

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
เหนี่ยวนำสามเฟส

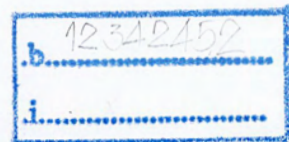
POWER QUALITY IMPROVEMENT OF FRONT END OF INDUCTION
MOTOR DRIVES



T117514



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 117514
วัน,เดือน,ปี..... 5 ต.ค. 2554



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์
บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553
การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ
สามเฟส

POWER QUALITY IMPROVEMENT OF FRONT END OF INDUCTION
MOTOR DRIVES



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

ผศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
เหนี่ยวนำสามเฟส

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย กรธานินทร์ ยูปานันท์ 50010025
 2. นาย เกียรติวีรพงศ์ วงษ์จิ 50010148
 3. นาย คณิน พันธุเวช 50010167

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชาติ มานพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

นาย กรณินทร์ ยูปานันท์

นาย เกียรติวีรพงศ์ วงษ์จิ

นาย คณิน พันธุเวช

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้นำเสนอผลจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดันจากแหล่งจ่าย โดยทำการสร้างแบบจำลองการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการติดตั้งโช้ค (Choke) ทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและทางด้านส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณฮาร์มอนิก, ตัวประกอบกำลัง, กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อทำหน้าที่ที่ภาระต่างๆ เพื่อลดผลปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องดังกล่าวให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2

POWER QUALITY IMPROVEMENT OF FRONT END OF INDUCTION MOTOR
DRIVES

Korntanin Yupananun

Kiatweerapong Wongji

Kanin Pantuwate

Assoc.Prof.Dr. Vijit Kinnares Supervisor

Asst.Prof.Dr. Chalemchart Manop Supervisor

2010

ABSTRACT

This thesis presents results of research on power quality improvement of three-phase induction motor drives in the state of balance and unbalance voltage. The adjustable speed induction motor drive is modeled using MATLAB / Simulink, and the simulation results are compared with experimental measurements. Choke is placed in front of the adjustable speed induction motor drives and connected at DC link. This is for studies of factors which contribute to the harmonic injection, power factor power input and power output from the drives as various loads. Also the investigation has been performed so that the reduction of harmonic contents complying with IEC standard 61000-3-2 can be obtained.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนัฐศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ และ ผศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอบคุณบุคลากรและพี่ๆเพื่อนๆร่วมห้องปฏิบัติการ (PMC) ที่ให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ และคอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อ.วัฒน์ ยี่ตา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานินทร์.....	4
บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน	
2.1 ลักษณะฮาร์มอนิก.....	5
2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก.....	8
2.2.1 Harmonic.....	8
2.2.2 Interharmonic.....	8
2.2.3 Characteristic Harmonic.....	9
2.2.4 Noncharacteristic Harmonic.....	9
2.1.5 Triplen Harmonic.....	9
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	9
2.3.1 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	10
2.3.2 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก.....	10
2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค.....	10
2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า.....	10
2.4.1 ตัวเก็บประจุ.....	10
2.4.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์.....	11

2.4.3	ตัวนำ.....	11
2.4.4	หลอดไฟฟ้า.....	12
2.4.5	รีเลย์ป้องกัน.....	12
2.4.6	เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุน.....	12
2.4.7	หม้อแปลง.....	12
2.4.8	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	12
2.4.9	การรบกวนโทรศัพท์.....	13
2.5	มาตรฐานฮาร์โมนิก.....	13
2.5.1	มาตรฐาน มอก. 1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 (2000-08)	13
2.5.2	มาตรฐาน IEEE 519-1992.....	15
2.6	ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
2.6.1	หลักการทํางานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	17
2.6.2	วงจรมุมลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	18
2.6.3	การวิเคราะห์วงจรมุมล.....	19
2.7	หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	21
2.7.1	ช่วงการทํางานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)	23
2.7.2	ช่วงการทํางานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)	23
2.7.3	ช่วงการทํางานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)	24
2.8	ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	24
2.8.1	อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	25
2.8.2	อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	26
2.9	เทคนิคการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	27
2.9.1	เทคนิค Sinusoidal Pulse wide Modulation (SPWM)	27
2.10	สรุป.....	28
บทที่ 3 หลักการทํางานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์		
3.1	หลักการทํางานของเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	29
3.1.1	กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล.....	31
3.1.2	กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล.....	33
3.2	การติดตั้งโช้คด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ(AC Choke)	35
3.3	การติดตั้งโช้คที่ส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงของเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	37
3.4	การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink.....	38
3.5	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	39

3.5.1	ค่าพิกัดของเครื่องปรับความเร็วรอบ	39
3.6	สรุป	40
บทที่ 4 ผลการจำลองและทดสอบ		
4.1	กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล	42
4.2	เมื่อไม่มีการติดตั้งโช๊คด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	42
4.3	เมื่อมีการติดตั้งโช๊คด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	45
4.3.1	เมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 3% ด้านหน้า ASD	47
4.3.2	เมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 5% ด้านหน้า ASD	48
4.3.3	เมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 7% ด้านหน้า ASD	49
4.4	เมื่อมีการติดตั้ง DC Choke	52
4.5	เมื่อมีการติดตั้งโช๊คทั้งด้านหน้าชุดขับเคลื่อนและที่ดิสคิงค์	58
4.6	กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล	65
4.6.1	กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโช๊ค	66
4.6.2	กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งโช๊ค	69
4.6.3	กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโช๊ค	70
4.6.4	กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโช๊ค	72
4.6.5	กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโช๊ค	73
4.6.6	กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage ที่มีการมีการติดตั้งโช๊ค	75
4.6.7	กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโช๊ค	76
4.6.8	กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโช๊ค	79
4.6.9	กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโช๊ค	81
4.6.10	กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งโช๊ค	84
4.6.11	กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโช๊ค	84
4.6.12	กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโช๊ค	87
4.7	สรุป	90
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการวิจัย	91
5.2	ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม		
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก		
ภาคผนวก ข		



VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสอินพุท ที่ความถี่หลักมูล.....	7
2.2 รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัม.....	9
2.3 การต่อตัวเก็บประจุชานกับระบบและเกิดเรโซแนนซ์แบบชาน.....	11
2.4 รูปคลื่นกระแสสำหรับการพิจารณาของ Class D.....	14
2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18
2.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
2.7 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แรงบิด กระแสมอเตอร์กับความถี่.....	23
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ.....	24
2.9 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	26
2.10 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	26
2.11 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM.....	27
2.12 หลักการพื้นฐานของเทคนิค PWM สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟส.....	28
3.1 โครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	29
3.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุทของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	30
3.3 รูปคลื่นแรงดันของ ASD ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	30
3.4 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล.....	31
3.5 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์.....	32
3.6 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง.....	32
3.7 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล.....	34
3.8 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง.....	34
3.9 การติดตั้งโช๊คต้านหน้า ASD.....	36
3.10 การติดตั้งโช๊คที่ส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง (DC Choke).....	37
3.11 ระบบ ASD ที่ใช้ในการจำลอง.....	38
3.12 แบบจำลองของ ASD.....	39
3.13 เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไลน์.....	40
4.1 ส่วนต่างๆของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
4.2 รูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 1.4 kW.....	44
4.3 สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 1.4kW.....	44
4.4 ค่า %THD _i ที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโช๊คต่างๆ.....	46

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5	เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	50
4.6	เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	50
4.7	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่าง ๆ.....	51
4.8	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ขณะติดตั้ง AC Choke.....	51
4.9	กระแสคี่โหลตที่ตีซีลิ่งค์	52
4.10	แรงดันคี่ซี	52
4.11	เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ.....	56
4.12	เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ.....	56
4.13	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	57
4.14	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	57
4.15	เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง AC พร้อม DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ.....	61
4.16	เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง AC พร้อม DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ.....	61
4.17	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	62
4.18	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่าง ๆ	62
4.19	เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่าง ๆ.....	63
4.20	เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่าง ๆ.....	63
4.21	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่าง ๆ.....	64
4.22	เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่าง ๆ.....	64
4.23	รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงจ่ายภาระที่ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโช๊ค	66
4.24	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลตเพ็งขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Over voltage โดยไม่มีการติดตั้งโช๊ค	67
4.25	เปรียบเทียบสเปกตรัมค่ากระแสที่เฟสต่าง ๆ	68
4.26	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลตเพ็งขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Over voltage โดยมีการติดตั้งโช๊ค	69
4.27	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า กระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW ไม่มีการติดตั้งโช๊ค.....	70
4.28	เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่าง ๆ	71
4.29	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลตเพ็งขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งโช๊ค	72
4.30	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการไม่มีการติดตั้งโช๊ค	73

IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.31	เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ	74
4.32	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการติดตั้งโซลิต	75
4.33	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage โดยมีการติดตั้งโซลิต	75
4.34	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซลิต	76
4.35	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่ สมดุล 3% แบบ Under voltage โดยไม่มีการติดตั้งโซลิต	77
4.36	เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ	78
4.37	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการติดตั้งโซลิต	79
4.38	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งโซลิต	80
4.39	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซลิต	81
4.40	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage โดยไม่มีการติดตั้งโซลิต	82
4.41	เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ	83
4.42	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการติดตั้งโซลิต	84
4.43	กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซลิต	84
4.44	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Under voltage โดยไม่มีการติดตั้งโซลิต	85
4.45	เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ	86
4.46	ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งโซลิต	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน Class A.....	14
2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสสำหรับระบบจำหน่ายที่แรงดัน 120 V ถึง 69,000 V.....	16
2.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน	17
3.1 แรงดันไฟฟ้าในสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดสอบกรณีไม่สมดุล 1 เฟส.....	35
4.1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการติดตั้งโช๊ค	43
4.2 ค่าอินตักแดนซ์ของโช๊คที่เปอร์เซ็นต์แรงดันต่างๆ.....	45
4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโช๊คต่างๆ	45
4.4 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 3% ด้านหน้า ASD.....	47
4.5 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 5% ด้านหน้า ASD.....	48
4.6 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช๊ค 7% ด้านหน้า ASD.....	49
4.7 ผลการทดลองติดตั้ง DC Choke 9.3 mH.....	53
4.8 ผลการทดลองติดตั้ง DC Choke 16.8 mH.....	54
4.9 ผลการทดลองติดตั้ง DC Reactor 25.8 mH.....	56
4.10 DC Reactor 4.7 mH & AC Reactor 3 mH.....	58
4.11 DC Reactor 9.3 mH & AC Reactor 3 mH.....	59
4.12 DC Reactor 16.8 mH & AC Reactor 3 mH.....	60
4.13 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของอินเวอร์เตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล	88
4.14 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล	89
4.15 เปรียบเทียบคุณลักษณะของ AC Choke และ DC Choke.....	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้จะพบว่าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาสำคัญต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า และมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการควบคุมแทนสวิตช์ในทางไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย เช่น การแปลงผันสัญญาณไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกระแสตรง ซึ่งการใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมนั้นถือว่าเป็นการระมัดระวังไม่เชิงเส้น จะสร้างฮาร์มอนิกออกมารบกวนระบบให้ได้รับความเสียหายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ชุดขับเคลื่อนเหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction motor drives) ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นของแหล่งจ่ายและจะมีเพิ่มมากขึ้นทุกปีซึ่งจะส่งผลเสียหายต่อระบบโดยรวม [1],[2]

ในปัญญานี้ได้นำเสนอวิธีการในการปรับปรุงปัญหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตและทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ให้กับระบบ เพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องดังกล่าวให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2 ที่จำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับบริบทที่ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไม่เกิน 16 แอมแปร์ [3] รวมถึงตัวประกอบกำลัง เมื่อเครื่องปรับความเร็วรอบทำงานที่ภาระต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาผลกระทบจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอยู่ในภาวะสมดุลและไม่สมดุล

2. เพื่อศึกษาการออกแบบ Series Line Reactor หรือ AC Choke และ DC Reactor หรือ DC Choke เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวทั้งทางด้านหน้าและส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเพื่อลดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแส

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

จากปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่รบกวนระบบอื่นๆที่ใช้ไฟฟ้าร่วมกันที่จุดต่อร่วม ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้นประเภทเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ไดโอดในการเรียงกระแส มีใช้อยู่เป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะมี

ราคาถูก แต่ปัญหาที่ตามมาคือเครื่องชนิดดังกล่าวจะไม่มี การปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่น กระแสอินพุท จึงทำให้เกิดมีฮาร์มอนิกที่สูงเกินมาตรฐานฉีดเข้าสู่ระบบทำให้ระบบอื่นๆทำงาน ผิดพลาดไป ในปริณญาณิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกจากเครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้ อยู่ในทางอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาดพิกัด 5.5 kW. แรงดันอินพุท 380/660 V. กระแส 12 A โดย การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 7.5 kW แรงดัน 380/660 V. กระแส 15.6/8.98 A. 4 pole 50 Hz. ความเร็วรอบที่พิกัด 1440 rpm

โดยทำการศึกษาจากแบบจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบและแบบจำลองมอเตอร์ เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ทำการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการ ทดสอบจากระบบจริงเพื่อศึกษาการฉีดฮาร์มอนิก, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแส , เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ เมื่อแหล่งจ่ายอินพุทอยู่ในภาวะสมดุลและไม่สมดุล

จากนั้นจะทำการติดตั้ง Series Line Reactor และ DC Reactor ทางด้านหน้าเครื่องปรับ ความเร็วรอบและตรงส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบ ที่เกิดขึ้นในเรื่องการลดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทให้เป็นไปตาม ข้อกำหนด มอก.1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ เอกสารและหนังสือที่ใช้เป็นข้อมูล เกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในด้านต่าง รวมถึง มาตรฐานและข้อกำหนดเกี่ยวกับฮาร์มอนิก



1.4.2 ทดสอบหาค่าต่างๆเกี่ยวกับเครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.4.3 ศึกษาการสร้างแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบและมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย ใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink

1.4.4 ทำการจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบที่จ่ายกำลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ภาระต่างๆ เมื่อแหล่งจ่ายอินพุทอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล รวมถึงการออกแบบ ติดตั้ง Series line reactor และ DC reactor ทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทางส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ ได้จากการจำลองและจากการทดลอง

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	2553							2554			
	มี.ย	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1.ศึกษาและค้นคว้า	[Progress bar]										
2.ทดสอบ Inverter		[Progress bar]									
3.ทดสอบ AC Reactor			[Progress bar]								
4.ทำการ Simulation				[Progress bar]							
5.ออกแบบ,สร้าง และทดสอบ DC Reactor							[Progress bar]				
6.วิเคราะห์ทดลองและติดตั้งอุปกรณ์								[Progress bar]			
7.สรุปผลงานวิจัย									[Progress bar]		

 แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้
 แผนการดำเนินงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.6.1 เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล

1.6.2 เป็นการจำลองชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้แนวทางในการศึกษาในด้านต่างๆก่อนนำผลดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบ

1.6.3 เป็นการออกแบบ Series line reactor หรือ AC Choke และ DC reactor หรือ DC Choke ที่ทำการติดตั้งทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทางส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงตามลำดับเพื่อให้มีความเหมาะสมในการลดผลกระทบจากเครื่องดังกล่าว

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญยานิพนธ์

ในปฏิญยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในปฏิญยานิพนธ์ แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ วิธีที่ใช้ในโครงการ แผนการดำเนินงาน เนื้อหาโดยย่อในแต่ละบทและประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ส่วนแรกกล่าวถึงพื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ลักษณะ , ประเภท และแหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิก รวมถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า และมาตรฐานฮาร์มอนิกในเรื่องของขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน ส่วนที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน ซึ่งจะอธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบต่างๆ รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

บทที่ 3 กล่าวถึงชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการการวิจัยซึ่งจะอธิบายถึงความแตกต่างกรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบเมื่อมีการติดตั้ง Series line reactor และ DC reactor ทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทางส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงตามลำดับ รวมถึงการจำลองระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink และการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบระบบเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ภาระต่างๆรวมถึงผลกระทบเมื่อติดตั้ง Series line reactor และ DC reactor ทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและทางส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงตามลำดับ

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยศึกษาการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลของแรงดัน ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายรวมถึงข้อเสนอแนะที่จะใช้ในการวิจัยลำดับต่อไป

บทที่ 2

พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าถือว่าเป็นหนึ่งในหลาย ๆ ปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าซึ่งในปัจจุบันนี้กำลังได้รับกล่าวถึงเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมและการเติบโตตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกเข้าไปรบกวนระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ให้ทำงานผิดพลาดไป โดยที่แต่ละหน่วยงานที่มีการใช้กระแสประเภทดังกล่าวมักจะเลือกใช้อุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งจ่าย ซึ่งจะตรงกับความต้องการของหน่วยงานคือ มีต้นทุนต่ำโดยไม่คำนึงถึงปัญหาที่ตามมา ในขณะที่กฎหมายหรือข้อกำหนดทางด้านฮาร์มอนิกในประเทศไทยยังไม่ได้มีการบังคับใช้ที่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาลักษณะและการเกิดฮาร์มอนิก จากภาวะที่ไม่เชิงเส้น เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลจากฮาร์มอนิก จากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เป็นภาระแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาวิธีการที่ง่าย และสะดวกในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกให้ลดลง

ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส พบว่ามีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติ รวมถึงข้อดีของมอเตอร์ดังกล่าว เช่น ราคาต่ำ, แข็งแรง, ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย เป็นต้น ซึ่งในบางลักษณะงานมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สามารถปรับได้ต่ำหรือสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นจึงได้มีการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นมาเรียกว่า “ เครื่องปรับความเร็วรอบ ” ซึ่งในปัจจุบันจะมีการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปีและจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบอื่นๆ

2.1 ลักษณะฮาร์มอนิก

องค์ประกอบฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบที่รวมอยู่ในสัญญาณที่มีความถี่ต่างจากความถี่หลักมูล เช่น สัญญาณใดๆ มีความถี่หลักมูลเท่ากับ 50 Hz ดังนั้นสัญญาณอื่นๆ ที่รวมอยู่ในสัญญาณดังกล่าวที่มีความถี่ไม่เท่ากับความถี่ดังกล่าวจะเรียกว่า องค์ประกอบฮาร์มอนิก รูปคลื่นสัญญาณรายคาบใดๆ ที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ [1] ดังสมการที่ (2.1)

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

- $f(t)$ = 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

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

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

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

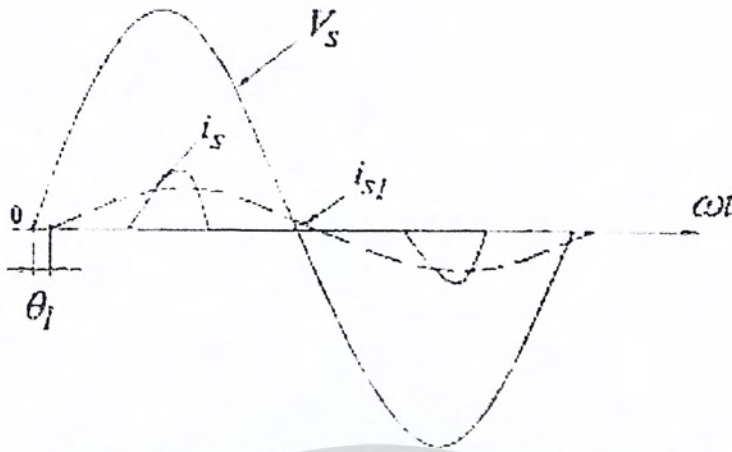
$$b_h = \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (2.5)$$

ในขณะที่ค่าที่ใช้บ่งชี้ว่าขนาดหนึ่งๆมีปริมาณฮาร์มอนิกอยู่มากหรือน้อยจะบอกในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลเรียกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสอินพุท ที่ความถี่หลักมูล

จากรูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุทที่จ่ายให้กับภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น 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

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

แทนค่าสมการที่ 2.9 และ 2.10 ลงในสมการที่ 2.8 จะได้

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

จะได้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ เพาเวอร์แฟคเตอร์ ในวงจรเชิงเส้นที่รูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นไซน์

I_{S1} = กระแสอินพุท ที่ความถี่หลักมูล

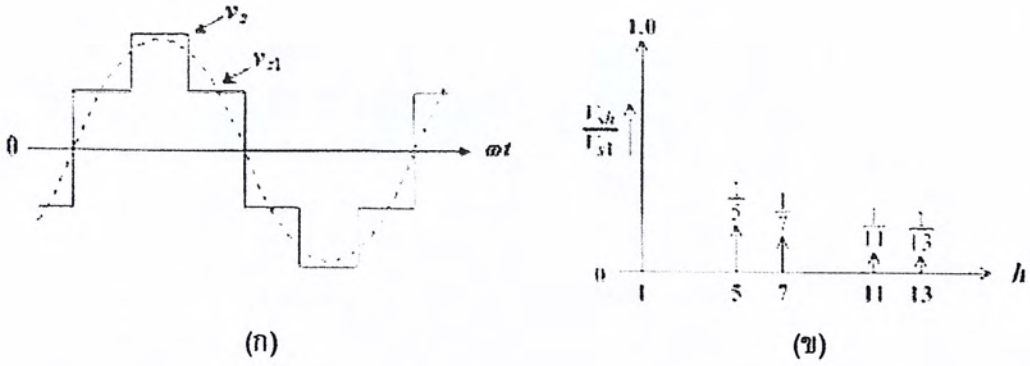
I_S = กระแสอินพุท

2.2 ประเภทของฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่หลายชนิดด้วยกันซึ่งถ้าแบ่งออกตามลักษณะของการเกิดและจำนวนเท่าของฮาร์โมนิก แบ่งออกได้ 5 ดังต่อไปนี้

2.1.1 Harmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณที่องค์ประกอบที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental Component) ดังรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งแสดงรูปคลื่นสัญญาณ 6 - Step และองค์ประกอบที่มีความถี่หลักมูล ในขณะที่รูปที่ 2.2 (ข) แสดงค่าแอมพลิจูดของฮาร์โมนิกซึ่งเป็นจำนวนเท่าที่เป็นจำนวนเต็มขององค์ประกอบที่มีความถี่หลักมูล

2.1.2 Interharmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณที่มีความถี่หลักมูล



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, ... ซึ่งในระบบสามเฟสสมมูลฮาร์มอนิกกลุ่มนี้มักจะรวมกันอยู่ในสายนิวทรัล

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก [2]

ระบบไฟฟ้าในอุดมคตินั้นจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่าในปัจจุบันนี้ได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคเอกชน ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้จะมีคุณสมบัติทำให้รูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์โดยจะมีปริมาณความผิดเพี้ยนมากขึ้นทุกๆปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วเรามักเรียกภาวะที่ทำให้รูปคลื่นทั้งแรงดันและกระแสของแหล่งจ่าย ผิดเพี้ยนไปว่าภาวะไม่เชิงเส้น ซึ่งเราสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ดังนี้คือ

2.3.1 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic devices)

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

2.3.2 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Ferromagnetic devices)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ หม้อแปลง ,เครื่องจกกลไฟฟ้าแบบหมุนและตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่ออุปกรณ์ประเภทนี้ได้รับแรงดันสูงเกินพิกัดจะทำให้กระแสแม่เหล็กสูงขึ้นจนทำให้แกนเหล็กของอุปกรณ์อิ่มตัวจึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นมา

2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ก (Arcing devices)

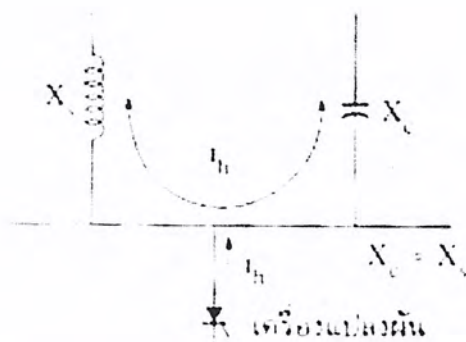
อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เต้าหลอม และเครื่องเชื่อมไฟฟ้า อุปกรณ์พวกนี้จะเกิดฮาร์มอนิกเป็นจำนวนมากเพราะมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์ก ลักษณะการเกิดฮาร์มอนิกประเภทนี้จะไม่สามารถคาดเดาได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของลำอาร์ก และนอกจากนี้อันตบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีทั้งที่เป็นฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็ม (Harmonic) และแบบไม่เป็นจำนวนเต็ม (Interharmonic)

2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า [2]

อุปกรณ์หรือเครื่องมือไฟฟ้าทุกชนิดจะถูกออกแบบมาให้ทำงานโดยได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์บริสุทธิ์หากแหล่งจ่ายมีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนอยู่ทำให้รูปคลื่นไซน์มีการผิดเพี้ยนก็จะทำให้เกิดผลกระทบจากฮาร์มอนิกขึ้นกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่รับปริมาณฮาร์มอนิกเข้าไปซึ่งมีดังต่อไปนี้

2.4.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุหรือคาร์ปาซิเตอร์ที่ต่อเข้าไปในระบบส่วนมากจะใช้ในการแก้ไขหรือปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์และแรงดันให้ดีขึ้น แต่ถ้าหากระบบมีฮาร์มอนิกอยู่ด้วยจะทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อตัวเก็บประจุขนานกับระบบและเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

เมื่อพิจารณาภาระไม่เชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งถ้าหากเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นจะทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลผ่านรีแอคแตนซ์ของระบบและตัวเก็บประจุ ซึ่งกระแสนี้จะไหลรวมกับกระแสฮาร์มอนิกของเครื่องแปลงผันด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบจึงทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนมาก ดังนั้นการเลือกขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องคำนึงถึงการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานด้วย

2.4.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์

กระแสที่มีความผิดเพี้ยนหรือกระแสที่มีฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดและต่อวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อฮาร์มอนิกที่มีความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูลจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรด้วยความร้อน ในขณะที่ฟิวส์จะนำมาใช้สำหรับป้องกันกระแสเกินโดยจะตัดวงจรด้วยความร้อน ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ (Skin effect) ขึ้นที่ฟิวส์จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมมากขึ้นจนฟิวส์หลอมละลาย

2.4.3 ตัวนำ

การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในตัวนำไฟฟ้าเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนในสายตัวนำเพิ่มขึ้นซึ่งความร้อนนี้จะมากกว่ากรณีกระแสที่เป็นไซน์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะในระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งที่ความถี่หลักมูลถ้าระบบมีความสมดุลก็ไม่มีกระแสไหลในสายนิวทรัล แต่ถ้าในระบบมีแหล่งจ่ายไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นแหล่งผลิตฮาร์มอนิก จะทำให้มีกระแสไหลในสายนิวทรัล ซึ่งก็คือกระแสฮาร์มอนิกนั่นเองทำให้สายนิวทรัลมีกระแสสูงเกินที่ออกแบบที่มักจะให้สายนิวทรัลเล็กกว่าสายเมนประมาณ 1-2 เท่าซึ่งเป็นสาเหตุให้สายนิวทรัลร้อนมากกว่าปกติ

2.4.4 หลอดไฟฟ้า

เมื่อใช้งานหลอดไฟแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ด้วยแรงดันที่มีฮาร์มอนิกจะทำให้อายุการใช้งานของหลอดไส้สั้นลง เพราะไส้หลอดจะมีความไวต่อระดับแรงดันที่ใช้งานซึ่งถ้าหากแรงดันอาร์เอ็มเอสมีค่าสูงเกินเนื่องจากฮาร์มอนิกปะปนอยู่ในรูปคลื่นแรงดันหรือแรงดันมีความผิดเพี้ยนก็จะส่งผลกระทบต่อไส้หลอดเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานลดลง

2.4.5 รีเลย์ป้องกัน

รูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกจะมีผลต่อสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน คือทำให้รีเลย์ทำงานไม่ถูกต้องหรือมีความผิดพลาดในการทำงานสูง เช่น หม้อแปลงกระแสจะเป็นตัวส่งสัญญาณความเพี้ยนของฮาร์มอนิกเข้าสู่รีเลย์ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รีเลย์ส่งตัดวงจรผิดพลาดไป

2.4.6 เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุน

เมื่อจ่ายแรงดันที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ให้กับเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหมุนจะเป็นสาเหตุให้ความร้อนสูงเกิน ,เกิดการ Pulsation Torque ขึ้นและกำลังสูญเสียในเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งความผิดเพี้ยนของแรงดันทำให้โรเตอร์เกิดความร้อนสูงมากเกินเป็นสาเหตุที่ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องกลไฟฟ้าสั้นลง ในขณะที่การสั่นของแรงบิดเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กที่มีความถี่หลักมูลในช่องว่างอากาศกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกในโรเตอร์

2.4.7 หม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่มีต่อหม้อแปลง คือ มีการเพิ่มความร้อนในรูปของกำลังสูญเสียมากขึ้น เช่นกำลังสูญเสียของขดลวด ,กระแสไหลวนซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสการและกำลังสองของความถี่ และกำลังสูญเสีย Stray loss ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ซึ่งเมื่อหม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้นมากกว่าที่พิกัดก็จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง และนอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงกับคาร์ปาซิเตอร์ของระบบ

2.4.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

รูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การตรวจจับแรงดันเป็นศูนย์ (Zero crossing) ของความถี่หลักมูล เมื่อเกิดฮาร์มอนิกที่มีความถี่มากกว่าความถี่หลักมูลจะทำให้วงจรเหล่านี้ทำงานผิดพลาด หรือกรณีแหล่งจ่ายกำลังอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic power supplies) ที่ใช้ยอดคลื่นของแรงดันในการอัดประจุให้กับคาร์ปาซิเตอร์ในส่วนของการกรอง แต่ความถี่ของฮาร์มอนิก

และความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างแรงดันที่ความถี่หลักมูลและฮาร์โมนิกจะทำให้ยอดคลื่นสูงขึ้นหรือแบนราบ ด้วยเหตุนี้แหล่งจ่ายกำลังจึงมีแรงดันขาออกไม่คงที่หรือต่ำกว่าแรงดันที่ต้องการ

2.4.9 การรบกวนโทรศัพท์

สายโทรศัพท์ที่ติดตั้งใกล้กับสายไฟฟ้าจะมีโอกาสให้เกิดการรบกวนระบบการสื่อสารได้ ถ้าหากสายไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วย เนื่องจากความถี่ฮาร์โมนิกอันดับสูงๆที่มากับสายไฟฟ้าจะมีความไวต่อการได้ยินและตอบสนองต่อสัญญาณโทรศัพท์

2.5 มาตรฐานฮาร์โมนิก

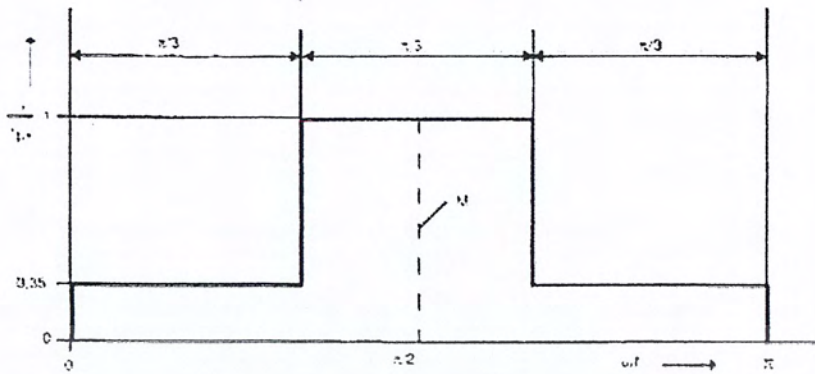
ปัจจุบันปัญหาฮาร์โมนิกเป็นปัญหาที่การวิจัยกันอย่างต่อเนื่องเพราะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อระบบมีฮาร์โมนิกในปริมาณที่สูงซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้ในปัจจุบันจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมปริมาณฮาร์โมนิกให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ IEEE 519-1992 [11] และ IEC 61000-3-2 [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 ฉบับภาษาอังกฤษเป็นหลักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้เกี่ยวข้องกับขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบจ่ายไฟฟ้าสาธารณะ โดยกำหนดขีดจำกัดของส่วนประกอบฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าเข้าซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยบริภัณฑ์ที่ถูกทดสอบภายใต้สภาวะที่ระบุในมาตรฐานนี้ใช้ได้กับบริภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส และประสงค์ให้ต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสาธารณะ ในมาตรฐานได้แบ่งระดับของภาวะในการพิจารณาเพื่อจำกัดฮาร์โมนิกดังต่อไปนี้

- Class A : อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลหรืออุปกรณ์อื่นๆที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้
- Class B : อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแบบพกพาได้และมีลักษณะใกล้เคียง เช่น อุปกรณ์ในการเชื่อม
- Class C : อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทให้แสงสว่างรวมทั้งตัวควบคุมการปรับแสงสว่าง
- Class D : อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำให้รูปร่างกระแสผิดเพี้ยนไปเป็นพิเศษ (Special Wave shape) ดังรูปที่ 2.4 และกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นกระแสสำหรับการพิจารณาของ Class D

โดยในปริภูมิพหุนามนี้ได้เลือกใช้มาตรฐานฮาร์โมนิก มอก. 1448-2544 Class A ซึ่งสามารถพิจารณาค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิกได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน Class A

ฮาร์โมนิกลำดับที่		ฮาร์โมนิกลำดับคู่	
อันดับฮาร์โมนิก	ค่ากระแสสูงสุด (A)	อันดับฮาร์โมนิก	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		
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 (15/n)$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 มาตรฐาน IEEE 519-1992

มาตรฐานฮาร์โมนิก IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power system [11] เป็นฉบับที่ปรับปรุงมาจาก IEEE 519-1981 โดยมีส่วนสำคัญที่เพิ่มขึ้นมาคือข้อกำหนดของปริมาณฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้แต่ละราย (Individual Consumer) จะสามารถจ่ายกลับคืนสู่ระบบได้ที่จุดต่อร่วมของทั้งสองฝ่าย ซึ่งมีขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกและแรงดันฮาร์โมนิกที่จุดต่อร่วมระหว่างแหล่งจ่ายและภาระอื่นๆหรืออาจใช้ในความหมายอื่นๆ เช่น จุดที่มีการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณฮาร์โมนิกกับจุดอื่นๆในระบบที่ต้องการพิจารณาปริมาณฮาร์โมนิกหรือในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม นิยมใช้ในความหมายของจุดต่อร่วมระหว่างภาระแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับภาระชนิดอื่น ทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สถานะคงตัว (Steady State) [2] ปริมาณความผิดเพี้ยนรวมเนื่องจากฮาร์โมนิกตามมาตรฐานฮาร์โมนิก IEEE 519-1992 ได้กำหนดขีดจำกัด 2 ข้อ คือ ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสและขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันที่จุด PCC

2.5.2.1 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแส (Current Distortion Limits)

เป็นการใช้ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบของการไฟฟ้าได้ โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแส คือ เปอร์เซนต์ความต้องการความผิดเพี้ยนรวม (Total Demand Distortion: TDD) ดังสมการที่ 2.18 ซึ่งหมายถึงค่าเปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกต่อความต้องการกระแสของภาระสูงสุด (ในช่วง เวลา 15 หรือ 30 นาที) [2] โดยที่ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกที่ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายที่ 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 เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่ได้เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนเกินขีดจำกัดที่ระบุในตารางที่ 2.3 ซึ่งขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันตามตารางนี้จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้อง และควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่หากการทำงานที่มีความยาวนานกว่านี้ขีดจำกัดสามารถเพิ่มถึง 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน (Total Harmonic Voltage Distortion : THD_v) ซึ่งจะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่มีความถี่หลักมูล หาได้จากสมการที่ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.6.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้จะยุบและพองตัวตามการเปลี่ยนแปลงของรูคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่เคลื่อนที่ไปตัดกับตัวนำในโรเตอร์เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไปสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์นี้จะไปดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางเดียวกันโดยที่ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed : ω_s , N_s) หรือที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$S = \frac{2\omega}{P} \quad \text{rad/s.} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.20 สามารถเขียนให้อยู่ในหน่วยของรอบต่อนาที (rpm) จะได้ดังสมการที่ 2.21

$$N_s = 60 \cdot \frac{s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad \text{rpm} \quad (2.21)$$

N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

S = ความเร็วซิงโครนัส (rad / s)

ω = ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (rad / s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- f = ความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

สลิป (Slip, S) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความเร็วสลิป (ω_{st}) ต่อความเร็วซิงโครนัส (ω_s) เขียนดังสมการที่ 2.22 และ 2.23

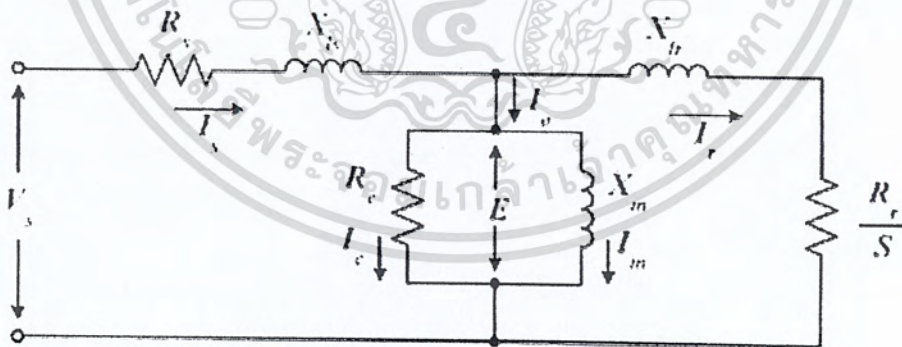
$$\omega_{st} = \omega_s - \omega_r \quad (2.22)$$

$$S = \frac{\omega_{st}}{\omega_s} \quad (2.23)$$

- S = สลิป
 ω_{st} = ความเร็วสลิป (rad / s)
 ω_r = ความเร็วโรเตอร์ (rad / s)

2.6.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นจะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงแต่จะต่างกันตรงขดลวดทุติยภูมิ กล่าวคือ ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่แต่กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นขดลวดทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ซึ่งก็คือโรเตอร์ของมอเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.5 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

- V_s = ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส
 R_s = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
 R_r = ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_c	=	ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
X_m	=	ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก
X_{ls}	=	ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
X_{lr}	=	ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
I_s	=	กระแสสเตเตอร์
I_r	=	กระแสโรเตอร์
I_c	=	กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
I_m	=	กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

2.6.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลที่จะได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้าสูญเสีย $P_{in} = 3V_s I_s \cos \phi$ (2.24)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ $P_{in} = 3I_s^2 R_s$ (2.25)

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) $P_g = 3I_r^2 \frac{R_s}{S}$ (2.26)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ $P_{lr} = 3I_r^2 R_r$ (2.27)

กำลังไฟฟ้าทางกล $P_{em} = P_g - P_{lr}$
 $= \frac{3I_r^2 R_r (1 - S)}{S}$ (2.28)

กำลังไฟฟ้าที่เพลลา $P_{em} = P_{em} - P_{fw}$ (2.29)

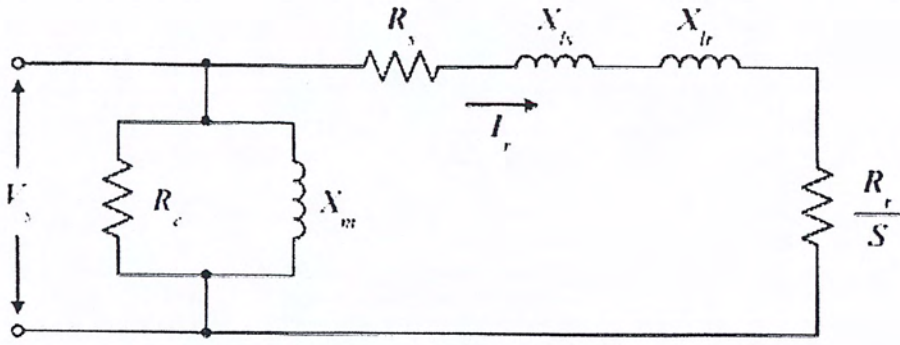
P_{fw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม

แรงบิดของมอเตอร์ $T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3I_r^2 R_r}{S\omega_s}$ (2.30)

ซึ่ง $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P}$ (2.31)

แทนค่าสมการที่ 2.30 ลงในสมการที่ 2.31 จะได้

แรงบิดของมอเตอร์ $T_{em} = \frac{3I_r^2 R_r P}{4\pi f S}$ (2.32)



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.5 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งค่ากระแส I_r สามารถหาได้ดังนี้

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (2.33)$$

เมื่อหาค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดหาได้จากสมการที่ 3.13

$$S_m = \frac{R_s}{\sqrt{R_r^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (2.34)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (R_s, X_{ls}) ซึ่งไม่มีผลต่อกำลังทางด้านเออร์ทพุทของมอเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$I_r = \frac{SV_s}{\sqrt{R_r^2 + S^2 X_{lr}^2}} \quad (2.35)$$

$$S_m = \frac{R_r}{X_{lr}^2} \quad (2.36)$$

แทนค่าสมการที่ 2.35 และ 2.36 ลงในสมการที่ 3.32 จะได้สามารถแรงบิดสูงสุดดังสมการ 2.37

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi f X_{lr}} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$T_m = \frac{3P(V_s/f)^2}{16\pi^2 L_{lr}} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.38 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อ อัตราส่วน $\left(\frac{V_s}{f}\right)$ มีค่าคงที่ด้วย

2.7 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปที่ 2.5 ฟลักซ์ในช่องอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดขึ้นจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ (B) จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนารอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage : E) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่ายและเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.39)$$

e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s = จำนวนรอบของขดลวด

ϕ = ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_m \sin \omega t$ (2.40)

แทนค่าสมการที่ 2.40 ลงในสมการที่ 2.39 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2.41

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (2.41)$$

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

$$E = 4.44 N_s \phi f k_w \quad (2.42)$$

k_w = Winding factor

จากสมการที่ 2.41 จะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การปรับเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่แตกต่างกันมากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ในการปรับความเร็วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่ละเอียดมากกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่ทั้งนี้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย ซึ่งจากรูปที่ 2.5 สมการที่ 2.38 และ 2.42 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s , E , Φ และ T ดังนี้

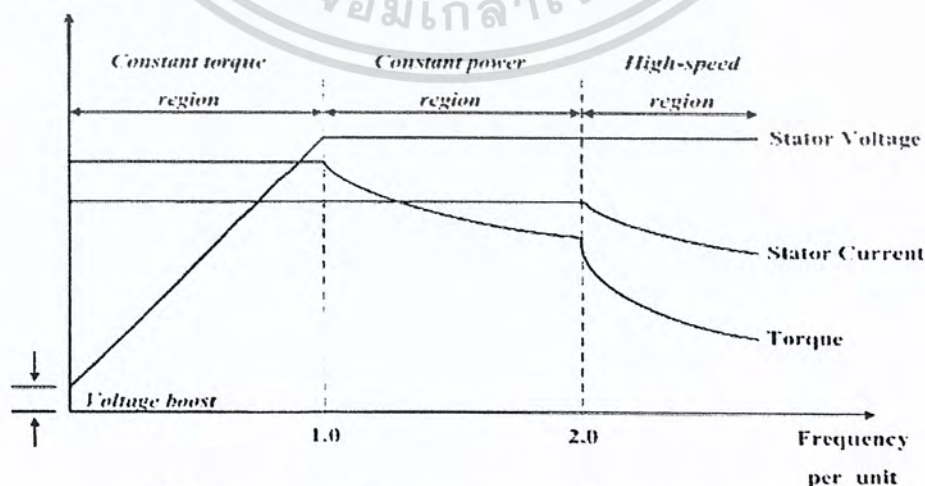
$$V_s \approx E \tag{2.43}$$

$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2, \left(\frac{E}{f}\right)^2 \tag{2.44}$$

$$\Phi \propto E/f \tag{2.45}$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V_s/f), (E/f) มีค่าคงที่ จึงจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ตั้งแต่ที่ระดับความถี่ต่ำถึงความถี่ที่พิกัด เราเรียกการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบนี้ว่า “การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage Variable Frequency : VVVF)” ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสามารถแบ่งช่วงของการควบคุมความเร็วได้เป็น 3 ช่วงดังต่อไปนี้

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



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด กระแสของมอเตอร์กับความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจะต้องทำให้ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าช่วงดังกล่าวขนาดของแรงดันสเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่งทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์และช่วงการทำงานนี้ค่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

2.7.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัดได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่มีค่าลดลง จะเป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงด้วยและขีดจำกัดกระแสโรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่แรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 2.46

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} \cdot T_{rated} \quad (2.46)$$

$$P_{em,max} = \omega_r \cdot T_{em,max} \quad (2.47)$$

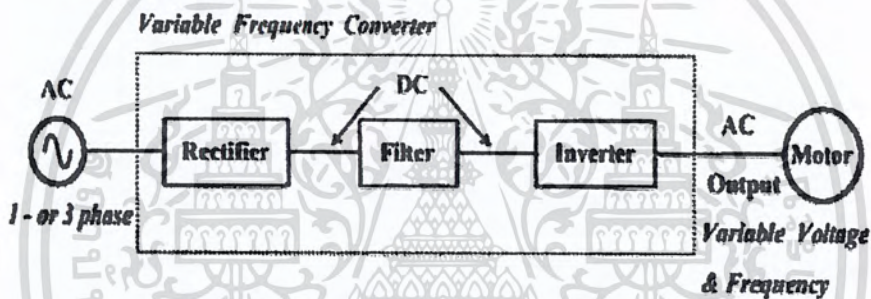
สมการที่ 2.47 จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกล ซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เราเรียกช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังคงที่ (Constant Power Region)

2.7.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตที่มีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่ความถี่ที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $\frac{1}{f^2}$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสของมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่นั้นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

2.8 ชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ระบบเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งอาจจะเป็น 1 เฟส หรือ 3 เฟส จ่ายไฟฟ้าเข้าเครื่องปรับความเร็วรอบโดยผ่านการแปลงผันสัญญาณจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง เราเรียกวางจรในส่วนนี้ว่าวงจรแปลงผัน แต่สัญญาณไฟตรงที่ได้จากวงจรดังกล่าวยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณ (Ripple) จึงต้องมีการกรองสัญญาณที่มีการกระเพื่อมให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้น เรียกวางจรส่วนนี้ว่าวงจรกรอง (Filter) หลังจากนั้นจะเป็นหน้าที่ของวงจรที่แปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในส่วนนี้จะมีหลายเทคนิคที่ใช้ควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และในส่วนสุดท้ายจะเป็นมอเตอร์ที่ถูกควบคุม



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ

เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะต้องมีความสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ ดังนั้นเครื่องปรับความเร็วรอบที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ ดังต่อไปนี้

- สามารถปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
- สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
- สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดที่ต้องการ

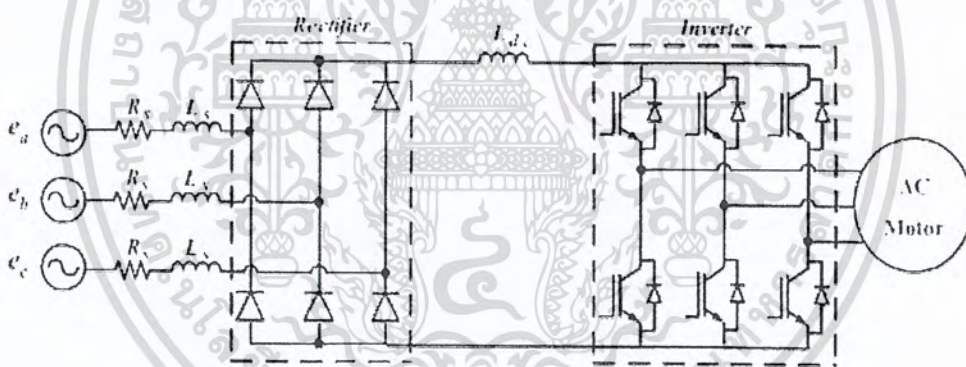
ภายในโครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบในส่วนของกรองและการแปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับ ซึ่งสามารถจำแนก ออกเป็น 2 ประเภท คือ

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

โดยการบอกชนิดของเครื่องปรับความเร็วรอบก็จะบอกตามประเภทของอินเวอร์เตอร์
ทั้ง 2 แบบจะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน
เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

2.8.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสแสดงดังรูปที่ 2.9 จะประกอบด้วย
ไดโอดแบบ 6 พัลซ์ ทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรงที่มีการกระเพื่อมและมีอินดัก
เตอร์ต่ออนุกรมใช้ในการกรองสัญญาณไฟตรงให้เรียบขึ้นและในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะใช้ไอจีบี
บีเพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ รูปคลื่น
กระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีบี
เช่น เทคนิค 6 Step หรือ PWM ซึ่งข้อดีของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวก็คือรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต
จะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์และมีการเกิดสไปค์ขึ้นเนื่องจากการคอมมิวเตชัน และนอกจากนี้ยังมี
ข้อจำกัดในเรื่องของช่วงความถี่เอาต์พุตที่ปรับค่าได้ในช่วงแคบๆและที่สำคัญจะต้องทำงานใน
สภาวะที่มีภาระเท่านั้นโดยส่วนมากแล้วอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะใช้ในการควบคุม
มอเตอร์ขนาดแรงม้าสูงๆ

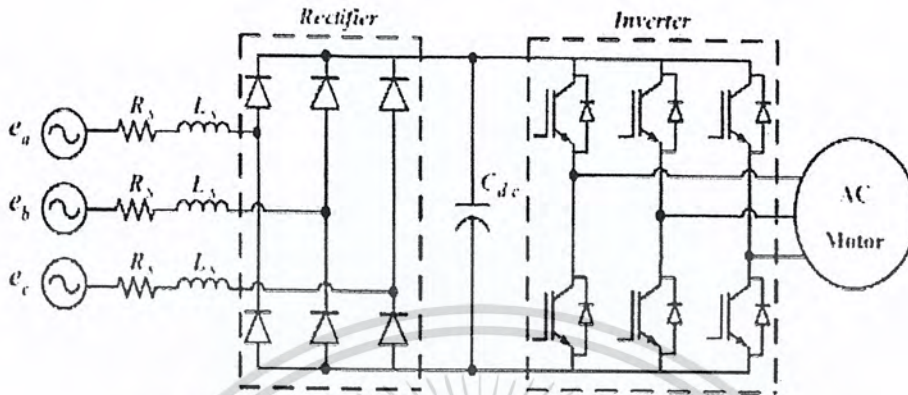


รูปที่ 2.9 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

2.8.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

โครงสร้างทางด้านวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะคล้ายๆ
กับแบบแหล่งจ่ายกระแส แต่จะแตกต่างกันตรงในส่วนของการกรองสัญญาณไฟตรง กล่าวคือ
อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะคาร์ปาคิเตอร์ที่มีค่าความจุสูงๆมาใช้ในการกรองสัญญาณ
ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการะ และโดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์แบบ
นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6 Step Inverter และ PWM Inverter ข้อดีของอินเวอร์เตอร์
แบบแหล่งจ่ายแรงดัน คือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย และปรับความถี่ได้ในย่าน
กว้างๆ ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของสวิตช์ในกึ่งเดี่ยวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่ง

ส่วนใหญ่จะแก้ไขโดยใช้วงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เพื่อป้องกันปัญหา ดังกล่าว และลักษณะของวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter มากกว่าแบบ 6 Step ทั้งนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบบ 6 Step จะมีปัญหาในเรื่องฮาร์มอนิกอันดับต่ำที่เกิดขึ้นทั้งจากรูปคลื่นแรงดันและกระแสนั่นเอง ในขณะที่อินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ และในลำดับต่อไปในปริิญาานิพนธ์นี้ขอกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter ทั้งนี้เพราะในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM Inverter

2.9 เทคนิคการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบ

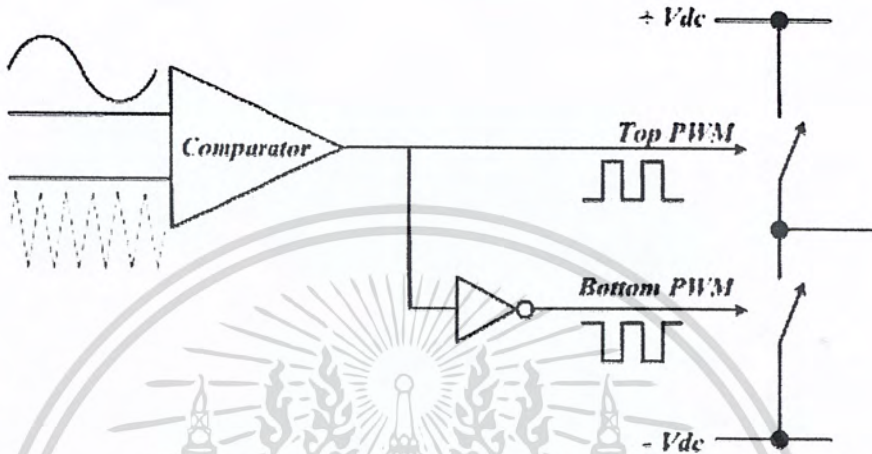
ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงชนิดและประเภทของเครื่องปรับความเร็วรอบแบบต่างๆ และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมเปิด-ปิด สวิตซ์ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ซึ่งมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกันและแต่ละเทคนิคก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่ในปริิญาานิพนธ์นี้จะกล่าวเพียงเทคนิค Sinusoidal Pulse wide Modulation (SPWM)

2.9.1 เทคนิค Sinusoidal Pulse wide Modulation (SPWM)

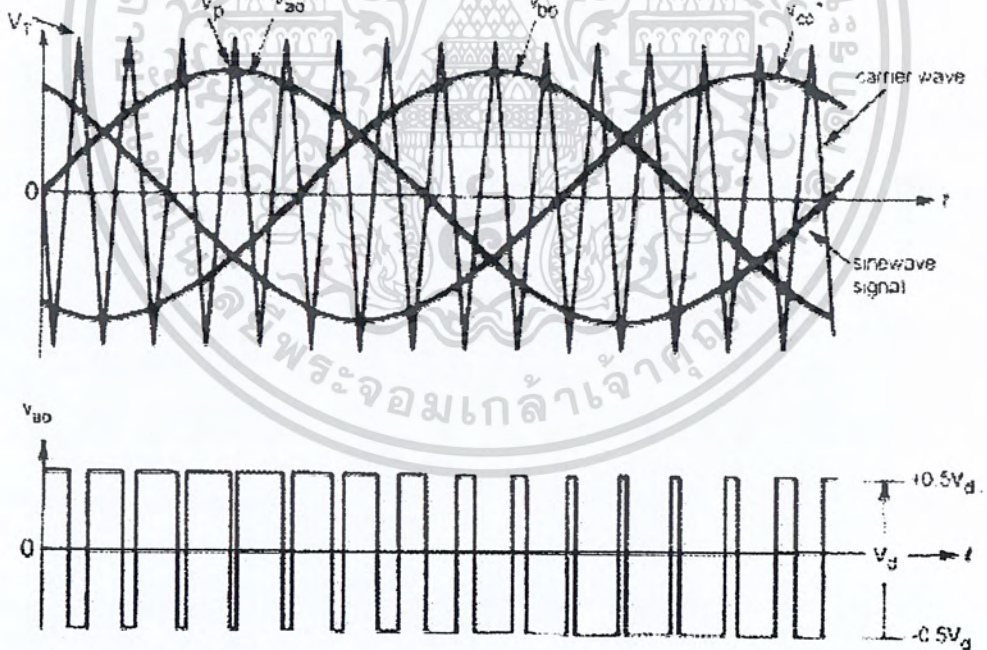
เทคนิคนี้จะใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ต้องการควบคุมความเร็วมาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เรียกว่า สัญญาณพาหะ ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะเกิดจุดตัดกันของสัญญาณทั้งสองและจุดตัดนี้จะทำให้ได้สัญญาณที่นำไปใช้ในการควบคุมสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างหลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ 1 กิ่ง และเมื่อจะนำไปทำการควบคุมทั้ง 3 กิ่งจะต้องใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงอีก 2 สัญญาณที่มีเฟสล่าหลังเฟสแรก 120 และ 240 องศาทางไฟฟ้า ตามลำดับ ในขณะที่สัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะใช้สัญญาณเดียวกัน



รูปที่ 2.11 หลักการพื้นฐานของเทคนิค SPWM



รูปที่ 2.12 หลักการพื้นฐานของเทคนิค PWM สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปริญาณิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้งานจริงในทางอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาดพิกัด 5.5 kW. แรงดันอินพุท 380-400 V. กระแส 12 A. ซึ่งใช้เทคนิคแบบ SPWM มาใช้ในการควบคุมการสวิตซ์ในส่วนของวงจรมอเตอร์โดยเครื่องปรับความเร็วรอบดังกล่าวจะใช้ในการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 kW. แรงดัน 380/660 V. กระแส 15.6/8.98 A. 4 Pole, 50 Hz และความเร็วนรอบที่พิกัด 1,440 rpm.

2.10 สรุป

ในบทนี้มีเนื้อหาแบ่งเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ ส่วนแรกคือพื้นฐานฮาร์มอนิก กล่าวถึงลักษณะของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบและสมการที่ใช้ในการหาค่าต่างๆ เมื่อรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก ได้แก่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม ,กำลังไฟฟ้าและเพาเวอร์แฟคเตอร์ เป็นต้น และนอกจากนี้ยังกล่าวถึงประเภทของฮาร์มอนิกและผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนที่ 2 กล่าวถึง หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่างๆ โดยใช้เครื่องปรับความเร็วรอบ รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมเครื่องปรับความเร็วรอบซึ่งในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคแบบ SPWM ซึ่งจะใช้ในการสร้างระบบจำลองโดยการกล่าวถึงในบทต่อไป

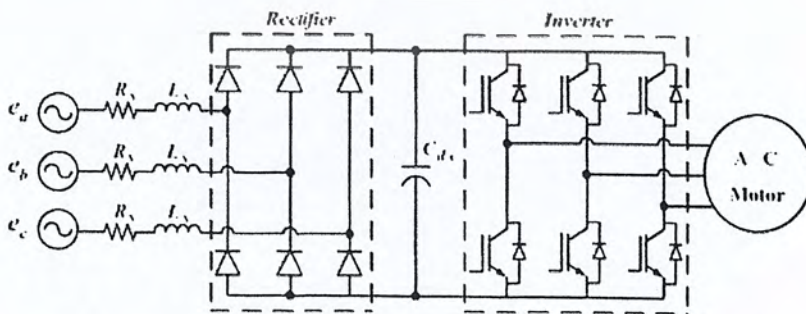
บทที่ 3

หลักการทํางานและการจําลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงฮาร์มอนิกที่เกิดจากภาระที่ไม่เชิงเส้นและทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส รวมถึงชนิดและเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส แต่ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทํางานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ไดโอดในการกรองแรงดันและต่อแบบ 6 พัลส์ โดยจะกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทั้งจากกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล รวมถึงการติดตั้งใช้คําด้านหน้า ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส และที่ DC Link โดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีภาระที่ระดับต่าง ๆ

3.1 หลักการทํางานของเครื่องปรับความเร็วรอบ [1]

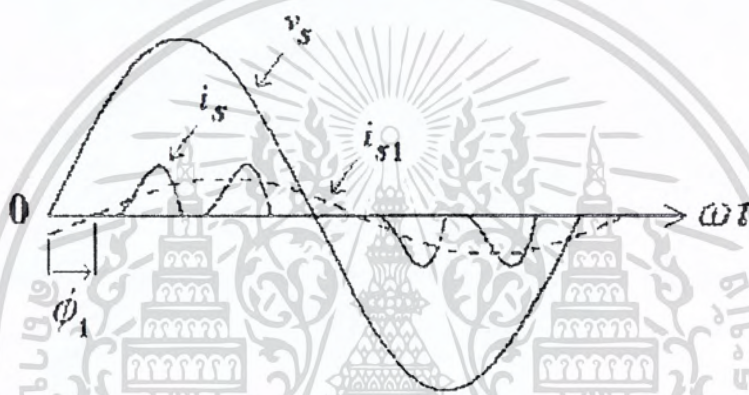
จากโครงสร้างของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายพลังงานให้กับระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส โดยผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ 3 เฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุทเป็นไฟตรง แต่สัญญาณไฟตรงที่ได้ยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณจึงต้องกรองสัญญาณดังกล่าวให้เป็นไฟตรงโดยใช้คาร์ปาซิเตอร์ และสัญญาณที่ได้จะเป็นแรงดันไฟตรงให้เป็นสัญญาณไฟสลับโดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยที่เทคนิคที่ใช้ควบคุมให้สวิตช์ดังกล่าวทํางานนั้นจะมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน แต่ในปริญญาณพนธ์นี้ใช้เทคนิค SPWM จะทำให้ได้สัญญาณไฟสลับที่สามารถควบคุมความถี่ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนําเพื่อใช้ในการขับภาระแบบต่าง ๆ



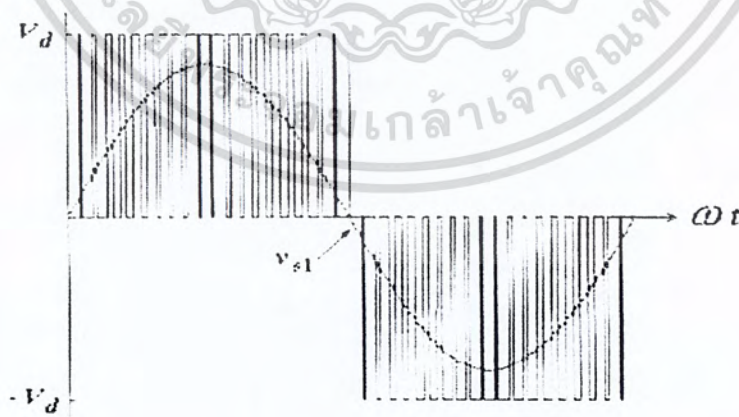
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนํา 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานของ ASD จะพบว่าระบบ ASD จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกออกมา 2 ส่วน ได้แก่ ในส่วนของแหล่งจ่ายอินพุตคือกระแสอินพุตที่จ่ายเข้าไปในระบบจะไม่ใช้สัญญาณไซน์ เนื่องจากไดโอดที่เรกติฟายเออร์และคาร์ปาซิเตอร์จะเป็นตัวกำหนดให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์โดยรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตแสดงดังรูปที่ 3.2 ในขณะที่ฮาร์มอนิกในส่วนของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเกิดจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณแรงดันที่ได้จะประกอบด้วยแรงดันที่มีความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิก แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแรงดันโวลท์ที่จ่ายเข้าไปยังมอเตอร์นี้จะทำให้การสูญเสียที่เกิดจากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นจากกรณีแรงดันเป็นไซน์จากรูปที่ 3.2 กระแสอินพุต (i_s) เป็นรูปกระแสต่อเฟสซึ่งเกิดจากกระแสไหลเข้าแต่ละไซเคิล ไดโอดจะมีการนำกระแส 2 ครั้ง



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของ ASD มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันของ ASD ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นกระแสอินพุทจากรูปที่ 3.2 นั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่ความถี่และองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ของวงจรเรกติไฟเออร์ดังสมการที่ 2.17

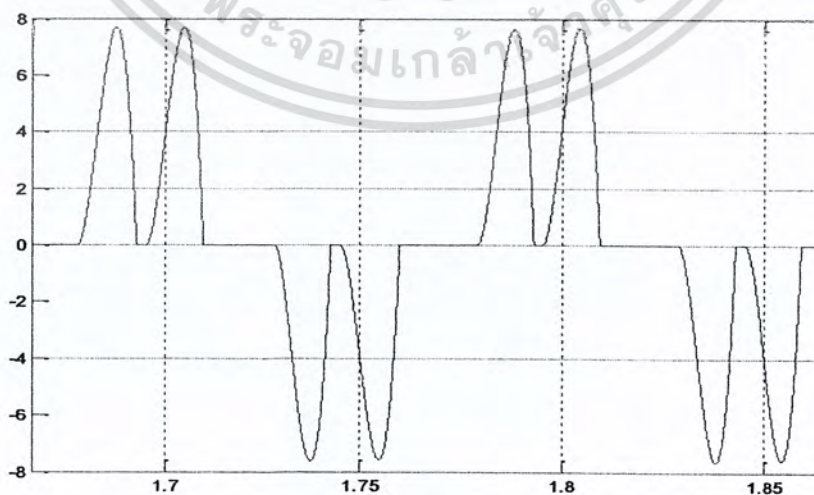
ดังนั้นจากโครงสร้างของวงจรเรกติไฟเออร์ดังรูปที่ 3.1 และรูปคลื่นกระแสอินพุทดังรูปที่ 3.2 องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ที่ได้ออกมาสู่ระบบได้แก่ อันดับที่ 5, 7, 11, 13, ... เป็นต้น ในขณะที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 และนอกจากนี้ค่า %THDi กระแสอินพุทที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 ในขณะที่ค่า %THDv ของแรงดันจากรูปที่ 3.3 คำนวณได้จากสมการที่ 2.19

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (3.1)$$

3.1.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

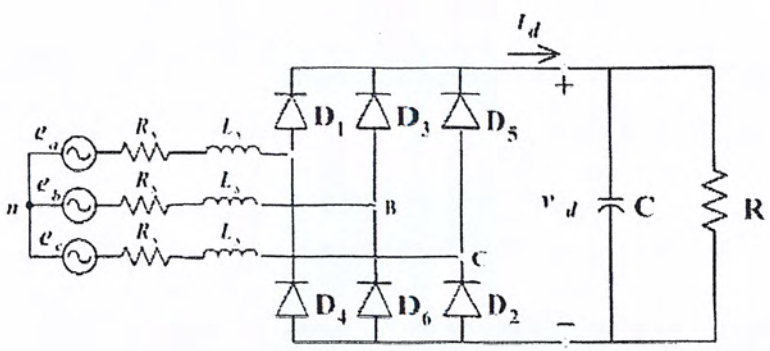
เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุท 3 เฟส อยู่ในสภาวะสมดุลรูปคลื่นกระแสอินพุท ASD แสดงดังรูปที่ 3.4 และองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ จะเป็นไปตามสมการที่ 3.1 ดังนั้นจากโครงสร้างของ ASD กรณีดังกล่าวอันดับฮาร์มอนิกที่ได้ออกมาสู่ระบบได้แก่ 5, 7, 11, 13, ... เป็นต้น ในขณะที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์คำนวณได้จากสมการ 2.15 และ 2.16

จากรูปที่ 3.4 จะพบว่าลักษณะของรูปคลื่นกระแสอินพุทต่อเฟสในไซเคิลบวก จะมีการนำกระแส 2 ครั้ง และไซเคิลลบก็จะมีการนำกระแสอีก 2 ครั้ง แต่ทั้งนี้กระแสเฟสดังกล่าวจะมีช่วงการทำงานทั้งหมด 6 ช่วงเวลาซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไปโดยกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของวงจรไดโอดแบบ 6 พัลส์, คาร์ปาคิเตอร์กรองแรงดันและภาวะ เพื่อเป็นตัวอย่างที่ง่ายในการวิเคราะห์ถึงการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุท

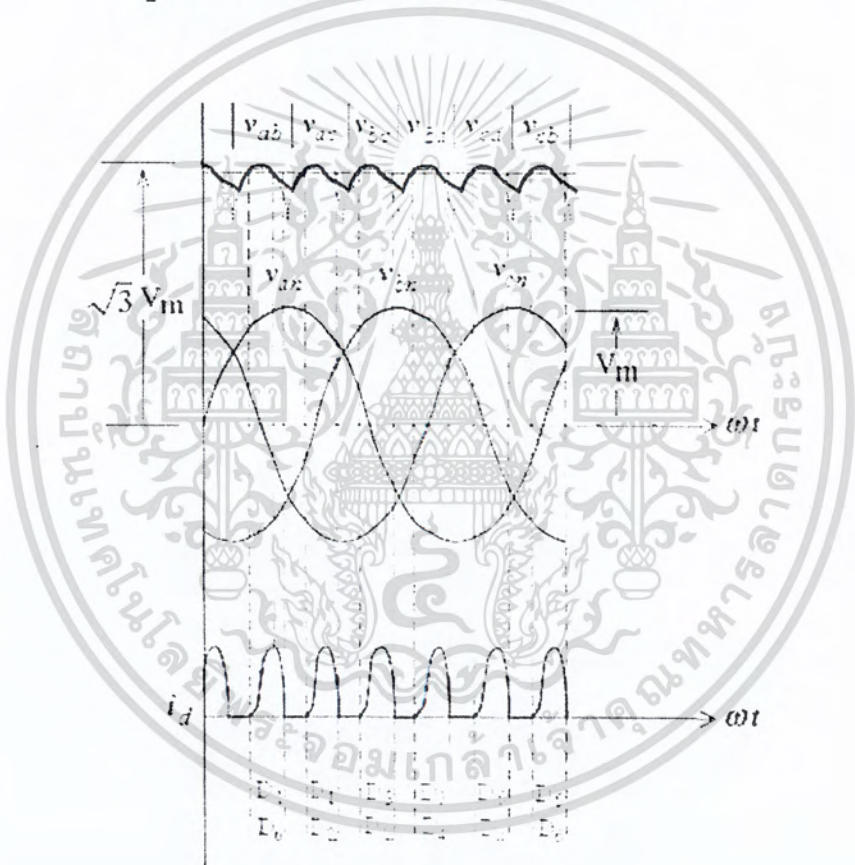


รูปที่ 3.4 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์



รูปที่ 3.6 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง

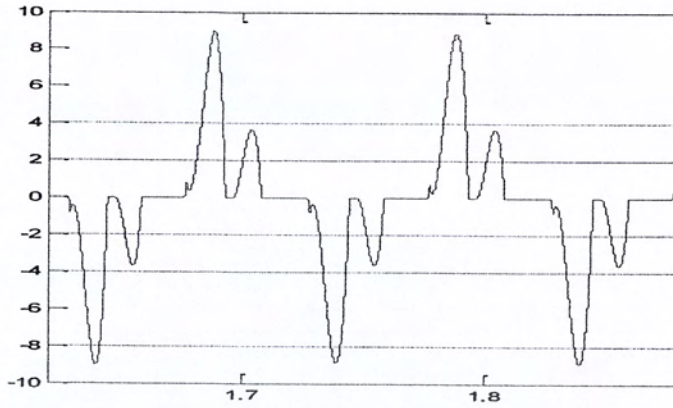
จากรูปที่ 3.6 จะแสดงโหมดการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งจะพบว่าในคาบของกระแสใน 1 ไซเคิลจะมีช่วงการทำงานอยู่ทั้งหมด 6 สถานะด้วยกัน เนื่องจากกระแสที่ไหลเข้าไปยังวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟสแต่ละช่วงเวลานั้นจะมีไดโอดนำกระแสเป็นคู่เสมอเพราะจะได้รับฟอว์เวอร์สไปอัสในขณะที่ไดโอดที่เหลือจะได้รับรีเวอร์สไปอัส เช่นในช่วงที่ 1 แรงดันที่มีศักย์บวกมากที่สุดได้แก่เฟส A ศักย์ลบมากที่สุดได้แก่เฟส B ดังนั้นช่วงนี้ไดโอด D1D6 จะนำกระแสจึงทำให้กระแสไหลจากเฟส A ไป เฟส B และได้รูปคลื่นกระแส DC 1 รูปคลื่น ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

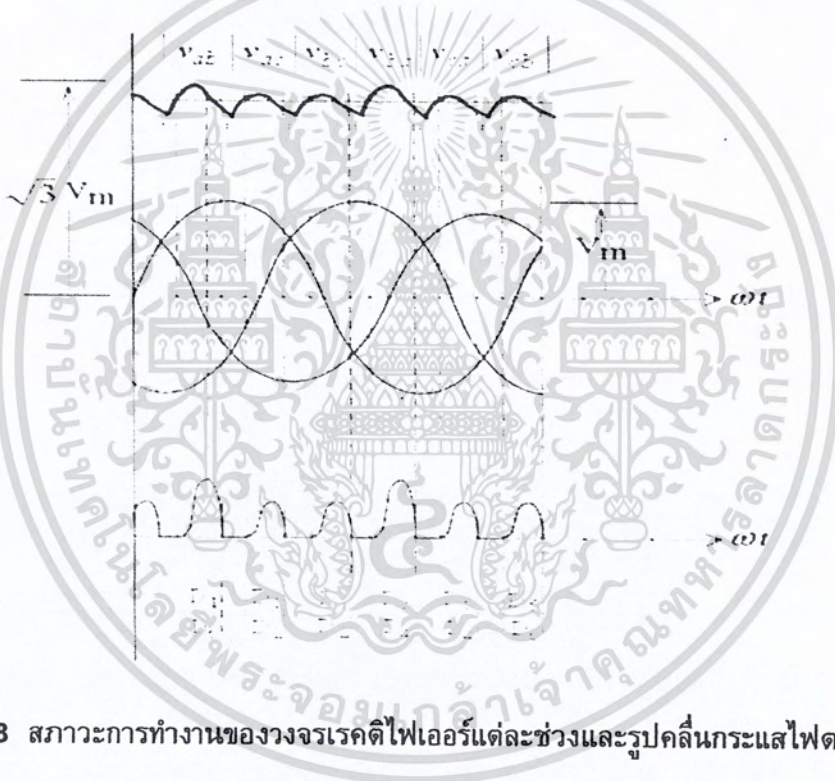
ต่อมาเฟส A ยังคงที่มีศักย์บวกมากที่สุดในขณะที่ศักย์ลบมากที่สุดเปลี่ยนเป็นเฟส C แทน ดังนั้นช่วงนี้ไดโอด D1D2 จะนำกระแสจึงทำให้กระแสไหลจากเฟส A ไป เฟส C และได้รูปคลื่นกระแส DC ลำดับต่อมา ดังนั้นลำดับการนำกระแสของไดโอดแต่ละคู่จะสัมพันธ์กับลำดับเฟสดังนี้ AB , AC, BC , BA, CA, CB และจะวนรอบลำดับเฟสต่อไป แต่ถ้าพิจารณากระแสไหลกลับอินพุตเฟส A จะได้ดังนี้คือ เมื่อเริ่มลำดับเฟส AB และ AC จะทำให้ได้รูปคลื่นเหมือนไฟตรงจำนวน 2 รูปคลื่น และลำดับเฟสต่อมา BC จะไม่มีกระแสไหลในเฟส A และลำดับต่อมาก็คือ BA และ CA ก็จะทำให้ได้รูปคลื่นเหมือนไฟตรงจำนวน 2 รูปคลื่น แต่ทิศทางจะเป็นลบ จึงทำให้ได้รูปคลื่นกระแสอินพุตเฟส A ดังรูปที่ 3.4

3.1.2 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล [7]

เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอินพุตอยู่ในสภาวะไม่สมดุล รูปคลื่นกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส จะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะพบว่าแอมพลิจูดของกระแสทั้ง 2 รูปคลื่นในแต่ละไซเคิลจะมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ที่ฉีดออกมาจะไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.17 แต่จะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกกลุ่มที่หารด้วย 3 ลงตัว (Triplen harmonic) ออกมาด้วย เช่น 3 ,6 ,9 เป็นต้นและนอกจากนี้ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกเลขคู่ด้วยแต่มีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่นำมาพิจารณา โหมดการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์ในกรณีดังกล่าวจะยังคงเหมือนกับกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าต่ำหรือสูงกว่าเฟสอื่นๆ ที่เหลือจะทำให้แรงดันไฟตรงมีการกระเพื่อม จึงทำให้ช่วงเวลาของกระแสอินพุตไหลผ่านไดโอดแต่ละช่วงนานหรือสั้นแล้วแต่กรณีแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุลและลำดับเฟสทำให้แอมพลิจูดทั้ง 2 รูปคลื่นของรูปคลื่นกระแสเฟสในไซเคิลบวกหรือลบไม่เท่ากัน จากรูป 3.8 แสดงโหมดการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์ กรณีแรงดันเฟส C ต่ำกว่าแรงดันเฟส A ,B จะพบว่าแอมพลิจูดของกระแสไฟตรงที่ได้ในแต่ละช่วงการนำกระแสของไดโอดจะสูงและต่ำไม่เท่ากันจึงทำให้กระแสอินพุตแต่ละเฟสแตกต่างกันด้วย และส่งผลต่อค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบลดต่ำลง จากกรณีที่แรงดันแหล่ง จ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดัน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 [7]



รูปที่ 3.7 กระแสอินพุทเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล



รูปที่ 3.8 สภาวะการทำงานของวงจรเรกติไฟเออร์แต่ละช่วงและรูปคลื่นกระแสไฟตรง

$$\%PVUR = \frac{\text{MAX}\{|V_a - V_{\text{avg}}|, |V_b - V_{\text{avg}}|, |V_c - V_{\text{avg}}|\}}{V_{\text{avg}}} \quad (3.2)$$

%PVUR = เปอร์เซนต์แรงดันไม่สมดุลต่อเฟส

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

V_a, V_b, V_c = แรงดันแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัตินั้นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสจะต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 1 - 2 โวลต์) ในปริณญาณินพจน์นี้ได้ทำการทดสอบการไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่าย 6 สภาวะเพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่แหล่งจ่ายสมดุล โดยมีค่าตามตารางที่ 3.1

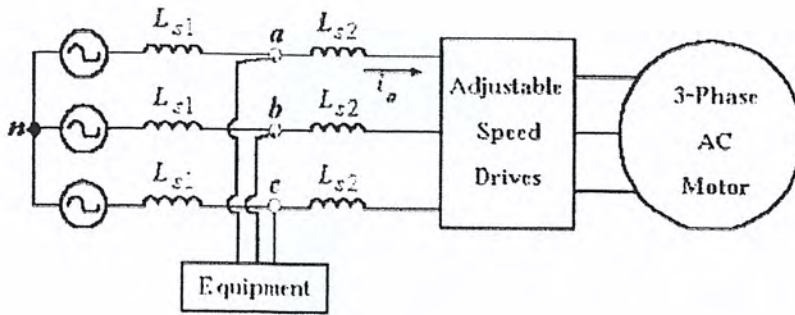
ตารางที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้าในสภาวะต่างที่ใช้ในการทดสอบกรณีไม่สมดุล 1 เฟส [5]

%PVUR	Va	Vb	Vc	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 $\pm 5\%$ จึงเลือกการทดสอบกรณีแรงดันไม่สมดุลที่ระดับสูงสุดที่ $\pm 5\%$

3.2 การติดตั้งโช๊คด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบ (AC Choke) [4],[6]

จากรูปคลื่นกระแสอินพุทจะพบว่ารูปคลื่นจะอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องซึ่งค่า %THDi จะค่อนข้างสูง ระบบ ASD ที่จ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ค่า %THDi ขึ้นอยู่กับภาระของมอเตอร์ด้วย กล่าวคือเมื่อมอเตอร์มีภาระหนักค่า %THDi จะต่ำกว่าเมื่อมอเตอร์มีภาระเบา แต่ก็ยังมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูง ซึ่งจากคุณสมบัติของอินดักเตอร์นั้น จะทำให้กระแสไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดทำให้กระแสอินพุทมีความต่อเนื่องซึ่งเมื่อนำอินดักเตอร์ (โช๊ค) มาติดตั้งด้านหน้า ASD จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทมีความต่อเนื่องมากขึ้น ทำให้ค่า %THDi และกระแสฮาร์มอนิกลดลง และยังเป็น การปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ระบบให้สูงขึ้น โดยการติดตั้งโช๊ค L_{S2} ด้านหน้า ASD และดังรูปที่ 3.9 และ L_{S1} หมายถึง อินดักเตอร์ของแหล่งจ่ายและจุด a, b และ c หมายถึง จุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้ไฟรายอื่น ๆ



รูปที่ 3.9 การติดตั้งไอซ์ (L_{S2}) ด้านหน้า ASD

ในปริยญาณินพจน์นี้ได้ทำการศึกษาคณณที่ม่มีการติดตั้งไอซ์ด้านหน้า ASD โดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในส่วนของคุณภาพของรูปคลื่นกระแสอินพุท ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุท ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบและมาตรฐานฮาร์โมนิกโดยในการออกแบบไอซ์ที่จะทำการติดตั้งทางด้านหน้า ASD นั้นจะออกแบบโดยอ้างอิงจากค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล ทั้งจากการจำลองและการทดสอบในสภาวะที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะที่สมดุล ทั้งนี้จะพิจารณาถึงค่าอินดักแตนซ์ของไอซ์ที่เหมาะสมโดยทำการปรับค่าแรงดันตกคร่อมไอซ์ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของแรงดันไลน์ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 [1]

$$\omega L_{s1} I_{a1} \geq (\%V) \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

(%V) = ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมไอซ์

ω = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)

L_{s1} = อินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย

L_{s2} = ไอซ์ที่ติดตั้งด้านหน้า ASD

I_{a1} = กระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล

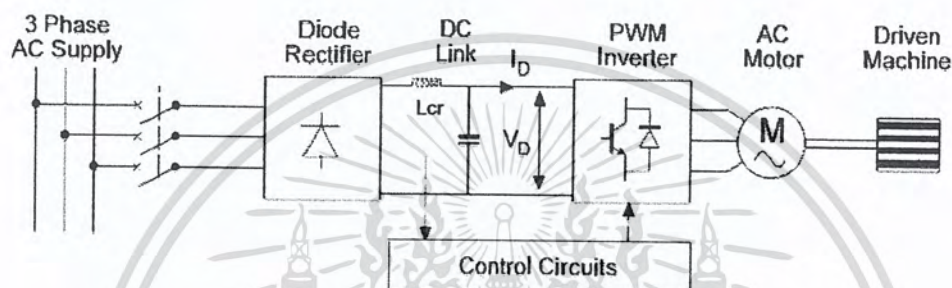
V_{LL} = แรงดันไลน์ ที่จุด PCC

จากสมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของไอซ์ อธิบายได้ดังนี้คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมไอซ์ (%V) หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของแรงดันแหล่งจ่ายต่อเฟสที่จุดต่อรวม ซึ่งกำหนดให้ตกคร่อมไอซ์ที่ความถี่หลักมูลโดยทำการจำลองค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมไอซ์ตั้งแต่ 1% ถึง 10% เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่า%THD, แล้วทำการทดลองที่ค่า 3% , 5% และ 7% เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุทที่ลดลง เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ กำลังไฟฟ้าอินพุทและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ในขณะที่ I_{a1} คือค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูลที่ยังไม่ได้มีการติดตั้งไอซ์ด้านหน้า ASD ซึ่งได้จากการทดสอบเมื่อมอเตอร์มีภาระสูงสุด ซึ่งในปริยญาณินพจน์นี้ได้เลือกทดสอบที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายภาระสูงสุดที่ 1400 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบจ่ายแก่โหลดและชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งค่ากระแสอินพุทที่ได้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของไอ้คที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ดังที่กล่าวไว้แล้ว โดยค่าอินดักแตนซ์ของไอ้คที่คำนวณได้จะแสดงในบทต่อไป

3.3 การติดตั้งไอ้คที่ส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงของเครื่องปรับความเร็วรอบ [12]



รูปที่ 3.10 การติดตั้งไอ้คที่ส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง (DC Choke)

ค่าอินดักแตนซ์ที่พอเหมาะสำหรับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ติดตั้งระหว่างแหล่งจ่ายกระแสสลับกับส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงของ ASD จะช่วยในการสร้างรูปคลื่นกระแสที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น ดังนั้น DC choke จะปรากฏหลังส่วนของ Diode rectifier bridge และก่อนหน้าคาปาซิเตอร์ที่ส่วนของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงสามารถใช้ในการลดความผิดเพี้ยนของกระแสขาเข้าที่มีฮาร์มอนิก DC choke ทำหน้าที่คล้ายกับ AC choke ตรงที่สามารถใช้ลดความผิดเพี้ยนของกระแส

สมมุติให้แหล่งจ่ายเป็นอุดมคติไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ และไม่คิดผลของแรงดันตกคร่อมพอร์เตอร์ระหว่างไดโอดที่นำกระแส เมื่อไม่มีกระแสที่ดีซีลิ่งจะทำให้ค่าแรงดันที่ดีซีบัสจะเพิ่มขึ้นไปถึงค่าพีคของกระแสสลับอินพุท ทำให้แรงดันเฉลี่ยที่ดีซีบัสจะมีค่าคงที่คือค่าพีคของแรงดันไลน์อินพุทโดยไม่คิดผลของแรงดันตกคร่อมระหว่างไดโอดและสมมุติว่าระบบเป็นอุดมคติ ค่าอินดักแตนซ์ที่เหมาะสมคือค่าที่ส่งผลให้แรงดันเฉลี่ยที่ดีซีบัสลดลงจากค่าพีคมาเป็นค่าเฉลี่ยของเรกติไฟเออร์สามเฟสภายใต้เงื่อนไขโหลดที่พิกัด มีผลให้เมื่อไดโอดแต่ละคู่ นำกระแสในช่วง 60 องศา ภายใต้เงื่อนไขที่โหลดพิกัด ความแตกต่างระหว่างค่าพีคของแรงดันไลน์ที่ไม่มีโหลดกับค่าแรงดันเฉลี่ยของเรกติไฟเออร์สามเฟสที่โหลดพิกัดจะปรากฏบน DC link choke ดังนั้นค่าอินดักแตนซ์ที่วิกฤตสามารถหาได้ดังนี้ [12]

$$L_{cr} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} = V_m - V_{3-ph-avg} = V_m - \frac{3 \cdot V_m}{\pi} \tag{3.4}$$

$$L_{cr} = \frac{\pi - 3}{\pi} \cdot V_m \cdot \frac{\Delta t}{\Delta i} = \frac{\pi - 3}{\pi} \cdot V_m \cdot \frac{T/6}{I_{dc}} \tag{3.5}$$

L_{cr} = ค่าวิกฤตของ DC Choke

V_m = ค่าพีคของแรงดันไลน์อินพุท

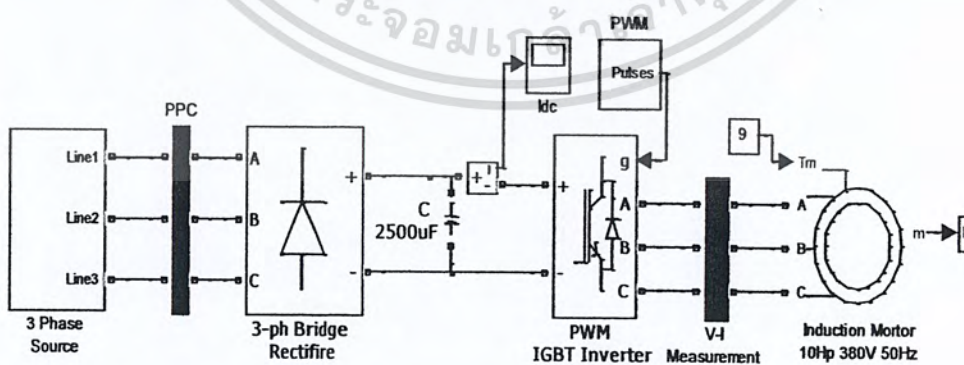
T = คาบเวลาของแหล่งจ่ายอินพุท

I_{dc} = กระแสไหลดที่ติชี่

L_{cr} คือค่าวิกฤตของDC choke และ I_{dc} คือกระแสไหลด การเปลี่ยนแปลงในกระแส Δi จากสมการที่ 3.5 เป็นผลต่างจากเงื่อนไขที่ไม่มีไหลดกับไหลดที่พิกัด ดังนั้น Δi จะเป็นค่าพิกัด กระแสเฉลี่ยที่ไหลต่อเนื่องของช่วงเวลาการนำกระแส 60 องศา T คือคาบเวลาของแหล่งจ่าย กระแสสลับ ในปริยญาณินพีได้ทำการจำลองระบบเพื่อหาค่ากระแสติชี่ไหลดที่ติชี่บัส แล้วนำมาแทนในสมการที่ 3.5 เพื่อหาค่าวิกฤตของ DC choke

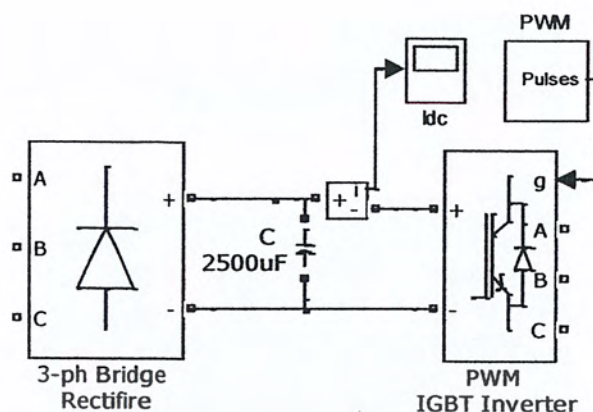
3.4 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink

วงจรที่ใช้ในการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 380 V, 50 Hz ส่วนที่ 2 เป็นแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบ ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ใช้ไดโอดต่อแบบบริดจ์ชนิด 6 พัลส์ และใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 2,500 μF กรองให้ไดไฟตรงเพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส ใช้เทคนิคการมอดดูเลชั่นแบบพีคดับเบิลเอ็ม ความถี่สวิตซ์ 2.9 kHz ซึ่งภายในแบบจำลอง ASD แสดงดังรูปที่ 3.11 ส่วนที่ 3 เป็นแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดกรงกระรอกซึ่งมีพิกัด แรงดัน 380 V , 50 Hz , 4 Pole , 10 HP และความเร็วรอบ 1,440 rpm ที่พิกัด และในส่วนที่ 4 เป็นแบบจำลองของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 3.11 ระบบ ASD ที่ใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



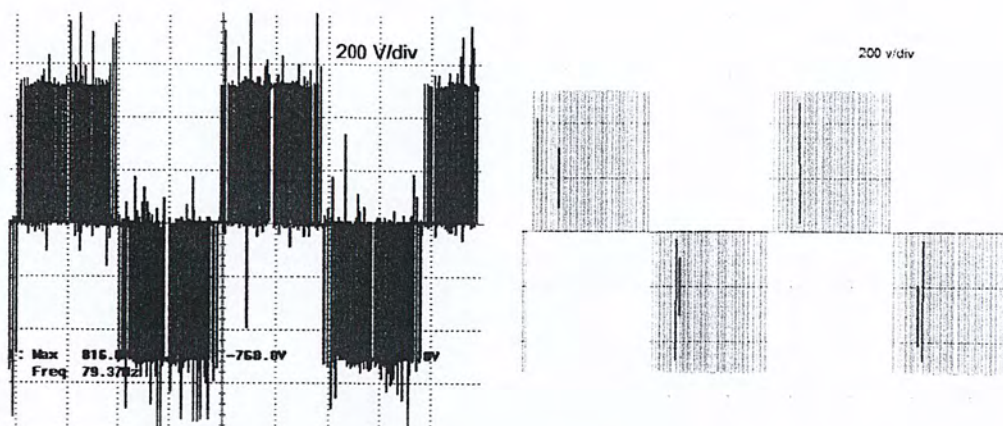
รูปที่ 3.12 แบบจำลองของ ASD

3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ในปฏิญญาพันธันนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าที่อ้างอิงมาจากระบบจริงเสียก่อน เช่น ค่าพิกัดต่าง ๆ ของเครื่องปรับความเร็วรอบ และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แล้วนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้ไปใส่ในระบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของโซลิตที่จะนำไปติดตั้งด้านหน้าเครื่องปรับความเร็วรอบและที่ตีชีบัสเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านต่าง ๆ เช่น คุณภาพของรูปคลื่นทางด้านอินพุทเพาเวอร์แฟคเตอร์ โดยทำการศึกษาทั้งในกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งจะได้ทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ในงานจริง

3.5.1 ค่าพิกัดของเครื่องปรับความเร็วรอบ

ระบบจำลองที่สร้างขึ้นจะต้องพิจารณาจากค่าแรงดันเอาต์พุทของเครื่องปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบจริงซึ่งมีความถี่สวิตซ์ที่ 2.9 kHz และใช้เทคนิคการควบคุมสวิตซ์แบบ SPWM จากรูปที่ 3.12 ได้ทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันโวลต์จากการทดสอบและการจำลองจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหลังจากนั้นนำพารามิเตอร์ของเครื่องปรับความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองนำไปใช้ในระบบเครื่องปรับความเร็วรอบทั้งหมด



ก. Experiment

ข. Simulation

รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไลน์

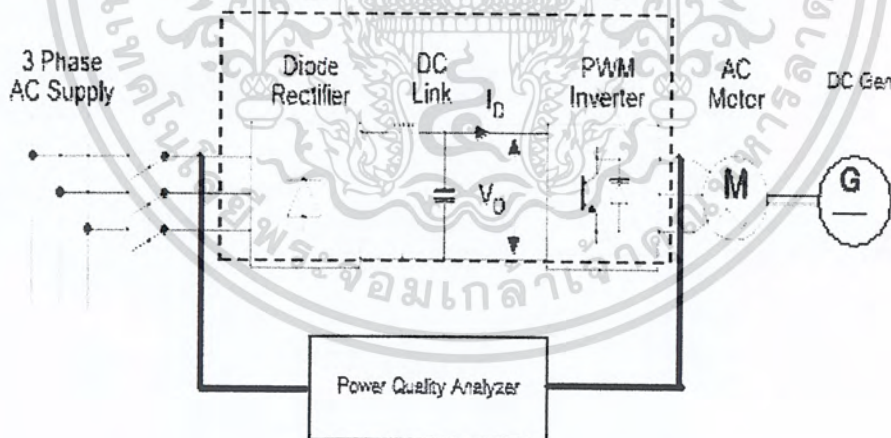
3.6 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยในส่วนของหลักการทำงานนั้นได้อธิบายถึงโครงสร้างภายในของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุตผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทั้งในสภาวะที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะที่สมดุลและไม่สมดุลที่ระดับต่างๆ และได้อธิบายถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของ Series line reactor หรือ AC Choke ที่นำมาติดตั้งด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และ DC Choke ที่นำมาติดตั้งระหว่างชุดเรกติไฟเออร์สามเฟสกับคาร์ปายเตอร์ที่ตีซีบีส เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและในส่วนของการจำลองการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ นั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ทำการจำลองทั้งในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ โดยการนำค่าพารามิเตอร์จริงที่ได้จากการทดสอบไปใส่ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งผลที่ได้ทั้งในส่วนของแรงดันไลน์จากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการทดลองและจำลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่ได้จะมีทิศทางเดียวกันและในบทความต่อไปได้ทำการจำลองโดยนำส่วนของการจำลองทั้งหมดมารวมเป็นระบบเดียวกันเปรียบเทียบกับระบบจริงใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการจำลองและทดสอบ

จากบทที่ผ่านมาได้ทำการสร้างระบบจำลองของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ASD) ขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink แทนระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบ และในบทนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมต่างของระบบและมอเตอร์ รวมถึงทำการออกแบบโค้ดที่จะทำการติดตั้งด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและที่ดิสคิงค์ภายในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล จึงได้ทำการทดสอบระบบเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออยู่กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Motor-Generator set) มีภาระที่ 1400 วัตต์เป็นภาระสูงสุดของการทดสอบ จากรูปที่ 4.1 จะแสดงระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบโดยเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสโดยใช้ variac 1 เฟส จำนวน 3 ตัวต่อแบบสตาร์เพื่อใช้ในการปรับแรงดันแหล่งจ่ายให้อยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล ใช้ Power Quality Analyzer Fluke43B ในการวัดค่าแรงดัน, กระแส, เพาเวอร์แฟกเตอร์ และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 4.1 ส่วนต่างๆของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะสมดุล

ในกรณีนี้จะแสดงค่ากระแสอินพุทและค่าอื่นๆเพียง 1 เฟสเท่านั้น เนื่องจากค่ากระแสทั้ง 3 เฟสในผลของการจำลองจะมีเท่ากัน แต่ในระบบจริงจะมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการทดสอบได้อ้างอิงค่ากระแสจากเฟส A ใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ซึ่งในการจำลองจะทำการจำลองค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อม AC Choke ที่ 1%-10% และได้ค่าอินดักแตนซ์ของ AC Choke ที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมต่างๆตามตารางที่ 4.2 ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.3 เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่า %THD_i แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิก (I_h) เทียบกับค่ากระแสที่ความถี่หลักมูล (I_{s1}) ดังตารางที่ 4.3 จากนั้นทำการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อม AC Choke ที่ 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ทั้งนี้ในการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของ AC Choke จะใช้ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลจากการทดสอบภาระสูงสุด (กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายโหลด 1400 Watt) ในสภาวะที่ไม่มีการติดตั้งโช๊ค และการออกแบบค่าอินดักแตนซ์ของ DC Choke โดยการจำลองเพื่อหาค่ากระแสโหลดที่ดีที่สุดจึงนำไปใช้ในการออกแบบที่ภาระสูงสุด จะได้ค่าอินดักแตนซ์ที่วิกฤตคือ 16.8 mH จากนั้นทำการทดสอบที่ค่าอินดักแตนซ์ของ DC Choke ได้แก่ 9.3, 16.8 และ 25.8 mH และสุดท้ายจะทำการทดสอบการติดตั้ง AC และ DC Choke ร่วมกันที่ใช้ AC Choke คือ 3mH และเปลี่ยนค่า DC Choke ได้แก่ 4.7, 9.3 และ 16.8mH

โดยสรุปจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณีใหญ่ๆ คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งใดๆ, การติดตั้ง AC Choke ด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, การติดตั้ง DC Choke ที่ดีซีลิงค์ และการติดตั้ง AC และ DC Choke ร่วมกัน

4.2 เมื่อไม่มีการติดตั้งโช๊คด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

กรณีที่ไม่มีการติดตั้งโช๊คด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบโดยให้ระบบมีภาระตั้งแต่ 0.3-1.4 กิโลวัตต์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับโหลด ซึ่งจะพบว่ารูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสอินพุทจะให้ผลที่สอดคล้องกัน และทั้งนี้จะเลือกค่ากระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูลของการทดสอบที่ภาระสูงสุดมาใช้ในการออกแบบโช๊คที่จะทำการติดตั้งด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในส่วนของการเปรียบเทียบองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆทั้งจากการจำลองและทดสอบ จะทำการเปรียบเทียบกับขีดจำกัดมาตรฐานฮาร์มอนิกตาม มอก. 1448-2544 หรือ IEC 61000-3-2 ได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการติดตั้งโซ่ค (1)

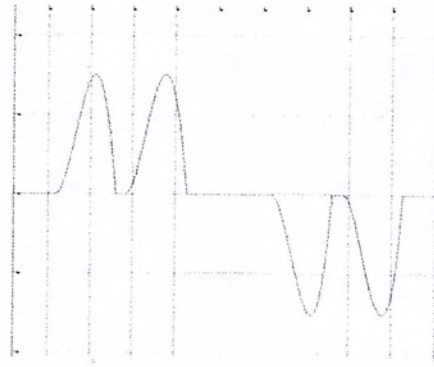
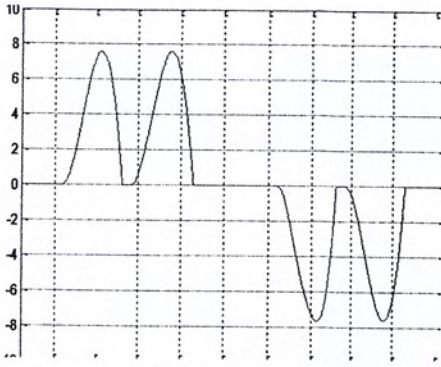
Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	1.45	1.13	0.88	0.92	0.79*	0.88*	0.65*	0.80*	0.44*	0.59*
0.6	2.04	1.58	1.26*	1.40*	1.08*	1.22*	0.80*	0.95*	0.64*	0.71*
0.9	2.57	2.05	1.75*	1.80*	1.48*	1.61*	0.97*	1.18*	0.81*	0.88*
1.2	3.07	2.56	2.11*	2.25*	1.82*	1.97*	1.12*	1.29*	0.90*	0.94*
1.4	3.52	2.99	2.43*	2.54*	1.98*	2.14*	1.35*	1.51*	0.97*	1.05*

หมายเหตุ * คือ ค่าที่เกินค่ามาตรฐานฮาร์โมนิก IEC 61000-3-2 Class A

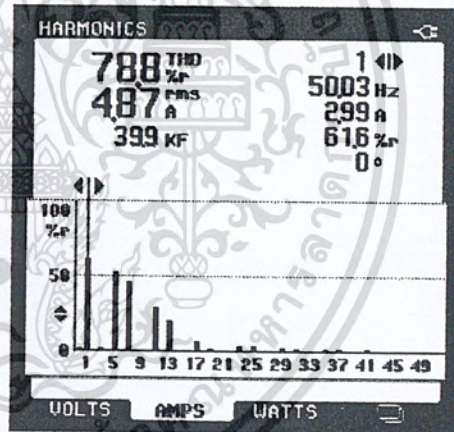
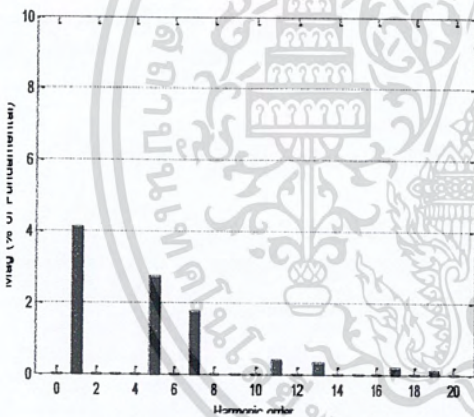
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการติดตั้งโซ่ค (2)

Load (kW)	%THD _i		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	84	84	0.48	0.53	2.0	2.1	0.69	0.75	0.67	0.73
0.6	81	82	0.53	0.55	2.6	2.8	1.07	1.12	1.04	1.10
0.9	80	81.7	0.60	0.57	3.3	3.6	1.37	1.43	1.33	1.42
1.2	79	80.7	0.62	0.59	4.0	4.3	1.57	1.69	1.54	1.64
1.4	79	79	0.75	0.61	4.4	4.8	1.78	1.87	1.76	1.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Simulation (ข) Experiment
 รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาระ 1.4 kW



(ค) Simulation (ง) Experiment

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมกระแสอินพุทเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 1.4kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เมื่อมีการติดตั้งโซลิดด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ตารางที่ 4.2 ค่าอินดักแตนซ์ของโซลิดที่เปอร์เซ็นต์แรงดันต่างๆ

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโซลิด (%)	ค่าอินดักแตนซ์ของโซลิด (mH)
1%	2.34
2%	4.67
3%	7.01
4%	9.34
5%	11.68
6%	14.01
7%	16.35
8%	18.68
9%	21.02
10%	23.36

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโซลิดต่างๆ(1)

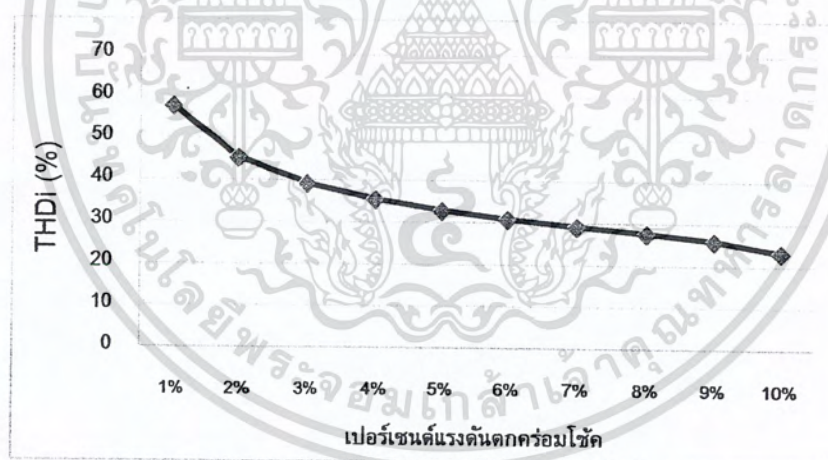
ลำดับฮาร์มอนิก	เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโซลิด (%)				
	1%	2%	3%	4%	5%
5	50.08	40.71	35.85	32.72	30.43
7	25.68	16.58	12.26	9.96	8.71
11	8.21	7.85	7.34	6.80	6.26
13	5.77	3.95	3.45	3.37	3.38
17	3.76	3.52	3.11	2.68	2.28
19	2.44	2.01	2.00	1.98	1.89
%THDi	57.46	45.12	39.01	35.27	32.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโหลดต่างๆ(2)

ลำดับฮาร์มอนิก	เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโหลด (%)				
	6%	7%	8%	9%	10%
5	28.62	27.06	25.60	23.93	21.16
7	8.04	7.68	7.52	7.42	7.30
11	5.74	5.23	4.71	4.09	3.12
13	3.37	3.32	3.22	2.99	2.39
17	1.95	1.68	1.49	1.38	1.35
19	1.75	1.57	1.37	1.14	0.88
%THDi	30.63	28.95	27.41	25.69	23.03

จากการจำลองจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสรวม (%THDi) และค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างตามเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโหลด ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ค่า %THDi ที่เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 เมื่อมีการติดตั้งโช้ค 3% ด้านหน้า ASD

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 3% ด้านหน้า ASD (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1 (A)		5 (A)		7 (A)		11 (A)		13 (A)	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	0.25	0.27	0.14	0.14	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02
0.6	1.80	1.82	0.80	0.80	0.35	0.34	0.14	0.14	0.07	0.07
0.9	2.10	2.14	0.85	0.87	0.35	0.34	0.15	0.16	0.07	0.08
1.2	2.45	2.48	0.95	0.95	0.35	0.34	0.15	0.18	0.07	0.08
1.4	3.00	3.01	1.05	1.08	0.35	0.35	0.20	0.21	0.08	0.09

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 3% ด้านหน้า ASD (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		Output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	52	52	0.79	0.79	1.3	1.3	0.70	0.72	0.70	0.70
0.6	45	44	0.88	0.85	2.0	2.0	1.15	1.17	1.00	1.03
0.9	40	41	0.89	0.87	2.3	2.3	1.30	1.33	1.25	1.26
1.2	39	39	0.90	0.88	2.6	2.6	1.60	1.62	1.55	1.56
1.4	36	36	0.91	0.89	3.0	3.2	1.90	1.92	1.75	1.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 เมื่อมีการติดตั้งโช้ค 5% ด้านหน้า ASD

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 5% ด้านหน้า ASD (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1 (A)		5 (A)		7 (A)		11 (A)		13 (A)	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Condition	Simulation	Experiment
0.3	1.20	1.23	0.45	0.45	0.15	0.18	0.08	0.08	0.04	0.04
0.6	1.60	1.60	0.55	0.57	0.18	0.18	0.10	0.12	0.05	0.05
0.9	2.00	2.04	0.65	0.67	0.18	0.19	0.14	0.14	0.06	0.06
1.2	2.60	2.60	0.75	0.77	0.20	0.20	0.15	0.16	0.06	0.07
1.4	2.95	2.95	0.80	0.83	0.20	0.21	0.15	0.16	0.07	0.08

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 5% ด้านหน้า ASD (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		Output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment
0.3	40	41	0.90	0.87	1.3	1.3	0.65	0.68	0.65	0.66
0.6	35	36	0.91	0.89	1.7	1.7	1.00	1.08	0.95	0.94
0.9	30	32	0.92	0.90	2.0	2.2	1.30	1.29	1.25	1.26
1.2	29	29	0.92	0.91	2.5	2.7	1.65	1.68	1.55	1.56
1.4	28	28	0.93	0.91	3.0	3.0	1.85	1.87	1.75	1.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 เมื่อมีการติดตั้งโช้ค 7% ด้านหน้า ASD

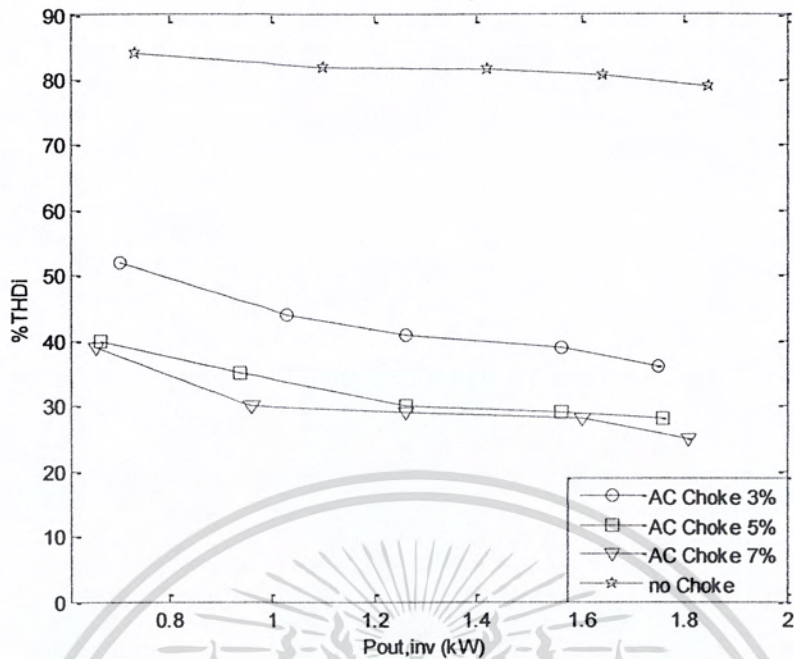
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 7% ด้านหน้า ASD (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experimen	Simulation	experimen	Simulation	experimen	Simulation	Condition	Simulation	Experimen
0.3	1.14	1.14	0.35	0.36	0.13	0.13	0.05	0.05	0.05	0.05
0.6	1.65	1.68	0.45	0.47	0.15	0.16	0.05	0.05	0.05	0.05
0.9	2.10	2.11	0.50	0.52	0.20	0.17	0.05	0.07	0.06	0.06
1.2	2.65	2.68	0.60	0.61	0.25	0.17	0.06	0.07	0.07	0.07
1.4	3.00	3.02	0.80	0.83	0.30	0.18	0.08	0.09	0.07	0.07

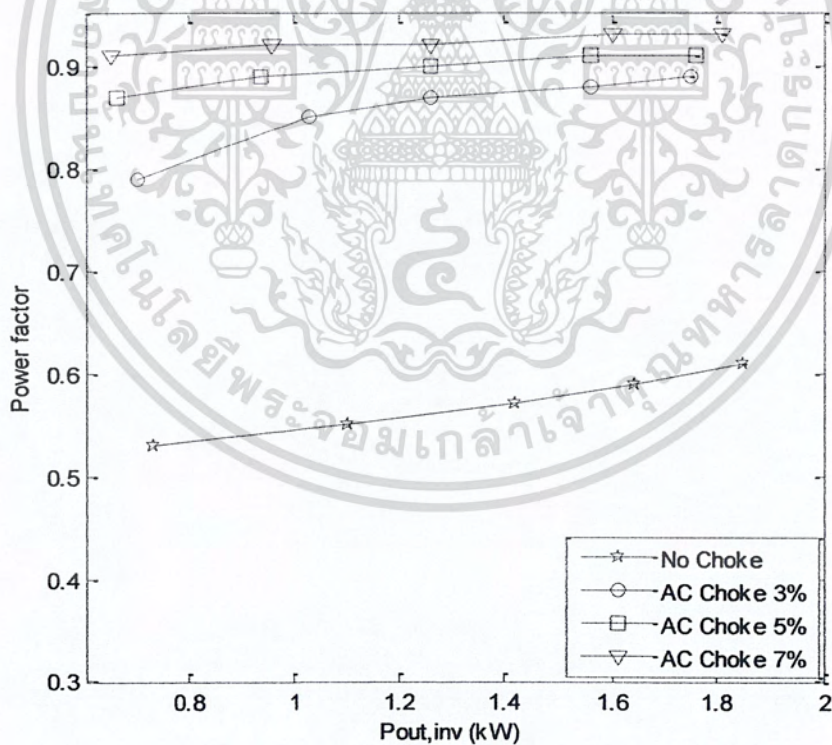
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเมื่อมีการติดตั้งโช้ค 7% ด้านหน้า ASD (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kWatt)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		Output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment
0.3	40	39	0.92	0.91	1.2	1.2	0.65	0.68	0.65	0.65
0.6	30	30	0.93	0.92	1.5	1.7	1.05	1.07	0.95	0.96
0.9	29	29	0.94	0.92	2.0	2.2	1.30	1.30	1.25	1.26
1.2	28	28	0.93	0.93	2.5	2.8	1.65	1.68	1.60	1.60
1.4	25	25	0.93	0.93	3.0	3.1	1.85	1.87	1.80	1.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

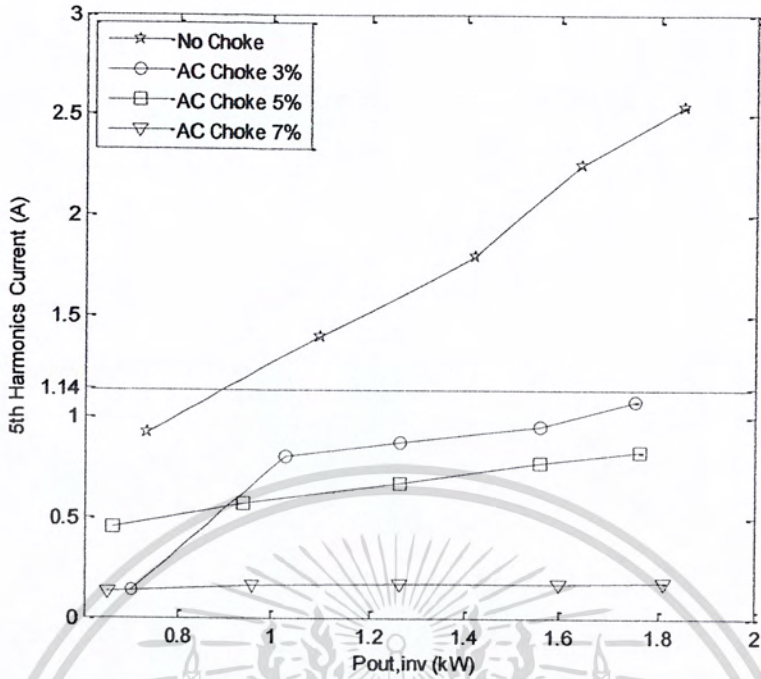


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่างๆ

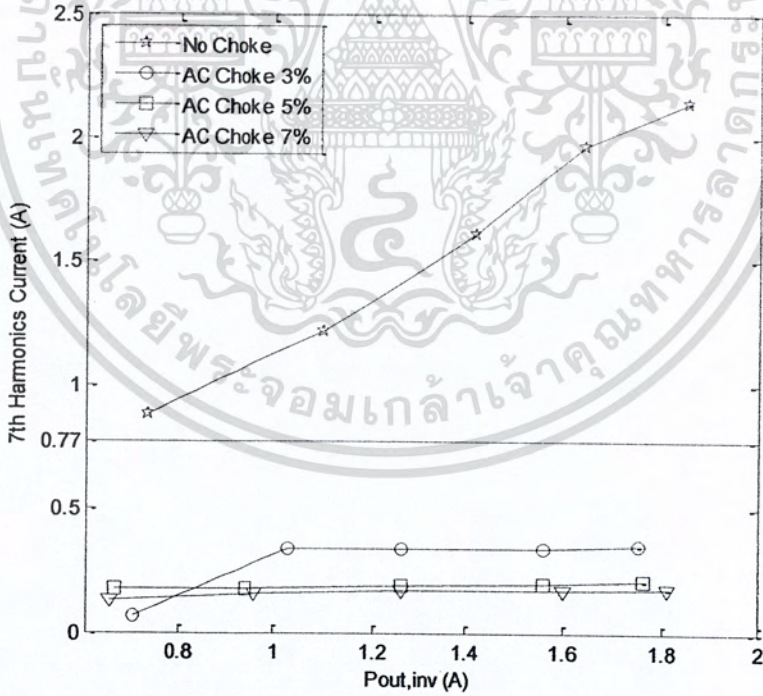


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



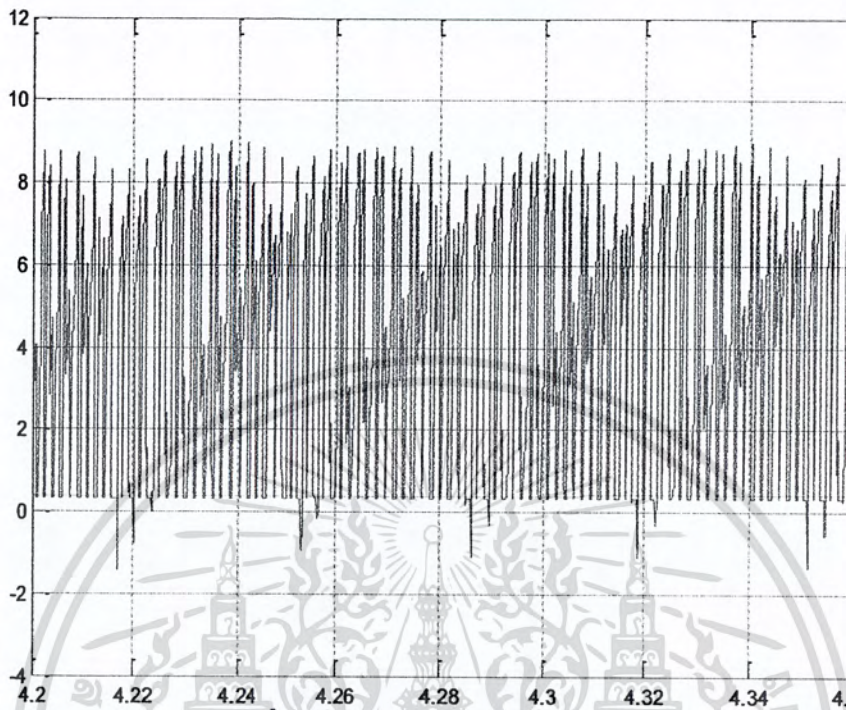
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง AC Choke ที่ค่าต่างๆ



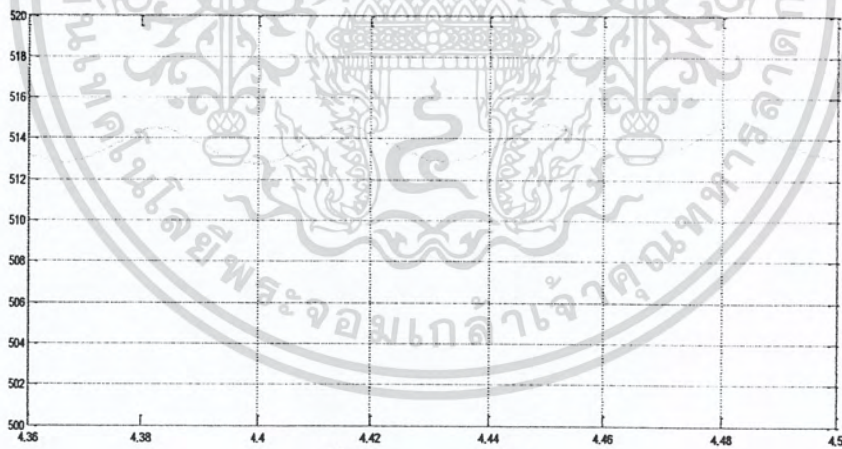
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ขณะติดตั้ง AC Choke

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 เมื่อมีการติดตั้ง DC Choke



รูปที่ 4.9 กระแสที่ไหลที่ดักที่ติงค์



รูปที่ 4.10 แรงแดันติงค์

ทำการจำลองหาค่ากระแสที่ติงค์เพื่อนำไปหาค่า L_{cr} เพื่อใช้ในการทดสอบจริงได้ค่า L_{cr}
 $= 16.8 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองติดตั้ง DC Choke 9.3 mH (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	1.22	1.29	0.60	0.63	0.34	0.45	0.09	0.11	0.10	0.11
0.6	1.31	1.35	0.65	0.66	0.45	0.50	0.11	0.13	0.12	0.13
0.9	1.80	1.81	0.67	0.71	0.49	0.52	0.18	0.19	0.14	0.16
1.2	2.29	2.35	0.76	0.83	0.54	0.55	0.23	0.26	0.19	0.19
1.4	2.79	2.82	0.79	0.84	0.55	0.55	0.24	0.26	0.20	0.21*

หมายเหตุ * คือ ค่าที่เกินค่ามาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2 Class A

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองติดตั้ง DC Choke 9.3 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
.3	59	60	0.80	0.76	1.29	1.30	0.55	0.69	0.64	0.66
.6	53	54	0.84	0.82	1.54	1.56	0.87	0.92	0.75	0.80
.9	44	44	0.89	0.88	2.17	2.22	1.21	1.30	1.09	1.22
1.2	35	38	0.92	0.90	2.59	2.62	1.48	1.60	1.42	1.54
1.4	31	36	0.96	0.95	3.01	3.02	1.81	1.83	1.67	1.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองติดตั้ง DC Choke 16.8 mH (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	1.11	1.22	0.33	0.36	0.27	0.26	0.07	0.07	0.08	0.09
0.6	1.45	1.57	0.41	0.43	0.30	0.30	0.11	0.14	0.11	0.12
0.9	1.82	1.85	0.44	0.48	0.33	0.35	0.16	0.17	0.12	0.14
1.2	2.49	2.59	0.58	0.60	0.41	0.42	0.22	0.23	0.18	0.19
1.4	2.74	2.85	0.64	0.65	0.43	0.45	0.23	0.25	0.19	0.21*

หมายเหตุ * คือ ค่าที่เกินค่ามาตรฐานฮาร์โมนิก IEC 61000-3-2 Class A

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองติดตั้ง DC Reactor 16.8 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	41.2	43.0	0.90	0.89	1.02	1.14	0.65	0.65	0.59	0.62
0.6	35.3	36.0	0.93	0.92	1.65	1.68	1.02	1.02	0.89	0.90
0.9	32.5	34.0	0.94	0.93	1.88	1.97	1.10	1.16	1.05	1.11
1.2	20.8	31.2	0.95	0.94	2.67	2.75	1.54	1.67	1.39	1.55
1.4	28.3	30.9	0.97	0.95	2.98	3.03	1.89	1.90	1.67	1.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองติดตั้ง DC Reactor 25.8 mH (1)

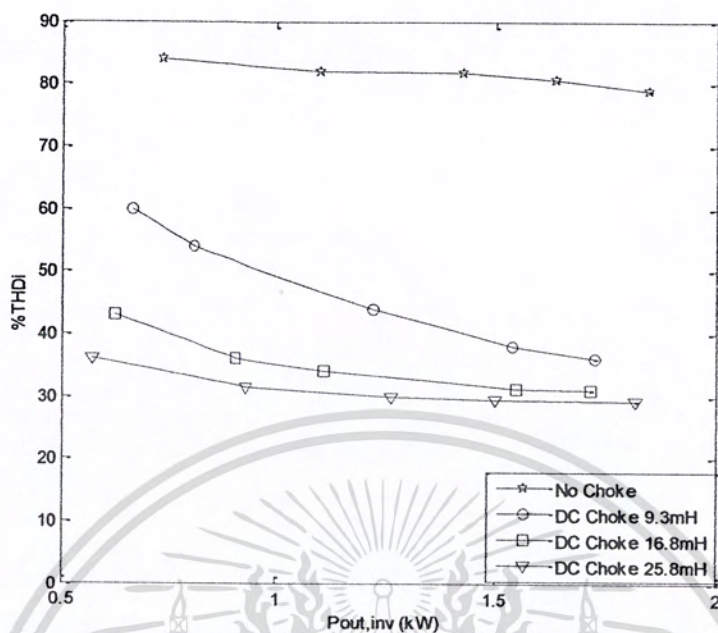
Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	1.00	1.01	0.22	0.28	0.20	0.21	0.07	0.09	0.08	0.08
0.6	1.48	1.56	0.33	0.34	0.24	0.27	0.13	0.14	0.11	0.12
0.9	2.01	2.08	0.45	0.46	0.32	0.33	0.16	0.19	0.15	0.16
1.2	2.32	2.40	0.52	0.53	0.37	0.39	0.22	0.23	0.19	0.20
1.4	2.89	2.96	0.63	0.63	0.41	0.44	0.26	0.26	0.20	0.22*

หมายเหตุ * คือ ค่าที่เกินค่ามาตรฐานฮาร์มอนิก IEC 61000-3-2 Class A

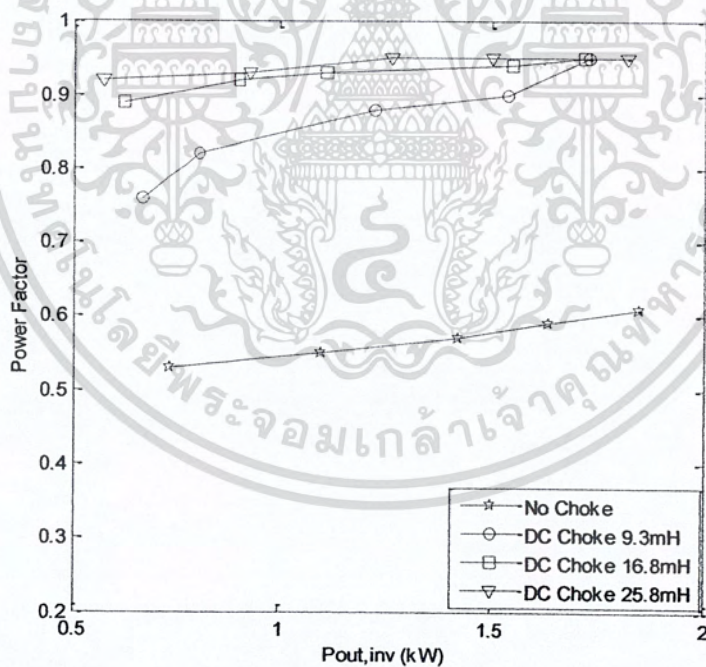
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองติดตั้ง DC Reactor 25.8 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	35.2	36.0	0.93	0.92	1.09	1.11	0.64	0.65	0.60	0.57
0.6	31.2	31.5	0.95	0.93	1.75	1.65	1.00	1.01	0.92	0.93
0.9	30.0	30.0	0.95	0.95	2.19	2.22	1.29	1.38	1.19	1.26
1.2	28.9	29.5	0.96	0.95	2.69	2.71	1.67	1.70	1.52	1.50
1.4	29.1	29.2	0.96	0.95	3.02	3.10	1.89	1.94	1.80	1.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

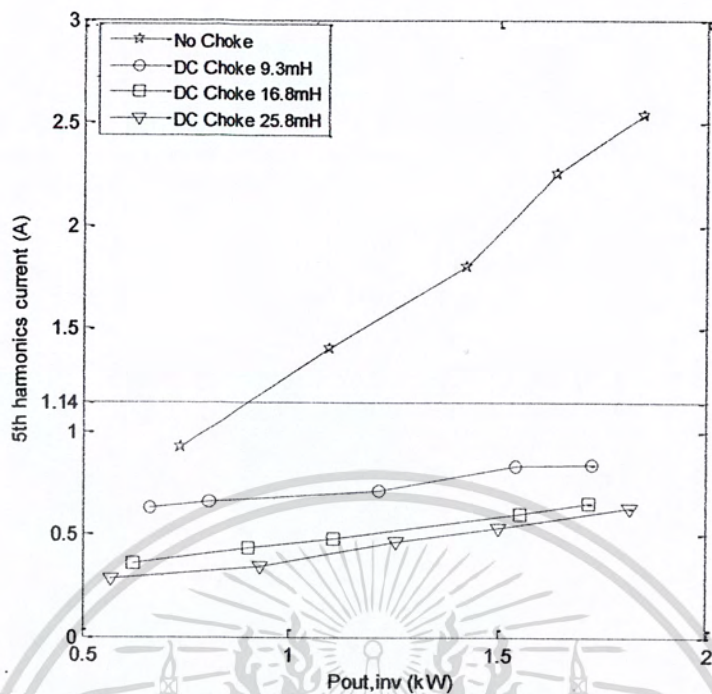


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ

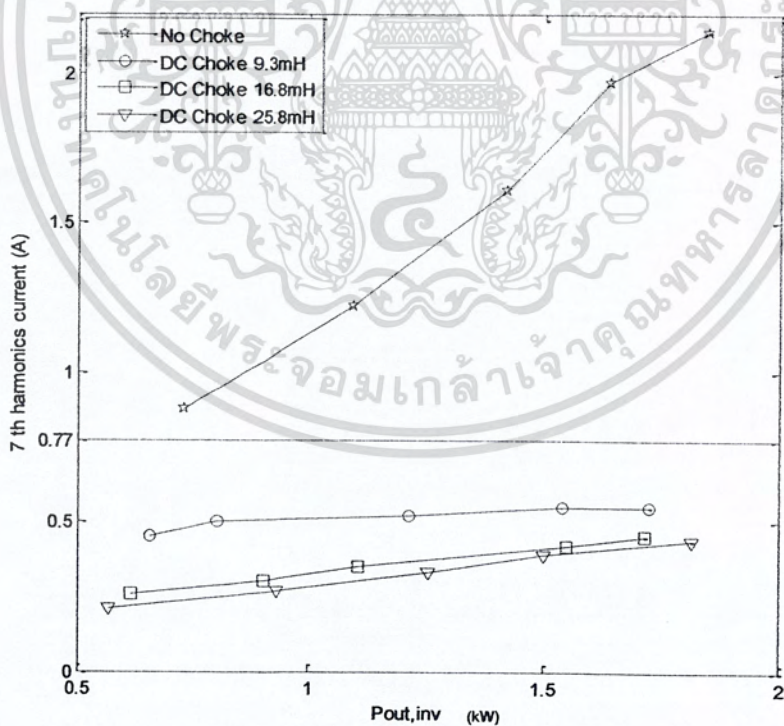


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 เมื่อมีการติดตั้งโช้คทั้งด้านหน้าชุดขับเคลื่อนและที่ตีซีลิงค์
ทำการทดลองติดตั้ง AC และ DC Choke พร้อมกันตามค่าต่างๆดังตารางที่ 4.10 –
4.12

ตารางที่ 4.10 DC Reactor 4.7 mH & AC Reactor 3 mH (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment	Simulation	experiment
.3	1.00	1.07	0.50	0.51	0.20	0.21	0.10	0.10	0.05	0.05
.6	1.50	1.55	0.60	0.63	0.25	0.27	0.13	0.13	0.05	0.06
.9	2.10	2.11	0.70	0.75	0.27	0.27	0.15	0.16	0.06	0.07
1.2	2.65	2.70	0.85	0.86	0.30	0.28	0.18	0.18	0.07	0.08
1.4	3.05	3.07	0.90	0.95	0.32	0.30	0.20	0.19	0.08	0.09

ตารางที่ 4.10 DC Reactor 4.7 mH & AC Reactor 3 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Input		output	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment	Simulation	experiment
0.3	50	48	0.86	0.84	1.20	1.20	0.70	0.70	0.60	0.60
0.6	45	40	0.90	0.89	1.70	1.70	1.00	1.04	0.95	0.98
0.9	38	36	0.93	0.91	2.00	2.30	1.40	1.41	0.10	1.10
1.2	35	33	0.94	0.92	2.50	2.80	1.70	1.71	1.55	1.57
1.4	33	32	0.94	0.92	3.00	3.20	2.00	2.00	1.90	1.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 DC Reactor 9.3 mH & AC Reactor 3 mH (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	Experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment	Simulation	experiment
.3	1.00	0.98	0.50	0.41	0.20	0.18	0.10	0.08	0.05	0.04
.6	1.50	1.58	0.60	0.53	0.25	0.19	0.13	0.12	0.05	0.05
.9	2.10	1.98	0.70	0.61	0.28	0.20	0.15	0.14	0.06	0.07
1.2	2.65	2.45	0.80	0.73	0.30	0.23	0.18	0.17	0.07	0.08
1.4	3.00	2.84	0.90	0.83	0.32	0.27	0.20	0.19	0.08	0.09

ตารางที่ 4.11 DC Reactor 9.3 mH & AC Reactor 3 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	Experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Input		output	
Condition	Simulation	Experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment	Simulation	experiment
0.3	50	42	0.89	0.86	1.20	1.00	0.70	0.61	0.60	0.57
0.6	45	35	0.90	0.89	1.70	1.70	1.00	0.99	0.95	0.92
0.9	38	32	0.92	0.90	2.00	2.10	1.40	1.28	0.10	1.23
1.2	35	31	0.92	0.91	2.50	2.50	1.70	1.47	1.55	1.44
1.4	33	30	0.93	0.92	3.00	2.90	2.00	1.82	1.90	1.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

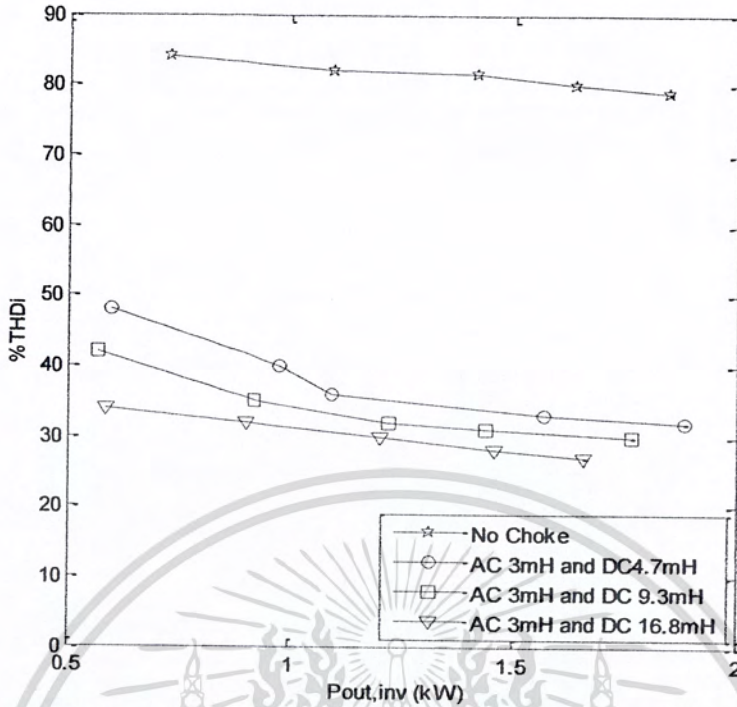
ตารางที่ 4.12 DC Reactor 16.8 mH & AC Reactor 3 mH (1)

Load (kW)	Harmonic Order									
	1		5		7		11		13	
Condition	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	Experiment	Simulation	experiment
.3	1.00	1.15	0.40	0.37	0.15	0.14	0.10	0.09	0.05	0.04
.6	1.50	1.47	0.50	0.42	0.18	0.15	0.13	0.11	0.05	0.06
.9	2.10	2.16	0.60	0.53	0.20	0.19	0.15	0.14	0.06	0.07
1.2	2.50	2.35	0.70	0.61	0.25	0.21	0.18	0.15	0.07	0.08
1.4	3.00	2.71	0.75	0.71	0.30	0.25	0.20	0.17	0.08	0.09

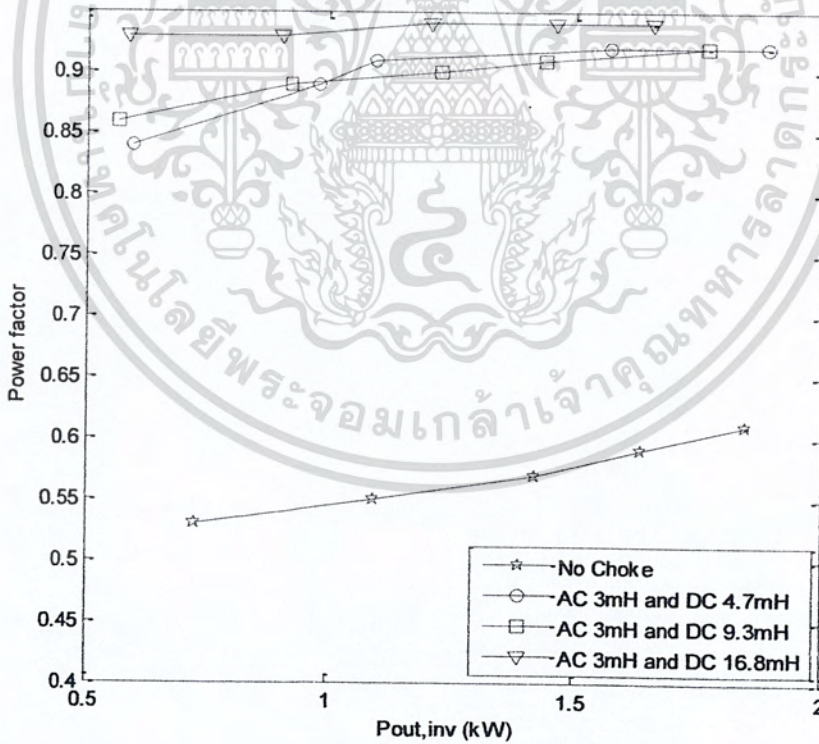
ตารางที่ 4.12 DC Reactor 16.8 mH & AC Reactor 3 mH (2)

Load (kW)	%THDi		PF		I_{rms}		Power (kW)			
	Simulation	Experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	input		output	
Condition	Simulation	Experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
0.3	40	34	0.93	0.93	1.20	1.20	0.70	0.75	0.60	0.59
0.6	35	32	0.93	0.93	1.70	1.50	1.00	0.95	0.95	0.90
0.9	33	30	0.94	0.93	2.00	2.20	1.40	1.26	0.10	1.21
1.2	30	28	0.94	0.93	2.50	2.40	1.70	1.50	1.55	1.46
1.4	28	27	0.94	0.94	3.00	2.80	2.00	1.74	1.90	1.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

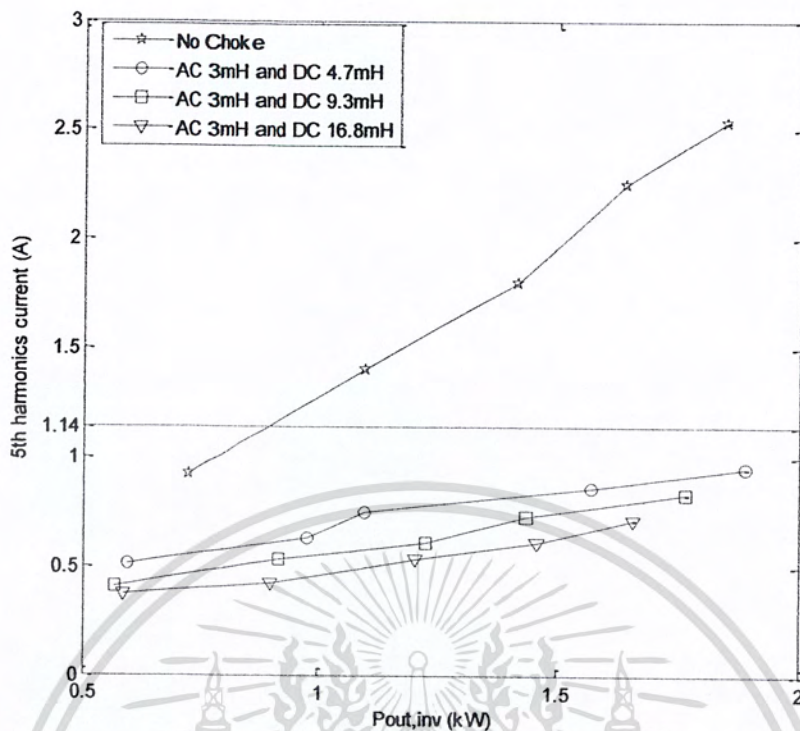


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง AC พร้อม DC Choke ที่ค่าต่างๆ

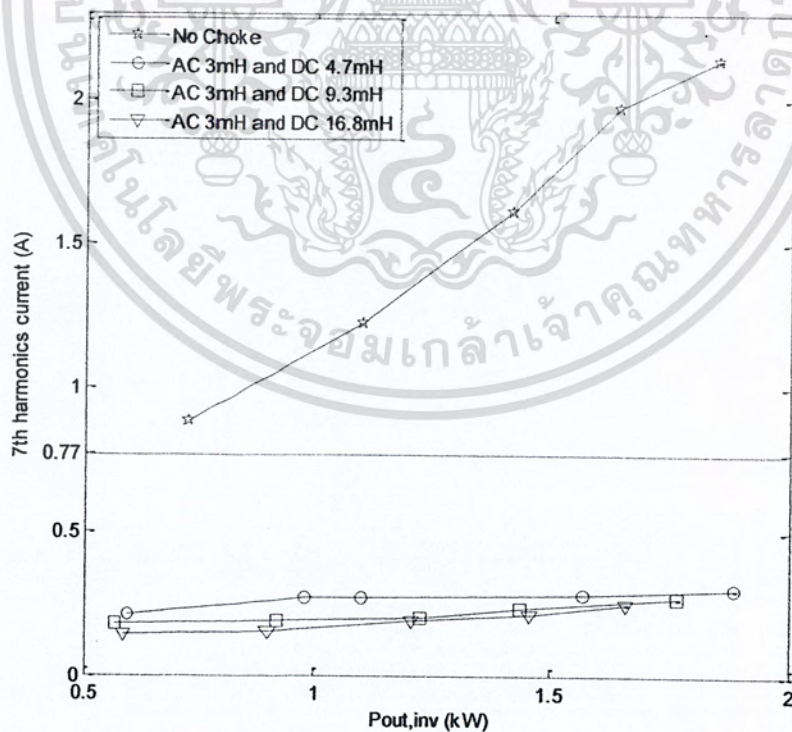


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง AC พร้อม DC Choke ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

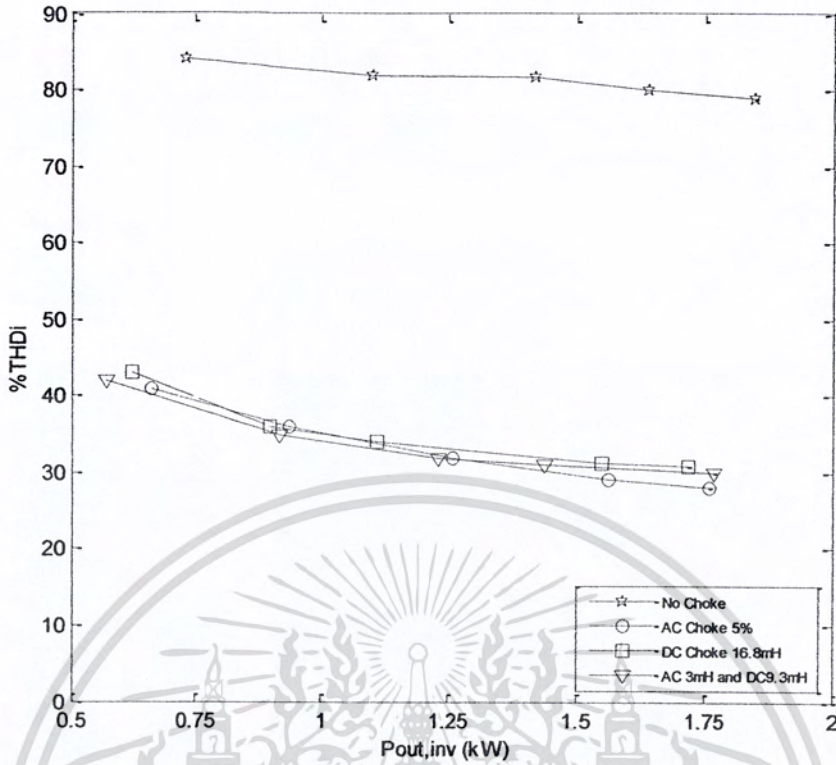


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ

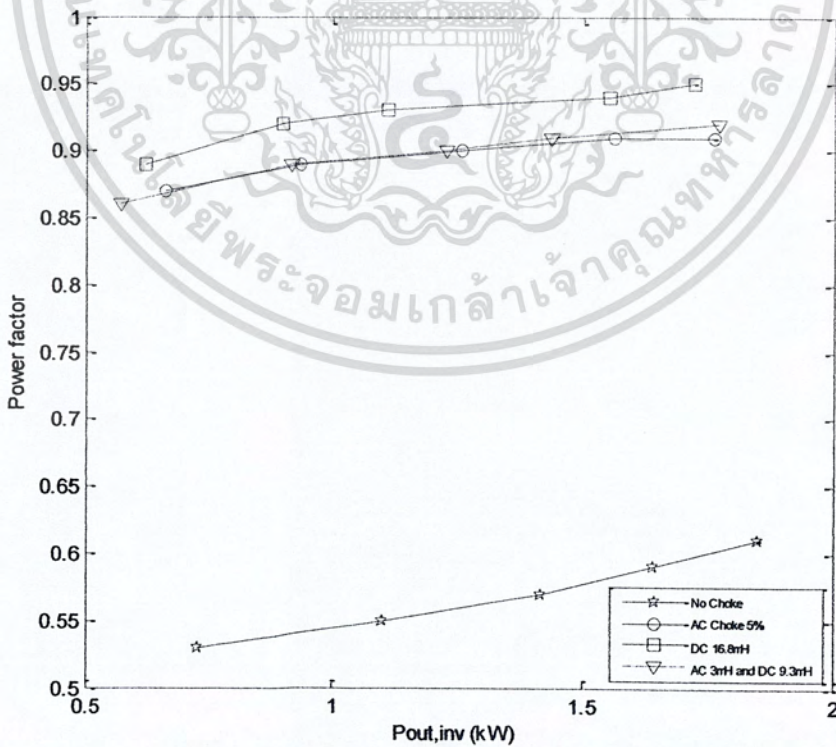


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง DC Choke ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

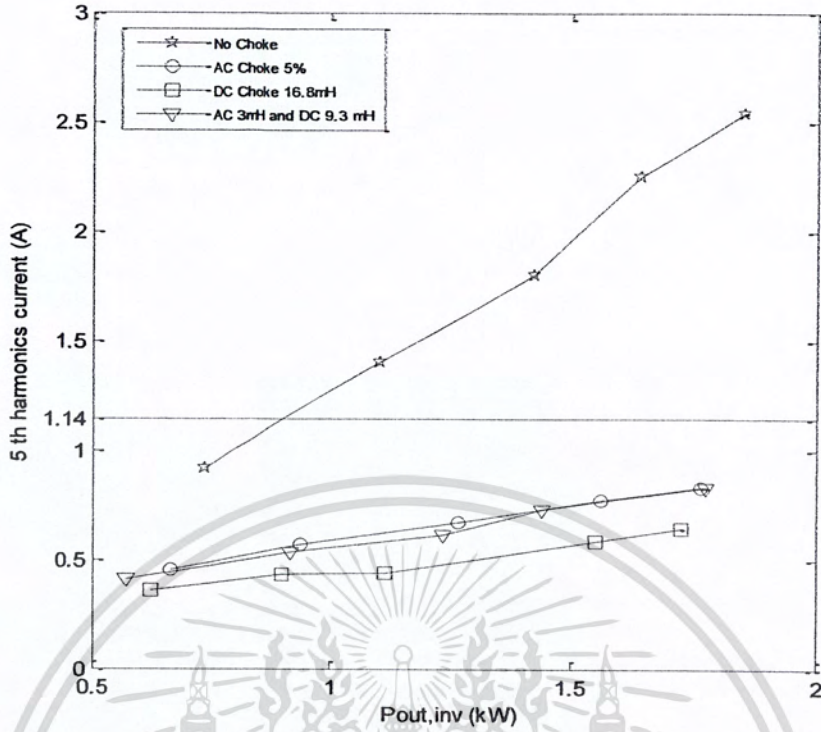


รูป 4.19 เปรียบเทียบค่า %THDi เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่างๆ

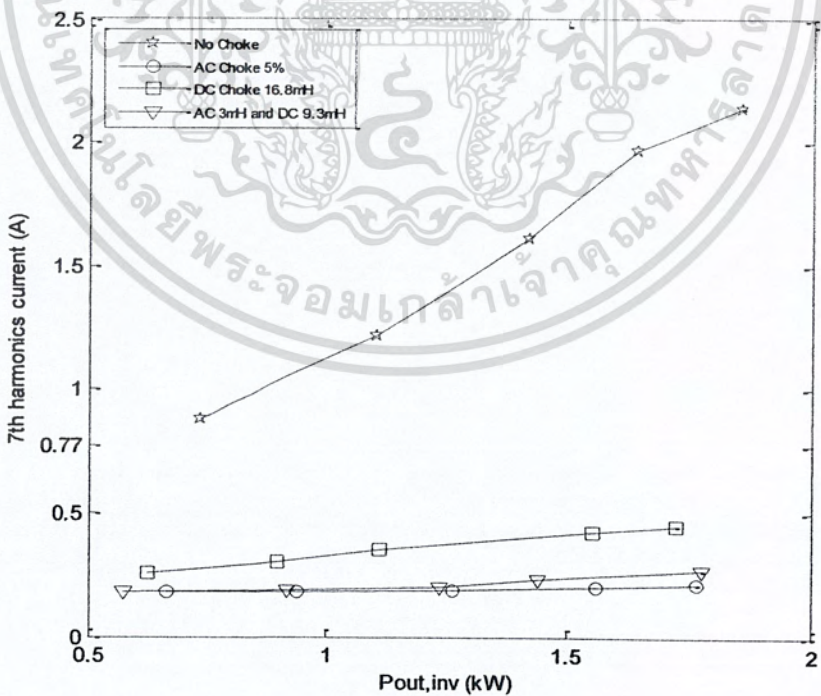


รูป 4.20 เปรียบเทียบค่า Power factor เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.21 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่างๆ



รูป 4.22 เปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 เมื่อติดตั้ง Choke ในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

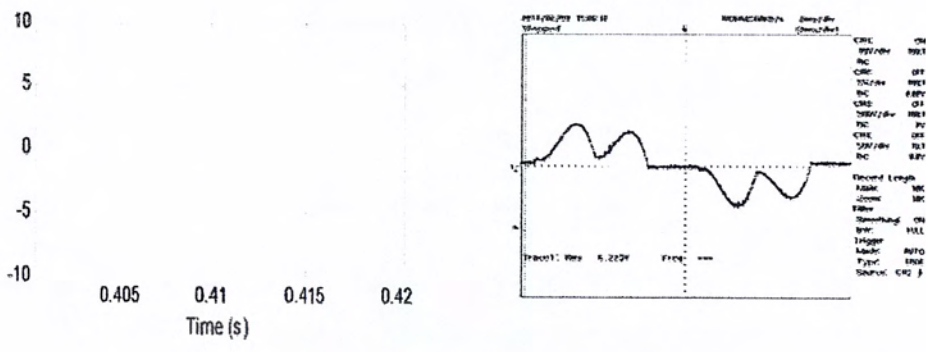
4.6 กรณีแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุล

เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในสภาวะไม่สมดุลจะทำให้กระแสทั้ง 3 เฟสจะไม่ทันกัน ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อทำการติดตั้งโช้คช่วยในการปรับปรุงรูปคลื่น ดังนั้นในกรณีจึงจะแสดงค่ากระแสอินพุท โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและทดสอบทั้งในส่วนของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส โดยพิจารณาทั้งกรณีที่ไม่มีการติดตั้งโช้ค AC 3mH DC9.3mH

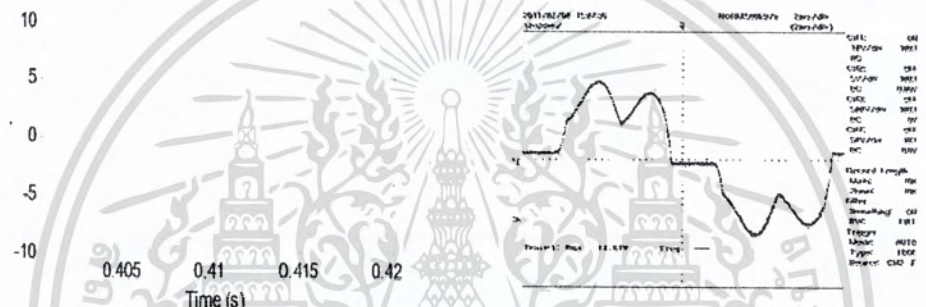
- แรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (1%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage และมี การติดตั้งโช้ค (1%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (1%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage และมี การติดตั้งโช้ค (1%-U with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (3%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage และมี การติดตั้งโช้ค (3%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (3%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage และมี การติดตั้งโช้ค (3%-U with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (5%-O without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage และมี การติดตั้งโช้ค (5%-O with choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage และไม่มีการติดตั้งโช้ค (5%-U without choke)
- แรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage และมี การติดตั้งโช้ค (5%-U with choke)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

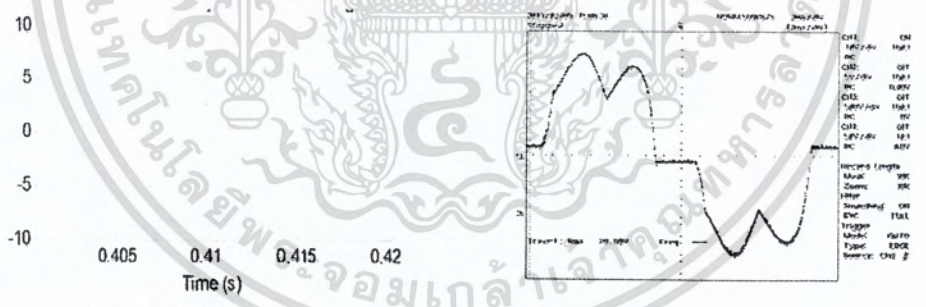
4.6.1 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโซลิต



(ก) เฟส A



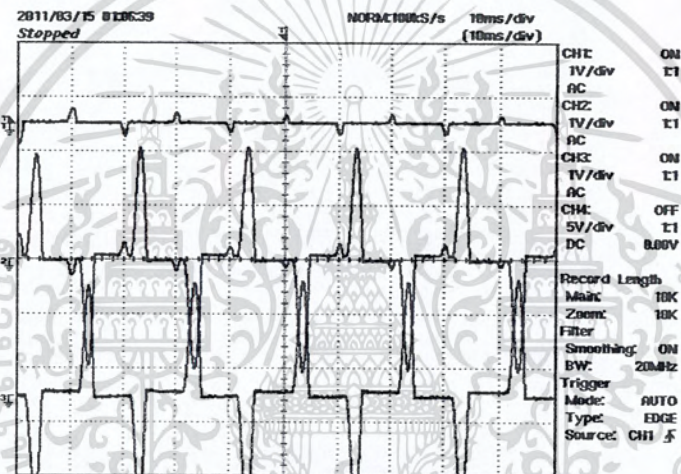
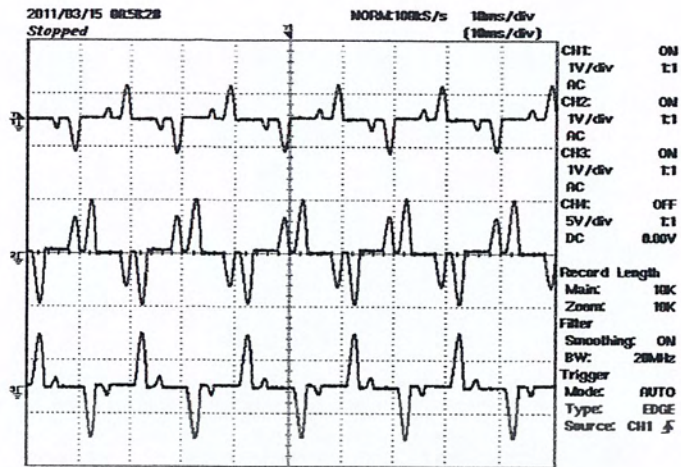
(ข) เฟส B



(ค) เฟส c

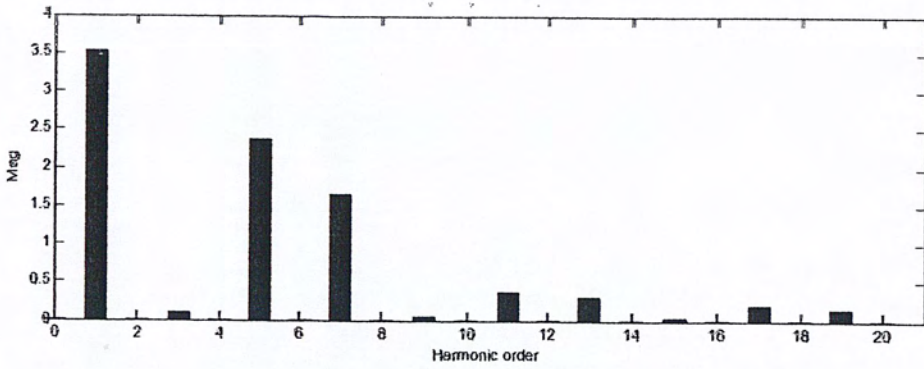
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายภาระที่ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

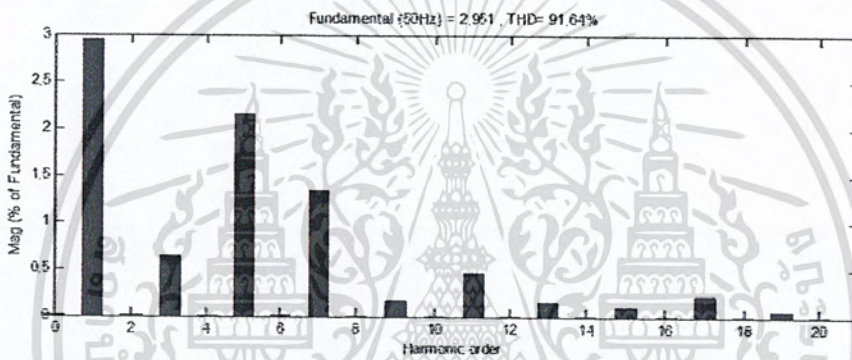


รูปที่ 4.24 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Over voltage โดยไม่มีการติดตั้งโช้ค

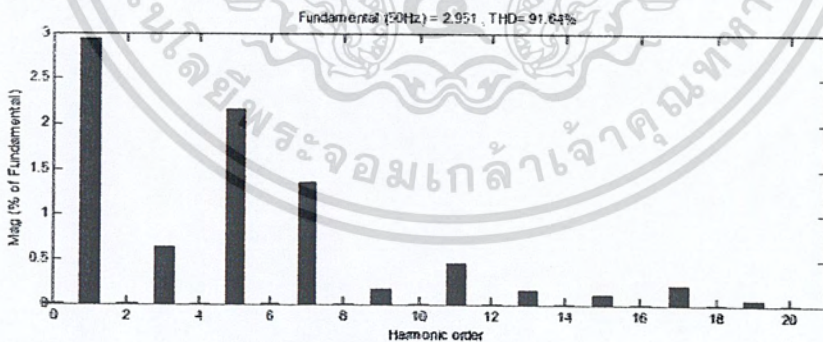
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สเปกตรัมกระแส เฟส A



(ข) สเปกตรัมกระแส เฟส B

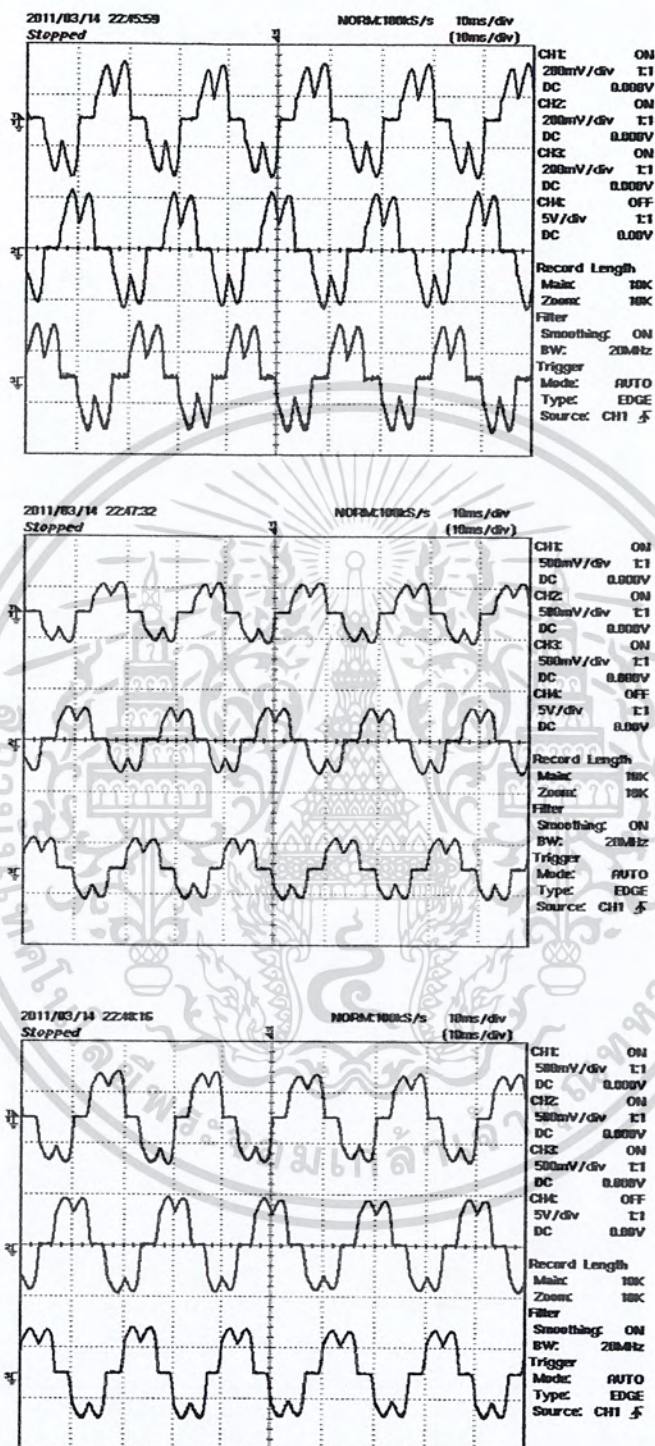


(ข) สเปกตรัมกระแส เฟส C

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบสเปกตรัมค่ากระแสที่เฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

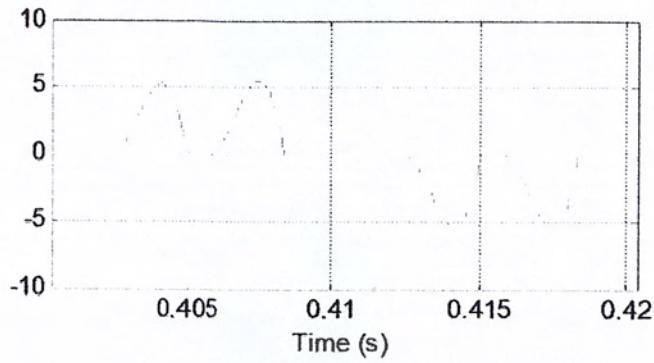
4.6.2 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งโซลาร์



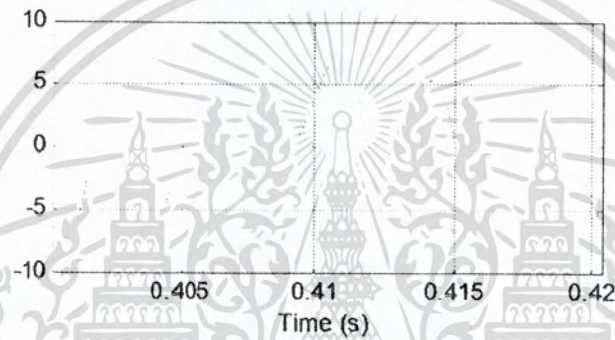
รูปที่ 4.26 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Over voltage โดยมีการติดตั้งโซลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

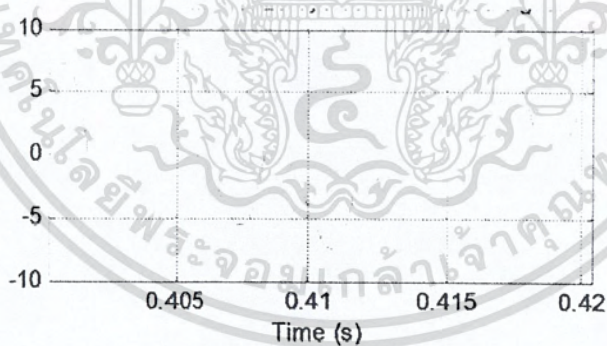
4.6.3 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโซลิต



(ก) เฟส A



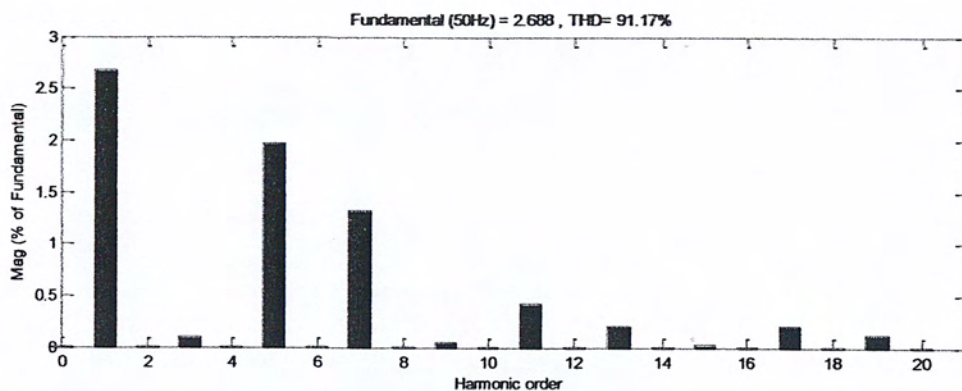
(ข) เฟส B



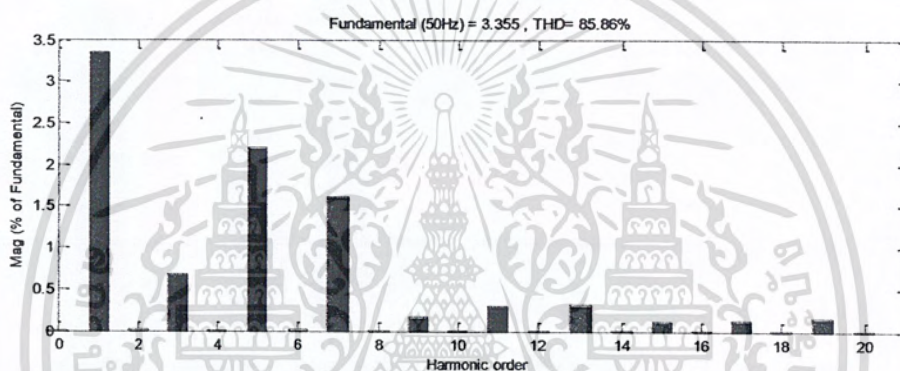
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.27 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW ไม่มีการติดตั้งโซลิต

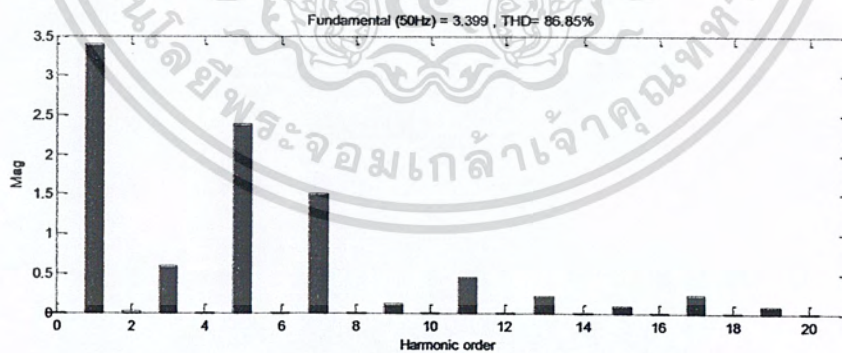
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สเปกตรัมกระแส เฟส A



สเปกตรัมกระแส เฟส B

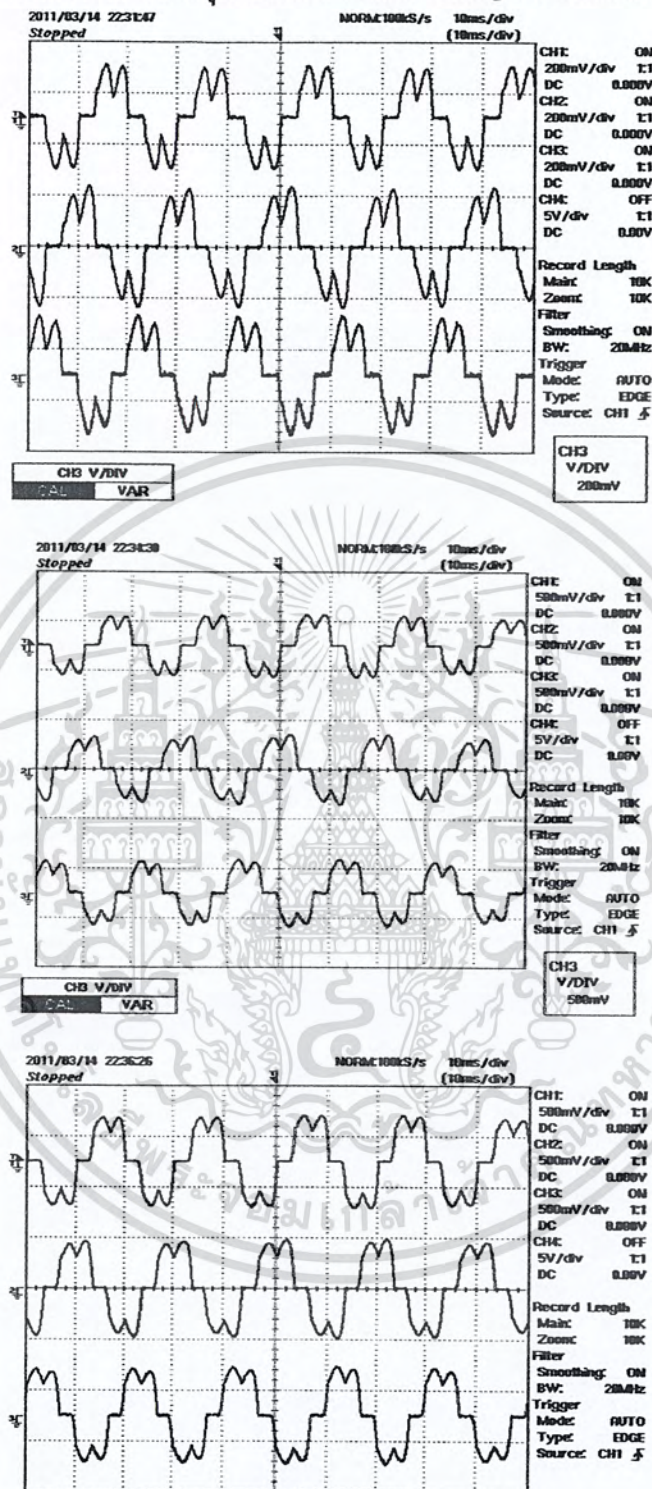


สเปกตรัมกระแส เฟส C

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

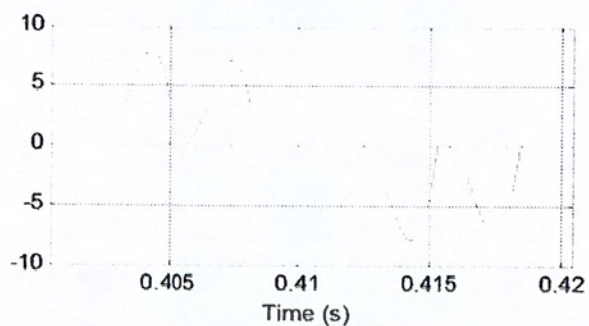
4.6.4 กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งใช้



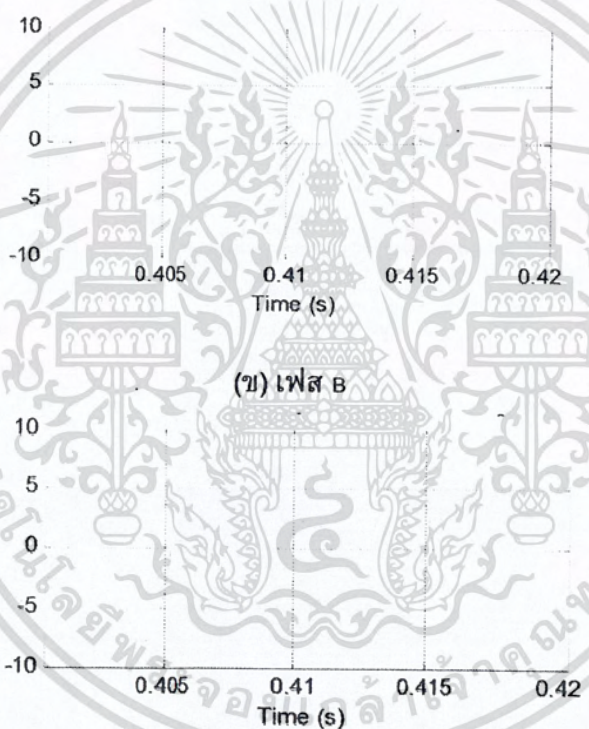
รูปที่ 4.29 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 1% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.5 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโซ่



(ก) เฟส A

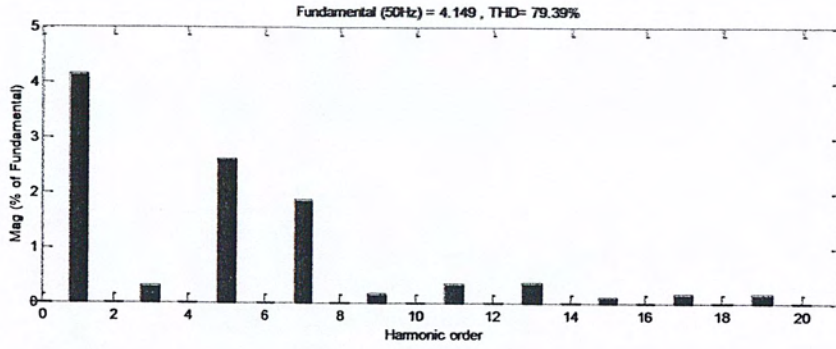


(ข) เฟส B

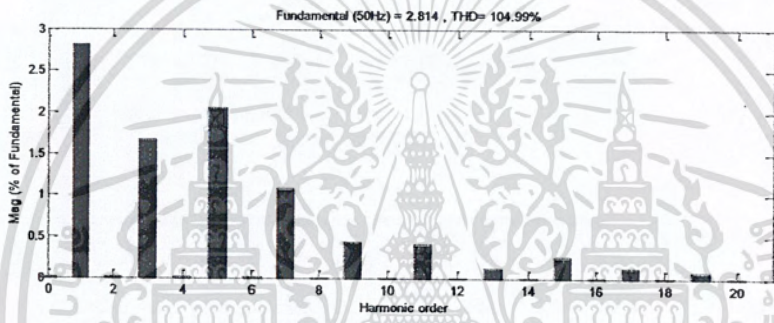
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.30 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการไม่มีการติดตั้งโซ่

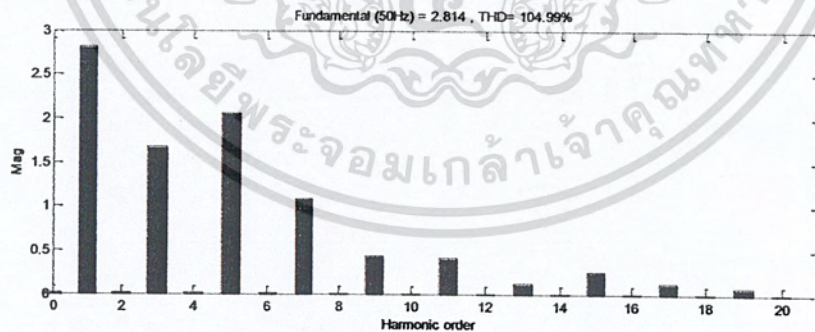
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส A



เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส B

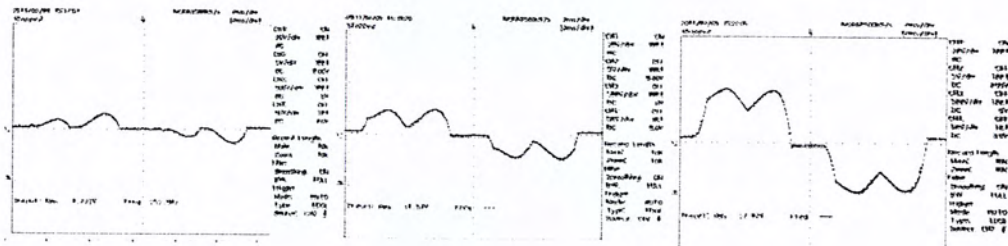


เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแส เฟส C

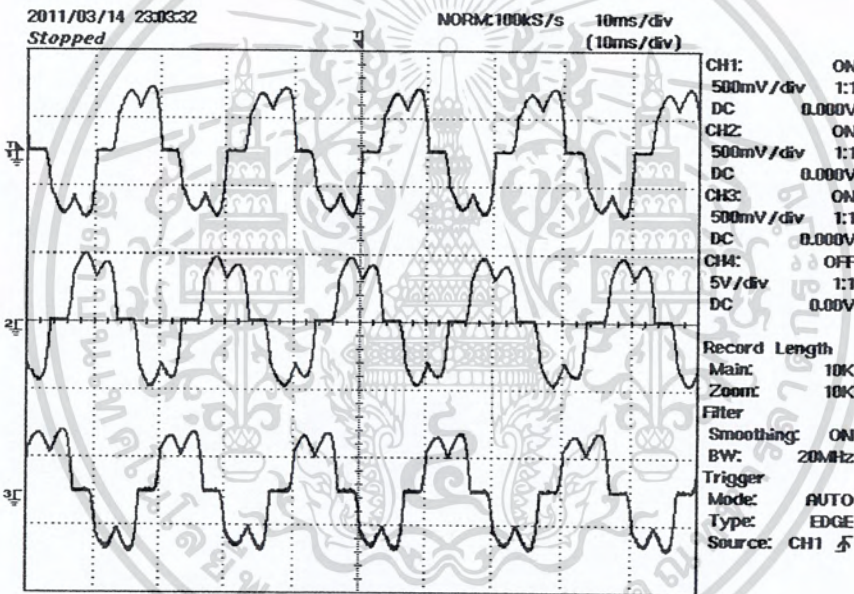
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.6 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ over voltage ที่มีการมีการติดตั้งโซลิต



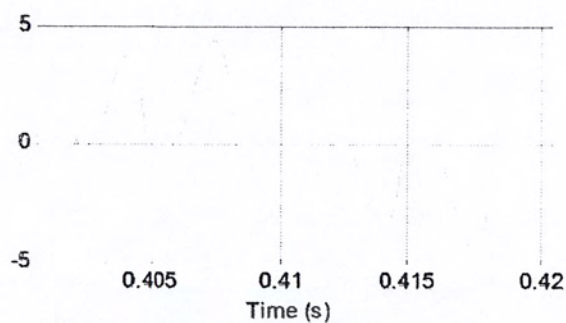
รูปที่ 4.32 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการมีการติดตั้งโซลิต



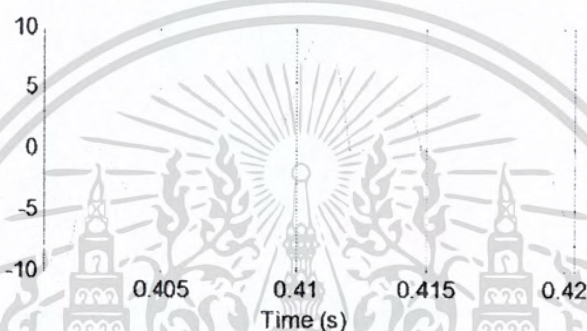
รูปที่ 4.33 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Over voltage โดยมีการติดตั้งโซลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.7 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโซล



(ก) เฟส A



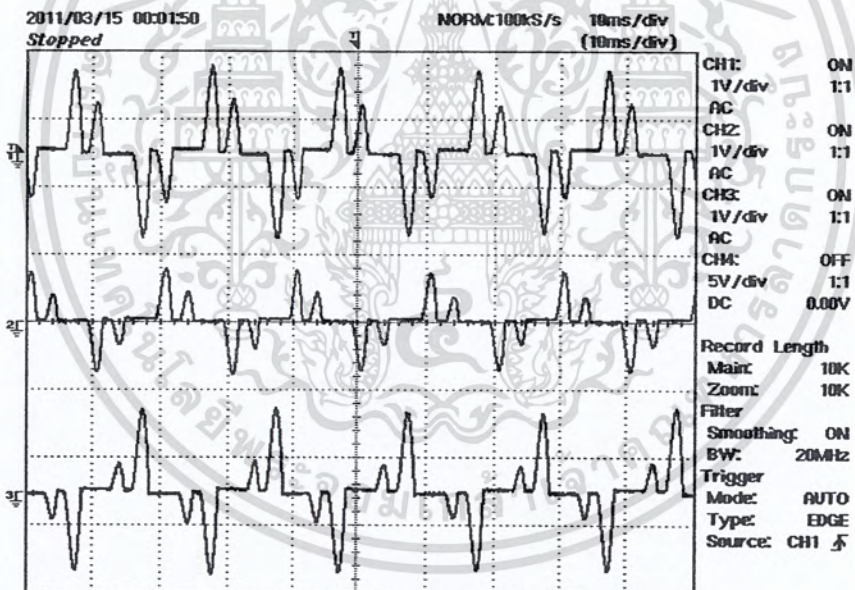
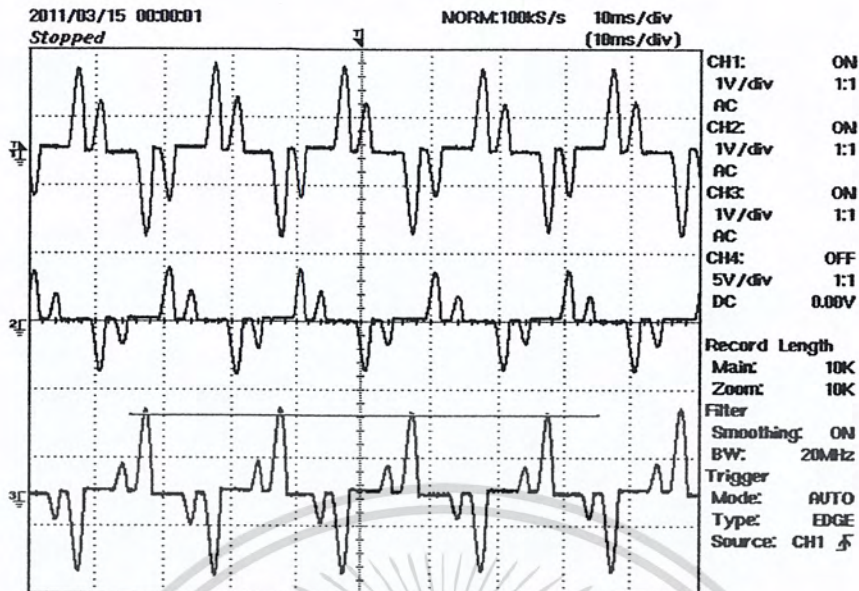
(ข) เฟส B



(ค) เฟส C

รูปที่ 4.34 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซล

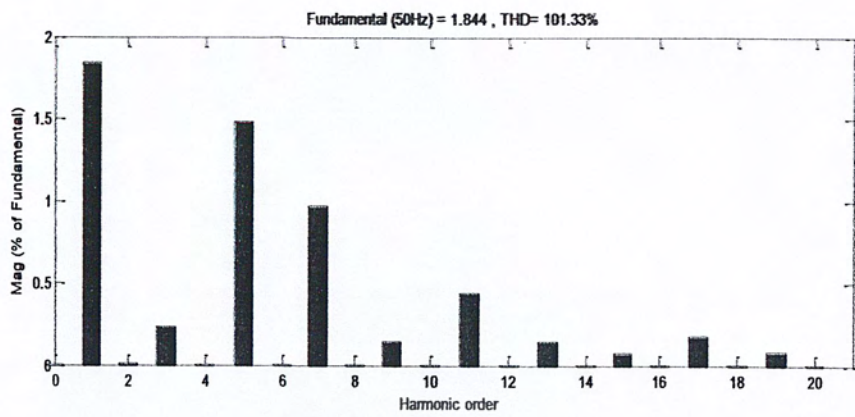
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



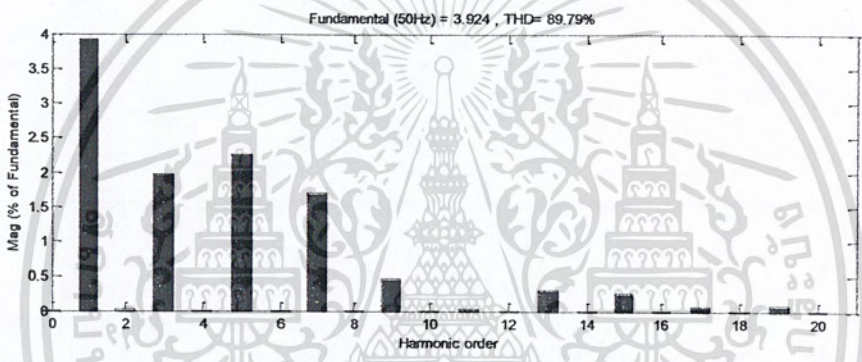
Copy To				Comment	Keyboard
PRNTR	PLTR	FILE	GP-IB	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	

รูปที่ 4.35 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่
สมดุล 3% แบบ Under voltage โดยไม่มีการติดตั้งใช้ค

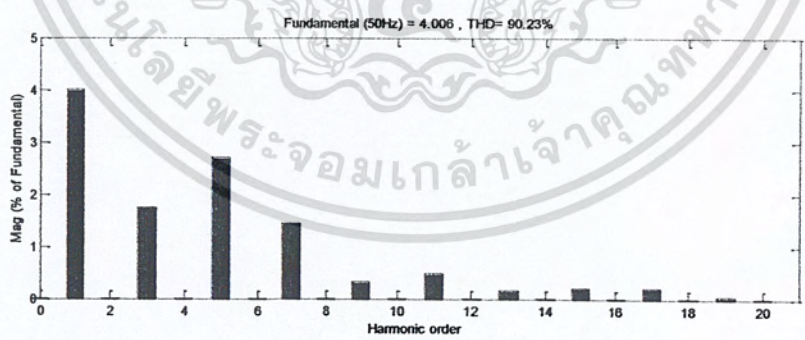
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สเปกตรัมกระแส เฟส A



สเปกตรัมกระแส เฟส B

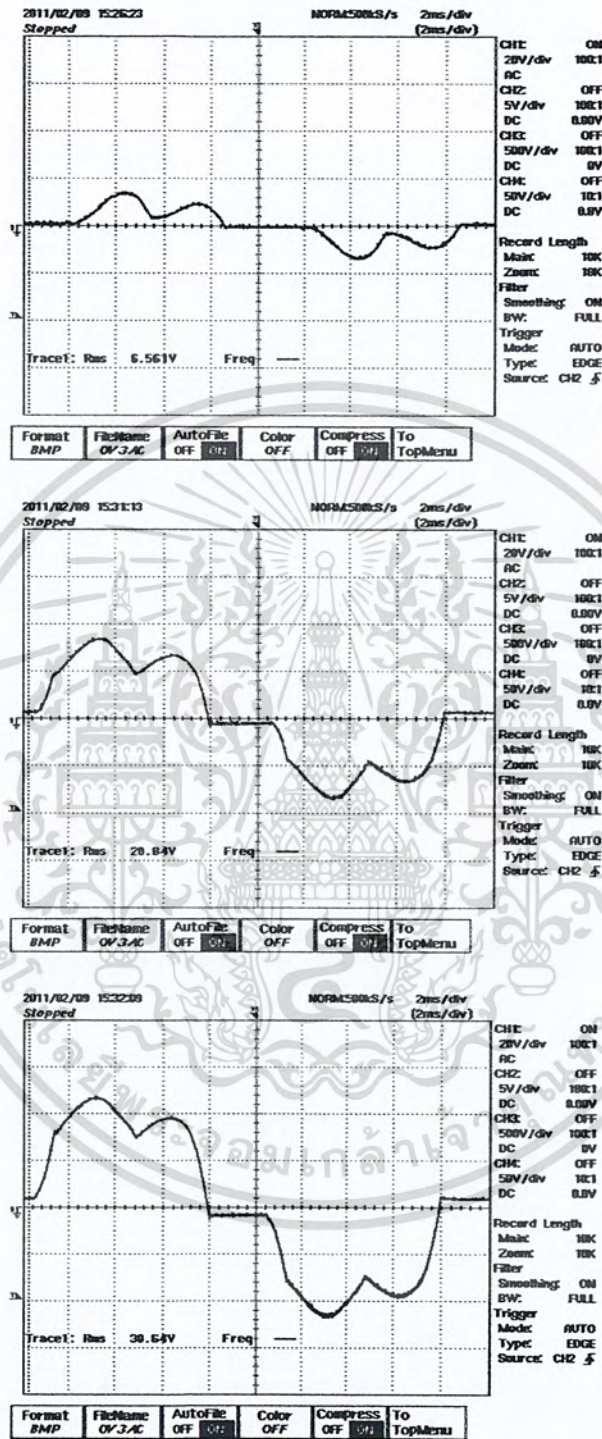


สเปกตรัมกระแส เฟส C

รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ

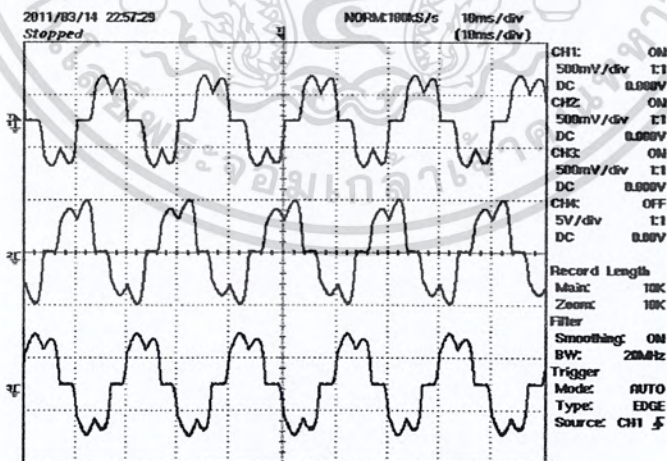
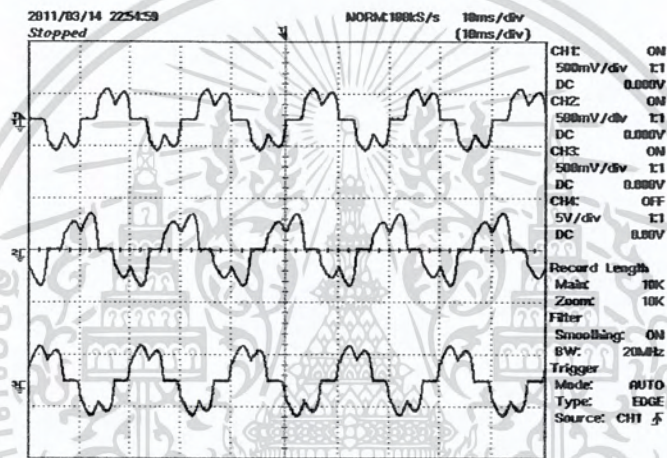
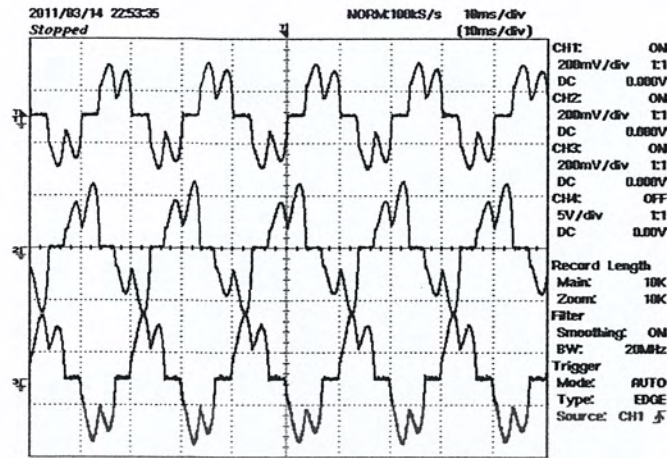
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.8 กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโซล



รูปที่ 4.37 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการติดตั้งโซล

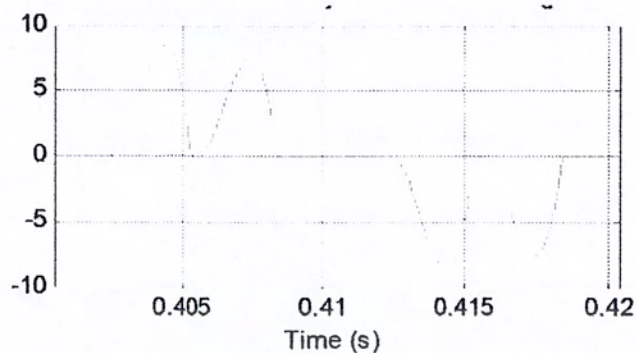
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



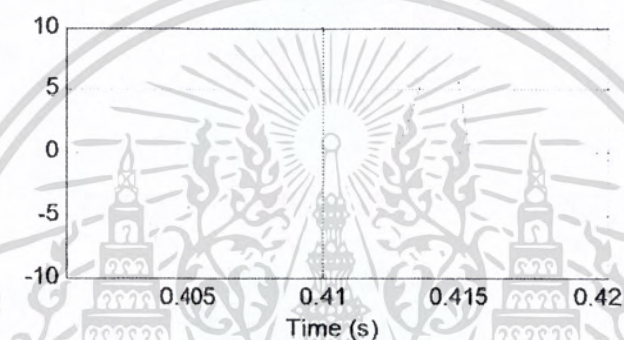
รูปที่ 4.38 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 3% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งใช้ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

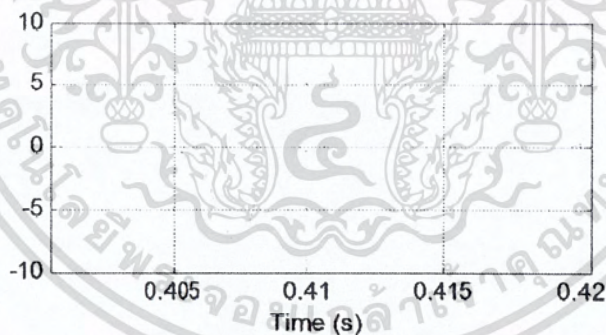
4.6.9 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage ที่ไม่มีการติดตั้งโซลด์



(ก) เฟส A



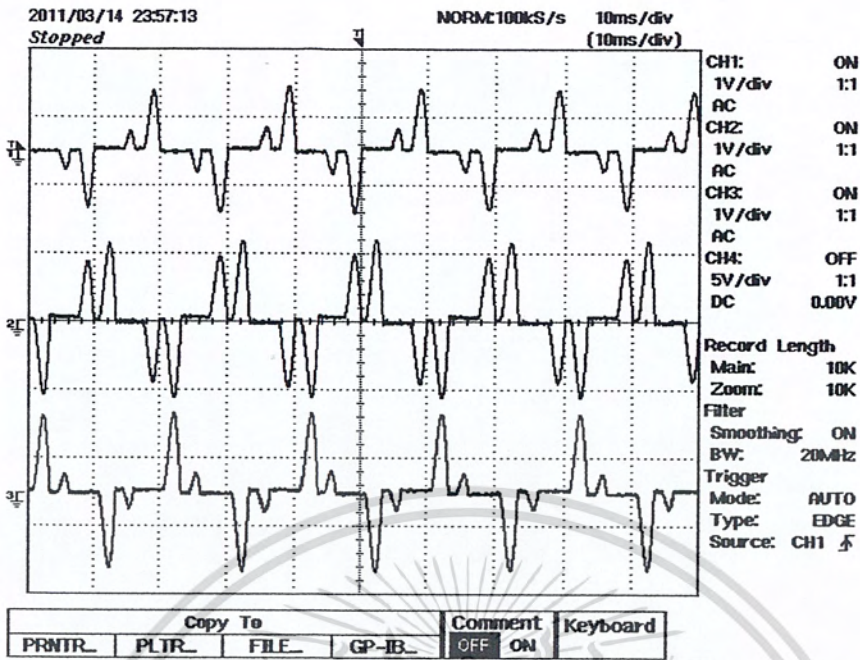
(ข) เฟส B



(ค) เฟส c

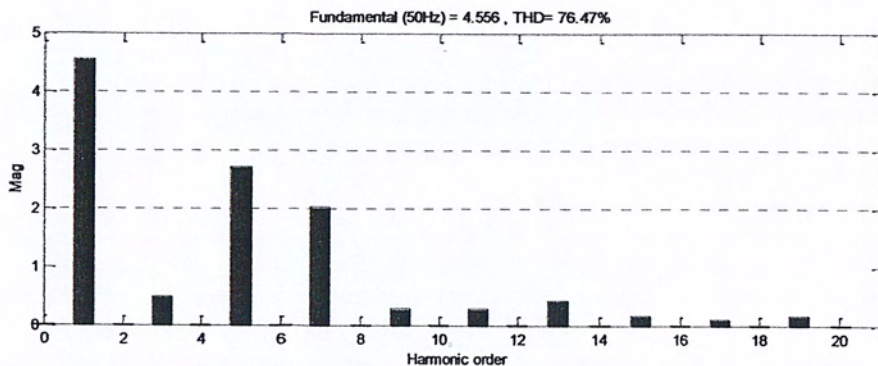
รูปที่ 4.39 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

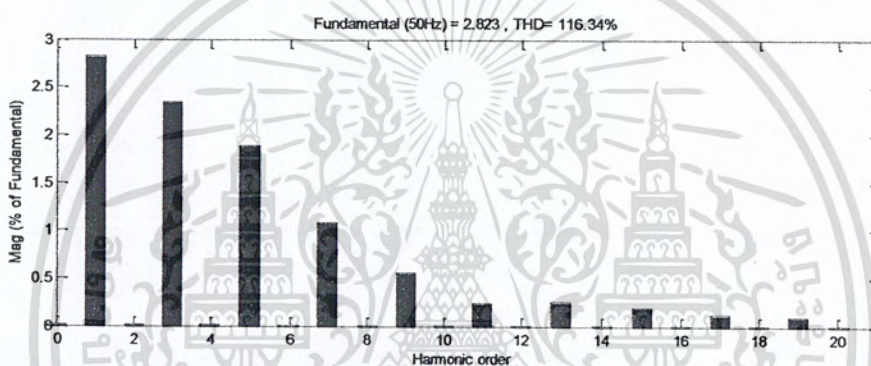


รูปที่ 4.40 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage โดยไม่มีการติดตั้งโซลิด

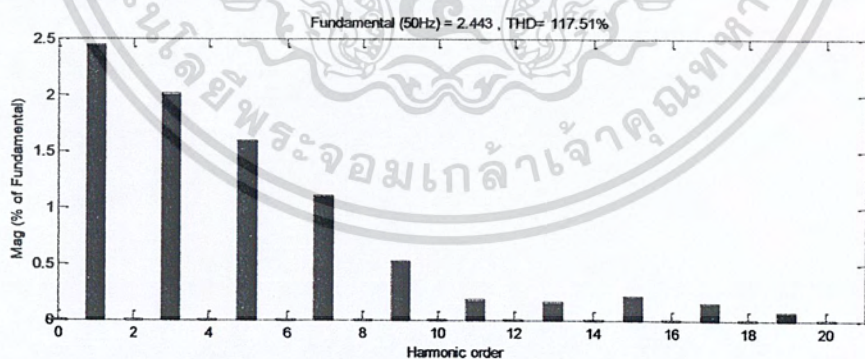
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สเปกตรัมกระแส เฟส A



สเปกตรัมกระแส เฟส B

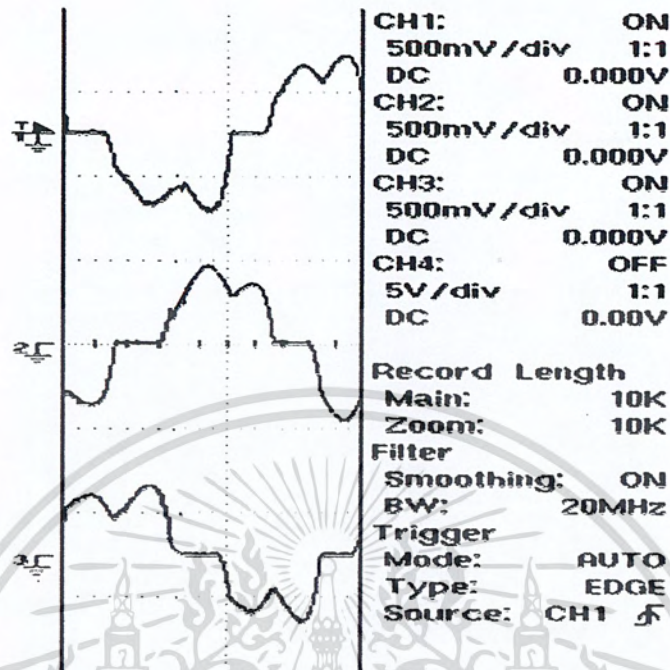


สเปกตรัมกระแส เฟส C

รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.10 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ over voltage ที่มีการติดตั้งโซล

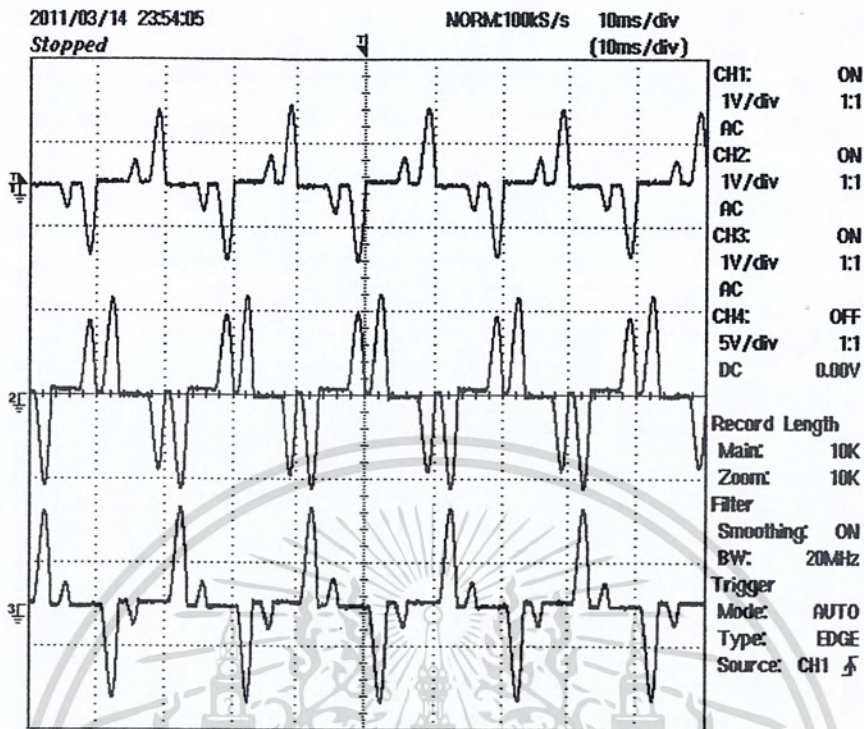


รูปที่ 4.42 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Over voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อมีการติดตั้งโซล

4.6.11 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage ที่มีการไม่มีการติดตั้งโซล

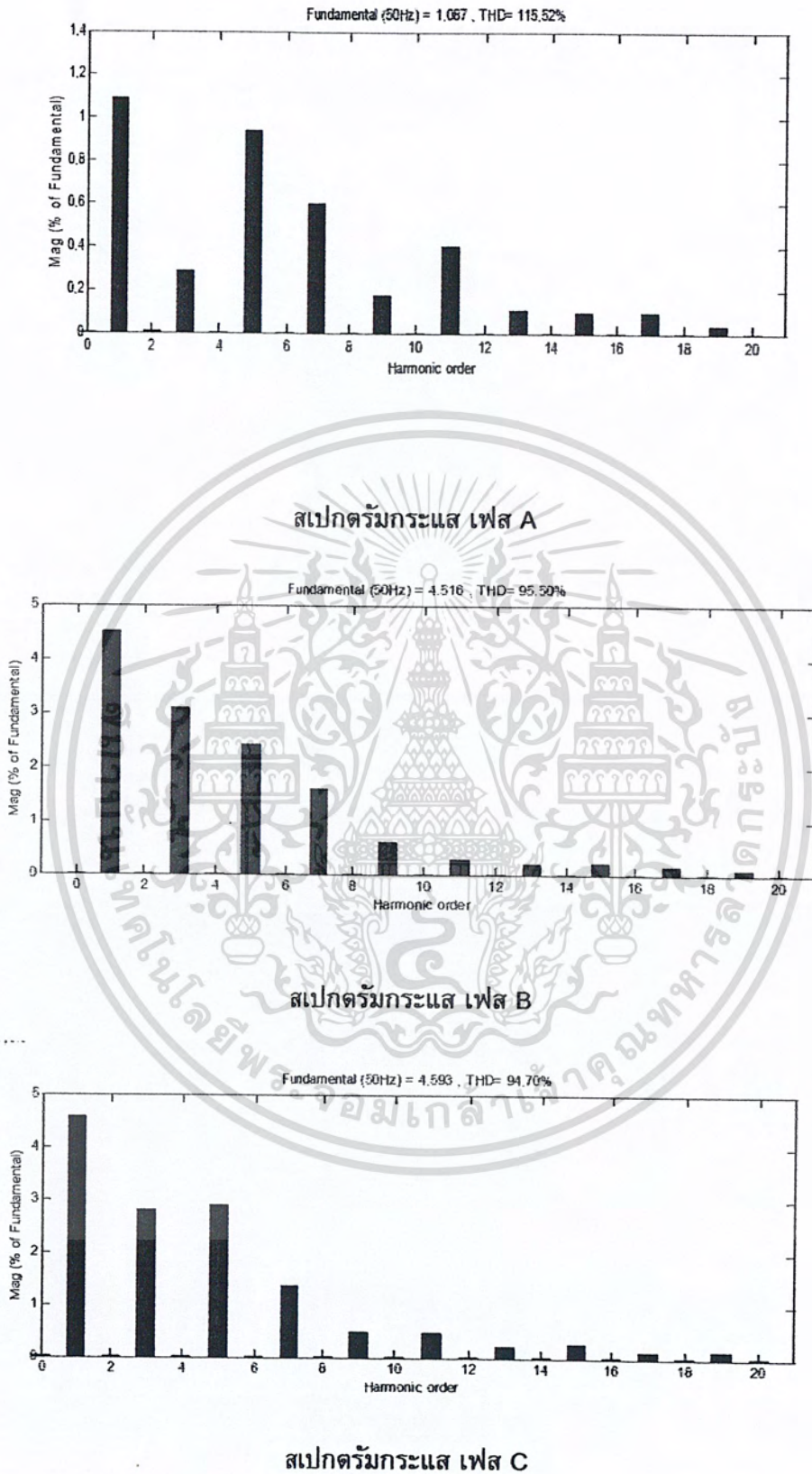


รูปที่ 4.43 กระแสอินพุท กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Under voltage ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายที่ภาระ 0.9 kW เมื่อไม่มีการติดตั้งโซล



รูปที่ 4.44 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่
สมดุล 5% แบบ Under voltage โดยไม่มีการติดตั้งโซลิด

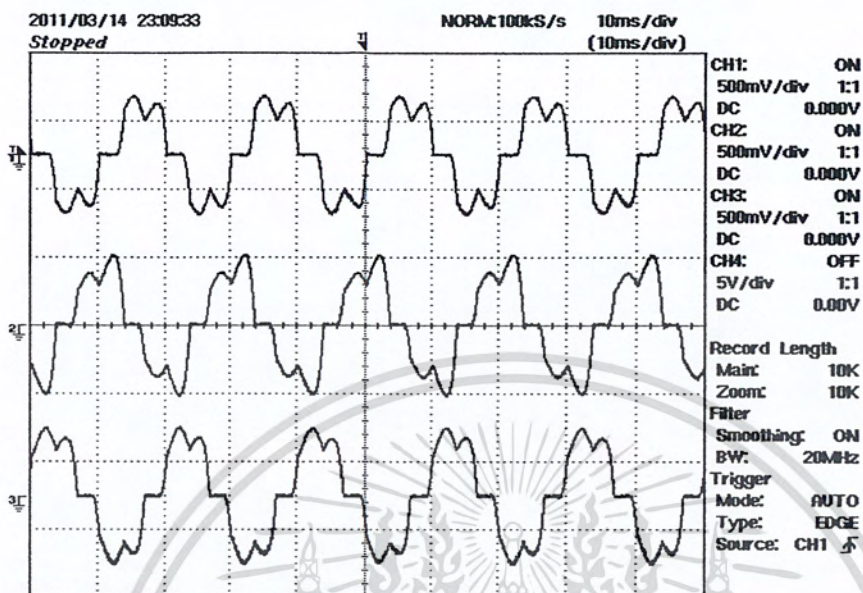
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่เฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.12 กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ under voltage ที่มีการติดตั้งโซลาร์



รูปที่ 4.46 ความเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสอินพุทเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กรณีแรงดันไม่สมดุล 5% แบบ Under voltage โดยมีการติดตั้งโซลาร์

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุทของอินเวอร์เตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล

Load (W)		Power input of Inverter (W)							
		No Load		400		800		1400	
Condition		Simulation	experimen	Simulation	experimen	Simulation	experimen	Simulation	experimen
1%-O	woc	402	370	890	882	1338	1300	1719	1640
	wc	392	363	881	873	1327	1290	1708	1650
3%-O	woc	404	350	877	853	1352	1320	1753	1740
	wc	398	342	880	857	1341	1280	1747	1730
5%-O	woc	411	398	906	897	1365	1330	1767	1740
	wc	401	376	888	874	1346	1320	1754	1730
1%-U	woc	407	381	890	877	1356	1320	1732	1690
	wc	387	376	856	845	1334	1310	1780	1740
3%-U	woc	410	370	875	886	1354	1347	1767	1756
	wc	397	359	882	873	1343	1330	1761	1750
5%-U	woc	412	350	902	892	1339	1270	1752	1720
	wc	401	345	895	871	1328	1260	1734	1710

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณีแรงดันไม่สมดุล

Load (W)		Power output of Inverter (W)							
		No Load		400		800		1400	
Condition		Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment	Simulation	experiment
1%-O	woc	273	275	734	742	1234	1210	1748	1710
	wc	272	267	731	729	1221	1189	1723	1690
3%-O	woc	274	285	724	722	1212	1200	1753	1730
	wc	271	216	715	707	1207	1140	1732	1660
5%-O	woc	276	274	770	766	1252	1130	1762	1670
	wc	277	285	787	777	1235	1190	1748	1670
1%-U	woc	275	274	745	734	1234	1170	1744	1760
	wc	273	270	723	765	1223	1100	1721	1750
3%-U	woc	276	263	736	729	1237	1239	1732	1739
	wc	272	218	774	763	1225	1180	1711	1700
5%-U	woc	276	250	782	775	1252	1240	1769	1630
	wc	275	234	765	754	1230	1210	1748	1750

หมายเหตุ

woc = without choke

wc = with choke

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลอง ทั้งในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB / Simulink และการทดสอบจริงพบว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งโช๊คด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้น ทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายอยู่ในสถานะสมดุลและไม่สมดุล จะส่งผลให้อัตราการสั่นไหวของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่สร้างออกมาจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะสูงเกินกว่าข้อกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิก ความแตกต่างของลักษณะระหว่าง AC Choke และ DC Choke เมื่อถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในการลดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส %THDi ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ขนาดต่อหน่วย และแรงดันตกคร่อมโช๊ค ดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.19-4.22

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบคุณลักษณะของ AC Choke และ DC Choke

	%THDi	Power Factor	ขนาด	แรงดันตกคร่อมโช๊ค
ไม่ติดตั้ง Choke	75%-90%	60%-80%	-	-
ติดตั้ง AC Choke	35%-45%	80%-90%	ปานกลาง (ต่อ 3 เฟส)	3% (ติดตั้งที่ด้านหน้า ชุดขับเคลื่อน)
ติดตั้ง DC Choke	30%-40%	85%-95%	เล็ก (ต่อ 1 เฟส)	น้อยกว่า 1% (ติดตั้งที่ซีลิ่งค์)
ติดตั้ง AC+DC Choke	30%-35%	90%-95%	ใหญ่ (ใช้โช๊ค 2 ตำแหน่ง)	3%-4%

ดังนั้นสามารถเลือกใช้วิธีการติดตั้งโช๊คที่ตำแหน่งต่างเพื่อปรับปรุงรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยน เพาเวอร์แฟกเตอร์ และค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ให้มีความเหมาะสมตามลักษณะงานที่ใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เนื่องจากวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ภายในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นวงจรไม่เชิงเส้นทำให้รูปคลื่นกระแสต้านเข้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีความผิดเพี้ยนไม่ต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆที่ใช้ไฟฟ้าร่วมกัน จะทำให้ได้รับกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปด้วย ในปริณญาณิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองและทดสอบผลกระทบที่เกิดจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดที่ใช้ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์แบบ 6 พัลส์ทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่สมดุล

การจำลองระบบนั้นในลำดับแรกจะใช้ค่าพารามิเตอร์และคุณลักษณะของระบบจริงมาสร้างระบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink เพื่อให้ได้คุณลักษณะของระบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ใกล้เคียงกับระบบจริงที่จะใช้ในการทดสอบกรณีต่างๆ หลังจากนั้นทำการจำลองโดยนำค่ากระแสอินพุทเมื่อชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายภาระสูงสุดที่ 1.4 kW ศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุท (%THDi) องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆเปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก เพาเวอร์แฟกเตอร์ และกำลังไฟฟ้าทั้งด้านหน้าและที่ออกจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส หลังจากนั้นปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยการออกแบบ AC Choke ติดตั้งทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และออกแบบ DC Choke ติดตั้งตรงส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และติดตั้งอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดพร้อมกัน จากการเปรียบเทียบระบบจำลองที่สร้างขึ้นกับการทดสอบมีแนวทางเดียวกันกับระบบจริงที่ได้ทำการทดสอบ กล่าวคือเมื่อมีการติดตั้ง AC Choke ด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทมีความต่อเนื่องเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม %THDi ลดลง องค์ประกอบฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิกอันดับต่างๆเป็นไปตามข้อกำหนดฮาร์มอนิก โดยฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบจะสูงขึ้น เมื่อติดตั้ง DC Choke ให้ผลคล้ายกับกรณีการติดตั้ง AC Choke แตกต่างตรงที่ DC Choke โดยลักษณะมีขนาดโดยรวมแล้วเล็กกว่าเนื่องจากใช้ต่อหนึ่งเฟสเท่านั้นที่ตีซีลิ่งค์ ทั้งยังไม่มีผลกระทบของแรงดันตกคร่อมเหมือนกับ AC Choke เพราะค่าแรงดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไลน์ที่จ่ายให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะลดลงเนื่องมาจากกระแสที่ไหลผ่าน AC Choke จะทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก และผลจากการติดตั้งอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดพร้อมกันได้ผลสอดคล้องกับการติดตั้งใน 2 กรณีดังที่กล่าวมา ผลกระทบจากภาระทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นโดยใช้กำลังไฟฟ้านอกจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเปรียบเทียบพบว่าค่า%THDi จะลดลง, กระแสที่ความถี่หลักมูลจะสูงขึ้น, องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆจะลดลง, เพาเวอร์แฟคเตอร์ดีขึ้น และจากทดลองที่สภาวะแรงดันไม่สมดุลเพื่อศึกษาผลกระทบจะพบว่าเกิดองค์ประกอบฮาร์มอนิกกลุ่มที่ 3 หารไม่ลงตัวขึ้นและค่ากระแสทั้งสามเฟสและ%THDi มีค่าไม่เท่ากัน มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุตมากขึ้น เมื่อติดตั้งโซ๊คแล้วทำให้รูปคลื่นกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากขึ้น และค่า%THDiจะลดลง

จากการเปรียบเทียบการติดตั้งโซ๊คเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยการติดตั้ง AC Choke และ DC Choke พร้อมกันจะสามารถลด %THDi ได้มากที่สุด องค์ประกอบฮาร์มอนิกลดลงมากที่สุด แต่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของแรงดันที่ตกคร่อมในส่วน AC Choke ด้วย กรณี DC Choke ค่าที่เหมาะสม หรือค่าที่วิกฤตสามารถให้ผลของการลดกระแสฮาร์มอนิกได้ดีกว่า AC Choke ที่กำลังไฟฟ้าขาออกจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แต่การติดตั้ง AC Choke จะทำการติดตั้งได้ง่ายกว่าโดยติดตั้งที่แหล่งจ่ายไฟกระแสลับได้โดยตรง โดยการออกแบบติดตั้ง AC Choke ไม่ควรทำให้แรงดันที่จ่ายเข้าสู่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ สามารถพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์แรงดันที่ตกคร่อม AC Choke ดังนั้นความเหมาะสมในติดตั้ง AC Choke หรือ DC Choke เพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าทางด้านหน้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะขึ้นอยู่กับระบบที่จะทำการปรับปรุงเนื่องจากมีหลายปัจจัยได้แก่ %THDi ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เพาเวอร์แฟคเตอร์ แรงดันที่ตีซีลิ่งค์ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่ทางปริญญาพันธ์นี้จะเสนอเกี่ยวกับการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสและวิธีการลดความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุทโดยการติดตั้งโช๊ค

1. ในการทดลองไม่ได้ทำการทดสอบที่พิกัดกำลังสูงสุดของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคือที่ 5.5 kW ทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดประมาณ 1.8kW เท่านั้น เป็นเพียงการศึกษาหาแนวโน้มและผลกระทบการติดตั้งโช๊คเพื่อปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

2. ในการออกแบบ AC Choke ในปริญญาพันธ์ต้องคำนึงถึงแรงดันตกคร่อมโช๊คเนื่องจากต้องจ่ายแรงดันเข้าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามคุณสมบัติของชุดขับนั้นๆ ควรออกแบบให้มีค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมโช๊คที่ 3%-5% เพราะถ้ามากกว่านี้จะทำให้แรงดันไฟตรงที่ตีซีลิ่งค์ลดลงมากเกินไป

3. สามารถใช้การติดตั้ง DC Choke แทน AC Choke ในกรณีที่ค่าแรงดันอินพุทลดลงเนื่องจากผลของแรงดันตกคร่อมใน AC Choke ซึ่งการออกแบบ DC Choke สามารถใช้ค่าอินดักแตนซ์ที่วิกฤตในส่วนของตีซีลิ่งค์ช่วยในการออกแบบและต้องสามารถทนกระแสที่พิกัดสูงสุดได้

4. ในกรณีที่การติดตั้งในข้อ 2 และ 3 ไม่สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกให้เป็นตามข้อกำหนดได้ สามารถใช้การติดตั้ง AC Choke และ DC Choke พร้อมกันเพื่อให้ %THDi และองค์ประกอบฮาร์มอนิกลดลงมากกว่ากรณีข้อที่ 2 และ 3

บรรณานุกรม

- [1] N. Mohan, T .M. Underland, and W.P. Robbins. **Power Electronics Converter, Application and Design**, 2nd edition John Wiley & Sons, 1995.
- [2] โดศักดิ์ ทัศนานุกริยะ, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง พ.ศ.2540.
กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2540
- [3] P. Caramia,G Carpinelli, F .Pezza , P. "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). " ขีดจำกัดสำหรับสิ่งที่ส่งออกมาซึ่งเป็นฮาร์โมนิก " (กระแสไฟฟ้าเข้า ≤ 16 แอมแปร์ ต่อเฟส), กรุงเทพมหานคร.
- [9] วสันต์ อู่ยายโสสม. "การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์โมนิกและการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ."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] Mahesh. M. Swamy, "**Passive Techniques for Reducing Input Current Harmonics.**" Yaskawa Electric America,10 Nov. 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] **Malcolm Barnes**, "Practical Variable Speed and Power Electronics"
Newnes, 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



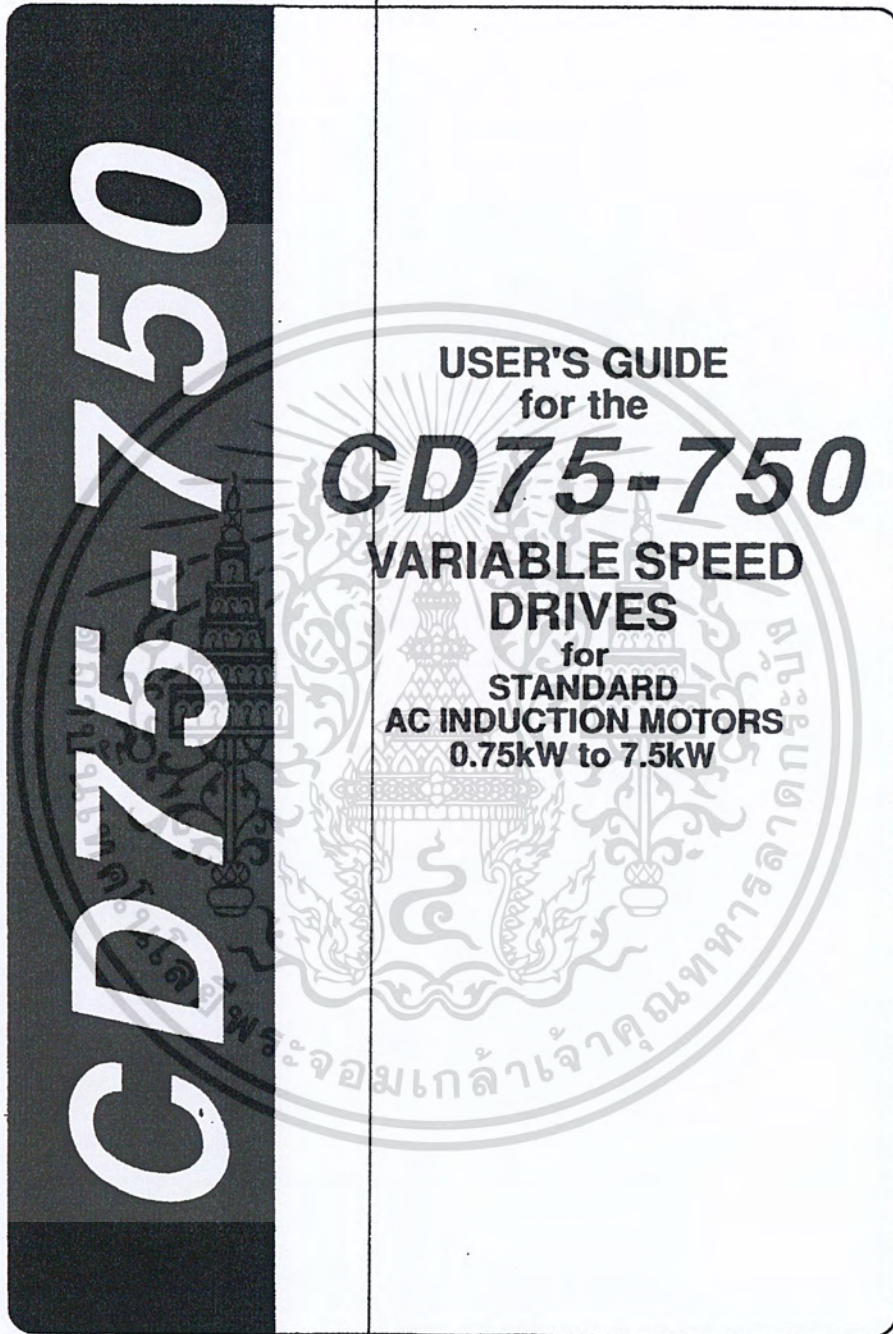
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คู่มือชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส CD75-750



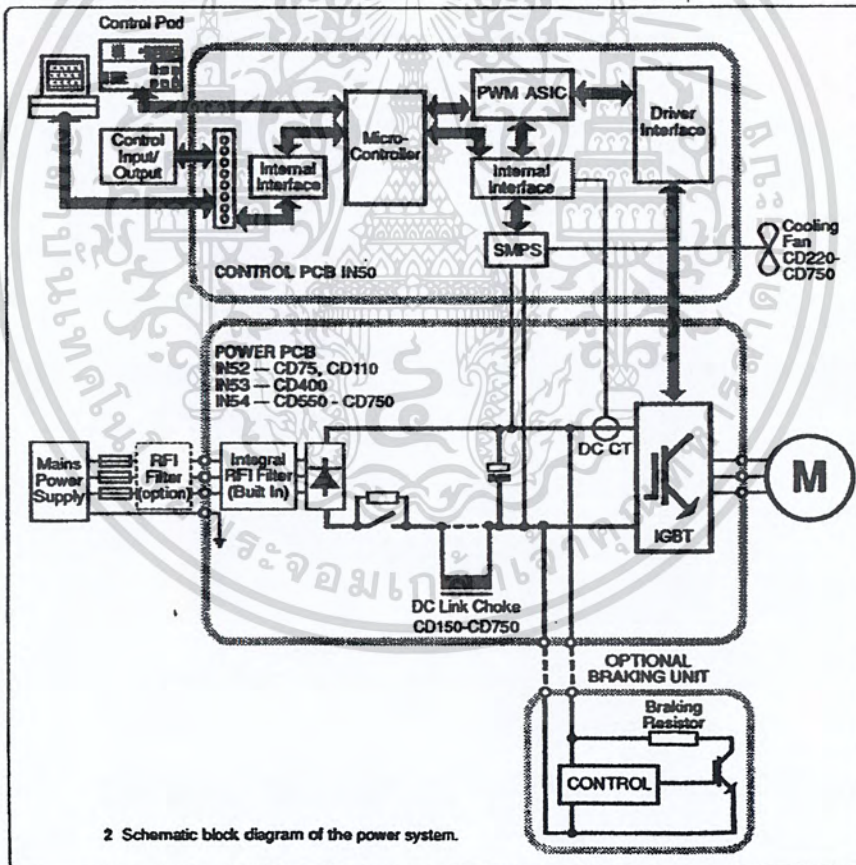
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD75-750

- Full digital control.
- Complete digital adjustment of drive parameters.
- Insulated gate bipolar transistor (IGBT) output bridge for high speed switching and low power consumption.
- Motor speed digitally-controlled from 0Hz to 960Hz.
- Choice of up to four switching frequencies in the range 2.9kHz to 11.7kHz.
- Fixed and alternatively variable V/f characteristic.
- Internal monitoring and protection includes Ixt overload, current limit, peak current limit, instantaneous overcurrent and individual IGBT protection.
- Complete isolation between control and power electronic circuits. Impedance isolation for ac supply and dc link voltage feedback.
- Ability to start the drive when the motor is spinning, in either direction, without large transient torques.
- 150% (industrial) and 120% (HVAC) starting torque.
- DC injection braking.
- Removable control pod for additional security.
- Fully-isolated RS485 serial communications interface.
- Integral RFI filter as standard.
- Supply-phase loss protection and mains discontinuity ride-through.
- Programmable presetting of speeds and jog.
- Programmable skip frequencies.
- Selectable auto-restart after trip.
- Mountings for front-of-panel or through-hole.
- Auto-logging of fault events data.
- Efficient thermal management, derating not required.
- Slip compensation.



2 Schematic block diagram of the power system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Motor Speed

Standard squirrel-cage ac induction motors are designed as single speed machines. If it is intended to use the capability of the drive to run the motor at speeds above its designed maximum, it is strongly recommended that the motor manufacturer is consulted first.

The principal risks due to overspeeding are the destruction of the rotor by centrifugal force, or of the bearings by vibration or heat.

Low speed is liable to result in overheating of the motor because the effectiveness of the internal cooling fan reduces in proportion to the square of the reduction of speed. Motors should be equipped with thermistor protection, and if full benefit of the use of low speeds is to be gained from a variable speed drive it may be necessary to arrange additional cooling for the motor.

4.2 Power Connections

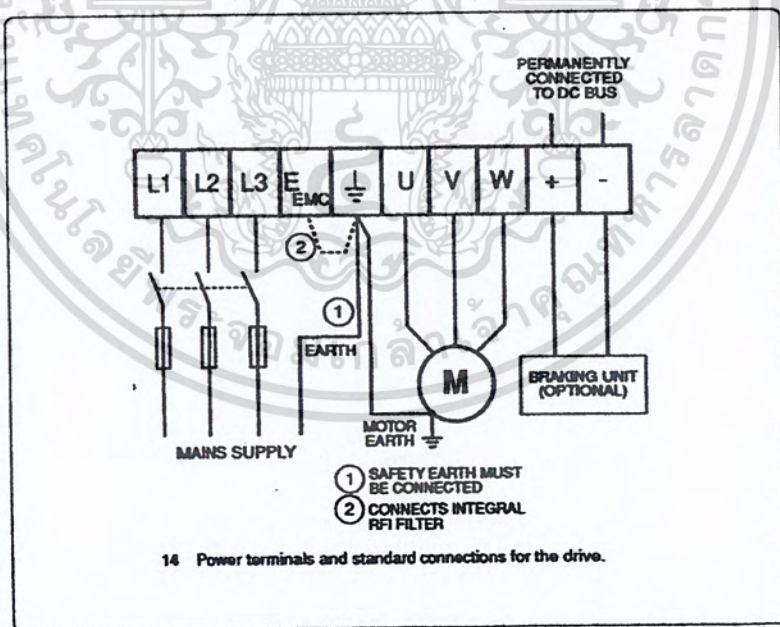
Refer to Fig 14.

Terminals

Access to the power connections is gained by removing the Terminal Cover, Fig. 13. If internal RFI filtering is required, link the power earth and the E_{EMC} terminals by a 2.5mm² wire link, Fig. 14.

L1	Line 1(R)	"U"	Motor Phase - U	+	DC Link Positive
L2	Line 2(S)	"V"	Motor Phase - V	-	DC Link Negative
L3	Line 3(T)	"W"	Motor Phase - W		
		E _{EMC}	Integral RFI filter		
					⊕ Power earth

The layout of the power terminals and connections is shown in Fig. 14.

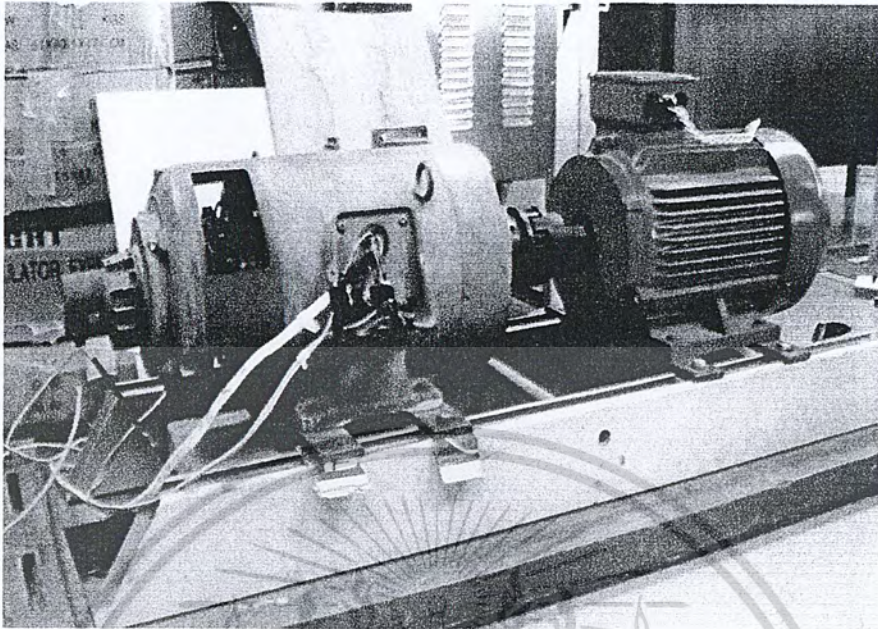


ภาคผนวก ข

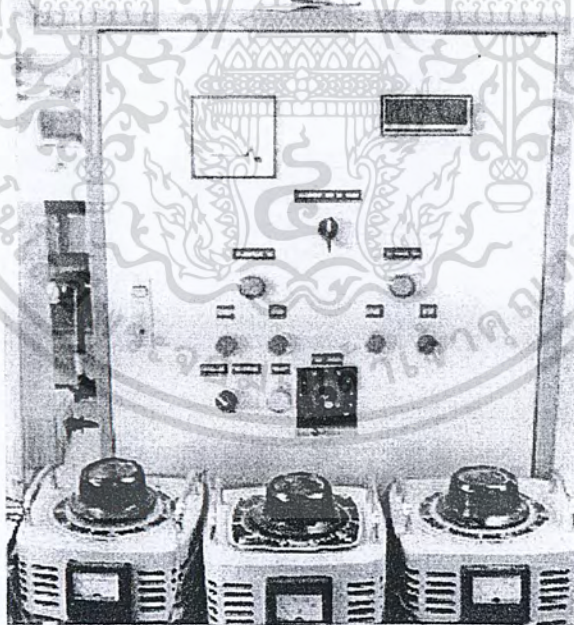
รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

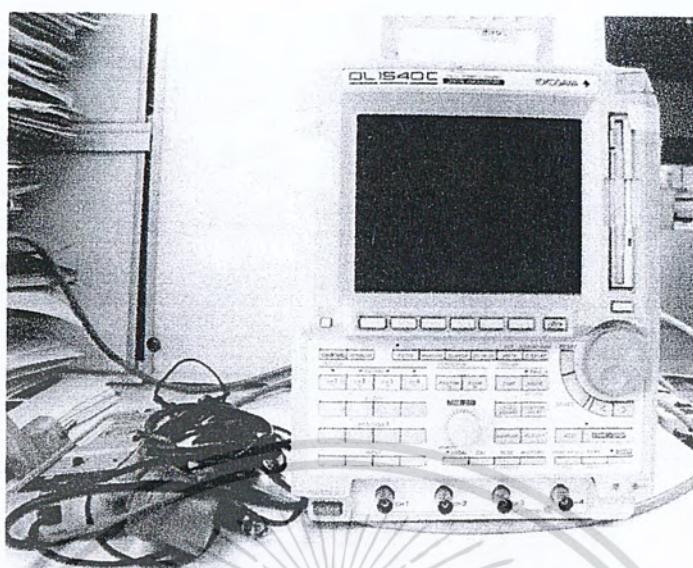


DC motor และ Induction motor



ASD และ Variac 1 เฟส 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

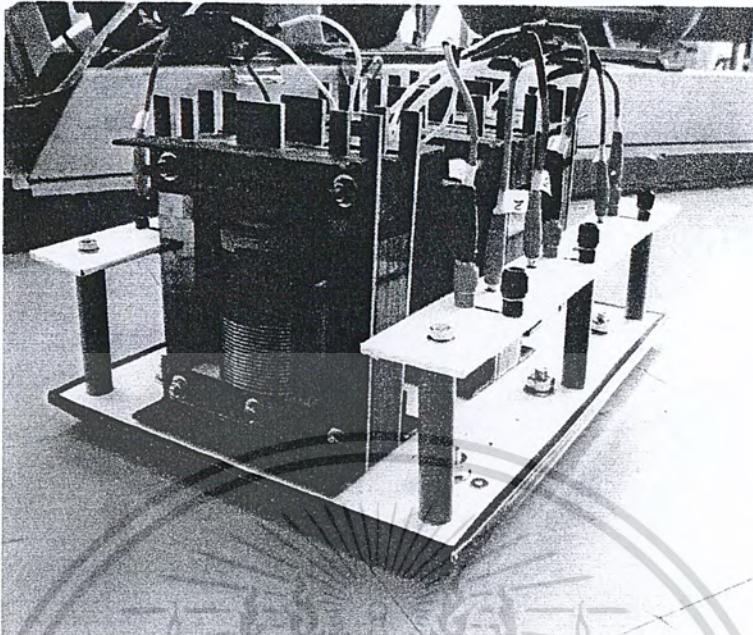


Oscilloscope



Power Quality Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

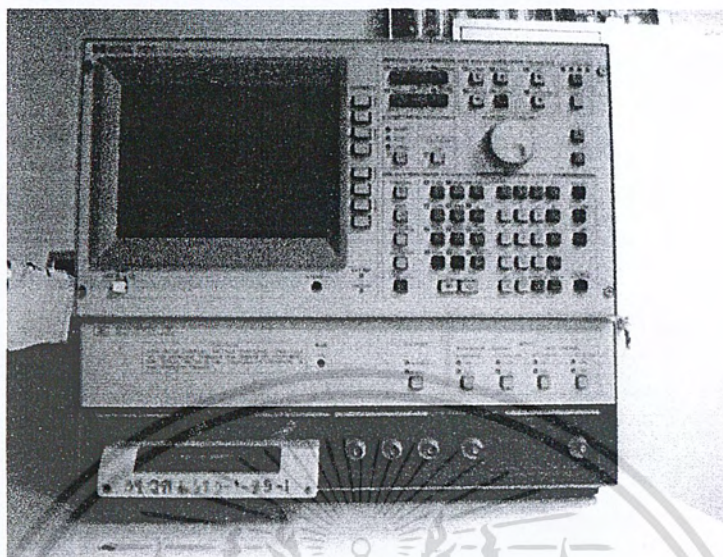


AC reactor



DC reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องวัดค่ารีแอกแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นาย กรธานินทร์ ยูปานันท์ เกิดวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2532
 ที่อยู่ 904/10508 ถ.ราชวิถี แขวงดุสิต กทม. 10300
 โทรศัพท์ 084-0159548 Email k.yupanan@gmail.com
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เกียรติวีรพงศ์ รวงษ์จิ เกิดวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2531
 ที่อยู่ 27/1 ม.5 ต.ตาลเดี่ยว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี 18110
 โทรศัพท์ 085-8298970 Email 0148eng_kmitl@hotmail.co.th
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย คณิน พันธุเวช เกิดวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2531
 ที่อยู่ 94/21 ม.5 ต.ห้วยกะปิ อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20130
 โทรศัพท์ 087-0403622 Email kanin.pantuwate@gmail.com
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้