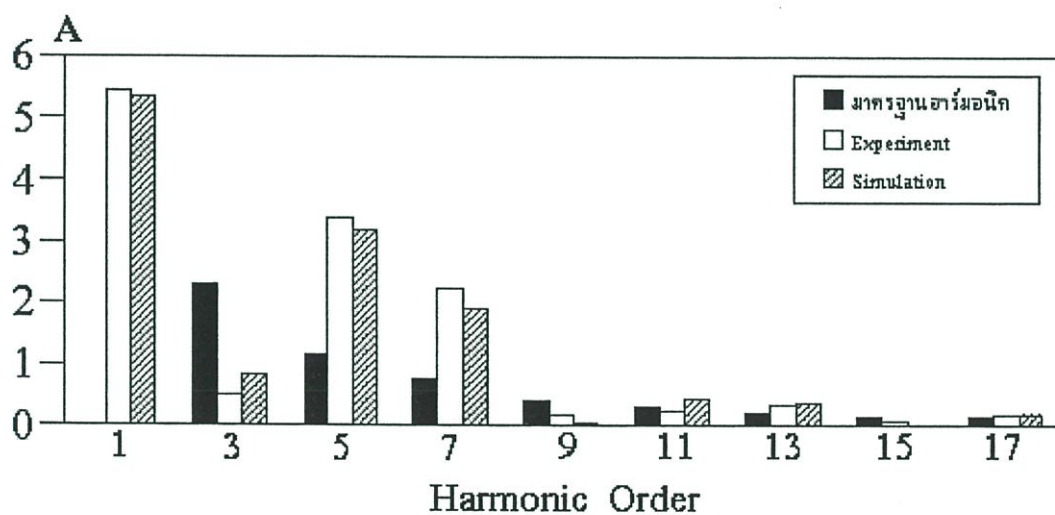
รูปที่ 5.64 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ภาระ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

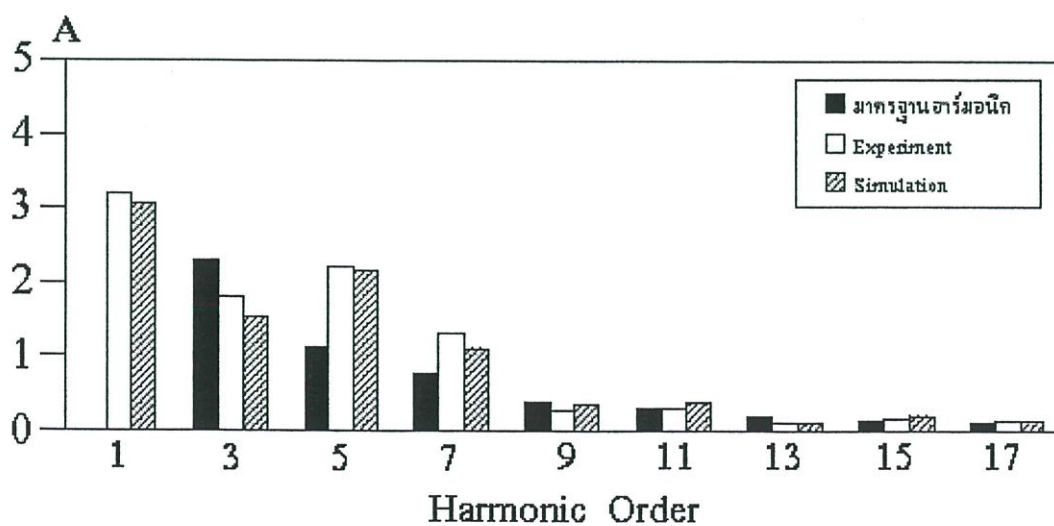
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.65 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส A

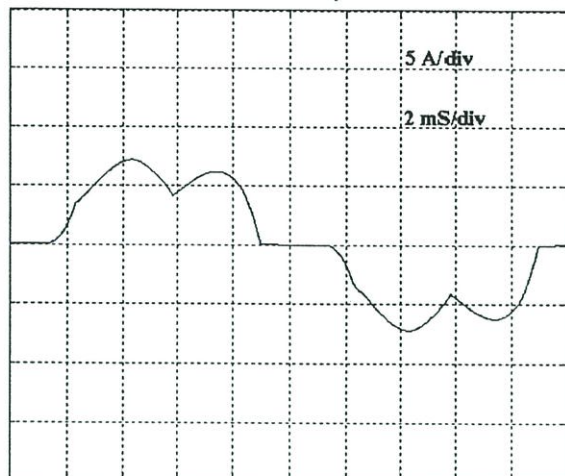


รูปที่ 5.66 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส B

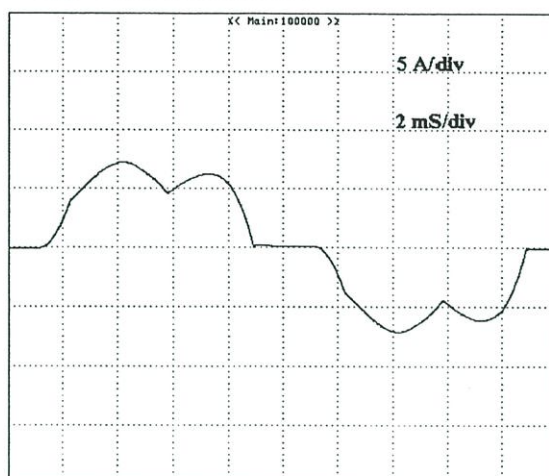


รูปที่ 5.67 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเฟส C

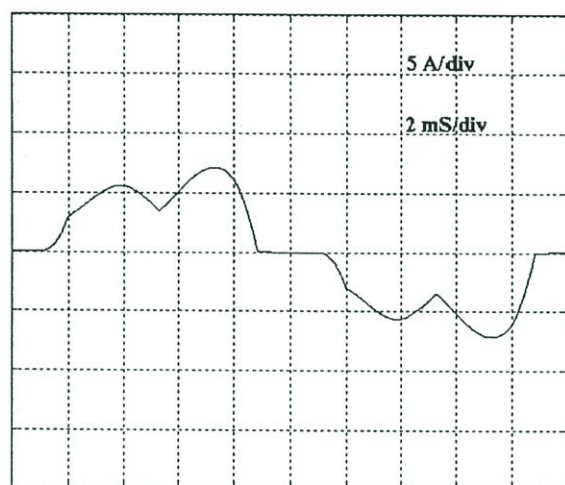
5.2.8 กรณีแรงดัน ไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้



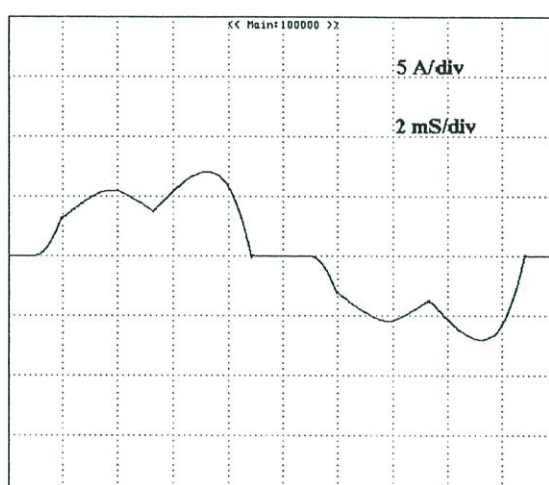
(ก)



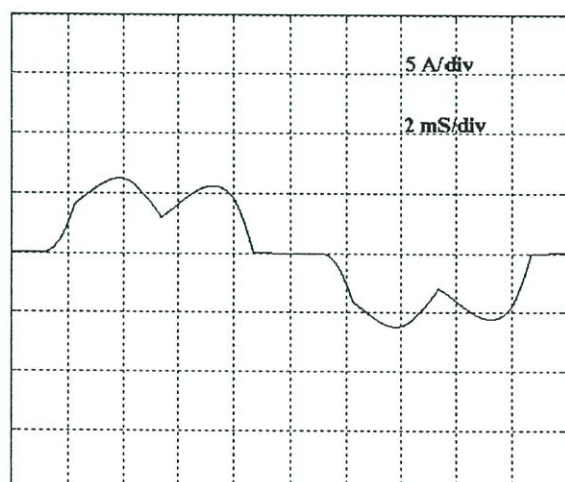
(ข)



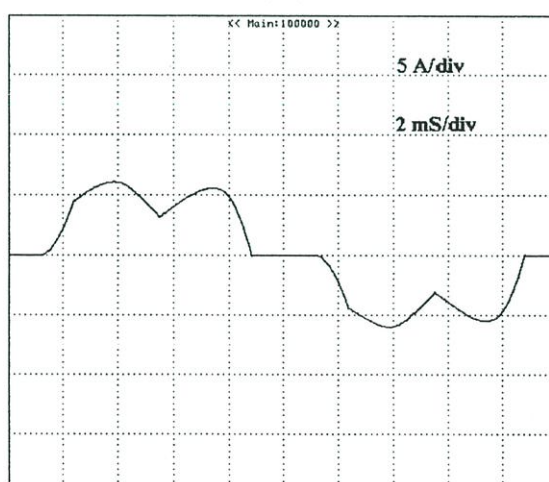
(ค)



(ง)



(จ)

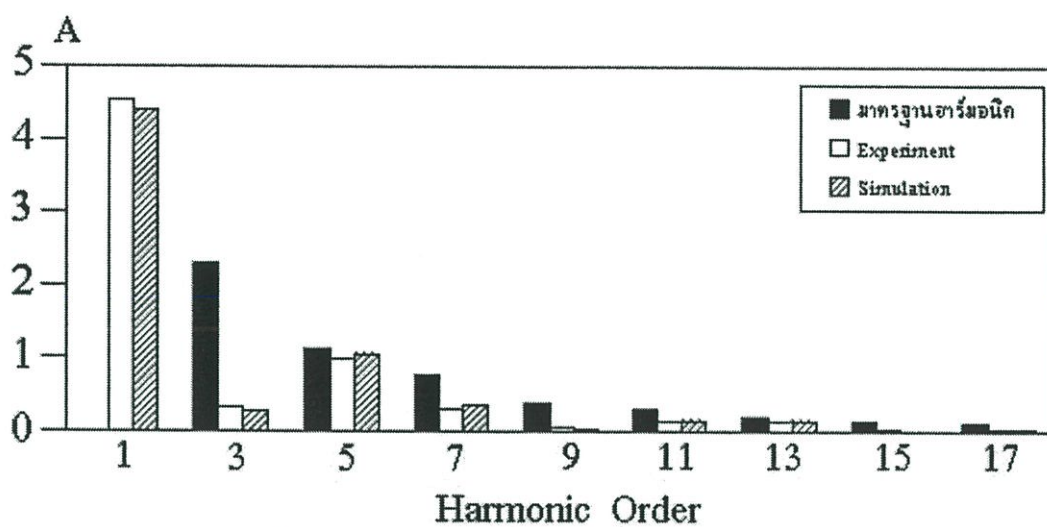


(ฉ)

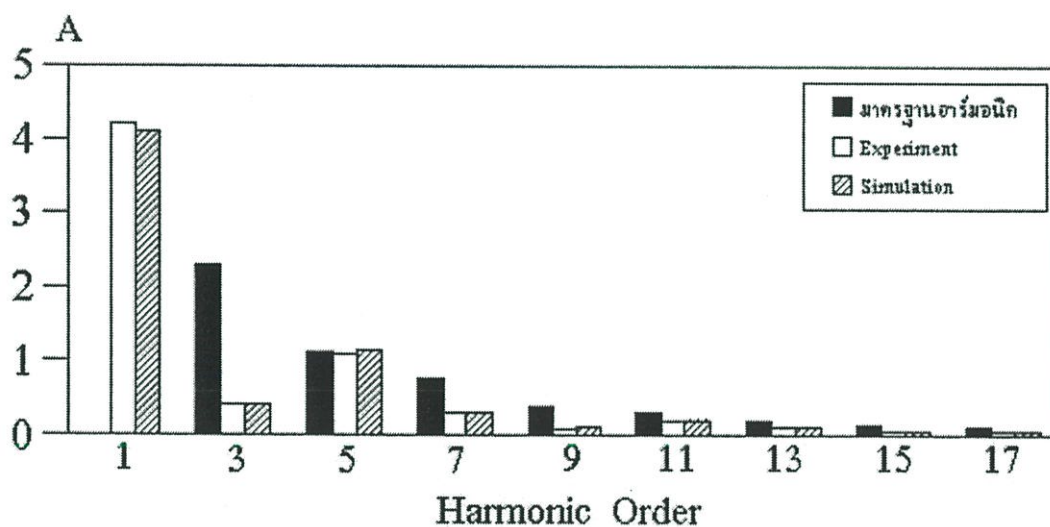
รูปที่ 5.68 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบ under voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

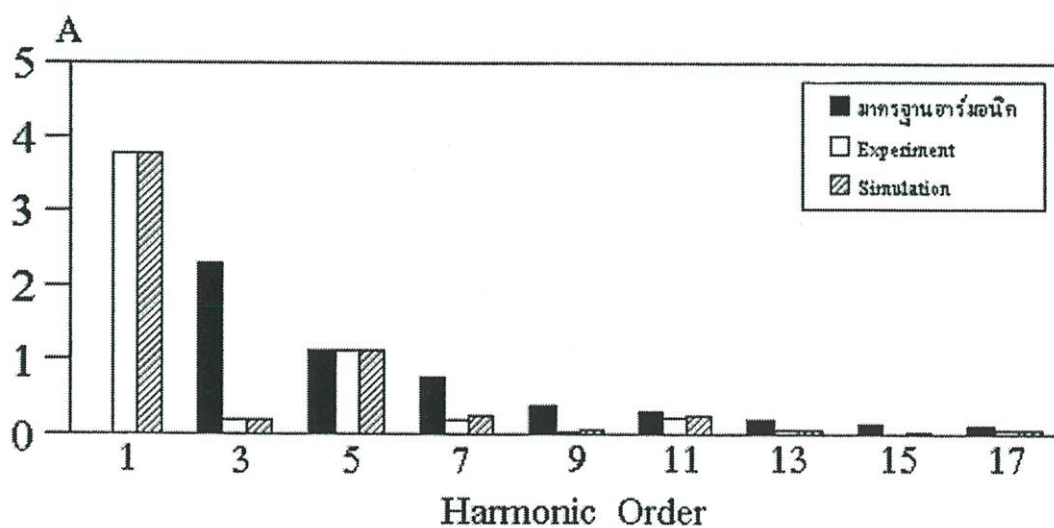
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.69 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส A

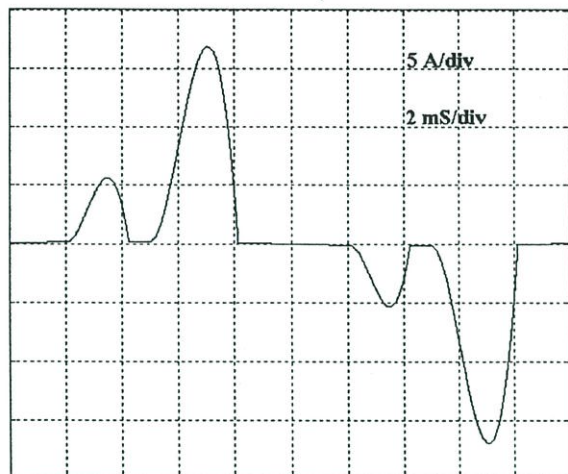


รูปที่ 5.70 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส B

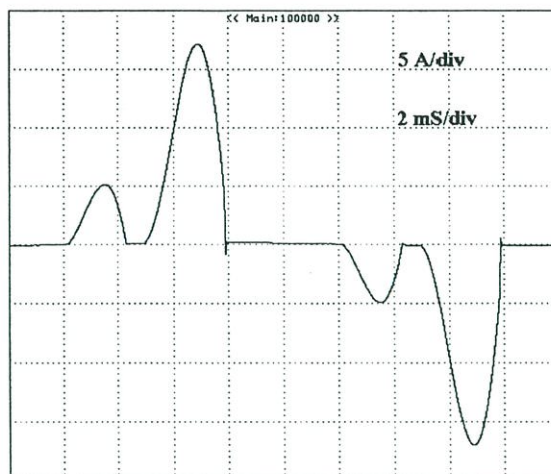


รูปที่ 5.71 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสอินพุตเฟส C

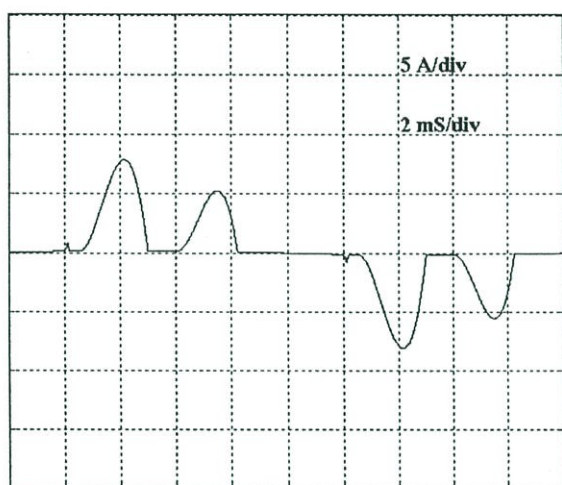
5.2.9 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค



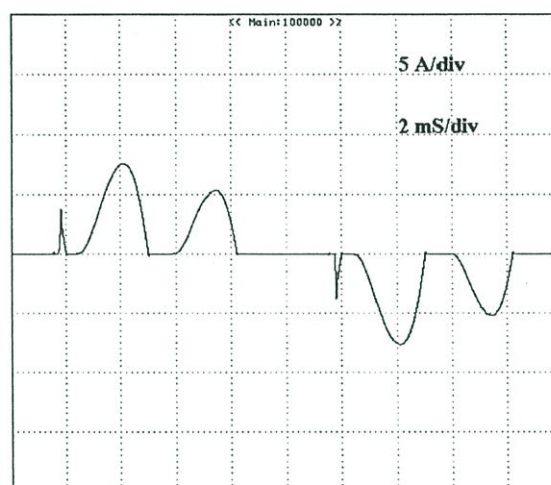
(ก)



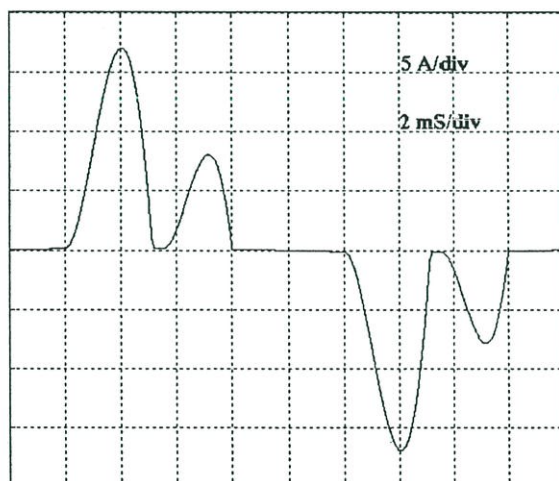
(ข)



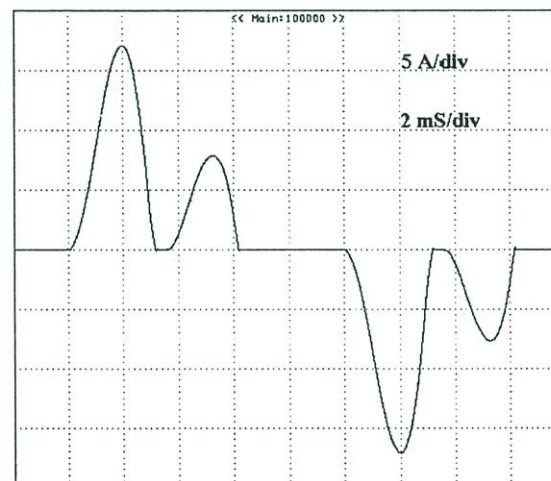
(ค)



(ง)



(จ)

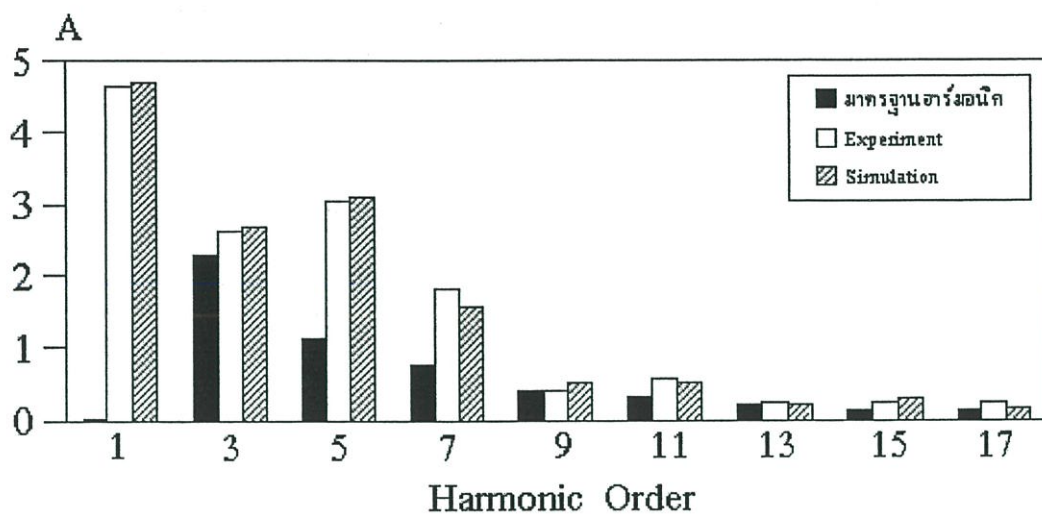


(ฉ)

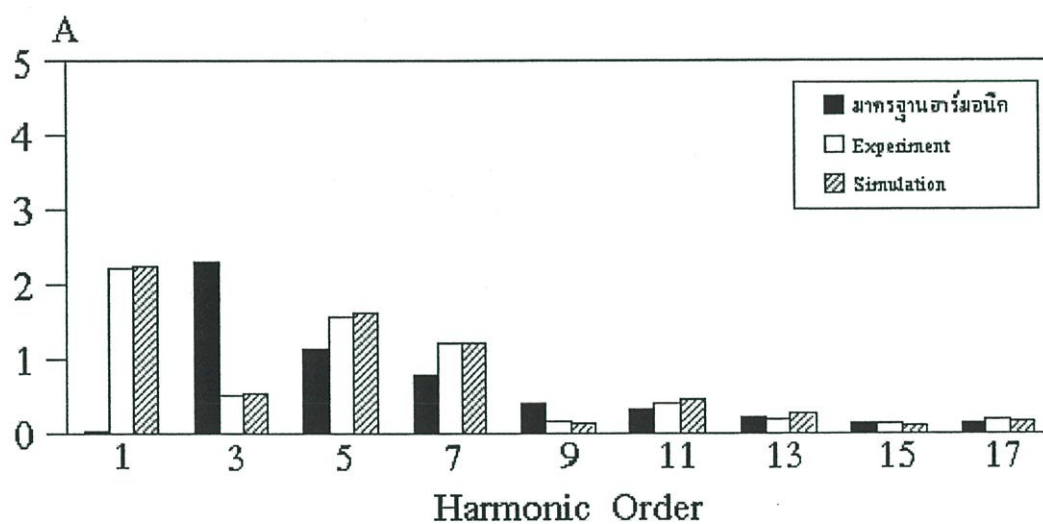
รูปที่ 5.72 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

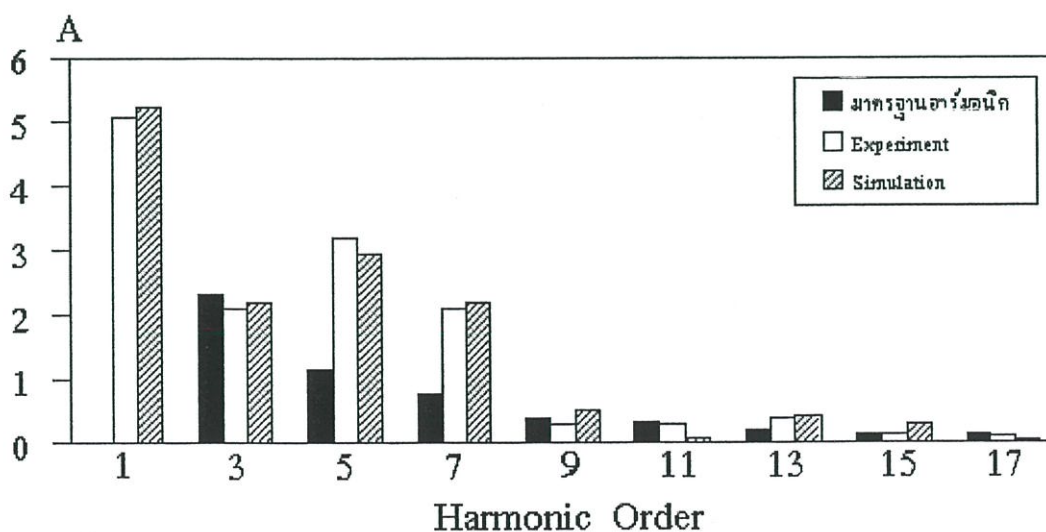
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.73 เปรียบเทียบผลเบี่ยงเบนค่าแอมพลิจูดเฟส A

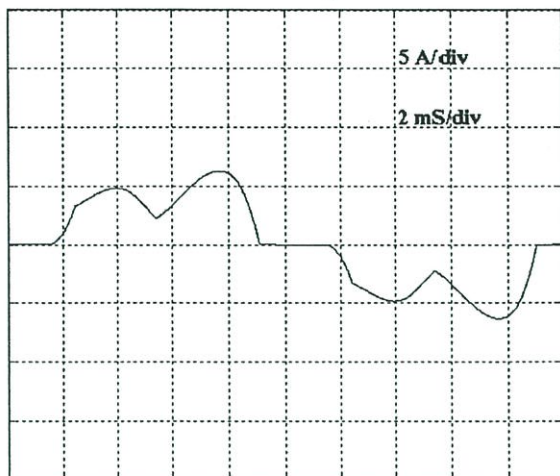


รูปที่ 5.74 เปรียบเทียบผลเบี่ยงเบนค่าแอมพลิจูดเฟส B

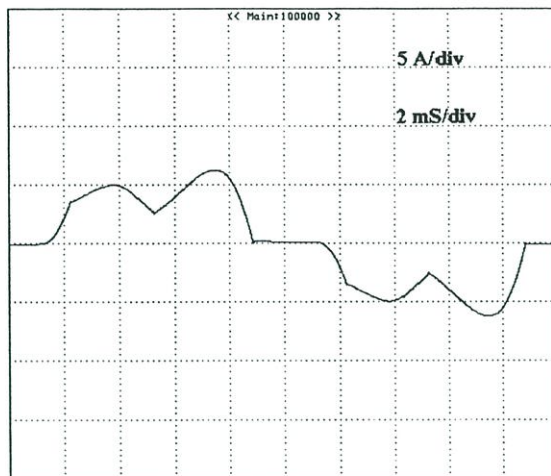


รูปที่ 5.75 เปรียบเทียบผลเบี่ยงเบนค่าแอมพลิจูดเฟส C

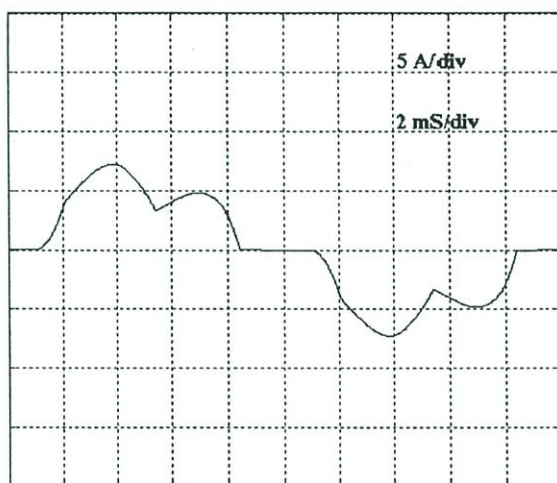
5.2.10 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งใช้ค



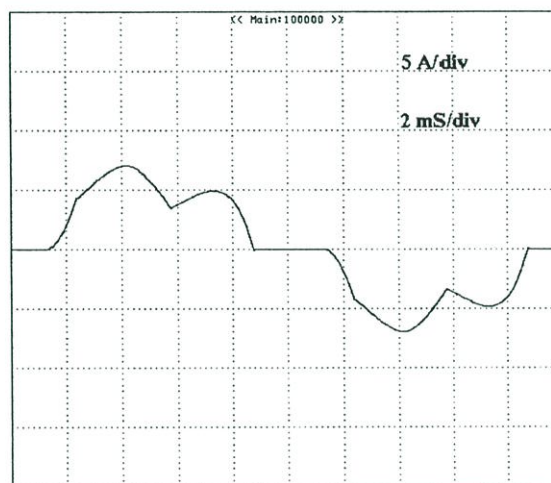
(ก)



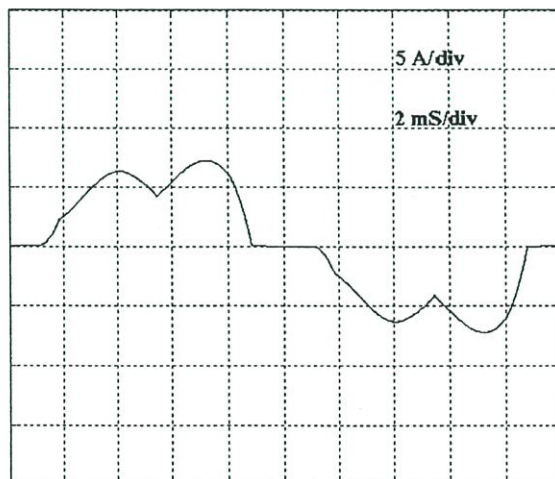
(ข)



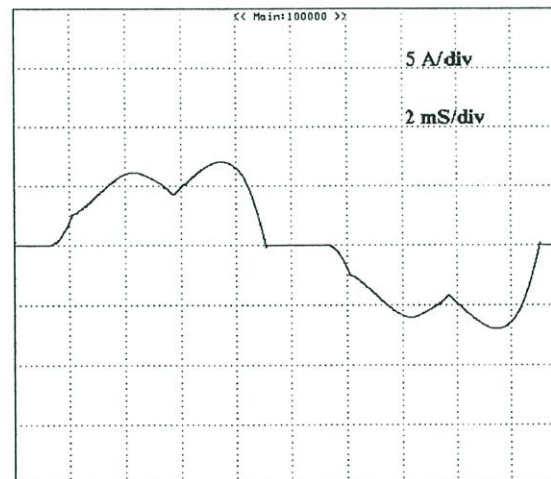
(ค)



(ง)



(จ)

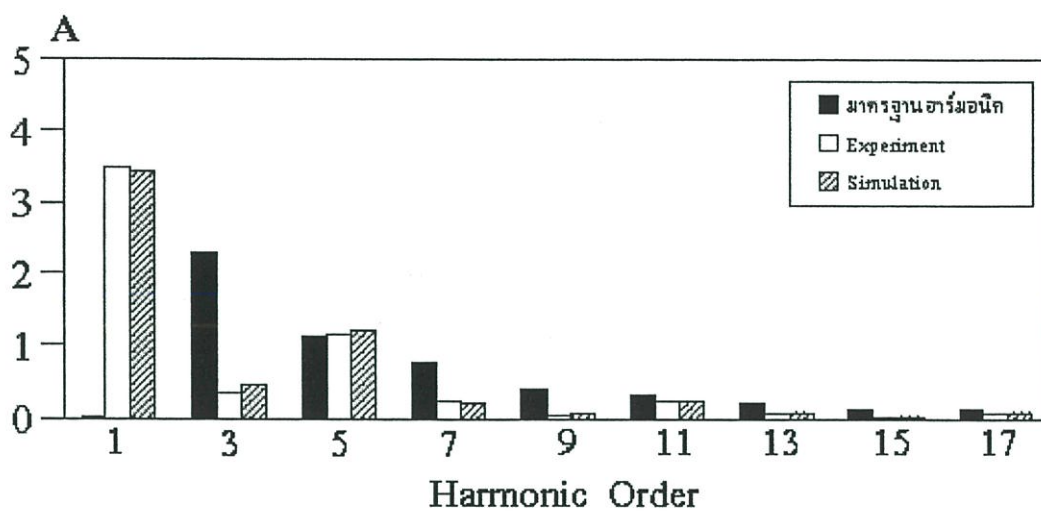


(ฉ)

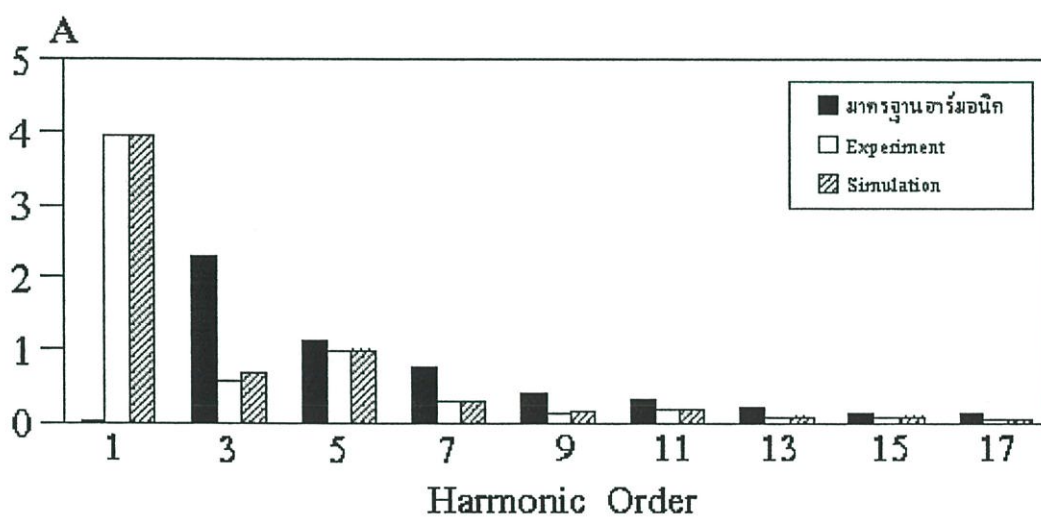
รูปที่ 5.76 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

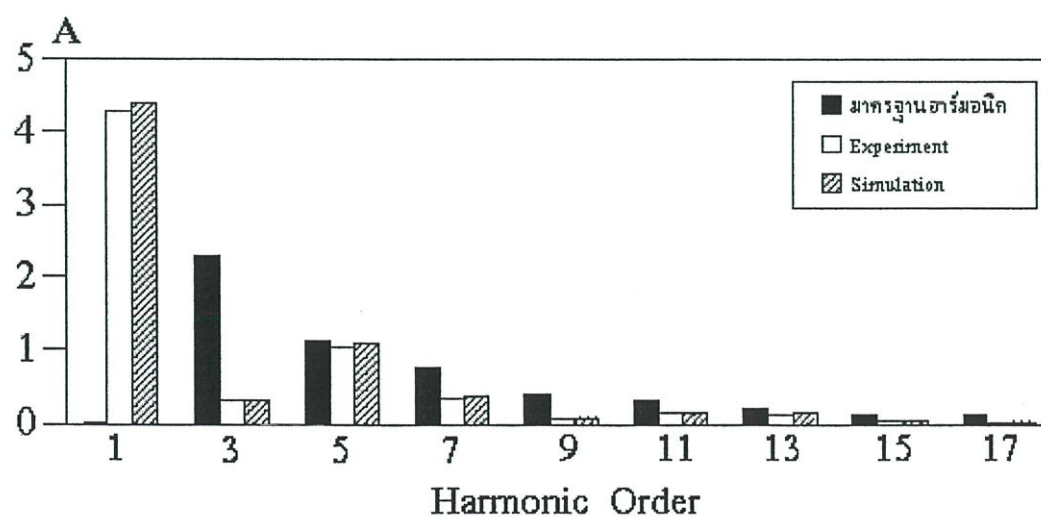
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.77 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส A

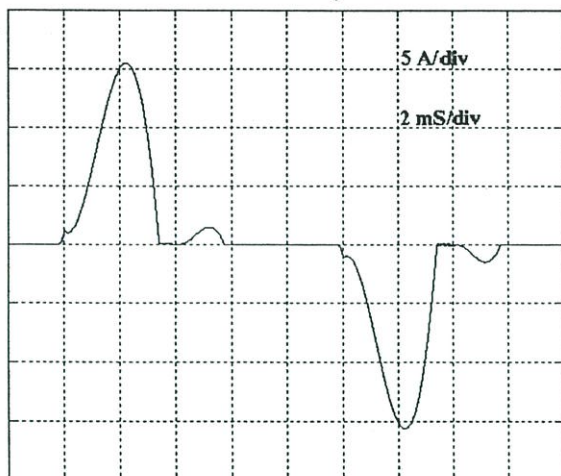


รูปที่ 5.78 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส B

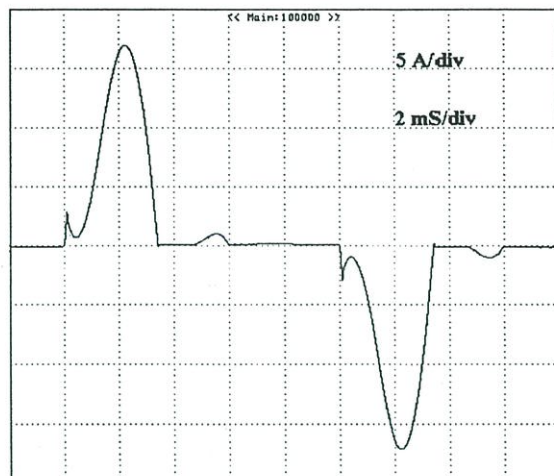


รูปที่ 5.79 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส C

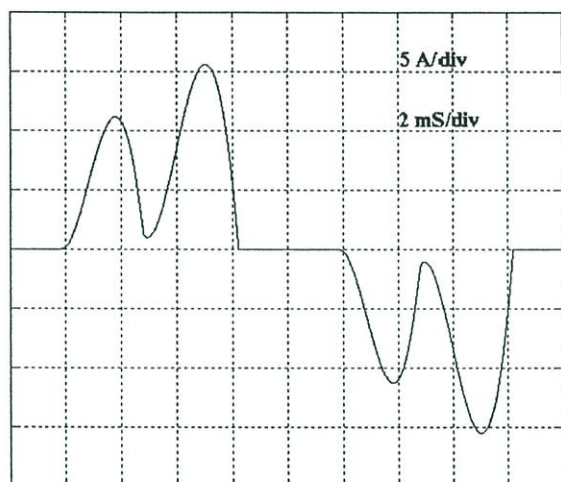
5.2.11 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งใช้



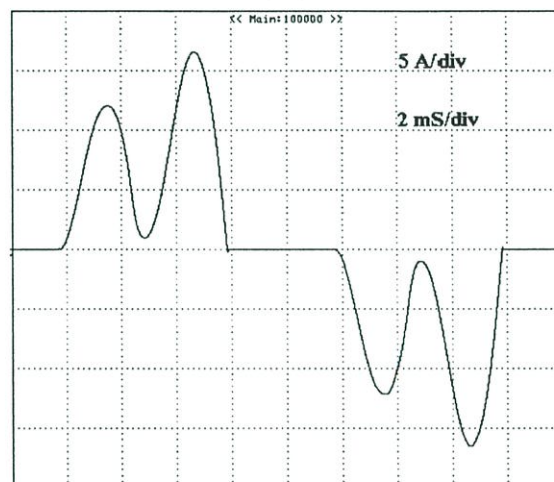
(ก)



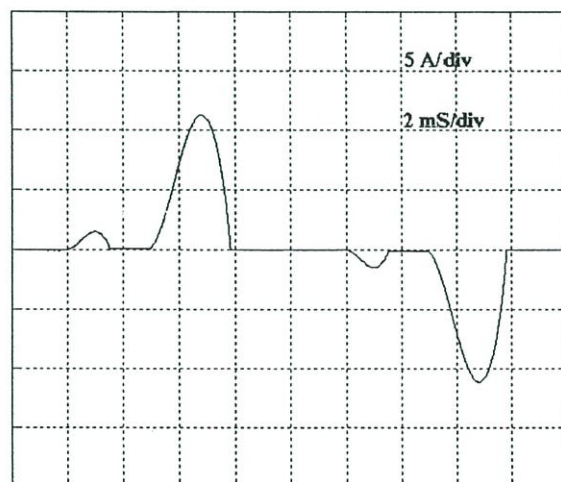
(ข)



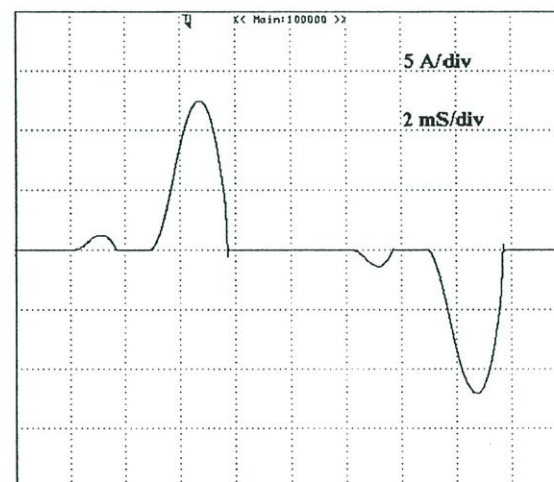
(ค)



(ง)



(จ)

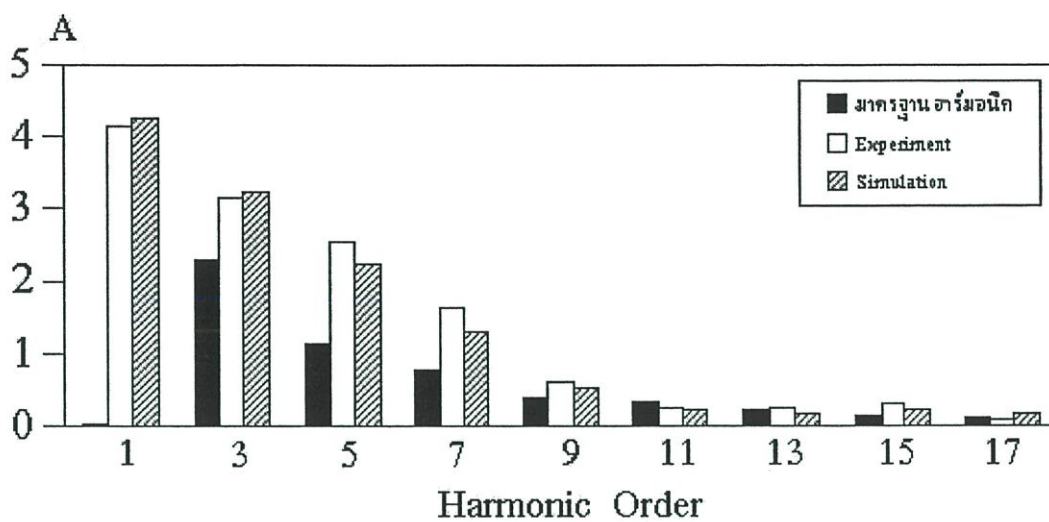


(ฉ)

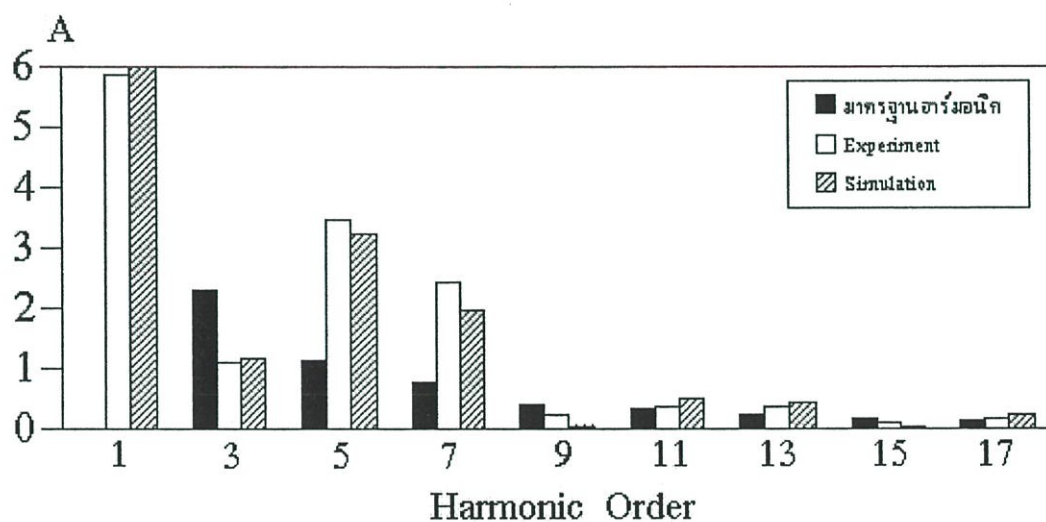
รูปที่ 5.80 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่ภาวะ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

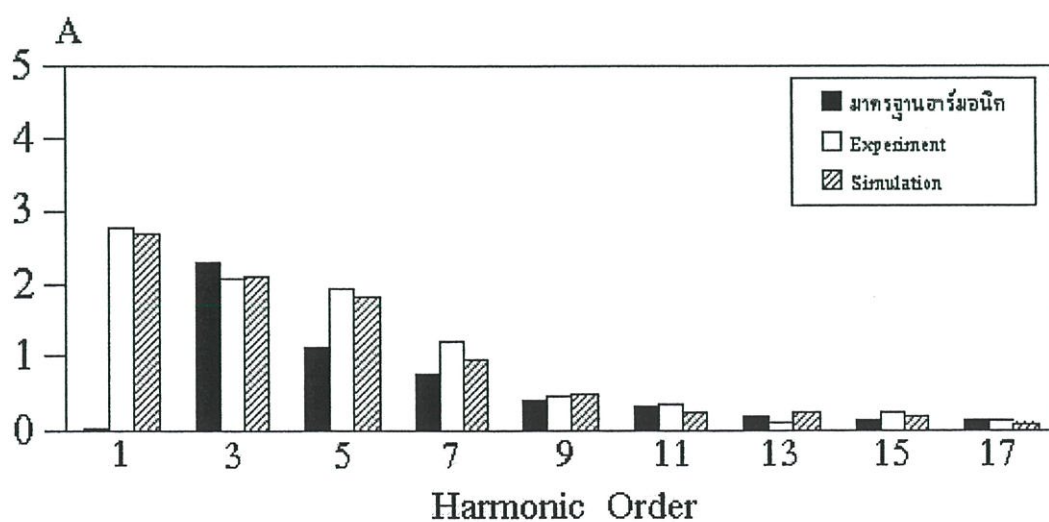
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



รูปที่ 5.81 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส A

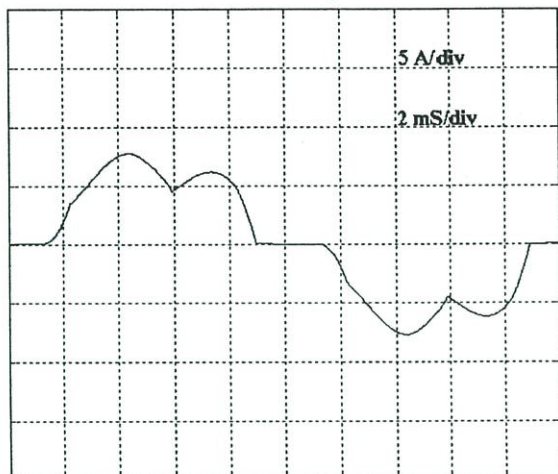


รูปที่ 5.82 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส B

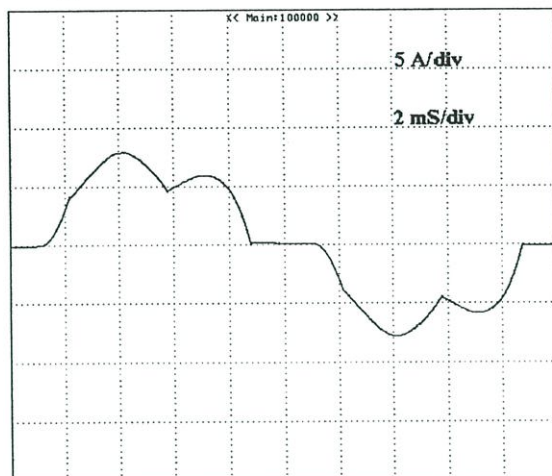


รูปที่ 5.83 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส C

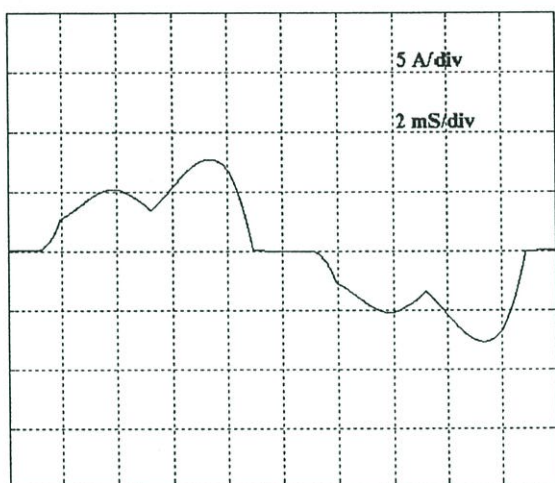
5.2.12 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้



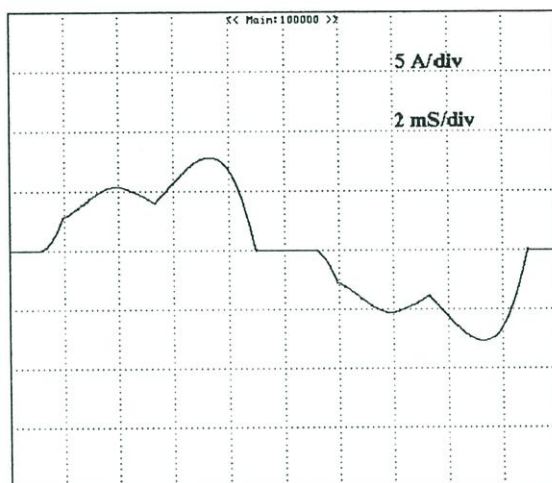
(ก)



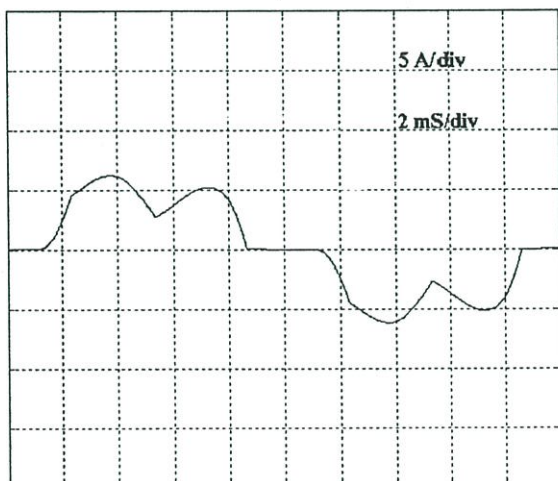
(ข)



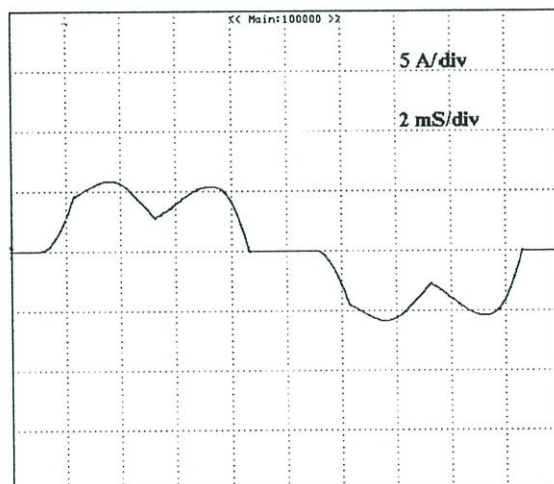
(ค)



(ง)



(จ)

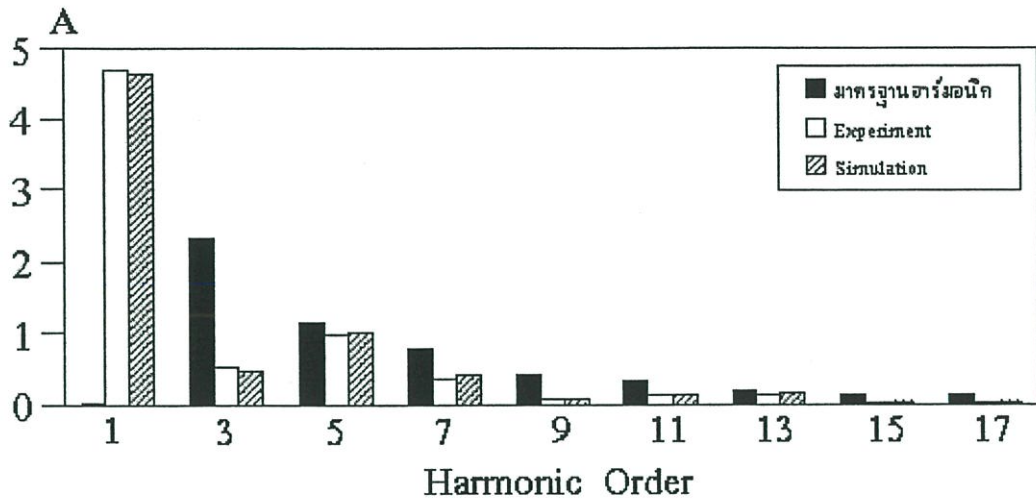


(ฉ)

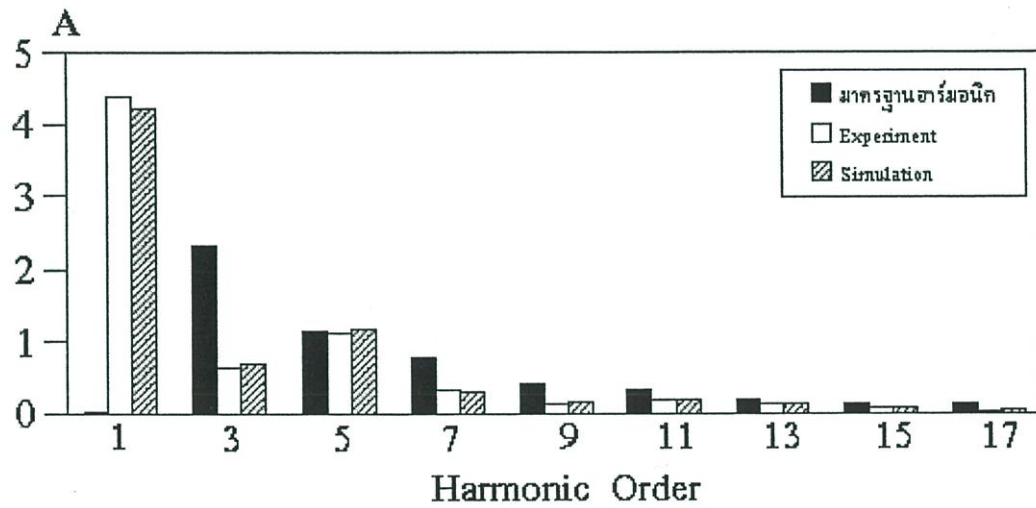
รูปที่ 5.84 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5 % แบบ over voltage ที่ภาระ 90 %

(ก) เฟส A Simulation (ข) เฟส A Experiment (ค) เฟส B Simulation

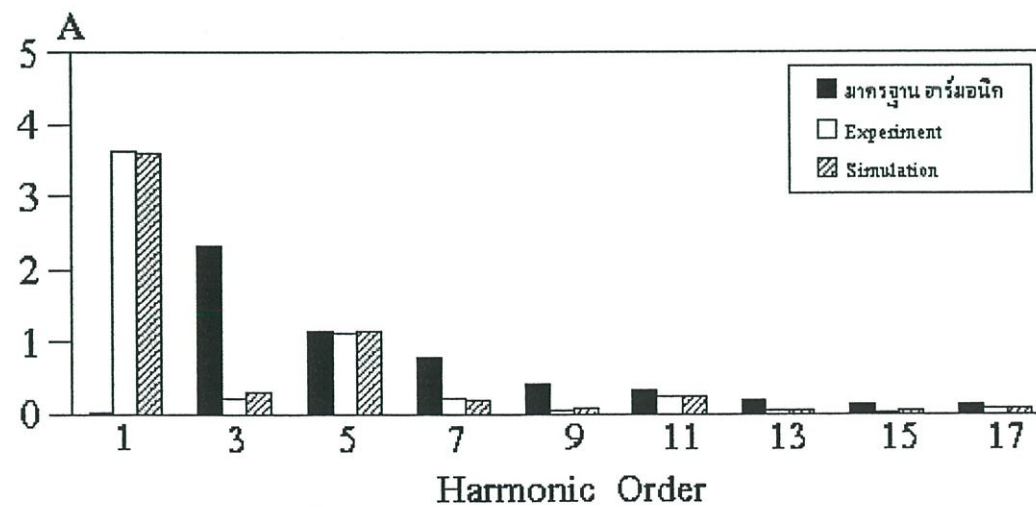
(ง) เฟส B Experiment (จ) เฟส C Simulation (ฉ) เฟส C Experiment



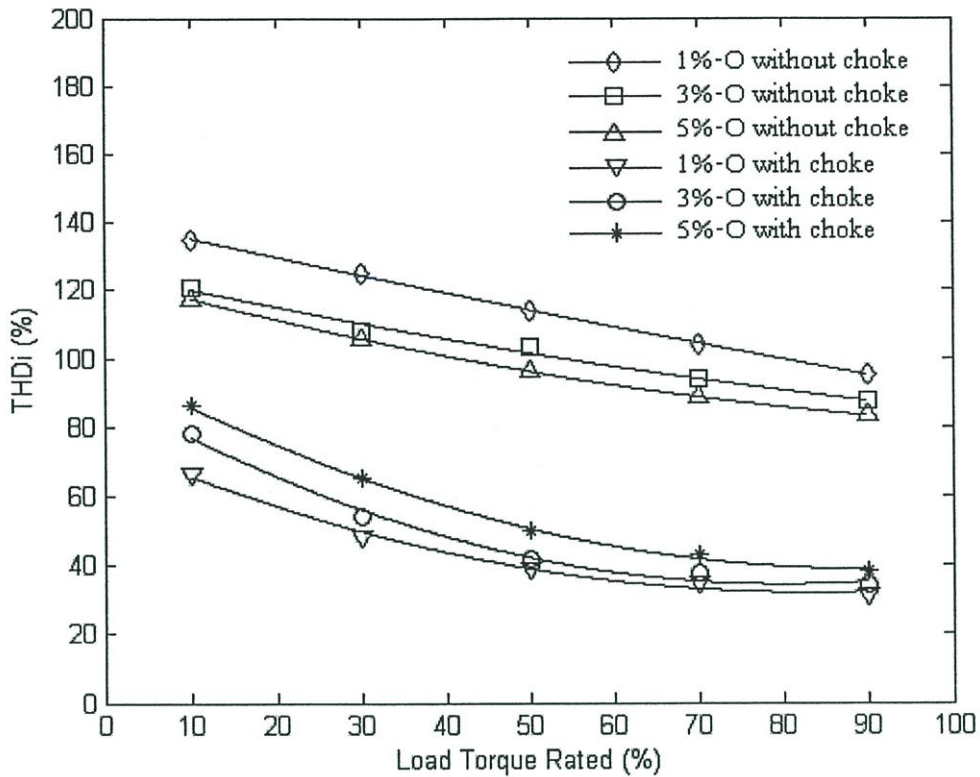
รูปที่ 5.85 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส A



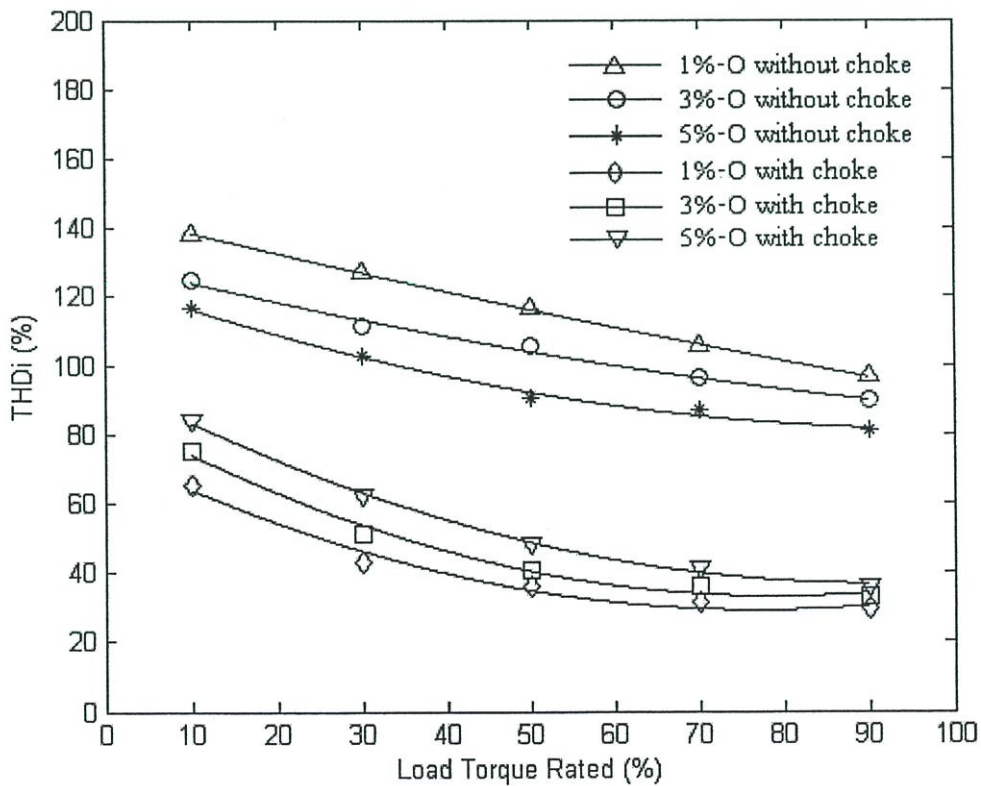
รูปที่ 5.86 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส B



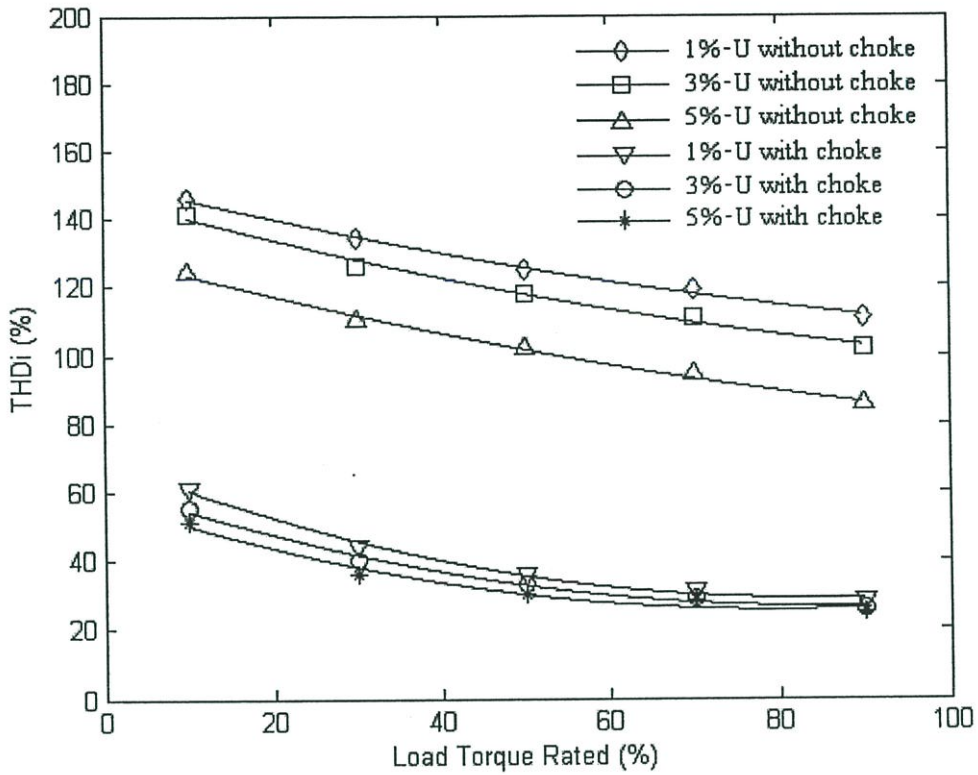
รูปที่ 5.87 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส C



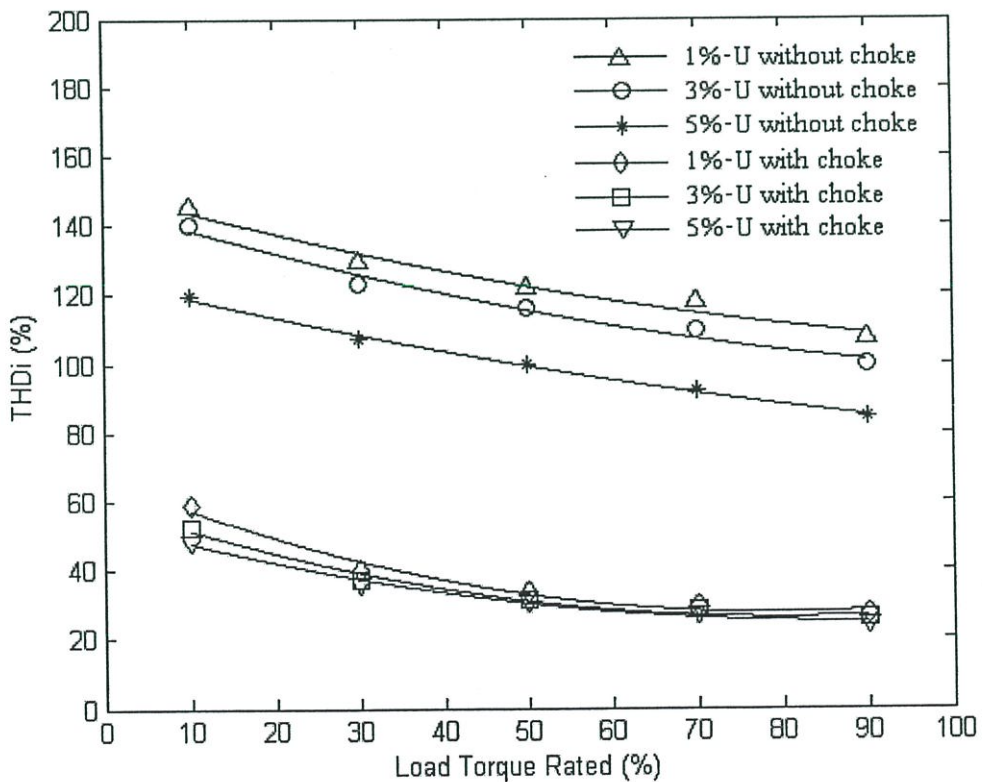
รูปที่ 5.88 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการจำลอง



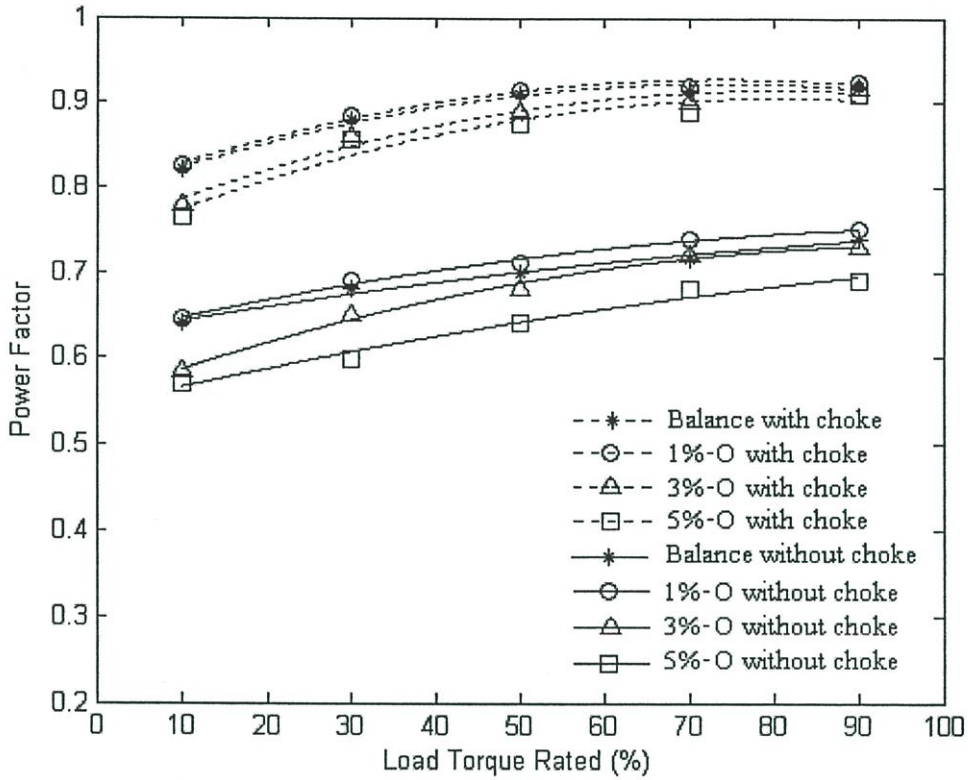
รูปที่ 5.89 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการทดสอบ



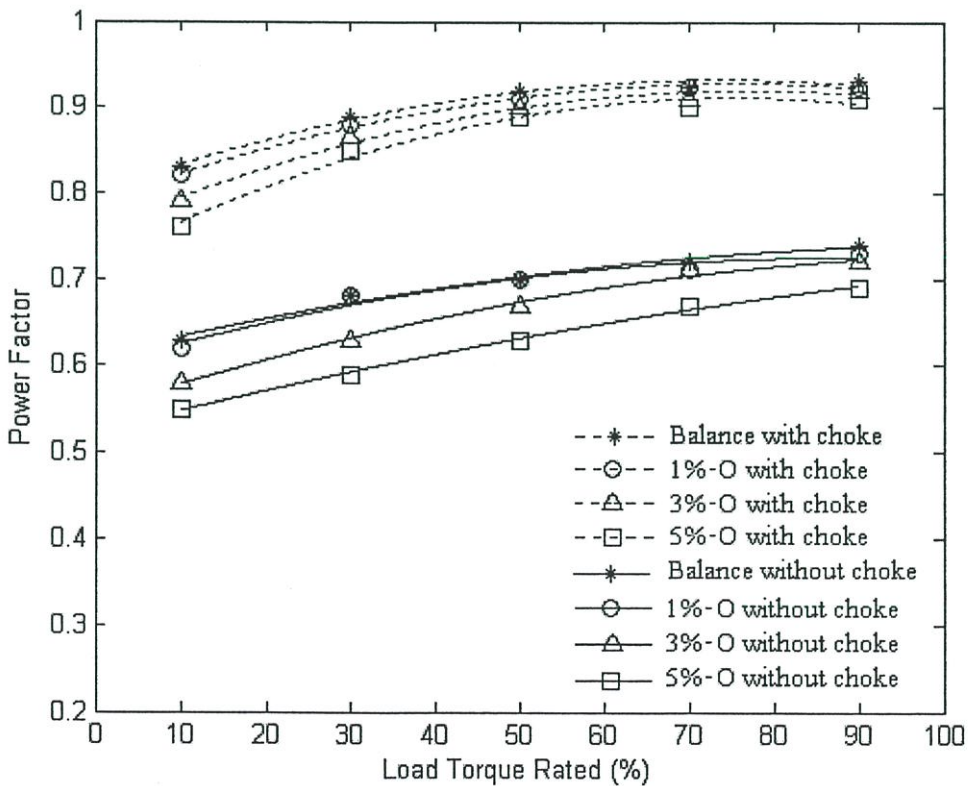
รูปที่ 5.90 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการจำลอง



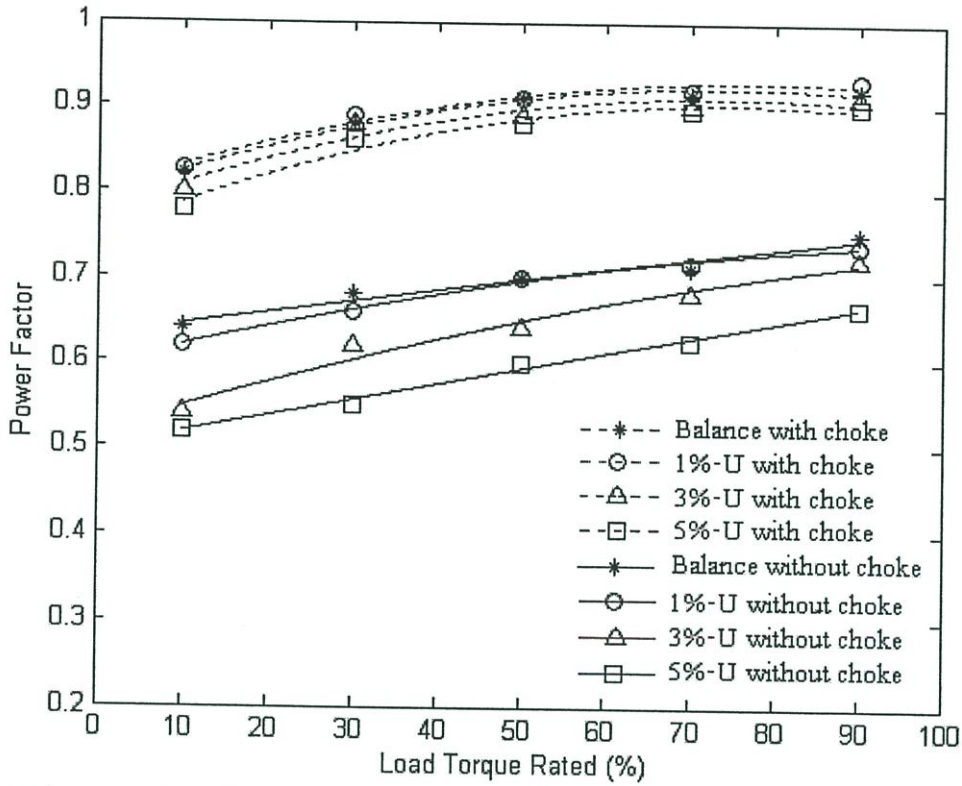
รูปที่ 5.91 เปรียบเทียบ %THD ของกระแสอินพุทกรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการทดสอบ



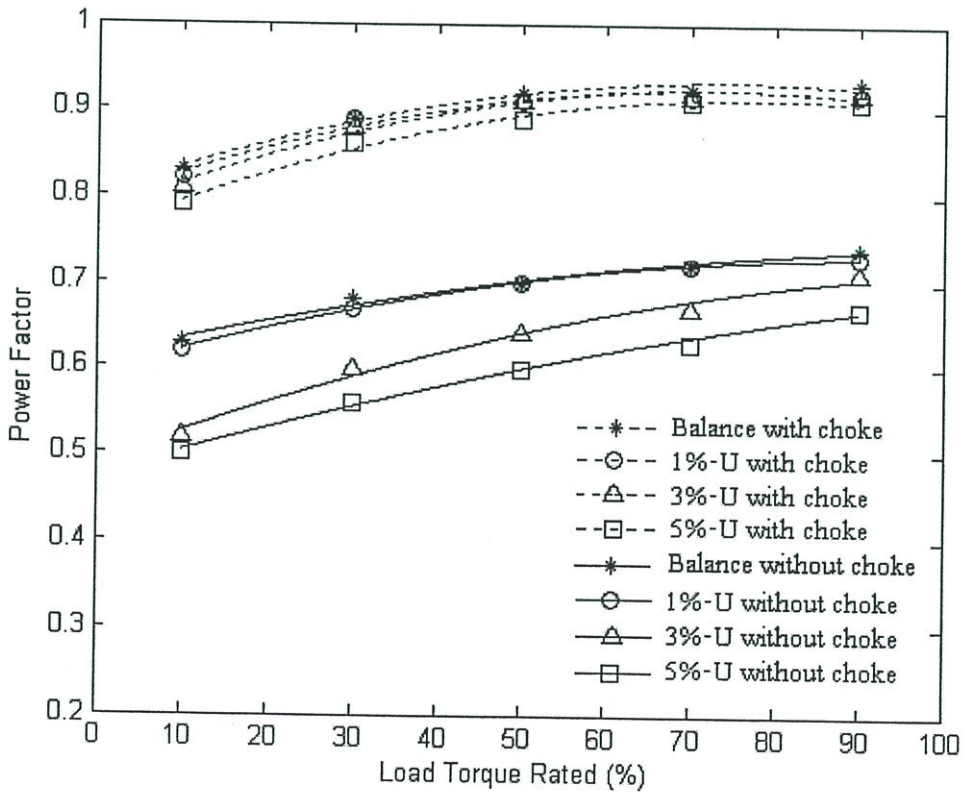
รูปที่ 5.92 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการจำลอง



รูปที่ 5.93 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ over voltage จากการทดสอบ



รูปที่ 5.94 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการจำลอง



รูปที่ 5.95 เปรียบเทียบ PF กรณีแรงดันไม่สมดุลแบบ under voltage จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล

% load torque rated		Power input of system (W)									
		10		30		50		70		90	
Condition		Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
1%-O	woc	603	546	1049	1032	1530	1515	2025	2031	2539	2548
	wc	592	538	1039	1016	1522	1520	2022	2043	2544	2557
3%-O	woc	607	550	1055	1031	1532	1521	2027	2032	2542	2559
	wc	598	546	1044	1018	1527	1519	2024	2041	2530	2547
5%-O	woc	612	566	1058	1039	1540	1529	2027	2030	2561	2556
	wc	603	548	1049	1024	1530	1521	2026	2041	2545	2554
1%-U	woc	607	547	1057	1037	1534	1536	2028	2046	2542	2550
	wc	588	541	1037	1015	1521	1522	2020	2042	2543	2554
3%-U	woc	610	542	1070	1011	1548	1517	2033	2019	2564	2549
	wc	606	536	1055	1017	1539	1517	2041	2040	2565	2606
5%-U	woc	615	549	1061	1023	1548	1524	2045	2040	2578	2549
	wc	609	534	1052	1015	1537	1517	2038	2042	2563	2597

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล

% load torque rated		Power output of system (W)									
		10		30		50		70		90	
		Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
1%-O	woc	273	274	692	693	1115	1118	1524	1528	1919	1920
	wc	273	274	691	693	1113	1115	1514	1520	1902	1910
3%-O	woc	274	274	693	694	1116	1119	1527	1529	1921	1921
	wc	274	274	691	693	1114	1116	1516	1520	1904	1910
5%-O	woc	274	274	691	694	1119	1120	1530	1532	1925	1931
	wc	274	274	692	693	1116	1117	1519	1525	1907	1916
1%-U	woc	274	274	692	693	1116	1118	1523	1524	1910	1916
	wc	273	274	691	692	1112	1114	1515	1519	1900	1906
3%-U	woc	273	274	692	693	1116	1118	1520	1527	1910	1918
	wc	273	274	690	692	1111	1114	1511	1518	1893	1899
5%-U	woc	273	274	692	693	1114	1117	1517	1525	1906	1916
	wc	273	273	690	691	1109	1114	1508	1516	1890	1899

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกรณีแรงดันไม่สมดุล

% load torque rated		Efficiency of system (%)									
		10		30		50		70		90	
Condition		Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
1%-O	woc	45.36	50.15	65.99	67.24	72.86	73.79	75.25	75.22	75.58	75.36
	wc	46.23	50.93	66.53	68.22	73.15	73.40	74.90	74.44	74.75	74.72
3%-O	woc	45.15	49.86	65.65	67.32	72.89	73.57	75.32	75.27	75.59	75.09
	wc	45.73	50.22	66.26	68.09	7.98	73.52	74.91	74.52	75.25	75.02
5%-O	woc	44.80	48.48	65.50	66.85	73.10	73.29	75.50	75.50	75.16	75.55
	wc	45.47	50.04	66.02	67.73	72.95	73.47	75.01	74.73	74.93	75.03
1%-U	woc	45.10	50.10	65.53	66.88	72.8	72.80	75.10	74.49	75.13	75.14
	wc	46.50	50.65	66.68	68.24	73.16	73.22	75.00	74.43	74.71	76.64
3%-U	woc	44.85	50.56	64.67	68.56	72.11	73.72	74.8	75.65	74.52	75.28
	wc	45.15	51.12	65.47	68.06	72.19	73.46	74.03	74.45	73.80	72.90
5%-U	woc	44.20	49.91	65.18	67.75	71.95	73.33	74.20	74.76	73.96	75.17
	wc	44.94	51.28	65.61	68.15	72.11	73.46	74.00	74.27	73.74	73.15

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล

% load torque rated		Efficiency of motor (%)									
		10		30		50		70		90	
Condition		Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
1%-O	woc	56.10	55.29	74.00	71.73	78.76	77.60	79.74	78.85	79.10	78.70
	wc	56.25	57.09	73.98	73.12	78.61	78.30	79.05	78.72	78.01	78.79
3%-O	woc	55.93	55.40	73.74	72.00	78.64	77.50	79.69	78.88	79.18	78.40
	wc	56.10	58.59	73.98	74.29	78.70	77.87	79.24	78.60	78.19	78.20
5%-O	woc	55.84	54.55	73.47	72.12	78.14	77.55	79.51	78.79	79.21	78.75
	wc	56.07	55.73	73.61	72.63	78.63	76.80	79.49	77.74	78.44	78.37
1%-U	woc	55.35	56.38	73.92	72.86	78.37	77.66	79.20	78.72	78.53	78.18
	wc	56.45	57.81	74.08	74.00	78.54	77.88	79.03	78.91	77.86	78.35
3%-U	woc	54.63	55.58	73.53	72.43	78.31	77.66	79.05	78.85	78.54	78.29
	wc	56.55	58.18	74.04	72.56	78.38	78.87	78.80	79.35	77.51	77.32
5%-U	woc	54.10	55.47	73.24	71.83	78.04	77.28	78.88	78.25	78.37	77.73
	wc	56.54	56.35	74.06	71.55	78.26	77.71	78.63	78.66	77.36	76.39

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

5.3 สรุป

ผลที่ได้จากการจำลองและทดสอบพบว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งใช้ค้ด้านหน้า ASD นั้นทั้งกรณี
ที่แรงดันของแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลนั้นจะส่งผลให้องค์ประกอบฮาร์มอนิก
อันดับต่างๆที่สร้างออกมาจาก ASD จะสูงเกินกว่าข้อกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกโดยเฉพาะอย่าง
ยิ่งกรณีที่ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุลย์ที่ระดับ 5 % ทั้งแบบแรงดันเกิน(over voltage)
และ แรงดันต่ำ (under voltage) จะทำให้ ASD สร้างฮาร์มอนิกออกมาสูงกว่ากรณีอื่นๆ และเมื่อ
มีการติดตั้ง series line reactor หรือ choke ด้านหน้า ASD ผลที่ได้คือองค์ประกอบฮาร์มอนิก
อันดับต่างๆจะอยู่ในข้อกำหนดฮาร์มอนิกและนอกจากนี้จะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ
สูงขึ้น ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์และระบบจะเปลี่ยนแปลง 2 –3 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการนำ ASD ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นทั้งกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายนั้นจะส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆที่ใช้ไฟฟ้าร่วมกัน คือจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับฮาร์มอนิกเข้าไปด้วย ซึ่งในปัจจุบันนี้ถือเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นจะต้องแก้ไข ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองและทดสอบผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่ใช้ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์แบบ 6 พัลส์ ทั้งในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล

การจำลองระบบนั้นในลำดับแรกจะใช้ค่าพารามิเตอร์และคุณลักษณะของระบบจริงนำมาสร้างระบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink เพื่อให้ได้คุณสมบัติของระบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ใกล้เคียงกับระบบจริงที่จะใช้ในการทดสอบกรณีต่างๆ หลังจากนั้นจึงทำการจำลองระบบโดยมีเงื่อนไขที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีภาระที่ 10%-90% ของพิกัดมอเตอร์ ซึ่งได้ศึกษาถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุท, องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ เปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก, เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ, ประสิทธิภาพของระบบ และมอเตอร์ หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบ series line reactor หรือ choke ติดตั้งด้านหน้า ASD ที่ค่าต่างๆ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากระบบจำลองที่สร้างขึ้นมีแนวทางเดียวกันกับระบบจริงที่ได้ทำการทดสอบ กล่าวคือ หลังจากที่มีการติดตั้งใช้ค้ด้านหน้า ASD ทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมลดลง, องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ เป็นไปตามข้อกำหนดฮาร์มอนิก, เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบสูงขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบและมอเตอร์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

การพิจารณากรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลนั้นได้ทำการจำลองและทดสอบทั้งหมด 6 สภาวะ (ตารางที่ 4.1) โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่ายนั้นจะพิจารณาจากการที่ไฟฟ้าจะให้แรงดันเปลี่ยนแปลงที่ระดับ $\pm 5\%$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลสูงสุดที่ $\pm 5\%$ ผลที่ได้ คือ เมื่อแรงดันไม่สมดุลจะทำให้ ASD สร้างองค์ประกอบฮาร์มอนิกกลุ่มที่ 3 หารลงตัว (triplen harmonic) ออกมาสู่แหล่งจ่าย ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงขึ้นตามระดับความไม่สมดุลของแรงดัน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นที่สายนิวทรัล และจากการออกแบบค่า choke ในกรณีที่แรงดันอยู่ในสภาวะสมดุลนั้นพบว่า

ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมใช้คที่เหมาะสมจะอยู่ที่ค่า 5 % ดังนั้นจึงเลือกค่าดังกล่าวมาติดตั้งด้านหน้า ASD ในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล ซึ่งผลที่ได้คือจะทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกกลุ่มที่ 3 ลดลงและนอกจากนี้องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆก็จะลดลงอยู่ในข้อกำหนดฮาร์มอนิกด้วย แต่ถ้าพิจารณาถึงในด้านกำลังไฟฟ้าอินพุท,เอาท์พุทและประสิทธิภาพของระบบและมอเตอร์แล้วจะพบว่า เมื่อมอเตอร์มีภาระต่ำหรือปานกลาง (10% - 50%) กำลังไฟฟ้าอินพุทของระบบจะต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งใช้คด้านหน้า ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงทำให้ประสิทธิภาพทั้งของระบบและมอเตอร์ในช่วงนี้จะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค แต่เมื่อมอเตอร์มีภาระสูงขึ้น (50%-90%) ซึ่งจะเป็นข้อเสียของการติดตั้งใช้คด้านหน้า กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าอินพุทจะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งใช้ค จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของระบบและมอเตอร์ลดต่ำลงแต่จะมีค่าเพียงเล็กน้อย (2%-3%) โดยเฉพาะกรณีที่แรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under กำลังไฟฟ้าอินพุทจะสูงกว่ากรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over ซึ่งทั้งนี้ก็เกิดจากการที่ค่าแรงดันอินพุทของมอเตอร์ที่ได้รับมาจาก ASD (หัวข้อที่ 4.4.1, รูปที่ 4.13 และ 4.14) ค่าแรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูลต่ำกว่าแรงดันที่พิกัดของมอเตอร์ ซึ่งเมื่อมีการติดตั้งใช้คด้านหน้าเข้าไปแล้วทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในส่วนนี้ แต่ถ้าพิจารณาในภาพรวมแล้วการติดตั้งใช้คด้านหน้า ASD ก็ยังส่งผลดีต่อระบบในด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดฮาร์มอนิกแล้วปริมาณฮาร์มอนิกที่ ASD สร้างขึ้นมายังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าข้อกำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันที่ตกคร่อมใช้คที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 5% เพราะถ้าหากมากกว่านี้จะทำให้แรงดันไฟตรงในส่วน dc-link ลดลงมากเกินไปซึ่งจะส่งผลต่อมอเตอร์ในกรณีที่มอเตอร์ทำงานที่ภาระสูงๆ กล่าวคือจะทำให้กระแสอินพุทของมอเตอร์สูงกว่าพิกัด

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่ผู้วิจัยจะเสนอเกี่ยวกับการทำงานของ ASD

1. เครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องที่มีใช้ในทางด้านอุตสาหกรรมซึ่งค่าแรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูลที่ได้จาก ASD เท่ากับ 346 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าแรงดันที่พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้ถูกออกแบบให้ทำงานที่แรงดัน 380 โวลต์ จึงทำให้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการทดสอบที่พิกัดได้

2. ถ้าหากใช้ ASD ที่มีพิกัดแรงดันที่ความถี่หลักมูลเท่ากับพิกัดของมอเตอร์แล้ว การติดตั้งใช้คด้านหน้าก็จะทำให้ประสิทธิภาพทั้งของระบบและของมอเตอร์สูงขึ้น และนอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุทให้อยู่ในข้อกำหนดฮาร์มอนิก

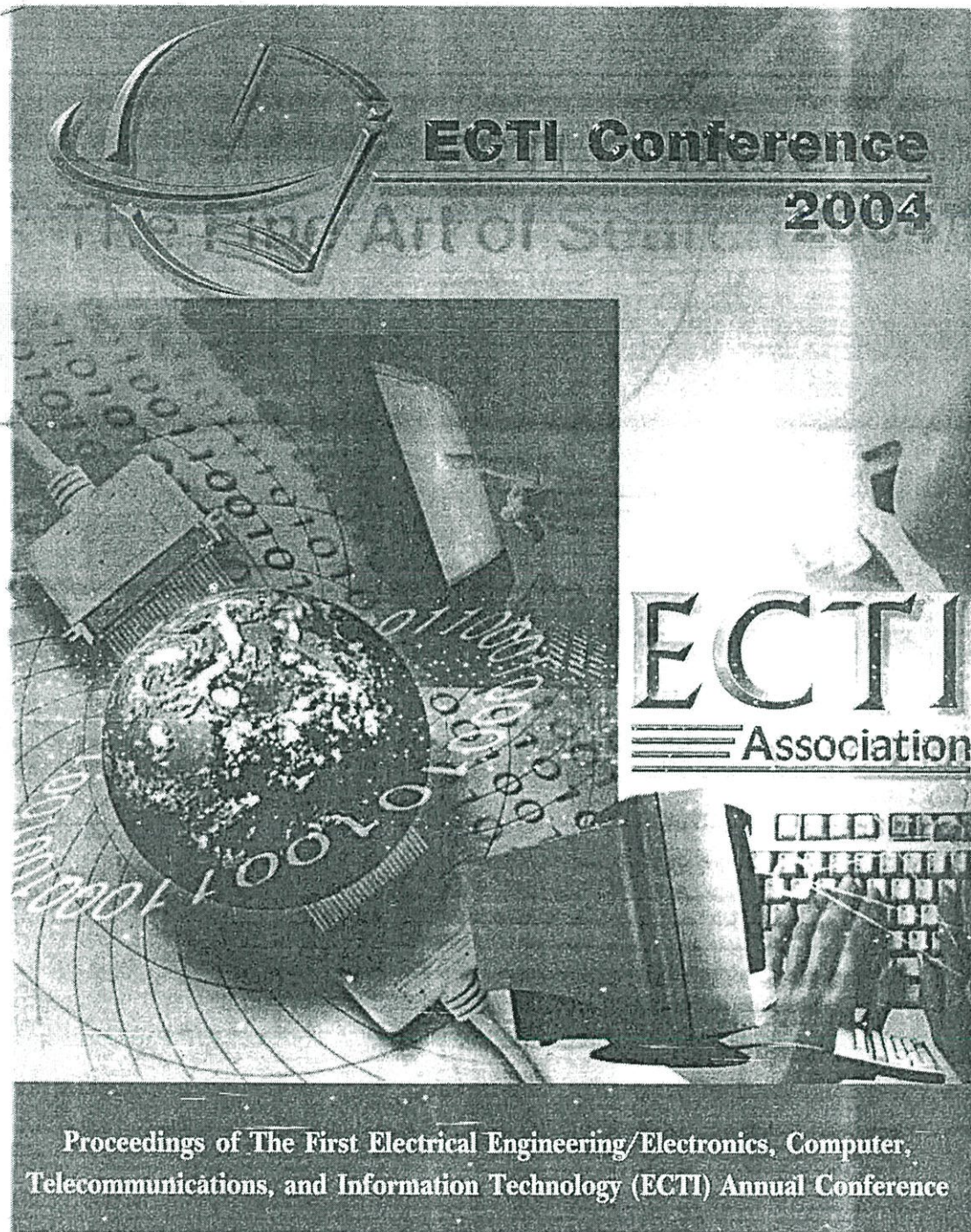
3. ในการออกแบบใช้คในงานวิจัยนี้พบว่าควรออกแบบให้มีค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมใช้คที่ 3%-5% ในกรณีที่ทราบว่ามอเตอร์มีภาระสูงๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วถ้าหากเราทราบถึงภาระการทำงานที่แน่นอนของมอเตอร์ว่าไม่ได้ทำงานที่พิกัด เช่น ครึ่งหนึ่งของพิกัดก็จะทำให้สามารถออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของใช้คให้มีค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันสูงกว่า 5 % ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Mohan, T. M. Underland and W. P. Robbins. Power Electronics Converter, Applications and Design , 2nd edition John Wiley and Sons, 1995.
- [2] ไตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง พ.ศ.2540.
กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2540.
- [3] P.Caramia,G. Carpinelli, F.Pezza , P. Verde ,”Power Quality Degradation effect on PWM voltage source inverter with diode bridge rectifier.” Proceeding. Ninth International Conference., Vol. 2 , 1-4 Oct. 2000.pp.570-576.
- [4] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, “Designing Harmonic Filters for Adjustable Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits.” IEEE Trans. On Industrial Applications., vol. 35, no.2, March/April 1999.pp.312-318.
- [5] M.H.Rashid, A.I.Maswood, ” Analysis of three-phase AC-DC converters under unbalanced supply conditions.” IEEE Trans. On Industry Applications., vol. 24, May-June 1988.pp.449-455.
- [6] V.Thanyaphirak, A. Kunakorn.” Improvement of current total harmonic distortion level due to AC variable speed drives using line reactor”,Proceeding . ECTI Conference,13-14 May 2004.pp.5-8.
- [7] A.V. Jouanne, B. Banerjee, ”Assessment of voltage unbalance”, IEEE Trans. On Power Delivery., vol. 16 ,Oct. 2001, pp.782 – 790.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2543 มอก. 1448-2544 IEC 61000-3-2 (2000-08). “ ขีดจำกัดสำหรับสิ่งที่ส่งออกมาซึ่งเป็นฮาร์มอนิก “ (กระแสไฟฟ้าเข้า ≤ 16 แอมแปร์ ต่อเฟส), กรุงเทพมหานคร.
- [9] วสันต์ ชูยายโสภ. “การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกและการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [10] J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger, Power System harmonic, John Wiley & Son
- [11] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System IEEE Std. 519-1992.

- [12] รัชต มั่งมีชัย, พิเชิต ลำยอง. "การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 , พฤศจิกายน 2545 .หน้า 11-15.

ภาคผนวก ก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



IEEE MTT/AP/ED
THAILAND CHAPTER



IEEE CAS Society



NECTEC



IEEE-LEOS
Thailand Chapter



Improvement of current total harmonic distortion level due to AC variable speed drives using line reactors

V.Thanyaphirak and A. Kunakorn

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This paper present simulations and measurements of AC variable speed drive systems to illustrate the current distortion level of the systems. The line reactors are connected in front of a PWM voltage source inverter drive to improve the total harmonic distortion (THD_i) content. The simulations are performed using MATLAB/Simulink and are compared with experimental results. It is found that the current total harmonic distortion level of system can be decreased using such line reactors.

Keywords: PWM voltage source inverter, Current total harmonic distortion, line reactors, MATLAB/Simulink

1. INTRODUCTION

Induction motors are workhorses for many industries. In order to obtain highly efficient use of the induction motors, the AC variable speed drives have been developed. The most important part for the AC variable speed drives is the inverter which is used as a source for driving the motor. There are two types of the inverters, which are voltage source inverters and current source inverters. The front part of an inverter is the rectifier. This part is regarded as a harmonic generation which causes a distortion in both current and voltage waveforms for the supply at the PCC (Point of Common Coupling)[1,2,3,4]. The distortion results in nonsinusoidal waveshapes for the current and the voltage affecting to other devices connected the PCC.

In this paper, studies on the current waveform distortion of a main supply with an AC variable speed drive are presented. The inverter part of the variable speed drive is PWM voltage source type. The line reactors are connected in series between the supply and the variable speed drive. The reactors are varied so that their effects on the current total harmonic distortion (THD_i) are investigated. The selection of the line reactors with a minimum effect to the efficiency of the overall system is discussed. The analysis is performed on both simulations and experimental measurements. The simulations are implemented using MATLAB/Simulink, while a high precision power analyser is employed for the measurements.

2. PWM voltage source inverter with line reactors

A circuit diagram of an AC variable speed drive with PWM voltage source inverter used in experiments and simulation is shown in Fig. 1. The inverter part employs IGBTs as switching devices, and the space vector PWM is used for producing voltages to supply an induction motor.

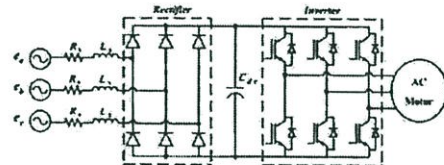


Fig.1: Circuit diagram of an AC variable speed drive

The rectifier part of the AC variable speed drive is a six-pulse bridge. Such a rectifier is treated as a harmonic source injecting harmonic contents to the source. The order of the harmonic from the rectifier can be calculated using Equation 1. [2]

$$h = kq \pm 1 \quad (1)$$

where,

h = order of the harmonic

k = integer (1,2,3,...)

q = number of pulse for the rectifier.

(in this case, $q=6$)

The typical current waveshape at the source with effects from the harmonic contents generated by the six-pulse rectifier is non-sinusoidal. Due to the distortion characteristics, the power factor of the system can be obtained by Equation 2. [2]

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (2)$$

where,

PF = power factor

I_{s1} = RMS input current for the fundamental component

I_s = the input current

$\cos \phi_1$ = displacement power factor

For the series line reactors installed in front of the AC variable speed drive, the design is based on the recommendation that the voltage drop at the line reactors should exceed 5% of the nominal line voltage from the source. This is shown in Equation 3. [2,4]

$$\omega L_{s2} I_{s1} \geq 0.05 \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

where,

$\omega = 2\pi f$

f = frequency of source

L_{s2} = inductance of line reactors

I_{11} = fundamental component of the input current
 V_{LL} = nominal line voltage from the source

As a result the system under the consideration can be illustrated as Fig. 2. The system consists of a three-phase voltage source with a source impedance in each phase, line reactors, an AC variable speed drive and a three-phase induction motor. The power analyser was placed at the PCC, which was in front of the line reactors for this case, to measure the harmonic contained in current waveshapes.

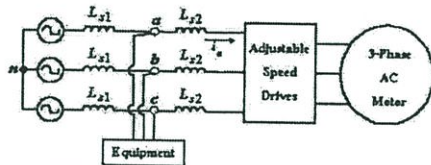


Fig. 2: The test system under consideration

3. MATLAB/Simulink models

The computer simulation package employed in this study was MATLAB/Simulink. The Simulink models for the system were constructed as shown in Fig. 3a and Fig. 3b. The data of an inverter were obtained from a commercial module. The parameters used in the models were as follows:

Voltage source	3-phase, 380 V, 50 Hz
PWM inverter	space vector modulation
PWM Switching frequency	3 kHz
DC link capacitor	1500 μ F
Inverter ratings	5.5 kW, 380 V, 12 A
Induction motor	3-phase, 380 V, 5 A, 50 Hz 4-pole, 3 HP, 1420 rpm

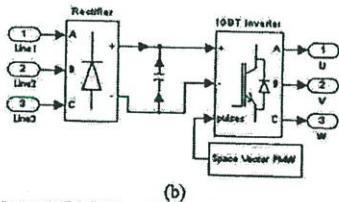
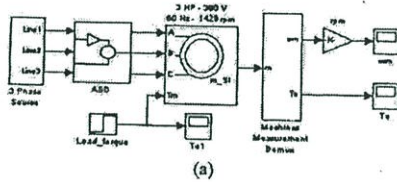
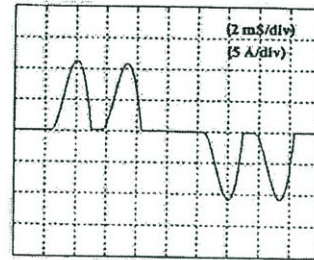


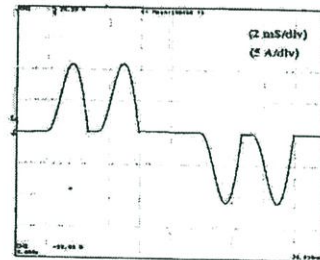
Fig. 3: MATLAB/Simulink models used in simulations

4. RESULTS

The simulations were performed, and the experimental results were measured. A power analyser was used in measurements. Due to limitations of equipment, the system was tested at the 90% of the rated power of the induction motor. The line reactors were varied to inspect their effect on THD_i of the input current. The value of line reactor was chosen so that the voltage drop at the line reactors was 3%, 5% and 7% of the nominal line voltage from the source respectively. The comparison between the simulations and the measurements is shown in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7.



Input current (simulation)
(a)



Input current (experiment)
(b)

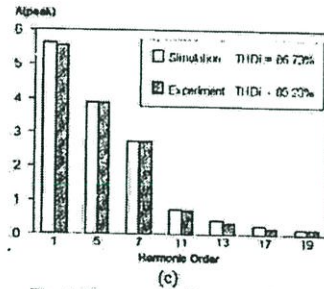
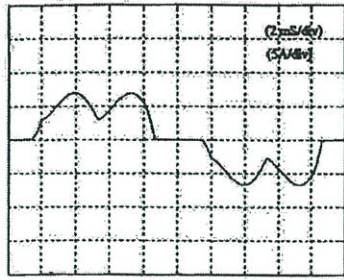
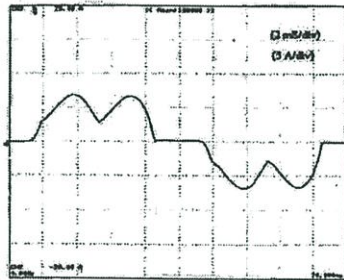


Fig. 4: Current waveforms and THD_i (without line reactors)
(c)



Input current (simulation)
(a)



Input current (experiment)
(b)

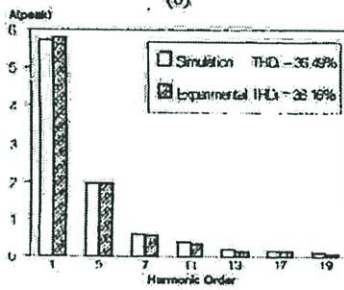
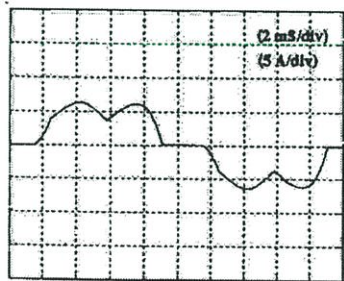
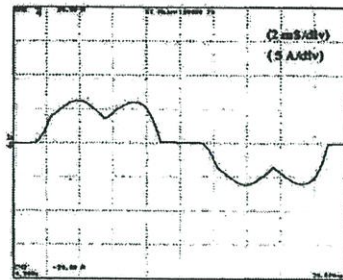


Fig. 5: Current waveforms and THDi (with 3% line reactors)



Input current (simulation)
(a)



Input current (experiment)
(b)

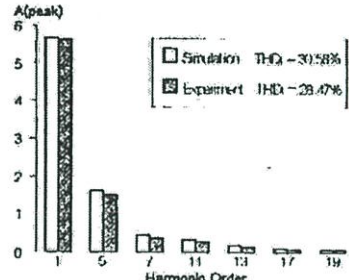
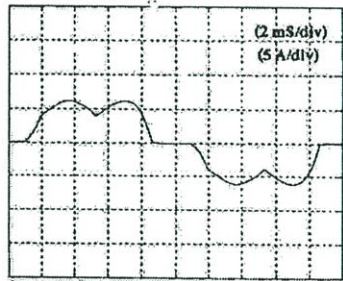
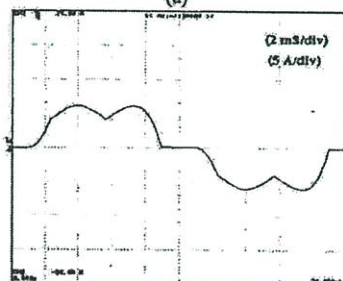


Fig. 6: Current waveforms and THDi (with 5% line reactors)



Input current (simulation)
(a)



Input current (experiment)
(b)

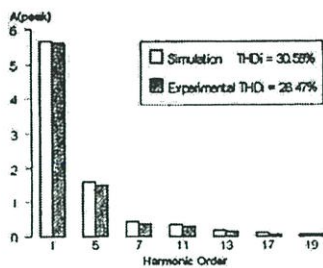


Fig. 7: Current waveforms and THDi (with 7% line reactors)

From the results obtained in both simulations and measurements, it can be seen that when connecting line reactors in series with the adjustable speed drive, the current waveform becomes more sinusoidal. As a result, the THDi at the PCC can be improved. At the 7% line reactors, although the THDi was less than other cases, it was noticed that the motor current started to exceed the rated current. This could cause less efficient and derating operation of the motor. The rated current of the motor, therefore, should be taken as another factor for selecting the value of line reactors for the AC variable speed drive.

It can be concluded that the increase in the value of the line reactors gives the better THDi of the system. In addition, the total input current should be decreased since the high orders of harmonic current are limited (comparing Fig. 4 with Fig. 5, Fig.6 and Fig.7). The input current also depends on the load at the induction motor. In order to investigate the effects of the motor load on the THDi contents, the motor load was varied. The results for the 5% line reactor are shown in Fig.8 and Fig.9.

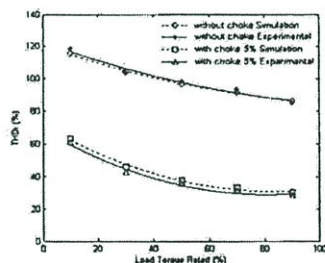


Fig. 8: THDi at the PCC with various motor loads

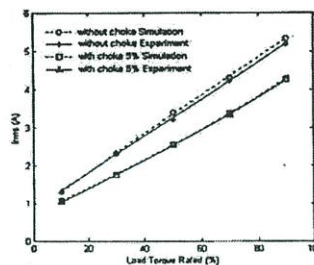


Fig. 9: The input current of the system with different motor load torques

5. CONCLUSIONS

The effects of line reactors connected in series on the current total harmonic distortion from the PWM voltage source inverter have been investigated. Three values of line reactors have been selected based on Equation 3. The simulation results obtained using MATLAB/Simulink are compared with the measurements. It has been found that the simulation model can give accurate prediction of the distortion level in current waveshapes with various values of the line reactors. The distortion level can be decreased by choosing the proper value of the line reactors with minimum change in the fundamental components. The appropriate line reactor should be able to improve THDi of the system. It should be noted that the proper line reactors for the system under consideration should not give the excessive motor current at the operation with load.

References

- [1] IEEE Standard 519-1992 "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System"
- [2] N. Mohan, T. M. Underland and W. P. Robbins "Power Electronics." 2nd edition John Wiley and Sons, 1995
- [3] P. Caramia, G. Carpinelli, F. Pezza and P. Verde "Power Quality Degradation effect on PWM voltage source inverter with diode bridge rectifier" IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp 570-576, October 2000
- [4] Mark F. McGranaghan and David R. Mueller "Designing Harmonic Filters for Adjustable Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits", IEEE Trans. On Industrial Applications vol. 35, no.2, pp 312-318, March/April 1999

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
27th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาบทความ

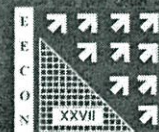
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย
ภาคีวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น



**การศึกษาผลกระทบของเครื่องปรับความเร็วรอบ
กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล**
**Studying Effect of AC Variable Speed Drives
Under Unbalanced Voltage Conditions of Mains Supply**

วีระ จันทวิภังค์ * **

* ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตตลิ่งชัน
ถนนโพธิ์ทอง-วชิรวิทย์ ต.โพธิ์ทอง อ.ตลิ่งชัน จ.ตลิ่งชัน โทร : 0-4273-4723
อีเมล: vicharn@kmitl.ac.th

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ โทร : 0-2362-4550

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้ ได้แก่ ปริมาณฮาร์มอนิก, เพาเวอร์แฟกเตอร์และประสิทธิภาพของระบบ เมื่อเครื่องปรับความเร็วรอบทำงานที่ภาระต่างๆ นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ศึกษากรณีที่มีการติดตั้งโช้ค (Choke) ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ เพื่อลดผลกระทบในเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตโดยการเปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2

Abstract

This paper presents studies on effects on AC variable speed drives for three phase induction motors with unbalanced voltage conditions from a source. Various factors such as harmonic content, power factor and system efficiency are investigated with different load levels. In addition, effects of the choke connection in front of variable speed drives are considered for the reduction of harmonic contents in the AC input current. The comparison is made with IEC standard 61000-3-2.

1. บทนำ

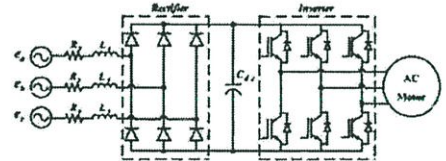
ในปัจจุบันนี้จะมีคนนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในกระบวนการควบคุมมอเตอร์ในทางไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย เช่น การแปลงผันสัญญาณไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกระแสตรง ซึ่งที่ความถี่คือเครื่องมือหรือเครื่องกลไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในกระบวนการซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่ไม่เชิงเส้นนั้น จะสร้างฮาร์มอนิกออกมา รบกวนระบบอื่นไว้ได้รับความเสียหายโดยกะทันหันซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Variable Speed Drives : VSD) ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่น

ของแหล่งจ่ายและจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปีซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวม [1],[2]

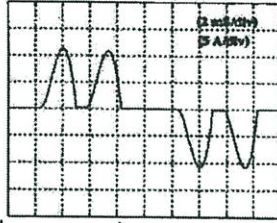
บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส กรณีแรงดันแหล่งจ่ายที่มีโวลเทจแบบออสซิลเลตอรีโวลเทจที่มีโวลเทจในจุดสายกราวด์ [3] เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะไม่สมดุล [4] เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างฮาร์มอนิกโดยจะทำการเปรียบเทียบกันมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2 ที่จำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับโรงไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไม่เกิน 16 แอมแปร์ [5] รวมถึงเพาเวอร์แฟกเตอร์และประสิทธิภาพของระบบเมื่อเครื่องปรับความเร็วรอบทำงานที่ภาระต่างๆ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลดผลกระทบที่มีต่อเครื่องดังกล่าวเมื่อมีการติดตั้งโช้ค (Choke) ด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ

2. ทฤษฎี

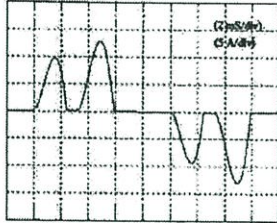
โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายพลังงานให้กับ VSD โดยผ่านวงจรบริดจ์ทรีเฟส และ คาปาซิเตอร์เพื่อกรองสัญญาณไฟให้เป็นไฟตรง และในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะใช้ควบคุมโวลเทจด้วยตัวทำการตัดและต่อวงจร ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมตัวอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันมีหลายเทคนิคด้วยกันและในบทความนี้จะใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ในการควบคุมตัวอินเวอร์เตอร์ที่จะได้แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสจ่ายให้กับมอเตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องปรับความเร็วรอบ



รูปที่ 2 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล



รูปที่ 3 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล

2.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายสมดุล

เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุทอยู่ในสภาวะสมดุลรูปคลื่นกระแสอินพุทของ VSD แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการที่ 1 [2]

$$h = 6q \pm 1 \tag{1}$$

h = อันดับของฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็ม (1, 2, 3, ...)

q = จำนวนพัลส์

ดังนั้นจากโครงสร้างของวงจรเรกติไฟเออร์ดังรูปที่ 1 จะได้อันดับฮาร์มอนิกที่สร้างออกมาสู่ระบบได้แก่ 5, 7, 11, 13, ... เป็นต้น ในขณะที่ ค่าเทออร์เฟซเคอร์คำนวณได้จากสมการที่ 2 [2]

$$PF = \frac{I_{s1} \cos \phi_1}{I_s} \tag{2}$$

PF = บุปประกอบกำลัง

I_{s1} = กระแสอินพุท rms ที่ความถี่หลัก

I_s = กระแสอินพุท rms

$\cos \phi_1$ = displacement power factor

2.2 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล

เมื่อจ่ายแรงดันไม่สมดุลให้กับ VSD รูปคลื่นกระแสอินพุทจะเป็นไปตาม [4] (รูปที่ 3) เนื่องมาจากกระแสอินพุทแต่ละเฟสใน 1

ไซคลิก จะมีช่วงที่กระแสไหลตามความนำกระแสของไดโอดอยู่ทั้งหมด 6 ช่วง ซึ่งในแต่ละช่วงจะมีกระแสไหลเข้าไปซาร์ทประจุที่คาร์ปรีเคอร์ได้ก็ต่อเมื่อไดโอดได้รับไบอัสตรงและช่วงที่แอมพลิจูดของแรงดันไลน์ของแหล่งจ่ายสูงกว่าแอมพลิจูดไฟตรงในส่วนของ DC Link ซึ่งมีผลต่อช่วงที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุลจะทำให้แรงดันไฟตรงมีการกระเพื่อมจึงทำให้ช่วงเวลาที่กระแสไหลเข้าไปซาร์ทประจุที่คาร์ปรีเคอร์ต่างกัน จึงทำให้แอมพลิจูดของรูปคลื่นกระแสเฟสทั้ง 2 เฟส ในแต่ละไซเคิลบวกหรือลบไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ค่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่สร้างออกมาจะไม่เป็นไปตามสมการที่ 1 แต่จะมีฮาร์มอนิกที่หารด้วย ลงตัว เช่น 3, 6, 9, ... (triplen harmonic) ออกมาด้วย เป็นต้น

ในทางปฏิบัติแล้วนั้นแรงดันไฟฟ้ในแต่ละเฟสจะต่างกันเล็กน้อย (1-2 โวลต์) และในการบอกรังค่าความไม่สมดุลของแรงดันนั้นจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std-141 คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\%PVUR = \frac{MAX \{ |V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}| \}}{V_{avg}} \tag{3}$$

$\%PVUR$ = เปอร์เซนต์แรงดันไม่สมดุลต่อเฟส

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้เฉลี่ย

V_a, V_b, V_c = แรงดันแต่ละเฟส

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้ในสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

%PVUR	V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์
0	220	220	220	B
1	220	220	223.5	1%-O
1	220	220	216.5	1%-U
3	220	220	230	3%-O
3	220	220	210	3%-U
5	220	220	237	5%-O
5	220	220	204	5%-U

ทั้งนี้ในการทดสอบจะใช้การไม่สมดุลของแรงดัน 1 เฟส ดังตารางที่ 1 มี 2 กรณี คือ แบบแรงดัน over และแบบแรงดัน under เช่น สัญลักษณ์ 3%-O หมายถึงแรงดันไม่สมดุล 3 % แบบแรงดัน over

3. มาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2

ในงานวิจัยนี้ได้มีมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2 มาใช้อ้างอิงสำหรับกำหนดขนาดฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่สร้างออกมาจากเครื่องปรับความเร็วรอบ ซึ่งมาตรฐานนี้ใช้ได้กับบริบทไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไฟฟ้เข้าไม่เกิน 16 A โดยเลือกใช้มาตรฐาน Class A ซึ่งขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกได้กำหนดไว้ตามตารางที่ 2 [5]

ตารางที่ 2 ซิกนัลกระแสสวิตช์อินพุตตามมาตรฐาน Class A

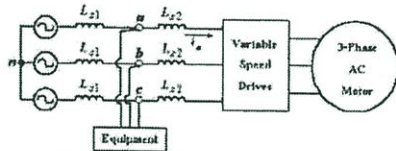
สวิตช์อินพุต		สวิตช์อินพุต	
อันดับอินพุต	ค่ากระแส (A)	อันดับอินพุต	ค่ากระแส (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8 ≤ n ≤ 40	0.23 (S/n)
11	0.33		
13	0.21		
15 ≤ n ≤ 39	0.15 (15/n)		

4. การติดตั้งโซ่ค้ำหน้า VSD

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งโซ่ค้ำหน้า VSD (3) (รูปที่ 4) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งในเรื่องของคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุต, ค่าแอมพลิจูดของกระแส และมาตรฐานสวิตช์อินพุตทั้งนี้ในการออกแบบค่าโซ่ค้ำหน้าจะออกแบบโดยอิงจากค่ากระแสเฉลี่ยอินพุตที่ความถี่หลักของการทดสอบในสภาวะที่เมตริกค่าอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงค่าอินพุตกระแสของโซ่ค้ำที่เหมาะสม [1] โดยการเลือกแรงดันตกคร่อมโซ่ค้ำ (% V) ที่ 5% ของแรงดันไลน์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 [2] ได้ทำอินพุตค้ำเท่ากับ 9.1 mH

$$\omega L_{s2} I_{d1} \geq (\%V) \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

- (%V) = ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโซ่ค้ำ
- ω = ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที)
- L_{s1} = อินдукแตนซ์ของแหล่งจ่าย
- L_{s2} = โซ่ค้ำที่ติดตั้งด้านหน้า VSD
- I_{d1} = กระแสอินพุตที่ความถี่หลัก
- V_{LL} = แรงดันไลน์ ที่จุด PCC



รูปที่ 4 การติดตั้งโซ่ค้ำหน้า VSD ที่จุดต่อร่วม (PCC)

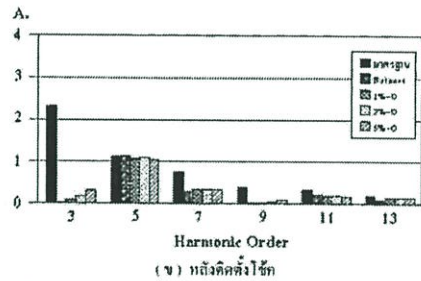
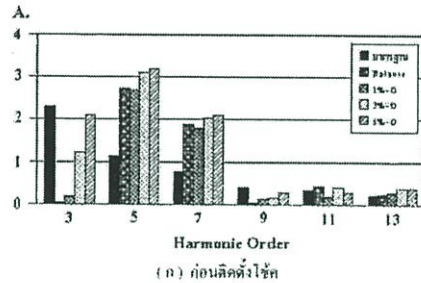
5. ผลการทดสอบ

ในการทดสอบได้ศึกษาการสร้างสวิตช์อินพุตต่างๆของเครื่องปรับความเร็วรอบก่อนและหลังติดตั้งโซ่ค้ำหน้า ในสภาวะ

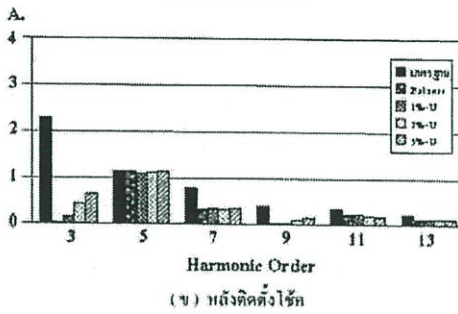
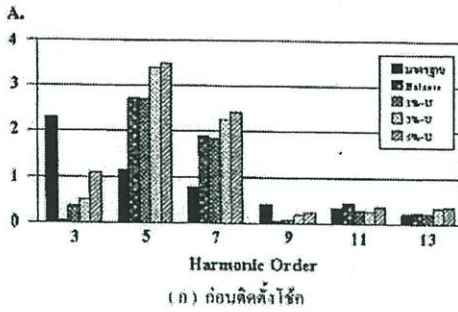
แรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและไม่สมดุลเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสวิตช์อินพุตในรูปที่ 5 และ 6 โดยที่เครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดพิกัดดังนี้

- Inverter ratings : 5.5 kW, 380 V, 12 A.
- PWM inverter : Space Vector Modulation
- Switching Frequency : 3 kHz
- Induction Motor : 3-phase, 220/380V, 5 A, 50 Hz
4-pole, 3 HP, 1420 rpm

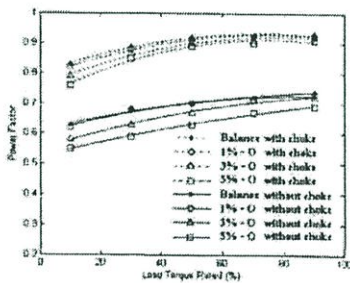
จากรูปที่ 5 และ 6 จะพบว่าก่อนทำการติดตั้งโซ่ค้ำ ปริมาณฮาร์มอนิกที่สร้างออกมาจากเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบจะมีปริมาณสูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยเมื่อสภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล 5% ทั้ง 2 กรณี จะส่งผลกระทบต่อทางด้านสวิตช์อินพุตสูงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งเมื่อทำการติดตั้งโซ่ค้ำหน้า VSD ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกอินพุตต่างๆที่สร้างออกมาต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งทำให้ค่ากระแสอินพุตของ VSD ลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงค่าแอมพลิจูดของกระแสของระบบซึ่งมีรูปที่ 7, 8 เนื่องจากค่ากระแสที่เกินเอสโกติคกับกระแสอินพุตที่ความถี่หลัก ซึ่งทั้งนี้การติดตั้งโซ่ค้ำหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบซึ่งวัดจากค่าถึงฮาร์มอนิกของมอเตอร์และค่าอินพุตของ VSD เปลี่ยนแปลงมากนักไปซึ่งแสดงดังตารางที่ 3



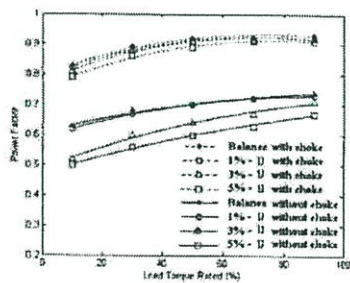
รูปที่ 5 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกอินพุตต่างๆเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลแบบแรงดัน over



รูปที่ 6 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลแบบแรงดัน under



รูปที่ 7 เทอร์นเฟคเตอร์ของระบบเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลแบบแรงดัน over



รูปที่ 8 เทอร์นเฟคเตอร์ของระบบเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลแบบแรงดัน under

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบเมื่อแหล่งจ่ายไม่สมดุล

Condition	Efficiency on Load Torque Rated (%)					
	10		50		90	
	Without choke	With choke	Without choke	With choke	Without choke	With choke
B	39.26	40.28	71.15	72.75	77.51	75.23
1%-O	42.10	42.54	73.00	73.51	75.40	76.29
1%-U	41.84	42.31	72.91	73.33	75.82	76.16
3%-O	41.65	41.95	73.68	73.62	76.66	76.59
3%-U	42.23	42.70	73.82	73.57	76.89	74.42
5%-O	40.50	41.80	73.39	73.58	77.13	76.59
5%-U	41.69	42.84	73.43	73.57	76.75	74.68

6. สรุป

จากการศึกษาระบบของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีไดโอดค้อนแบบบริดจ์กริดไฟเออร์ที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อแหล่งจ่ายไม่สมดุลอยู่ในสภาวะไม่สมดุลพบว่าสภาวะการไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่ายแต่ละกรณีจะมีผลต่อการพิจารณานิเวศน์ต่างๆที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งกรณีที่มีแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล 5% จะส่งผลกระทบต่อปริมาณฮาร์มอนิกและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบมากที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิกแล้วพบว่าปริมาณฮาร์มอนิกที่สร้างออกมาจะสูงเกินกำหนด แต่ถ้ามีการติดตั้งไอค้ำหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบออกจะทำได้ปริมาณฮาร์มอนิกลดลงต่ำกว่ามาตรฐานแล้วจึงทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบสูงขึ้นโดยที่ประสิทธิภาพของระบบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] V.Thanyaphirak, A. Kunakorn." Improvement of current total harmonic distortion level due to AC variable speed drives using line reactor", Proceeding . ECTI Conference, 13-14 May 2004.

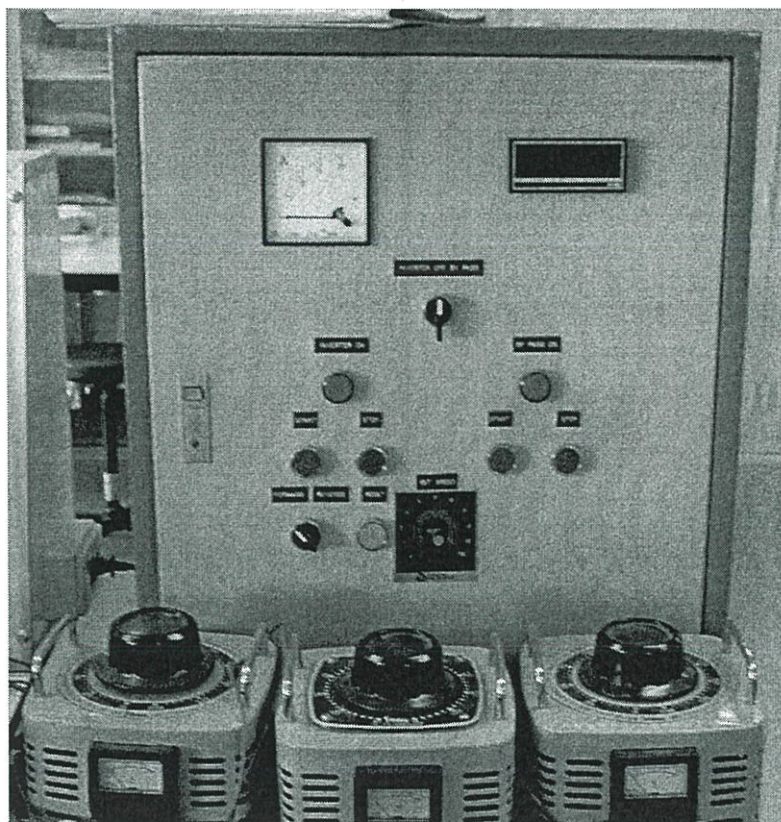
[2] N.Mohan, T. M. Underland and W. P. Robbins."Power Electronics." Converter, Applications and Design , 2nd edition John Wiley and Sons,

[3] P.Caramia,G. Carpinelli, F.Pezza ,P.Verde ."Power Quality Degradation effect on PWM voltage source inverter with diode bridge rectifier", Proceeding. 9th International Conference Harmonics and Quality of Power Volume: 2 , 1-4 Oct. 2000.

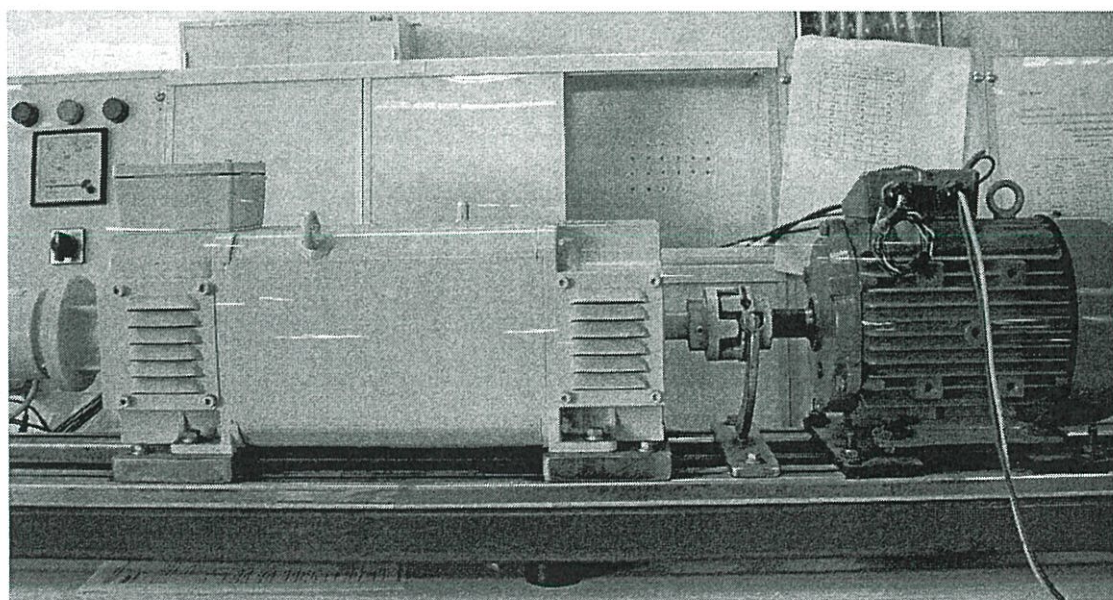
[4] A. von Jouanne, B.; Banerjee. " Assessment of voltage unbalance " IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 16 , Issue: 4. Oct. 2001 Pages:782 - 790

[5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2543 มอก. 1448-2544 IEC 61000-3-2 (2000-08). " ข้อจำกัดสำหรับสิ่งที่ส่งออกมาแจ้งเป็นฮาร์มอนิก " (กระแสไฟฟ้าเข้า ≤16 แอมแปร์ต่อเฟส), กรุงเทพฯ :

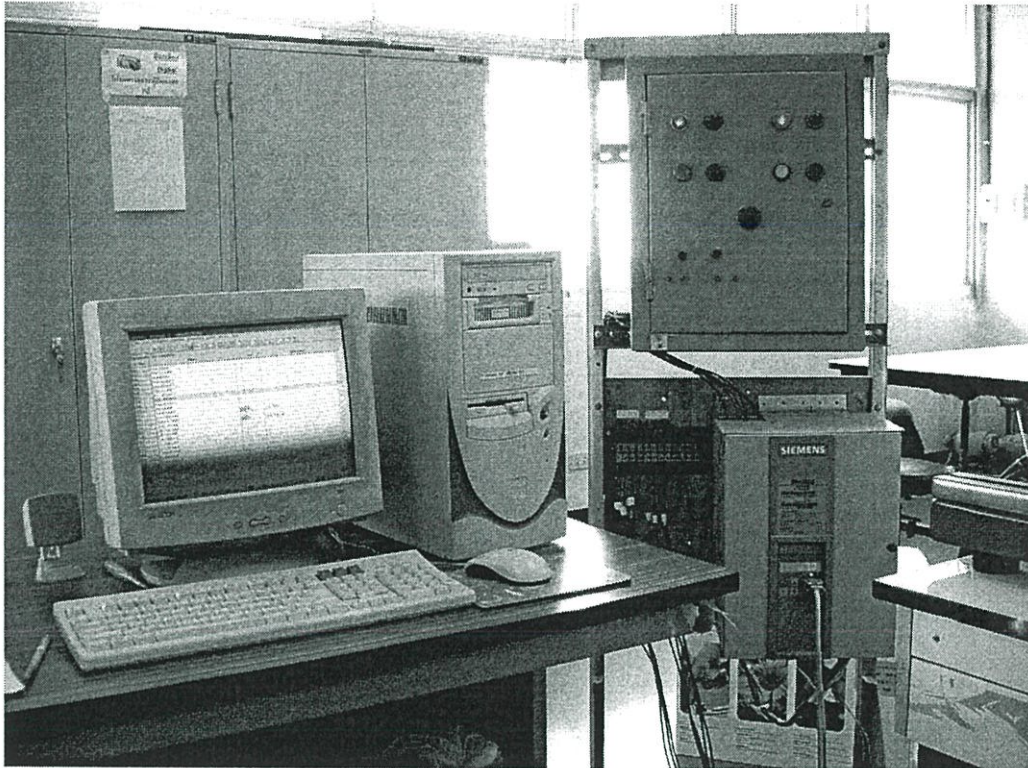
ภาคผนวก ข
รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



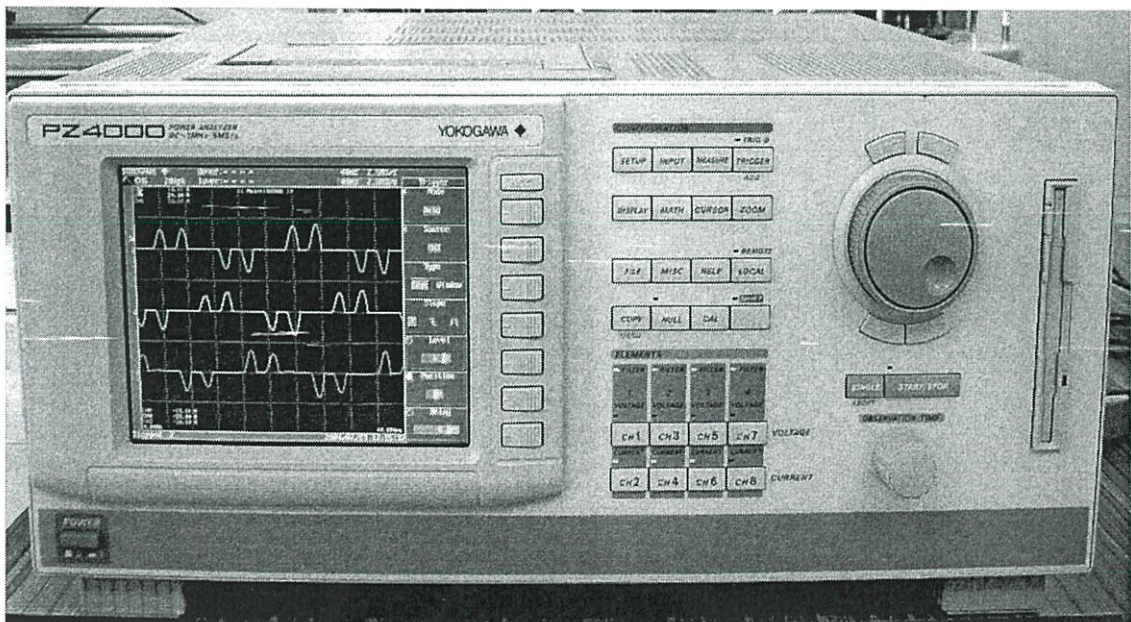
ASD และ Variac 1 เฟส 3 ตัว ที่ใช้ในการทดสอบ



Test Rig. ที่ใช้ในการทดสอบ



DC Drive ที่ควบคุมผ่าน computer



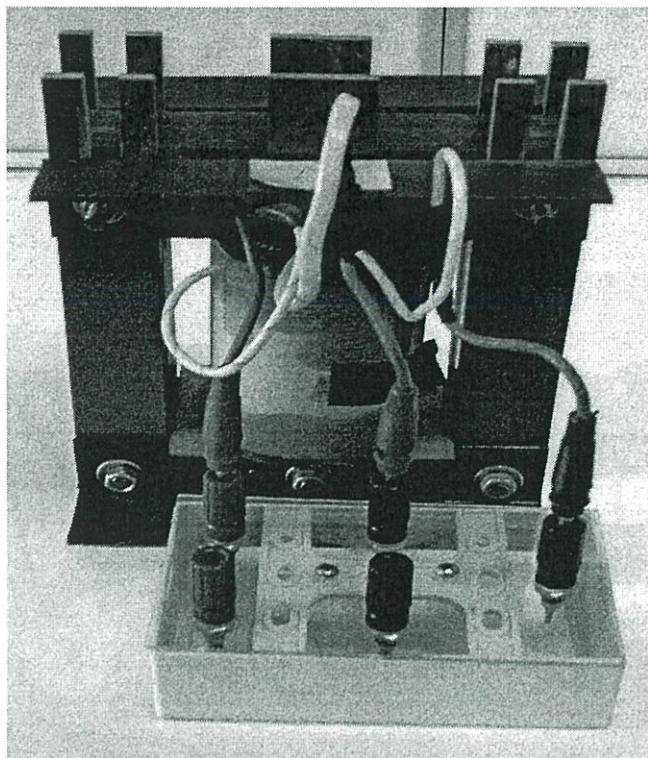
เครื่อง Power Analyzer PZ4000 ที่ใช้ในการวัด



ดิจิตอลมัลติมิเตอร์



เครื่องวัดค่าอินดักแตนซ์



Series Line Reactor (Choke)



เครื่องวัดความเร็วรอบ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวีระ ถันยาภิรักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	2 กันยายน 2517 ที่จังหวัดบุรีรัมย์
ที่อยู่	199/4 ม.3 ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160
ประวัติการศึกษา	2538 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2539-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 5 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสกลนคร อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม