

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนต่อหม้อแปลงหนึ่งเฟส

EFFECT OF DISTORTION POWER ON 1- ϕ TRANSFORMER



ประภาพรรณ เคลือบวันรัตน์
PRAPAPAN KHLUABWANNARAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 47530
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-559-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF DISTORTION POWER ON 1- ϕ TRANSFORMER



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

2003

ISBN 974-324-559-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนต่อหม้อแปลงหนึ่งเฟส
นักศึกษา	นางสาวประภาพรณ เคลือบวัฒนรัตน์
รหัสนักศึกษา	43061026
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. สุลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีได้ในระบบไฟฟ้าปัจจุบัน ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าปรากฏ(Apparent Power)มีค่าเพิ่มสูงขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน(Distortion Power) ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนต่อหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส และเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยคำนึงถึงความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD)และอาศัยสมการการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และBudeanu ทำการทดสอบโดยหม้อแปลงแบบ 1 เฟส พิกัด 1 kVA 220/110V 50 Hz จ่ายโหลดจริงแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) 15%, 30% และ 50% และจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ โดยใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณของแรงดันและกระแสด้วยหลักการของ Fast Fourier Transform(FFT) ในโปรแกรม MATLAB เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมการที่มีอยู่ในการหาสมการที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดสอบ ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาลำดับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนของอินเวอร์เตอร์ เพื่อการจ่ายโหลดมอเตอร์ และเป็นแนวทางในการหาลำดับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนในระบบไฟฟ้าเนื่องจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลักษณะอื่นๆ

Thesis Title	Effect of Distortion Power on 1- ϕ Transformer
Student	Miss. Prapapan Khluabwannarat
Student ID.	43061026
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Sulee Bunjongjit

ABSTRACT

Distortion power is related to nonlinear voltage and current waveforms occurring in a power system. This affects to an increase in apparent power. This thesis is aimed to characteristics study the of distortion power, effects of distortion power on a 1- ϕ transformer and power factors due to nonlinear loads considering the total harmonic current distortion (THD_i). Various formulas of distortion power according to Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki and Budeanu are employed in calculations. Tests are conducted with linear and nonlinear loads of 15%, 30% and 50% total harmonic current distortion (THD_i). Mixed loads, which are combinations between linear and nonlinear current load, are also used in the testes. The distortion powers obtained from the tests are, then, compared with that from the calculations. The analysis of voltage and current signals is performed using Fast Fourier transform (FFT) on the MATLAB program. The suitable formulas for the test system are determined. The result derived from this study can be applied to find the distortion power due to an inverter supplying load motor current and can be used to determine the distortion power with other nonlinear loads.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก รศ. ศุภี บรรจงจิตร ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ. มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์ ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อ.เชาว์น ชมภูอินไหว อ.สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยเป็นอย่างดี และให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเรื่องเครื่องมือวัดทางไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อ.บุญเลิศ สือเลข และ อ.ปัญญา มาลีวัตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้คำแนะนำเรื่องการทดสอบเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อ.สิริวิช ทัดสวน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีชนบุรี ที่ให้คำแนะนำในเรื่อง พิกัด เก-แฟคเตอร์ อันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง และ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ และยังให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักยิ่งที่สนับสนุนและให้กำลังใจที่ดี มาตลอดเวลาและตลอดไป

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประกาศ ณ กรุงเทพมหานคร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XXVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่จะได้จากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 หลักการใหม่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีฮาร์โมนิกส์.....	5
2.1.1 กระแสฮาร์โมนิกส์.....	6
2.1.2 แรงดันฮาร์โมนิกส์.....	6
2.1.3 ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม(Total Harmonic Distortion : THD).....	7
2.1.4 ค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมด(Total Demand Distortion : TDD).....	7
2.1.5 ค่าตัวประกอบค่ายอด.....	8
2.1.6 ลำดับฮาร์โมนิกส์.....	8
2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์.....	8
2.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สร้างเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่เป็น จำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน.....	9
2.2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สร้างกระแสฮาร์โมนิกส์ทั้งที่มีความถี่เป็นจำนวน เท่าและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน.....	9
2.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.3.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.3.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า.....	12
2.3.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อเบงก์คาปาซิเตอร์.....	12
2.3.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อฟิวส์.....	13
2.3.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า.....	13
2.3.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า.....	13
2.4 หม้อแปลงพิกัด เค-แฟคเตอร์ (K-Factor rated Transformer).....	14
2.4.1 การคำนวณ เค-แฟคเตอร์.....	15
บทที่ 3 สมการของกำลังไฟฟ้า.....	20
3.1 สมการของกำลังไฟฟ้า.....	20
3.2 สมการของค่าตัวประกอบกำลัง.....	23
3.3 สมการของกำลังไฟฟ้าผิผิว.....	23
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	27
4.1 ขั้นตอนการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว.....	27
4.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดตามเงื่อนไขต่างๆ.....	35
4.2.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	35
4.2.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	36
4.2.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	40
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	41
4.2.4.1 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น.....	41

สารบัญ(ต่อ)

4.2.4.2 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็นAC-DC full wave Thyristor Converter.....	49
4.2.4.3 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็นAC-DC half wave Thyristor Converter.....	70
4.2.4.4 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็นAC-AC Converter.....	91
4.3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลด แบบเป็นเชิงเส้น ร่วมกับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	113
4.3.1 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _i) 10%, 20%, 30%.....	113
4.3.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _i) 10%, 20%, 30%.....	119
4.3.3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _i) 10%, 20%, 30%.....	125
4.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการ คำนวณด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd , Filipski, Czarnecki, Budeanu.....	132
4.5 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน โดยอินเวอร์เตอร์.....	134
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	141
5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	141

สารบัญ(ต่อ)

5.1.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100%.....	141
5.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100%.....	141
5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบเป็นเชิง เส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	143
5.2 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu, Shephere, Filipski, Czarnecki, Budeanu.....	146
5.3 ผลของกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นที่มีต่อ K-Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	147
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	149
6.1 บทสรุป.....	149
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	150
เอกสารอ้างอิง.....	152
ภาคผนวก.....	154
ภาคผนวก ก.	155
ภาคผนวก ข	163
ภาคผนวก ค	165
ประวัติผู้เขียน.....	172

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่มูลฐาน.....	6
2.2 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์.....	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์โมนิกส์ แรงดันฮาร์โมนิกส์ และอิมพีแดนซ์ ของระบบ.....	11
3.1 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า.....	22
4.1 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน.....	29
4.2 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยสมการของ Budeanu and Shepherd (สมการที่ 3.20).....	31
4.3 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยสมการของ Filipski (สมการที่3.25).....	32
4.4 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยสมการของ Czarnecki (สมการที่3.27).....	33
4.5 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยสมการของ Budeanu (สมการที่3.29).....	34
4.6 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	35
4.7 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้นแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็น เชิงเส้น จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	36
4.8 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้นแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็น เชิงเส้น จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	36
4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อ แปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	38
4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการ คำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	39
4.11 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น.....	40
4.12 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นAC-DC full wave Thyristor Converter.....	40
4.13 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นAC-DC half wave Thyristor Converter.....	40
4.14 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นAC-AC Converter.....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟาย ออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทาน จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	42
4.16 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟาย ออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้าน จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	42
4.17 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	43
4.18 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	43
4.19 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	44
4.20 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	44
4.21 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	45
4.22 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	45
4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ..	48
4.24 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	49
4.26 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	49
4.27 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	50
4.28 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	50
4.29 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	51
4.30 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	51
4.31 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	52
4.32 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15%.....	55
4.34 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%.....	55
4.35 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope	56
4.36 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	56
4.37 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	57
4.38 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	57
4.39 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	58
4.40 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.41 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....59
- 4.42 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....59
- 4.43 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30%.....62
- 4.44 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30%.....62
- 4.45 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....63
- 4.46 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....63
- 4.47 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....64
- 4.48 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	65
4.50 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	65
4.51 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	66
4.52 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	66
4.53 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50%.....	69
4.54 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50%.....	69
4.55 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	70
4.56 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	71
4.58 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	71
4.59 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	72
4.60 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	72
4.61 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	73
4.62 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	73
4.63 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15%.....	76
4.64 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 15%.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.65 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope 77	77
4.66 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....77	77
4.67 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....78	78
4.68 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....78	78
4.69 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....79	79
4.70 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....79	79
4.71 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....80	80
4.72 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....80	80

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.73 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 30%.....	83
4.74 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม (THD,) 30%.....	83
4.75 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope	84
4.76 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	84
4.77 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	85
4.78 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	85
4.79 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	86
4.80 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.81 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	87
4.82 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	87
4.83 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 50%.....	90
4.84 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD,) 50%.....	90
4.85 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15%จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	91
4.86 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	91
4.87 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	92
4.88 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	92

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.89 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	93
4.90 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	93
4.91 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	94
4.92 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	94
4.93 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15%.....	97
4.94 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 15%.....	97
4.95 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope	98
4.96 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	98
4.97 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.98 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	99
4.99 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	100
4.100 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	100
4.101 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	101
4.102 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	101
4.103 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30%.....	104
4.104 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD _r) 30%.....	104
4.105 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD _r) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	105
4.106 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD _r) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.107 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	106
4.108 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	106
4.109 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	107
4.110 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	107
4.111 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	108
4.112 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	108
4.113 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50%.....	111
4.114 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 50%.....	111
4.115 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD _i) 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.116 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 10% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....113
- 4.117 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....114
- 4.118 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....114
- 4.119 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....115
- 4.120 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....115
- 4.121 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i)10% ,20% , 30%.....118
- 4.122 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการ คำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i)10% ,20% , 30%.....118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.123 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	119
4.124 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 10% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....	119
4.125 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	120
4.126 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer	120
4.127 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....	121
4.128 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer	121
4.129 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิขึ้นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD)10% ,20% , 30%.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.130	แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 10% , 20% , 30%.....124
4.131	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....125
4.132	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 10% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....125
4.133	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....126
4.134	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....126
4.135	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope.....127
4.136	แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) _i 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer.....127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.137 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) _p 10% ,20% , 30%.....	130
4.138 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) _p 10% ,20% , 30%.....	130
4.139 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์.....	134
4.140 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะไม่ง่ายโหลด.....	135
4.141 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ 75% ของกระแสที่พิกัด.....	135
4.142 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์เต็มพิกัด.....	136
4.143 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ 120% ของกระแสที่พิกัด.....	136
4.144 แสดงกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ทำงานขณะไม่ง่ายโหลดและขณะจ่ายโหลดมอเตอร์.....	138
4.145 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ทำงานขณะไม่ง่ายโหลดและขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ลักษณะต่างๆ.....	139
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนและความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) _p 15%, 30%, 50%.....	142
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% , 30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) _p 10%.....	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% , 30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 20%.....	144
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% , 30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%.....	144
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 10%, 20% และ 30% ที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20%, 30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70% และ 60%.....	145
5.6 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีต่อ K- Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงลำดับฮาร์มอนิกส์กับขนาดของฮาร์มอนิกส์.....	15
2.2 แสดงผลสรุปค่า K-Factor ของโหลดชนิดต่างๆ.....	16
2.3 แสดงพิกัด K- Factor และดัชนีของพิกัด โหลด K.....	17
2.4 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่า $KVA-L_{LK}$ จากโหลดต่างๆ.....	18
4.1 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	37
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผืนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบเป็นเชิงเส้น.....	38
4.3 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ.....	46
4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผืนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ.....	47
4.5 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 15%.....	53
4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผืนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 15%.....	54
4.7 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 30%.....	60
4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผืนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 30%.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 50%.....	67
4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้ จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม (THD _r) 50%.....	68
4.11 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 15%.....	74
4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้ จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม (THD _r) 15%.....	75
4.13 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 30%.....	81
4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้ จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม (THD _r) 30%.....	82
4.15 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD _r) 50%.....	88

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 50%.....	89
4.17 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 15%.....	95
4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 15%.....	96
4.19 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 30%.....	102
4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 30%.....	103
4.21 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 50%.....	109
4.22 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 50%.....	110
4.23 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 10%, 20%, 30%.....	116
4.24 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิคูณด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 10%, 20%, 30%.....	117

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD _i) 10%, 20%, 30%.....	122
4.26 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD _i) 10%, 20%, 30%.....	123
4.27 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD _i) 10%, 20%, 30%.....	128
4.28 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD _i) 10%, 20%, 30%.....	129
4.29 แสดงผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ ทำงานขณะไม่จ่าย โหลดและขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ ลักษณะต่างๆ.....	137
4.30 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่น เมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานขณะไม่จ่าย โหลดและขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ลักษณะต่างๆ.....	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งแปรตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ความเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจส่งผลให้เทคโนโลยีต่างๆ ได้มีการพัฒนาก้าวหน้า จนเกิดมีสิ่งประดิษฐ์ เครื่องมือและเครื่องใช้ทางไฟฟ้าต่างๆ ออกมามากมาย อาทิเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องโทรสาร เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การนำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้สำนักงานเป็นที่นิยมน้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดี แต่มิได้หมายความว่าจะมีแต่ประโยชน์เพียงเท่านั้น เพราะอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนแต่มีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear devices) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของแรงดันและกระแสไม่คงที่ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ภายในตัวอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าไม่คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ดังนั้น โหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นหรือโหลดแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลันเป็นผลทำให้มีสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน หรือมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ฉะนั้นโหลดที่มีความไม่เชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า แล้วฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้ก็ป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าและองค์ประกอบกำลังของระบบไฟฟ้า โดยจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพและประสิทธิภาพต่ำลง ระบบไม่มีเสถียรภาพ ขาดความต่อเนื่อง และมีกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเกิดขึ้นมาในองค์ประกอบกำลัง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เพาเวอร์แฟกเตอร์มีค่าลดลงจากกรณีที่โหลดมีความเป็นเชิงเส้น ลักษณะเช่นนี้จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าได้ เช่น ความร้อนที่จะเกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ความสูญเสียในหม้อแปลงและในสายเคเบิล ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงตามไปด้วย การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เกิดความผิดพลาด การทำงานของเครื่องจักรเกิดความผิดพลาด ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในแกนเหล็กและในชุดขดลวด รวมถึงความร้อนของหม้อแปลงที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki, Budeanu

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวิชาการต่างๆ ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนและองค์ประกอบของกำลังในระบบไฟฟ้า และจากข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์

1.4.2 จัดหาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ขนาด 1 kVA แรงดัน 220/110 V ที่ 50 เฮิร์ตซ์ พร้อมทั้งเตรียมชุดโหลดลักษณะต่างๆ และอุปกรณ์ในการทดสอบ

1.4.3 เขียนโปรแกรมในการวิเคราะห์รูปคลื่นด้วย Fast Fourier Transform และเขียนโปรแกรมการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki, Budeanu ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.4 ทำการติดต่อและขอยืมเครื่องมือวัด Power Harmonics Analyzer Fluke 41B และ Digital Storage Scope DL1520 Yokogawa จากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.4.5 ทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส

1.4.6 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบด้วยผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ และแสดงถึงผลกระทบของค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส

1.4.7 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่จะได้จากวิทยานิพนธ์

1.5.1 สามารถนำหลักการของทฤษฎีตามบทความวิชาการต่างๆ มาใช้ประโยชน์ในการทดสอบและคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

1.5.2 รู้และเข้าใจถึงกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น เนื่องจากโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.5.3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้า รวมถึงผลกระทบที่จะเกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

1.6 หลักการใหม่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิพื้อนที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส เมื่อกำลังไฟฟ้าผิพื้อนนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากฮาร์มอนิกสจากโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กำลังไฟฟ้าผิพื้อนที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น รูปคลื่นของสัญญาณไม่เป็นไซน์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากปกติหรือจากโหลดแบบที่เป็นเชิงเส้น และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ก็มีค่าลดลงจากปกติด้วยเช่นกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าเป็น $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ [1-5] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้อนและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิพื้อนที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส โดยอาศัยคำจำกัดความและสมการการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้อนที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd , Filipski, Czarnecki, Budeanu ทำการทดสอบโดยหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 1 kVA 220/110 V 1-φ 50 Hz จำยโหลดจริงแบบที่เป็นเชิงเส้นและแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้อนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ เป็นการเปรียบเทียบสมการที่มีอยู่เพื่อหาสมการที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดสอบ ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าผิพื้อนที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีฮาร์มอนิก (Harmonic)

ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณไซน์ ที่เป็นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 เฮิร์ตซ์ ดังนั้น ฮาร์มอนิกที่ 2 จึงมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 100 เฮิร์ตซ์ และฮาร์มอนิกที่ 3 มีความถี่เป็นสามเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 150 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน

ฮาร์มอนิกสลายคาบใดๆ สามารถคำนวณหาโดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ ดังสมการ

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (2.1)$$

โดยที่

$f(t)$ คือ สัญญาณรายคาบ

C_0 คือ องค์ประกอบกระแสตรง

n คือ ลำดับฮาร์มอนิก

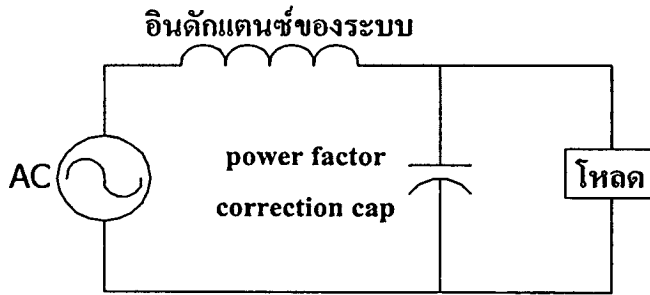
ω_0 คือ ความถี่มูลฐาน

C_n คือ ขนาดของฮาร์มอนิกลำดับที่ n

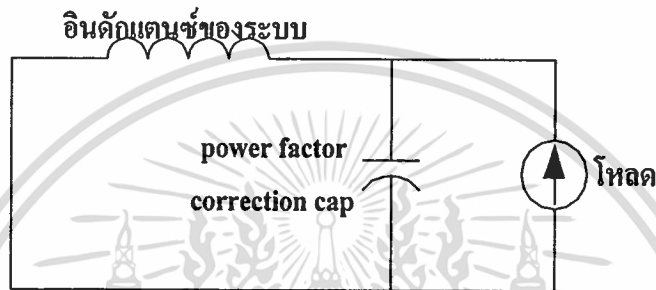
ϕ_n คือ มุมของฮาร์มอนิกลำดับที่ n

จากสมการดังกล่าว สัญญาณรายคาบใดๆ จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระแสตรง และองค์ประกอบของสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันมูลฐานบริสุทธิ์ โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์มอนิกจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่มูลฐาน



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

ดังนั้นสามารถให้คำนิยามศัพท์ต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.1 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Devices) ซึ่งอาจจะเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน(Converter)ได้ขยายตัวอย่างมากมายเป็นผลทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นอย่างมาก

2.1.2 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage)

แรงดันฮาร์โมนิกส์เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นของแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งหาได้ดังสมการที่ 2.2

$$V_h = Z_h I_h \quad (2.2)$$

โดยที่ V_h คือ แรงดันฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ h
 I_h คือ กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ h
 Z_h คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ของระบบ

2.1.3 ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion ; THD)

ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion; THD) คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ความถี่มูลฐาน ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 [8,15]

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.4)$$

โดยที่ $\%THD_v$ คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
 $\%THD_i$ คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม

2.1.4 ค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมด (Total Demand Distortion: TDD)

ค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมด (Total Demand Distortion: TDD) ซึ่งก็คือค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมดของกระแส [8,15]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ I_L คือค่ากระแสสูงสุดที่ต้องการของโหลด (ในช่วงเวลาความต้องการในทุกๆ 15 หรือ 30 นาที) ที่ความถี่มูลฐานที่จุดต่อร่วม (Point of common coupling; PCC) ซึ่งจะมีข้อแนะนำอยู่ในมาตรฐาน [8,15]

2.1.5 ค่าตัวประกอบค่ายอด (Crest factor)

ค่าตัวประกอบค่ายอด (Crest factor) คืออัตราส่วนที่บ่งบอกถึงลักษณะค่ายอด (Peak) ต่อค่าประสิทธิภาพ (RMS) ของสัญญาณแรงดันหรือกระแส

$$\text{Crest factor} = \frac{\text{peak value}}{\text{effective value}} \quad (2.6)$$

ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีฮาร์โมนิก (Fundamental voltage) ค่าตัวประกอบค่ายอดจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}$ หรือเท่ากับ 1.4142 ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบค่ายอดน้อยกว่า 1.4142 จะบ่งบอกได้ว่าค่ายอดรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบปลายแบน (Flat-Topped) และในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบค่ายอดมากกว่า 1.4142 จะบ่งบอกได้ว่าค่ายอดรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบปลายแหลม (Pointy)

2.1.6 ลำดับฮาร์โมนิก (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิก คืออัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิก และความถี่มูลฐาน เช่น เมื่อกล่าวถึงฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 และความถี่มูลฐานมีค่าเป็น 50 เฮิร์ตซ์ จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกที่ 3 คือ 150 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น

2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก (Harmonic Source)

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมายหลายแหล่งด้วยกัน และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกกล่าวถึงแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก ที่เรียกว่า โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ประเภทย่อยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อุปกรณ์เหล่านี้มีการดึงกระแสที่มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิม เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ภายในตัวอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าไม่คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ และสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะการเกิดฮาร์โมนิก [19] คือ

2.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สร้างเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานได้แก่

1. เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static power converter: SPC) ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง เพื่อใช้แยกสารละลายใช้ในกระบวนการชุบโลหะ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์กระแสตรง หรือใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแล้วแปลงกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกทอดหนึ่ง เพื่อใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับ ฯลฯ SPC จะมีฮาร์มอนิกส์เฉพาะตัว หาได้จากสมการที่ 2.5

$$h = kP \pm 1 \quad (2.7)$$

โดยที่ h คือ ลำดับที่ของฮาร์มอนิกส์

k คือ จำนวนเต็ม 1,2,3,4,.....

P คือ จำนวนพัลส์ของเรกติไฟเออร์

2. เครื่องกลไฟฟ้า ส่วนใหญ่ก็คือ มอเตอร์กระแสสลับ

3. หม้อแปลงไฟฟ้า เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก กระแสจะสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเพี้ยนมากขึ้น หากหม้อแปลงไฟฟ้าได้รับแรงดันเกิน และ/หรือ มีกระแสตรงปะปนอยู่ด้วย จะทำให้รูปคลื่นไม่สมมาตร

4. หลอดปล่อยประจุก๊าซ โดยทั่วไปแล้ว กระแสจะเพี้ยนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับบัลลาสต์ที่ต่อร่วมอยู่กับหลอด เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 36 วัตต์ หากใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็กจะมีค่า THD, ประมาณ 5% ถึง 12% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบ

5. แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (Switching mode power supply: SMPS) และ UPS (Uninterruptible power supply) หากไม่มีวงจรกรองฮาร์มอนิกส์กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายไฟจะมีลักษณะเป็นพัลส์ เกิดฮาร์มอนิกส์มากโดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำๆ และอุปกรณ์ประเภทนี้มีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้นสูงมาก

2.2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ทั้งที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ที่เรียกว่า ฮาร์มอนิกส์ และ อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ [20] ได้แก่

1. Cycloconverter ประยุกต์ใช้กับ Rocking – Mill ขนาดใหญ่ในโรงรีดโลหะ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงเส้นจนถึง Static –VAR generator กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายไฟจะมีความถี่ต่างๆ มากมาย โดยมี Characteristic frequency หาได้จาก $f_i = (p_1 \times m \pm 1) f \pm p_2 \times n \times f_0$

เมื่อ p_1 คือจำนวนพัลส์ของภาคแปลงไฟฟ้าเข้า p_2 คือจำนวนพัลส์ของภาคขาออก m และ n คือเลข
 เอกส ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเต็มบวกใดๆ และ f_0 คือความถี่ขาออกของ cycloconverter หากโหลดไม่สมดุล แรงดันระหว่างเฟสไม่สมดุล และมุมจูนวนไม่สมดุลจะมี non-characteristic frequency $f_1 = (p1 \times m \pm 1) f \pm p2 \times n \times f_0$ ปนออกมาด้วย

2. ชุดปรับความเร็วรอบของมอเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current source inverter adjustable speed drive: CSI-ASD) จะสร้างกระแสอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์จากการบีต (Beat) ของความถี่ 2 ชุด คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ 50 เฮิร์ตซ์ และความถี่ที่ใช้ขับมอเตอร์

3. เตาหลอมแบบอาร์ก เกิดกระแสอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ เพราะการหลอมโลหะมีลักษณะเป็นพลวัต (Dynamic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มต้นหลอม

4. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก จะมีลักษณะคล้ายกับเตาหลอมแบบอาร์ก

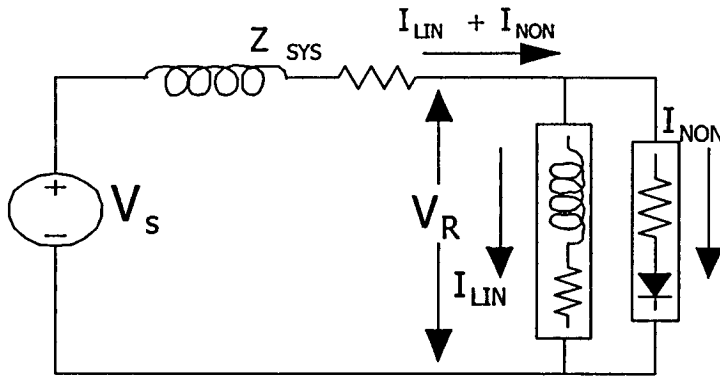
5. ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle หรือ Pulse burst modulation (PBM) เป็นอุปกรณ์ที่กำลังได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้น เช่น ใช้ควบคุมการทำงานของเตาอบ เตาเผา เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบสเปด สำหรับชุดที่ควบคุมการทำงานของเตาเผา นั้น มีหลายบริษัทที่ผลิตได้ถึง 2 MW การควบคุมทำโดยการลดแรงดันที่จ่ายให้โหลด โดยการหยุดการทำงานเป็น cycle เช่น จ่ายไฟเพียง 4 cycle ใน 5 cycle จะทำให้เตาอบหรือเตาเผาสร้างความร้อนได้เพียง 80% ของค่าพิกัด เป็นต้น

2.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ มีหลายประการ [19] เช่น ในกรณีที่โหลดซึ่งได้รับแรงดันไฟฟ้าในรูปของคลื่นไซน์ แต่มีการดึงกระแสที่มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิม เมื่อวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ฟูเรียร์จะสามารถแยกรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนไปออกเป็น ส่วนประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 ผลรวมของกระแสโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (I_{NON}) และกระแสโหลดที่เป็นเชิงเส้น (I_{LIN}) นั้นจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ (Z_{SYS}) จะทำให้แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบ (V_D) กับแรงดันตกคร่อมในอิมพีแดนซ์ของระบบ (V_D) เกิดความผิดเพี้ยนไปด้วย

แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

1. ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
2. ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีประสิทธิภาพลดลง
3. ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
4. ทำให้โรงจักรทำงานผิดพลาด (Plant Maloperation)



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกส์ แรงดันฮาร์มอนิกส์ และอิมพีแดนซ์ของระบบ

ฮาร์มอนิกส์จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่ออยู่ในระบบ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลงมี 3 ประการ[16,19,20]ดังนี้

1. กระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีไหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลัก (Stray Flux Loss) มีค่าเพิ่มขึ้น
2. แรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่ายจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{core} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2 \quad (2.8)$$

โดยที่ P_{core} คือ กำลังสูญเสียแกนเหล็ก
 $k_1 f$ คือ กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส
 $k_2 f^2$ คือ กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก
 V คือ แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย (Line Capacitors)

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ซึ่งเกิดขึ้นกับ
 ความถี่ โดยกำลังสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกส์สูงๆ จะทำให้เกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

ร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าที่ฮาร์โมนิกส์ต่ำๆ ถ้าหม้อแปลงต้องจ่ายโหลดที่มีฮาร์โมนิกส์มากๆ จะพบว่าความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงจะลดลง

2.3.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density Wave) ออกมาทำให้เกิดสัญญาณรบกวนอย่างมาก (Higher Noise Emission) เมื่อเทียบกับกรณีเป็นแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพธ์ (Resultant Flux) กระจายในช่องอากาศ (Air Gap) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ค็อกกิง (Cogging) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่องมอเตอร์ได้ หรือเกิดครอว์ลิง (Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

คู่ของฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Pairs) เช่นฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 และ 7 จะมีศักยภาพที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลตทางกล (Mechanical Oscillations) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำ (Turbine Generator) หรือระบบมอเตอร์ – โหลด (Motor-Load System) การออสซิลเลตทางกลเกิดขึ้นเมื่อมีการกระทำ (Interaction) ระหว่างกระแสฮาร์โมนิกส์กับสนามแม่เหล็กที่มีความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency Magnetic field) ทำให้เกิดแรงบิดออสซิลเลตเป็นผลให้เกิดเรโซแนนซ์ทางกล ตัวอย่างเช่น ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 และ 7 จะทำให้เกิดแรงบิดหมุนกระตุ้น (Torsional Stimulus) ในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 คือ 300 Hz ถ้าความถี่ของการสั่นสะเทือนทางกลใกล้กับความถี่ของการกระตุ้นทางไฟฟ้าแล้ว จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ทางกลขึ้น

ยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับมอเตอร์อย่างไรก็ดีได้มีผู้แนะนำชื่อว่า GOLDBERG กำหนดขีดจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิกส์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่เกิน 5% โดยคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

2.3.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเบงก์คาปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan\delta)\omega_n V_n^2 \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	P_L	คือ กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์
	$\tan \delta$	คือ $R/(1/\omega C) = \text{Loss Factor}$
	ω_n	คือ $2 \cdot \pi \cdot f_n$
	V_n	คือ แรงดันอาร์เอ็มเอสฮาร์โมนิกส์ลำดับ n

กรณีที่มีฮาร์โมนิกส์ การหาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของคาปาซิเตอร์ ต้องคิดที่ความถี่มูลฐานและที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ค่ากำลังไฟฟ้ารวมนี้ต้องไม่เกินค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของคาปาซิเตอร์ มิฉะนั้นจะทำให้คาปาซิเตอร์เสียหาย ตามมาตรฐานนานาชาติ IEC 70-1967 Power Capacitor และ IEC 70-1968 Self - Heating Metallised – Paper Power Capacitor กำหนดไว้ว่าคาปาซิเตอร์ต้องสามารถทำงานในภาวะโหลดเกิน (Overload) ได้ดังนี้

- กระแส (A) ได้ถึง 130%
- แรงดัน (V) ได้ถึง 110%
- กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAR) ได้ถึง 135%

2.3.4 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อฟิวส์

การที่ฟิวส์ขาดอาจเป็นผลอย่างหนึ่งของการมีฮาร์โมนิกส์ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไปอย่างมากกรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำ (Low Magnitude Fault) เกิดขึ้น และฮาร์โมนิกส์ทำให้เวลาในการหลอมละลายของฟิวส์ลดลง

2.3.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนการเริ่มใช้ต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสไฟสถับ รูปคลื่นไซน์ที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นถ้ามีมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์โมนิกส์ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดหรือกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ในระบบมีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ค่าสูงในวงจร เป็นผลให้มิเตอร์ประเภทงานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่นมิเตอร์วัดค่า-ชั่วโมง (Watt-hour Meters) ทำงานผิดพลาด เนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์มากกว่า 20% จึงจะมีผลกับมิเตอร์

2.3.6 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

ฮาร์โมนิกส์ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าหลายประการ เช่น

1. เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อแรงดันขอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาด

เอกสารและความสว่างของภาพเปลี่ยนไปใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอร์คิวรีอาร์ก การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหายแก่หลอด

3. คอมพิวเตอรืจะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์อย่างมากโดยเฉพาะถ้ารูปคลื่นของแรงดันเพี้ยนจนมียอดแบนราบ(Flat Topping) และกระแสฮาร์โมนิกส์สูงจนทำให้เกิดแรงดันที่คร่อมระหว่าง Neutral-ground สูง ดังนั้นทุกบริษัทมีขีดจำกัดฮาร์โมนิกส์ค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกส์มากกว่าขีดจำกัดนี้ จะทำให้คอมพิวเตอร์เสียหายได้

4. อุปกรณ์ควบคุมความเร็วที่ใช้ทริสเตอร์ควบคุม ฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่ออุปกรณ์ชนิดนี้ดังต่อไปนี้

4.1. แรงดันที่มีนอตซ์ทำให้มุมยิงของทริสเตอร์ผิดพลาด เป็นผลให้การควบคุมอุปกรณ์ผิดพลาดไป

4.2 ผลของเรโซแนนซ์ระหว่างอุปกรณ์ต่างๆทำให้เกิดแรงดันเกิน (OverVoltage) และเกิดการแกว่ง (Hunting) ของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.3.7 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์โมนิกส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ(Low Level Noise) ก่อให้เกิดความรำคาญ เช่น ในระบบโทรศัพท์ ฮาร์โมนิกส์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้เสียงที่พูดกันได้ยินเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูง(High Level) ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจทำให้เกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือทำให้ระบบสื่อสารใช้การไม่ได้

2.4 หม้อแปลงพิกัด เค-แฟคเตอร์ (K-Factor Rated Transformer)

ปัจจุบันได้มีการออกแบบหม้อแปลงสำหรับรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นโดยเฉพาะซึ่งจะมีข้อความบอกไว้ที่แผ่นป้ายชื่อหม้อแปลง(Nameplate) “เหมาะสมในการใช้กับกระแสโหลดประเภทไม่เป็นรูปคลื่นไซน์(nonsinusoidal current load) ด้วยค่า K-Factor ไม่เกิน.....” เช่น หม้อแปลงมี K-Factor เท่ากับ 9 นั้นหมายความว่า หม้อแปลงตัวนี้ได้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่างปกติขณะจ่ายโหลดที่มีกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดเป็น 9 เท่าของความถี่มูลฐาน[16,17] เป็นต้น

พิกัด K-Factor จึงมีความจำเป็นเนื่องจากความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงด้วยผลจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1

2.4.1 การคำนวณ เค-แฟคเตอร์ (Calculating K-Factor)

Underwriters Laboratory (UL)และผู้ผลิตหม้อแปลงได้กำหนดวิธีการกำหนดพิคัด เรียกว่า K-Factor สำหรับหม้อแปลงแบบแห้ง ค่า K-Factor สัมพันธ์กับความสามารถในการรับโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น โดยหม้อแปลงไม่ร้อนเกินพิคัดอุณหภูมิที่กำหนดไว้ วิธี K-Factor อยู่บนพื้นฐานของค่าความสูญเสียที่คาดเดาไว้ได้ [17]

ค่า K-Factor ได้ถูกกำหนดบนพื้นฐานต่อหน่วย(P.U.) ดังสมการที่ 2.10

$$K - \text{Factor} = \sum_{h=1}^{h=\max} [I_h(\text{p.u.})]^2 \cdot h^2 = \frac{\sum I_h^2 \cdot h^2}{\sum I_h^2} = \frac{\sum f_h^2 \cdot h^2}{\sum f_h^2} = \frac{\sum I_h^2 \cdot h}{I_{\text{rms}}^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.11)$$

พิคัดมาตรฐานของพิคัด K-Factor คือ 4, 9, 13, 20, 30, 40 และ 80 กระแสในสมการที่ 2.10 ได้กำหนดไว้บนพื้นฐานต่อหน่วย เพื่อที่ว่าผลรวมของผลคูณของกระแสแต่ละตัวคูณกับตัวเลขฮาร์โมนิกส์ แล้วยกกำลังของผลคูณจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสำหรับ โหลดแบบเชิงเส้น K-Factor มีค่าเป็น 1 เสมอ

สำหรับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่กำหนดให้ ถ้าทราบกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละตัว ก็สามารถคำนวณ K-Factor ได้ และนำไปเปรียบเทียบกับค่า K-Factor ที่แผ่นป้ายชื่อหม้อแปลง (Nameplate) ของหม้อแปลงที่ใช้งาน ตราบใดที่ค่า K-Factor ที่โหลดมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ K-Factor ของหม้อแปลง หม้อแปลงตัวที่ใช้งานนั้นไม่จำเป็นต้องลดพิคัดตัวเอง

ตัวอย่างการคำนวณหา K-Factor จากข้อมูลกำหนดให้ วงจรเรกติฟายเออร์แบบควบคุม (Controlled Rectifier) มีฮาร์โมนิกส์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับฮาร์โมนิกส์กับขนาดของฮาร์โมนิกส์

ลำดับฮาร์โมนิกส์	ขนาดกระแส(%)
Fundamental	100
5	20.0
7	14.2
11	9.1
13	7.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ผลรวมของกระแสประสิทธิผล} = \sqrt{100^2 + 20^2 + 14.2^2 + 9.1^2 + 7.7^2} = 104$$

ดังนั้น

$$K\text{-Factor} = \left(\frac{100}{104}\right)^2 + \left[\left(\frac{20}{104}\right)^2 \cdot 5^2\right] + \left[\left(\frac{14.2}{104}\right)^2 \cdot 7^2\right] + \left[\left(\frac{9.1}{104}\right)^2 \cdot 11^2\right] + \left[\left(\frac{7.7}{104}\right)^2 \cdot 13^2\right] = 4.62$$

จะเห็นว่าพิกัดมาตรฐาน K-Factor ที่จะเลือกคือ 13

จาก [17] ได้มีการสำรวจค่า K-Factor ของโหลดที่มีใช้ในปัจจุบันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงผลสรุปค่า K-Factor ของโหลดชนิดต่างๆ

Load	K-Factor
Incandescent lighting	K-1
Electric resistance heating	K-1
Motor(without solid state drives)	K-1
Control transformer/electromagnetic control drives	K-1
Motor-generators (without solid state drives)	K-1
Distribution transformers	K-1
Electric-discharge lighting	K-4
UPS w/ optional input filtering	K-4
Welders	K-4
Induction heating equipment	K-4
PLCs and solid state controls(other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment (e.g. PBX)	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multiwire receptacle circuits in general care areas of heat care facilities and classroom of schools etc.	K-13
Multiwire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Main-frame computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drive)	K-20
Multiwire receptacle circuit in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Load	K-Factor
Multiwire receptacle circuit in industrial , medical ,and educational laboratories	K-30
Multiwire receptacle circuit in commercial office spaces	K-30
Small main frames (mini and micro)	K-30
Other load identified as producing very high amounts of harmonics	K-40

เมื่อ UL ได้มีการกำหนดค่า ดัชนีของฟักัดโหลด K (INDEX OF LOAD K-RATINGS, I_{LK}) จุดประสงค์เพื่อต้องการออกแบบแหล่งจ่ายให้มีความสามารถในการรับโหลดที่มีฮาร์โมนิกส์รวมอยู่ด้วย ซึ่งจะคำนึงถึงการทำงานที่อุณหภูมิของแหล่งจ่ายไม่เกินค่าที่จำกัดไว้ ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ของ ฟักัด K-Factor กับดัชนีของฟักัดโหลด K ไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงฟักัด K-Factor และดัชนีของฟักัดโหลด K

K-Factor	I_{LK}	K-Factor	I_{LK}	K-Factor	I_{LK}
K-1	0.0	K-17	70.71	K-33	141.42
K-1.5	10.60	K-17.5	72.37	K-33.5	144.80
K-2	14.59	K-18	74.05	K-34	148.32
K-2.5	17.96	K-18.5	75.75	K-34.5	152.00
K-3	20.85	K-19	77.46	K-35	155.84
K-3.5	23.44	K-19.5	79.19	K-35.5	159.86
K-4	25.82	K-20	80.94	K-36	164.08
K-4.5	28.04	K-20.5	82.72	K-36.5	168.52
K-5	30.15	K-21	84.52	K-37	173.21
K-5.5	32.16	K-21.5	86.34	K-37.5	178.15
K-6	34.10	K-22	88.19	K-38	183.40
K-6.5	35.97	K-22.5	90.07	K-38.5	188.98
K-7	37.80	K-23	91.99	K-39	194.94
K-7.5	39.58	K-23.5	93.93	K-39.5	201.31
K-8	41.32	K-24	95.92	K-40	208.17
K-8.5	43.03	K-24.5	97.94	K-40.5	215.57
K-9	44.72	K-25	100.00	K-41	223.61

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

K-Factor	I _{LK}	K-Factor	I _{LK}	K-Factor	I _{LK}
K-9.5	46.39	K-25.5	102.11	K-41.5	232.38
K-10	48.04	K-26	104.26	K-42	242.02
K-10.5	49.67	K-26.5	106.46	K-42.5	252.68
K-11	51.30	K-27	108.71	K-43	264.58
K-11.5	52.92	K-27.5	111.02	K-43.5	277.98
K-12	54.52	K-28	113.39	K-44	293.24
K-12.5	56.13	K-28.5	115.82	K-44.5	310.91
K-13	57.74	K-29	118.32	K-45	331.66
K-13.5	59.34	K-29.5	120.89	K-45.5	356.57
K-14	60.94	K-30	123.54	K-46	387.30
K-14.5	62.55	K-30.5	126.28	K-46.5	426.61
K-15	64.17	K-31	129.10	K-47	479.58
K-15.5	65.79	K-31.5	132.02	K-47.5	556.78
K-16	67.42	K-32	135.04	K-48	685.57
K-16.5	69.06	K-32.5	138.17	-	-

ตัวอย่าง การประยุกต์นำค่าของพิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัดโหลด K ไปใช้งาน แสดงได้ดังนี้ เมื่อต้องการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีรายการโหลดต่างๆ ดังตารางที่ 2.4 จะต้องเลือกหม้อแปลงที่มีค่า K-Factor เท่าใด

ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่า KVA-I_{LK} จากโหลดต่างๆ

รายการของโหลด	ขนาด(kVA)	I _{LK}	(KVA × I _{LK}) = KVA – I _{LK}
Discharge lighting	7.0	25.82	180.74
Receptacle circuits	2.0	123.54	247.08
Main frame computers	5.0	80.94	404.70
Motor w/drive	0.5	80.94	40.47
Motor w/o drive	1.5	0.00	0.00
Total	16.0	-	872.99

เมื่อ

$$\begin{aligned}\text{Average } I_{LK} &= (\text{Total KVA} - I_{LK}) / \text{Total kVA} \\ &= 872.99/16 \\ &= 54.56\end{aligned}$$

จากตารางที่ 2.3 ที่ $I_{LK} = 54.56$ ไม่มี ดังนั้นควรเลือกให้มีค่ามากกว่า จะได้ที่ $I_{LK} = 57.74$ ซึ่งให้ค่า K-Factor ที่ 13 ดังนั้นการออกแบบระบบจะต้องเลือกหม้อแปลงที่มีค่า K-Factor = 13



บทที่ 3

สมการของกำลังไฟฟ้า

ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มีอยู่ทั่วไปมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์(non-sinusoidal) สาเหตุมาจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นและเป็นต้นเหตุทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิ่เกิน (Distortion Power) ในวงจรไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็นความต้านทานบริสุทธิ์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสจะเป็นไซน์(Sinusoidal) ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้น ถ้าวงจรไฟฟ้านั้นมีโหลดเป็นความต้านทานแต่ไม่ใช่ความต้านทานบริสุทธิ์ หรือมีโหลดจำพวกวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น รีเลย์ฟายเออร์ คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ หรือที่เรียกว่าโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้เกิดความผิ่เกินขึ้นกับรูปสัญญาณ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ และทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิ่เกินขึ้นด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการทดสอบโดยใช้โหลดทางไฟฟ้าทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแทนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าผิ่เกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงสมการของกำลังไฟฟ้าผิ่เกิน สมการของกำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลัง

3.1 สมการของกำลังไฟฟ้า

ปริมาณทางไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ จากรูปแบบของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) สำหรับฟังก์ชันที่เป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic function) คือ

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (3.1)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (3.2)$$

เมื่อ $\omega_0 = 2\pi / T$, $C_0 = a_0 / 2$, $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ และ $\phi_h = \tan^{-1}(a_h / b_h)$

ในการพิจารณาถึงปริมาณของฮาร์มอนิกส์ในสถานะอยู่ตัว (Steady state) จะได้ค่าชั่วขณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ (Nonsinusoidal situations) [10,12] โดยมีรูปแบบ คือ

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (3.3)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) เพื่อความสะดวกจะไม่พิจารณาเทอมในส่วนที่เป็นดีซี, V_h และ I_h เป็นค่าแรงดันและกระแสที่เป็นค่า RMS ของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h^{th} ตามลำดับ จึงจะได้สมการที่แสดงเป็นค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวม คือ

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \text{Volt} \quad (3.5)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{Ampere} \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาถึงค่าของกำลังไฟฟ้า P ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง [10,12] ค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ S คือ

$$S = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2\right) \left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2\right)} = V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad \text{VA} \quad (3.7)$$

ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง P ชั่วขณะ คือ

$$p(t) = v(t) i(t) \quad \text{WATT} \quad (3.8)$$

และค่าของกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยในคาบเวลา T ของค่า $p(t)$ คือ

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad \text{WATT} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการที่ (3.3) และ (3.4) ในสมการที่ (3.8) จะได้ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง P คือ

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h) \qquad \text{WATT} \qquad (3.10)$$

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกส์ คือ

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\alpha_h - \beta_h) \qquad \text{VAR} \qquad (3.11)$$

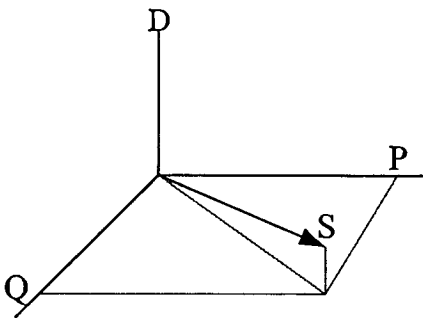
จาก [1-6] จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในสภาวะที่รูปสัญญาณไม่เป็นไซน์ โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ตามไปด้วย คือ

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \qquad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) ค่า D คือ ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน เป็นผลคูณของแรงดันและกระแสในแต่ละส่วนของความถี่ที่แตกต่างกันในสมการที่ (3.3) และ (3.4) ซึ่งจะได้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในเทอมของความเพี้ยนโวลต์แอมแปร์(Distortion volt-amperes) [1] หรือ กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (Distortion Power) คือ

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \qquad \text{VA} \qquad (3.13)$$

ความสัมพันธ์ของค่า S , P , Q และ D ในรูปของเวกเตอร์สามมิติแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่ค่าของ P และ Q เป็นองค์ประกอบของค่า S ในกรณีที่ไม่นับถึงผลของฮาร์มอนิกส์ และ D เป็นองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมาของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ [1]



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า

3.2 สมการของค่าตัวประกอบกำลัง

แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Loads) นอกจากจะทำให้เกิดความเพี้ยนของกำลังไฟฟ้า (Distortion Power) และก่อให้เกิดกำลังสูญเสีย (Power losses) ขึ้นในระบบแล้วยังทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน [8-11] ซึ่งจากเดิมค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor; PF) ในสภาวะไซน์ (Sinusoidal situations) จะได้จาก

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \quad (3.14)$$

$$PF = DPF = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \cos(\alpha_1 - \beta_1) \quad (3.15)$$

เมื่อ DPF คือ Displacement power factor และ $(\alpha_1 - \beta_1)$ คือ ค่ามุมตัวประกอบกำลัง (Power factor angle) ดังนั้นในสภาวะไซน์จะมีค่าตัวประกอบกำลังเพียงค่าเดียว เรียกว่า Displacement power factor และเมื่อพิจารณาตัวประกอบกำลัง ในสภาวะที่ไม่เป็นไซน์ (Nonsinusoidal situation) แรงดันและกระแสมีรูปสัญญาณไม่เป็นไซน์ คือ มีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังจะต้องคิดผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์และกระแสฮาร์มอนิกส์รวมเข้าไปด้วย และเรียกค่าตัวประกอบกำลังนี้ว่า ค่าตัวประกอบกำลังจริง (True power factor ; TPF) [8-11] จะได้จาก

$$TPF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (3.16)$$

กรณีที่โหลดเป็นแบบเชิงเส้นจะให้ $PF = DPF$

กรณีที่โหลดไม่เป็นแบบเชิงเส้นจะให้ $TPF < DPF$

3.3 สมการของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน

จาก [1-7] เริ่มแรกกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนได้ถูกกำหนดขึ้นโดย Budeanu เมื่อปี ค.ศ. 1927 ประมาณ 70 ปีล่วงมาแล้ว โดย Budeanu ได้กำหนดกำลังไฟฟ้าเสมือน Q สำหรับวงจรไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ (Nonsinusoidal waveform) [5] คือ

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \phi_n \quad \text{VAR} \quad (3.17)$$

โดยที่ Q คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power)

V_n, I_n คือ ค่าRMS ของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์

กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ในวงจรที่โหลดไม่ได้เป็นความต้านทาน ค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏ อาจจะสูงกว่าผลลัพธ์จากกำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้าเสมือน Q นั่นคือ

$$S^2 - (P^2 + Q^2) \geq 0 \quad \text{VA} \quad (3.18)$$

ดังนั้น องค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่เพิ่มขึ้นมาจึงได้ถูกแนะนำโดย Budeanu เรียกว่า “ Distortion power” อธิบายด้วยการวัดของค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นมา เนื่องมาจาก ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น(waveform distortion)

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad \text{VA} \quad (3.19)$$

กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน D เกิดจากผลคูณของแรงดันฮาร์โมนิกส์และกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่ ความถี่ต่างๆ โดยที่สูตรต่างๆ ของ Distortion power เป็นไปตามฟังก์ชันของแรงดันฮาร์โมนิกส์และ กระแสฮาร์โมนิกส์ที่แต่ละความถี่

จาก [3] สูตรสำหรับ กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน โดย Budeanu เป็นสูตรเริ่มแรกต่อมาได้มีการ พัฒนาขึ้นโดย Shepherd and Zand, และ Emanuel โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ประกอบด้วย องค์ประกอบของแรงดันและกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

$$D^2 = \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n) \quad (3.20)$$

โดยที่ $\theta_m = \alpha_m - \beta_m$ และ $\theta_n = \alpha_n - \beta_n$ และ V_m, V_n, I_m, I_n และ $\alpha_m, \alpha_n, \beta_m, \beta_n$ คือ ค่าRMS และมุมเฟสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ ของแรงดันและกระแส ตามลำดับ

หลังจากนั้น กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนได้ถูกพัฒนาโดย Piotr Filipski [4] สามารถแบ่งองค์ประกอบของกำลังไฟฟ้า ผลเนื่องมาจากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ แบ่งออกได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 4 องค์ประกอบ นั่นคือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S กำลังไฟฟ้าจริง P กำลังไฟฟ้าเสมือน Q และกำลังไฟฟ้าผิผิว D ทั้ง 4 องค์ประกอบมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{3.21}$$

โดยที่ $S = VI$ (3.22)

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \theta_n \tag{3.23}$$

$$Q = \sum_n V_n I_n \sin \theta_n \tag{3.24}$$

และ $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$

$$D = \sqrt{\sum_m \sum_n [V_m^2 I_n^2 - V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)]} \tag{3.25}$$

โดยที่ V, I คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแส
 V_m, V_n, I_m, I_n คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์
 θ_m, θ_n คือ มุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์

สมการกำลังไฟฟ้าผิผิว D โดย L.S. Czarnecki [5]: Czarnecki คำนวณ Distortion power ด้วยสมการ ดังนี้

$$D_B^2 = S^2 - (P^2 + Q_B^2) \tag{3.26}$$

$$D_B^2 = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{ (V_m I_n - V_n I_m)^2 + 2 V_m I_n V_n I_m [1 - \cos(\theta_m - \theta_n)] \} \tag{3.27}$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าจริง
 Q_B คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน
 D_B คือ กำลังไฟฟ้าผิผิว
 V_m, V_n, I_m, I_n คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์
 θ_m, θ_n คือ ค่ามุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก [3] การอธิบายค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน ที่อธิบายได้อย่างถูกต้องด้วย Budeanu ยกตัวอย่าง โดยพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกส์และกระแสฮาร์โมนิกส์ ลำดับที่ 1, 2 และ 3 (รวม DC component เข้าด้วยกัน) กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน จะได้จาก

$$\begin{aligned}
 D^2 &= S^2 - P^2 - Q^2 \\
 D^2 &= (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2)(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) \\
 &\quad - (V_0 I_0 + V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 \cos \theta_3)^2 \\
 &\quad - (V_1 I_1 \sin \theta_1 + V_2 I_2 \sin \theta_2 + V_3 I_3 \sin \theta_3)^2 \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.28) ถ้ารวมแรงดันฮาร์โมนิกส์และกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ เข้าด้วยกัน จะสามารถเขียนสมการที่ (3.28) ในรูปทั่วไป ดังนี้

$$D^2 = \sum_{m=0}^{h-1} \sum_{n=m+1}^h \{V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)\} \quad (3.29)$$

โดยที่ $\theta_m = \alpha_m - \beta_m$ และ $\theta_n = \alpha_n - \beta_n$ และ V_m, V_n, I_m, I_n และ $\alpha_m, \alpha_n, \beta_m, \beta_n$ คือ แรงดันและกระแสที่เป็นค่าRMS และมุมเฟสของแรงดันและกระแส ที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้อาศัยหลักการและทฤษฎีกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้น ดังกล่าวข้างต้น ทำการทดสอบโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ขนาด 1 kVA 220/110 V 50 Hz จ่ายโหลดจริงแบบเป็นเชิงเส้น , แบบไม่เป็นเชิงเส้น และจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ โดยโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ ได้แก่ รีคตีฟายเออร์แบบเต็มคลื่น , AC/DC full wave Thyristor converter, AC/DC half wave Thyristor converter และ AC/AC full wave controller converter ต่อรวมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

4.1 ขั้นตอนการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นและกำลังไฟฟ้าต่างๆ โดยมีลำดับขั้นตอนการทดสอบสามารถนำเสนอได้ดังรูปที่ 4.1 และสามารถอธิบายถึงขั้นตอนในการทดสอบได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการต่อวงจรการทดสอบตามเงื่อนไขของการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการรับค่า จากรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ที่ต้องการนำมาคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้น โดยข้อมูลของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสอยู่ในรูปของ ASCII File

ขั้นตอนที่ 3 กำหนด Cycle ของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่จะนำมาพิจารณาอย่างน้อย 1 Cycle

ขั้นตอนที่ 4 ทำการกระจาย รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส โดยอาศัยหลักการของ Fast Fourier Transformer (FFT) ซึ่งกระบวนการนี้ได้ใช้ คำสั่ง FFT ในโปรแกรม MATLAB

ขั้นตอนที่ 5 แสดงผลการกระจายรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสจะอยู่ในรูปของค่าแอมพลิจูด และมุมเฟสของแรงดันและกระแสตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการกระจายรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส

ขั้นตอนที่ 7 นำค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่ได้จากการกระจายรูปคลื่นไปทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ และค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้น ด้วยสมการแต่ละสมการที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu ทำการคำนวณโดยการเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดข้อมูลที่จะพิจารณาดังแต่ ลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ 31

ขั้นตอนที่ 8 เป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในสมการที่ 3.7

ขั้นตอนที่ 9 เป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11

ขั้นตอนที่ 10 เป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพื่น ในสมการที่ 3.20,3.25,3.27 และสมการที่ 3.29

ขั้นตอนที่ 11 เป็นการคำนวณค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด(Displacement Power factor; DPF)และค่าตัวประกอบกำลังจริง(True power factor; TPF) ในสมการที่ 3.15 และสมการที่ 3.16

ขั้นตอนที่ 12 เป็นการคำนวณ ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม (Total harmonic voltage distortion; THD_v) และความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (Total harmonic current distortion; THD_i) ในสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4

ขั้นตอนที่ 13 เป็นการคำนวณ พิกัดเค-แฟคเตอร์(K-Factor) ในสมการที่ 2.10

ขั้นตอนที่ 14 แสดงผลการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 15 ต้องการจบการทำงานหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ให้กลับไป A แล้วทำตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง และถ้าใช่ก็จบการทดสอบ

สำหรับการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัด 2 เครื่อง คือ

1. Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa
2. Power Harmonic Analyzer Fluke 41B

ดังนั้น ผลการทดสอบที่ได้ แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ

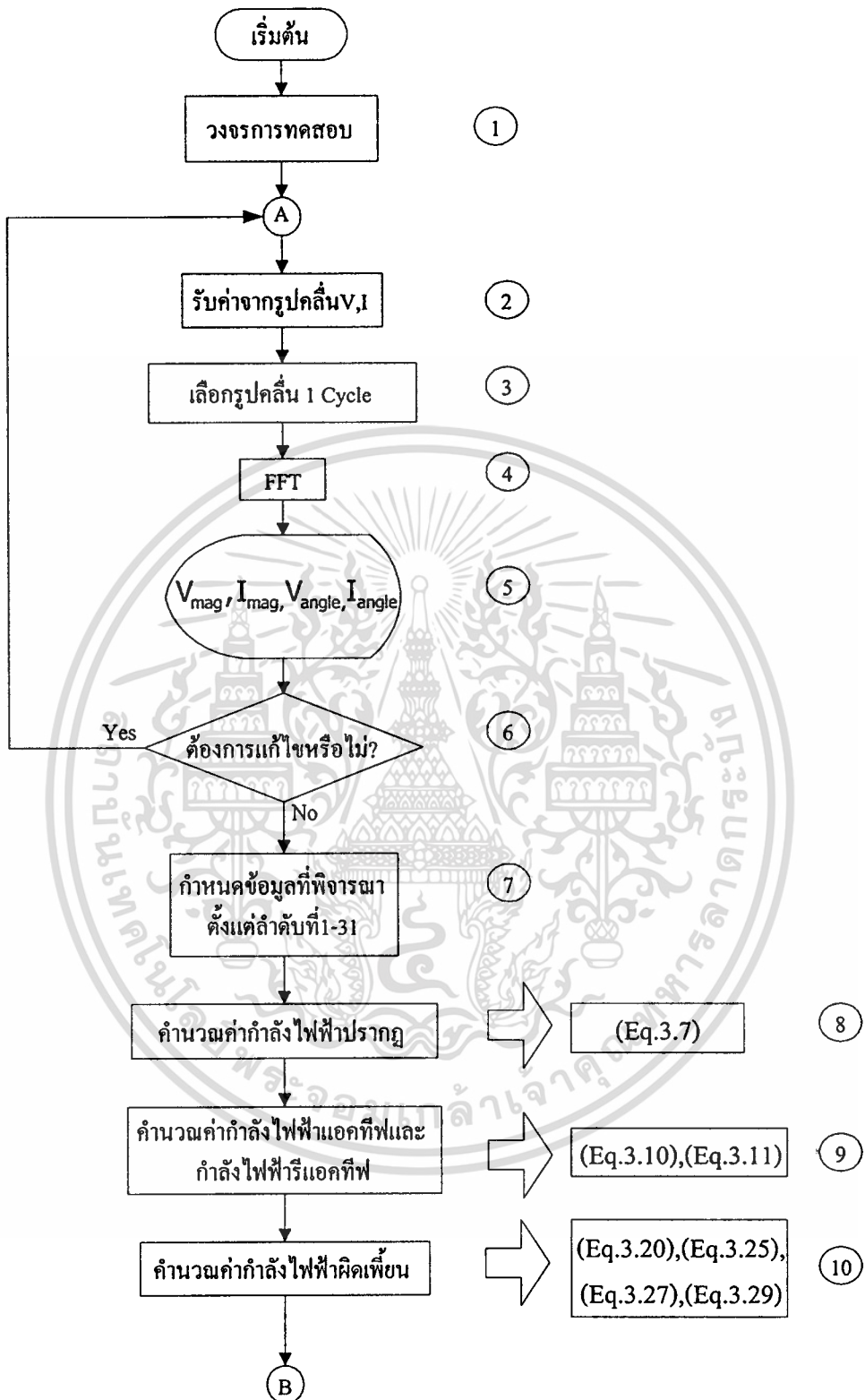
1. ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa ซึ่งทำการทดสอบโดยเลือกใช้ Voltage Probe×10 และ Current Probe 10 mV/A
2. ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ซึ่งกำลังไฟฟ้าผิพื่น D1 คำนวณจากสมการที่ 3.13 $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ โดยค่าของ S, P และ Q ไม่ได้ใช้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B

แต่จะใช้ค่า $S = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2\right) \left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2\right)} = V_{rms} \cdot I_{rms}$ จากสมการที่ 3.7

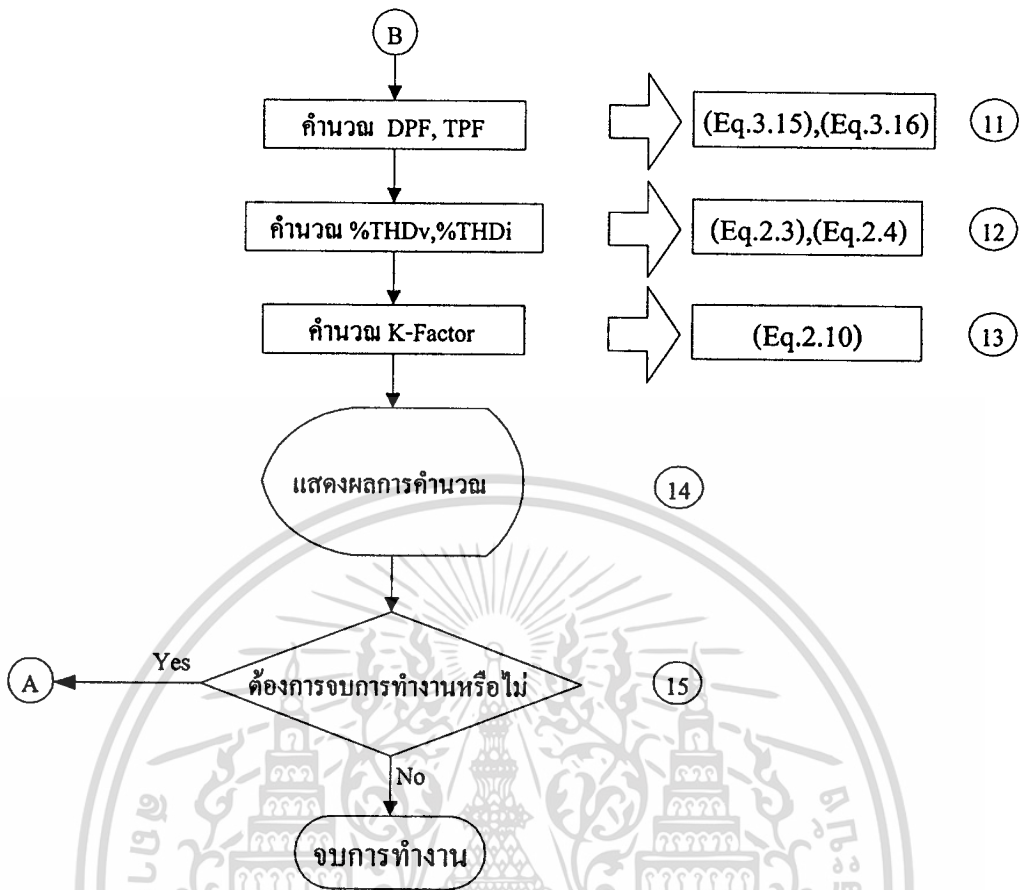
$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h)$ จากสมการที่ 3.10

และ $Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\alpha_h - \beta_h)$ จากสมการที่ 3.11

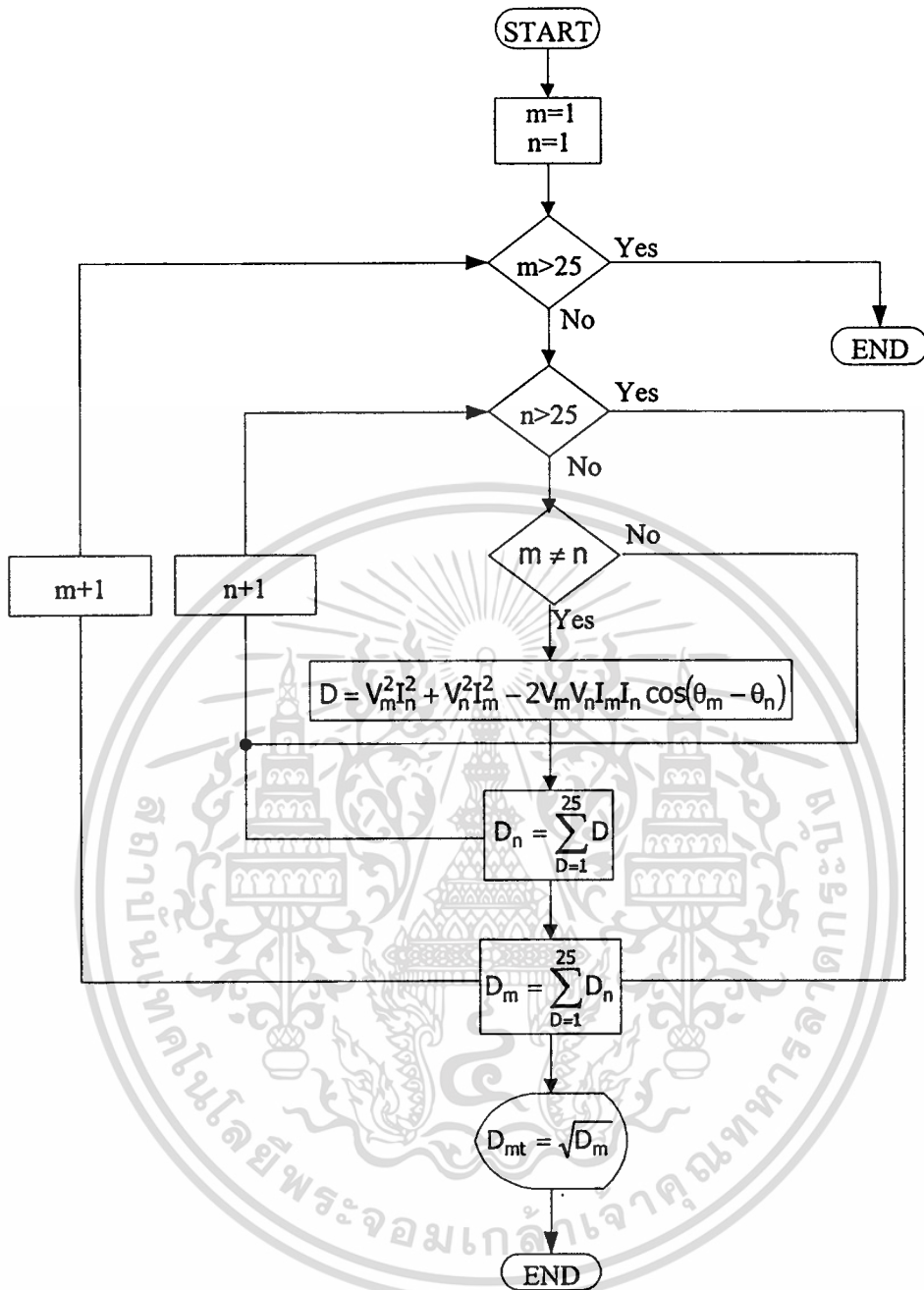
ทำการคำนวณด้วยลำดับฮาร์โมนิกสทั้งหมด 31 ลำดับด้วยกัน



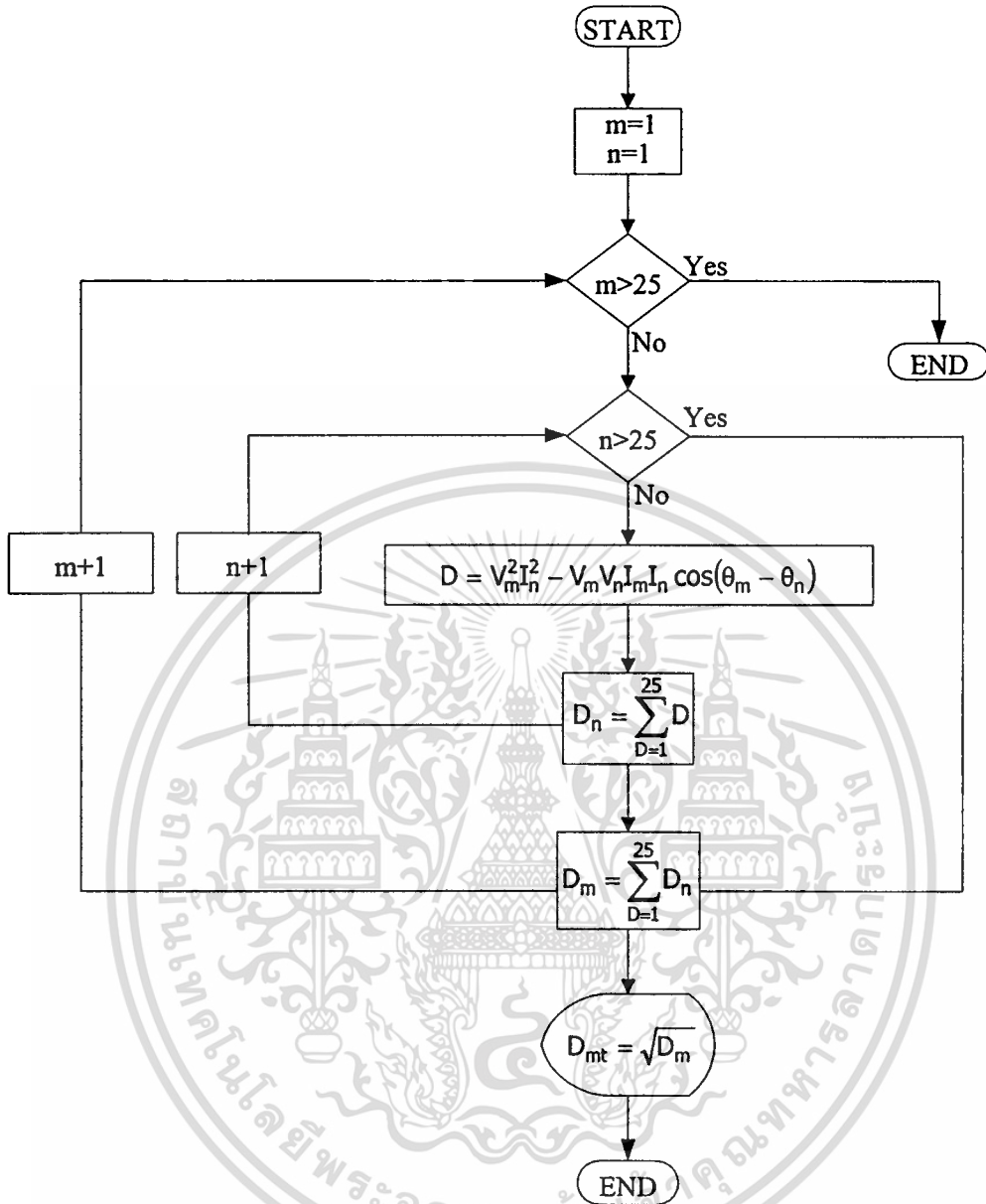
รูปที่ 4.1 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน



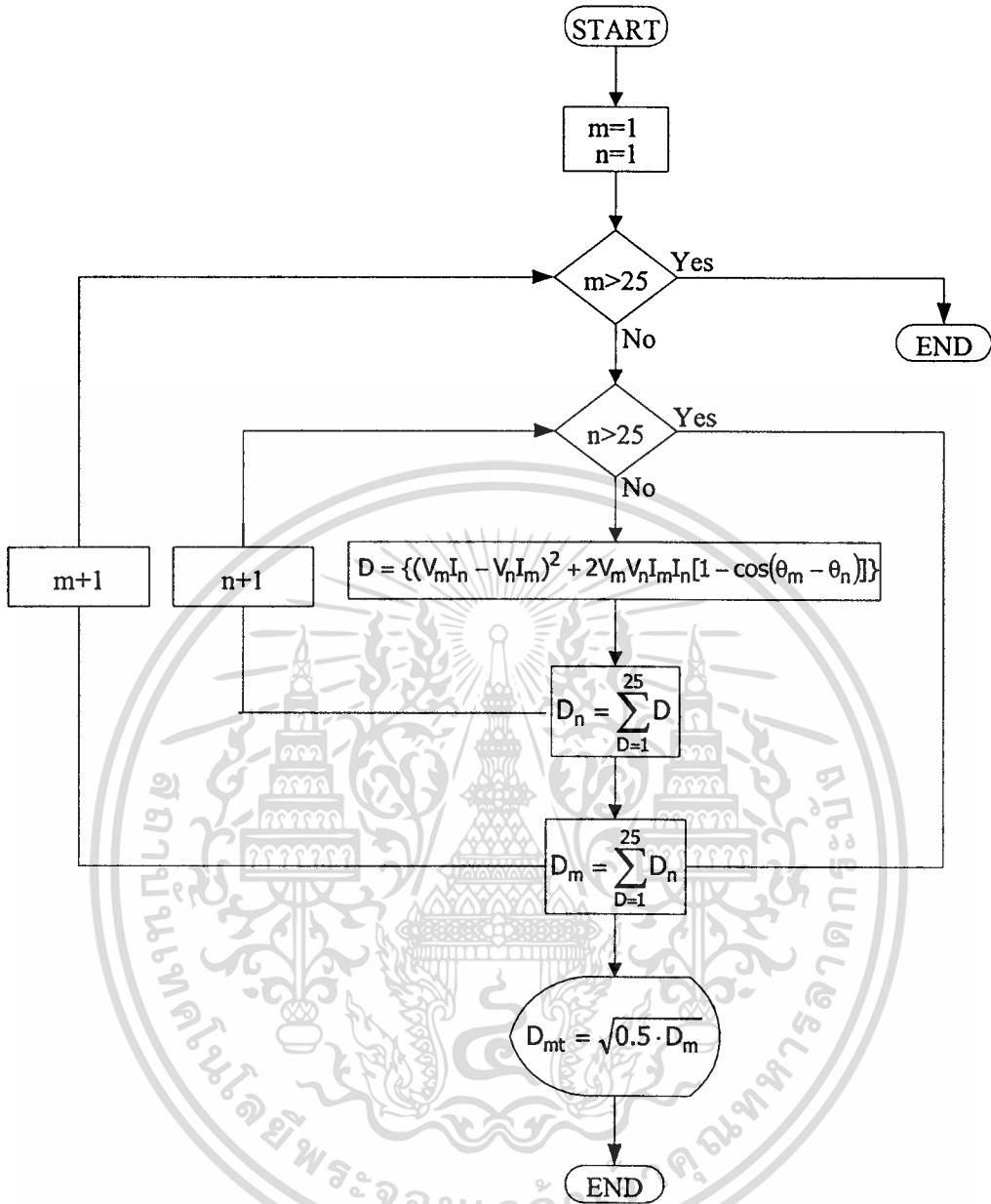
รูปที่ 4.1 (ต่อ) แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน



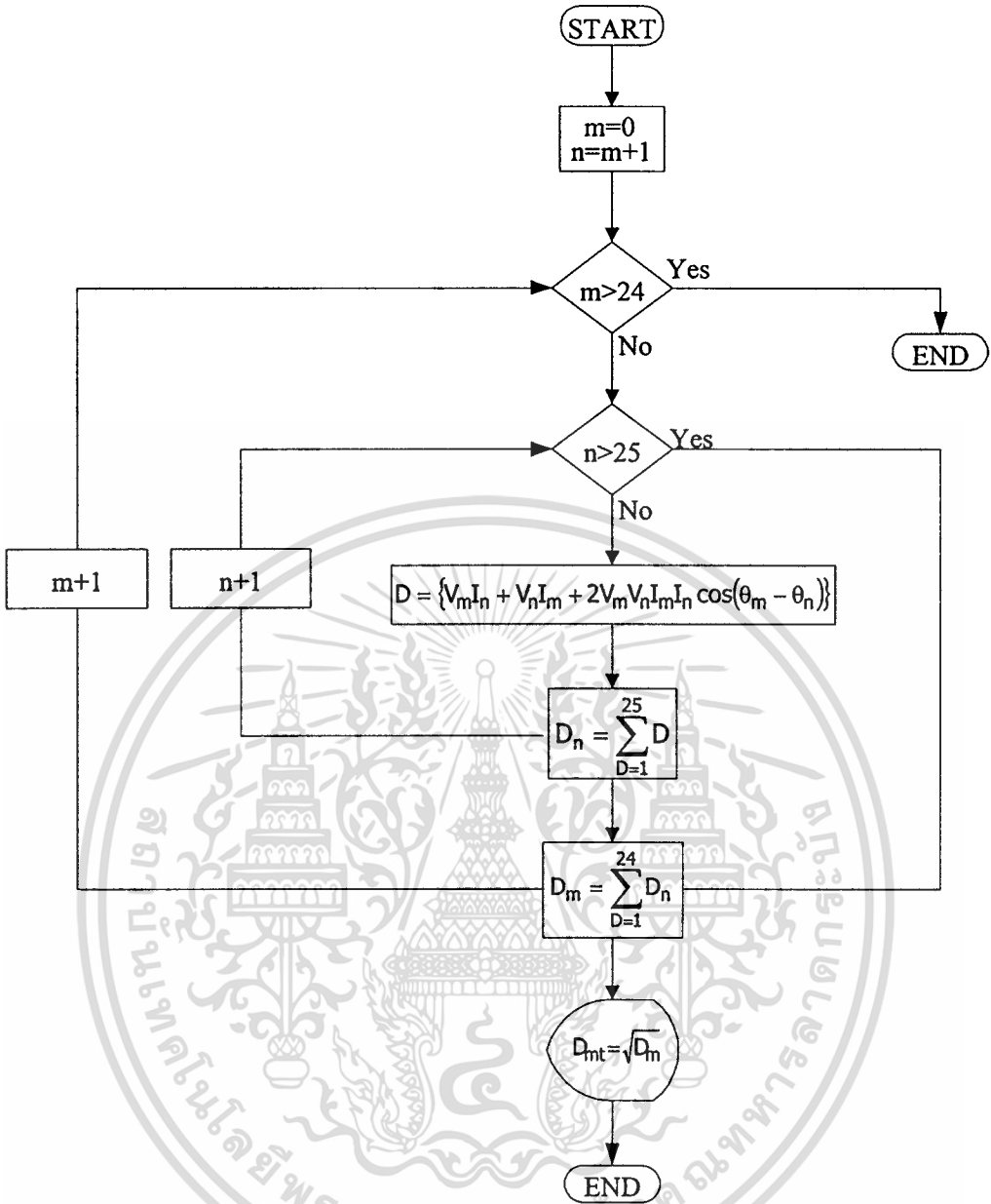
รูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิขึ้นด้วยสมการของ Budeanu (สมการที่ 3.20)



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผดเพี้ยนด้วยสมการของ Filipski (สมการที่ 3.25)



รูปที่ 4.4 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดพลาดด้วยสมการของ Czarnecki (สมการที่ 3.27)

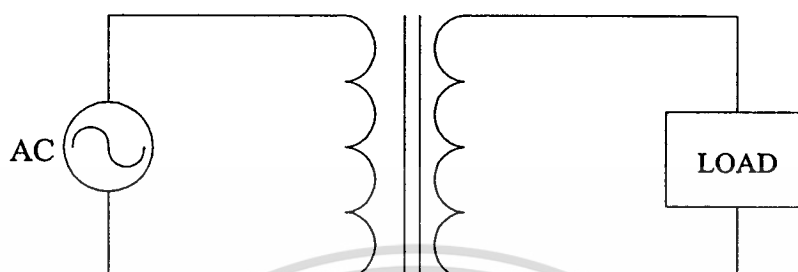


รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยสมการที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดตามเงื่อนไขต่างๆ

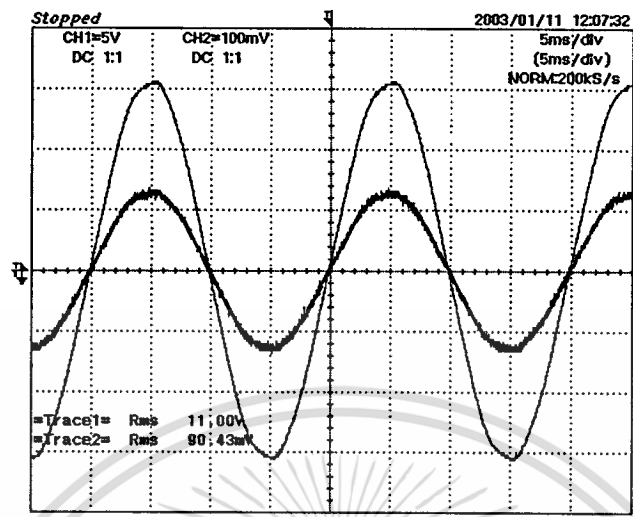
4.2.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

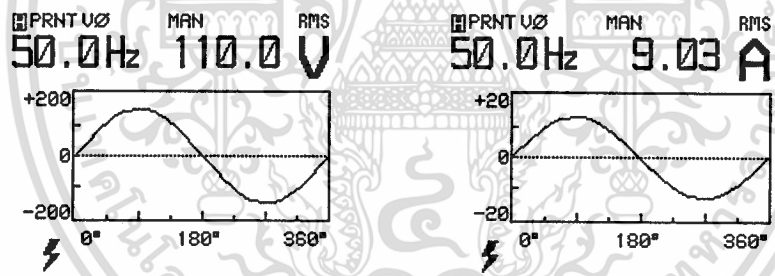
จากวงจรดังรูปที่ 4.6 ทำการทดสอบโดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1- ϕ ขนาด 1 kVA พิกัดแรงดัน 220/110V 50 Hz จ่ายโหลดแบบที่เป็นเชิงเส้น 100% ซึ่งโหลดแบบที่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ได้แก่ หลอดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 29 หลอด เป็นโหลดความต้านทานโดยมีค่าความต้านทาน 12.41 โอห์ม และเมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 4.6 แล้วทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงที่แรงดัน 220 V เพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำที่ 110 V และวัดกระแสทางด้านแรงต่ำให้ได้กระแสที่พิกัด จากนั้นทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ด้วยเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง เพื่อนำไปวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณด้วย Fast Fourier Transform (FFT) โดยใช้โปรแกรม MATLAB แล้วนำผลจากการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่ได้ ไปทำการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าต่างๆ พร้อมทั้งคำนวณหา กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนโดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลัง ในสมการที่ 3.13 และคำนวณหา กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนด้วยสมการที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu ในสมการที่ 3.20 , 3.25 , 3.27 และสมการที่ 3.29

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่ม เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางค่านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบที่เป็นเชิงเส้น จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางค่านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบเป็นเชิงเส้น จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

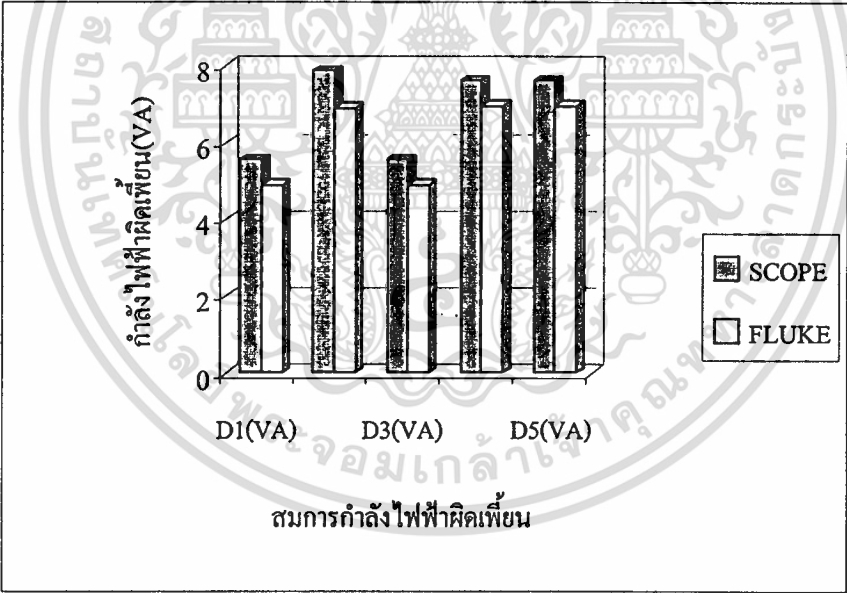
กรณี	เครื่องมือวัด	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _i	%THD _v
sin	SCOPE	994.423	994.407	1.029	5.578	1.000	1.000	1.013	1.224	1.037
	FLUKE	993.099	992.236	41.095	4.904	0.999	0.999	1.008	1.234	1.321
	%ความผิดพลาด	0.133	0.218	-3893.683	12.083	0.100	0.100	0.444	-0.792	-27.362

หมายเหตุ S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S คำนวณจากสมการที่ 3.7
 P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
 Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
 D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
 DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
 TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
 KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
 %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม
 %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม
 %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

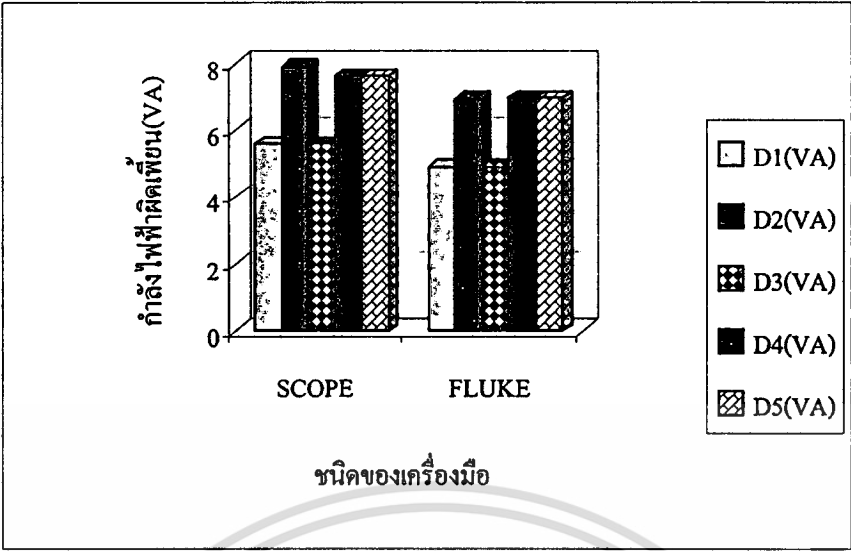
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

กรณี	เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
sin	SCOPE	5.578	7.888	5.578	7.631	7.631
	FLUKE	4.904	6.935	4.904	6.975	6.975
	%ความผิดพลาด	12.083	12.082	12.083	8.601	8.601

หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
 D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20
 D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25
 D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27
 D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น



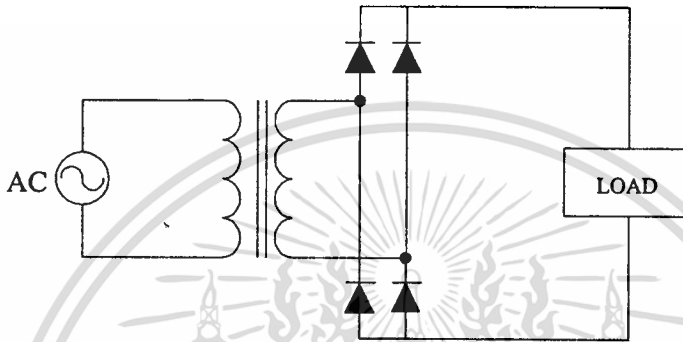
รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนโดยหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% พบว่ามีกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเกิดขึ้นในระบบที่ทำการทดสอบ เนื่องมาจากฮาร์มอนิกส่ออาจจะเกิดมาจากขดลวดภายในตัวหม้อแปลงหรือฮาร์มอนิกส์ที่ปะปนมากับระบบส่งจ่าย เห็นได้จาก $\%THD_u$ และ $\%THD_v$ ในตารางที่ 4.1 และผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ดังรูปที่ 4.9

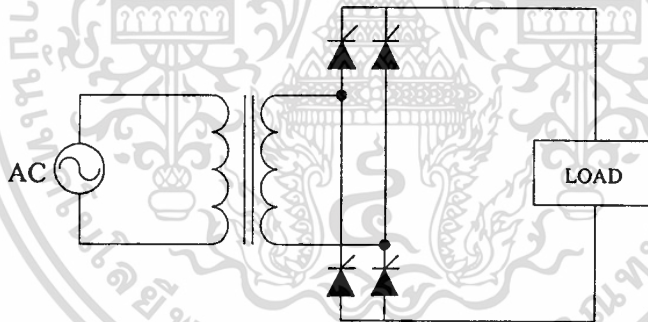
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่จากการคำนวณแต่ละสมการ พบว่า D3 จำนวนจากสมการที่ 3.25 มีค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเท่ากับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบ D4 และ D5 จำนวนจากสมการที่ 3.27 และ 3.29 มีกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเท่ากันแต่มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริง และยังพบว่า D2 จำนวนจากสมการที่ 3.20 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนสูงที่สุด เนื่องจากสมการนี้เป็นสมการเริ่มแรก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1927

4.2.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

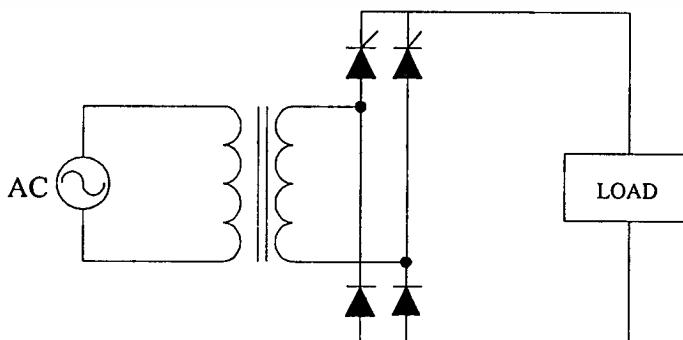
สำหรับการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงแบบ 1- ϕ ขนาด 1 kVA พิกัดแรงดัน 220/110V 50 Hz จ่ายโหดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยโหนดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ได้แก่ รีกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น , AC-DC full wave Thyristor converter, AC-DC half wave Thyristor converter และ AC-AC full wave controller converter ทดสอบร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหนดเป็นรีกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น

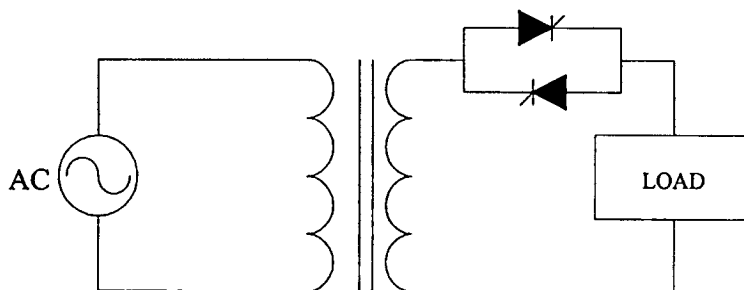


รูปที่ 4.12 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหนดเป็น AC-DC full wave Thyristor Converter



รูปที่ 4.13 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหนด AC-DC half wave Thyristor Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด AC-AC full wave Controller Converter

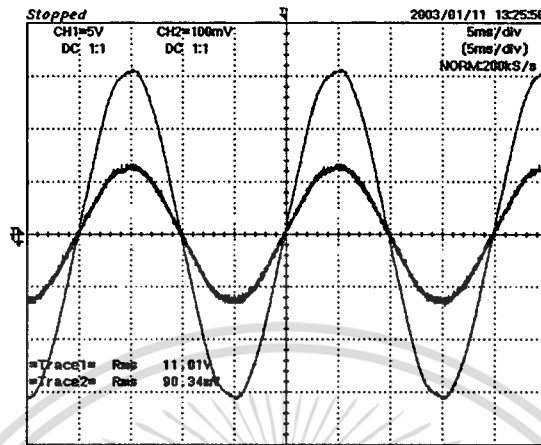
จากวงจรดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 คือ วงจรที่ใช้ในการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นไม่เชิงเส้น โดยโหลดแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น , AC-DC full wave Thyristor Converter, AC-DC half wave Thyristor Converter และ AC-AC full wave Controller Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ เป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ และเมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 ตามลำดับ แล้วทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงที่แรงดัน 220 V เพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำที่ 110 V และวัดกระแสทางด้านแรงต่ำให้ได้กระแสที่พิกัด จากนั้นทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ด้วยเครื่องมือวัด Digital Scope DL 1520 และ Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ทั้งสองเครื่อง เพื่อนำไปวิเคราะห์หูปคลื่นสัญญาณด้วย Fast Fourier Transform (FFT) โดยใช้โปรแกรม MATLAB แล้วนำผลจากการวิเคราะห์หูปคลื่นสัญญาณที่ได้ ไปทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ พร้อมทั้งคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนโดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังในสมการที่ 3.13 และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนด้วยสมการที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd , Filipski, Czarnecki, Budeanu ในสมการที่ 3.20 , 3.25 , 3.27 และสมการที่ 3.29

4.2.4 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

4.2.4.1 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น

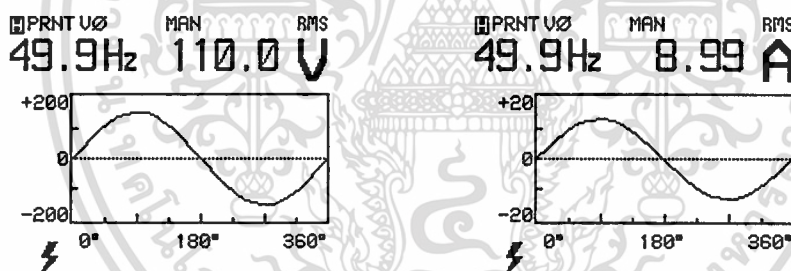
จากวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.11 โหลดแบบไม่เชิงเส้น คือ เร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำตามลำดับ สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. กรณีสื่อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 29 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

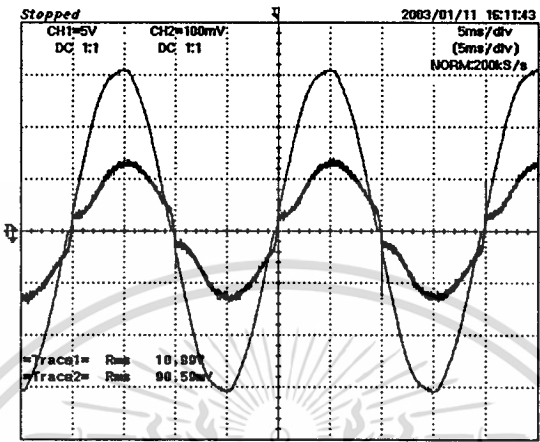
รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อกับความต้านทาน จากเครื่องมือวัด Digital scope



รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น เร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อกับความต้านทาน จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

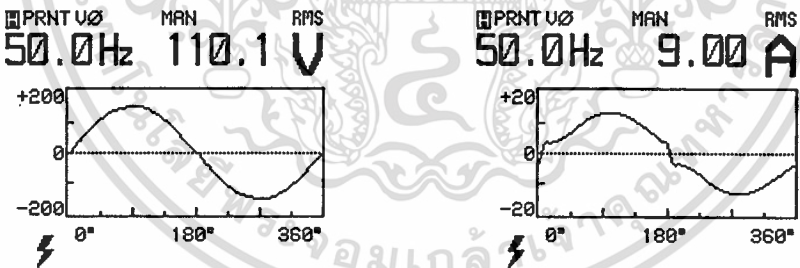
2. กรณีสื่อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่าง ๆ

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 30 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมตัวเหนี่ยวนำขนาด 52.9 mH



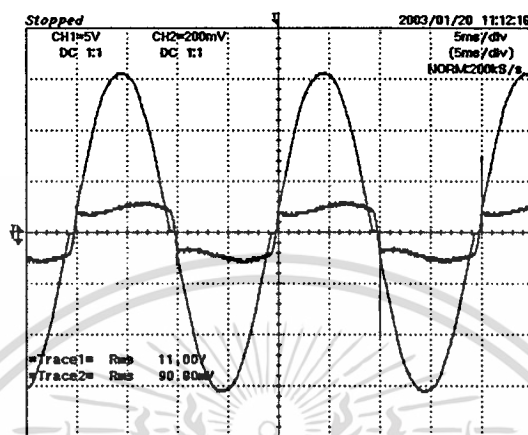
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH จากเครื่องมือวัด Digital scope



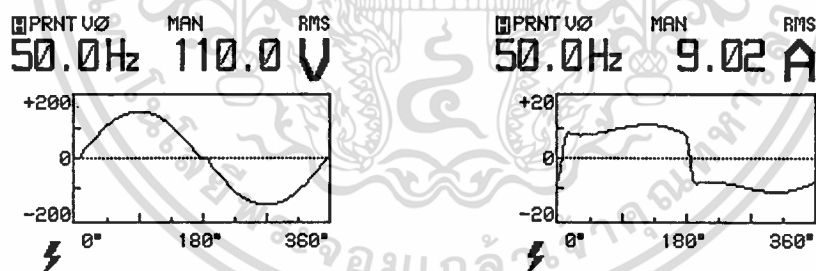
รูปที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.2. หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับโหลด อินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 33 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 105.8 mH



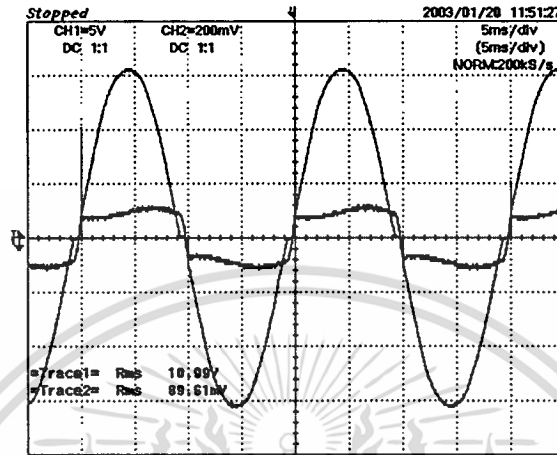
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH จากเครื่องมือวัด Digital scope



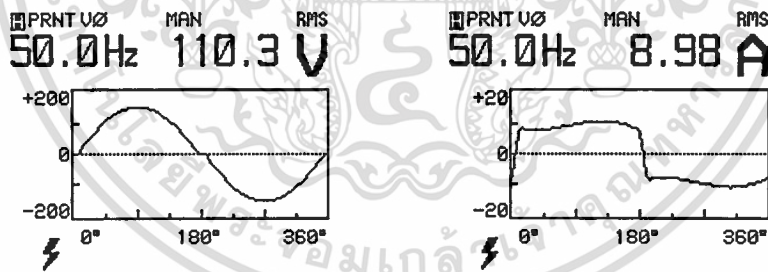
รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.3 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับ หลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 35 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 157.8 mH



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH จากเครื่องมือวัด Digital scope



รูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _i	%THD _v
R	SCOPE	989.807	990.019	989.982	1.602	8.356	1	1	1.015	1.658	1.238
	FLUKE	989.627	989.773	988.871	42.093	3.728	0.999	0.999	1.009	1.287	1.143
	%ความผิดพลาด	0.018	0.025	0.112	-2527.528	55.385	0.100	0.100	0.591	22.390	7.690
L=52.9mH	SCOPE	987.631	992.188	970.346	177.647	106.329	0.984	0.978	1.845	9.406	1.996
	FLUKE	986.722	991.305	976.015	137.116	106.145	0.991	0.985	1.819	9.439	1.998
	%ความผิดพลาด	0.092	0.089	-0.584	22.791	0.173	-0.711	-0.716	1.409	-0.351	-0.070
RL L=105.8mH	SCOPE	940.007	996.117	907.294	201.785	358.259	0.976	0.911	4.929	34.792	4.112
	FLUKE	937.914	992.605	913.039	164.793	352.799	0.984	0.919	4.726	34.367	34.367
	%ความผิดพลาด	0.223	0.353	-0.633	18.332	1.524	-0.809	-0.900	4.118	1.222	-735.753
L=158.7mH	SCOPE	923.622	982.266	892.885	188.546	363.391	0.978	0.909	5.079	35.917	4.223
	FLUKE	923.938	981.73	900.66	150.038	360.685	0.986	0.917	4.867	35.619	4.351
	%ความผิดพลาด	-0.034	0.055	-0.871	20.424	0.745	-0.818	-0.880	4.174	0.830	-3.045

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน

S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10

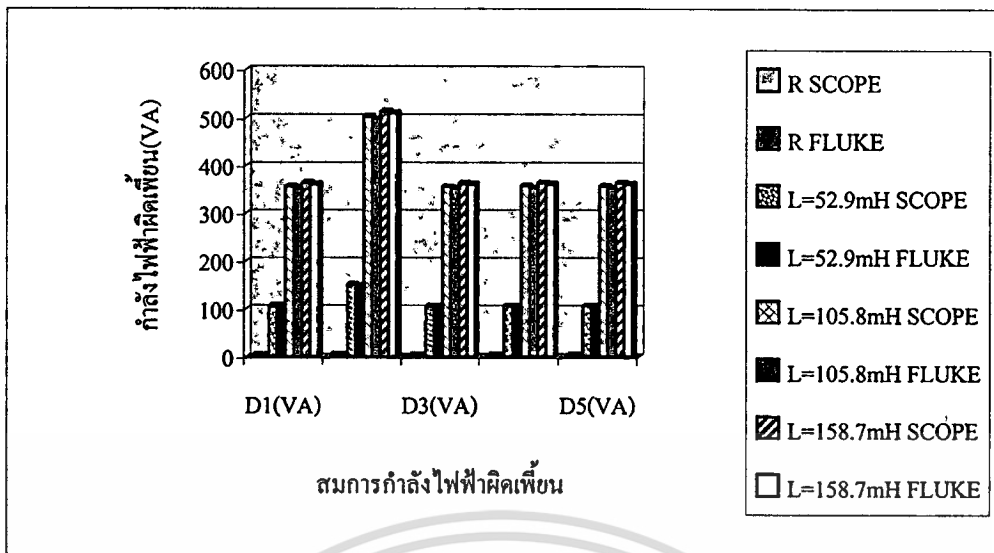
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor จำนวนจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor จำนวนจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor จำนวนจากสมการที่ 2.10
- %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกสักรวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่นคู่ร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่างๆ

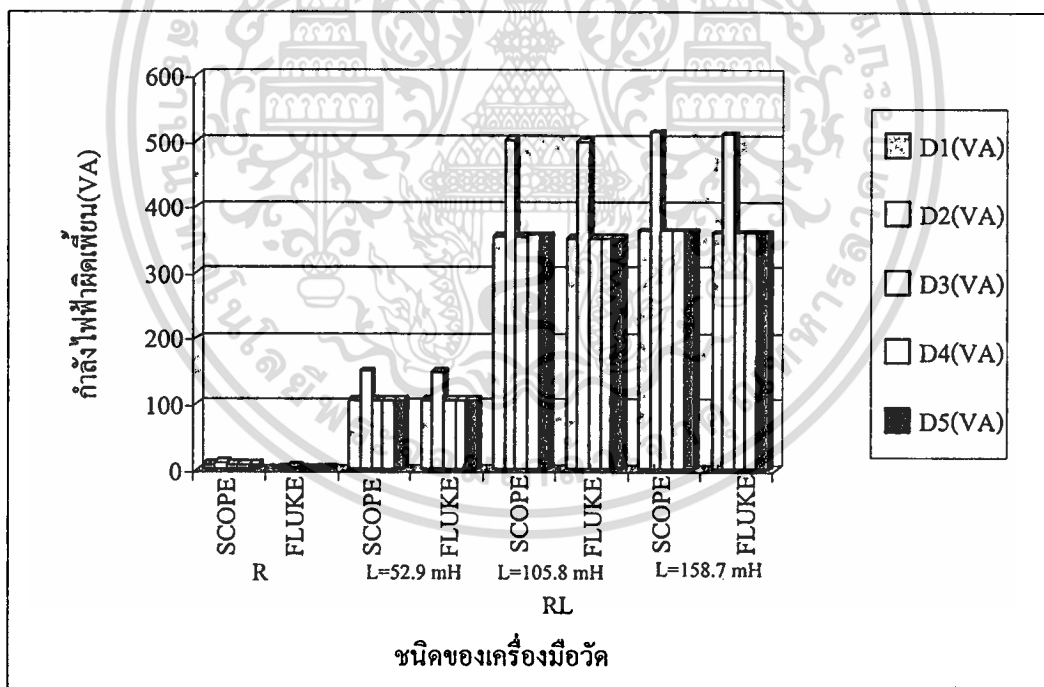
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	8.356	11.817	8.356	8.760	8.760
		FLUKE	3.728	5.272	3.728	6.106	6.106
		%ความผิดพลาด	55.385	55.384	55.384	30.295	30.295
RL	L=52.9mH	SCOPE	106.329	150.372	106.329	106.771	106.771
		FLUKE	106.145	150.112	106.145	106.198	106.198
		%ความผิดพลาด	0.173	0.173	0.173	0.536	0.536
	L=105.8mH	SCOPE	358.259	506.655	358.259	358.349	358.349
		FLUKE	352.799	498.933	352.799	352.816	352.816
		%ความผิดพลาด	1.524	1.524	1.524	1.544	1.544
	L=158.7mH	SCOPE	363.391	513.913	363.391	363.595	363.595
		FLUKE	360.685	510.086	360.685	360.714	360.714
		%ความผิดพลาด	0.745	0.745	0.745	0.792	0.792

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
- D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผัดเฟี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

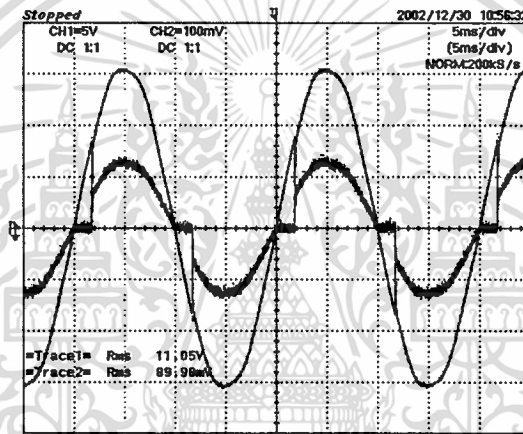


รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผัดเฟี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็นเร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

4.2.4.2 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter

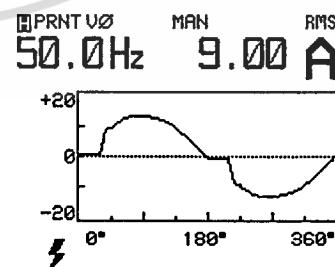
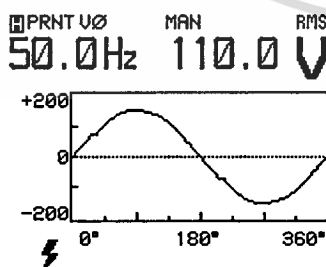
จากวงจรการทดสอบรูปที่ 4.12 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำตามลำดับ ในหัวข้อนี้ทำการทดสอบที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%, 30% และ 50% สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 30 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

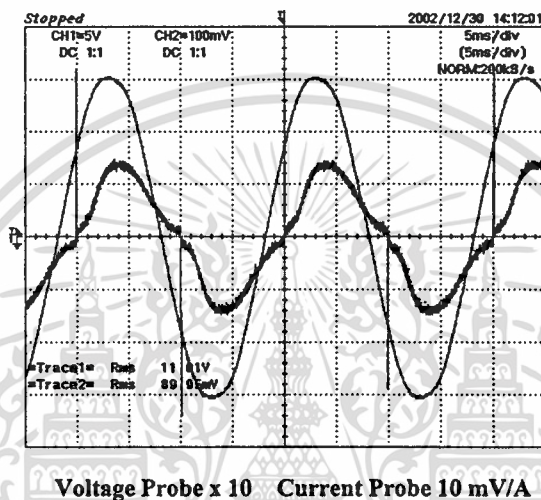
รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



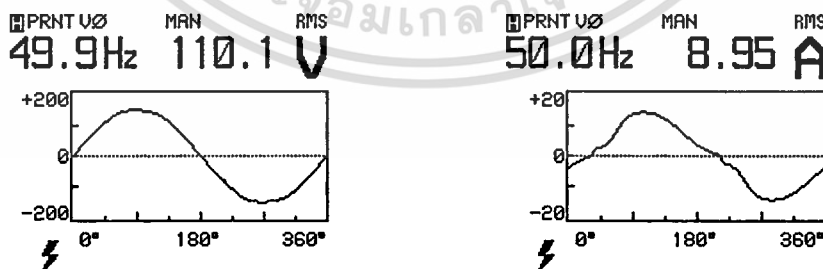
รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 15%

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 30 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 15%

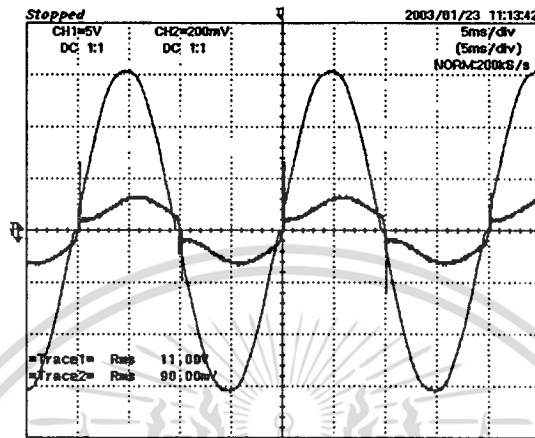


รูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



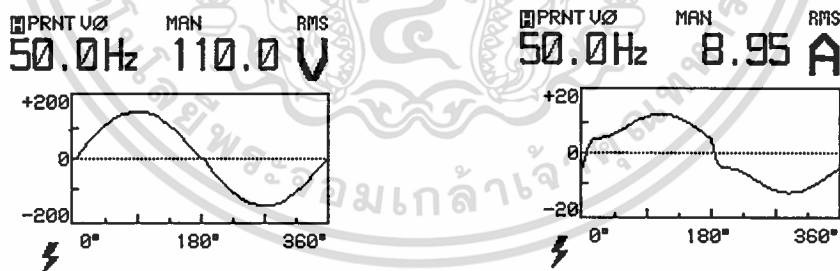
รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 15%จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 33 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%



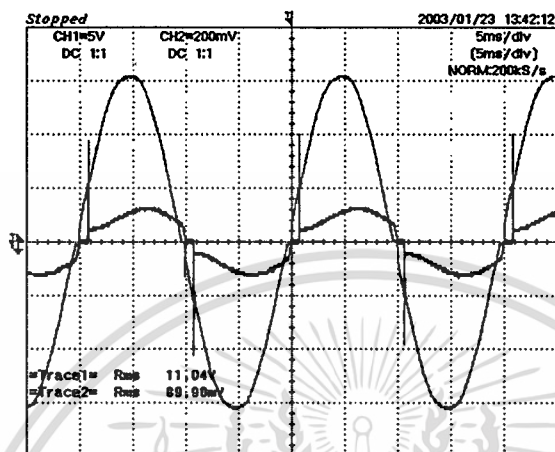
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%จากเครื่องมือวัด Digital Scope



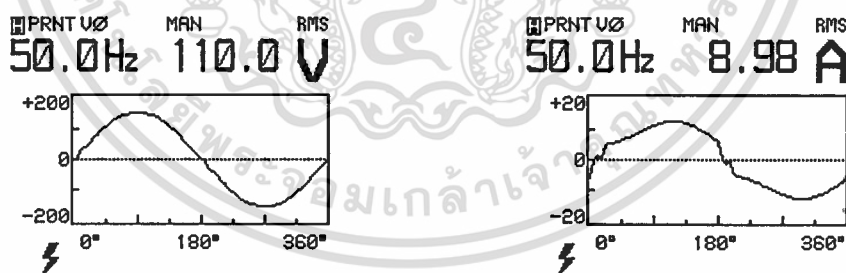
รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 35 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.31 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.32 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายโวลต์เป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสอาร์มอนิกสรวม (THD_v) 15%

ลักษณะโวลต์	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	974.919	986.994	970.451	87.290	157.362	0.996	0.983	2.469	2.355
	FLUKE	979.610	991.259	977.958	49.133	154.201	0.999	0.987	2.412	2.384
	%ความผิดพลาด	-0.481	-0.432	-0.774	43.713	2.009	-0.271	-0.346	2.341	-1.244
L=52.9 mH	SCOPE	983.121	994.112	887.611	419.277	156.882	0.904	0.893	1.327	1.780
	FLUKE	984.794	995.577	902.204	391.546	154.580	0.917	0.906	1.300	1.710
	%ความผิดพลาด	-0.170	-0.147	-1.644	6.614	1.467	-1.449	-1.490	2.019	3.910
RL L=105.8 mH	SCOPE	975.708	986.518	942.950	242.211	159.367	0.969	0.956	1.896	2.117
	FLUKE	970.984	981.857	946.894	205.038	159.358	0.977	0.964	1.885	2.117
	%ความผิดพลาด	0.484	0.473	-0.418	15.347	0.006	-0.898	-0.900	0.586	0.005
L=158.7 mH	SCOPE	976.647	987.175	919.247	323.381	157.873	0.943	0.931	2.415	2.328
	FLUKE	971.494	982.201	925.092	288.672	159.974	0.955	0.942	2.305	2.557
	%ความผิดพลาด	0.528	0.504	-0.636	10.733	-1.330	-1.198	-1.149	4.563	-9.831

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S คำนวณจากสมการที่ 3.7

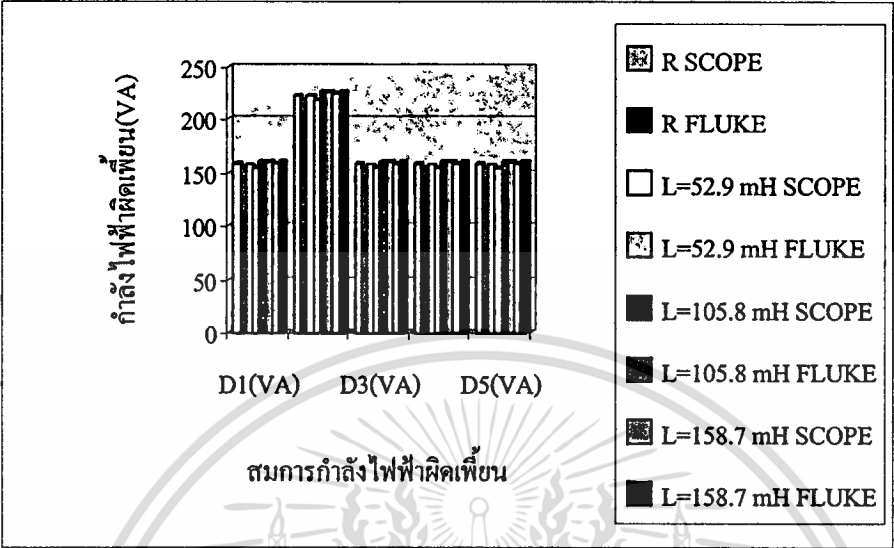
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรว
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรว
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้น ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรว (THD_i) 15%

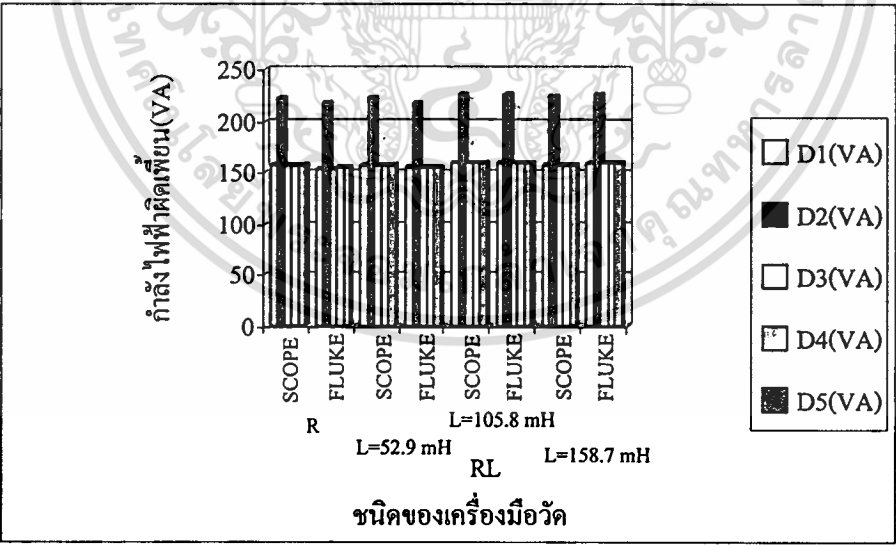
ลักษณะ โหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	157.362	222.543	157.362	157.884	157.884
		FLUKE	154.201	218.073	154.201	154.530	154.530
		%ความผิดพลาด	2.009	2.009	2.009	2.124	2.124
RL	L=52.9 mH	SCOPE	156.882	221.864	156.882	157.029	157.029
		FLUKE	154.580	218.609	154.580	154.610	154.610
		%ความผิดพลาด	1.467	1.467	1.467	1.541	1.541
	L=105.8 mH	SCOPE	159.367	225.379	159.367	159.581	159.581
		FLUKE	159.358	225.366	159.358	159.547	159.547
		%ความผิดพลาด	0.006	0.006	0.006	0.021	0.021
	L=158.7 mH	SCOPE	157.873	223.267	157.873	157.979	157.979
		FLUKE	159.974	226.237	159.974	159.999	159.999
		%ความผิดพลาด	-1.330	-1.330	-1.330	-1.279	-1.279

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski

D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarniecki
D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu

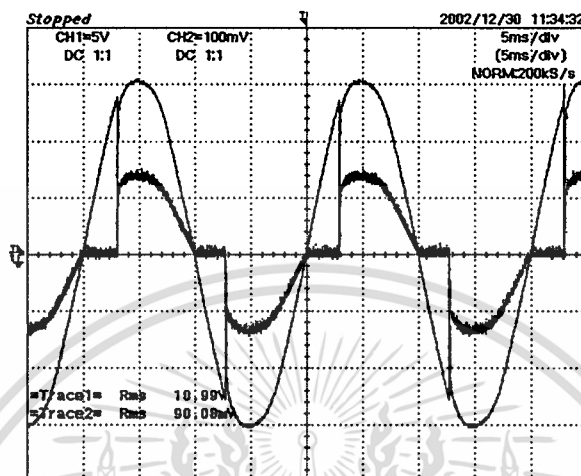


รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของกระแสอาร์มอนิกส์รวม (THD) 15%



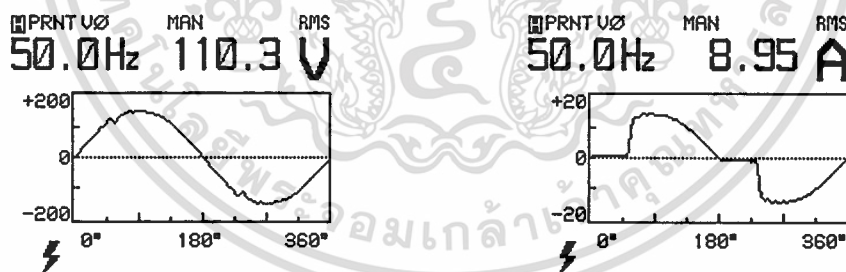
รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสอาร์มอนิกส์รวม (THD) 15%

3. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 33 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

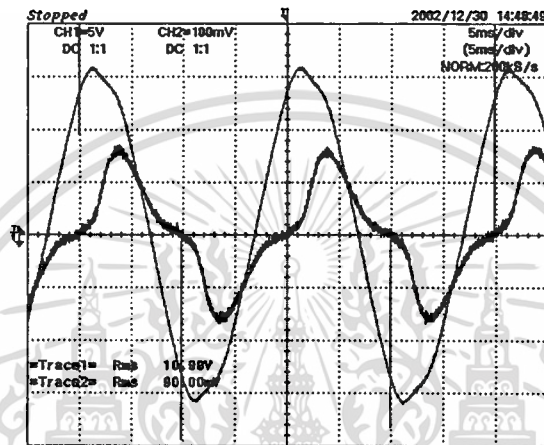
รูปที่ 4.35 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.36 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

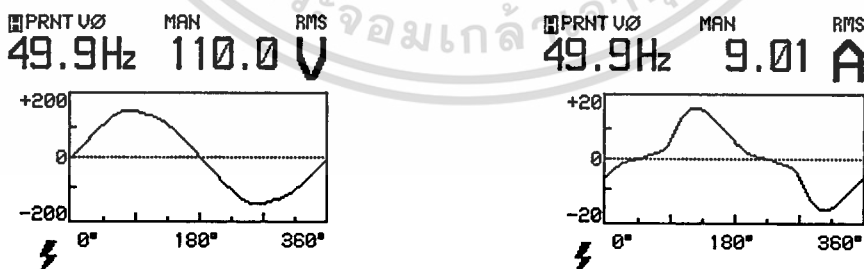
4. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%

4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 36 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



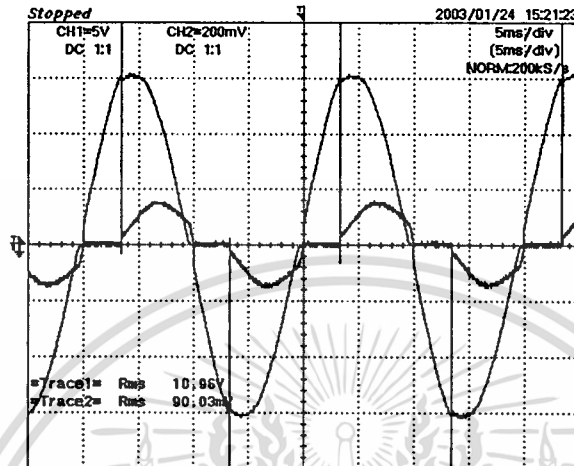
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.37 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.38 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 39 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%

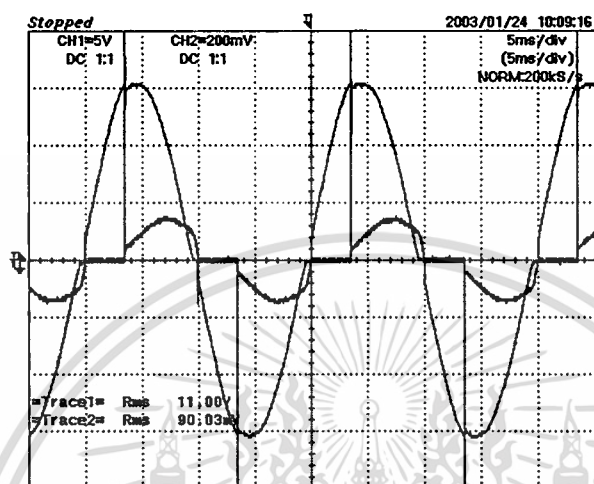


รูปที่ 4.39 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%จากเครื่องมือวัด Digital Scope



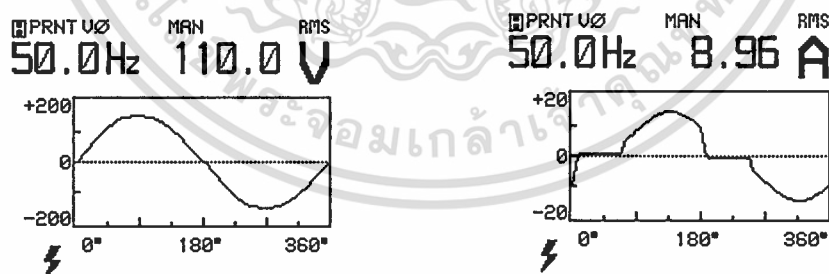
รูปที่ 4.40 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 42 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.41 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.42 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบเมื่อปรับเปลี่ยนขั้วโหนดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 30%

ลักษณะ โหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	939.631	989.338	902.840	235.967	328.617	0.968	0.913	5.534	3.436
	FLUKE	933.122	983.062	904.561	202.333	327.479	0.976	0.920	5.520	3.540
	%ความผิดพลาด	0.693	0.634	-0.191	14.254	0.346	-0.868	-0.822	0.258	-3.042
L=52.9 mH	SCOPE	957.251	1004.400	684.609	658.386	326.455	0.721	0.682	1.871	3.331
	FLUKE	945.493	992.285	686.875	637.695	325.848	0.733	0.692	1.860	3.306
	%ความผิดพลาด	1.228	1.206	-0.331	3.143	0.186	-1.679	-1.555	0.609	0.748
RL L=105.8 mH	SCOPE	950.738	994.362	716.059	614.186	314.310	0.759	0.720	2.870	3.032
	FLUKE	937.084	981.491	727.536	578.021	316.081	0.783	0.741	2.863	3.259
	%ความผิดพลาด	1.436	1.294	-1.603	5.888	-0.563	-3.162	-2.944	0.244	-7.500
L=158.7 mH	SCOPE	948.546	991.067	689.622	640.004	311.497	0.733	0.696	3.574	3.265
	FLUKE	939.414	982.433	702.896	610.775	313.155	0.755	0.716	3.478	3.469
	%ความผิดพลาด	0.963	0.871	-1.925	4.567	-0.532	-2.974	-2.831	2.697	-6.239

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดต่างๆไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน
S(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้น ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับ ผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วม กับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 30%

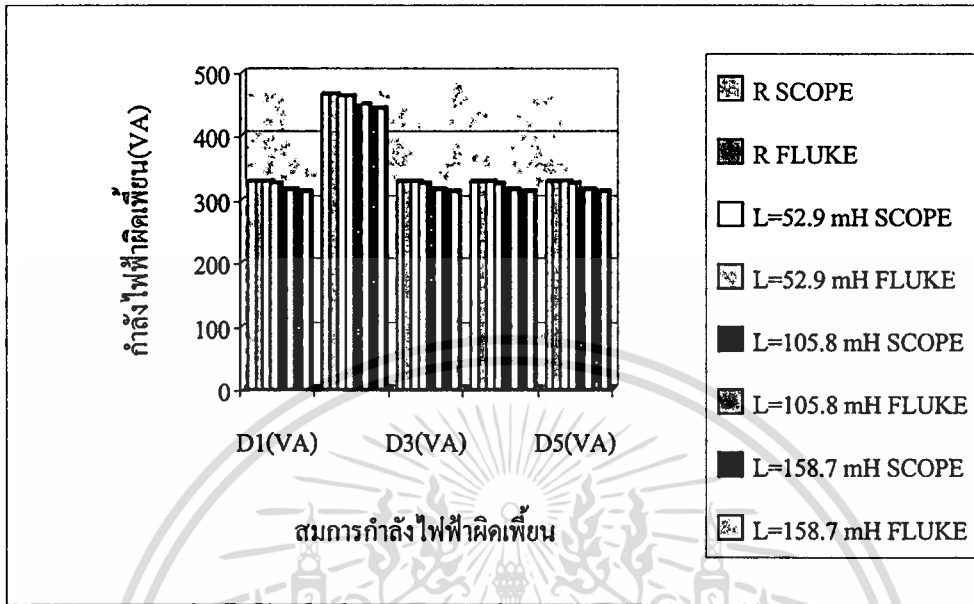
ลักษณะ โหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	328.617	464.735	328.617	328.798	328.798
		FLUKE	327.479	463.125	327.479	327.488	327.488
		%ความผิดพลาด	0.346	0.346	0.346	0.398	0.398
RL	L=52.9 mH	SCOPE	326.455	461.676	326.455	326.764	326.764
		FLUKE	325.848	460.818	325.848	325.962	325.962
		%ความผิดพลาด	0.186	0.186	0.186	0.245	0.245
	L=105.8 mH	SCOPE	314.310	444.502	314.310	314.618	314.618
		FLUKE	316.081	447.006	316.081	316.340	316.340
		%ความผิดพลาด	-0.563	-0.563	-0.563	-0.547	-0.547
	L=158.7 mH	SCOPE	311.497	440.524	311.497	311.549	311.549
		FLUKE	313.155	442.868	313.155	313.396	313.396
		%ความผิดพลาด	-0.532	-0.532	-0.532	-0.593	-0.593

หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.13

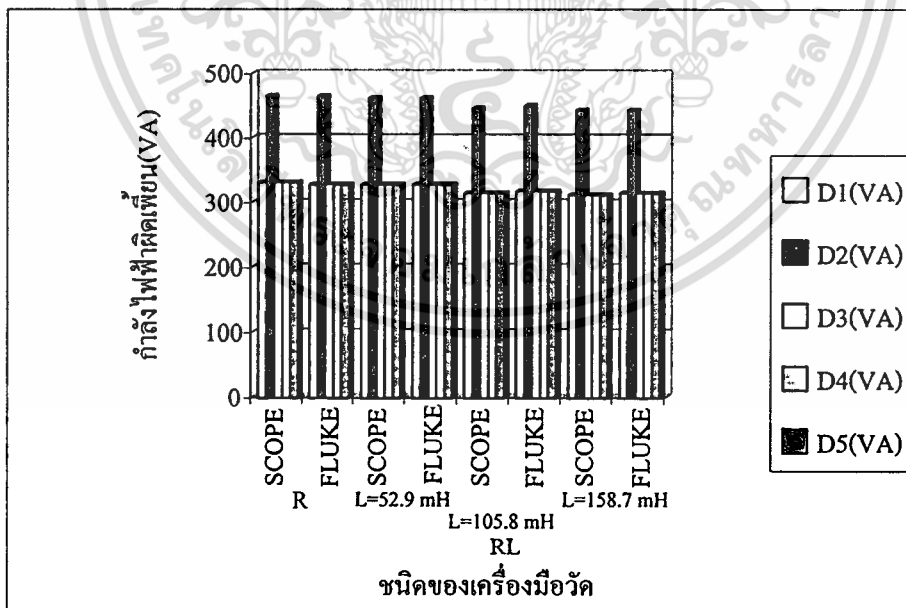
D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd

เอกสารนี้เป็นเอกสาร D3 (VA) ไร้คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski เป็นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarniecki
 D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



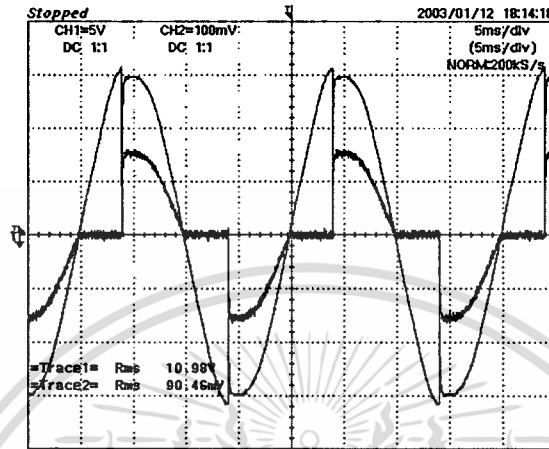
รูปที่ 4.43 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD) 30%



รูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD) 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 36 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

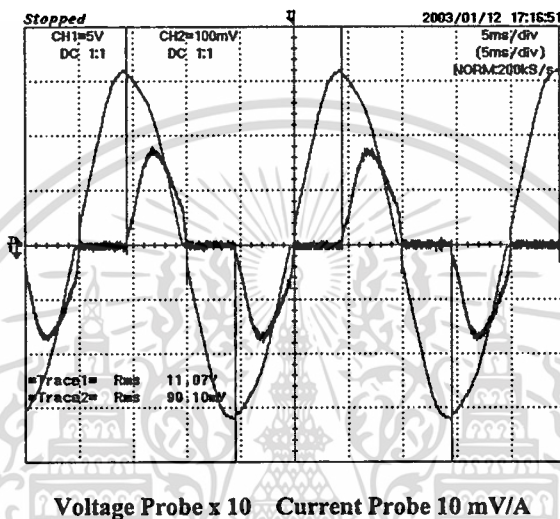
รูปที่ 4.45 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



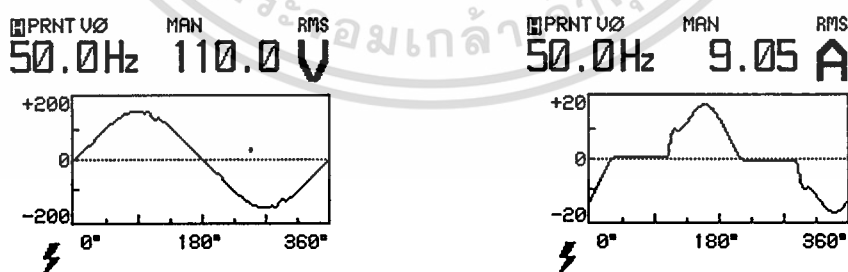
รูปที่ 4.46 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 50%

6.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 44 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 50%

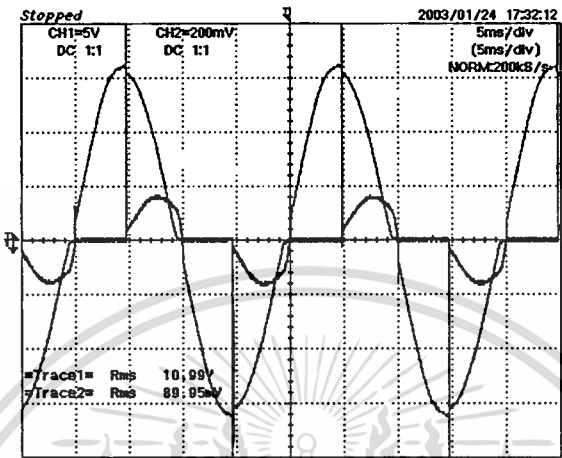


รูปที่ 4.47 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



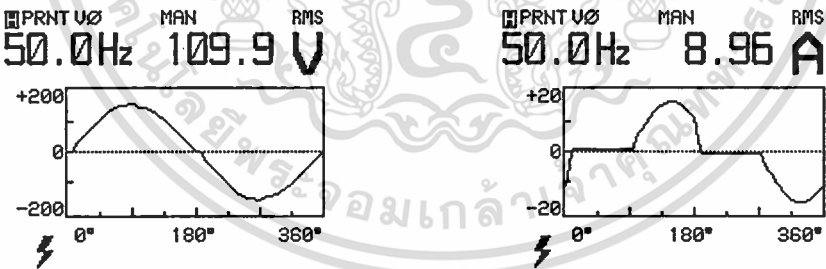
รูปที่ 4.48 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.2 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโวลต์ AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 52 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50%



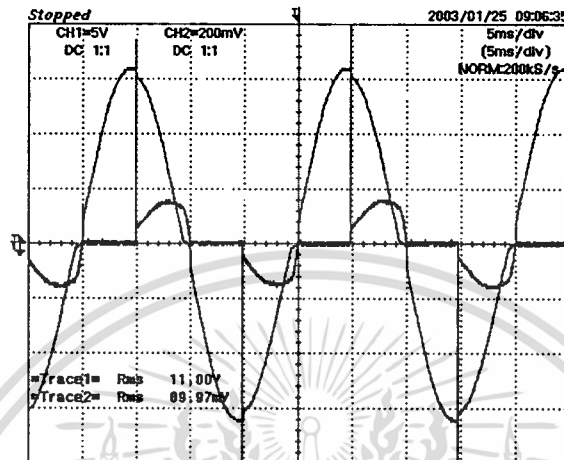
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.49 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลต์เป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.50 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลต์เป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.3 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 60 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.51 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.52 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงไฮลด์เป็นAC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อรวมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสสลับรวมกัน (THD) 50%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	884.405	985.930	784.545	367.734	470.445	0.906	0.796	8.906	5.317
	FLUKE	880.236	981.440	795.537	329.820	470.707	0.924	0.811	8.701	5.713
	%ความผิดพลาด	0.471	0.455	-1.401	10.310	-0.056	-2.021	-1.873	2.303	-7.455
L=52.9 mH	SCOPE	903.671	1005.000	607.357	650.649	466.604	0.682	0.604	3.341	3.924
	FLUKE	879.046	980.467	611.270	611.132	462.798	0.707	0.623	3.384	4.045
	%ความผิดพลาด	2.725	2.441	-0.644	6.073	0.816	-3.634	-3.144	-1.272	-3.087
L=105.8 mH	SCOPE	876.647	981.712	492.436	706.451	471.373	0.572	0.502	4.484	4.448
	FLUKE	860.402	968.607	504.180	676.554	475.687	0.598	0.521	4.586	4.561
	%ความผิดพลาด	1.853	1.335	-2.385	4.232	-0.915	-4.495	-3.768	-2.284	-2.554
L=158.7 mH	SCOPE	872.505	976.628	478.222	710.262	469.715	0.559	0.490	5.494	4.530
	FLUKE	862.929	965.719	502.117	681.411	464.942	0.593	0.520	5.485	4.568
	%ความผิดพลาด	1.097	1.117	-4.997	4.062	1.016	-6.213	-6.167	0.158	-0.837

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทำไปไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าผิเคี่ยน
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S คำนวณจากสมการที่ 3.7

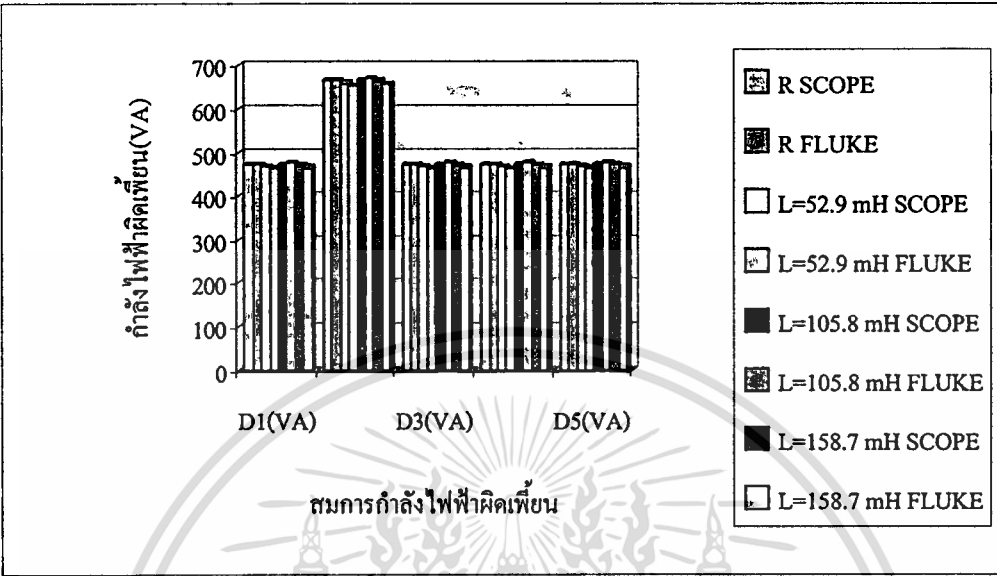
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม
- %ความผิพพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและค้วเหนี่ยวนา ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 50%

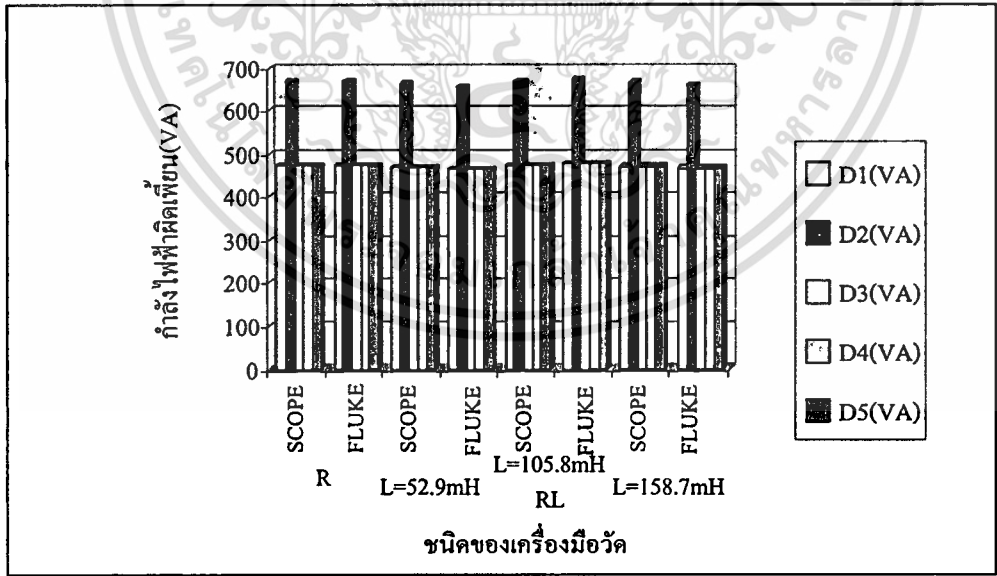
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	470.445	665.309	470.445	470.526	470.526
		FLUKE	470.707	665.681	470.707	470.720	470.720
		%ความผิพพลาด	-0.056	-0.056	-0.056	-0.041	-0.041
RL	L=52.9 mH	SCOPE	466.604	659.877	466.604	466.775	466.775
		FLUKE	462.798	654.495	462.798	462.806	462.806
		%ความผิพพลาด	0.816	0.816	0.816	0.850	0.850
	L=105.8 mH	SCOPE	471.373	666.622	471.373	471.379	471.379
		FLUKE	475.687	672.723	475.687	475.976	475.976
		%ความผิพพลาด	-0.915	-0.915	-0.915	-0.975	-0.975
	L=158.7 mH	SCOPE	469.715	664.278	469.715	469.820	469.820
		FLUKE	464.942	657.528	464.942	465.336	465.336
		%ความผิพพลาด	1.016	1.016	1.016	0.954	0.954

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski

D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarniecki
 D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



รูปที่ 4.53 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 50%



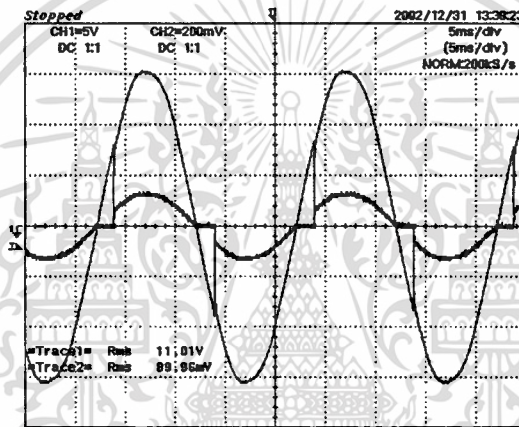
รูปที่ 4.54 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.3 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter

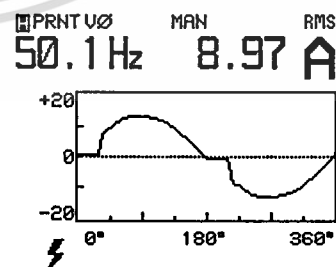
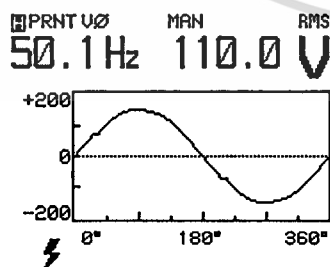
จากวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.13 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำตามลำดับ ในหัวข้อนี้ทำการทดสอบที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%, 30% และ 50% สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 32 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

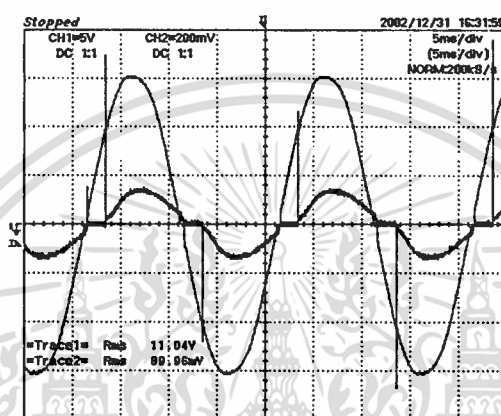
รูปที่ 4.55 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.56 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

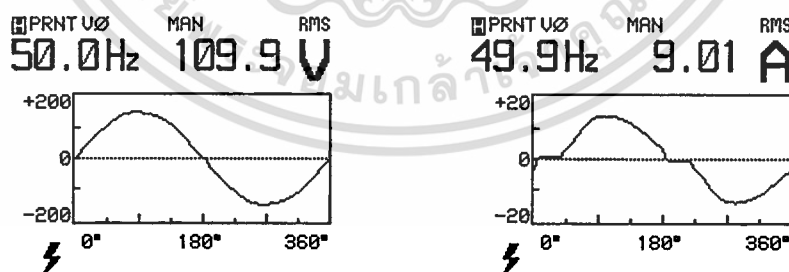
2. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD_i) 15%

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 34 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD_i) 15%



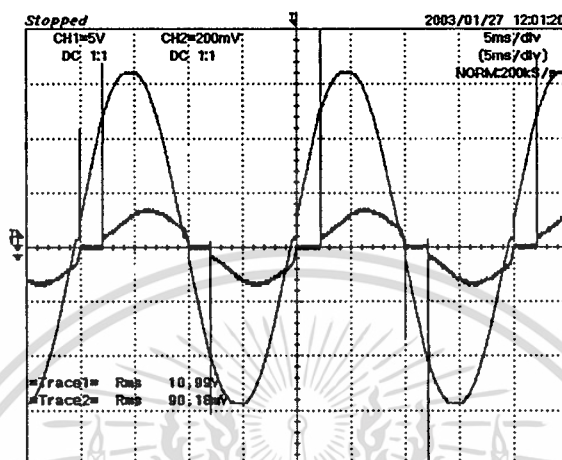
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.57 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



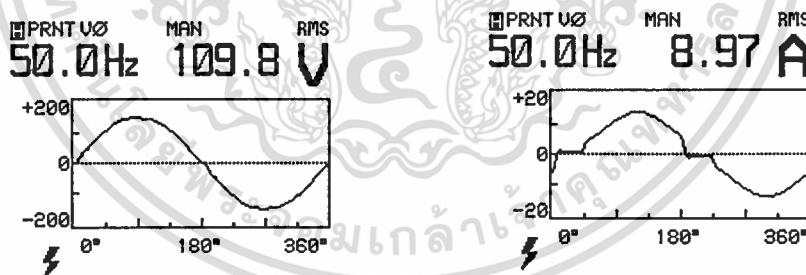
รูปที่ 4.58 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 37 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 15%



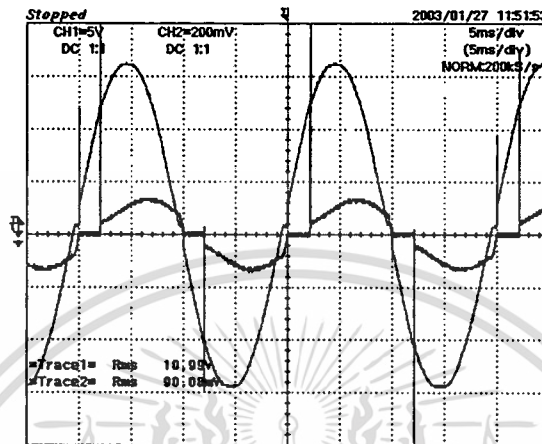
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.59 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



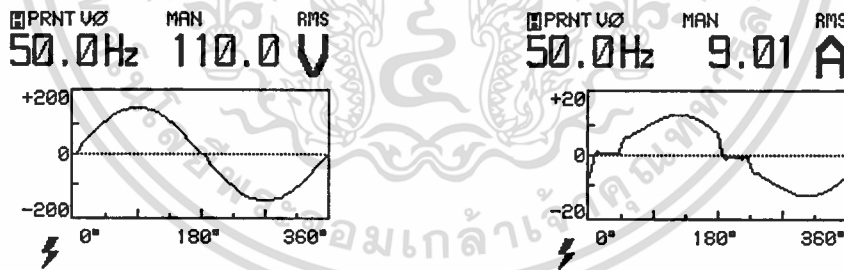
รูปที่ 4.60 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i) 15% จากเครื่องมือวัดPower Harmonic Analyzer

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 40 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.61 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.62 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบเมื่อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสสลับรวมอนิกส์รวม (THD_i) 15%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	963.362	976.180	958.360	89.626	162.611	0.996	0.982	2.692	2.451
	FLUKE	972.787	985.752	970.719	52.083	163.403	0.999	0.985	2.543	2.459
	%ความผิดพลาด	-0.978	-0.981	-1.290	41.889	-0.487	-0.291	-0.306	5.549	-0.335
L=52.9 mH	SCOPE	973.420	986.151	907.446	348.575	165.924	0.934	0.920	1.709	1.751
	FLUKE	973.489	985.489	921.409	309.585	162.333	0.948	0.935	1.651	1.780
	%ความผิดพลาด	-0.007	0.067	-1.539	11.186	2.164	-1.543	-1.608	3.377	-1.616
RL L=105.8 mH	SCOPE	981.062	991.535	860.506	467.264	155.997	0.879	0.868	2.360	2.082
	FLUKE	970.840	982.527	864.475	436.842	164.953	0.893	0.880	2.290	2.305
	%ความผิดพลาด	1.042	0.909	-0.461	6.511	-5.741	-1.559	-1.371	3.000	-10.699
L=158.7 mH	SCOPE	984.762	995.641	855.338	483.932	159.711	0.870	0.859	2.819	2.235
	FLUKE	972.296	983.720	862.299	444.911	161.865	0.889	0.877	2.772	2.281
	%ความผิดพลาด	1.266	1.197	-0.814	8.063	-1.349	-2.102	-2.037	1.664	-2.022

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าเคปเพียน
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S คำนวณจากสมการที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

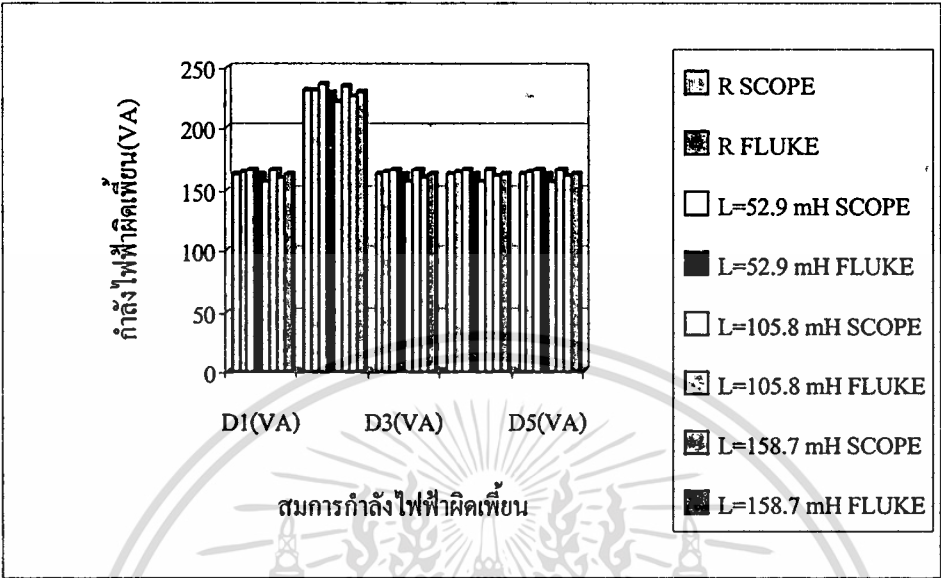
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_i คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสัรวม
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสัรวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้น ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half wave Thyristor Converte ต่อยว่กับความต้านทาน และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสัรวม (THD_i) 15%

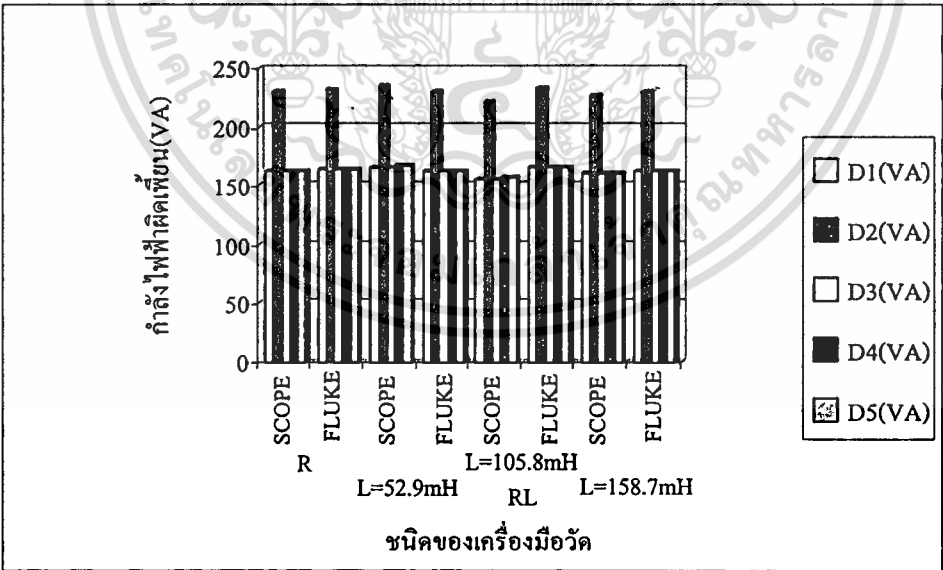
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	162.611	229.967	162.611	162.680	162.680
		FLUKE	163.403	231.087	163.403	163.489	163.489
		%ความผิดพลาด	-0.487	-0.487	-0.487	-0.497	-0.497
RL	L=52.9 mH	SCOPE	165.924	234.651	165.924	166.164	166.164
		FLUKE	162.333	229.574	162.333	162.353	162.353
		%ความผิดพลาด	2.164	2.164	2.164	2.294	2.294
	L=105.8 mH	SCOPE	155.997	220.613	155.997	156.379	156.379
		FLUKE	164.953	233.278	164.953	165.032	165.032
		%ความผิดพลาด	-5.741	-5.741	-5.741	-5.534	-5.534
	L=158.7 mH	SCOPE	159.711	225.865	159.711	160.192	160.192
		FLUKE	161.865	228.911	161.865	162.200	162.200
		%ความผิดพลาด	-1.349	-1.349	-1.349	-1.253	-1.253

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski

D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



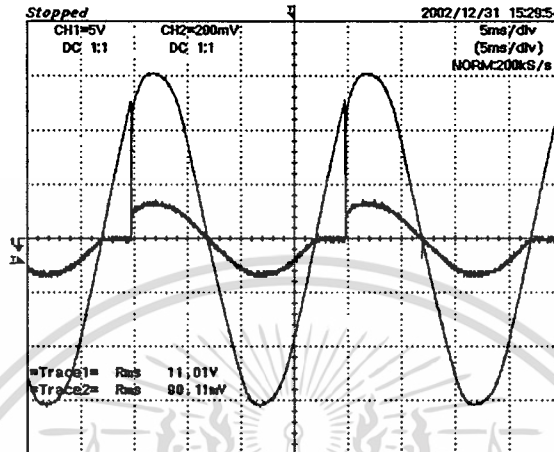
รูปที่ 4.63 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half wave Thyristor Converter คำนวณร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 15%



รูปที่ 4.64 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดAC-DC Half wave Thyristor Converter คำนวณร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 15%

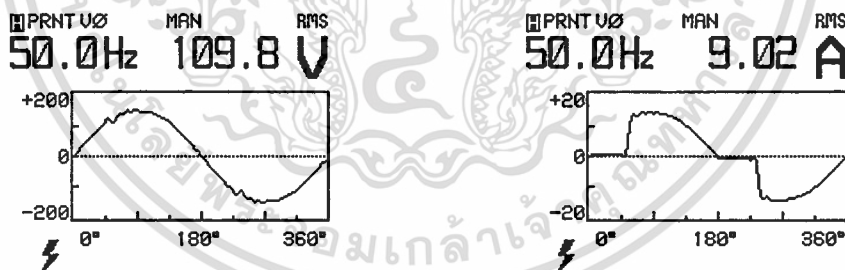
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 34 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

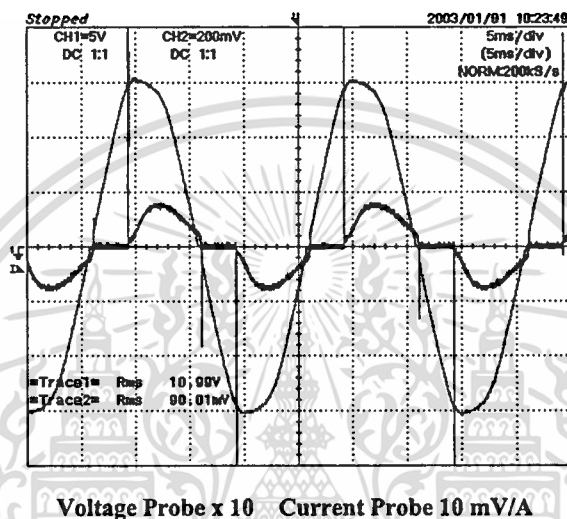
รูปที่ 4.65 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



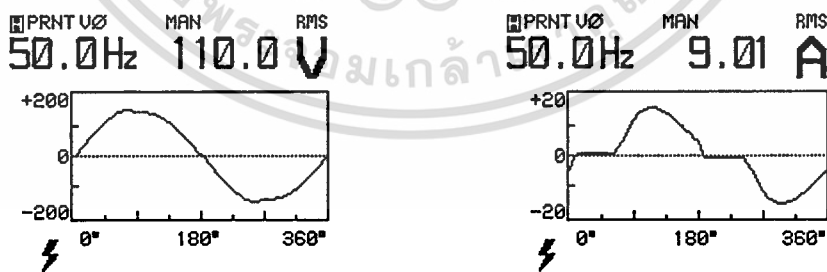
รูปที่ 4.66 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 30%

4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 36 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 30%

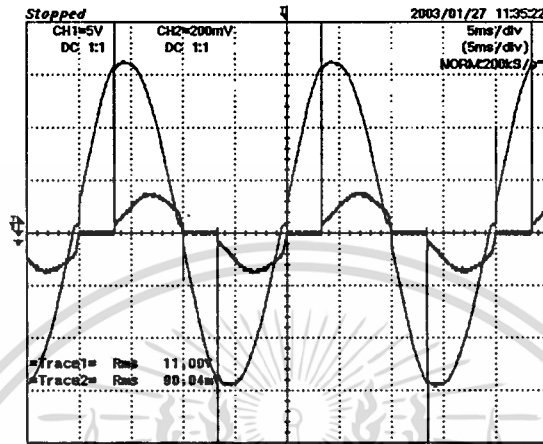


รูปที่ 4.67 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.68 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 38 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



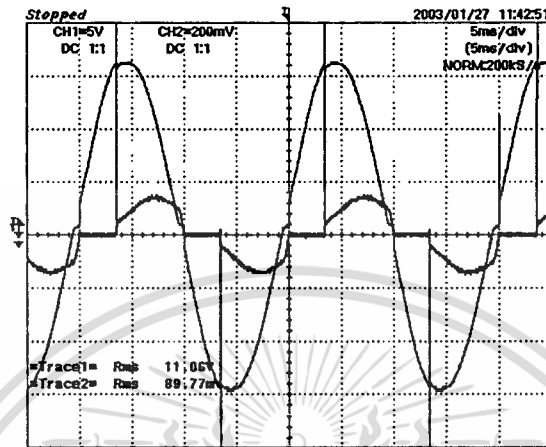
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.69 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



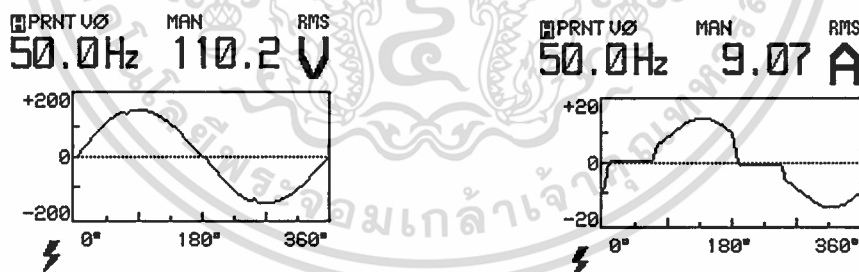
รูปที่ 4.70 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.3 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 43 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.71 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.72 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD)30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสสลับรวมอนิกส์รวม (THD) 30%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	952.036	996.065	921.809	216.074	309.394	0.974	0.926	5.245	3.227
	FLUKE	950.031	995.436	926.028	186.802	313.799	0.980	0.930	5.117	3.420
	%ความผิดพลาด	0.211	0.063	-0.458	13.547	-1.424	-0.688	-0.519	2.442	-5.971
L=52.9 mH	SCOPE	953.458	1001.800	791.492	516.615	332.070	0.837	0.790	2.325	3.466
	FLUKE	954.865	1001.600	802.686	496.002	335.870	0.851	0.801	2.312	3.681
	%ความผิดพลาด	-0.148	0.020	-1.414	3.990	-1.144	-1.588	-1.430	0.563	-6.209
RL L=105.8 mH	SCOPE	941.125	982.768	703.780	614.426	304.970	0.753	0.716	3.134	2.964
	FLUKE	932.080	974.992	715.692	585.595	308.986	0.774	0.734	3.088	3.079
	%ความผิดพลาด	0.961	0.791	-1.693	4.692	-1.317	-2.735	-2.500	1.484	-3.897
L=158.7 mH	SCOPE	938.969	981.980	677.181	639.320	311.416	0.727	0.690	3.814	3.234
	FLUKE	923.510	966.035	692.325	600.263	305.932	0.756	0.717	3.720	3.178
	%ความผิดพลาด	1.646	1.624	-2.236	6.109	1.761	-3.920	-3.930	2.459	1.753

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่เสีย
 S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

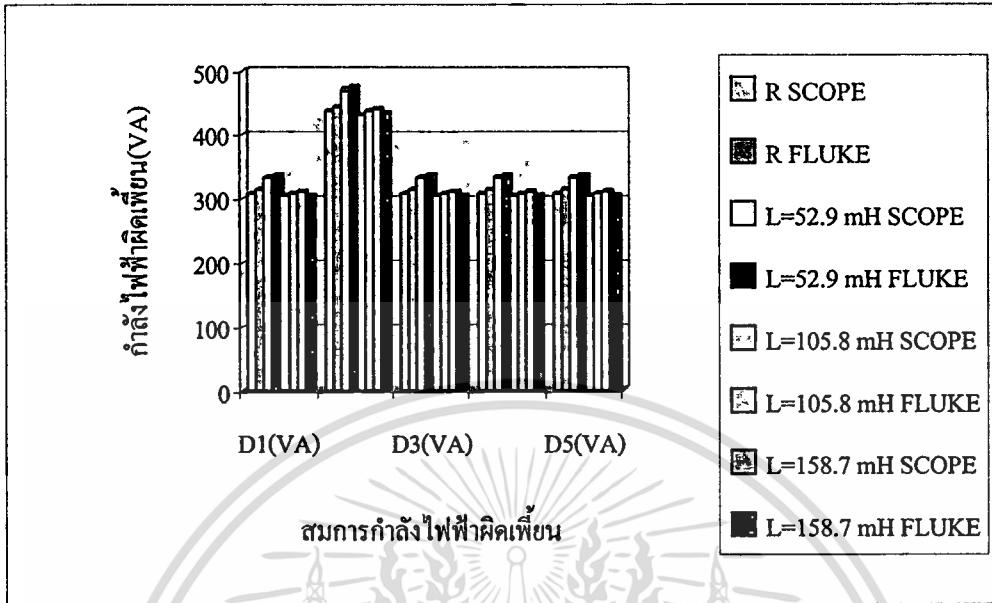
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยน ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converte ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 30%

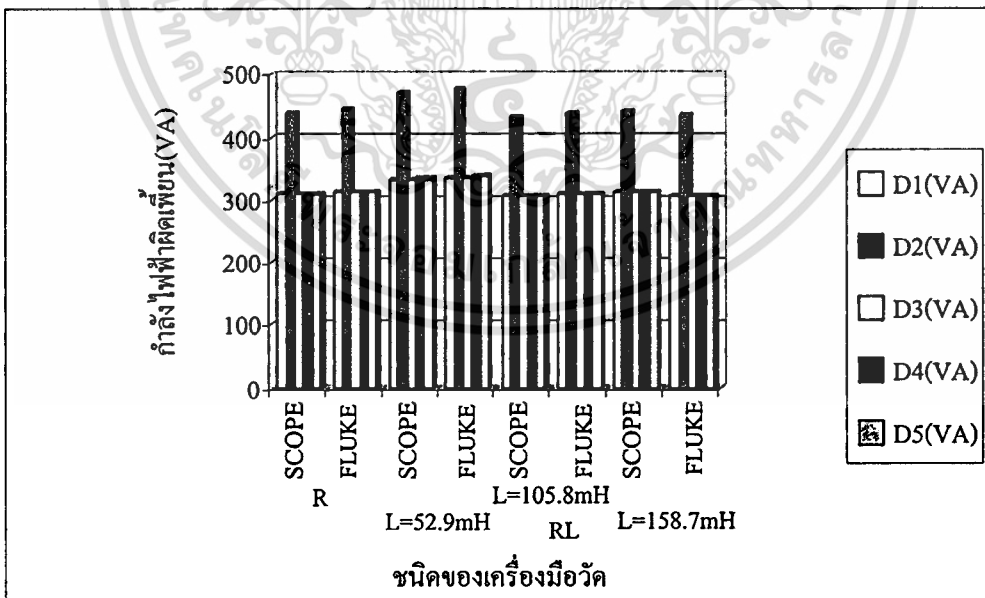
ลักษณะ โหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	309.394	437.549	309.394	309.455	309.455
		FLUKE	313.799	443.779	313.799	313.806	313.806
		%ความผิดพลาด	-1.424	-1.424	-1.424	-1.406	-1.406
RL	L=52.9 mH	SCOPE	332.070	469.618	332.070	333.348	333.348
		FLUKE	335.870	474.992	335.870	336.775	336.775
		%ความผิดพลาด	-1.144	-1.144	-1.144	-1.028	-1.028
	L=105.8 mH	SCOPE	304.970	431.293	304.970	305.222	305.222
		FLUKE	308.986	436.972	308.986	309.041	309.041
		%ความผิดพลาด	-1.317	-1.317	-1.317	-1.251	-1.251
	L=158.7 mH	SCOPE	311.416	440.408	311.416	311.737	311.737
		FLUKE	305.932	432.653	305.932	305.987	305.987
		%ความผิดพลาด	1.761	1.761	1.761	1.845	1.845

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki

D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



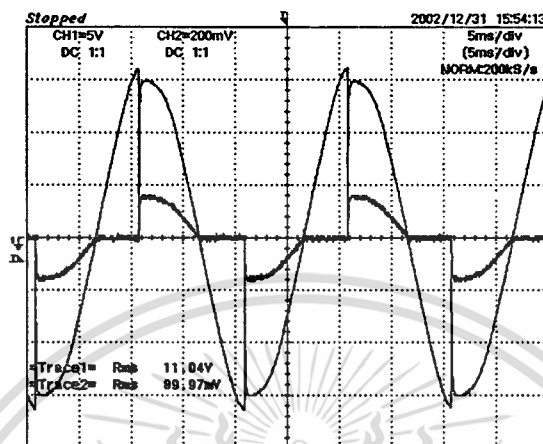
รูปที่ 4.73 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%



รูปที่ 4.74 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด AC-DC half wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม

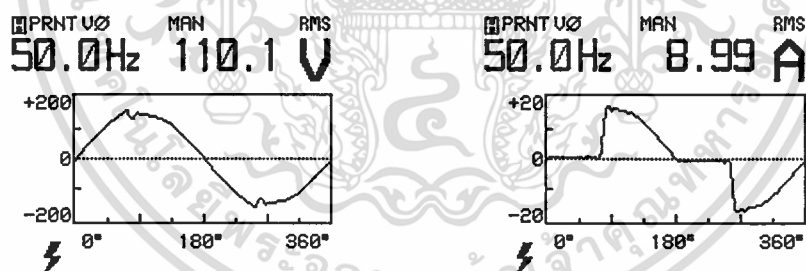
(THD) 30% สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 36 หลอด ซึ่งเป็นการความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

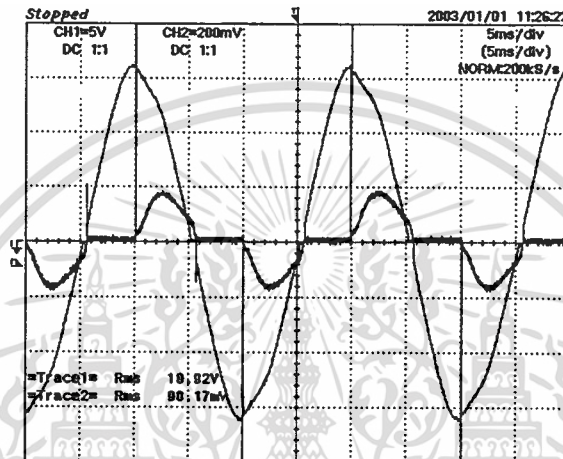
รูปที่ 4.75 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.76 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

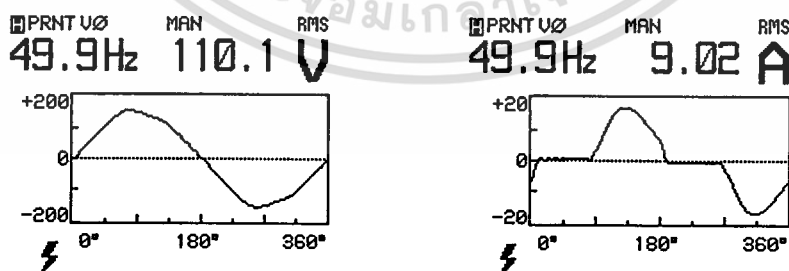
6. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 50%

6.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 45 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 50%



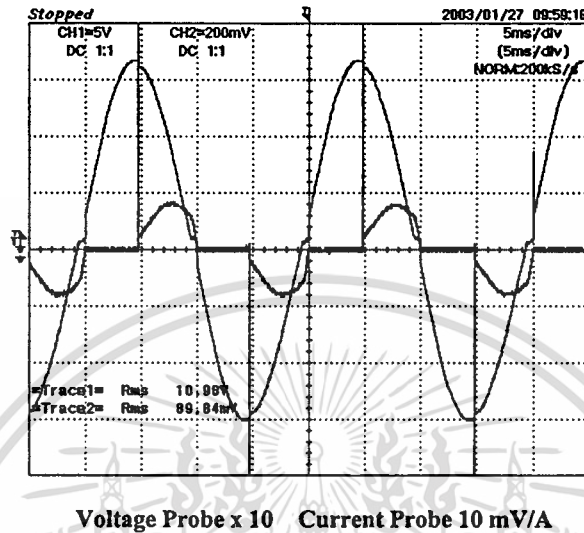
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.77 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

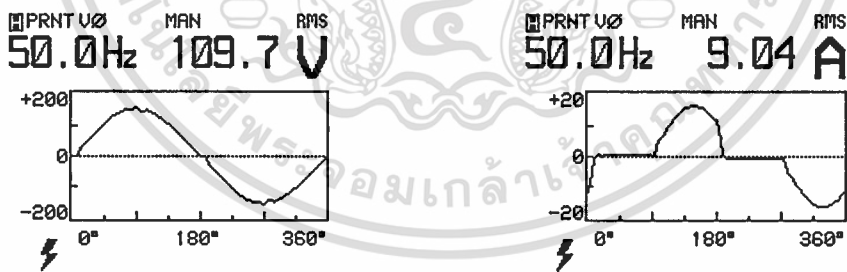


รูปที่ 4.78 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 55 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50%

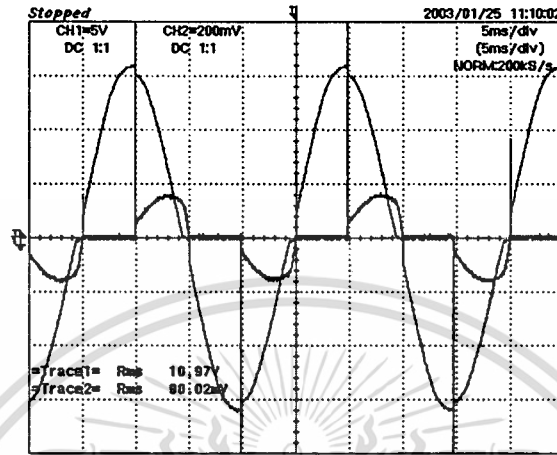


รูปที่ 4.79 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



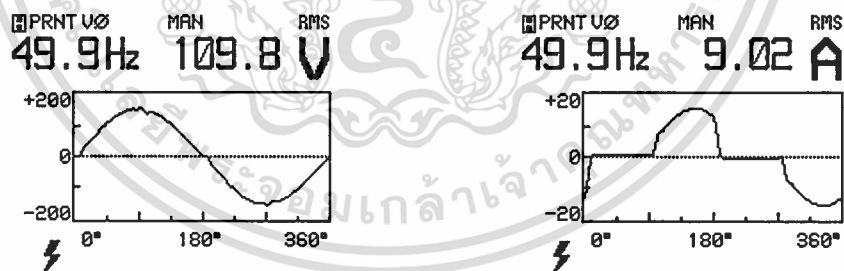
รูปที่ 4.80 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.3 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 66 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.81 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.82 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบเมื่อปรับเปลี่ยนโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสเสาร้อนิกสรวม (THD)_r 50%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	887.161	990.562	781.628	377.278	477.423	0.901	0.789	9.117	5.549
	FLUKE	881.439	985.291	788.183	346.579	479.009	0.915	0.800	8.940	5.812
	%ความผิดพลาด	0.645	0.532	-0.839	8.137	-0.332	-1.643	-1.369	1.939	-4.734
L=52.9 mH	SCOPE	909.125	1009.600	607.843	653.627	471.788	0.681	0.602	3.292	4.517
	FLUKE	894.042	994.182	613.724	625.858	469.087	0.700	0.617	3.281	4.770
	%ความผิดพลาด	1.659	1.527	-0.968	4.249	0.572	-2.819	-2.524	0.340	-5.610
L=105.8 mH	SCOPE	889.997	993.535	500.017	718.377	470.138	0.571	0.503	4.920	4.015
	FLUKE	869.161	976.029	504.288	688.575	473.488	0.591	0.517	4.976	4.148
	%ความผิดพลาด	2.341	1.762	-0.854	4.149	-0.712	-3.431	-2.662	-1.138	-3.300
L=158.7 mH	SCOPE	879.780	985.252	480.432	717.654	474.215	0.556	0.488	5.590	4.476
	FLUKE	876.562	981.143	511.634	691.243	472.288	0.595	0.522	5.768	4.370
	%ความผิดพลาด	0.366	0.417	-6.495	3.680	0.406	-6.939	-6.952	-3.192	2.364

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดท้าวไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าคิดเพี้ยน
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S กำหนดจากสมการที่ 3.7

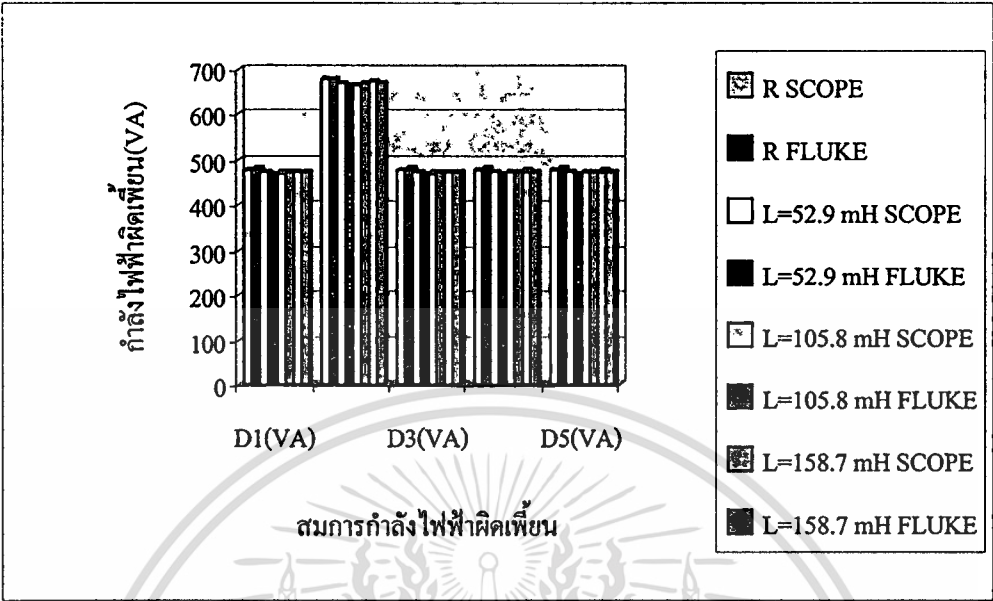
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงคั่นฮาร์โมนิกสร่วม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้น ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converte ต่อร่วมกับความคั่นทาน และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม (THD_v) 50%

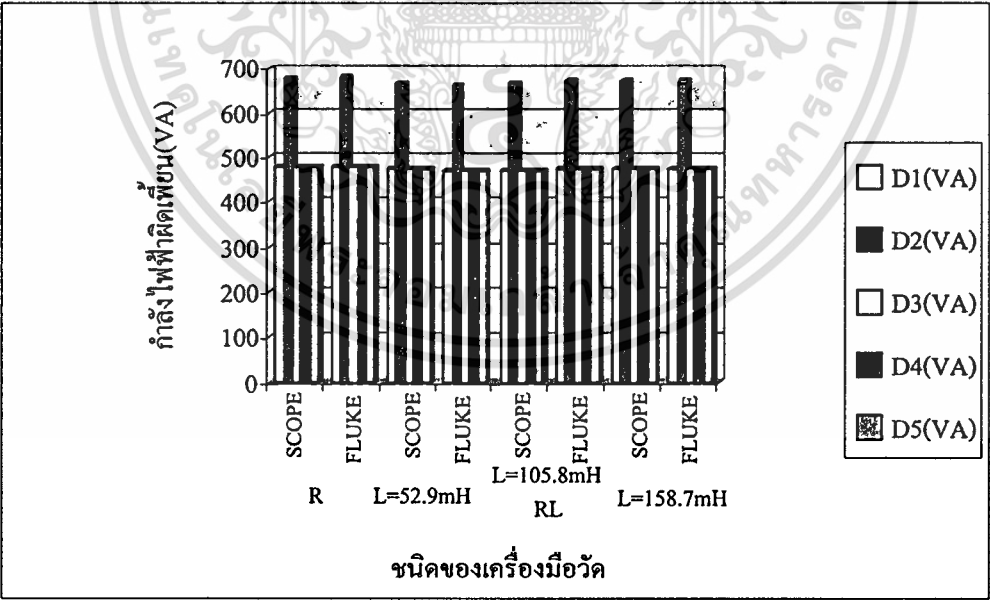
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	477.423	675.178	477.423	478.667	478.667
		FLUKE	479.009	677.421	479.009	479.032	479.032
		%ความผิดพลาด	-0.332	-0.332	-0.332	-0.076	-0.076
RL	L=52.9 mH	SCOPE	471.788	667.209	471.788	471.985	471.985
		FLUKE	469.087	663.389	469.087	469.096	469.096
		%ความผิดพลาด	0.572	0.572	0.572	0.612	0.612
	L=105.8 mH	SCOPE	470.138	664.876	470.138	470.398	470.398
		FLUKE	473.488	669.613	473.488	473.526	473.526
		%ความผิดพลาด	-0.712	-0.712	-0.712	-0.665	-0.665
	L=158.7 mH	SCOPE	474.215	670.641	474.215	474.472	474.472
		FLUKE	472.288	667.916	472.288	472.296	472.296
		%ความผิดพลาด	0.406	0.406	0.406	0.459	0.459

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้นจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขยขึ้นจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki

D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



รูปที่ 4.83 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD,) 50%



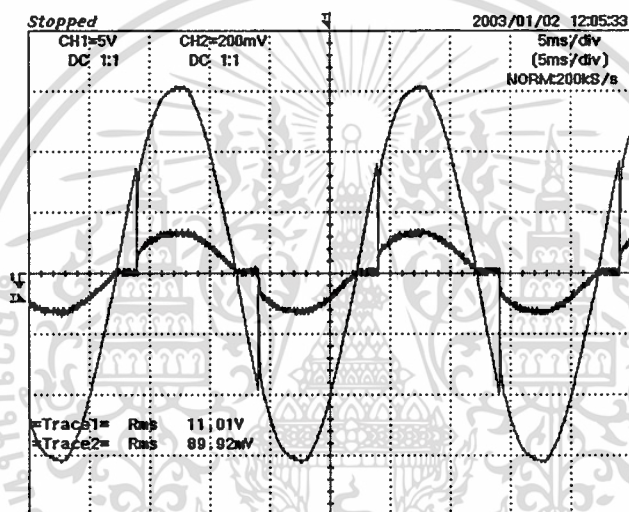
รูปที่ 4.84 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดAC-DC Half Wave Thyristor Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรว (THD,) 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.4 ผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter

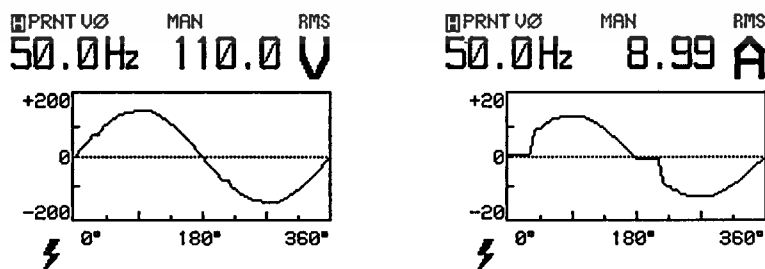
จากวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.14 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ตามลำดับ ในหัวข้อนี้ทำการทดสอบที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15%, 30% และ 50% สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 31 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.85 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

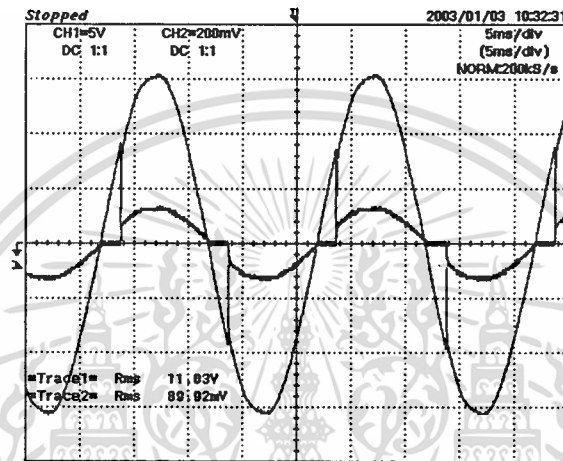


รูปที่ 4.86 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

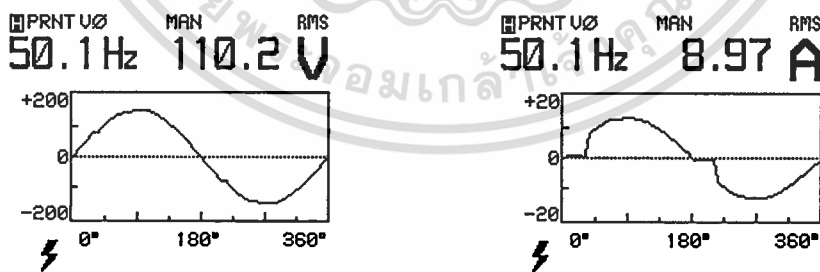
2. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 34 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%



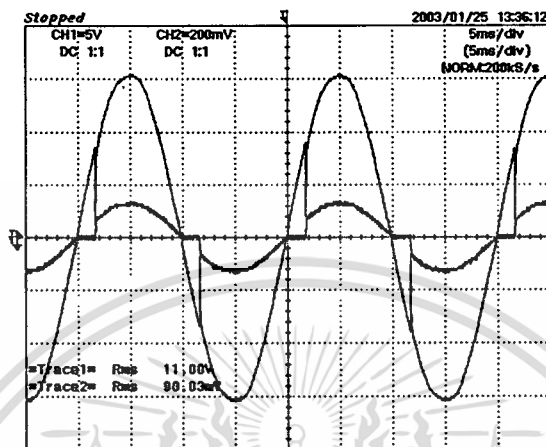
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.87 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



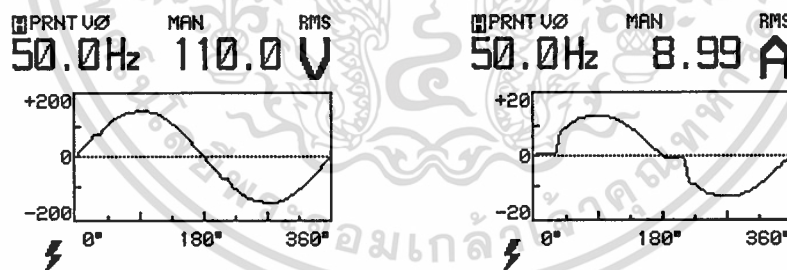
รูปที่ 4.88 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 37 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%



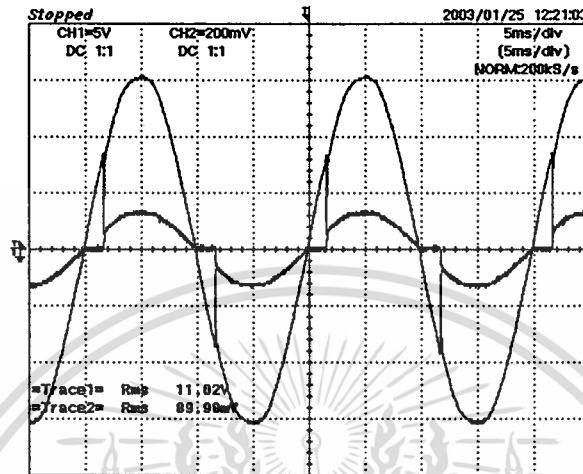
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.89 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางค่านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



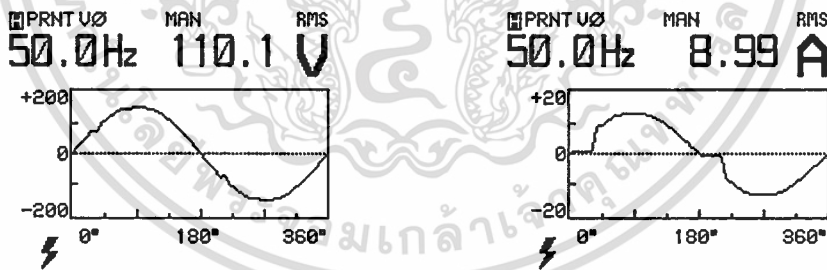
รูปที่ 4.90 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางค่านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 40 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.91 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.92 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 15% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 15%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	982.947	995.386	976.387	95.559	168.316	0.995	0.981	2.592	2.788
	FLUKE	980.507	992.585	978.182	52.296	160.156	0.999	0.986	2.503	2.249
	%ความผิดพลาด	0.248	0.281	-0.184	45.274	4.848	-0.402	-0.510	3.434	19.333
L=52.9 mH	SCOPE	967.453	979.152	957.867	126.823	158.571	0.991	0.978	2.530	2.087
	FLUKE	964.849	977.066	959.906	87.720	159.824	0.996	0.982	2.477	2.204
	%ความผิดพลาด	0.269	0.213	-0.213	30.833	-0.790	-0.494	-0.450	2.095	-5.606
RL L=105.8 mH	SCOPE	977.218	989.266	970.363	106.013	160.638	0.994	0.981	2.561	2.297
	FLUKE	957.134	968.906	953.943	67.186	155.746	0.998	0.985	2.452	2.225
	%ความผิดพลาด	2.055	2.058	1.692	36.625	3.045	-0.342	-0.377	4.264	3.121
L=158.7 mH	SCOPE	965.817	978.594	958.055	111.024	165.679	0.993	0.979	2.600	2.316
	FLUKE	976.988	989.878	973.428	71.476	164.888	0.997	0.983	2.552	2.464
	%ความผิดพลาด	-1.157	-1.153	-1.605	35.621	0.477	-0.393	-0.449	1.862	-6.368

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเฟส
 S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S คำนวณจากสมการที่ 3.7

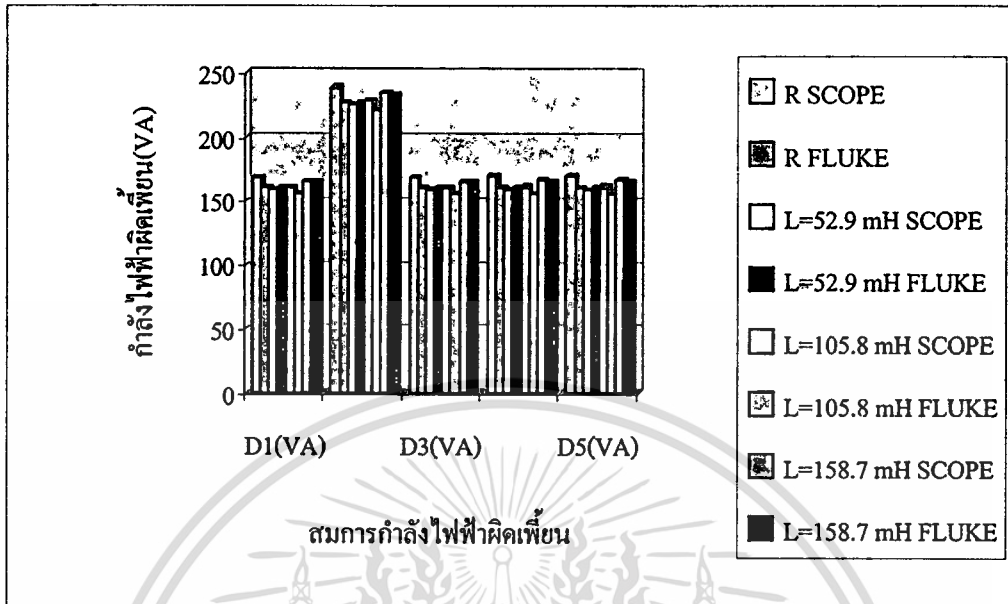
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้น ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_v) 15%

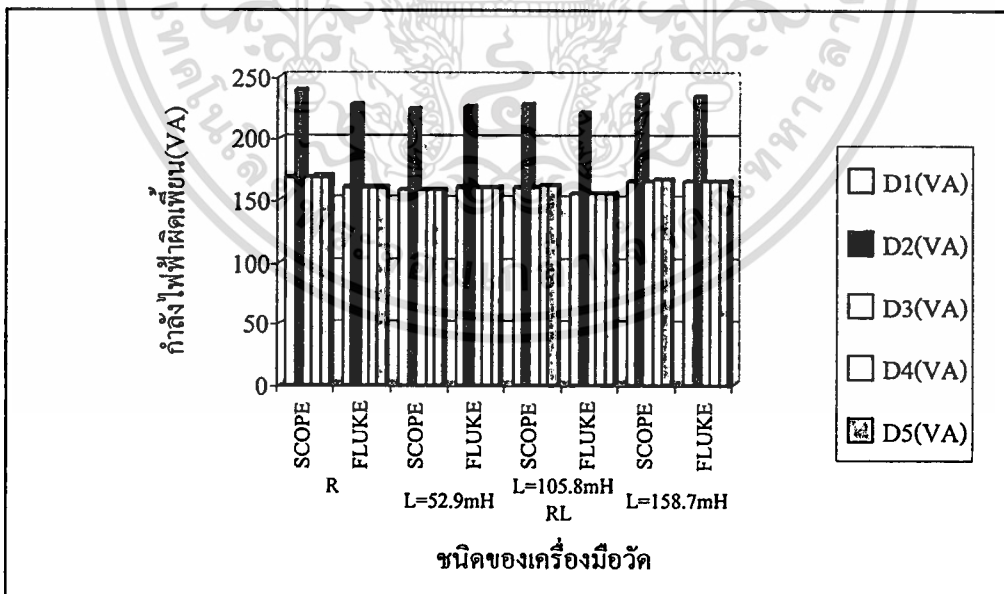
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	168.316	238.035	168.316	169.015	169.015
		FLUKE	160.156	226.495	160.156	160.186	160.186
		%ความผิดพลาด	4.848	4.848	4.848	5.224	5.224
RL	L=52.9 mH	SCOPE	158.571	224.254	158.571	158.732	158.732
		FLUKE	159.824	226.026	159.824	159.826	159.826
		%ความผิดพลาด	-0.790	-0.790	-0.790	-0.689	-0.689
	L=105.8 mH	SCOPE	160.638	227.177	160.638	161.048	161.048
		FLUKE	155.746	220.258	155.746	155.748	155.748
		%ความผิดพลาด	3.045	3.045	3.045	3.291	3.291
	L=158.7 mH	SCOPE	165.679	234.305	165.679	166.591	166.591
		FLUKE	164.888	233.187	164.888	164.918	164.918
		%ความผิดพลาด	0.477	0.477	0.477	1.004	1.004

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 3.27 ของ Czamecki

D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเค้เพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



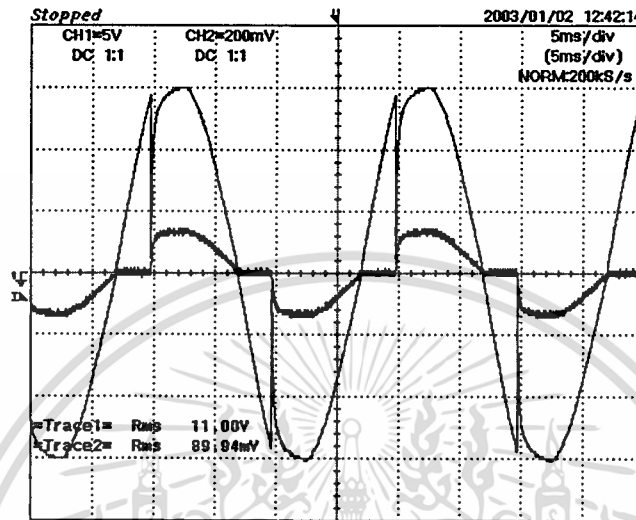
รูปที่ 4.93 แสดงการเปรียบเทียบกําลังไฟฟ้าผิเค้เพี้ยนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสํรวม (THD) 15%



รูปที่ 4.94 แสดงการเปรียบเทียบกําลังไฟฟ้าผิเค้เพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด AC-DC Converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสํรวม (THD) 15%

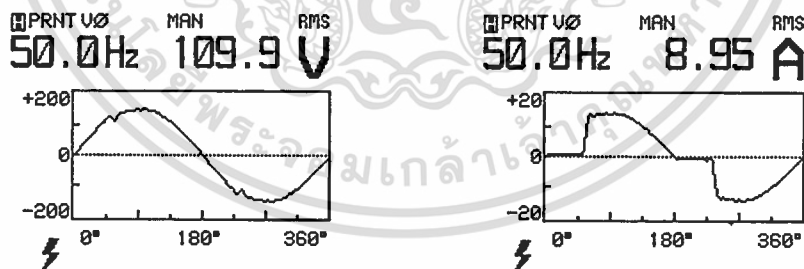
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 30 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

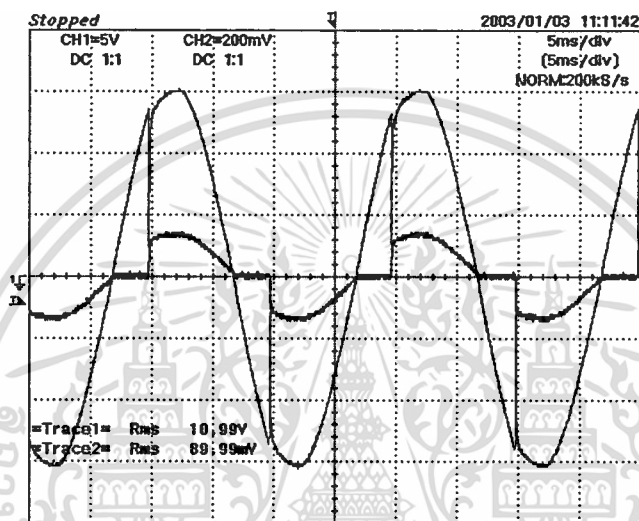
รูปที่ 4.95 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.96 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อกับความต้านทาน ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

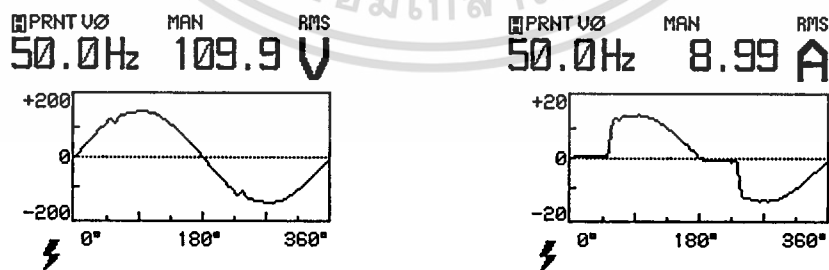
4. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จำยโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%

4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จำยโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 35 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%



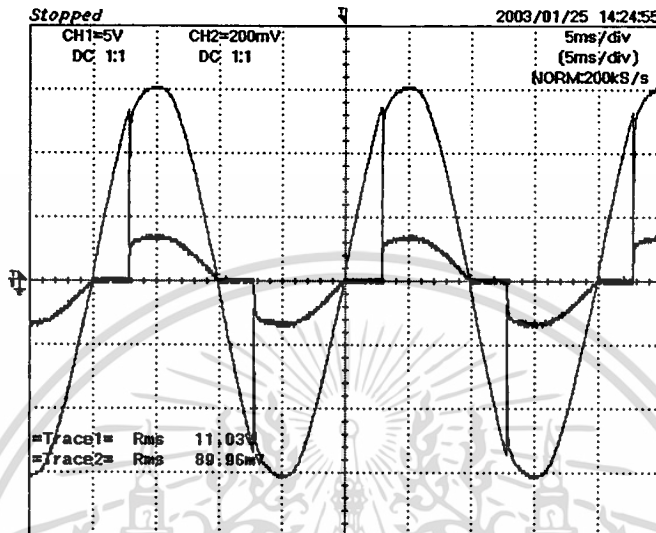
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.97 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



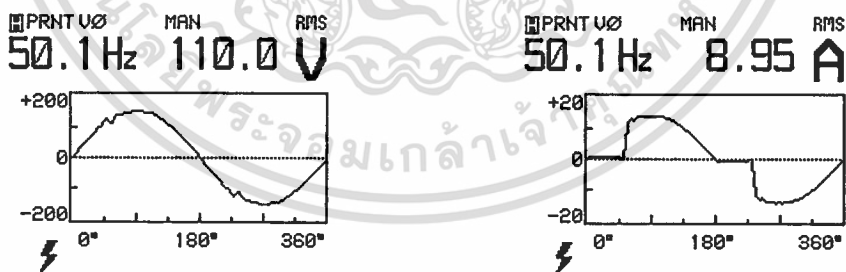
รูปที่ 4.98 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า จำยโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 38 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%



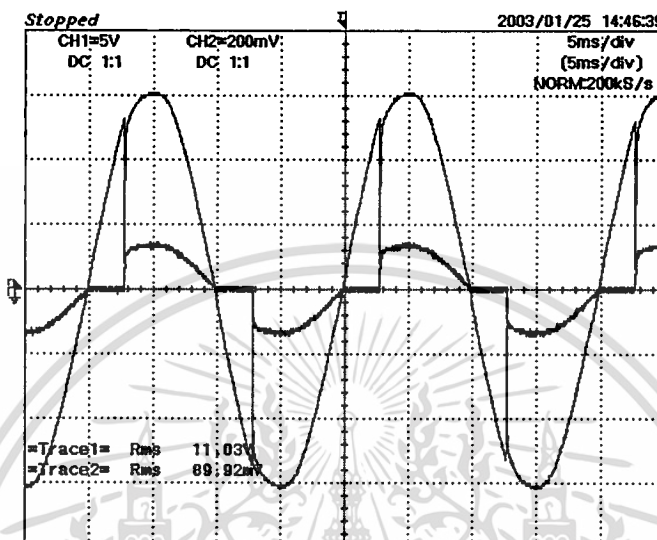
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.99 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC/AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



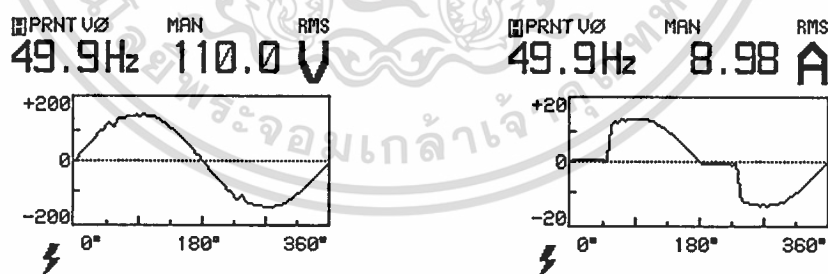
รูปที่ 4.100 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC/AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

4.3 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 42 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.101 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC/AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.102 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC/AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC/AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ 50 Hz ของกระแสอาร์ม่อนิกส์รวม (THD_i) 30%

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	943.778	986.748	899.086	230.978	334.612	0.969	0.911	4.660	3.295
	FLUKE	932.944	981.462	902.504	202.025	328.545	0.976	0.920	5.532	3.324
	%ความผิดเพี้ยน	1.148	0.536	-0.380	12.535	1.813	-0.754	-0.911	-18.703	-0.880
L=52.9 mH	SCOPE	967.453	980.942	897.893	246.479	308.681	0.964	0.915	5.289	3.314
	FLUKE	963.699	978.491	902.979	212.879	311.059	0.973	0.923	5.099	3.487
	%ความผิดเพี้ยน	0.388	0.250	-0.566	13.632	-0.770	-0.933	-0.819	3.578	-5.229
RL L=105.8 mH	SCOPE	940.933	983.762	904.181	234.912	308.319	0.968	0.919	5.283	3.286
	FLUKE	946.846	988.519	920.817	192.651	303.566	0.979	0.932	5.000	3.358
	%ความผิดเพี้ยน	-0.628	-0.484	-1.840	17.990	1.542	-1.126	-1.349	5.362	-2.185
L=158.7 mH	SCOPE	939.424	983.086	903.336	233.312	309.851	0.968	0.919	5.241	3.281
	FLUKE	938.727	981.359	911.320	197.598	305.803	0.977	0.929	5.056	3.393
	%ความผิดเพี้ยน	0.074	0.176	-0.884	15.307	1.306	-0.940	-1.056	3.526	-3.420

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

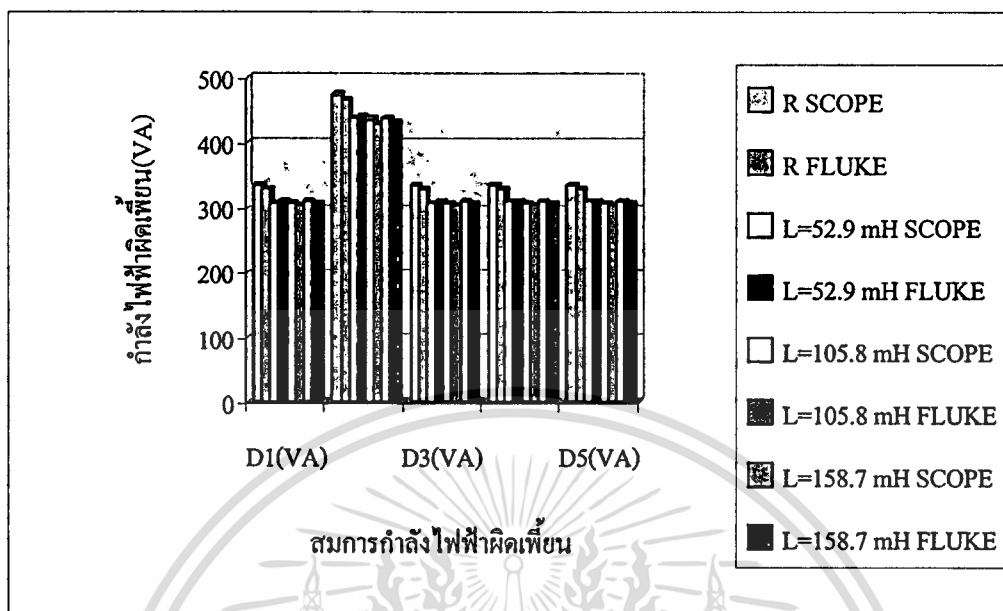
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 30%

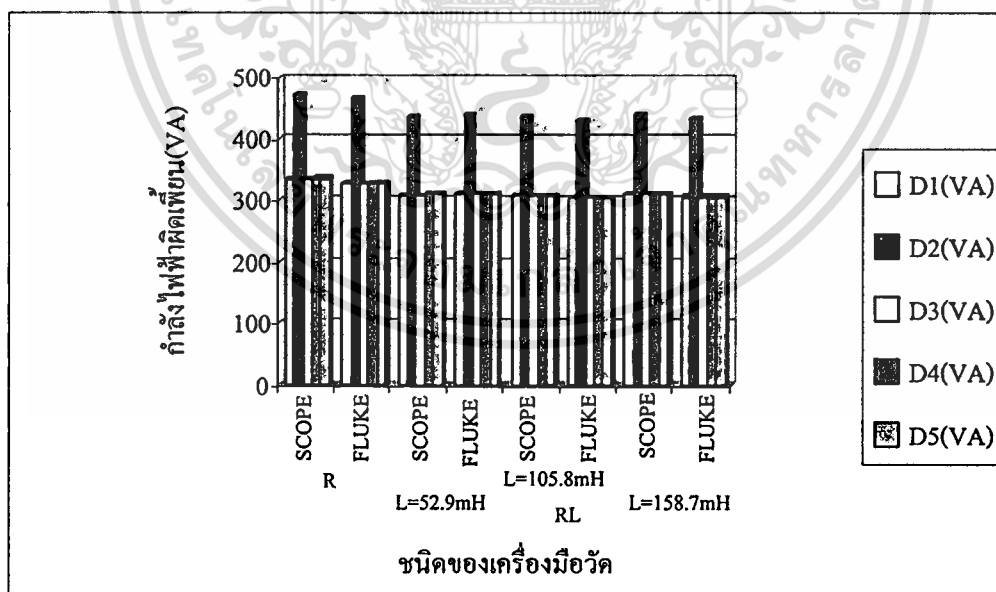
ลักษณะ โหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	334.612	473.213	334.612	335.511	335.511
		FLUKE	328.545	464.633	328.545	328.571	328.571
		%ความผิดพลาด	1.813	1.813	1.813	2.068	2.068
RL	L=52.9 mH	SCOPE	308.681	436.541	308.681	309.536	309.536
		FLUKE	311.059	439.904	311.059	311.447	311.447
		%ความผิดพลาด	-0.770	-0.770	-0.770	-0.617	-0.617
	L=105.8 mH	SCOPE	308.319	436.029	308.319	308.497	308.497
		FLUKE	303.566	429.307	303.566	303.578	303.578
		%ความผิดพลาด	1.542	1.542	1.542	1.594	1.594
	L=158.7 mH	SCOPE	309.851	438.195	309.851	310.373	310.373
		FLUKE	305.803	432.470	305.803	305.812	305.812
		%ความผิดพลาด	1.306	1.306	1.306	1.470	1.470

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki

D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิพื่นจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



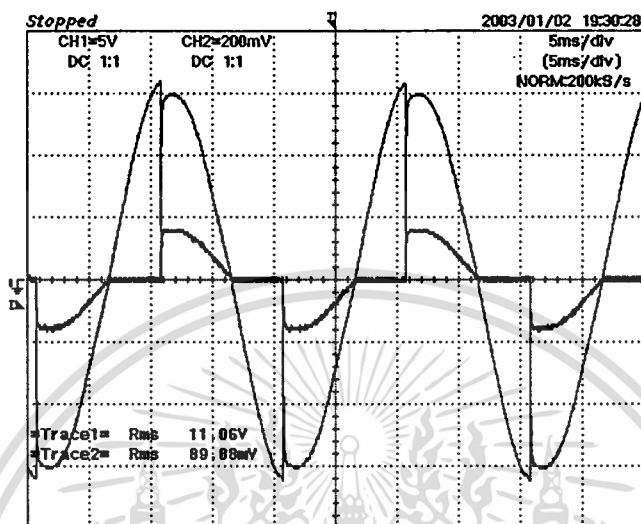
รูปที่ 4.103 แสดงการเปรียบเทียบกําลังไฟฟ้าผิพื่นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลต์เป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสํรวม (THD) 30%



รูปที่ 4.104 แสดงการเปรียบเทียบกําลังไฟฟ้าผิพื่น ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลต์ AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสํรวม (THD) 30%

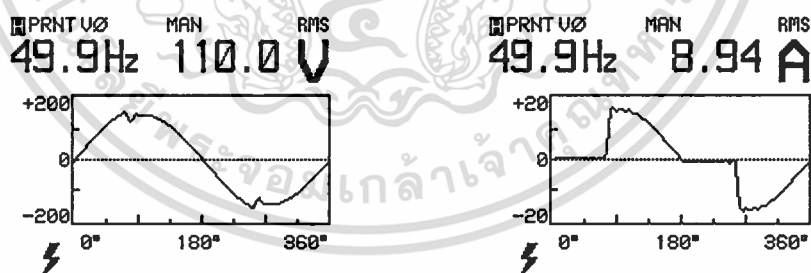
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จ่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 35 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน ที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

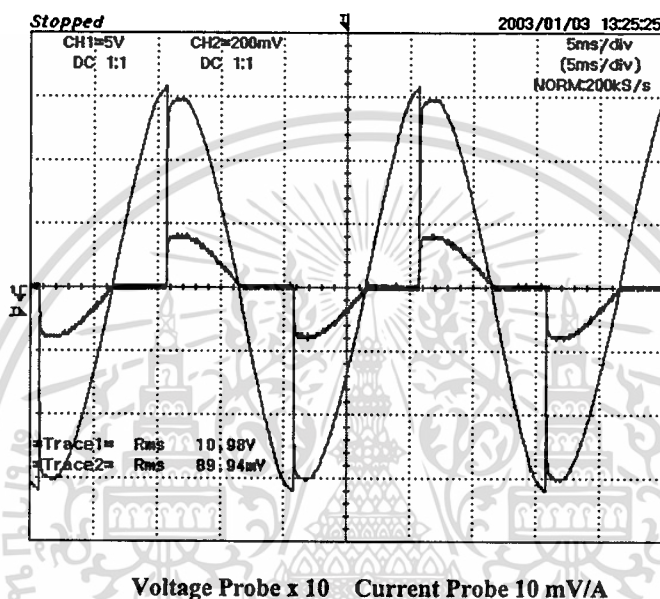
รูปที่ 4.105 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



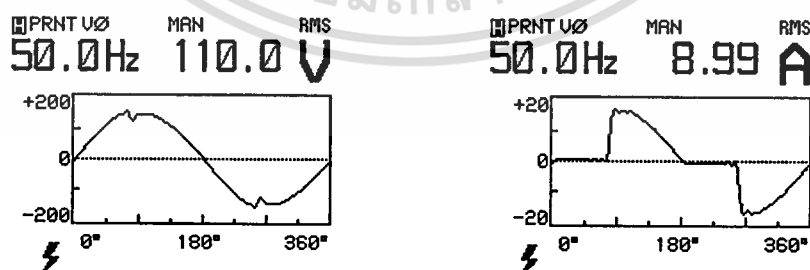
รูปที่ 4.106 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน ที่ความถี่ขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6. กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 1 kVA 220/110V 1- ϕ 50 Hz จำยโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ขนาดต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%

6.1 หม้อแปลงไฟฟ้า จำยโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ จำนวน 39 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%

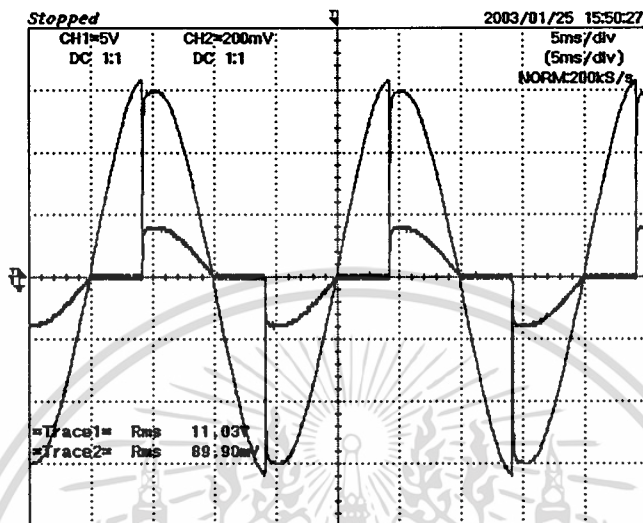


รูปที่ 4.107 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



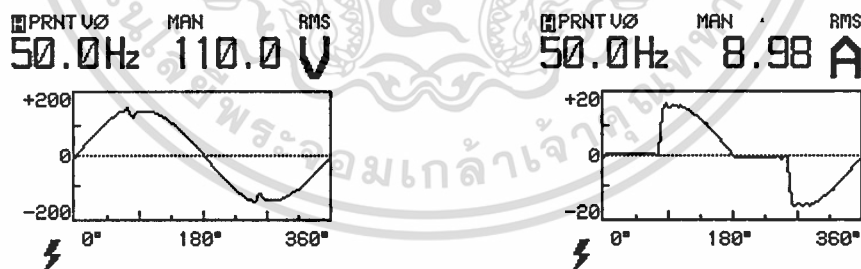
รูปที่ 4.108 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจำยโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 52.9 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.2 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 46 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%



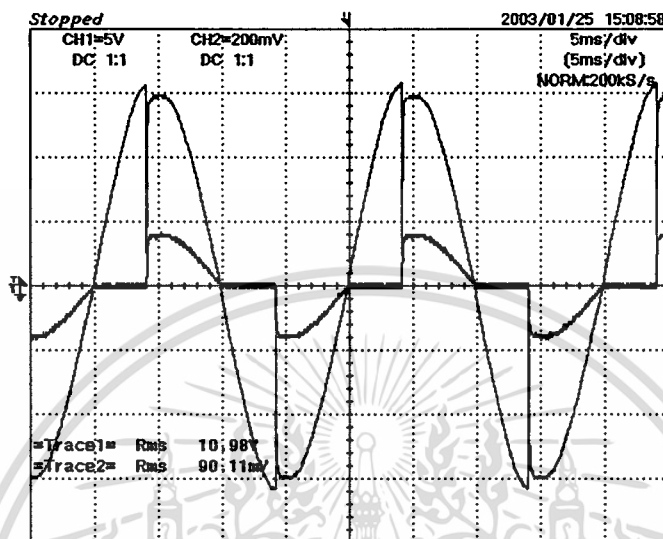
Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.109 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i)50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



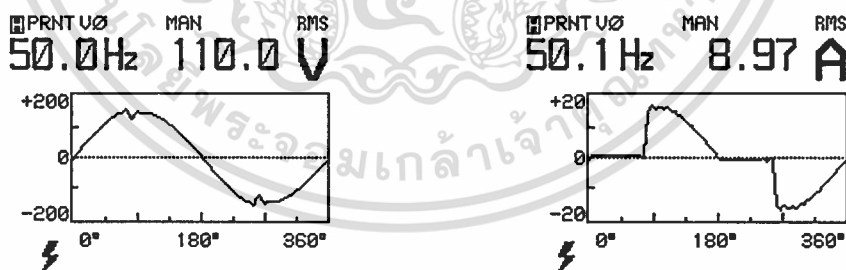
รูปที่ 4.110 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 105.8 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

6.3 หม้อแปลงไฟฟ้า ข่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนส์ 100 วัตต์ จำนวน 53 หลอด ซึ่งเป็นความต้านทาน และต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 50%



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.111 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.112 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ 158.7 mH ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) 50% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ 50% ของกระแสอาร์ม่อนิกส์รวม (THD_i) 50%

ลักษณะ โหลด	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
R	SCOPE	878.939	987.414	767.380	385.164	487.609	0.894	0.777	9.209	5.603
	FLUKE	869.989	981.364	767.994	359.911	493.762	0.906	0.783	9.062	5.977
	%ความผิดพลาด	1.018	0.613	-0.080	6.556	-1.262	-1.320	-0.682	1.596	-6.679
	SCOPE	967.453	979.324	754.102	399.595	480.343	0.884	0.770	8.864	5.425
L=52.9 mH	FLUKE	963.699	976.251	763.936	369.712	482.472	0.900	0.783	8.758	5.950
	%ความผิดพลาด	0.388	0.314	-1.304	7.478	-0.443	-1.867	-1.623	1.199	-9.683
	SCOPE	879.747	984.234	766.496	391.214	477.653	0.891	0.779	8.974	5.437
	FLUKE	879.132	984.462	781.642	358.696	479.101	0.909	0.794	8.721	5.559
RL L=105.8 mH	%ความผิดพลาด	0.070	-0.023	-1.976	8.312	-0.303	-2.043	-1.952	2.810	-2.244
	SCOPE	876.093	983.463	760.377	394.745	482.911	0.888	0.773	9.168	5.403
	FLUKE	880.946	987.087	783.160	358.771	481.960	0.909	0.793	8.669	5.660
	%ความผิดพลาด	-0.554	-0.368	-2.996	9.113	0.197	-2.434	-2.613	5.443	-4.770

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเฟส
S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

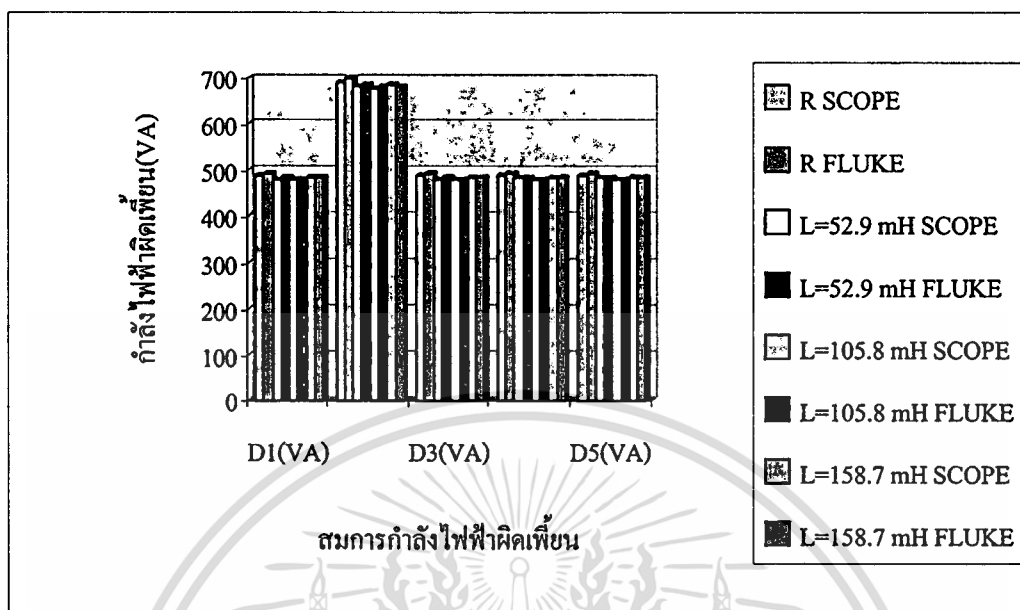
- P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P คำนวณจากสมการที่ 3.10
- Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q คำนวณจากสมการที่ 3.11
- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

ตารางที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%

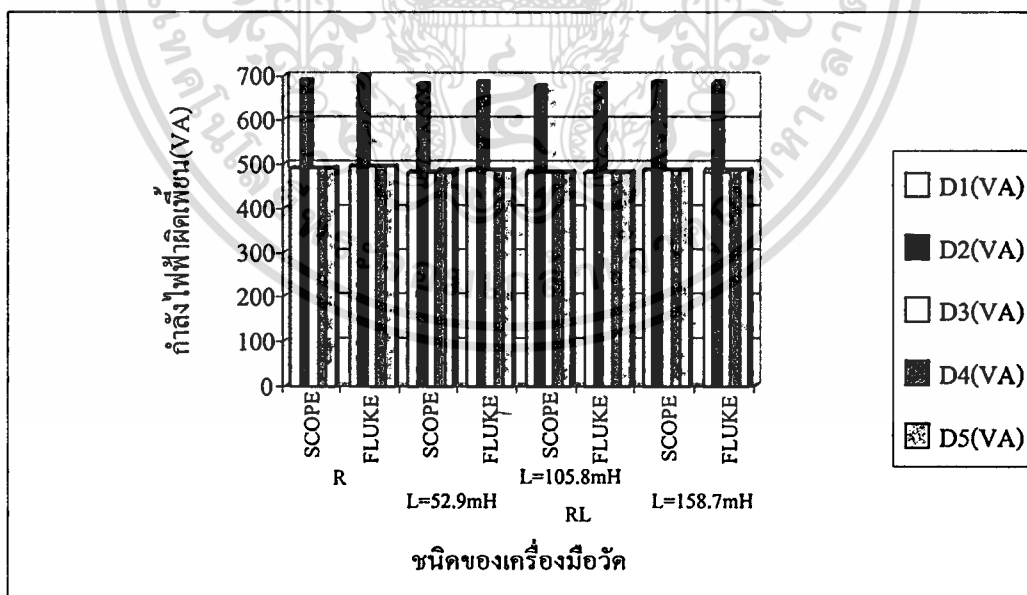
ลักษณะโหลด		เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R		SCOPE	487.609	689.584	487.609	487.720	487.720
		FLUKE	493.762	698.286	493.762	493.769	493.769
		%ความผิดพลาด	-1.262	-1.262	-1.262	-1.240	-1.240
RL	L=52.9 mH	SCOPE	480.343	679.308	480.343	481.900	481.900
		FLUKE	482.472	682.319	482.472	482.511	482.511
		%ความผิดพลาด	-0.443	-0.443	-0.443	-0.127	-0.127
	L=105.8 mH	SCOPE	477.653	675.504	477.653	477.691	477.691
		FLUKE	479.101	677.551	479.101	479.266	479.266
		%ความผิดพลาด	-0.303	-0.303	-0.303	-0.330	-0.330
	L=158.7 mH	SCOPE	482.911	682.939	482.911	483.021	483.021
		FLUKE	481.960	681.594	481.960	482.280	482.280
		%ความผิดพลาด	0.197	0.197	0.197	0.153	0.153

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki

D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



รูปที่ 4.113 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%



รูปที่ 4.114 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้น ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับผลจากการคำนวณแต่ละสมการเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด AC-AC Converter ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

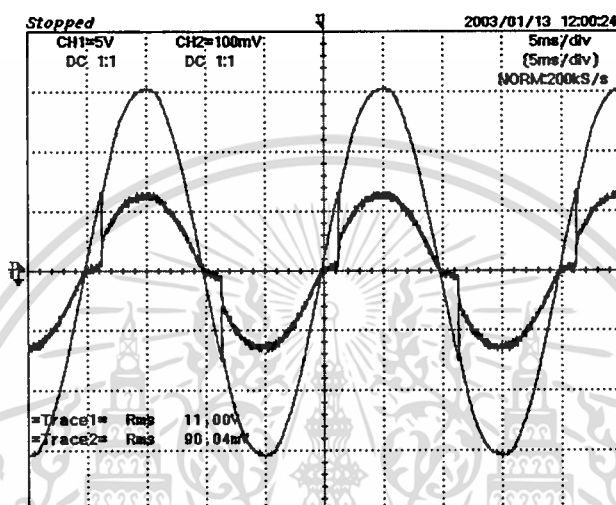
จากการที่หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 4.11-รูปที่ 4.14 ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) 15%, 30% และ 50% พบว่าเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นกับรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส แสดงได้ด้วย รูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงดังกล่าวข้างต้น จะส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นในองค์ประกอบกำลัง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าปรากฏ S เพิ่มค่าสูงขึ้น เพาเวอร์แฟกเตอร์ลดลง และส่งผลต่อพิกัดการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงหรือพิกัด K-Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3 – ตารางที่ 4.22

จากรูปที่ 4.23 รูปที่ 4.33 รูปที่ 4.43 รูปที่ 4.53 รูปที่ 4.63 รูปที่ 4.73 รูปที่ 4.83 รูปที่ 4.93 รูปที่ 4.103 และ รูปที่ 4.113 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด คือ Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa และเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B พบว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลักษณะต่างๆที่จำลองขึ้นตามวัฏจักร โหลด ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD,) 15%, 30% และ 50% ทั้งสองเครื่องมือวัดให้กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.34 รูปที่ 4.44 รูปที่ 4.54 รูปที่ 4.64 รูปที่ 4.74 รูปที่ 4.84 รูปที่ 4.94 รูปที่ 4.104 และ รูปที่ 4.114 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละสมการ พบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณ แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu

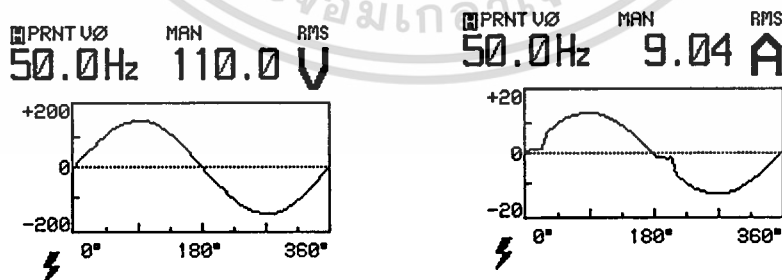
4.3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

4.3.1 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 10%, 20%, 30%

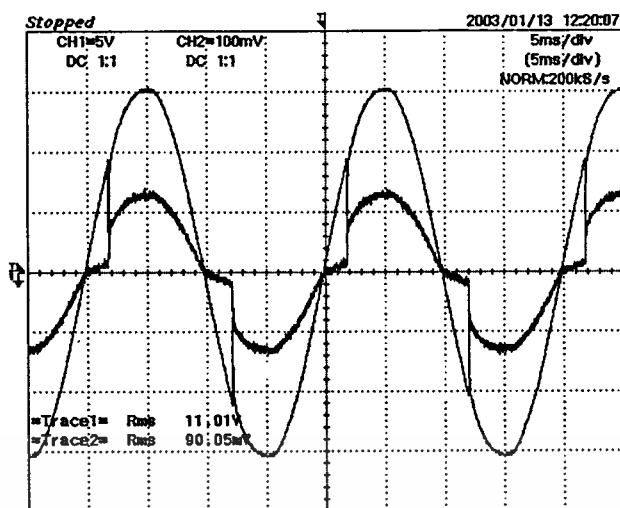


Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.115 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

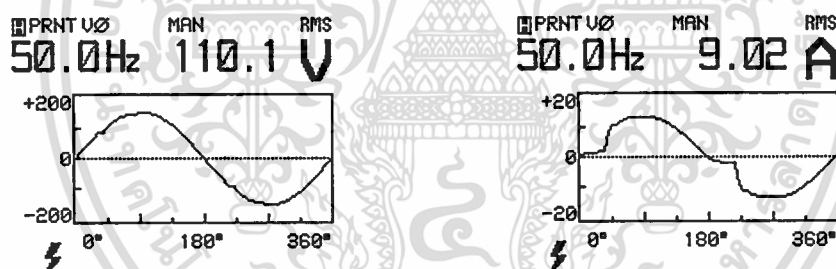


รูปที่ 4.116 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 10% จาก เครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

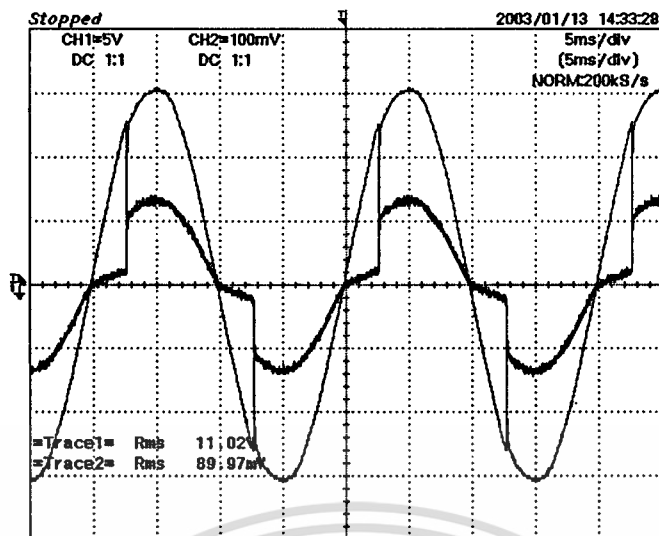


Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.117 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

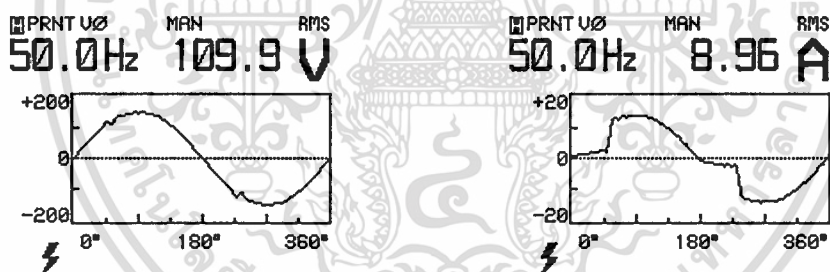


รูปที่ 4.118 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.119 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.120 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม

(THD_i) 10%, 20%, 30%

THD _i	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
10%	SCOPE	988.548	993.401	986.887	50.075	101.942	0.999	0.993	1.703	1.853
	FLUKE	989.419	994.007	989.195	3.827	97.622	1.000	0.995	1.663	1.843
	%ความผิดพลาด	-0.088	-0.061	-0.234	92.357	4.237	-0.130	-0.181	2.332	0.523
20%	SCOPE	977.043	990.413	970.148	104.443	169.773	0.994	0.980	2.511	2.158
	FLUKE	978.052	991.460	975.694	57.201	166.561	0.998	0.984	2.497	2.280
	%ความผิดพลาด	-0.103	-0.106	-0.572	45.232	1.892	-0.402	-0.470	0.550	-5.663
30%	SCOPE	950.078	977.971	929.802	174.305	248.017	0.983	0.951	3.675	2.753
	FLUKE	948.606	977.189	935.106	132.562	250.804	0.990	0.957	3.787	2.916
	%ความผิดพลาด	0.155	0.080	-0.570	23.948	-1.124	-0.733	-0.652	-3.023	-5.922

หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน

S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10

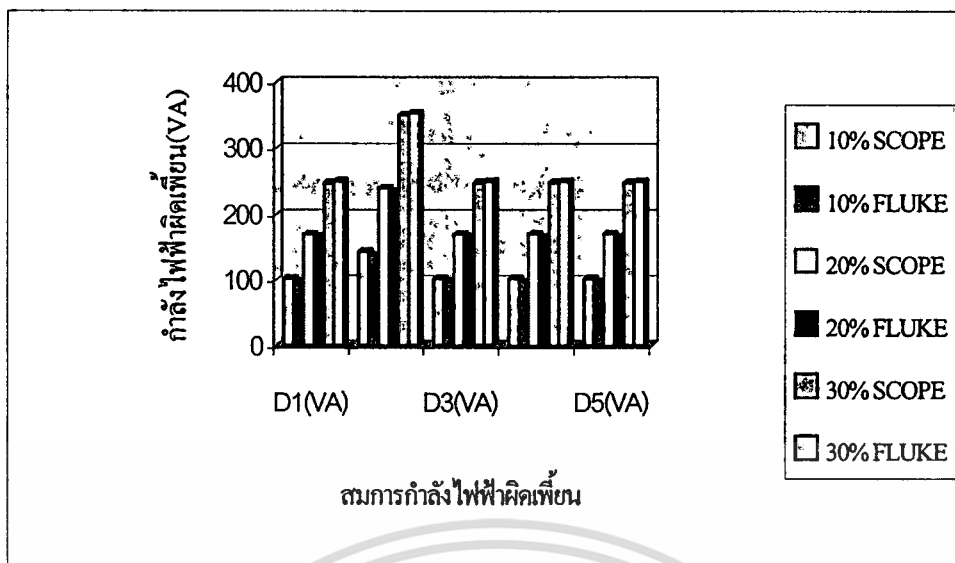
Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11

- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

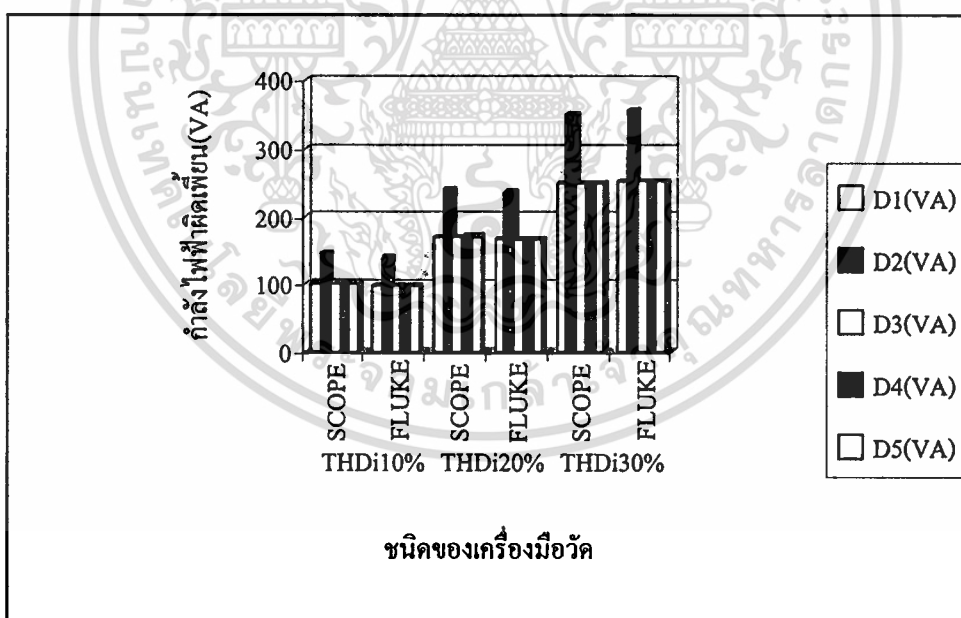
ตารางที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_v) 10%, 20%, 30%

THD _v	เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
10%	SCOPE	101.942	144.168	101.942	101.994	101.994
	FLUKE	97.622	138.059	97.622	97.697	97.697
	%ความผิดพลาด	4.237	4.237	4.237	4.213	4.213
20%	SCOPE	169.773	240.096	169.773	170.382	170.382
	FLUKE	166.561	235.552	166.561	166.625	166.625
	%ความผิดพลาด	1.892	1.892	1.892	2.205	2.205
30%	SCOPE	248.017	350.750	248.017	248.537	248.537
	FLUKE	250.804	354.691	250.804	250.823	250.823
	%ความผิดพลาด	-1.124	-1.124	-1.124	-0.920	-0.920

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
- D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิ่เพิ่มจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu

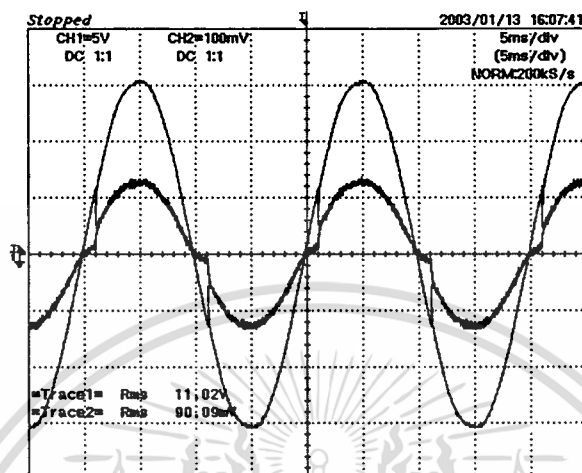


รูปที่ 4.121 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดปกติด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i) 10%, 20%, 30%



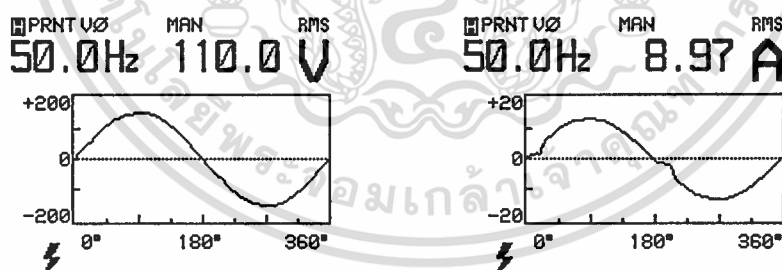
รูปที่ 4.122 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดปกติ ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับ ผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i) 10%, 20%, 30%

4.3.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสดเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสดที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสดไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสดที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสดฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20%, 30%

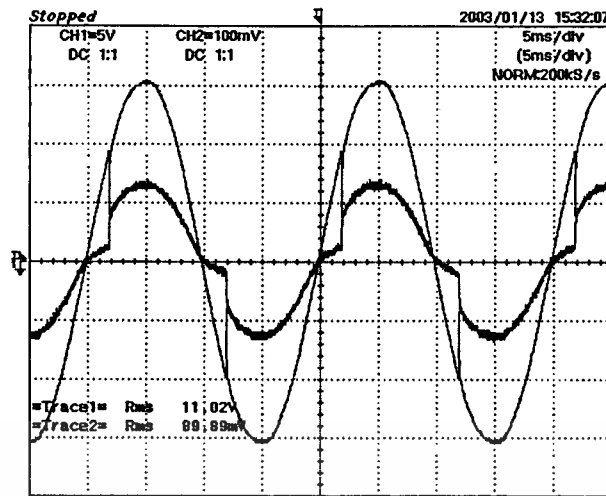


Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.123 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสดทางดันแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสดเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสดที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสดไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสดที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสดฮาร์โมนิกสรวม 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

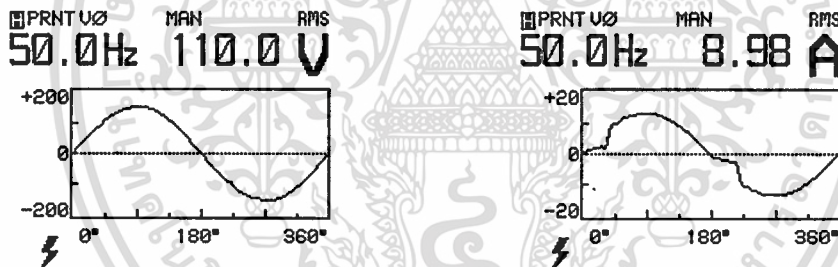


รูปที่ 4.124 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสดทางดันแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสดเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสดที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสดไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสดที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสดฮาร์โมนิกสรวม 10% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

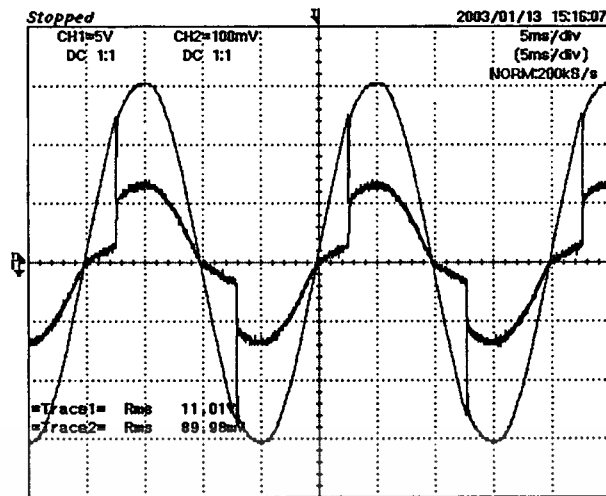


Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.125 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

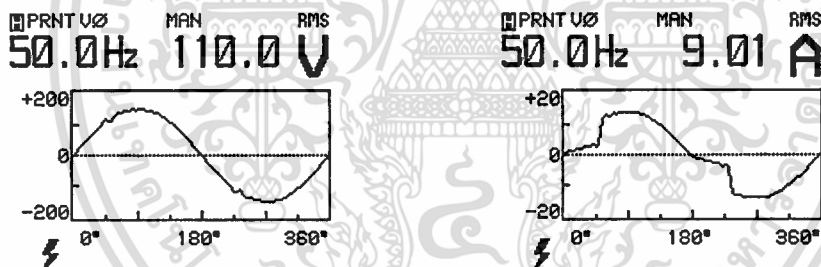


รูปที่ 4.126 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่4.127 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่4.128 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_v) 10%, 20%, 30%

THD _v	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
10%	SCOPE	985.962	988.654	985.307	34.961	73.389	0.999	0.997	1.412	1.650
	FLUKE	983.676	986.542	983.642	12.753	74.502	1.000	0.997	1.437	1.634
	%ความผิดพลาด	0.232	0.214	0.169	63.522	-1.517	-0.050	-0.050	-1.799	0.952
20%	SCOPE	974.549	983.680	970.308	83.331	138.510	0.996	0.986	2.104	1.874
	FLUKE	972.906	982.650	971.761	38.501	140.710	0.999	0.989	2.140	1.761
	%ความผิดพลาด	0.169	0.105	-0.150	53.797	-1.589	-0.291	-0.253	-1.726	5.999
30%	SCOPE	967.818	988.914	952.311	153.405	217.993	0.987	0.963	3.080	2.457
	FLUKE	968.202	989.464	959.346	106.443	217.631	0.994	0.970	3.079	2.442
	%ความผิดพลาด	-0.040	-0.056	-0.739	30.613	0.166	-0.668	-0.685	0.026	0.598

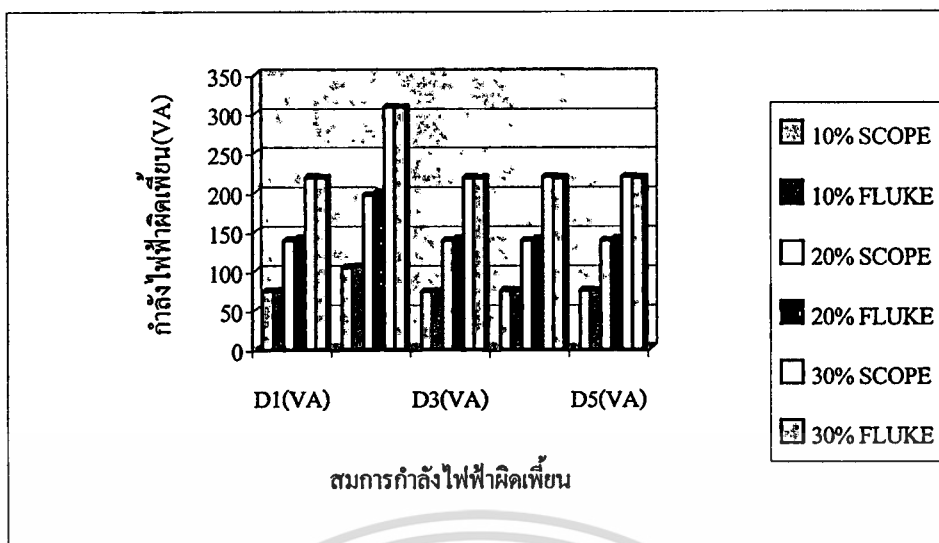
หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน
 S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7
 P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10
 Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11

- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

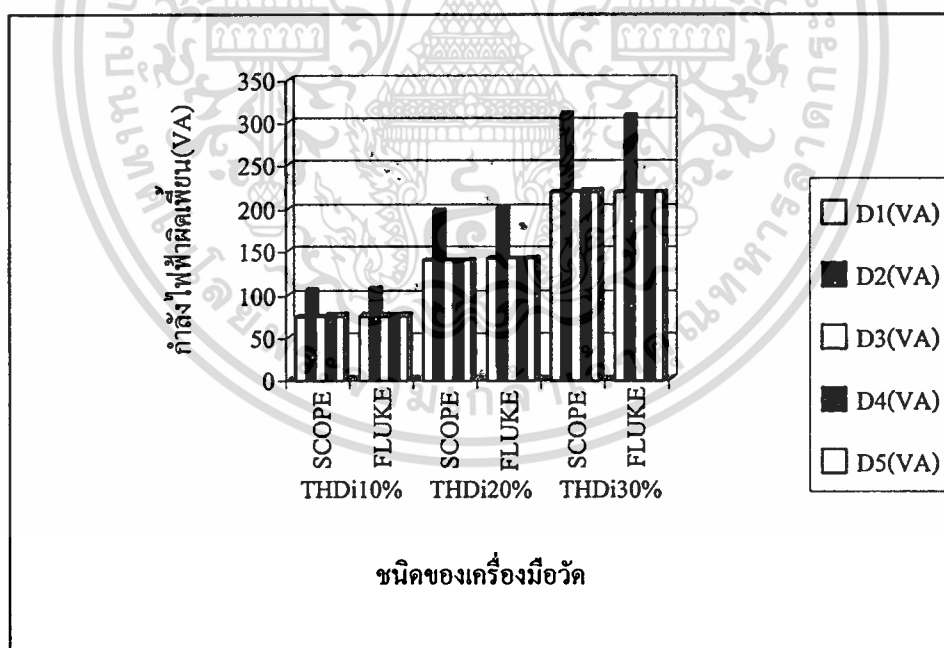
ตารางที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD_v) 10%, 20%, 30%

THDi	เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
10%	SCOPE	73.389	103.79	73.39	74.64	74.64
	FLUKE	74.502	105.36	74.50	74.50	74.50
	%ความผิดพลาด	-1.517	-1.517	-1.517	0.182	0.182
20%	SCOPE	138.510	195.88	138.51	138.52	138.52
	FLUKE	140.710	198.99	140.71	140.84	140.84
	%ความผิดพลาด	-1.589	-1.589	-1.589	-1.677	-1.677
30%	SCOPE	217.993	308.29	217.99	219.46	219.46
	FLUKE	217.631	307.78	217.63	217.66	217.66
	%ความผิดพลาด	0.166	0.166	0.166	0.820	0.820

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
- D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu

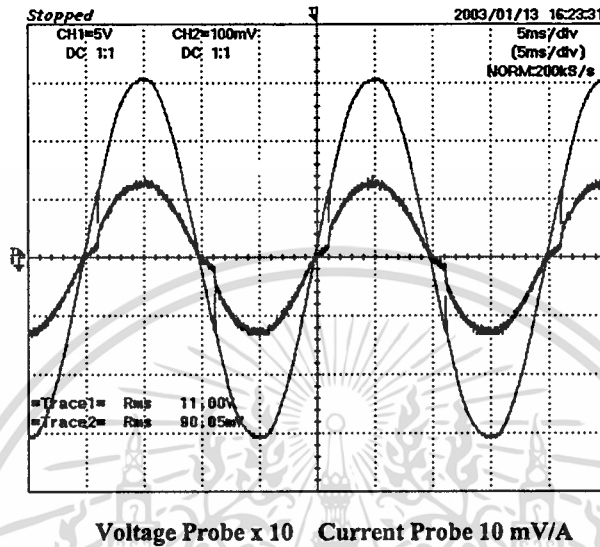


รูปที่ 4.129 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิพื้อนด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD) 10%, 20%, 30%

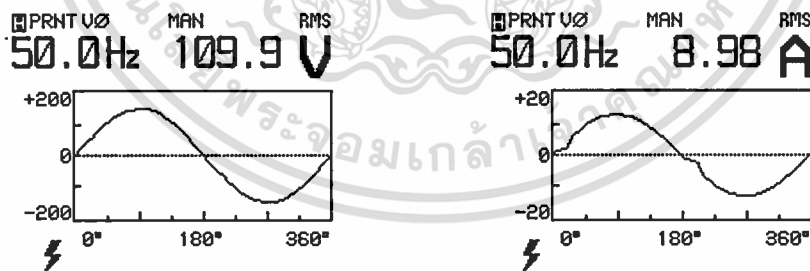


รูปที่ 4.130 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิพื้อน ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับ ผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร่วม(THD) 10%, 20%, 30%

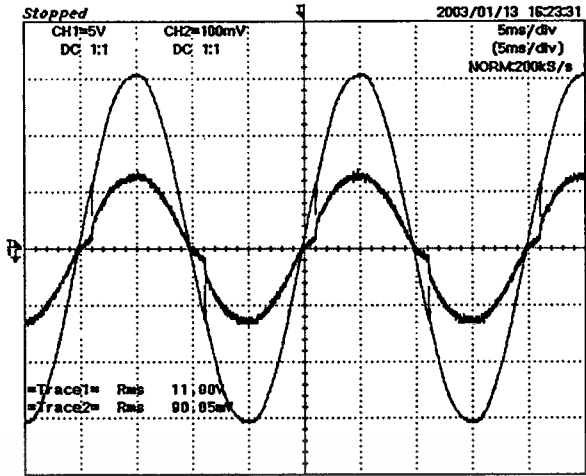
4.3.3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรรวม (THD) 10%, 20%, 30%



รูปที่ 4.131 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรรวม 10% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

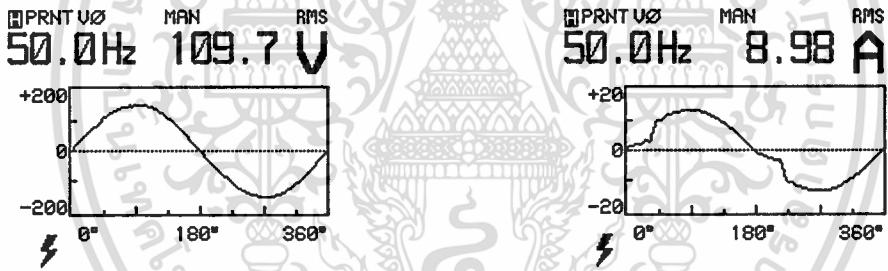


รูปที่ 4.132 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรรวม 10% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

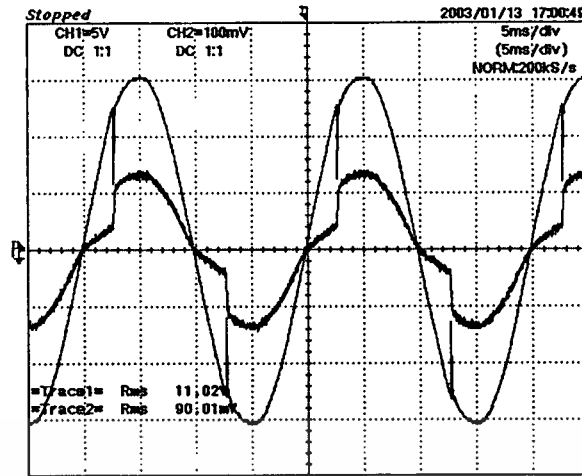


Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.133 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Digital Scope

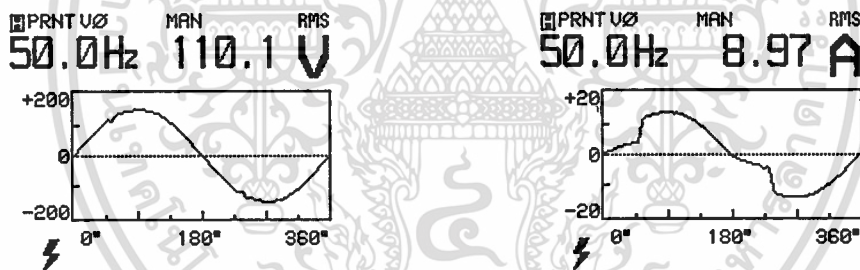


รูปที่ 4.134 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 20% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer



Voltage Probe x 10 Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.135 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Digital Scope



รูปที่ 4.136 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer

ตารางที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD_i) 10%, 20%, 30%

THD _i	เครื่องมือวัด	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	DI(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _v
10%	SCOPE	991.376	993.404	990.919	30.285	63.350	1.000	0.998	1.312	1.498
	FLUKE	982.663	985.033	982.668	13.237	66.916	1.000	0.998	1.357	1.447
	%ความผิดพลาด	0.879	0.843	0.833	56.291	-5.629	-0.040	-0.010	-3.421	3.379
20%	SCOPE	972.761	979.348	969.999	68.797	116.148	0.998	0.991	1.778	1.711
	FLUKE	970.855	977.627	970.372	24.824	116.260	0.997	0.993	1.802	1.659
	%ความผิดพลาด	0.196	0.176	-0.038	63.917	-0.096	0.050	-0.212	-1.355	3.028
30%	SCOPE	972.209	987.456	961.241	129.587	185.184	0.991	0.974	2.535	2.188
	FLUKE	973.024	988.543	967.707	83.691	183.727	0.996	0.979	2.553	2.085
	%ความผิดพลาด	-0.084	-0.110	-0.673	35.417	0.787	-0.535	-0.555	-0.718	4.694

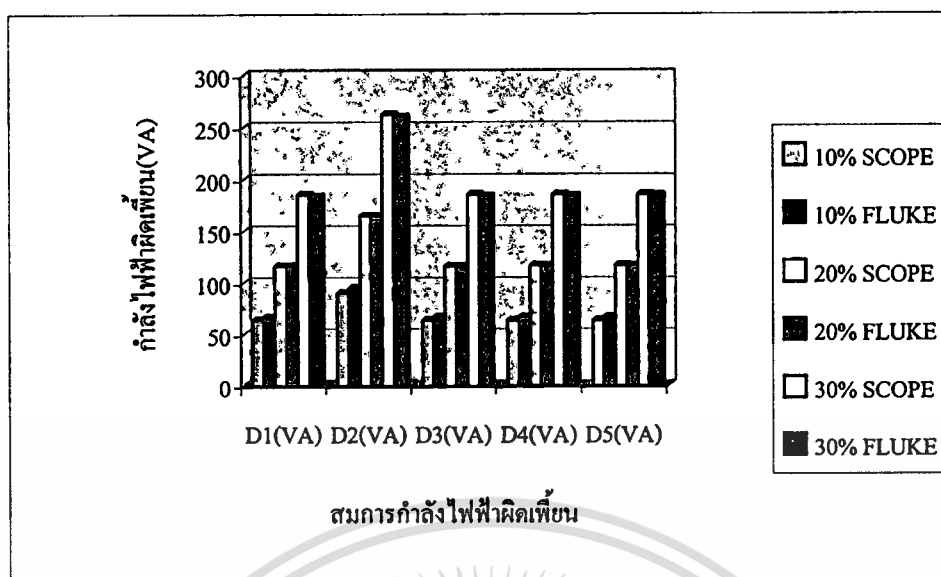
หมายเหตุ S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน
 S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7
 P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10
 Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11

- D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.13
- DPF คือ Displacement power factor คำนวณจากสมการที่ 3.15
- TPF คือ True power factor คำนวณจากสมการที่ 3.16
- KF คือ K-Factor คำนวณจากสมการที่ 2.10
- %THD_v คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
- %ความผิดพลาด คือ ((ค่าจาก Scope – ค่าจาก Fluke)/ ค่าจาก Scope)×100%

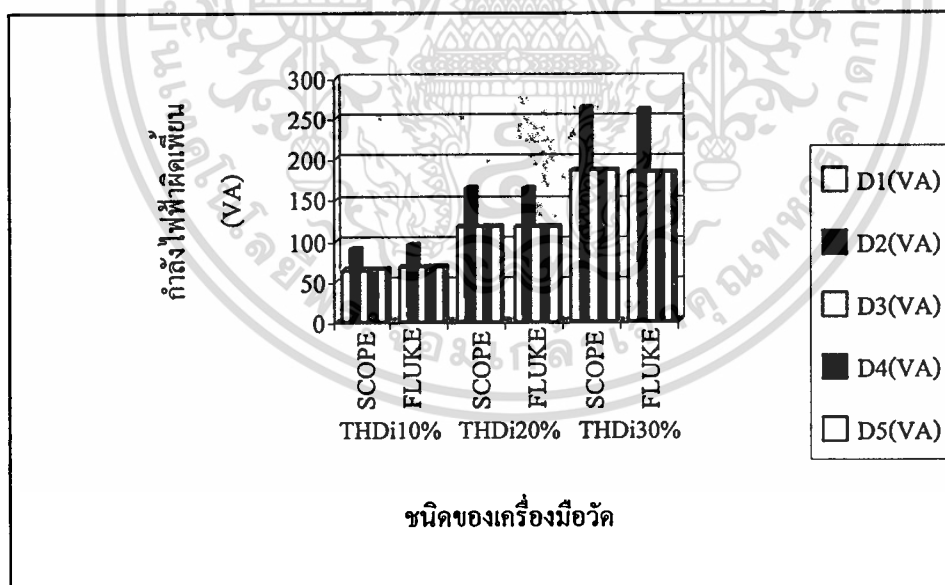
ตารางที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_v) 10%, 20%, 30%

THDi	เครื่องมือวัด	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
10%	SCOPE	63.350	89.59	63.35	63.70	63.70
	FLUKE	66.916	94.63	66.92	67.04	67.04
	%ความผิดพลาด	-5.629	-5.629	-5.629	-5.239	-5.239
20%	SCOPE	116.148	164.26	116.15	116.49	116.49
	FLUKE	116.260	164.42	116.26	116.33	116.33
	%ความผิดพลาด	-0.096	-0.096	-0.096	0.131	0.131
30%	SCOPE	185.184	261.89	185.18	185.22	185.22
	FLUKE	183.727	259.83	183.73	183.88	183.88
	%ความผิดพลาด	0.787	0.787	0.787	0.724	0.724

- หมายเหตุ D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.13
- D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
- D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
- D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
- D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวขึ้นจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



รูปที่ 4.137 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้นด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสอง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i) 10%, 20%, 30%



รูปที่ 4.138 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิ่ขึ้น ด้วยผลจากการทดสอบจริง กับ ผลจากการคำนวณแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD_i) 10%, 20%, 30%

จากรูปที่ 4.115 – 4.120, รูปที่ 4.123-4.128 และรูปที่ 4.131-4.136 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20%, 30%, 40% และ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70%, 60% ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20%, 30% พบว่าเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นกับรูปคลื่นของแรงดัน และกระแส ส่งผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนขึ้น แสดงได้ด้วย ตารางที่ 4.23 ตารางที่ 4.25 และ ตารางที่ 4.27

จากรูปที่ 4.121 รูปที่ 4.129 และรูปที่ 4.137 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด คือ จาก Digital Storage Scope DL 1520 และ จาก Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ให้ค่า กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ใกล้เคียงกันมาก

จากรูปที่ 4.122 รูปที่ 4.130 และรูปที่ 4.138 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณในแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20%, 30%, 40% และ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70%, 60% ที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20%, 30% พบว่า กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการที่ 3.25 (D3) และมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 (D4) และ 3.29 (D5) โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.20(D1) จะมีกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริงและมีค่าสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณในสมการอื่นๆ เนื่องจากลักษณะวิธีในการคำนวณที่แตกต่างและอาจจะเป็นเพราะสมการที่ 3.20 เป็นสมการแรกเริ่มที่เก่าเกินไป

4.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่น ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu

จากการทดสอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ขนาด 1 กิโลโวลต์แอมป์ แรงดัน 220/110 โวลต์ ทดสอบด้วยการจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ทดสอบด้วยการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) 15% , 30% , 50% และทดสอบด้วยการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% , 30% , 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% , 70% , 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20%, 30%

จากการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง คือ Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa และ Power Harmonic Analyzer Fluke 41B เพื่อนำไปวิเคราะห์รูปคลื่นด้วย Fast Fourier Transform (FFT) ด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถแบ่งผลการทดสอบได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ

1. กำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง
2. กำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu

ดังนั้นสามารถทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณของแต่ละสมการเพื่อหาสมการสำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผื่นที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.34 รูปที่ 4.44 รูปที่ 4.54 รูปที่ 4.64 รูปที่ 4.74 รูปที่ 4.84 รูปที่ 4.94 รูปที่ 4.104 และ รูปที่ 4.114 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) 15% , 30% , 50% และจากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.122 รูปที่ 4.130 และรูปที่ 4.138 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผื่น ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณในแต่ละสมการ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20%, 30%, 40%และโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70%, 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20%, 30% พบว่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ได้จากการคำนวณในสมการ

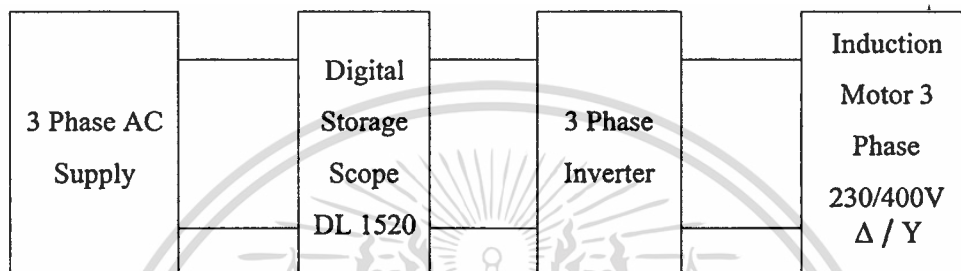
ที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd ให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการคำนวณ และให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิผิวด้วยผลจากการทดสอบจริง เนื่องมาจากสมการนี้เป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวที่ค่อนข้างเก่า มีขึ้นในปี ค.ศ. 1927 ซึ่งในขณะนั้นยังไม่มีความจริงในนิยามและการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าผิผิว

กำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.25 ของ Filipski จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าผิผิวด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการนี้คำนวณจากค่าแรงดันและกระแสที่เป็นค่า RMS ที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิก และมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิก โดยไม่คำนึงถึงส่วนประกอบดี ซี (DC Component) สำหรับกำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki และสมการที่ 3.29 ของ Budeanu จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่มีค่าเท่ากัน แต่จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิผิวด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการทั้งสองคำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC Component)

จากผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผิวด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณในแต่ละสมการของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki และ Budeanu พบว่าสมการที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิผิวเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดในระบบที่ทำการทดสอบนี้ได้แก่ สมการที่ 3.25 ของ Filipski

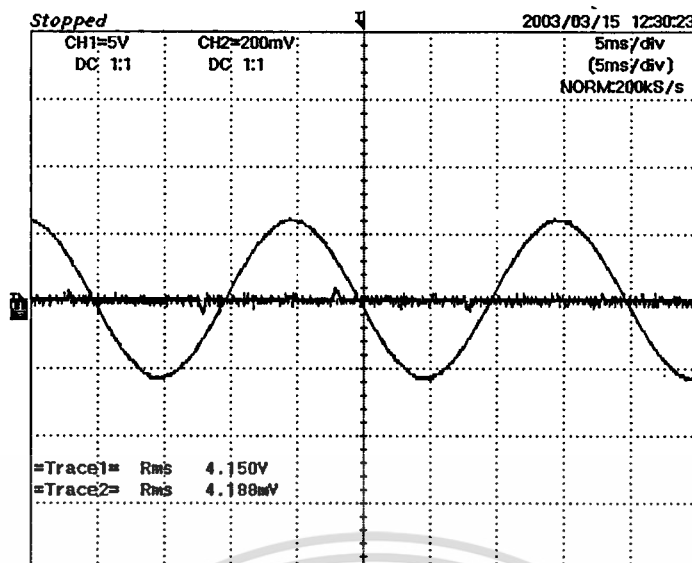
4.5 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนโดยอินเวอร์เตอร์

การทดสอบโดยให้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ของมิตซูบิชิ จ่ายโหลดมอเตอร์ 3 เฟส 4-Pole 1410 rpm 50 Hz 230/400 V Δ/Y 6/3.65 A 1.5 kW p.f 0.81 ทำการทดสอบในขณะที่มอเตอร์ไม่จ่ายโหลด, จ่ายโหลดมอเตอร์เต็มพิกัด, จ่ายโหลดมอเตอร์ที่ 75% และ 120% ของกระแสที่พิกัด โดยมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.139



รูปที่ 4.139 แสดงวงจรการทดสอบ เมื่อทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์

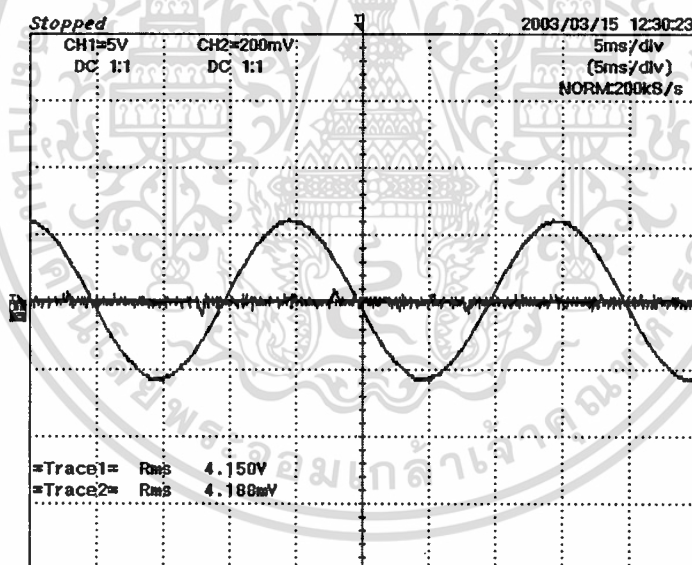
จากวงจรการทดสอบดังรูป ทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ขณะมอเตอร์ไม่จ่ายโหลด มอเตอร์จ่ายโหลดเต็มพิกัด และมอเตอร์จ่ายกระแสโหลด 75%, 120% ของกระแสที่พิกัด เพื่อนำรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ไปวิเคราะห์รูปคลื่นด้วย Fast Fourier Transform (FFT) ด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปคลื่นไปทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ และค่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยน ด้วยสมการแต่ละสมการที่มีอยู่ของ Budeanu and Shepherd, Filipski, Czarnecki, Budeanu เช่นเดียวกับการทดสอบข้างต้น โดยกำหนดข้อมูลที่จะพิจารณาตั้งแต่ ลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ 31



Voltage Probe x 100

Current Probe 10 mV/A

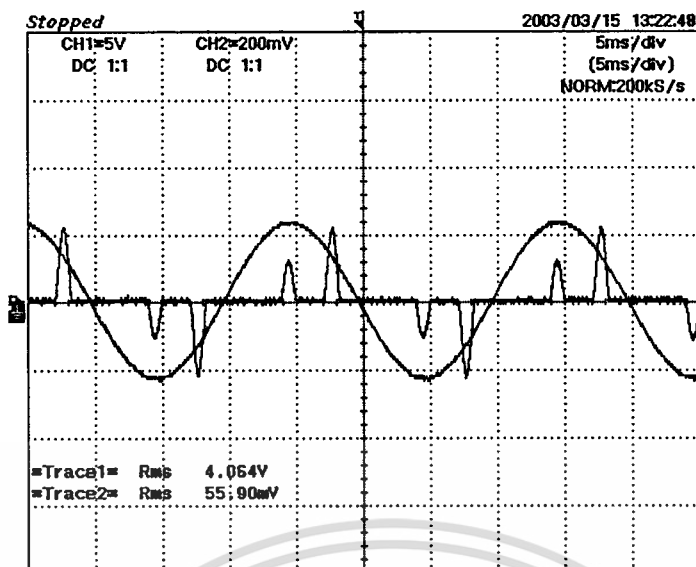
รูปที่ 4.140 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะไม่จ่ายโหลด



Voltage Probe x 100

Current Probe 10 mV/A

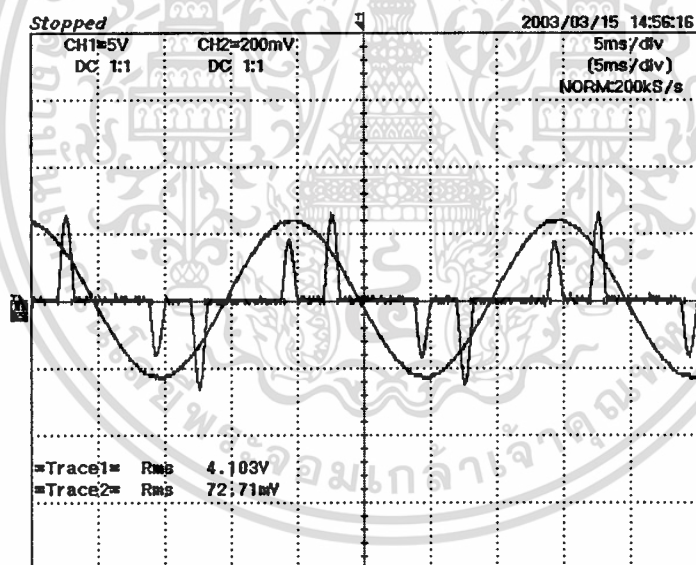
รูปที่ 4.141 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะมอเตอร์จ่ายกระแสโหลด 75% ของกระแสที่เต็มพิกัด



Voltage Probe x 100

Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.142 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะมอเตอร์จ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัด



Voltage Probe x 100

Current Probe 10 mV/A

รูปที่ 4.143 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายโหลด 120% ของมอเตอร์

ตารางที่ 4.29 แสดงผลการทดสอบ อินเวอร์เตอร์ทำงานขณะไม่จ่ายโหลด และ ขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ลักษณะต่างๆ

กรณี	Vrms(V)	Arms(A)	S*(VA)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	DPF	TPF	KF	%THD _i	%THD _v
NO LOAD	414.443	0.411	60.009	170.233	44.666	40.107	159.298	0.744	0.262	182.587	265.458	0.846
75% LOAD	410.541	4.149	791.935	1703.2	573.113	548.014	1507.300	0.723	0.337	83.286	190.391	1.003
FULL LOAD	406.040	5.567	1149.461	2260.300	901.148	711.358	1947.000	0.785	0.399	71.846	169.308	0.806
120%LOAD	109.870	7.296	1631.605	2990.400	1369.600	881.105	2508.100	0.841	0.458	59.495	153.587	0.764

- หมายเหตุ

S*(VA)

คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไปไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าคิดเฟ้น

S (VA)

คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7

P (Watt)

คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10

Q (Var)

คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11

D1 (VA)

คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าคิดเฟ้นจากสมการที่ 3.13

DPF

คือ Displacement power factor จำนวนจากสมการที่ 3.15

TPF

คือ True power factor จำนวนจากสมการที่ 3.16

%THD_i

คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรว

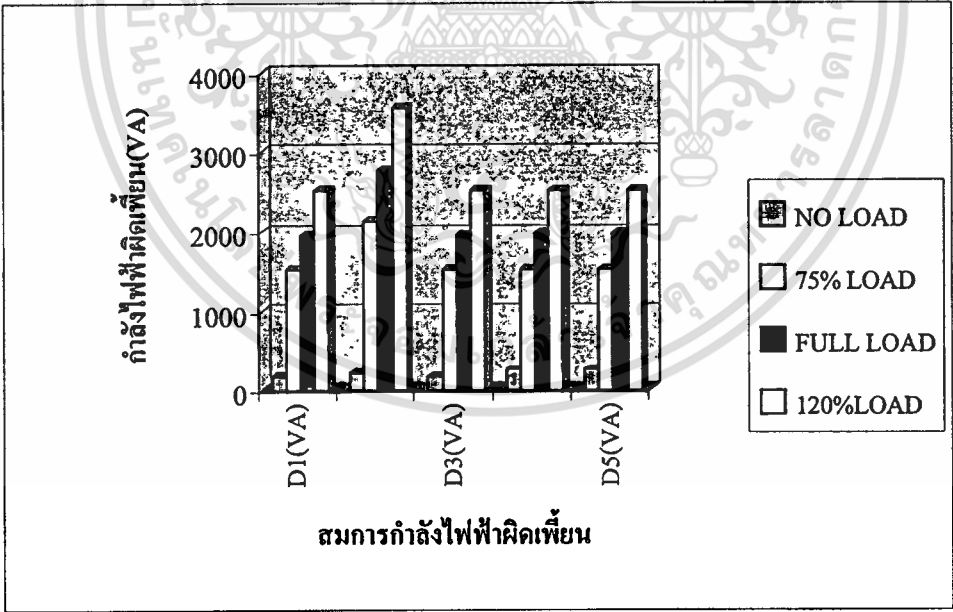
%THD_v

คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกสรว

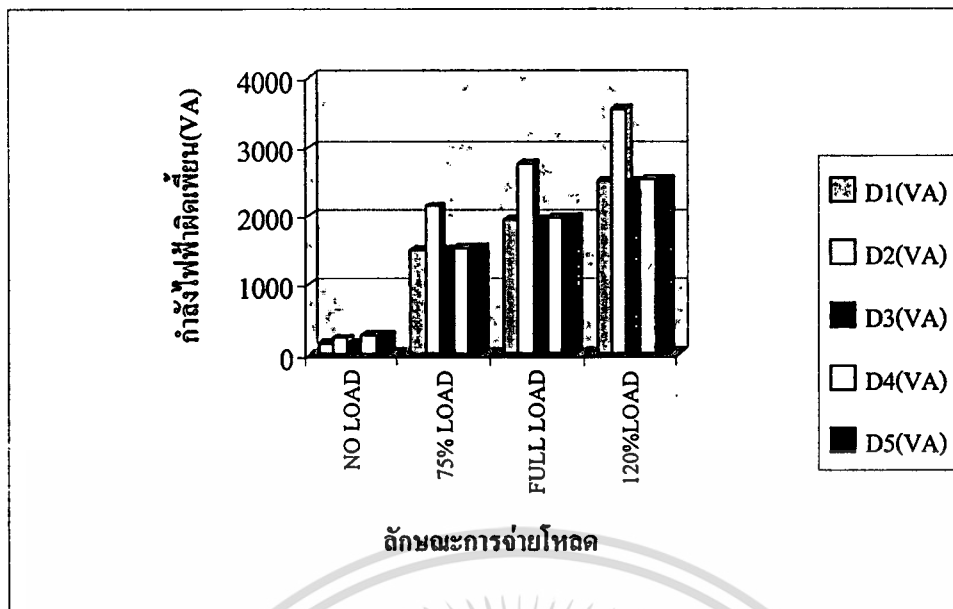
ตารางที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานขณะไม่ว่าย โหลดและขณะจ่ายโหลดคอมเคอร์

กรณีย	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
NO LOAD	159.298	225.281	159.298	260.220	260.220
75% LOAD	1507.300	2131.700	1507.300	1525.400	1525.400
FULL LOAD	1947.000	2753.500	1947.000	1970.300	1970.300
120%LOAD	2508.100	3546.900	2508.100	2518.300	2518.300

หมายเหตุ D1 (VA) คีย ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
D2 (VA) คีย ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
D3 (VA) คีย ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski
D4 (VA) คีย ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki
D5 (VA) คีย ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu



รูปที่ 4.144 แสดงกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนทางเคาน์อินพุตของอินเวอร์เตอร์ ทำงานขณะไม่ว่ายโหลด และขณะจ่ายโหลดคอมเคอร์



รูปที่ 4.145 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ทำงานขณะไม่จ่ายโหลดและขณะจ่ายโหลดมอเตอร์

จากผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนโดยอินเวอร์เตอร์เพื่อการจ่ายโหลดมอเตอร์ ทำการทดสอบด้วยการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa โดยเลือกใช้ Voltage Probe $\times 100$ และ Current Probe 10 mV/A เพื่อนำรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไปทำการวิเคราะห์รูปคลื่นด้วย Fast Fourier Transform (FFT) ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลจากการวิเคราะห์รูปคลื่นเมื่อนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนจากผลการคำนวณพบว่ากำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนเพิ่มค่าสูงขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.144 จะเห็นว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่พิกัดจะมีกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่ 75% ของกระแสที่พิกัด และเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่ 120% ของกระแสที่พิกัด จะมีกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่ 75% ของกระแสที่พิกัด และสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนจากการจ่ายกระแสโหลดมอเตอร์ที่พิกัดด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 4.145 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริง D1 กับกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณ D2 จากสมการคำนวณที่ 3.20 ของ Shepherd , D3 คำนวณจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski , D4 คำนวณจากสมการที่ 3.25 ของ Czamecki และ D5 คำนวณจากสมการที่ 3.27 ของ Budeanu พบว่ากำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริง D1 มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยน D3 ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.25 ของ Filipski ดังนั้นสรุปได้ว่าสามารถนำหลักการวิธีการทดสอบและสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าผลิตเพี้ยนดังกล่าวข้างต้นมาทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบและคำนวณหากำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เนื่องมาจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลักษณะต่างๆ ที่นอกเหนือจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น เนื่องมาจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นสมควรจะเป็นสมการการคำนวณที่นำเสนอ โดย Filipski นั่นคือ สมการที่ 3.25



บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว โดยหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% พบว่ามีกำลังไฟฟ้าผิผิวเกิดขึ้นในระบบที่ทำการทดสอบ เนื่องมาจากระบบที่ทำการทดสอบมีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นในปริมาณน้อยๆ แต่สามารถยอมรับได้ แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1 ในส่วนของ %THD_i และ %THD_v ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดมาจากขดลวดภายในตัวหม้อแปลงหรือเกิดจากฮาร์มอนิกส์ที่ปะปนอยู่ในระบบส่งจ่าย ซึ่งตามทฤษฎีแล้วระบบที่เป็นเชิงเส้น ที่มีรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสเหมือนกัน คือ เป็นรูปสัญญาณไซน์ กำลังไฟฟ้าผิผิวจะเป็นศูนย์ [15] กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าผิผิวที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดมาจากระบบที่ทำการทดสอบมีฮาร์มอนิกส์ปะปนอยู่เล็กน้อยเห็นได้จากความไม่เรียบของรูปสัญญาณ การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการทดสอบจริงจากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope และ Power Harmonic Analyzer โดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลัง(สมการที่ 3.13) และกำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.20, 3.25, 3.27, 3.29 กำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่องมือมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และจากรูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวด้วยผลจากการทดสอบจริงโดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลัง กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการ จะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวจากการทดสอบจริงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.25, 3.27 และสมการที่ 3.29 ส่วนสมการที่ 3.20 จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่สูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการทดสอบจริงและจากการคำนวณในสมการอื่นๆ

5.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

การทดสอบกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลักษณะต่างๆ ตามวัฏจักรโหลดที่จำลองขึ้น คือ เร็กติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น AC-DC Thyristor Converter แบบเต็มคลื่นและแบบครึ่งคลื่น และ AC-AC Converter ซึ่งคู่รวมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

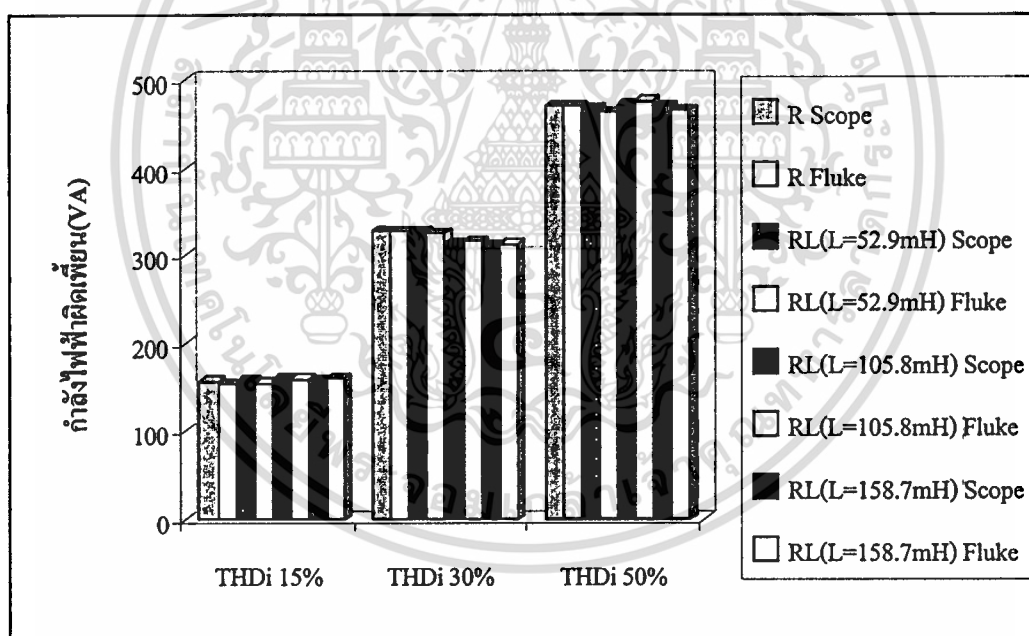
พบว่ามีกำลังไฟฟ้าผิผิวเกิดขึ้นในระบบที่ทำการทดสอบเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด กำลังไฟฟ้าผิผิวที่ได้จากการทดสอบจริงจากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope

และ Power Harmonic Analyzer โดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังสมการที่ 3.13 และ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.20, 3.25, 3.27, 3.29 แสดงเห็นว่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ไ้จากเครื่องมือวัดทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก สำหรับการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นด้วยผลจากทดสอบจริงโดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลัง กับผลที่ไ้จากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นจากการทดสอบจริงจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ไ้จากการคำนวณจากสมการของ Filipski คือ สมการที่ 3.25 สำหรับกำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ไ้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.29 จะมีค่าเท่ากันแต่จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ไ้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.29 คิผผลขององค์ประกอบกระแสตรงคั้ว(DC Component) [3] ส่วนสมการที่ 3.20 จะให้กำลังไฟฟ้าผิผื่นที่สูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นที่ไ้จากการทดสอบจริงและจากการคำนวณในสมการอื่น ๆ

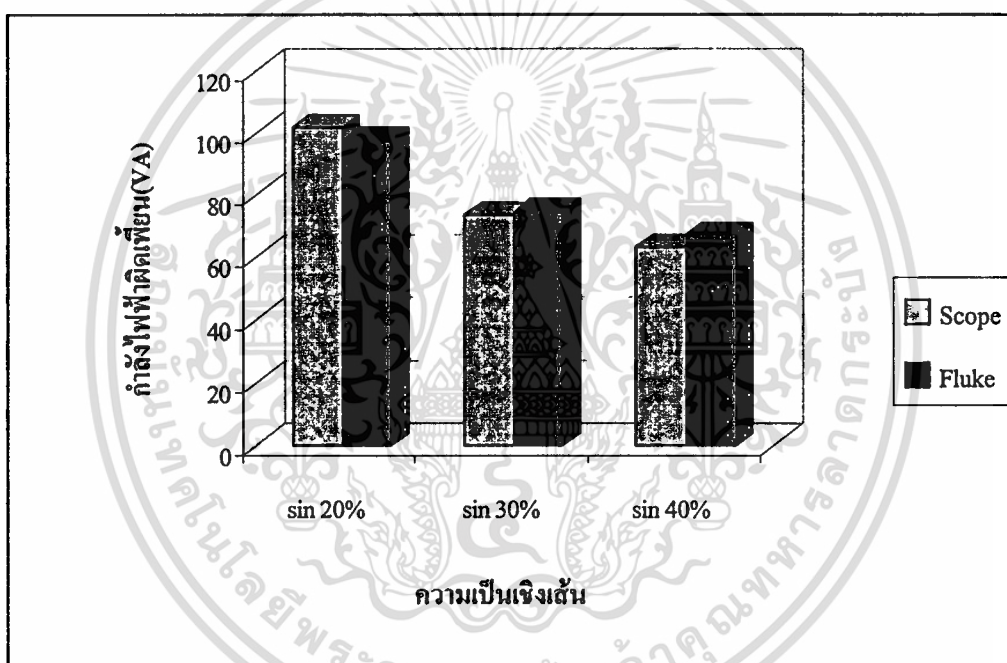
จากผลการทดสอบห้อมแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวม(THDi) 15%, 30% และ 50% พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิผื่นที่เกิดขึ้นแล้วจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวม(THDi)มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงไ้ดังรูปที่ 5.1



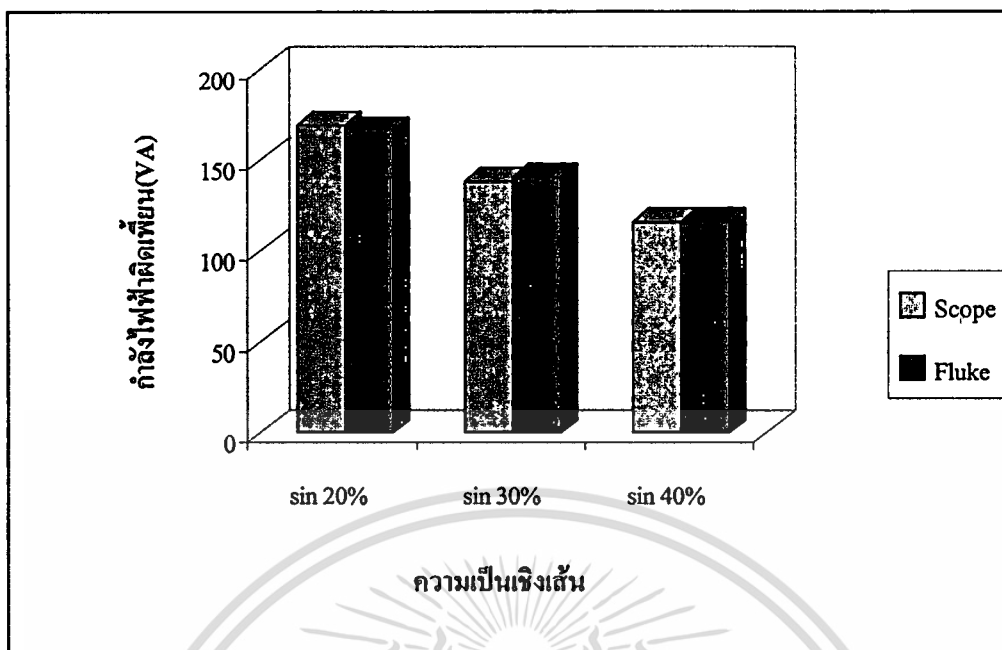
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิผื่นและความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวม(THDi) 15% , 30% และ 50%

5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น

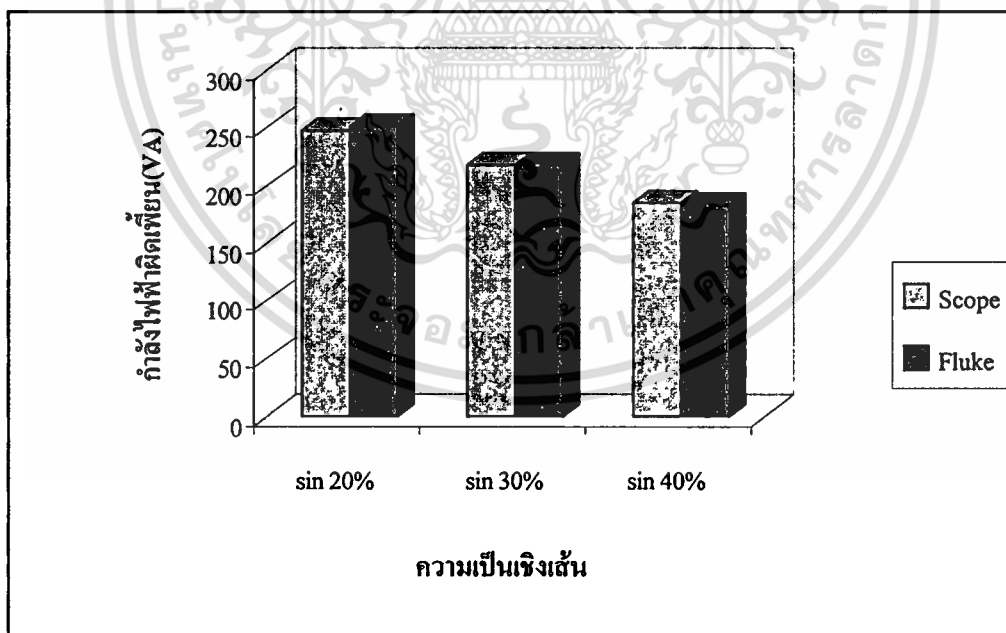
การทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% , 30% และ 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% , 70% และ 60% ของกระแสที่พิกัด จากผลการทดสอบ พบว่ากำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีแนวโนม้จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นลดต่ำลง และโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มสูงขึ้น ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD_i)ค่าเดียวกัน ดังรูปที่ 5.2 , รูปที่ 5.3และ รูปที่ 5.4 ในขณะที่วณกันกำลังไฟฟ้าปรากฏก็มีแนวโนม้เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าลดต่ำลง เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิพเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% ,30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ,70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD_i) 10%

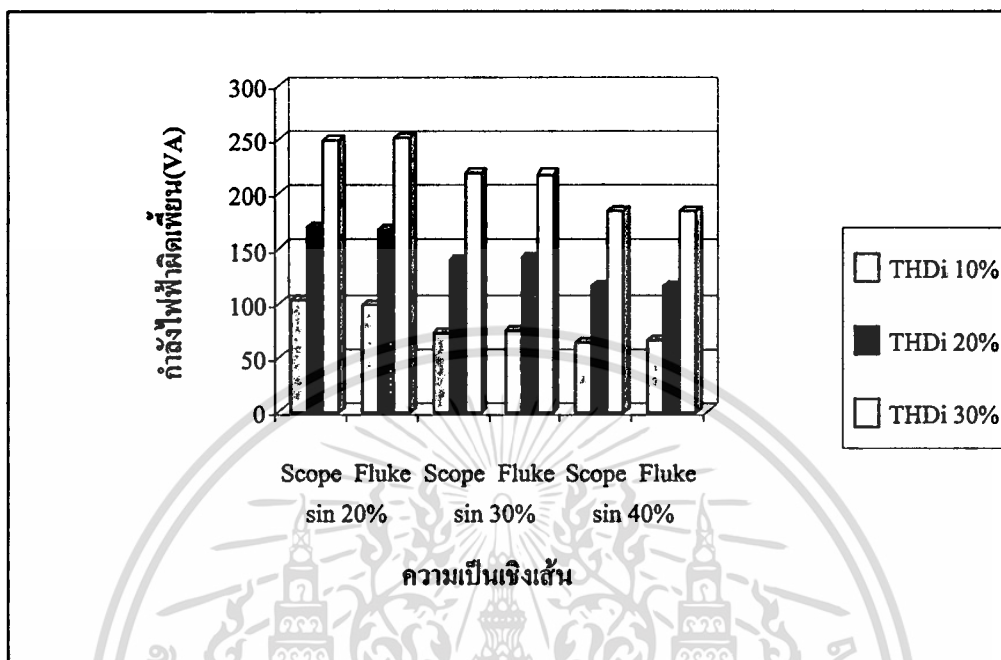


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% ,30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ,70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 20%



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับความเป็นเชิงเส้นที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20% ,30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ,70% และ 60% ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%

เมื่อความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) 10%, 20% และ 30% ที่กระแสแบบเป็นเชิงเส้น 20%, 30% และ 40% ร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80%, 70% และ 60%

จากการทดสอบทั้งหมด พบว่าเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa และเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ทำการรับข้อมูลในลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแส เพื่อนำไปวิเคราะห์รูปคลื่นด้วย Fast Fourier Transform (FFT) ในโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำผลการวิเคราะห์รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไปคำนวณหา กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ เครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องกว่าผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B เนื่องจาก Digital Storage Scope DL 1520 รับค่าของสัญญาณ โดยตรง (Mode DC) ด้วย Sampling rate 200 kHz สำหรับ Power Harmonic Analyzer Fluke 41B จะรับค่าแบบสุ่ม (Mode AC) ด้วย Sampling rate 2 kHz ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ได้รับไม่มีความต่อเนื่องของสัญญาณ เพราะฉะนั้น เครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa มีความละเอียดสูงมากกว่าเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B ดังนั้นเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa จึงให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องมากกว่าเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B

5.2 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นด้วยผลจากการทดสอบจริงกับ ผลจากการคำนวณด้วยสมการแต่ละสมการของ Budeanu , Shepherd , Filipski, Czarnecki , Budeanu

จากผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 15%, 30% และ 50% รวมทั้งหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 10%, 20% และ 30% พบว่าการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากการทดสอบจริง โดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลัง $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ (สมการที่ 3.13) [1-6] กับการคำนวณจากสมการที่มีอยู่ คือ 1). Budeanu, Shepherd and Zand, and Emanuel (สมการที่ 3.20) 2). Filipski (สมการที่ 3.25), 3). Czarnecki (สมการที่ 3.27), 4). Budeanu (สมการที่ 3.29) กำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากการทดสอบจริงจะเท่ากับผลที่ได้จากการคำนวณในสมการการที่ 3.25(D3) ของ Filipski เนื่องจากสมการนี้ไม่คำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC Component) [3] และกำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นจากการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากสมการที่ 3.27(D4) และ สมการที่ 3.29(D5) โดยที่กำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากสมการทั้งสองนี้จะมีค่าเท่ากันและจะมีค่าสูงกว่า กำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการที่ 3.27(D4) และสมการที่ 3.29(D5) คำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC Component) แต่สำหรับกำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากสมการที่ 3.20(D2) จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากการทดสอบจริงและมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นที่ได้จากการคำนวณอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากสมการนี้เป็นสมการเริ่มแรกตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1927 และเป็นการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิติดเพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแส โดยไม่คำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC Component) ซึ่งแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสที่นำมาคำนวณจะต้องมีลำดับฮาร์มอนิกที่ไม่เท่ากัน เช่น จากสมการที่ 3.20(D2) แสดงตัวอย่างการคำนวณได้

$$D^2 = \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)$$

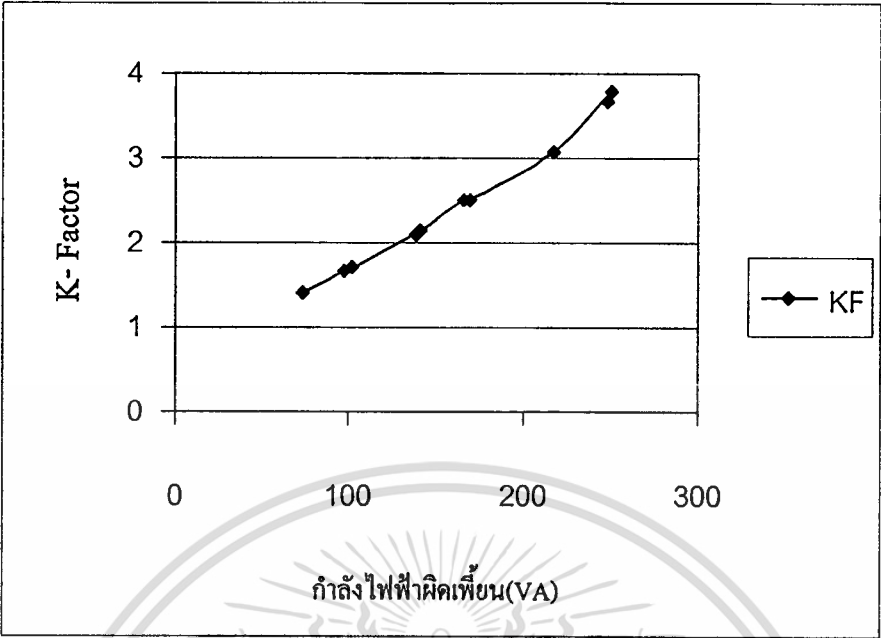
โดยที่ $m = 1$ จะได้ $D^2 = V_1^2 I_2^2 + V_2^2 I_1^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$
 $+ V_1^2 I_3^2 + V_3^2 I_1^2 - 2V_1 V_3 I_1 I_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) + \dots$

โดยที่ $m = 2$ จะได้ $D^2 = V_2^2 I_1^2 + V_1^2 I_2^2 - 2V_2 V_1 I_2 I_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)$
 $+ V_2^2 I_3^2 + V_3^2 I_2^2 - 2V_2 V_3 I_2 I_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) + \dots$

5.3 ผลของกำลังไฟฟ้าผิผิวที่มีต่อ K-Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการทดสอบและผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไม่เป็นรูปไซน์ โหลดประเภทนี้เป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิกส์และเป็นสาเหตุของการเกิดกำลังไฟฟ้าผิผิว ดังนั้นเมื่อความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มมากขึ้นแล้ว จะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าผิผิวเพิ่มค่าสูงขึ้น กำลังไฟฟ้าผิผิวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อความสูญเสียที่เพิ่มเนื่องจากกระแสเอ็ดดีในตัวนำขดลวดและส่วนของโลหะอื่น จะเพิ่มอุณหภูมิของส่วนเหล่านั้นให้สูงกว่าอุณหภูมิทำงานปกติภายใต้ปกติ ทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกินพิกัดที่จะยอมรับได้ สำหรับวิธีการป้องกันหม้อแปลงจากความร้อนเกิน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าผิผิว โดยวิธีการลดพิกัดโหลดหม้อแปลงลงมา หรือโดยการเลือกใช้หม้อแปลงที่มีการออกแบบมาโดยเฉพาะ เพื่อรับโหลดแบบที่ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าผิผิว หม้อแปลงประเภทนี้จะกำหนดค่า K-Factor เป็นตัวบอกความสามารถในการรับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามมาตรฐานของ UL กำลังไฟฟ้าผิผิวเกิดจากการคูณกันของแรงดันฮาร์โมนิกส์และกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ สำหรับ K-Factor อยู่บนพื้นฐานของความสูญเสียที่คาดเดาไว้ได้ โดยมีวิธีการคำนวณในรูปค่าตัวประกอบที่ขีดจำกัดมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียของกระแสเอ็ดดีในขดลวด ดังนั้น K-Factor จะแปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าผิผิว เมื่อความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) เพิ่มค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าผิผิวเพิ่มค่าสูงขึ้น ส่งผลต่อ K-Factor ให้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

ปกติแล้วหม้อแปลงโดยทั่วไปได้ถูกออกแบบสำหรับจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear load) ดังนั้นเมื่อใช้กับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องความร้อนเกินในหม้อแปลงหรือปัญหาแรงดันเอาต์พุตผิผิว ดังนั้น หม้อแปลงเมื่อใช้กับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นแล้วจึงจำเป็นต้องลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงลงมา หรือออกแบบหม้อแปลงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าผิผิวก็สามารถทราบพิกัด K-Factor ได้จากการคำนวณในสมการที่ 2.10 โดยทราบค่ากระแสฮาร์โมนิกส์จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าผิผิว ดังนั้น เมื่อทราบค่า K-Factor [20] แล้วก็สามารถคำนวณหาการลดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ หรือสามารถออกแบบหม้อแปลงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อป้องกันอุณหภูมิเกินในหม้อแปลงไฟฟ้าและหลีกเลี่ยงปัญหาแรงดันที่เอาต์พุตผิผิว (distortion)



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีต่อ K- Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า



บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

จากการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ขนาด 1 กิโลโวลต์ แอมป์ พิกัดแรงดัน 220/110 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จำหน่ายแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น ลักษณะต่างๆ ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม(THD) 15%, 30% และ 50% ทั้งจำหน่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบเป็นเชิงเส้นร่วมกับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสรวม (THD) 10%, 20% และ 30% จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะมีปริมาณทางไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งเพิ่มเข้ามาในองค์ประกอบกำลัง ทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เพาเวอร์แฟกเตอร์ลดต่ำลง ซึ่งปริมาณทางไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามาในองค์ประกอบกำลังนี้ เรียกว่า “กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน(Distortion Power; D)” กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นต้นกำเนิดฮาร์โมนิก แล้วฮาร์โมนิกนี้เองที่เป็นสาเหตุของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเกิดจากการคูณกันของแรงดันฮาร์โมนิกและกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่างๆ และมีผลต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ เป็น $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

2. กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa และจากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B มีผลใกล้เคียงกัน ซึ่งกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากเครื่องมือวัด Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa ให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าผลที่ได้จากเครื่องมือวัด Power Harmonic Analyzer Fluke 41B และการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลที่ได้จากการทดสอบจริงโดยอาศัยความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังในสมการที่ 3.13 กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการการคำนวณที่มีอยู่แต่ละสมการของ Budeanu, Shepherd and Zand and Emanuel ในสมการที่ 3.20 สมการที่ 3.25 ของ Filipski สมการของ Czarnecki ในสมการที่ 3.27 และสมการของ Budeanu ในสมการที่ 3.29 พบว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริงจากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง โดยอาศัยความสัมพันธ์ $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ ในสมการที่ 3.13 จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.25 ของ Filipski สำหรับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.27 ของ Czarnecki และสมการที่ 3.29 ของ Budeanu จะมีค่าเท่ากับทั้งสองสมการแต่จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.25 และมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.29 คำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC

เอกส Component) และจากการคำนวณพบว่าสมการที่ 3.20 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนสูงกว่ากำลังไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดเพี้ยนจากสมการการคำนวณอื่นๆ และมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ได้จากการทดสอบจริง เนื่องจากสมการที่ 3.20 เป็นสมการเริ่มแรก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1927 ซึ่งค่อนข้างเก่า และในขณะนั้นยังไม่มีความชัดเจนในนิยามและการคำนวณหาลำกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ทั้งเป็นการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแส โดยไม่คำนึงถึงผลของส่วนประกอบดี ซี (DC Component) ซึ่งแต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสที่นำมาคำนวณจะต้องมีลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เท่ากันแสดงในหัวข้อที่ 5.2 จากการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการคำนวณ แสดงให้เห็นแนวโน้มของสมการการคำนวณที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ว่าสมควรจะใช้สมการการคำนวณของ Filipski ในสมการที่ 3.25

3. จากผลการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน พบว่าเมื่อความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเกิดจากการคูณกันของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ ดังนั้น เมื่อความเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_v , THD_i) เปลี่ยนแปลงไปไม่ว่าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือมีค่าลดต่ำลง ก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน จากการทดสอบปรากฏว่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม(THD_v)เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยประมาณ 5% ตามมาตรฐาน IEEE 519 กำหนดไว้ว่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม(THD_v) ไม่เกิน 5% ถือว่าไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) เป็นส่วนมาก เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนกับความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) จึงเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือแปรผันตรงกัน คือ ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD_i) สูงค่าขึ้น กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนก็จะสูงค่าขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนยังมีความสัมพันธ์กับพิกัด K-Factor ของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด K-Factor = $\sum_{h=1}^{h=\max} [I_h(\text{p.u.})]^2 \cdot h^2$ จากสมการเห็นได้ว่า K-Factor มีความสัมพันธ์กับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเพิ่มค่าขึ้นเนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ แล้วพิกัด K-Factor ก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเช่นกัน

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การทดสอบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเนื่องจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น และส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ทำการทดสอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส จำยาลอดแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะต่างๆ ปัญหาที่พบ ก็คือ ปัญหาเรื่องการหาหมุมของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีกำลังไฟฟ้าผิผิวเกิดขึ้น(ในแนวแกน D ดังรูปที่ 3.1) เนื่องจากไม่พบรายละเอียดในส่วนนี้ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาต่อไปควรจะทำการศึกษาทดสอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ที่มีลักษณะแตกต่างไปจากโหลดที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำให้เห็นถึงคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าผิผิว เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาหมุมของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าผิผิว และเห็นถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากกำลังไฟฟ้าผิผิวได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์ขนาดของหม้อแปลง การออกแบบหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ หรือการลดพิภคหม้อแปลงเมื่อทราบถึงแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าผิผิวที่มีต่อพิภค K-Factor ได้ เพื่อการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น



เอกสารอ้างอิง

- [1]. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan and H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality," McGraw- Hill. New York, pp.123-133, 1996.
- [2]. J Arrillaga, N R Watson, and S Chen, "Power System Quality Assessment," John Wiley & Son.England, pp.51-63, 2000.
- [3]. M.E. El-Hawary, " Commentary on Various Formulations of Distortion Power D," IEEE Power Engineering Review. , pp.50-52, May 1999.
- [4]. Piotr Filipski, "The Measurement of Distortion Current and Distortion Power.," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement., Vol. IM-33, No.1, pp.36-39, March 1984.
- [5]. L.S Czamecki, "Distortion Power in Systems with Nonsinusoidal Voltage," IEE Proceedings B, Vol. 139, No.3, pp. 276-280, May 1992.
- [6]. Alexander Eigeles Emanuel, "Power in Nonsinusoidal Situations A Review of Definitions and Physical," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No.3, pp. 1377-1389, July 1990.
- [7]. P.S. Filipski, Y. Baghzouz, and M.D. Cox, " Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1237-1244, July 1994.
- [8]. Lorenzo Cividino, " Power Factor, Harmonic Distortion; Causes, Effects and Considerations," Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC'92., 14 th International, pp. 506-513.,4-8 Oct 1992.
- [9]. John E. Mitchell, " Distortion Factor: The "New" Problem of Power Factor," Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC'92., 14 th International, pp. 514-516.,4-8 Oct 1992.
- [10]. W.Mack Grady and Robert J. Gilleskie, " Harmonics and How They Relate to Power Factor," Proceeding of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'39), San Diego, CA, pp. 1-8, November 1993.
- [11]. Tristan A. Kneschke, P.E. , " Distortion and Power Factor of Nonlinear Loads," Railroad Conference Proceeding of the 1999 ASME/IEEE Joint, pp. 47-54, 1999.
- [12]. IEEE Power Engineering Society, " Tutortil on Harmonics Modeling and Simulation." IEEE Inc., 1998.

- [13]. S.Q. Sun and Q.R. Xiang , “ Waveform distortion and Distortion Power,” IEE Proceeding B, Vol.139, No.4 , pp.303-306, July 1992.
- [14]. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, Inc. 1993.
- [15]. IEEE Std 100-1996. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics. Terms ANSI/IEEE 100-1996, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.,New York.1996
- [16]. Kao Chen, “Energy Management in illuminating Systems,” CRC Press Boca Raton London New York Washington, D.C., pp. 143-147.,1999
- [17]. วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์ และ ชีรวัฒน์ ศรีนทุ, “ ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อหม้อแปลง.” คู่มือเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน หน้า 37-48.
- [18]. ประภาพรณ เคลือบวันฉัตรณ์, สุติ บรรจงจิตร, บุญเลิศ สือเฉย และปัญญา มาลีวัตร “ การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจากภาระไม่เป็นเชิงเส้น” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 หน้า 1-6 , มิถุนายน 2545.
- [19]. ชีรภัทร พัฒนานิธิ , บรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่, ฤทธิชัย ภูภิรมย์. “ การวิเคราะห์และแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [20]. ไชยะ แซ่มซ้อย, “ สถานการณ์ทางด้านฮาร์โมนิกส์ของประเทศไทย.” หน้า 32-50. ในการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2540.



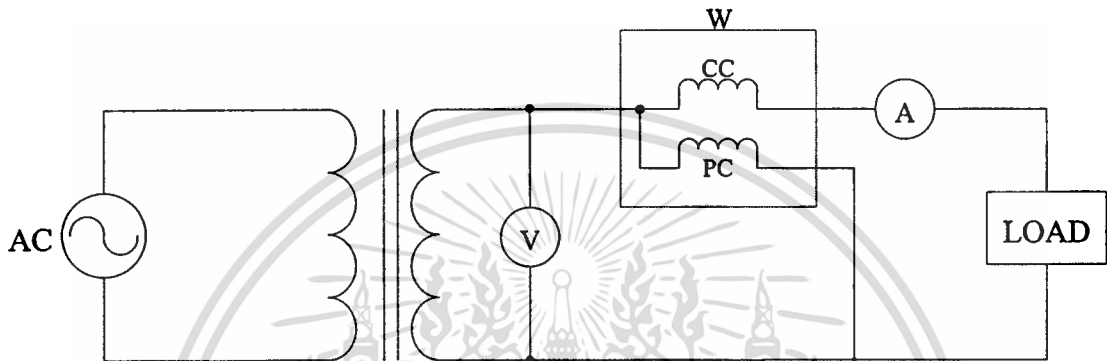
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบเพิ่มเติม

สำหรับผลการทดสอบเพิ่มเติมนี้ ได้ทำการทดสอบโดยหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 1 kVA 220/110 V 50 Hz จ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงวงจรการทดสอบกำลังไฟฟ้าผิขึ้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 1 แสดงวงจรการทดสอบ โหลดที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. โหลดแบบเป็นเชิงเส้น โดยโหลดแบบที่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ได้แก่ หลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 W ซึ่งเป็นโหลดความต้านทาน

2. โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ รีกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่นและแบบครึ่งคลื่น , AC/DC full wave Thyristor converter, AC/DC half wave Thyristor converter และ AC/AC full wave controller converter ต่อกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ สำหรับเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบนี้ ได้แก่

1. Digital Storage Scope DL 1520 ของ Yokogawa
2. Power Harmonic Analyzer Fluke 41B
3. Watt Meter แบบเข็มของ Yokogawa
4. Volt Meter แบบเข็มของ Yokogawa
5. Amp Meter แบบเข็มของ Yokogawa

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 1 แล้วจ่ายแรงดันทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงที่ แรงดัน 220 V เพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำที่พิกัด 110 V แล้วทำการปรับกระแสทางด้านแรงต่ำเพื่อให้ได้

กระแส 5 Arms เนื่องจากวัดด้วยมิเตอร์ แบบเข็มของ Yokogawa สามารถทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แสดงผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้น

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	V(Vrms)	A(Arms)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R	SCOPE	107.623	5.0898	547.787	547.776	1.024	3.378	4.777	3.378	4.614	4.614
	FLUKE	109.186	4.9239	537.621	536.990	25.754	3.853	5.449	3.853	5.900	5.900
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	550.000	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.161	-1.796	0.402	0.404	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.740	1.522	2.251	2.366	-	-	-	-	-	-

- หมายเหตุ
- S*(VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S ที่วัดทั่วๆ ไป ไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยน
 - S (VA) คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S จำนวนจากสมการที่ 3.7
 - P (Watt) คือ กำลังไฟฟ้าจริง P จำนวนจากสมการที่ 3.10
 - Q (Var) คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน Q จำนวนจากสมการที่ 3.11
 - D1 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.13
 - D2 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.20 ของ Budeanu and Shepherd
 - D3 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.25 ของ Filipksi
 - D4 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.27 ของ Czamecki
 - D5 (VA) คือ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่คิดเพี้ยนจากสมการที่ 3.29 ของ Budeanu

%ความผิดพลาด ใช้ค่าที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นค่าอ้างอิง(Reference)

2. แสดงผลการทดสอบ เมื่อห้เปลี่ยนแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

2.1 ผลการทดสอบ เมื่อห้เปลี่ยนแปลงจ่ายโหลดเป็นรีกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่นต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นการด้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบเมื่อห้เปลี่ยนแปลงจ่ายโหลดเป็นรีกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	V(Vrms)	A(Arms)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R	SCOPE	107.473	5.050	542.699	542.682	0.635	4.329	6.122	4.329	4.687	4.687
	FLUKE	109.379	4.905	536.488	535.880	25.433	2.198	3.108	2.198	5.231	5.231
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	547.500	-	-	-	-	-	-
%ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.297	-0.992	1.327	0.880	-	-	-	-	-	-
%ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.564	1.904	2.457	2.122	-	-	-	-	-	-
RL	SCOPE	106.782	5.062	540.503	518.176	117.009	99.729	141.038	99.729	99.787	99.787
	FLUKE	108.614	4.922	534.540	517.381	90.070	99.686	140.978	99.686	99.767	99.767
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	520.000	-	-	-	-	-	-
%ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.926	-1.236	1.727	0.351	-	-	-	-	-	-
%ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		1.260	1.570	2.811	0.504	-	-	-	-	-	-

2.2 ผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full wave Thyristor converter ต่อร่วมกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-DC Full wave Thyristor converter

ลักษณะโหลด	เครื่องมือวัด	V(Vrms)	A(Arms)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R	SCOPE	107.058	5.128	548.964	508.979	118.800	167.895	237.440	167.895	168.683	168.683
	FLUKE	109.007	4.971	541.836	509.345	91.822	160.382	226.814	160.382	160.673	160.673
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	562.500	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.675	-2.556	0.188	9.515	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.903	0.586	1.484	9.450	-	-	-	-	-	-
RL	SCOPE	107.506	5.070	545.044	407.806	321.070	166.379	235.296	166.379	176.184	176.148
	FLUKE	109.007	4.971	541.836	509.346	91.822	160.382	226.814	160.382	160.673	160.673
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	410.000	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.267	-1.398	0.901	0.535	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.903	0.586	1.484	-24.231	-	-	-	-	-	-

2.3 ผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลต์เป็นAC-DC Half wave Thyristor converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โวลต์เป็น AC-DC half wave Thyristor converter

ลักษณะ โหลด	เครื่องมือวัด	V(Vrms)	A(Arms)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R	SCOPE	107.076	5.076	543.545	502.895	119.930	167.793	237.296	167.793	171.270	171.270
	FLUKE	109.693	4.960	544.051	421.273	300.995	167.101	236.317	167.101	167.421	167.421
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	510.000	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.658	-1.526	1.174	1.393	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.279	0.806	1.082	17.398	-	-	-	-	-	-
RL	SCOPE	107.552	5.127	551.432	412.156	325.295	168.489	238.279	168.489	173.630	173.630
	FLUKE	109.693	4.960	544.051	421.273	300.995	167.101	236.317	167.101	167.421	167.421
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	415.000	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.226	-2.542	-0.260	0.685	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.279	0.806	1.082	-1.511	-	-	-	-	-	-

2.4 ผลการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC converter ต่อร่วมกับโหลดอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์ ซึ่งเป็นความต้านทานและต่อรวม
กับตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเป็น AC-AC converter

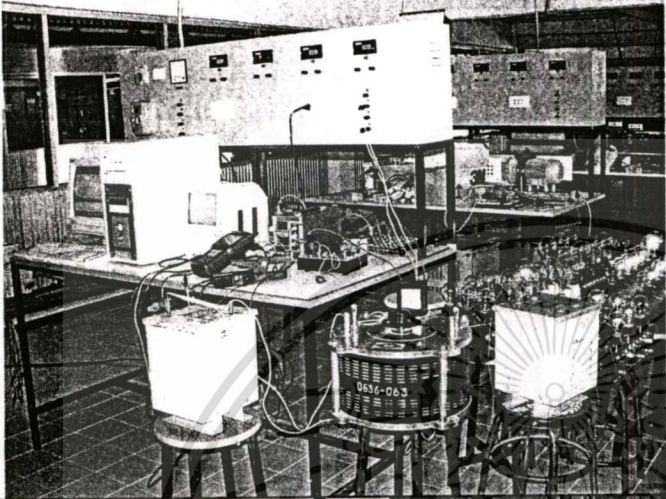
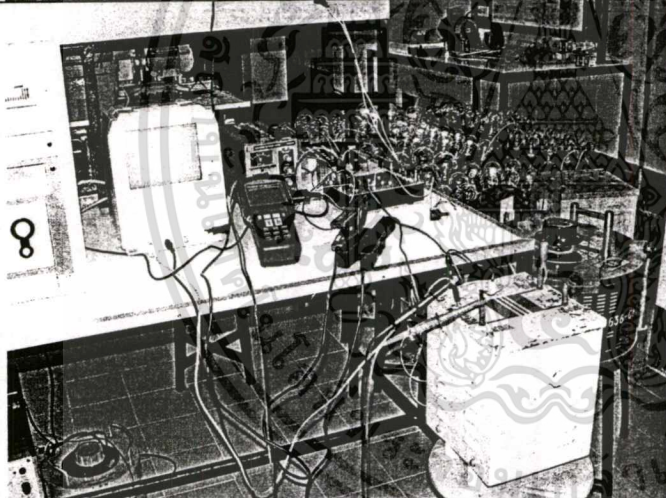
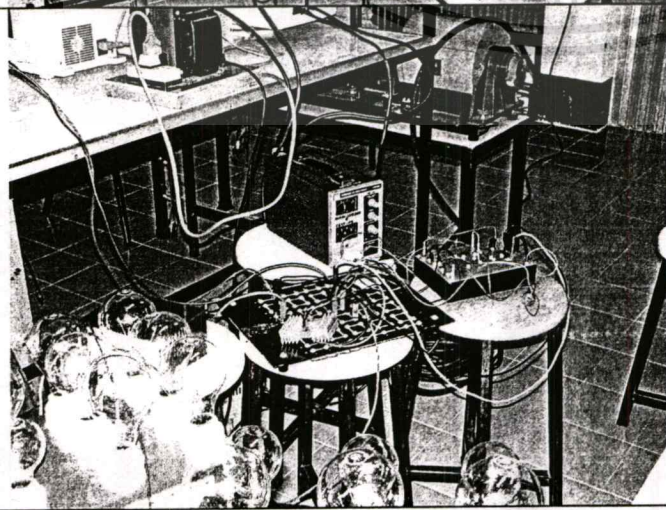
ลักษณะ โหลด	เครื่องมือวัด	V(Vrms)	A(Arms)	S(VA)	P(Watt)	Q(Var)	D1(VA)	D2(VA)	D3(VA)	D4(VA)	D5(VA)
R	SCOPE	107.484	5.125	550.877	510.925	119.791	167.545	236.944	167.545	172.089	172.089
	FLUKE	109.439	4.964	543.198	509.666	94.810	162.222	229.417	162.222	162.225	162.225
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	512.500	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.287	-2.504	-0.159	0.307	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.510	0.730	1.237	0.553	-	-	-	-	-	-
RL	SCOPE	107.108	5.098	546.072	488.034	154.907	189.792	268.407	189.792	193.764	193.764
	FLUKE	109.286	4.9	535.798	485.036	131.583	185.758	262.702	185.758	185.807	185.807
	WATT METER	110.000	5.000	550.000	490.000	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ SCOPE & WATT METER		2.629	-1.966	0.714	0.401	-	-	-	-	-	-
% ความผิดพลาดของ FLUKE & WATT METER		0.649	1.946	2.582	1.013	-	-	-	-	-	-

3. สรุป

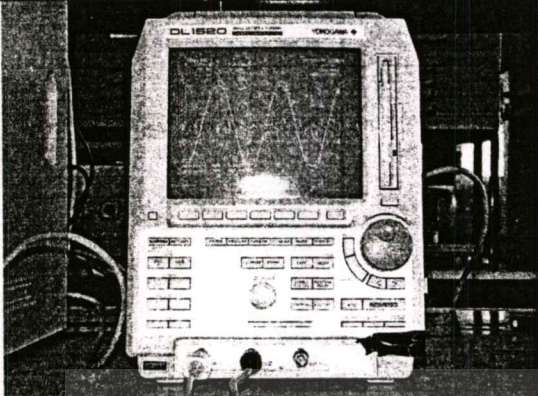
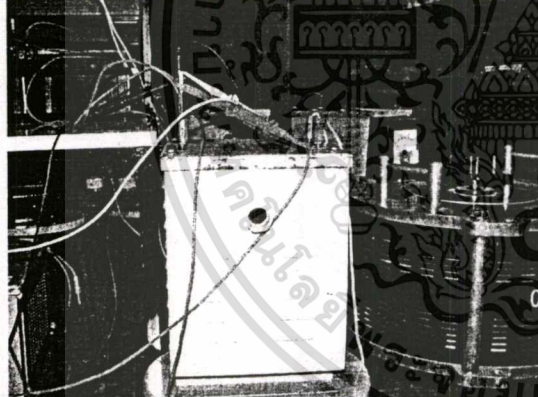
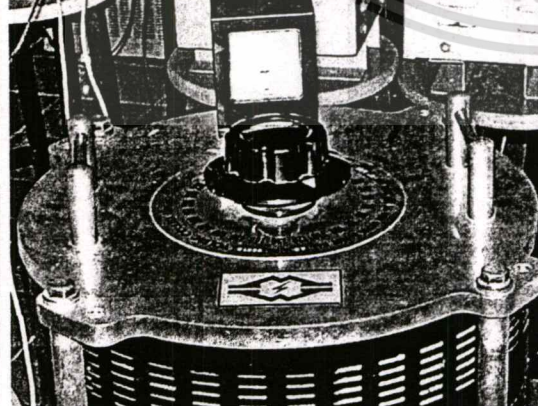
จากตารางที่ 1-6 แสดงผลการทดสอบหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% พบว่าการที่หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้ระบบที่ทำการทดสอบมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้น พร้อมทั้งมีกำลังไฟฟ้าผิเกิดขึ้น ดังนั้นผลที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้งสามเครื่อง แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดแบบเข็ม คือ วัดคีมเตอร์, โวลท์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ ไม่สามารถแสดงผลการวัดในส่วนของฮาร์โมนิกส์ได้ แอมป์มิเตอร์ไม่สามารถวัดค่ากระแสที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ได้ตามพิกัดกระแสที่ 5 Arms ในขณะที่ Scope และ Fluke สามารถวัดค่ากระแสที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ได้ตามพิกัดกระแสที่กำหนดคือ 5 Arms การที่วัดคีมเตอร์, โวลท์มิเตอร์ และ แอมป์มิเตอร์ ไม่สามารถวัดและแสดงผลจากระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องนั้น ก็จะทำให้ไม่สามารถวัดและแสดงผลกำลังไฟฟ้าต่างๆ เช่น กำลังไฟฟ้าปรากฏ, กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้าผิที่เกิดขึ้นในระบบที่ทดสอบได้อย่างถูกต้องด้วยเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดสอบนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้ได้ผลจากการวัดที่ถูกต้องแม่นยำและไม่เกิดความเสียหายกับเครื่องมือวัดนั้นๆ ด้วย

ภาคผนวก ข.

แสดงรูปการทดสอบและรูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	รูปการทดสอบโดยรวมเพื่อ แสดงให้เห็นถึงการต่ออุปกรณ์และ เครื่องมือวัด
	รูปการทดสอบโดยรวมเพื่อ แสดงให้เห็นถึงการต่ออุปกรณ์และ เครื่องมือวัด
	รูปการต่อวงจรการทดสอบบางส่วน เพื่อแสดงให้เห็นการต่อวงจรการ ทดสอบและการอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปถ่าย	รายละเอียด
	Digital Storage Scope DL 1520 YOKOGAWA
	Power Harmonic Analyzer Fluke 41B
	หม้อแปลงไฟฟ้า 1-ϕ ขนาด 1 kVA 220/110 V 50 Hz
	Variac 1 phase 220/110 V 8 kVA 40 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์



1. การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากภาระไม่เป็นเชิงเส้น
ประเภทพรรณ เกลือบวณวัฒน์ ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย ปัญญา มาสวัตร 1
2. การจำลองสภาพวิกฤตเพื่อศึกษาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบ斬น้ำมัน
สิริชัย ทัดสวน ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์ วิจิตร กิณเรศ ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย 7
3. การเปรียบเทียบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM กับคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM ที่ใช้
ตัวเหนี่ยวนำอิมิตัว 13
4. จีรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว วุฒิพันธ์ ศิสประณวิวัฒน์ อุบลรัตน์ จางวนิชเลิศ
ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะของพัดลมไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 19
5. อารังศักดิ์ ศรีวิเศษ วิจิตร กิณเรศ
การวิเคราะห์โหลดไฟฟ้ ด้วยวิธีศาสตร์ที่แก้ได้ โดยให้เทคนิคการคำนวณ และการแยกส่วนย่อยแบบปรับปรุ 25
6. พรสิน ชัยศิริพงศ์ นพพล สีสาจินดาโรกรักษ์
การวิเคราะห์อายุการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีผลกระทบจากแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ 31
7. สุทัศน์ พิลา ศุภี บรรจงจิตร บุญเลิศ สือเจย ปัญญา มาสวัตร
TCSC ในมุมมองของการปรับลดค่าความของไฟฟ้า 37
8. สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย ศุภี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา วิมลนง วงศ์ละลิน
การศึกษาผลกระทบด้านความปลอดภัยของตัวนำส่งพลังงานในระบบไฟฟ้า 43
9. จารุวัตร เจริญสุข สุนธยา นิเลียง
การเปรียบเทียบสมรรถนะของหม้อน้ำมันเพื่อการใช้งานไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือน 49
10. จารุวัตร เจริญสุข สุวัชัย จังจุฑารักษ์
โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาเวลาในการทำเชื้ออาหารการป้องกัน 55
11. หิมทัญญู พรเฉลิมพงศ์ ดำกิง ไบประเสริฐพงศ์ วณิษฐา วิจารณ์วราญักษ์ อรุณ พันธ์ไมสี วันชัย สุทธิบูรณ์ 61
12. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณด้วยขั้วมอส
อังกณา จารุวาระกุล กอบชัย เดชหาญ 65
13. วงจรบูตสเตรป ใบซินมอส อินเวอร์เตอร์ ทำงานแบบเต็มย่านที่ศึกษาไฟเลี้ยง 1 โวลต์
คำผอง คงสมบูรณ์ กอบชัย เดชหาญ เอกภมิล นิลอาชา 70
14. การออกแบบวงจรบูตสเตรป ใบซินมอส ทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำ
สิริวัฒน์ ลิ้มโพธิ์ กอบชัย เดชหาญ ชัยวุฒิ อาริย์พัฒนกุล สุชาติ คุณทวีเทพ 76
15. วงจรบูตสเตรปขั้วมอสไดรสเตอร์บัพเพอร์ความเร็วสูง
หวัช ซูเมือง กอบชัย เดชหาญ ทศิษฐ ไรจน์ทลงคำ สุชาติ คุณทวีเทพ 81
16. วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าประมาณ 700mV - 1.2V ด้วยสายส่งไมโครสตริป
ยงยุทธ พิมพ์จำปา สมยศ จูเนะบิยะ 87
17. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขแบบหลายแถบความถี่ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคสโปลนทรานซิสชันฟังก์ชัน
ควรวินน์ ชิวปริธา กอบชัย เดชหาญ พินิติ์ เสนียังค์ ณ ฤกษ์ยา 93
18. การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด
ชูนิทธ์ ประดับเพชร วิรพงษ์ ภัณจิตร สุรพันธ์ ยัมมัน กอบชัย เดชหาญ 99
19. การกำจัดฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการของดีจิตอลคอมบิเลเตอร์โดยในแนตของราก
เพ็ญบุตต์ ตั้งสมรพจน์ พุศศักดิ์ ชิวสุวัชร 105
20. การแบ่งส่วนภาพโดยทฤษฎีการฟอตอนจากการต่อแบบหลายความละเอียดผ่านการรักษาสภาพแบบปรับเรียบ
พรพจน์ โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ พุศศักดิ์ ชิวสุวัชร 111
21. การออกแบบระบบเชื่อมต่อข้อมูลแบบจุดต่อจุดผ่านเครือข่าย SDH
ไพโรจน์ หาดสำน กอบชัย เดชหาญ 117
22. การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้การมอดูเลตแบบ GMSK
พิเชษฐ ร่มสมันต์ สุรพล บุญจันทร์ เกียรติกร วงศ์โรจน์ภรณ์ สุวิมล สีทธิวิภาภ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจากภาระไม่เป็นเชิงเส้น

Distortion Power Analysis due to Nonlinear Load

ประภาพรณ เคลือบวันรัตน์ สุทธิ บรรจงจิตร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บุญเลิศ สือเฉย ปัญญา มาลีวัตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เนื่องมาจากภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยคำจำกัดความและสมการการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่มีอยู่ของ Budeanu, Czarnecki และ Filipski ทำการทดสอบโดยใช้หม้อแปลงพิกัด 1 kVA, 220/110V 1 ϕ 50 Hz ง่ายภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อบันทึกค่าขององค์ประกอบกำลัง จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนตามฟังก์ชันของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ โดยอาศัยสมการของ Budeanu, Czarnecki และ Filipski แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทั้งกรณีเป็นไซน์และไม่เป็นไซน์ ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบกับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ซึ่งจะช่วยในกรณีวิเคราะห์ขนาดของหม้อแปลง ขนาดของสายส่ง และความร้อนที่อาจเกิดขึ้นในอุปกรณ์ โดยทั้งหมดเกิดจากค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนทั้งสิ้น

Abstract

This paper presents a method of a distortion power analysis due to nonlinear loads by employing various definitions and formulas of the distortion power according to Budeanu, Czarnecki and Filipski. The tests are conducted in nonlinear load conditions of a transformer with a rate of 1 kVA, 220/110V 1 ϕ 50 Hz for measuring power components. The computed distortion power is calculated to determine the voltage and current harmonics of various frequencies. The results are compared with the measured values for studying characteristics of distortion power, and power factor of sinusoidal and nonsinusoidal waveforms. The results derived from this paper can be used to apply for a large transformer with different nonlinear loads. The analysis is helped to find a capacity of transformers, line conductors and thermal developed in the equipment caused by the distortion power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ปัจจุบันวิวัฒนาการและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มีอยู่ทั่วไปมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์(nonsinusoidal) เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นกับรูปสัญญาณ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น จำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องโทรสาร เครื่องมือสื่อสาร บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ปรับความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน ทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพทางไฟฟ้าด้อยลง ไม่มีเสถียรภาพขาดความต่อเนื่อง ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอในส่วนของทฤษฎีการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อศึกษาคุณสมบัติของค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เริ่มแรกกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนได้ถูกกำหนดขึ้นโดย Budeanu เมื่อปี ค.ศ. 1927 ประมาณ 70 ปีล่วงมาแล้ว โดย Budeanu ได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ สำหรับวงจรไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์(nonsinusoidal) [2]

$$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \phi_n \quad (1)$$

โดยที่ U_n , I_n คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์

กำลังไฟฟ้าปรากฏ ; S ในวงจรที่ภาระไม่ได้เป็นความต้านทาน ค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏ อาจจะสูงกว่าผลลัพธ์จากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ P และ Q_B นั่นคือ

$$S^2 - (P^2 + Q_B^2) \geq 0 \quad (2)$$

ดังนั้น องค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นมาจึงได้ถูกแนะนำโดย Budeanu เรียกว่า “Distortion power” อธิบายด้วยการวัดของค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่ม

ขึ้นมา เนื่องมาจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น(waveform distortion)

$$D_B^2 = S^2 - (P^2 + Q_B^2) \quad (3)$$

กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน เกิดขึ้นโดยการ Cross products ของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่ต่างๆ โดยที่สูตรต่างๆ ของ Distortion power เป็นไปตามฟังก์ชันของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ที่แต่ละความถี่ [1]

สูตรสำหรับ กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน โดย Budeanu เป็นสูตรเริ่มแรกต่อมาได้มีการพัฒนาขึ้นโดย Shepherd and Zand, และ Emanuel [1] โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน ประกอบด้วยองค์ประกอบของแรงดันและกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

$$D^2 = \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n) \quad (4)$$

โดยที่ $\theta_m = \alpha_m - \beta_m$ และ $\theta_n = \alpha_n - \beta_n$ และ V_m, V_n, I_m, I_n และ $\alpha_m, \alpha_n, \beta_m, \beta_n$ คือ ค่า RMS และมุมเฟสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแส ตามลำดับ

หลังจากนั้น กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน โดย PIOTR FILIPSKI [3]: สามารถแบ่งองค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ แบ่งออกได้เป็น 4 องค์ประกอบ นั่นคือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ S กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ P กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q และกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน D ทั้ง 4 องค์ประกอบมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } S = UI \quad (6)$$

$$P = \sum_n U_n I_n \cos \phi_n \quad (7)$$

$$Q = \sum_n U_n I_n \sin \phi_n \quad (8)$$

$$\text{และ } D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

$$= \sqrt{\sum_m \sum_n [U_m^2 I_n^2 - U_m U_n I_m I_n \cos(\phi_m - \phi_n)]} \quad (9)$$

โดยที่ U, I เป็นค่า RMS ของแรงดันและกระแส

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U_n, I_n และ ϕ_n เป็นค่า RMS และมุมเฟสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแส

กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน; D โดย L.S. Czarnecki [2]:
Czarnecki คำนวณ Distortion power ด้วยสูตร

$$D_B^2 = S^2 - (P^2 + Q_B^2) \\ = \frac{1}{2} \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} \{ (U_r I_s - U_s I_r)^2 + 2U_r I_s U_s I_r [1 - \cos(\phi_r - \phi_s)] \} \quad (10)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
Q คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

U_r, U_s, I_r, I_s คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิก
 ϕ_r, ϕ_s คือ ค่ามุมเฟสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแส

การอธิบายของ กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน ที่อธิบายได้อย่างถูกต้องด้วย Budeanu [1] สามารถแสดงสูตรการคำนวณ กำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนตามฟังก์ชันของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกที่มีความถี่ต่างๆ ดังนี้

$$D^2 = \sum_{m=0}^{h-1} \sum_{n=m+1}^h \{ V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n) \} \quad (11)$$

โดยที่ $\theta_m = \alpha_m - \beta_m$ และ $\theta_n = \alpha_n - \beta_n$ และ V_m, V_n, I_m, I_n และ $\alpha_m, \alpha_n, \beta_m, \beta_n$ คือ ค่า RMS และมุมเฟสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแส ตามลำดับ

จากสมการที่ 11 สามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน(Distortion power) โดยอาศัยหลักการของฟูเรียร์ด้วยสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของ รูปคลื่นของแรงดันและกระแส ในการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยนเนื่องมาจากภาวะที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยคำนึงถึงผลของฮาร์โมนิก ซึ่งทำให้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าใน 4 องค์

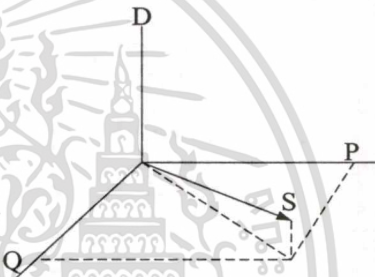
ประกอบคือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน ดังนี้

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \\ S = \sqrt{(\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2)(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2)} \quad (12)$$

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h \quad (13)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \theta_h \quad (14)$$

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้าทั้ง 4 ในเชิงเวกเตอร์สามมิติ แสดงได้ดังรูปที่ 1



[4].

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า
จากความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้าที่คำนึงถึงผลของฮาร์โมนิก ดังนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ คือ

Displacement power factor: $DPF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (15)$

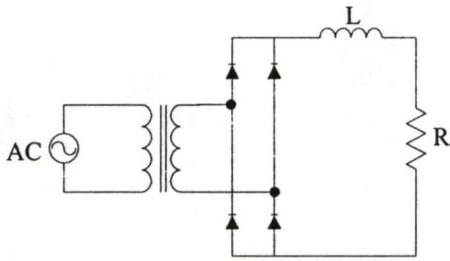
True power factor: $TPF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (16)$

3. การทดสอบ

จากหลักการของค่ากำลังไฟฟ้าผิเคเพี้ยน จะพบว่าเมื่ออยู่หลายงานวิจัย ดังนั้น จึงได้ทำการทดสอบโดยหม้อแปลงขนาด 1 kVA 1 เฟส 50 Hz แรงดัน 220/110 V ทดสอบร่วมกับภาระจริง โดยภาระที่ใช้จะเป็นภาระที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ตัวเรียงกระแส ต่อร่วมกับความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ดังวงจรในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นแนวโน้มของค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริง วงจรการทดสอบแสดงได้ดังรูป

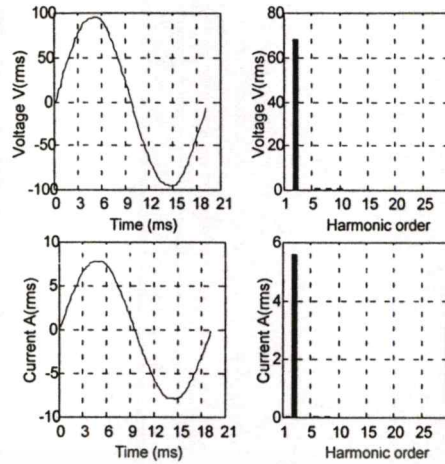


รูปที่ 2 แสดงวงจรการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบทำได้โดยใช้หม้อแปลงทดสอบขนาด 1 kVA 1 เฟส 50 Hz 220/110 V ทดสอบร่วมกับภาระจริงโดยต้องจรงตามรูปที่ 2 ภาระของหม้อแปลงประกอบไปด้วย Single phase bridge และหลอดไส้ (GLS) ขนาด 100 วัตต์ จำนวน 29 หลอด ซึ่งเป็นภาระความต้านทานโดยมีค่าความต้านทาน 12.414 โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำ มาต่ออนุกรมกับภาระความต้านทาน และเมื่อต้องจรงได้ดังรูปที่ 2 ทำการป้อนแรงดันทางด้าน Primary ของหม้อแปลงเพื่อให้ได้แรงดันที่ด้าน Secondary ของหม้อแปลง 110 Vrms และปรับกระแสทางด้าน Secondary จากนั้นทำการวัดกำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยครั้งแรกทำการวัดกำลังไฟฟ้าในกรณีที่ภาระมีความเป็นเชิงเส้น และครั้งต่อไป ทำการวัดในกรณีที่ภาระมีความไม่เป็นเชิงเส้น พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นของแรงดันและกระแสของทั้งสองกรณี เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ Fast Fourier Transform (FFT) แล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพิพันธ์ (Distortion power) ด้วยสมการของ Budeanu , Czarnecki และ Filipski สุดท้ายทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพิพันธ์ (Distortion power) ด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณของแต่ละสมการ

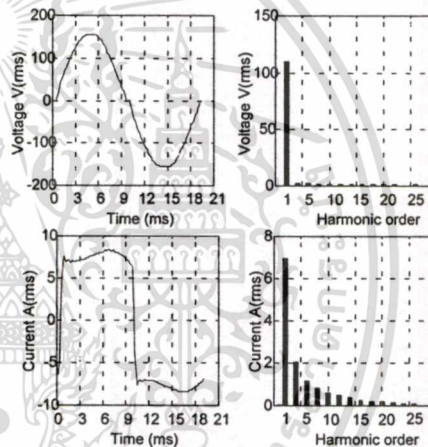
4. ผลการทดสอบ

1. กรณีที่ภาระเป็นเชิงเส้น

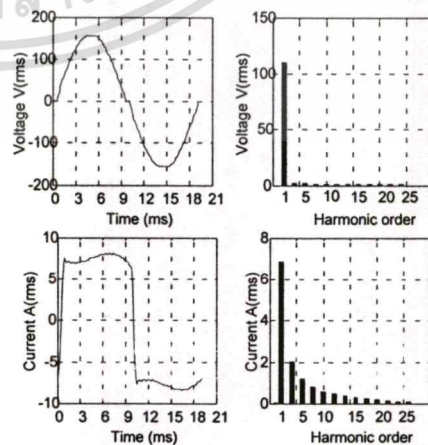


รูปที่ 3 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์

2. กรณีที่ภาระไม่เป็นเชิงเส้น

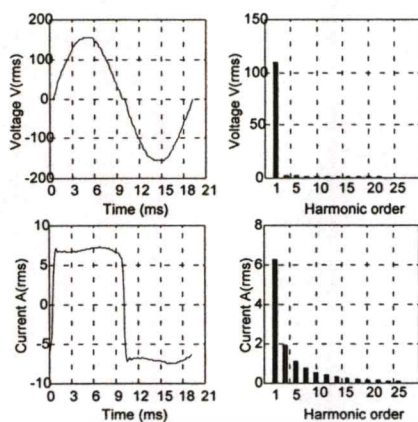


รูปที่ 4 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ตัวเหนี่ยวนำ 89.6 mH

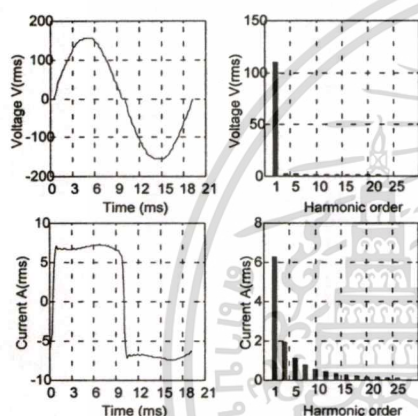


รูปที่ 5 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสที่แต่ละลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ตัวเหนี่ยวนำ 98.8 mH

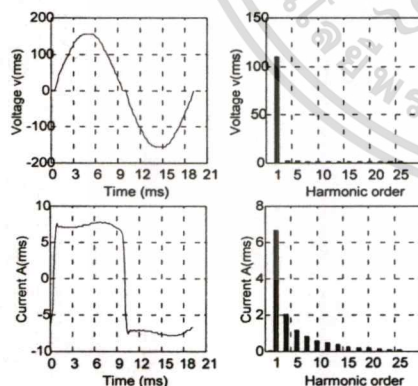
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ระบุชื่อเป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแส
ที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกที่ตัวเหนี่ยวนำ 128.4 mH



รูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแส
ที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกที่ตัวเหนี่ยวนำ 179.3 mH



รูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแส
ที่แต่ละลำดับฮาร์มอนิกที่ตัวเหนี่ยวนำ 0.317 H

5. บทสรุป

จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิ
พื้นที่ได้จากการทดสอบจริงและผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียง
กัน จากการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่การเป็น

เชิงเส้นและกรณีที่การไม่เป็นเชิงเส้น จะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าผิ
พื้นที่มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากในกรณีที่การเป็นเชิงเส้น แรงดัน
และกระแสมีรูปคลื่นเป็นไซน์ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่จะ
เป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น แต่ในกรณีที่การไม่
เป็นเชิงเส้น รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่เป็นไซน์ จะทำให้
เกิดค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่ขึ้น เนื่องจากมีฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น
เนื่องมาจากการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น และจากการเปรียบเทียบ
ผลการคำนวณด้วยสมการที่มีอยู่ของ Budeanu, Czarnecki และ
Filipski ดังตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่าผลจากการคำนวณค่ากำลัง
ไฟฟ้าผิพื้นที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผล
จากการทดสอบจริงค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่ได้ทั้งสองจะมีค่าใกล้
เคียงกัน แสดงว่าสมการสำหรับการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่
ที่มีอยู่ของ Budeanu, Czarnecki และ Filipski ที่นำมาคำนวณค่า
กำลังไฟฟ้าผิพื้นที่มีแนวโน้มความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำ
มาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่ได้ต่อไป แต่ทั้งนี้ยังต้องอาศัยการ
ทดสอบและการคำนวณด้วยสมการการคำนวณเหล่านี้ต่อไป
เพื่อพิจารณาถึงความถูกต้อง ความเหมาะสม ที่จะนำไปเป็นสม
การสำหรับการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่ และจากตารางที่ 2
กำลังไฟฟ้าปรากฏ(S)มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ(S*)ที่วัดโดย
ปกติทั่วไป เนื่องมาจากผลของกำลังไฟฟ้าผิพื้นที่ที่เกิดขึ้น ดั
งนั้นจากหลักการและผลการทดสอบถ้าสามารถวิเคราะห์ค่ากำลังไฟ
ฟ้าผิพื้นที่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
Displacement power factor และ True power factor ได้อย่างถูกต้อง
จะทำให้สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏได้อย่างถูกต้อง
มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การกำหนดขนาดของหม้อแปลง ขนาด
ของสายส่งและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วย

จากหลักการและการทดสอบเบื้องต้นที่นำเสนอในบท
ความนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการการ
ทดสอบกับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่และแรงดันไฟฟ้าสูงด้วยการ
จ่ายโหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้เห็นคุณสมบัติ
ของค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่เนื่องมาจากการที่มีความไม่เป็นเชิง
เส้นได้อย่างชัดเจนขึ้น เพื่อศึกษาคุณสมบัติของค่ากำลังไฟฟ้าผิ
พื้นที่ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งนำไปสู่แนวทางการวิเคราะห์
เพื่อหาวิธีการกำจัดและลดค่ากำลังไฟฟ้าผิพื้นที่เนื่องมาจาก
การที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น อันจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพ
และประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการในกรณีที่มีการเป็นเชิงเส้น

กรณี	กำลังไฟฟ้า	P	Q	S	D	D4	D8	D10	D11	DPF	TPF
sin	การทดสอบ	390	20	390	0	-	-	-	-	1	1
	การคำนวณ	380.093	16.02	380.422	0	4.156	2.939	3.513	3.513	0.99	0.99
	%ความผิดพลาด	2.54	1.93	2.46	0	-	-	-	-	0.9	0.9

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าด้วยผลจากการทดสอบจริงกับผลจากการคำนวณแต่ละสมการในกรณีที่มีการไม่เป็นเชิงเส้น

ลำดับ	กำลังไฟฟ้า	P	Q	S	S*	D	D4	D8	D10	D11	DPF	TPF
L=89.6 mH	การทดสอบ	770	110	840	777.817	317.175	-	-	-	-	0.99	0.92
	การคำนวณ	752.771	95.258	752.771	758.774	315.296	445.967	315.346	315.374	315.374	0.99	0.92
	%ความผิดพลาด	2.238	13.402	10.385	2.448	0.592	29.301	0.016	0.025	0.025	0	0
L=98.8 mH	การทดสอบ	770	110	840	777.817	317.175	-	-	-	-	0.99	0.91
	การคำนวณ	750.128	88.615	820.068	755.344	319.322	451.769	319.449	319.479	319.479	0.99	0.915
	%ความผิดพลาด	2.581	19.441	2.373	2.889	0.672	29.793	0.712	0.721	0.721	0	0.546
L=128.4 mH	การทดสอบ	750	90	820	755.381	319.061	-	-	-	-	0.99	0.91
	การคำนวณ	734.946	76.779	804.765	738.945	318.759	450.759	318.735	318.766	318.766	0.995	0.913
	%ความผิดพลาด	2.007	14.69	1.856	2.176	0.095	29.217	0.102	0.093	0.093	0.503	0.329
L=179.3 mH	การทดสอบ	740	80	810	744.312	319.531	-	-	-	-	0.99	0.91
	การคำนวณ	722.103	69.391	791.727	725.429	317.150	448.477	317.121	317.150	317.150	0.995	0.912
	%ความผิดพลาด	2.419	13.261	2.256	2.537	0.745	28.752	0.754	0.745	0.745	0.503	0.219
L=0.317 H	การทดสอบ	700	80	770	704.557	310.645	-	-	-	-	0.99	0.91
	การคำนวณ	683.486	65.046	748.999	686.574	299.360	423.464	299.434	299.453	299.453	0.996	0.913
	%ความผิดพลาด	2.359	18.693	2.727	2.552	3.633	26.642	3.609	3.603	3.603	0.602	0.329

หมายเหตุ S* คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดทั่วๆ ไป ไม่พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าผิผิว

D1 คือ ผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 1

D4 คือ ผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 4

D8 คือ ผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 8

D10 คือ ผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 10

D11 คือ ผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 11

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมี ดังนี้

1. True RMS Multimeter Fluke 87
2. Power Harmonics Analyzer Fluke 41B

6. เอกสารอ้างอิง

[1]. M.E. El-Hawary, "Commentary on Various Formulations of Distortion Power D," IEEE Power Engineering Review. , pp. 50-52, May 1999.

[2]. L.S Czamecki, "Distortion power in systems with nonsinusoidal voltage," IEE Proceedings B, Vol. 139, No.3, May 1992.

[3]. P. Filipski, "The Measurement of Distortion Current and Distortion Power.," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement., Vol. IM-33, No.1, March 1984.

[4]. R. C. Dugan, M. F. McGranaghan and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality," McGraw-Hill. New York, 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวประภาพรณ เคลือบวัฒนรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2519 ที่จังหวัด นครปฐม สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย เอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2541

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาที่ 2543 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า(ไฟฟ้ากำลัง) ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผลงานวิจัยทางวิชาการตีพิมพ์ทางด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท คือ เรื่อง “การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจาก ภาระไม่เป็นเชิงเส้น.” วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2545 หน้า 1-6.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้