



การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกสำหรับตัวกรองฮาร์โมนิกแบบแอกทีฟชนิดปรับ
ค่าได้เอง โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบ RLS

Harmonic Current Detection of Adaptive Active Harmonic Filter
Using RLS Algorithm

ชาญชัย พฤกษ์พาดิ
CHANCHAI PRUGPADEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2561



การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟชนิดปรับ
ค่าได้เอง โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบ RLS
Harmonic Current Detection of Adaptive Active Harmonic Filter
Using RLS Algorithm

ชาญชัย พฤกษ์พาดิ
CHANCHAI PRUGPADEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟชนิด
ปรับค่าได้เอง โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบ RLS

ชื่อ นามสกุล ชาญชัย พฤษภาติ

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ)


..... กรรมการและเลขานุการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(อาจารย์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

วันที่ 3 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561

ชื่อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้ เองโดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบ RLS
ชื่อ สกุล	ชาญชัย พุกกะพาดิ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์ วิธีที่นำเสนอจะประยุกต์มาจากทฤษฎีของตัวกรองเพื่อตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง ซึ่งแต่เดิมทฤษฎีดังกล่าวใช้เพื่อการประมวลผลสัญญาณเสียง แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำมาประยุกต์ใช้กับตัวจับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

หลักการและการสร้างตัวจับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธีลีตส์มินสแควร์และขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์จะถูกนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองขั้นตอนวิธี จากนั้นทำการจำลองขั้นตอนวิธีทั้งสองดังกล่าวด้วยโปรแกรมแมตแลบซิมูลิคเพื่อจำลองการทำงานสามกรณีศึกษา ซึ่งทั้งสามกรณีศึกษาที่จำลองการทำงานจะเป็นกรณีที่ได้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลจำลองการทำงานพิสูจน์ได้ว่าตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธีลีตส์มินสแควร์และขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์สามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้จริง แต่ขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าและมีความผิดพลาดน้อยกว่าขั้นตอนวิธีลีตส์มินสแควร์ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์ดังที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหมาะสมกับตัวกรองแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : ฮาร์มอนิก, ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ, ขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีตส์แควร์

Thesis title	Harmonic Current Detection of Adaptive Active Filter Using RLS Algorithm
Author	Chanchai Prugpadee
Degree	Master of Engineering
Major program	Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

This thesis proposes a method for detecting harmonics current in the adaptive active harmonic filter with Recursive Least Square (RLS) algorithm. The proposed method is based on the theory of noise cancellation adaptive filter. Originally, the theory was used for audio signal processing, but this thesis is applied to the harmonic current detector of an active harmonic filter.

The principle and construction of the harmonic current detector in the adaptive active harmonic current filter with Least Mean Square (LMS) algorithm and Recursive Least Square (RLS) algorithm are presented to compare the efficiency of both algorithms. Then simulate these two algorithms with Matlab-Simulink program to simulate the three case studies. All three case studies that simulate are generally available in industrial plants.

The simulation results show that the harmonic current detector in the adaptive active harmonic current filter with the LMS algorithm and the RLS algorithm can detect the harmonic currents in the power systems. However, the RLS algorithm is more efficient and has less error value than the LMS algorithm. Therefore, it is confirmed that the RLS algorithm proposed in this thesis is appropriate to use with the adaptive active harmonic current filter to really work in the industry.

Keywords: Harmonic, Active Harmonic Filter, RLS algorithm

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัย มาโดยตลอด ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ที่ได้รับจากอาจารย์ทั้งสองท่าน และ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละ เวลา มา พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆและเจ้าหน้าที่ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของ ข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มี พระคุณทุกท่าน

ชาญชัย พฤกษ์พาดิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญภาพ	(ฉ)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ	6
2.4 แนวคิดของตัวจับสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง	8
2.5 การประยุกต์ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้เองเพื่อตรวจจับสัญญาณฮาร์มอนิก	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	13
3.1 เครื่องมือที่ใช้	13
3.2 วิธีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และ RLS	13
3.3 วิธีการทดลองการจับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล	22
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ขั้นตอนวิธี LMS และ RLS	22
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบ ปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS บนวงจรจำลองระบบ ไฟฟ้า	23
4.3 การอภิปรายผล	36
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	37
5.1 สรุปผล	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	40
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	54

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟในระบบไฟฟ้า	2
2	การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟในระบบไฟฟ้า	3
3	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ	7
4	บล็อกไดอะแกรมทฤษฎีการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้	9
5	บล็อกไดอะแกรมการประยุกต์ใช้การกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้เอง ในการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง	12
6	วงจรสัญญาณอินพุต	14
7	สัญญาณอินพุต	14
8	Source Block ของพารามิเตอร์ ซายน์เวฟในโปรแกรม MATLAB Simulink ของความถี่หลักมูล (บน) ของความถี่ฮาร์มอนิกที่สาม (ล่าง)	15
9	สัญญาณอ้างอิง	16
10	บล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี LMS	16
11	บล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี RLS	17
12	วงจรเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี LMS และ RMS	18
13	วงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส กรณีศึกษาที่ 1	19
14	วงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส กรณีศึกษาที่ 2	20
15	วงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส กรณีศึกษาที่ 3	21
16	บล็อกไดอะแกรมทฤษฎีการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้	22
17	ผลจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS (บน) และขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)	23
18	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 กระแสโหลรวมในระบบไฟฟ้าต่อเฟส	24
19	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
20	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)	26
21	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 กระแสโพลตรวมในระบบไฟฟ้าต่อเฟส	27
22	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)	28
23	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)	29
24	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณกระแสรวมทั้งสามเฟส	31
25	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ทั้งสามเฟส โดยขั้นตอนวิธี LMS	32
26	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ทั้งสามเฟส โดยขั้นตอนวิธี RLS	33
27	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 ประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก โดยขั้นตอนวิธี LMS	34
28	ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 ประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก โดยขั้นตอนวิธี RLS	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรเรียงกระแส และวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อกระแสและแรงดันทั้งในเชิงขนาด (Amplitude) และมุม (Phase Angle) คือจะทำให้รูปสัญญาณมีขนาดและรูปร่างเบี่ยงเบน (Distortion) ไปจากสภาพตอนที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)

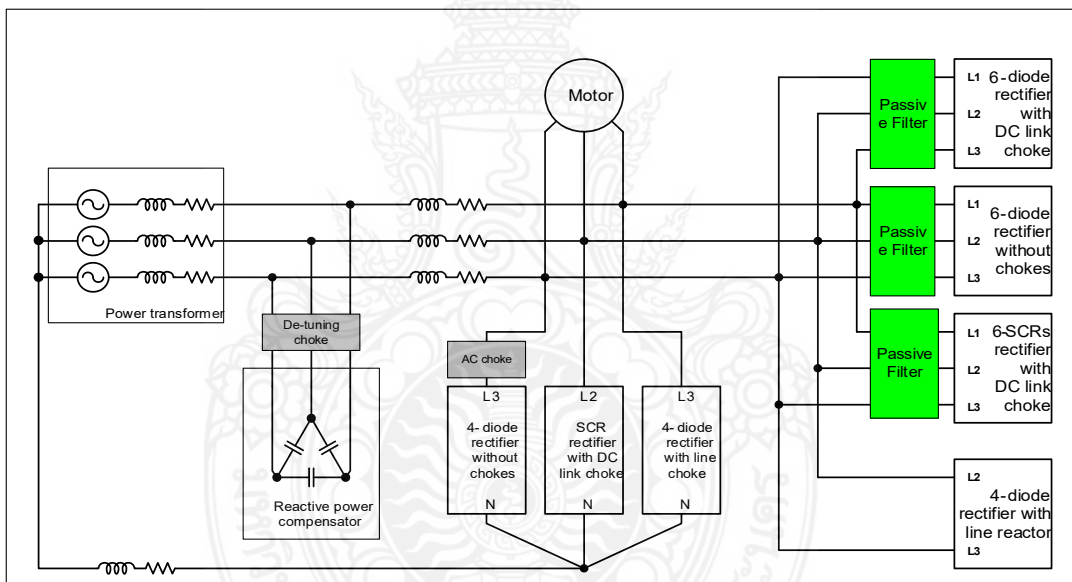
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงได้ตั้งกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากผู้ใช้ไฟ (สถานประกอบการประเภทรถธุรกิจและอุตสาหกรรม) โดยกำหนดค่าขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันสำหรับผู้บริโภคไฟรายใดๆที่จุดต่อร่วม ทั้งยังมีการบังคับใช้สำหรับผู้ขอไฟรายใหม่ให้แสดงรายการใช้ไฟฟ้าและคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก เพื่อให้การไฟฟ้าตรวจสอบ หากเกินขีดจำกัดที่กำหนดจะไม่จ่ายไฟให้ ส่วนผู้ใช้ไฟรายเดิมหากการไฟฟ้าตรวจสอบแล้วพบว่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัด ผู้ใช้ไฟต้องทำการแก้ไขเพื่อลดผลกระทบไม่ให้เกินขีดจำกัดที่กำหนด ไม่เช่นนั้นการไฟฟ้าจะเข้าไปดำเนินการแก้ไขให้ และคิดค่าใช้จ่ายกับผู้บริโภคไฟหรือจัดการจ่ายไฟฟ้า แม้ว่าปัจจุบันข้อกำหนดนี้จะมีความเข้มงวดกับผู้ยื่นขอใช้ไฟรายใหม่ แต่ในความเป็นจริงแล้วหากมีการตรวจสอบกันอย่างจริงจังจะพบผู้ใช้ไฟส่วนมากล้วนสร้างปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัด ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟได้ก็จะเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผู้บริโภคไฟเองและยังเป็นการปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ของผู้ให้บริการไฟฟ้าด้วย

การเบี่ยงเบนของกระแสฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่เราพิจารณาในเรื่องประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาจจะเกิดขึ้นได้โดยเหตุการณ์ธรรมชาติอย่างเช่น ฟิวส์ หรืออาจเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ขนาดใหญ่ (nonlinear load) ในระบบไฟฟ้าเอง ตัวอย่างเช่น ไดรฟ์ไฟฟ้ากำลังสูงๆ (high power electric drive) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกพัฒนามาใช้เพื่อการประหยัดพลังงาน แต่ในทางกลับกันก็สร้างกระแสฮาร์มอนิกให้ระบบไฟฟ้า สำหรับฟิวส์

เราสามารถใช้อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (surge arrestor) ในการป้องกันระบบไฟฟ้า และกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากฟ้าผ่านี้จะเกิดขึ้นเพียงระยะเวลาสั้น แต่ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะอยู่ในระบบไฟฟ้าที่เราใช้โหลดนั้นๆอยู่ กระแสฮาร์มอนิกเป็นสาเหตุให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดปกติ ทั้งยังอาจจะทำลายอุปกรณ์ไฟฟ้าตัวอื่นๆที่อยู่ในระบบได้

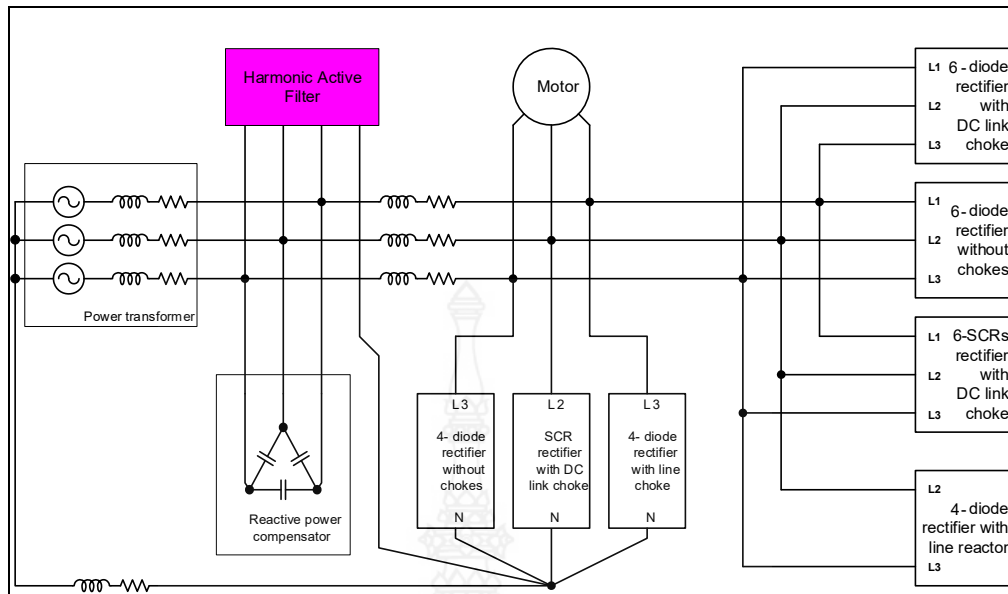
การแก้ไขหรือปรับปรุงฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำได้โดยการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าไปที่ระบบ ซึ่งตัวกรองแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆคือ ตัวกรองแบบพาสซีฟ และตัวกรองแบบแอกทีฟ

ตัวกรองแบบพาสซีฟมีข้อเสียคือต้องทราบอันดับที่แน่นอนของฮาร์มอนิกแล้วจึงออกแบบตัวกรองพาสซีฟสำหรับฮาร์มอนิกอันดับนั้นๆซึ่งนิยมใช้ปรับปรุงที่สาขาย่อยของระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยต่ออนุกรมกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟในระบบไฟฟ้า

ตัวกรองแบบแอกทีฟสามารถใช้ปรับปรุงได้ทั้งที่สาขาย่อย หรือที่ระบบไฟฟ้าทั้งระบบโดยการต่อขนานดังแสดงในรูปที่ 2 ตัวกรองแบบแอกทีฟยังสามารถปรับตัวได้เองเพื่อชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกช่วงเวลา จากข้อดีดังกล่าวทำให้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟมีความน่าสนใจและนำมาวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2 การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟในระบบไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าขั้นตอนวิธี Least Mean Square (LMS) และขั้นตอนวิธี Recursive Least Square (RLS)
- 1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าการสร้างแบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบ ขั้นตอนวิธี Least Mean Square (LMS) และขั้นตอนวิธี Recursive Least Square (RLS) บนโปรแกรม MATLAB Simulink
- 1.2.5 เพื่อปรับปรุงพัฒนาทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง มาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองในระบบไฟฟ้า
- 1.2.6 เพื่อศึกษาค้นคว้าการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในโรงงานในสถานะโหลด R-L-C ค่าต่างๆ ด้วยตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองที่พัฒนาขึ้น บนโปรแกรม MATLAB Simulink

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 การศึกษาทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง บนพื้นฐานขั้นตอนวิธีที่นิยมคือ LMS และ RLS
- 1.3.2 การจำลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี LMS และ RLS บนโปรแกรม MATLAB Simulink

1.3.3 การจำลองระบบไฟฟ้าในสภาวะโหลต R-L-C ค่าต่างๆ และตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง บนโปรแกรม MATLAB Simulink

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ทดสอบขั้นตอนวิธี LMS และ RLS ด้วย MATLAB Simulink เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสองชนิด

1.4.2 ทดสอบจำลองตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าในโหลตต่างๆกัน ด้วยตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นบน MATLAB Simulink

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าด้วยตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ

1.5.2 พัฒนาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองสำหรับตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ จากทฤษฎีการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง

1.5.3 พัฒนาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองแบบแอดทีฟชนิดปรับค่าได้เอง โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบ RLS ซึ่งมีความเร็วในการหาจุดบรรจบเร็วขึ้นกว่าการใช้ขั้นตอนวิธีแบบ LMS ของงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากวิทยานิพนธ์ "Adaptive Power Line Harmonic Detection For Active Filter Applications," โดย Weidong Liu, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada, 2004. ได้พัฒนา ตัวจับสัญญาณฮาร์มอนิกสำหรับชุดควบคุมของ ตัวกรองสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ โดยใช้ขั้นตอนวิธี LMS (Least Mean Square) สำหรับตัวกรองปรับค่าได้เอง (Adaptive Filter) โดยพัฒนาจาก ทฤษฎีตัวกรองสัญญาณรบกวนปรับค่าได้เอง สำหรับการกรองสัญญาณหรือตัดสัญญาณรบกวนของไมโครโฟน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยเมื่อโหลดหรือกระแสฮาร์มอนิกเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวกรองนี้ก็ยังสามารถตรวจจับตามการเปลี่ยนแปลงได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังใช้ MATLAB ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการใช้ขั้นตอนวิธี LMS ซึ่งเป็นทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนเสียงแบบปรับค่าได้เอง มาใช้ในการตรวจจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองในระบบไฟฟ้าได้จริง

2.2 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อได้ศึกษาวิทยานิพนธ์ "Adaptive Power Line Harmonic Detection For Active Filter Applications," โดย Weidong Liu, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada, 2004. และ ศึกษาทฤษฎีการกรองสัญญาณเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้เอง รวมถึงบทความทางวิชาการเกี่ยวกับทฤษฎีดังกล่าว พบว่ายังมีขั้นตอนวิธีอื่นอีกที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ขั้นตอนวิธี LMS ในการกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง นั่นคือขั้นตอนวิธี RLS (Recursive Least Mean Square) ซึ่งขั้นตอนวิธี RLS นี้ใช้เวลาในการถึงจุดสิ้นสุด เร็วกว่า และไม่มีผลกระทบต่อสัญญาณอินพุตเท่าขั้นตอนวิธี LMS แต่ข้อเสียคือจะใช้กระบวนการคำนวณซับซ้อนกว่าต้องใช้โปรเซสเซอร์ที่มีสถาปัตยกรรมที่สูง ซึ่งในปัจจุบันโปรเซสเซอร์ที่มีสถาปัตยกรรมสูง มีแพร่หลายและราคาถูกลงกว่าแต่ก่อน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีแนวคิดจะพัฒนาการตรวจจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง โดยใช้ทฤษฎีการกรองสัญญาณเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้เอง โดยใช้ขั้นตอนวิธี RLS ซึ่งจะทำการทดลองเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธี LMS เดิม โดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อประเมินประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของการจับสัญญาณฮาร์มอนิก

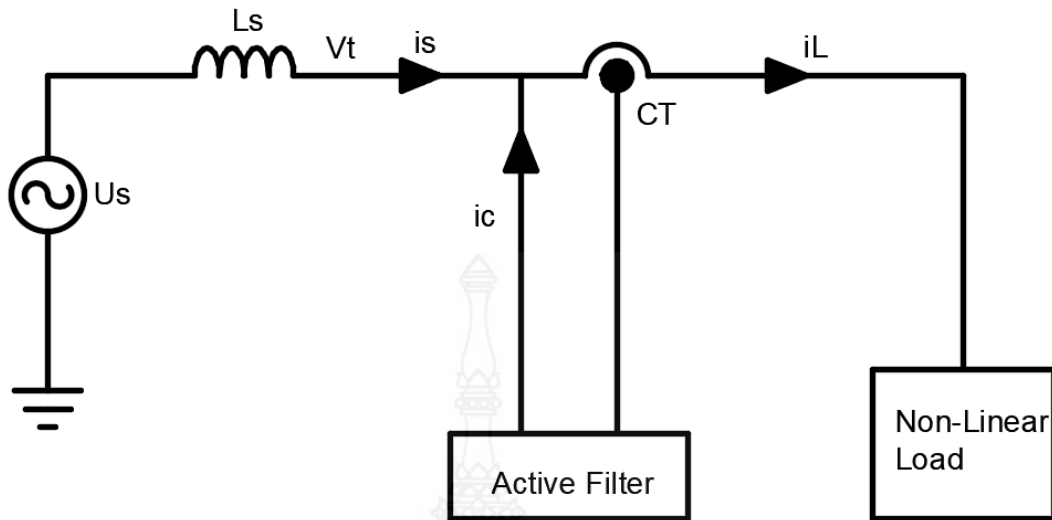
2.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ

ในบทนี้นำเสนอหลักการการทำงานพื้นฐาน และกระบวนการสำหรับการควบคุมกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ รวมถึงระบบควบคุมของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ และช่วงท้ายจะนำเสนอวิธีการการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้ ซึ่งพัฒนามาจาก ทฤษฎีกระบวนการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้ ทฤษฎีกระบวนการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้นี้แต่เดิมได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับ ตัวประมวลผลสัญญาณรบกวน (noise signal processor)

2.3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ

หลักการการทำงานพื้นฐานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟคือ ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า จากนั้นจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดเท่ากับที่ตรวจจับได้แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเวลานั้น โดยส่วนประกอบหลักของตัวกรองแบบแอดทีฟมีสองส่วนคือ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม [1] วงจรกำลังแบบง่ายๆคือ อินเวอร์เตอร์สำหรับ 3 เฟสต่อแบบบริดจ์กับ สวิตช์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ตัวสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 4 ตัวสำหรับระบบไฟ 1 เฟส ส่วนวงจรควบคุม ประกอบด้วย ส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ส่วนประมวลผลการกรอง และส่วนส่งสัญญาณให้อินเวอร์เตอร์ เมื่อเริ่มต้นวงจรควบคุมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟจะจับสัญญาณรูปคลื่นของแรงดัน (voltage) และกระแส (current) ของระบบไฟฟ้า ต่อจากนั้นจะผ่านกระบวนการประมวลผลเพื่อหารูปคลื่นกระแสที่จะมาทดแทนเพื่อที่จะลบล้างกระแสฮาร์มอนิกในระบบ จากนั้นวงจรควบคุมนี้จะสร้างสัญญาณสวิตชิงส่งไปยัง อินเวอร์เตอร์ในวงจรกำลัง สุดท้ายอินเวอร์เตอร์จะจ่ายกระแสทดแทนเพื่อลบล้างกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิก แบบแอดทีฟได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยแรงดันแหล่งจ่าย U_s เป็นแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave Form) แต่รูปคลื่นแรงดัน V_t เกิดการเบี่ยงเบนอันเนื่องจากโหลดที่ต่อเป็นโหลดที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ

โดยกระแสโหลด i_L เกิดจากกระแสโหลดที่มีความถี่หลักมูล i_l รวมกับกระแสโหลดที่มีความถี่ฮาร์มอนิก i_h และสามารถเขียนในรูปแบบของฟูเรียทรานส์เฟอ์เมชัน (fourier transformation) ดังนี้

$$i_L(t) = I_l \sin(\omega + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega + \varphi_n) \quad (2.3.1.1)$$

$$i_L(t) = i_l(t) + i_h(t) \quad (2.3.1.2)$$

เมื่อให้ i_s เป็นกระแสแอกทีฟที่อยู่ในเฟสเดียวกับแรงดัน U_s และ i_q เป็นกระแสรีแอกทีฟซึ่งมีมุมต่างจากกระแส i_s 90 องศา ดังนั้นกระแสโหลดที่มีความถี่หลักมูลจะมีค่าดังนี้

$$i_l(t) = i_s(t) + i_q(t) \quad (2.3.1.3)$$

แทนค่าจาก (2.3.1.3) ลงใน (2.3.1.2) จะได้

$$i_L(t) = i_s(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (2.3.1.4)$$

$$i_L(t) = i_s(t) + i_{comp}(t) \quad (2.3.1.5)$$

เมื่อกระแส i_{comp} คือกระแสที่ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟต้องจ่ายออกมาเพื่อปรับปรุงฮาร์มอนิก

ตามที่แสดงในรูปที่ 3 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟวัดกระแส i_L ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยผ่านตัวหม้อแปลงกระแส จากนั้นตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟประมวลผลกระแสนี้เป็นสองส่วนคือกระแสที่ต้องการชดเชย i_{comp} (ซึ่งกระแสที่ถูกชดเชยนี้ไม่ใช่เฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอย่างเดียวทั้งยังรวมถึงมุนของกระแสที่ล่าหน้าหรือล่าหลังแรงดันด้วย) และกระแสจริงที่ไม่ได้ถูกรบกวน i_s ที่ถูกจ่ายจริงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

2.3.2 วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกแบบดั้งเดิมของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบ แอคทีฟ

การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญมากของวงจรควบคุมของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอคทีฟ ถ้าการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกไม่ถูกต้อง ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอคทีฟ ก็ไม่สามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอและพัฒนาวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

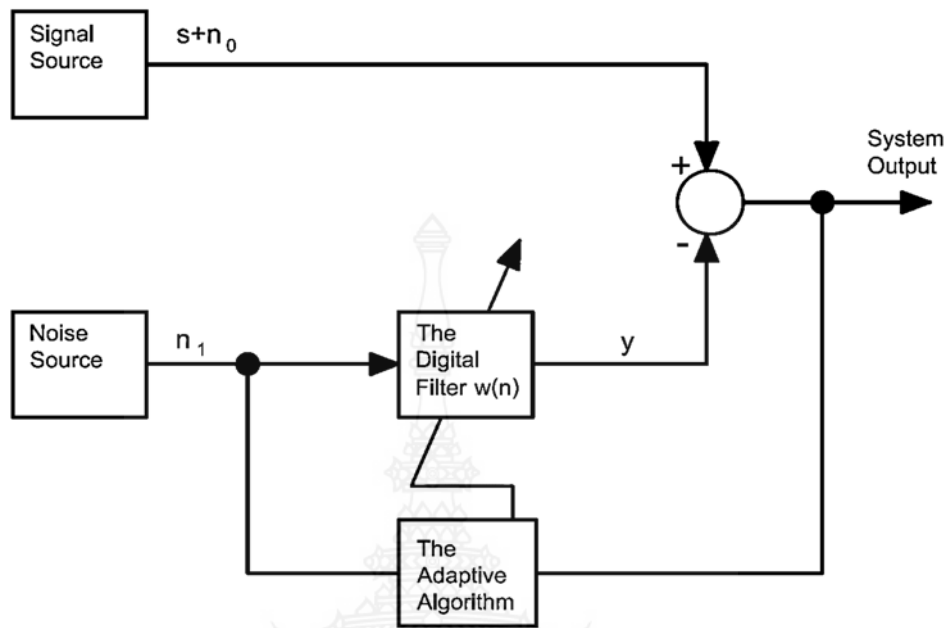
วิธีการของวงจรควบคุมโดยทั่วไปของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอคทีฟ มีสองกลุ่มคือ วิธีการชดเชยด้วยความถี่โดเมน (frequency-domain compensating methods) และวิธีการชดเชยด้วยเวลาโดเมน (time-domain compensating methods) [2]

วิธีการชดเชยด้วยความถี่โดเมน คือการใช้ฟูเรียทรานฟอร์มเมชัน บนกระแสโวลตรวมที่วัดได้ในระบบไฟฟ้า เพื่อแยกสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกออกจากสัญญาณกระแสใช้งานจริง และประมวลผลสัญญาณกระแสชดเชย วิธีการนี้ใช้ได้กับกระแสฮาร์โมนิกที่ไม่ต่อเนื่องมาเป็นช่วงๆ แต่ในความเป็นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม กระแสฮาร์โมนิกเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีกระแสฮาร์โมนิกตลอดเวลา ข้อจำกัดอีกอย่างคือวิธีการชดเชยด้วยความถี่โดเมน ใช้ฟูเรียทรานฟอร์มเมชัน ต้องการเวลาในการประมวลผลมากทำให้เกิดการล่าช้า ไม่สามารถควบคุมแบบเวลาจริงได้ (real time control)

วิธีการชดเชยด้วยเวลาโดเมน ขึ้นกับการสุ่มวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบชั่วขณะเวลาหนึ่งแล้วประมวลผลสัญญาณกระแสชดเชย โดยหลักการแล้ว วิธีการนี้สามารถชดเชยได้ทั้งกระแสฮาร์โมนิก ชั่วขณะหรือกระแสฮาร์โมนิกถาวรได้ แต่มีข้อจำกัดที่ต้องออกแบบเฉพาะเพื่อตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกแต่ละชนิดไม่สามารถตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกได้ครอบคลุมทุกความถี่ในหนึ่งวงจร

2.4 แนวคิดของตัวจับสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง

จากหัวข้อที่แล้วการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกแบบดั้งเดิมทั้งวิธีการชดเชยด้วยความถี่โดเมน และวิธีการชดเชยด้วยเวลาโดเมนมีข้อจำกัด ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวคิด วิธีการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้ ซึ่งไม่ว่ากระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร วิธีการนี้ยังสามารถตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนามาจากทฤษฎี ของการจับสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้ ซึ่งแต่เดิมทฤษฎีนี้ได้ถูกนำเสนอเป็นวิธีการประมวลผลสำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนให้ออกจากสัญญาณไม่ชัดเจนที่ได้รับ ให้เหลือแต่สัญญาณที่ต้องการ ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 4 [2]



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมทฤษฎีการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้

เซ็นเซอร์หลักจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ s และสัญญาณรบกวน n_0 รวมกันเป็นสัญญาณ $s+n_0$ ซึ่งใช้เป็นสัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เอง โดยเซ็นเซอร์อีกตัวจะรับสัญญาณรบกวน n_1 ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณ s แต่สัมพันธ์กับสัญญาณ n_0 โดย สัญญาณ n_1 นี้เรียกว่าสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณทดแทน y และสัญญาณ y นี้ถูกจำลองให้ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และสุดท้ายสัญญาณเอาต์พุตของระบบก็คือการนำเอาสัญญาณ $s+n_0$ มาหักล้างกับสัญญาณ y ซึ่งจะได้เป็นสัญญาณ $s+n_0-y$

ขั้นตอนวิธีปรับค่าได้เอง (The Adaptive Algorithm) เกิดจากการรับสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอาพุตมาประมวลผลปรับค่า $w(n)$ เพื่อให้สัญญาณ y ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และทำเช่นนี้วนไปเรื่อยๆจนกระทั่งสัญญาณ เข้าใกล้สัญญาณ n_0 มากที่สุด

กระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เองจะประมวลสัญญาณอินพุตอ้างอิงและปรับสัญญาณเอาพุตผ่านขั้นตอนวิธี Least-square เช่น ขั้นตอนวิธี Least-Mean-Square algorithm) เพื่อให้สัญญาณผิดพลาด (error signal) ตอบสนองกับสัญญาณเอาพุต ซึ่งถ้าเลือกใช้ขั้นตอนวิธีที่ถูกต้อง กระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง สามารถปรับสัญญาณเอาพุตอย่างต่อเนื่องทำให้สัญญาณผิดพลาดน้อยลงเรื่อยๆ

ให้ s, n_0, n_1 และ y เป็นค่าเชิงสถิติ และให้ s ไม่มีความสัมพันธ์กับ n_0 และ n_1 แต่ n_0 มีความสัมพันธ์กับ n_1 สัญญาณเอาพุตจะด้ตั้งสมการข้างล่าง

$$\epsilon = s + n_0 - y \quad (2.4.1)$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของ (2.4.1) จะได้

$$\epsilon^2 = s^2 + (\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})^2 + 2\mathbf{s}(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y}) \quad (2.4.2)$$

ให้ค่าคาดหวังทั้งสองข้าง (expectations) ของ (2.4.2) และเนื่องจาก s ไม่มีความสัมพันธ์กับ \mathbf{n}_0 และ \mathbf{y} จะได้

$$\begin{aligned} E[\epsilon^2] &= E[s^2] + E[(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})^2] + 2E[\mathbf{s}(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})] \\ &= E[s^2] + E[(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})^2] \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

กระบวนการนี้เราต้องการให้อาพุดมีค่าน้อยที่สุด (minimum) ดังนั้น

$$E_{min}[\epsilon^2] = E[s^2] + E_{min}[(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})^2] \quad (2.4.4)$$

เมื่อกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้ประมวลผลและทำงานที่สุทธค่า $E[\epsilon^2]$ และ $E[(\mathbf{n}_0 - \mathbf{y})^2]$ จะเหลือน้อยมาก ค่าอาพุด \mathbf{y} ที่ได้คือค่าประมาณของ Least Square ที่ดีที่สุดสำหรับอินพุต \mathbf{n}_0

ขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้มีอยู่หลายขั้นตอนวิธีที่นิยมกันมีขั้นตอนวิธี Least Mean Square (LMS) และ Recursive Least Square (RLS)

2.4.1 ขั้นตอนวิธี Least Mean Square (LMS)

ขั้นตอนวิธี LMS เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในกระบวนการกรองสัญญาณแบบปรับค่าเองได้ เป็นขั้นตอนวิธีที่ปรับเปลี่ยนได้ตามสัดส่วนที่เป็นเชิงเส้นเพื่อลดระดับของค่าผิดพลาด จะอัปเดต weight เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากเกณฑ์ least mean square เนื่องจาก LMS เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้งานได้ง่ายและมีการคำนวณน้อยลง ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$\mathbf{y}(n) = \boldsymbol{\omega}^H(n) \cdot \mathbf{x}(n) \quad (2.4.1.1)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n) \quad (2.4.1.2)$$

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n) + \mu \cdot \mathbf{x}(n) \cdot \mathbf{e}(n) \quad (2.4.1.3)$$

เมื่อ μ คือค่าคงที่ step size ($0 < \mu < 2$), $\mathbf{x}(n)$ คือสัญญาณอ้างอิง n และ $\mathbf{e}(n)$ คือสัญญาณผิดพลาด $s+n_0-y$

2.4.2 ขั้นตอนวิธี Recursive Least Mean Square (RLS)

ขั้นตอนวิธี RLS เป็นขั้นตอนวิธีที่ซับซ้อนกว่าขั้นตอนวิธี LMS แต่ข้อดีคือมีความเร็วในการปรับตัวจนถึงจุดบรรจบเร็วกว่าและมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตน้อยกว่าขั้นตอนวิธี LMS [3] ค่าประมวลผล $w(n)$ ของขั้นตอนวิธี RLS หาได้จาก

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n) + \boldsymbol{\delta}(n) \cdot \mathbf{e}(n) \quad (2.4.1.4)$$

2.4.3 ทฤษฎีเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี LMS และ RLS

ขั้นตอนวิธี RLS เป็นขั้นตอนวิธีที่ปรับค่าได้เองเข้าสู่ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ได้เร็วกว่าขั้นตอนวิธี LMS หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ขั้นตอนวิธี RLS ใช้เวลาน้อยกว่าในการปรับค่าได้เองเข้าสู่ผลลัพธ์ที่ต้องการ และยังมีผลกระทบกับสัญญาณอินพุตน้อยกว่าขั้นตอนวิธี LMS ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอขั้นตอนวิธี RMS ในการตรวจจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง

2.5 การประยุกต์ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้เองเพื่อตรวจจับสัญญาณฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเป็นสิ่งที่ยาก เนื่องจากปกติต้องรู้ขนาดและมุมของกระแสฮาร์มอนิกที่แท้จริง แต่อาจใช้วิธีหากระแสฮาร์มอนิกทางอ้อมหรือจากการวิเคราะห์ นั่นคือทำการวัดกระแสปกติ (กระแสรวม) ที่มีความถี่หลักมูลและกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ จากนั้นทำการหักล้างกระแสความถี่หลักมูลออกไป ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือกระแสฮาร์มอนิกนั่นเอง [1] ซึ่งหลักการนี้จะเป็นหลักการเดียวกับทฤษฎีการใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง

$i_L(t)$ เป็นกระแสไฟฟ้ารวมในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นประกอบอยู่ด้วย กระแสไฟฟ้า $i_L(t)$ สามารถเขียนในรูปประกอบชายนีโดยใช้ Fourier Transformation ได้ดังนี้

$$i_L(t) = I_L \cdot \text{sine}(\omega + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cdot \text{sine}(n\omega + \varphi_n) \quad (2.5.1)$$

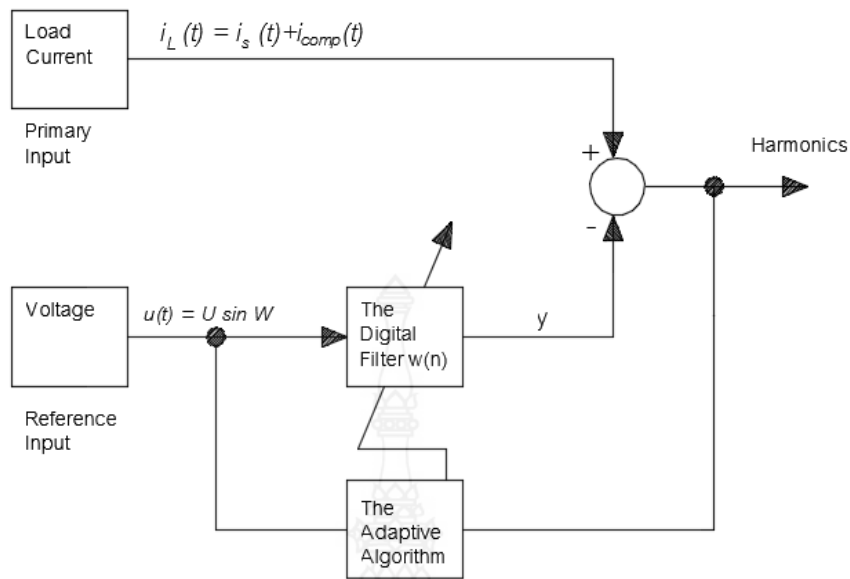
$$i_L(t) = i_l(t) + i_h(t) \quad (2.5.2)$$

เมื่อ i_l เป็นกระแสไฟฟ้าความถี่พื้นฐาน และ i_h เป็นผลรวมกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า $i_l(t)$ ยังสามารถแยกออกเป็นกระแสไฟฟ้าจริง (active current) i_s ซึ่งอยู่ในเฟสเดียวกับแรงดัน U_s และกระแสไฟฟ้าเสมือนจริง (reactive current) i_q ซึ่งมีมุมมองทางไฟฟ้าต่างกับ i_s 90 องศา ดังนั้นสมการ 4.2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_L(t) = i_s(t) + [i_q(t) + i_h(t)] \quad (2.5.3)$$

$$i_L(t) = i_s(t) + i_{comp}(t) \quad (2.5.4)$$

จากสมการ 2.5.4 กระแสไฟฟ้า i_{comp} เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่จะต้องตรวจจับได้ในระบบเขียนในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม ของตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้เองดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการประยุกต์ใช้การกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้เอง ในการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง

สัญญาณอินพุตคือสัญญาณกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าซึ่งได้มาจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า $i_L(t)$ ส่วนสัญญาณอ้างอิงเราสามารถใช้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านทางหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า $u(t)$ ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้านี้จะมีมเฟสทางไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าจริง $i_s(t)$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ตัวกรองสัญญาณเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้เอง ที่สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่งกับสัญญาณรบกวนที่เราจะขจัดจากระบบ สัญญาณที่ต้องการขจัดของเราคือสัญญาณกระแสไฟฟ้าจริง ตัวปรับกำลัง weight จะปรับค่าเองทำให้ในที่สุดสัญญาณที่เหลือคือสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกรวมกับสัญญาณกระแสเสมือนจริงที่เราต้องการตรวจจับและเอาออกจากระบบต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 เครื่องมือที่ใช้

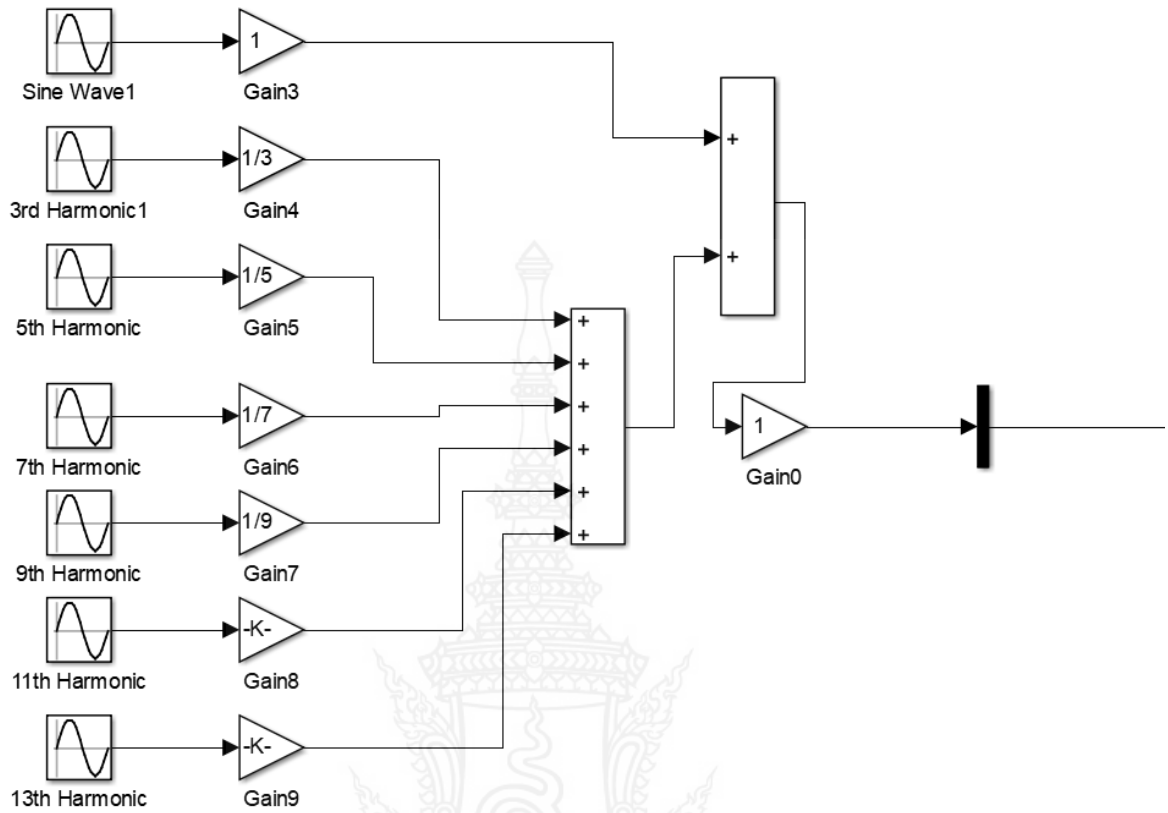
วิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดลองอยู่ สองการทดลอง การทดลองแรกจะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และ RMS โดยจะจำลองวงจร บนโปรแกรม MATLAB Simulink และการทดลองที่สองจะเป็นการทดลองประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสองในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าจำลอง ซึ่งมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกันสามชนิดซึ่งโหลดที่จำลองทั้งสามชนิดนี้จะครอบคลุมโหลดที่มีในอุตสาหกรรมได้ทั้งหมดเช่นกันการทดลองในการทดลองที่สองนี้ก็ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการจำลองระบบไฟฟ้า

3.2 วิธีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และ RLS

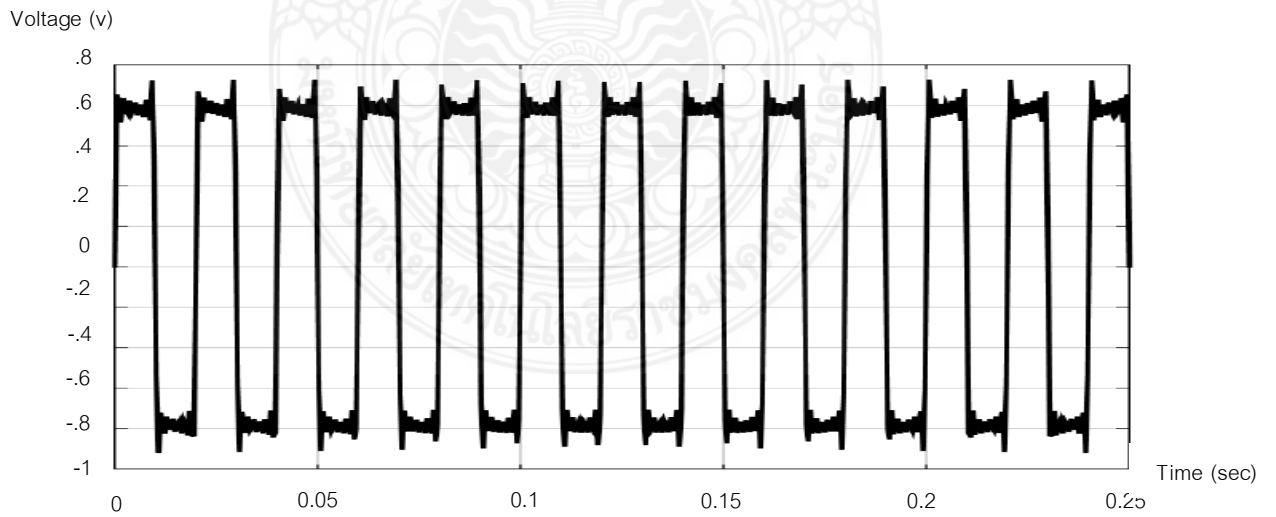
วงจรที่สร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และ RLS มีรายละเอียดแบ่งเป็นข้อๆได้ดังนี้

3.2.1 สัญญาณอินพุต

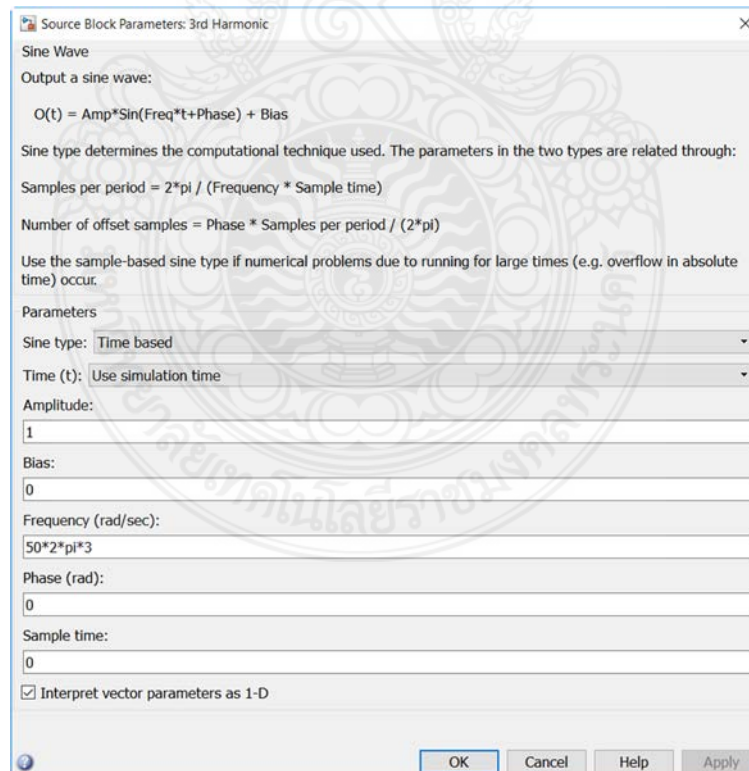
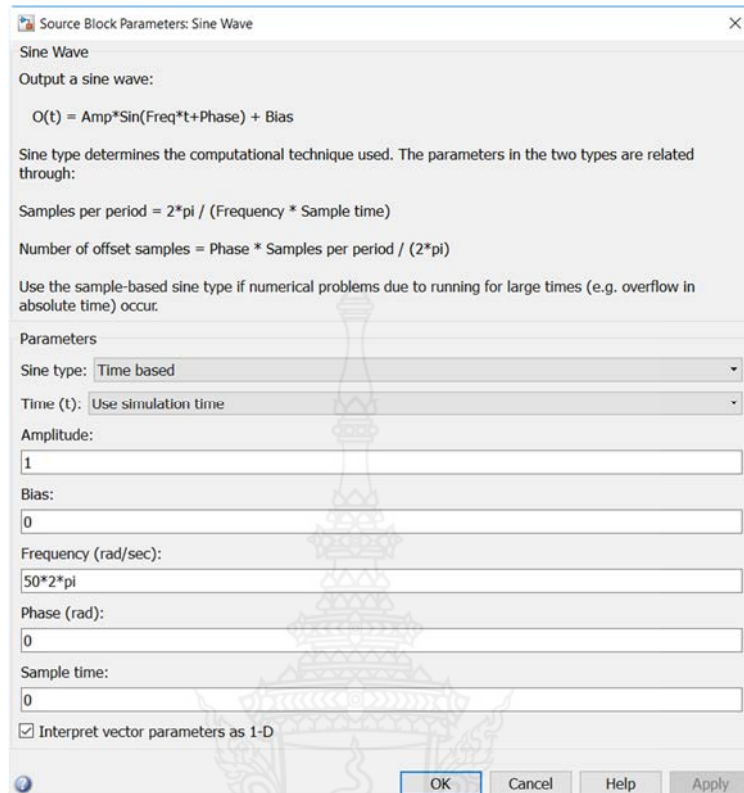
สัญญาณอินพุตในการทดลองนี้เป็นผลรวมของสัญญาณไซน์เวฟที่มีความถี่หลักมูล (fundamental frequency) ในการทดลองนี้ใช้ 50 เฮิร์ต กับสัญญาณไซน์เวฟที่มีความถี่ฮาร์มอนิกเป็นเลขคี่ (จำนวนเท่าของความถี่หลักมูล 3,5,7,9,11,13) และแอมป์จูด (amplitude) ของสัญญาณก็จะเป็นส่วนของความถี่ฮาร์มอนิกนั้นๆตามลำดับ (1/3, 1/5, 1/7, 1/9, 1/11) ซึ่งผลรวมที่กล่าวมาข้างต้นคือสแควร์เวฟนั่นเอง (square wave)



รูปที่ 6 วงจรสัญญาณอินพุต



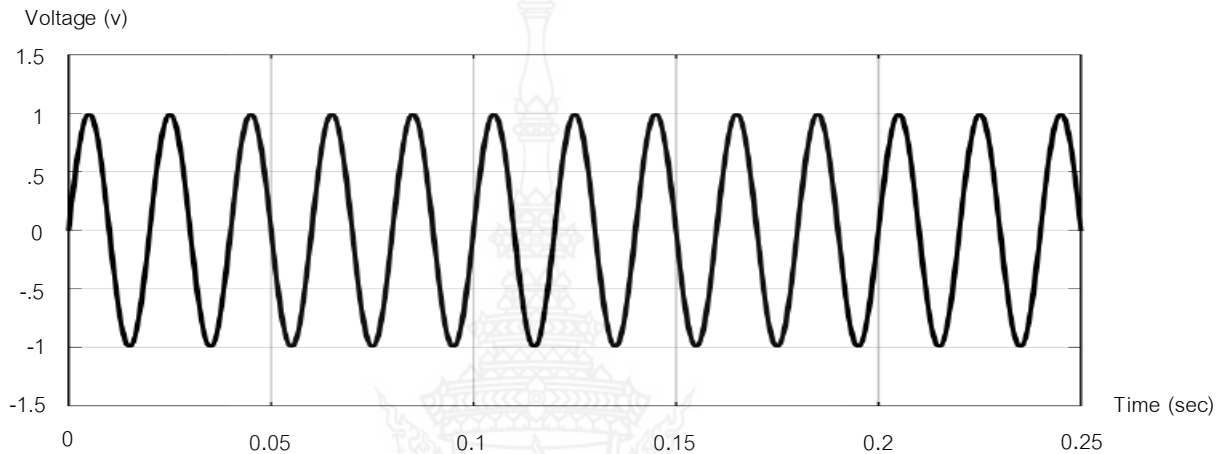
รูปที่ 7 สัญญาณอินพุต



รูปที่ 8 Source Block ของพารามิเตอร์ ซายน์เวฟในโปรแกรม MATLAB Simulink ของความถี่หลัก
มูล (บน) ของความถี่ฮาร์โมนิกที่สาม (ล่าง)

3.2.2 สัญญาณอ้างอิง

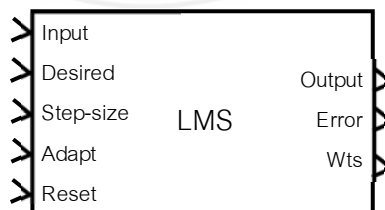
จากทฤษฎีตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง สัญญาณอ้างอิง คือสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณรบกวนไม่ว่าทางใดก็ทางหนึ่ง ในการทดลองนี้จึงใช้สัญญาณไซน์เวฟที่มีความถี่หลักมูลเป็นสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 9 สัญญาณอ้างอิง

3.2.3 ฟังก์ชันบล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี LMS

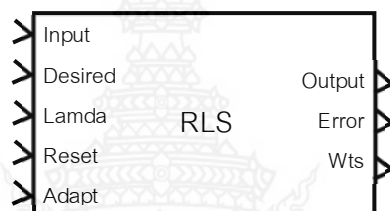
บล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี LMS คำนวณค่า weight ของตัวกรองหรือสัมประสิทธิ์ที่ต้องการเพื่อลดข้อผิดพลาด $e(n)$ ระหว่างสัญญาณเอาต์พุต $y(n)$ และสัญญาณที่ต้องการ $d(n)$ เชื่อมต่อสัญญาณที่คุณต้องการกรองไปยังพอร์ตอินพุต สัญญาณอินพุตอาจเป็นสเกลาร์หรือเวกเตอร์คอลัมน์ เชื่อมต่อสัญญาณที่ต้องการไปยังพอร์ตที่ต้องการ สัญญาณที่ต้องการต้องมีข้อมูลประเภทความซับซ้อนและมีมิติข้อมูลเหมือนกับสัญญาณอินพุต พอร์ต เอาต์พุต แสดงผลสัญญาณขาเข้าที่ถูกกรอง ซึ่งเป็นค่าประมาณของสัญญาณที่ต้องการ พอร์ตข้อผิดพลาดจะแสดงผลลัพธ์ของการลบสัญญาณเอาต์พุตออกจากสัญญาณที่ต้องการ



รูปที่ 10 บล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี LMS

3.2.4 ฟังก์ชันบล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี RLS

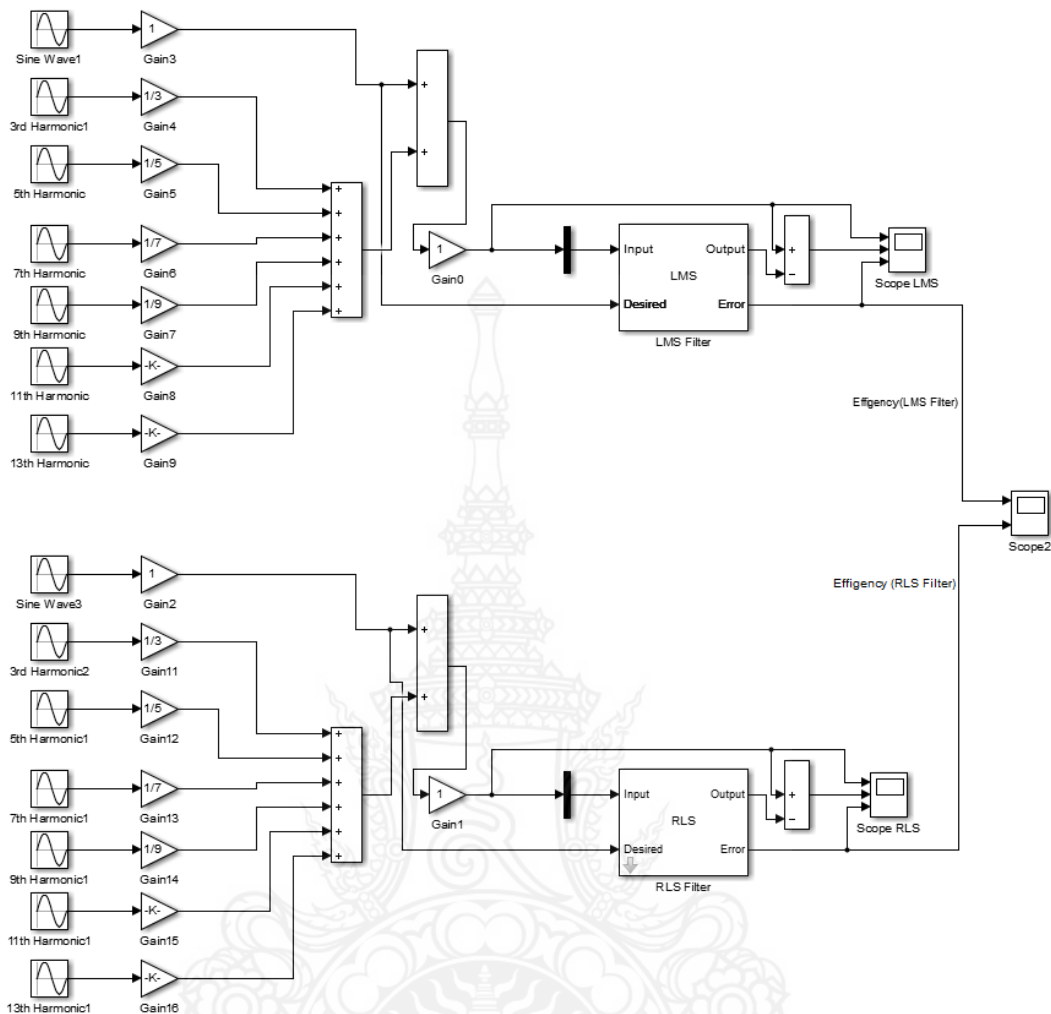
บล็อกตัวกรอง RLS คำนวณค่าประมาณสแควร์น้อยที่สุด (RLS) ของ weight ตัวกรอง FIR บล็อกประมาณการน้ำหนักตัวกรองหรือค่าสัมประสิทธิ์ที่จำเป็นในการแปลงสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณที่ต้องการ เชื่อมต่อสัญญาณที่คุณต้องการกรองไปยังพอร์ตอินพุต สัญญาณอินพุตอาจเป็นสเกลาร์หรือเวกเตอร์คอลัมน์ เชื่อมต่อสัญญาณที่คุณต้องการจำลองไปยังพอร์ตที่ต้องการ สัญญาณที่ต้องการต้องมีข้อมูลประเภทความซับซ้อนและมีมิติข้อมูลเหมือนกันกับสัญญาณอินพุต พอร์ตเอาต์พุตจะแสดงสัญญาณขาเข้าที่กรอง พอร์ตข้อผิดพลาดจะแสดงผลลัพธ์ของการลบสัญญาณเอาต์พุตออกจากสัญญาณที่ต้องการ



รูปที่ 11 บล็อกตัวกรองขั้นตอนวิธี RLS

3.2.5 ทฤษฎีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี LMS และ RLS

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี LMS และ RLS ได้จากการนำวงจรการกรองสัญญาณรบกวนด้วยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS แล้วนำสัญญาณจากพอร์ตข้อผิดพลาดของทั้งสองวงจรมาเทียบกันหาว่าจุดบรรจบขั้นตอนวิธีไหน ใช้ระยะเวลาถึงจุดบรรจบได้เร็วกว่ากัน เนื่องจากสัญญาณจากพอร์ตข้อผิดพลาดจะแสดง ผลลบสัญญาณเอาต์พุตออกจากสัญญาณที่ต้องการ ระยะเวลาที่ถึงจุดบรรจบคือระยะเวลาที่จุดที่ข้อผิดพลาดน้อยที่สุดที่ขั้นตอนวิธีนั้นๆทำได้



รูปที่ 12 วงจรเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี LMS และ RMS

3.3 วิธีการทดลองการจับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS

การทดลองการจับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS นี้ เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่างๆ สามารถศึกษา บนโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งกรณีศึกษาทั้งสามแบบที่จำลองใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งครอบคลุมทุกระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกและการเบี่ยงเบนฮาร์มอนิก

3.3.1 กรณีศึกษาจำลองระบบไฟฟ้าที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ในบทนี้นำเสนอกรณีศึกษาสำหรับทดลองการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแบบปรับค่าได้เองในตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดทีฟ บนโปรแกรม MATLAB Simulink กรณีศึกษาทั้งสาม

นี้ครอบคลุมทุกระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกและการเบี่ยงเบนฮาร์มอนิก

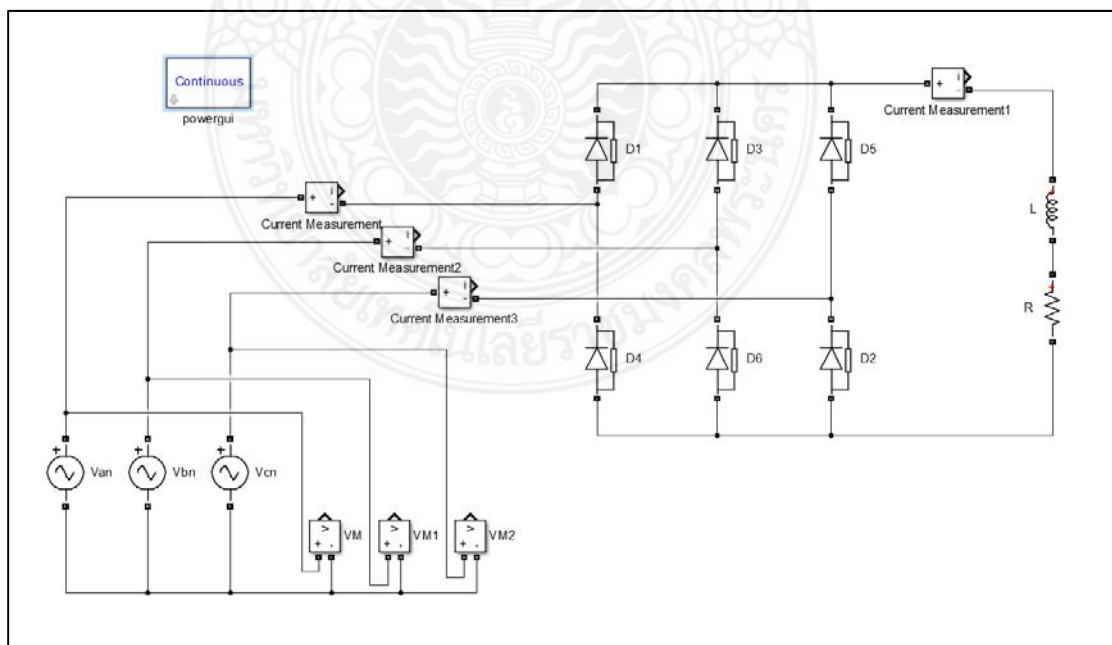
การจำลองระบบไฟฟ้าใน 3 กรณีศึกษา จะจำลองโดยใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยต่ออยู่กับเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L และ R-L-C ซึ่งกระแสฮาร์มอนิก ประเภทนี้พบได้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

กรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส สมดุลจึงขอแนะนำเสนอผลการทดลองแค่หนึ่งเฟส ซึ่งอีกสองเฟสนั้นเนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลที่มีผลลัพธ์เหมือนกันทั้ง 3 เฟส ส่วนกรณีที่ 3 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมดุลจึงนำเสนอผลการทดลองทั้ง 3 เฟส

การนำเสนอทั้งสามกรณีศึกษาจะเหมือนกันคือสิ่งแรกจะนำเสนอวงจรและค่าที่ใช้ทดลองในโปรแกรม MATLAB Simulink สองคือผลการทดลองจากการใช้ตัวจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และสามคือผลการทดลองจากการใช้ตัวจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี RLS วงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี ดังแสดงในรูปด้านล่าง

กรณีศึกษาที่ 1:

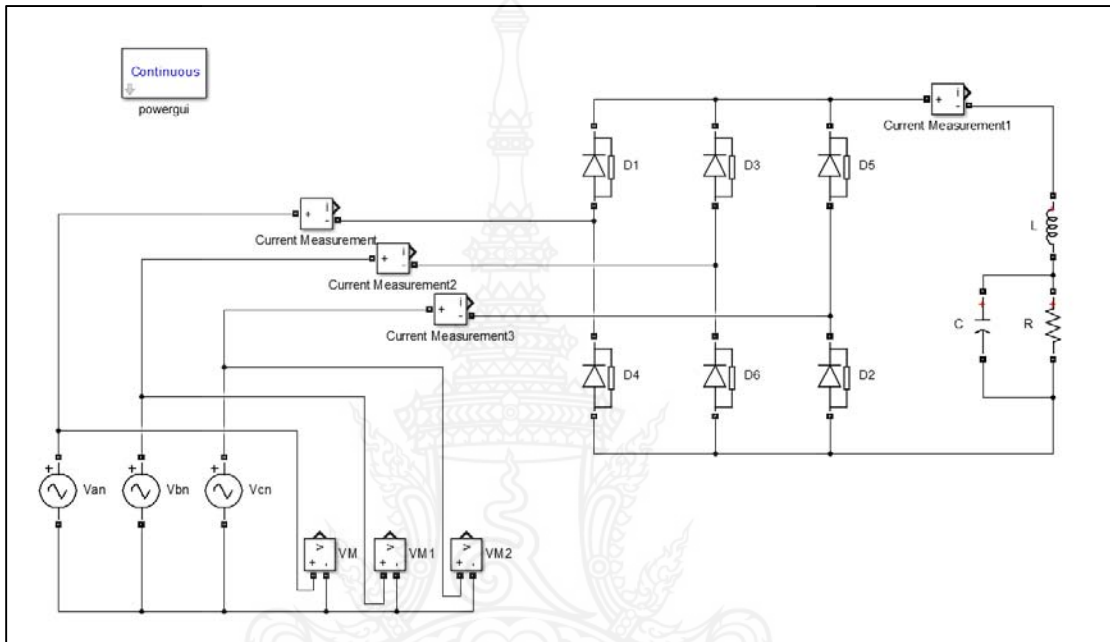
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เป็นวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุล กับวงจร 3 เฟส เรกติไฟเออร์ต่อเข้ากับโหลด รีซิสเซแตนซ์ ($R = 40 \Omega$); อินดักแตนซ์ ($L = 10 \text{ mH}$) วงจร Simulink กรณีศึกษาที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 วงจรระบบไฟฟ้า3เฟส กรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2:

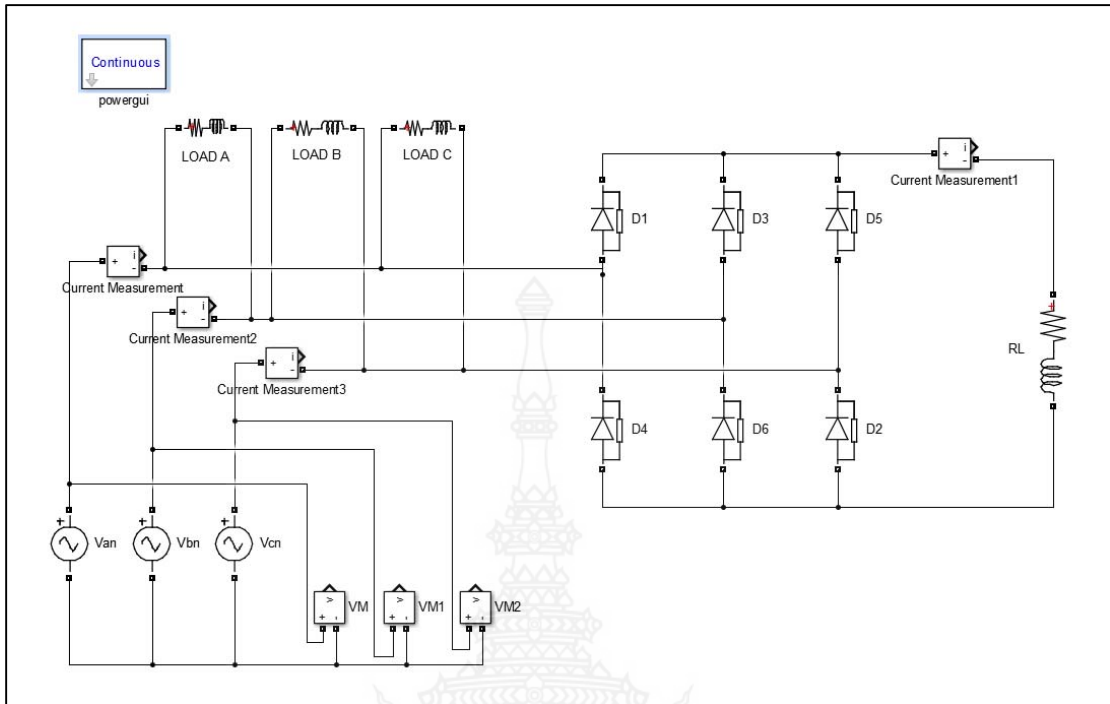
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เป็นวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมูล กับวงจร 3 เฟส เรคตีไฟเออร์ ที่มีโหลด รีซิสแตนซ์ (R) = 40Ω ; อินดักแตนซ์ (L) = 10 mH และ คาปาซิแตนซ์ (C) = $10 \mu\text{F}$ วงจร Simulink กรณีศึกษาที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 วงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส กรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาที่ 3

สำหรับวงจรระบบไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 3 เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมมูล โดย เฟสที่ 1 ต่อรีซิสแตนซ์ (R) = 40Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 10 mH เฟสที่ 2 ต่อรีซิสแตนซ์ (R) = 30Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 7.5 mH ส่วนเฟสที่ 3 รีซิสแตนซ์ (R) = 20Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 5 mH และทั้ง 3 เฟสนี้ต่อเข้ากับวงจรวงจร 3 เฟสเรคตีไฟเออร์ โดยมีโหลดคาร์ริชอสแตนซ์ (R) = 40Ω และอินดักแตนซ์ (L) = 10 mH วงจร Simulink กรณีศึกษาที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 15



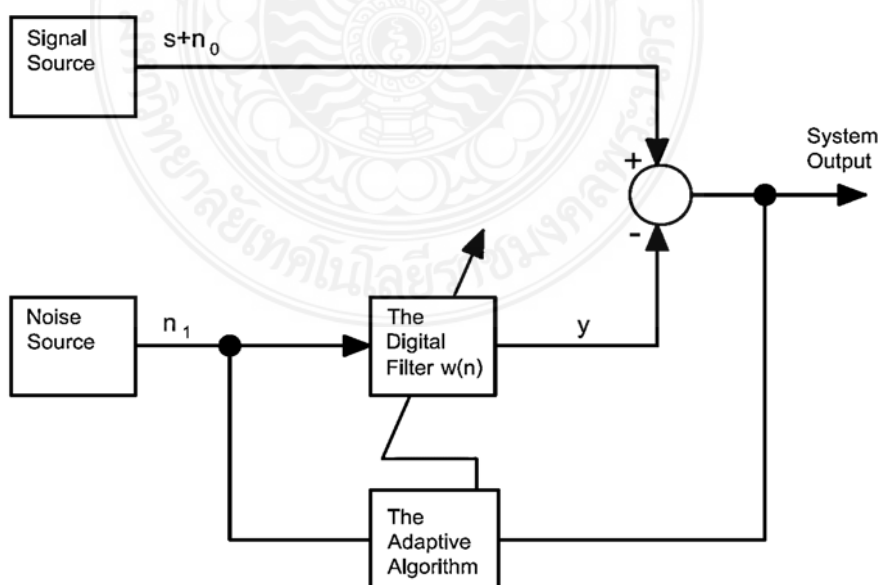
รูปที่ 15 วงจรระบบไฟฟ้า3เฟส กรณีศึกษาที่ 3

บทที่ 4

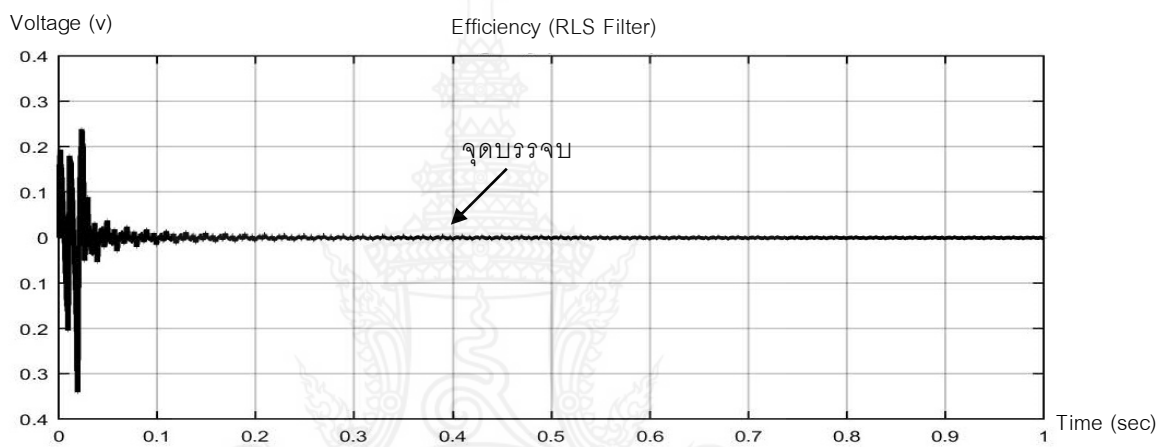
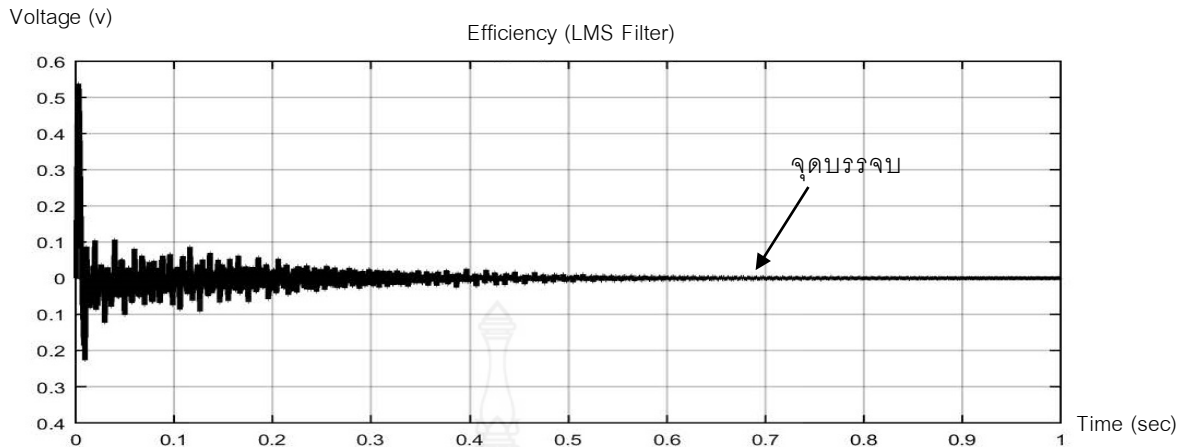
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี LMS และ RLS

การทดลองแรกจะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และ RMS โดยจำลองการทำงานของขั้นตอนวิธี LMS และ RLS ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยตั้งค่า Step Size (μ) ของขั้นตอนวิธี LMS เป็น 0.07 และ Forgetting Factor ของขั้นตอนวิธี RLS เป็น 1 จากรูปที่ 16 แสดงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS จะเห็นว่า ขั้นตอนวิธี RLS ใช้ระยะเวลาในการวิ่งเข้าหาจุดบรรจบน้อยกว่า รวมทั้งช่วงเวลาก่อนและหลังจุดบรรจบจะมีการกระเพื่อมของสัญญาณน้อยกว่า ขั้นตอนวิธี LMS นั่นคือเมื่อใช้ขั้นตอนวิธี RLS จะให้สัญญาณ y เข้าใกล้สัญญาณ n_0 ในบล็อกไดอะแกรมทฤษฎีการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้ ในรูปที่ 16 ได้เร็วมากกว่า และสัญญาณเอาต์พุตมีความใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมากกว่าขั้นตอนวิธี LMS



รูปที่ 16 บล็อกไดอะแกรมทฤษฎีการกำจัดเสียงรบกวนแบบปรับค่าได้



รูปที่ 17 ผลจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS (บน) และขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS บนวงจรจำลองระบบไฟฟ้า

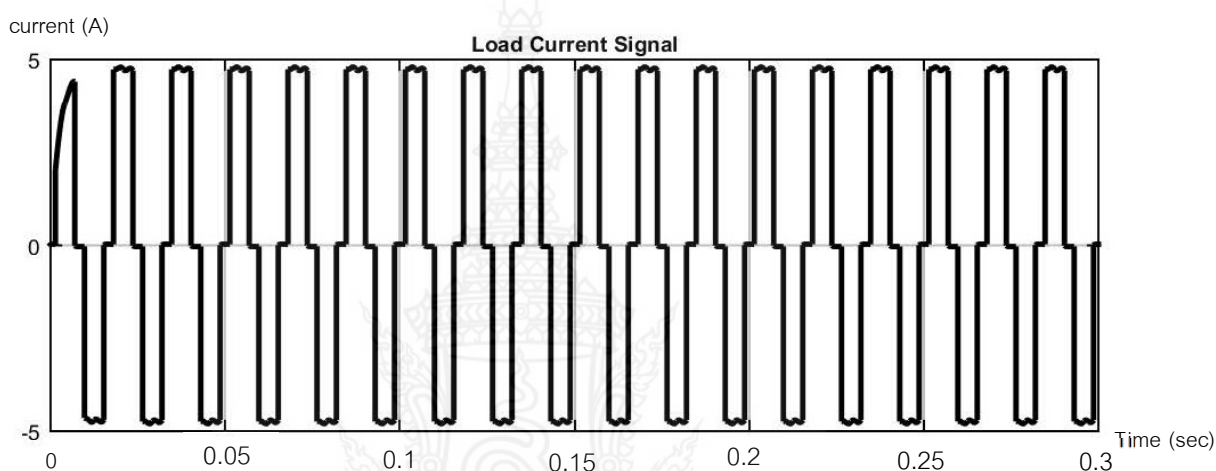
กรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส สมดุลจึงขอแนะนำเสนอผลการทดลองแค่หนึ่งเฟส ซึ่งอีกสองเฟสนั้นเนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลที่มีผลลัพธ์เหมือนกันทั้ง 3 เฟส ส่วนกรณีที่ 3 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบไม่สมดุลจึงนำเสนอผลการทดลองทั้ง 3 เฟส

การนำเสนอผลการทดลองทั้งสามกรณีศึกษาจะเหมือนกันคือสิ่งแรกผลการทดลองจากการใช้ตัวจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS สองคือผลการทดลองจากการใช้ตัวจับสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี RLS และสุดท้ายคือเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสอง

ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1:

ระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุลกับวงจร 3 เฟส เเรคตีไฟเออร์ที่มีโหลด รีซิสแตนซ์ (R) = 40 Ω ; และอินดักแตนซ์ (L) = 10 mH

จากรูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่ากระแสไหลในวงจรนี้เป็นสแควร์เวฟ ซึ่งกระแสไหลสแควร์เวฟคือ ผลรวมของกระแสที่มีความถี่มูลฐาน กับกระแสฮาร์โมนิกลำดับคี่ (odd harmonic)

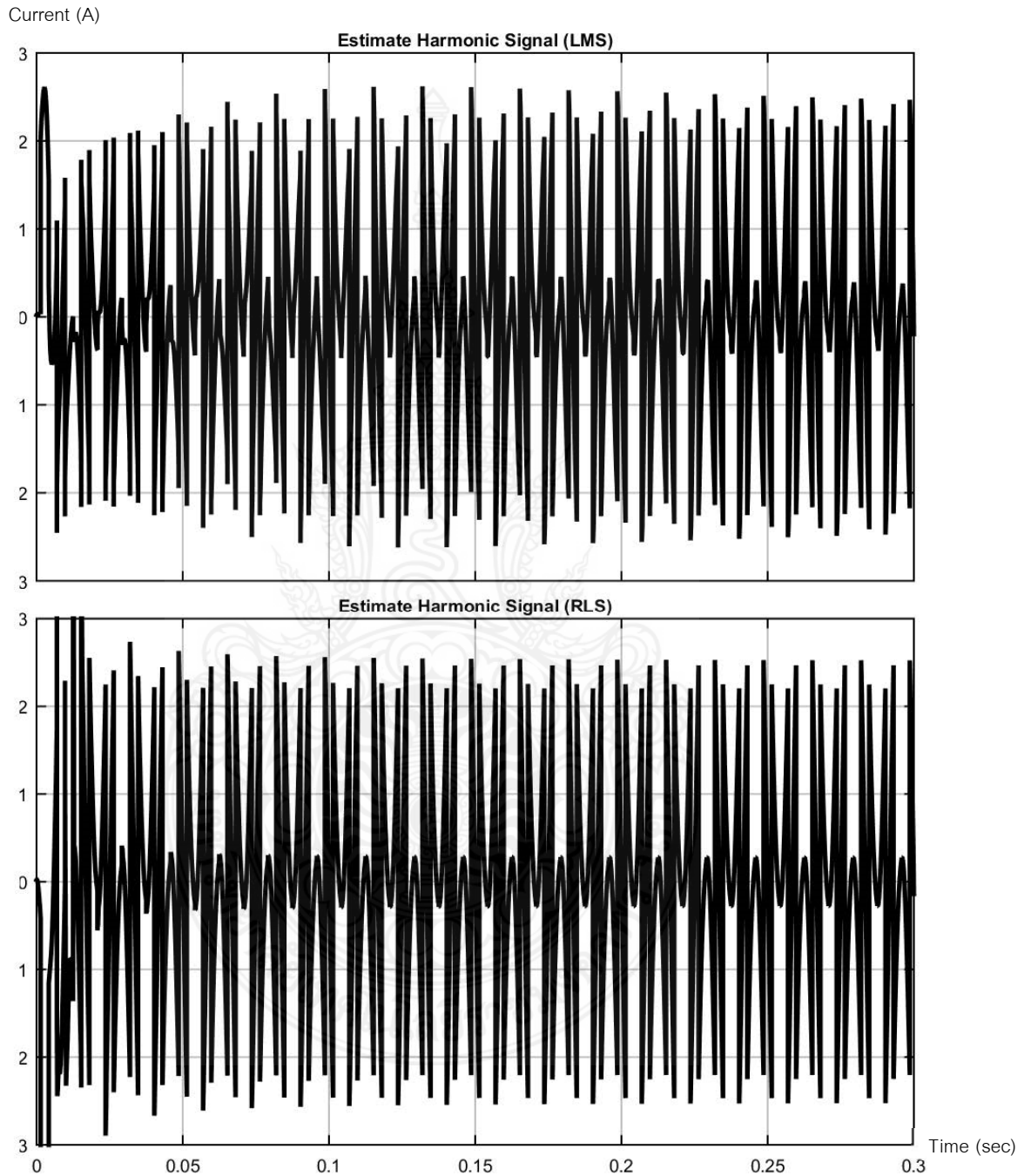


รูปที่ 18 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 กระแสไหลรวมในระบบไฟฟ้าต่อเฟส

รูปที่ 19 แสดงผลลัพธ์กระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้จาก ตัวจับกระแสฮาร์โมนิกแบบปรับค่าเองได้ ด้วยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS กระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองสังเกตจากกราฟสัญญาณฮาร์โมนิกทั้งสองในช่วงเวลา 0 – 0.05 วินาทีแรก กราฟกระแสฮาร์โมนิกที่จับได้ยังไม่คงที่ และกราฟสัญญาณฮาร์โมนิก ที่ตรวจจับด้วยขั้นตอนวิธี RLS เริ่มคงที่ที่เวลา 0.05 วินาทีเป็นต้นไป ส่วนกราฟสัญญาณฮาร์โมนิก ที่ตรวจจับด้วยขั้นตอนวิธี LMS จะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 0.1 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งผลจากกราฟทั้งสองแสดงให้เห็นว่าการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS ตรวจจับได้เร็วกว่าขั้นตอนวิธีแบบ LMS ส่วนรูปที่ 20 แสดงกราฟรูปคลื่นสัญญาณของค่าผิดพลาดจากขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS หรือเราสามารถเรียกอีกอย่างว่าประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS จากกราฟจะเห็นได้ว่า จุดบรรจบของขั้นตอนวิธี LMS อยู่ที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที และมีค่ากระแสเฟื้อมอยู่ระดับหนึ่ง ส่วนจุดบรรจบของขั้นตอนวิธี RLS อยู่ที่เวลาประมาณ 0.5 วินาที และที่ค่ากระแสเฟื้อมที่น้อยกว่า

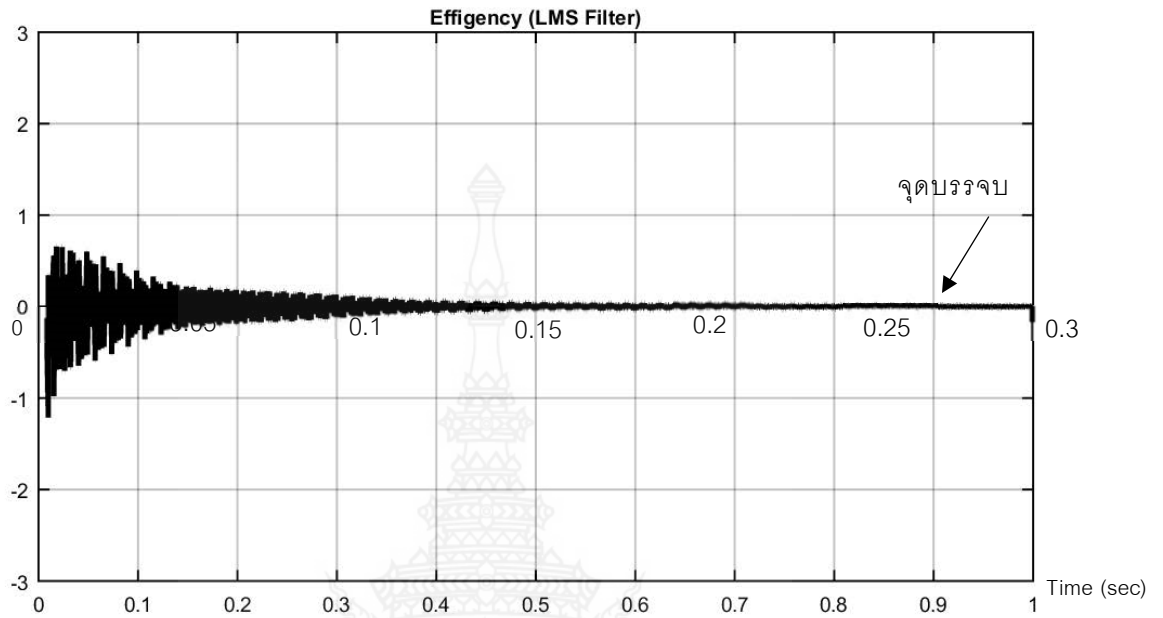
จากผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 ทั้งรูปที่ 19 และ 20 สอดคล้องกัน และสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีศึกษาที่ 1 นี้ตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกด้วย ขั้นตอนวิธี RLS มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวจับ

สัญญาณฮาร์มอนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS และสัญญาณค่าผิดพลาดน้อยที่สุดมีค่ากระเพื่อมน้อยกว่า
ขั้นตอนวิธี LMS

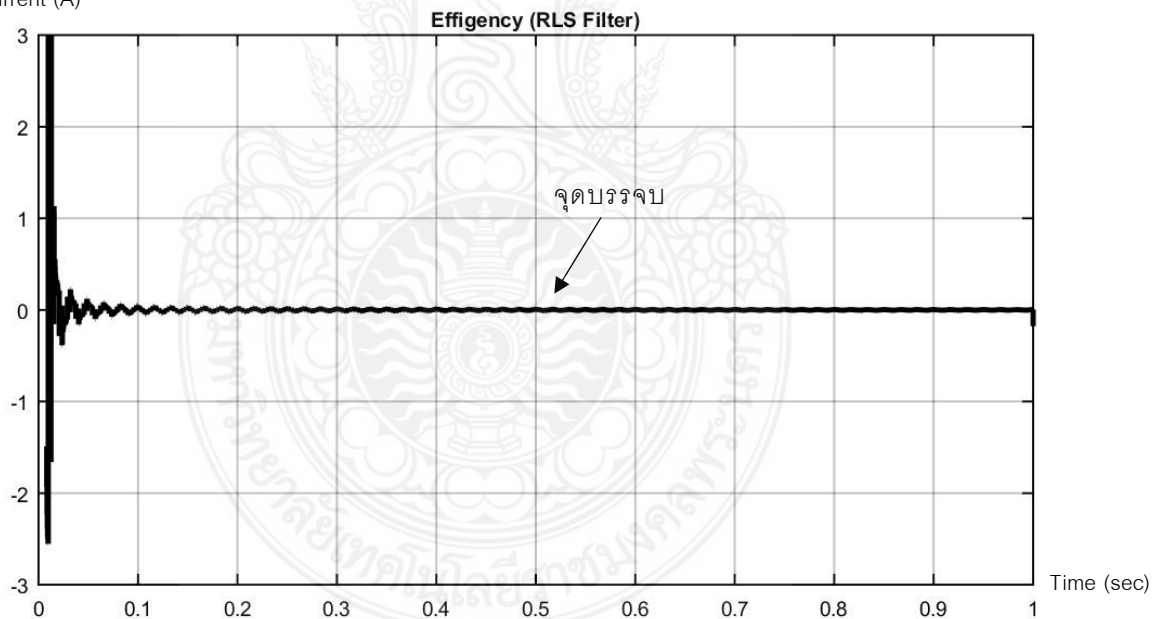


รูปที่ 19 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี LMS
(บน), สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)

current (A)



current (A)

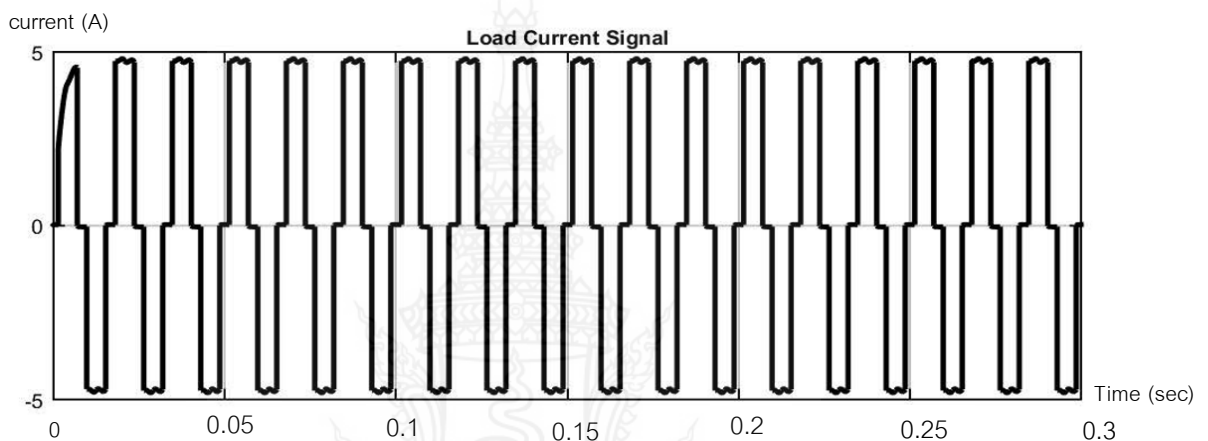


รูปที่ 20 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสรวมอนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสรวมอนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)

ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2:

ระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมูลกับวงจรเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด รีซิสเตอร์ (R) = 40Ω อินดักแตนซ์ (L) = 10 mH และคาปาซิแตนซ์ (C) = $10 \mu\text{F}$

กระแสโหลดจากกรณีศึกษาที่ 2 แสดงดังรูปที่ 21 จากรูปสัญญาณกระแสโหลด จะเป็นรูปเหมือนสแควร์เวฟ ซึ่งสแควร์เวฟนี้เกิดจากผลรวมของกระแสรูปซายน์ความถี่มูลฐาน กับกระแสรูปซายน์ที่มีความถี่ฮาร์โมนิกคือ

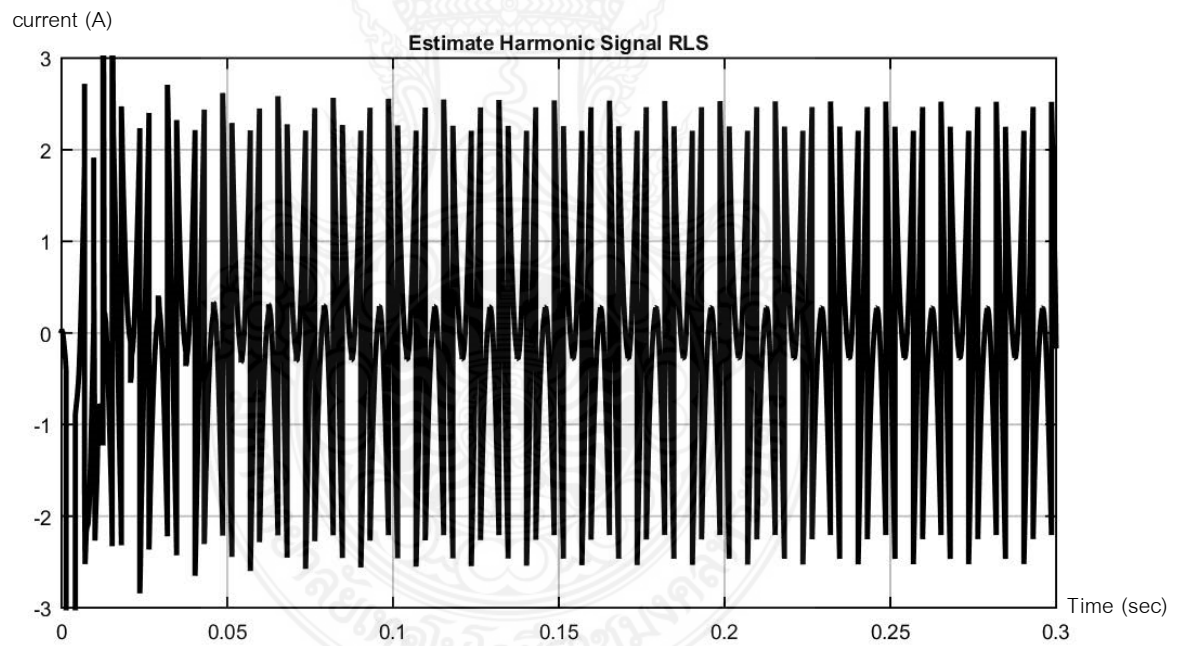
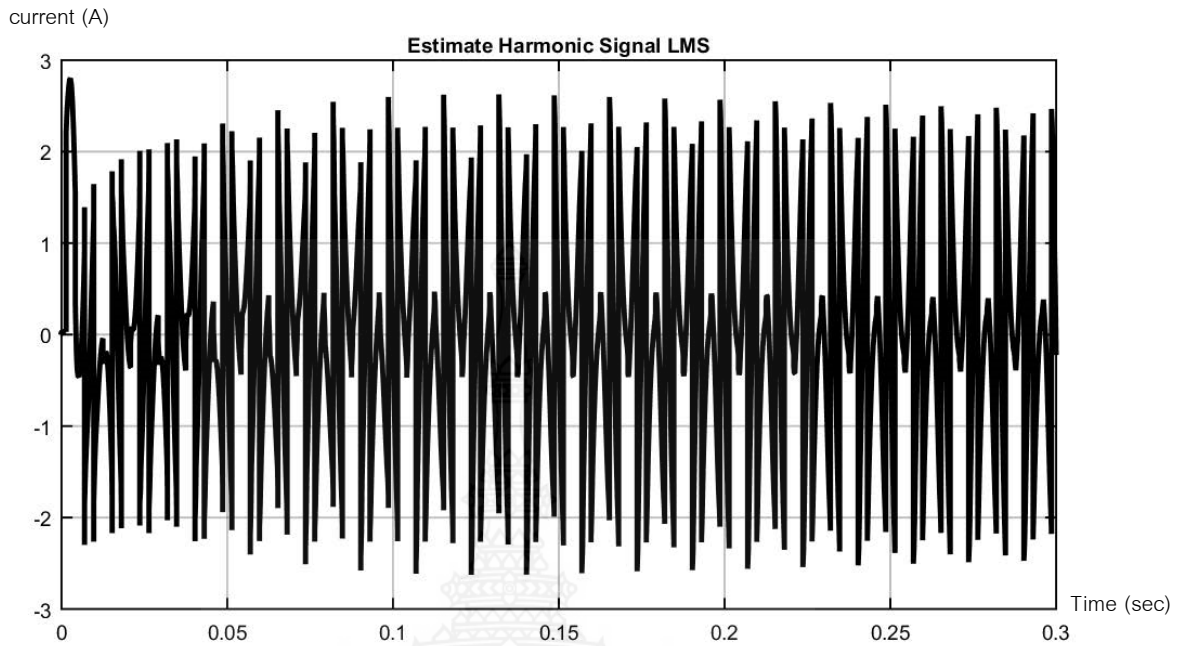


รูปที่ 21 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 กระแสโหลดรวมในระบบไฟฟ้าต่อเฟส

รูปที่ 22 แสดงรูปคลื่นฮาร์โมนิกในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ตรวจจับได้ด้วยตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอน RLS โดยรูปสัญญาณรูปบน ตรวจจับได้ด้วยตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS ส่วนรูปสัญญาณรูปล่าง ตรวจจับได้ด้วยตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี RLS

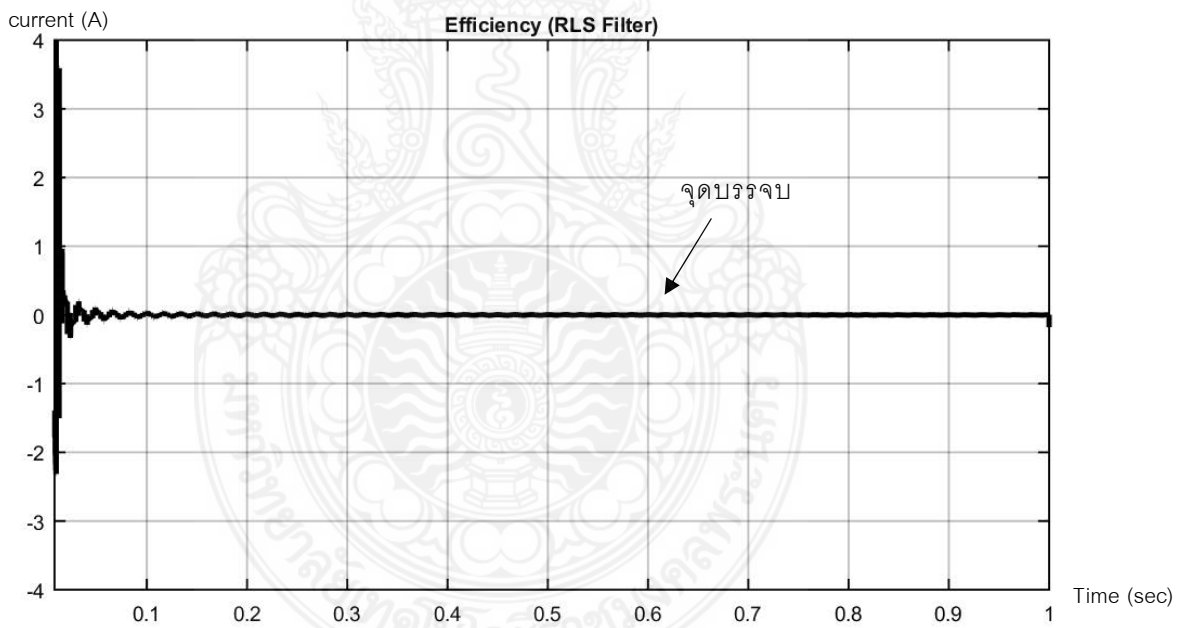
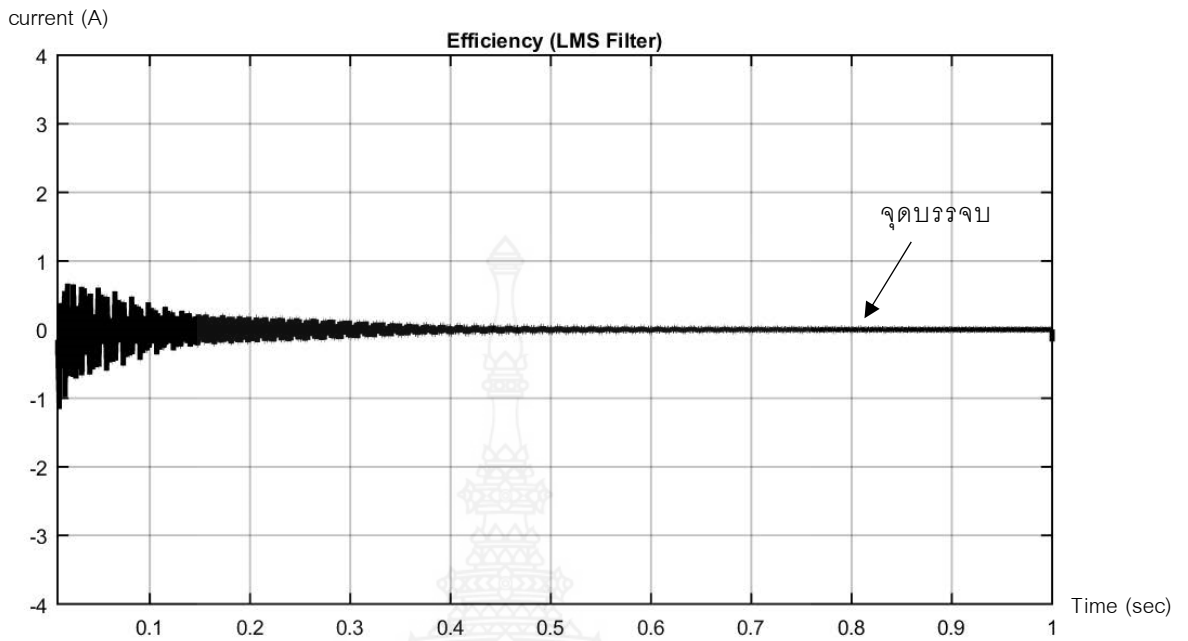
จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณทั้งสองช่วงแรกรูปคลื่นยังไม่นิ่งมีการกระเพื่อมเนื่องจากตัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองขั้นตอนวิธีกำลังปรับค่าเพื่อให้ถึงจุดบรรจบ ขั้นตอนวิธี LMS ใช้เวลาประมาณ 0.1 วินาที รูปคลื่นฮาร์โมนิกถึงจะไม่กระเพื่อม ส่วนขั้นตอนวิธี RLS ใช้เวลาน้อยกว่าคือประมาณ 0.05 วินาที รูปคลื่นฮาร์โมนิกถึงจะไม่กระเพื่อม แสดงให้เห็นว่า ตัวตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี RLS มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกมากกว่าตัวตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี LMS

รูปที่ 23 แสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS จากรูปจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีแบบ RLS มีประสิทธิภาพมากกว่าและคือถึงจุดบรรจบเร็วกว่าขั้นตอนวิธีแบบ LMS โดยขั้นตอนวิธี LMS ถึงจุดบรรจบในเวลา 0.8วินาที และขั้นตอนวิธี RLS ถึงจุดบรรจบในเวลา 0.6วินาที



Time offset: 0

รูปที่ 22 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)



Time offset: 0

รูปที่ 23 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสรวมอนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS (บน), ประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณกระแสรวมอนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)

ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3

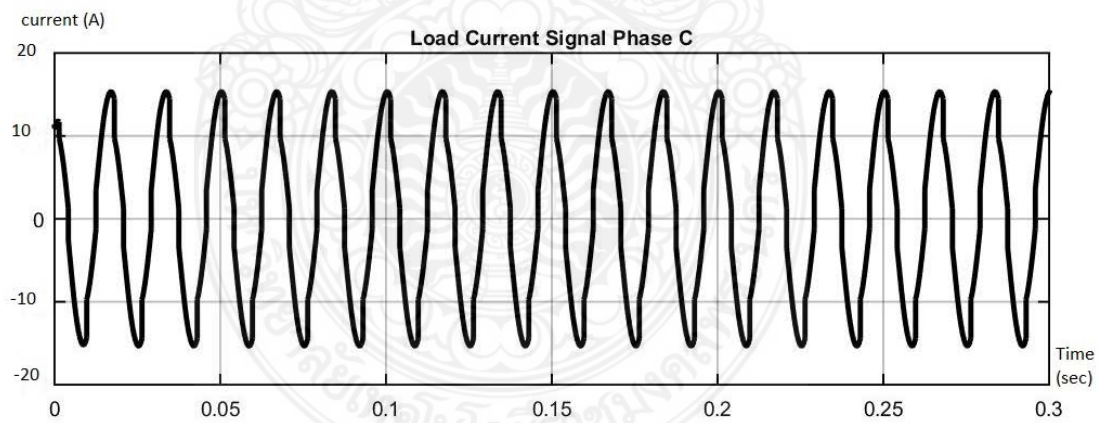
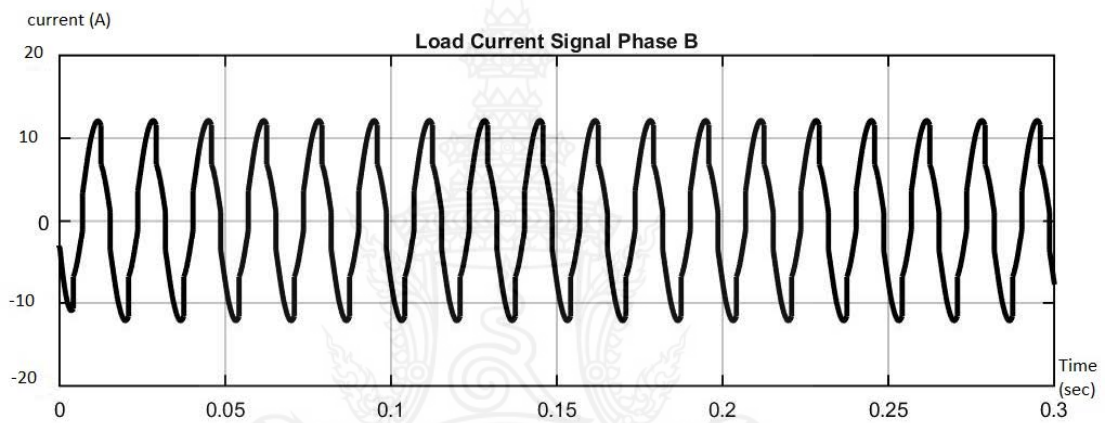
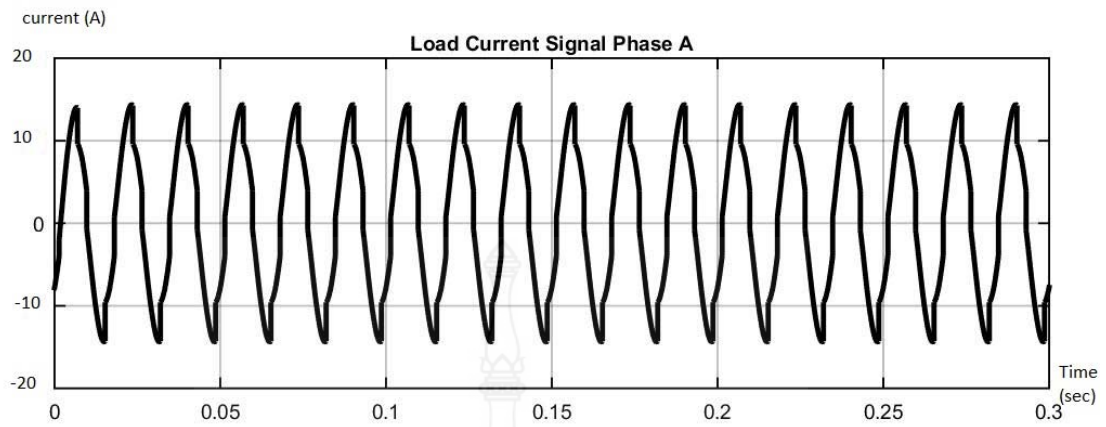
สำหรับวงจรระบบไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 3 เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส แบบไม่สมดุล โดย เฟสที่ 1 ต่อรีซิสแตนซ์ (R) = 40 Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 10 เฟสที่ 2 ต่อรีซิสแตนซ์ (R) = 30 Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 7.5 mH ส่วนเฟสที่ 3 รีซิสแตนซ์ (R) = 20 Ω และ อินดักแตนซ์ (L) = 5mH และทั้ง 3 เฟสนี้ต่อเข้ากับวงจรวงจร 3 เฟสเรกติไฟเออร์ โดยมีโหลดคาร์ริชอสแตนซ์ (R) = 40 Ω และอินดักแตนซ์ (L) = 10 mH

เนื่องจากในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ เป็นระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุลต่ออยู่กับเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L นั้น ผลการทดลองจะแสดงเป็นแต่ละเฟสและแสดงทั้ง 3 เฟส

รูปที่ 24 แสดงกระแสโหลดทั้งสามเฟสในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ เนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลย์ จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสเฟส ทั้ง 3 เฟสไม่เหมือนกัน ซึ่งกระแสโหลดนี้ไม่เป็นรูปคลื่นชาน์น เนื่องจากมีกระแสที่มีความถี่ฮาร์โมนิกปนอยู่กับกระแสที่มีความถี่มูลฐาน

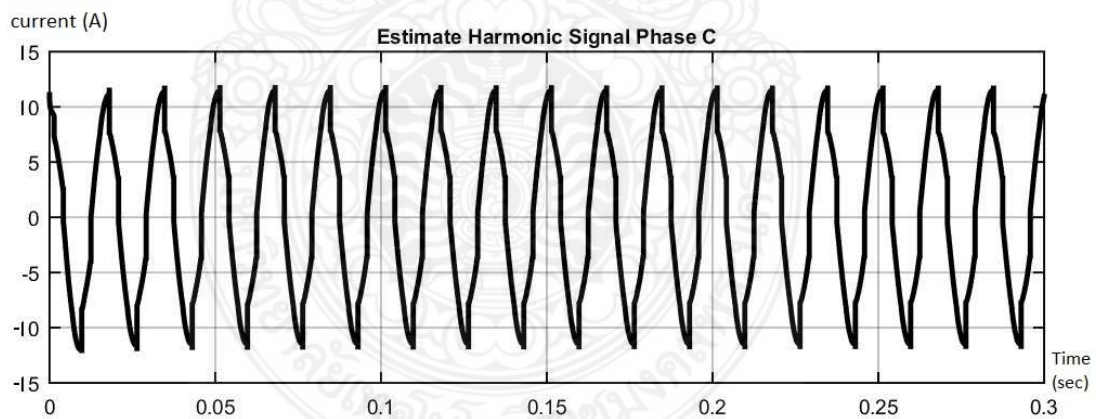
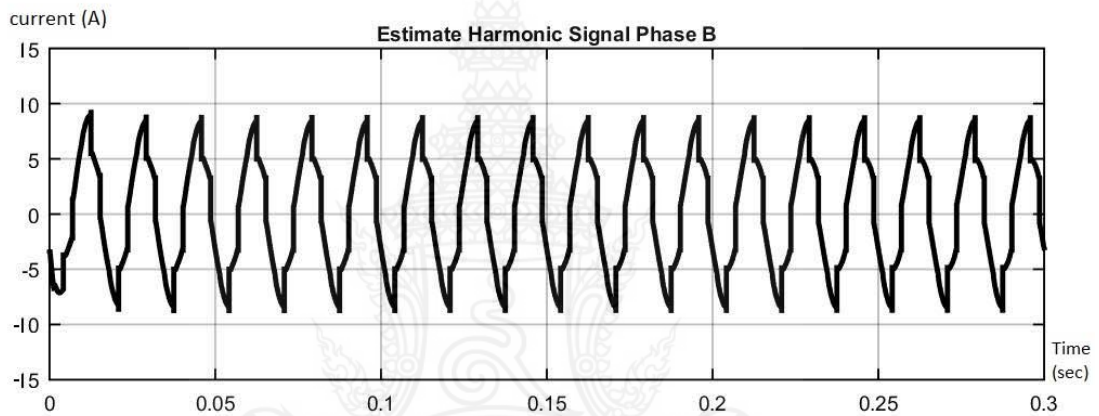
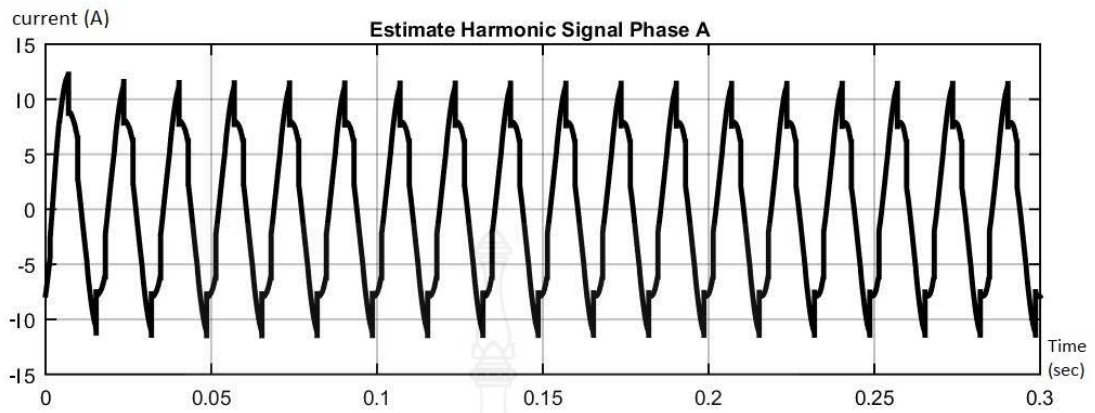
รูปคลื่นสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกในแต่ละเฟสที่ตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี LMS ตรวจจับได้ แสดงดังรูปที่ 25 ส่วนรูปที่ 26 แสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้ด้วย ตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี RLS จากรูปที่ 26 และรูปที่ 26 นี้ แสดงให้เห็นว่า ตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธี LMS และ RLS ทั้งสองขั้นตอนนี้สามารถตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกได้ แต่จากรูปยังไม่เห็นถึงความแตกต่างในด้านประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสองอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสอง ในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ ดูได้จากผลการทดลองในรูปที่ 27 และรูปที่ 28 เปรียบเทียบกัน

ในรูปที่ 27 แสดงประสิทธิภาพของการตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี LMS จุดบรรจบอยู่ที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที แต่ยังมีค่าผิดพลาดอยู่ที่ +/-0.4 ส่วนในรูปที่ 28 แสดงประสิทธิภาพของการตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกด้วยขั้นตอนวิธี RLS จุดบรรจบอยู่ที่เวลาประมาณ 0.5 วินาทีที่มีค่าผิดพลาดอยู่ที่ +/-0.1 แสดงให้เห็นว่า การตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ ตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี RLS มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวจับสัญญาณฮาร์โมนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS



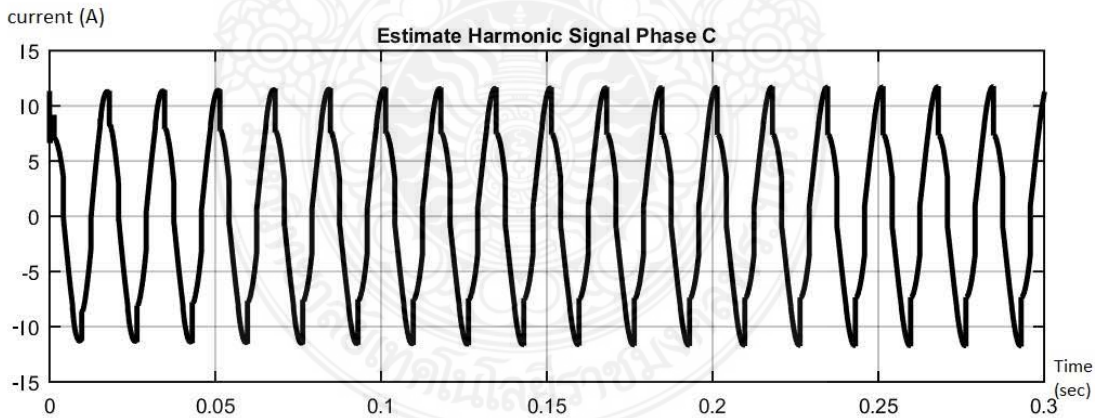
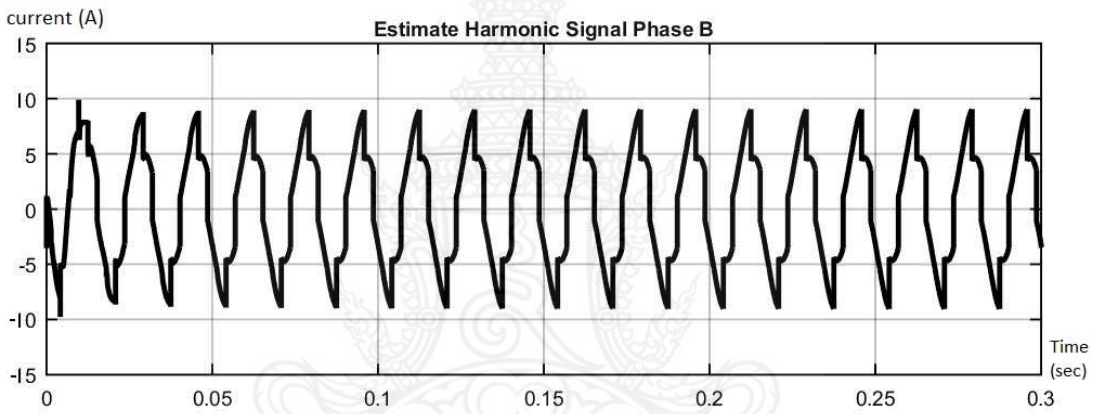
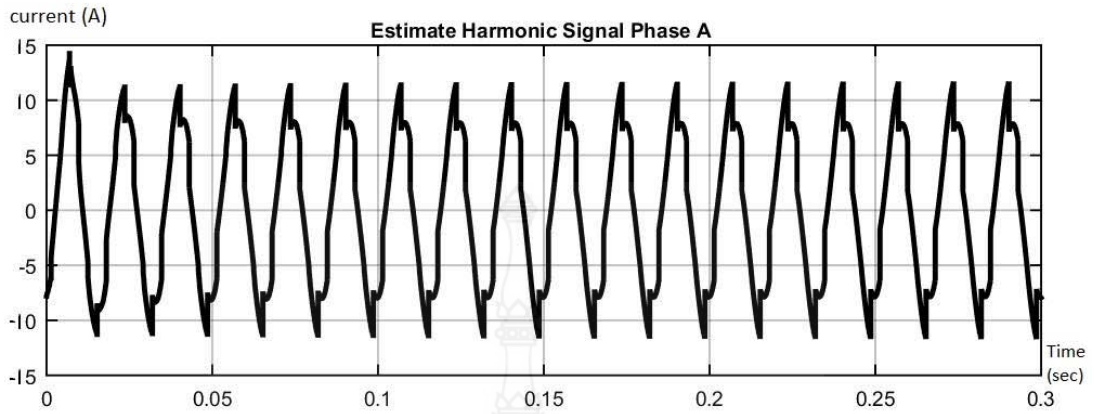
Time offset: 0

รูปที่ 24 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณกระแสรวมทั้งสามเฟส



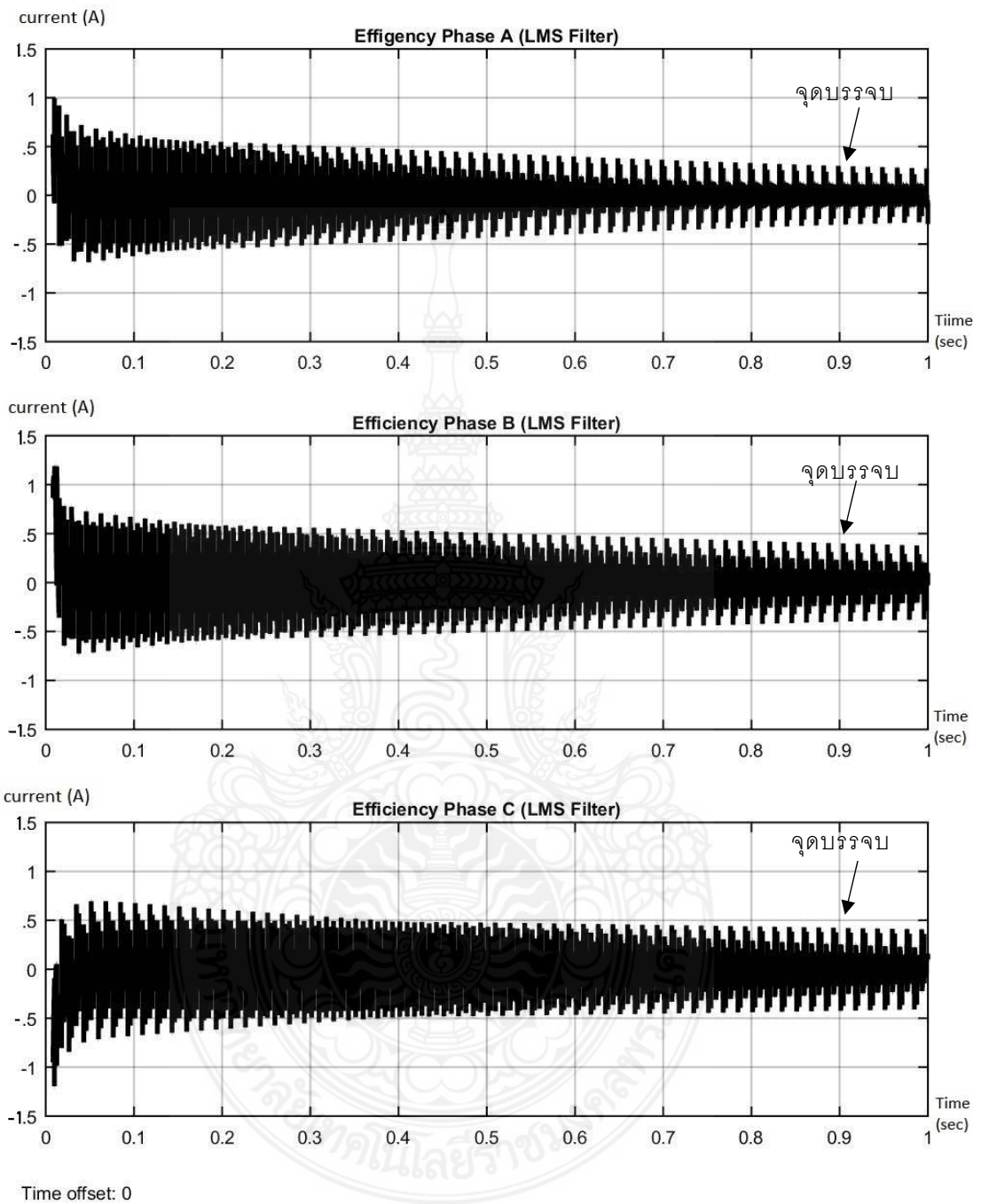
Time offset: 0

รูปที่ 25 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ทั้งสามเฟส
โดยขั้นตอนวิธี LMS

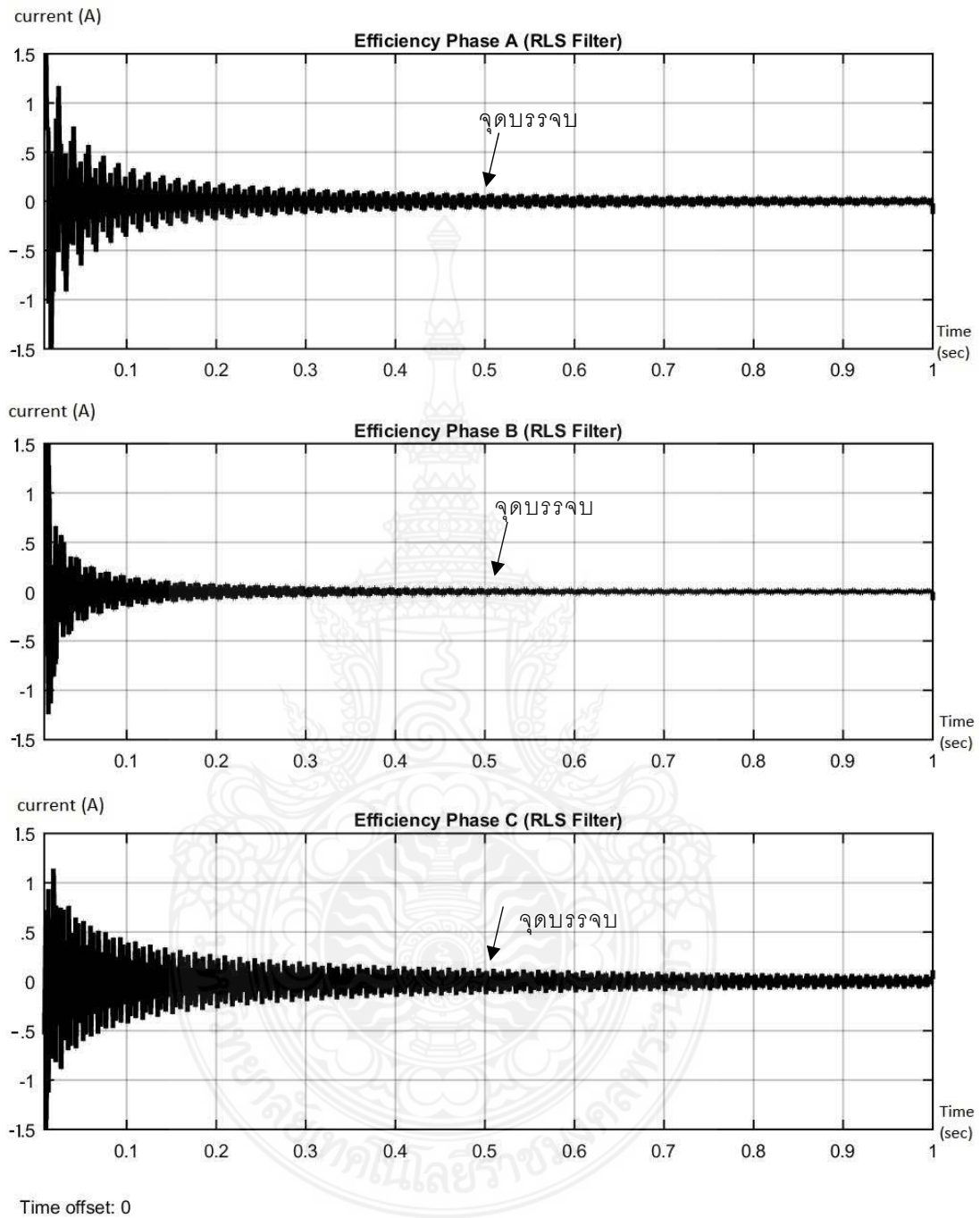


Time offset: 0

รูปที่ 26 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 สัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ทั้งสามเฟส
โดยขั้นตอนวิธี RLS



รูปที่ 27 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 ประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
โดยขั้นตอนวิธี LMS



รูปที่ 28 ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 3 ประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
โดยขั้นตอนวิธี RLS

4.3 การอภิปรายผล

จากการทดลองการตรวจจับกระแสมอนิก โดยกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณีศึกษาจะเห็นว่า ตัวตรวจจับกระแสมอนิกแบบปรับค่าได้เองโดยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอน RLS ทั้งสองขั้นตอนวิธีสามารถตรวจจับกระแสมอนิกได้จริง และเมื่อเปรียบเทียบการตรวจจับกระแสมอนิกโดยขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS สำหรับตัวจับกระแสมอนิกชนิดปรับค่าได้เอง เห็นได้ว่าขั้นตอนวิธี RLS มีข้อดีกว่าคือความเร็วในการปรับจนถึงจุดบรรจบเร็วกว่า และมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตน้อยกว่า (เหมือนที่เห็นได้ชัดเจนในผลการทดลองในกรณีศึกษาที่ 3) ถึงแม้ว่าการคำนวณของขั้นตอนวิธีแบบ RLS จะซับซ้อนกว่า ทำให้ต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูงและหน่วยความจำมากขึ้นก็ตาม แต่เมื่อนำหลักการของตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับกระแสมอนิก การใช้ขั้นตอนวิธี RLS จะมีประสิทธิภาพ สามารถตรวจจับฮาร์โมนิกได้เร็วขึ้นและค่าผิดพลาดน้อยลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกับผลดีที่ได้นั้น ขั้นตอนวิธี RLS จึงมีความเหมาะสมที่จะวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์โมนิกแบบแอดกทีฟชนิดปรับตัวได้เองต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งนำเสนอการตรวจจับสนรณมอริกภายในเครื่องกรองกระแสนรณมอริกแบบแอกทีฟชนิดปรับค่าได้เอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 มีการพัฒนาทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เองเพื่อมาทำการตรวจจับสนรณมอริกกระแสนรณมอริก ซึ่งทำให้พ้นจากข้อจำกัดของการตรวจจับสนรณมอริกแบบดั้งเดิมทั้งวิธีการชดเชยด้วยโดเมนความถี่และวิธีการชดเชยด้วยโดเมนเวลา

5.1.2 มีการศึกษาถึงขั้นตอนวิธี LMS และ ขั้นตอนวิธี RLS เพื่อหาความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการนำมาใช้ตรวจจับสนรณมอริกของระบบไฟฟ้ากำลัง

5.1.3 มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS โดยการจำลองและทดสอบบนโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งจะใช้ขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี RLS กับระบบไฟฟ้าสามเฟสในกรณีศึกษาสมรรถนะที่ครอบคลุมโหนดของโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุของการเกิดการเบี่ยงเบนกระแสนรณมอริก ซึ่งผลการจำลองพิสูจน์ได้ว่า ขั้นตอนวิธี RLS มีประสิทธิภาพมากกว่าขั้นตอนวิธี LMS

5.1.4 ขั้นตอนวิธี RLS เป็นขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นชุดต้นแบบของเครื่องกรองกระแสนรณมอริกแบบแอกทีฟชนิดปรับค่าได้เองเพื่อใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากมีความเร็วในการพบจุดบรรจบสูงกว่าขั้นตอนวิธี LMS

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการวิจัยและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink เท่านั้น แต่ถ้าจำเป็นต้องสร้างเครื่องชุดต้นแบบของเครื่องกรองกระแสนรณมอริกแบบแอกทีฟชนิดปรับค่าได้เองเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามเวลาจริง (real time) จำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูง ดังนั้นหากประมวลผลด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor) ก็จะทำให้สามารถตรวจจับสนรณมอริกและยังกระแสไปหักล้างกับกระแสนรณมอริกได้ทัน และจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าปัจจุบันตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในงาน

ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม และยังถูกใช้กับตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบปรับค่าได้เอง จึงสามารถหา
มาใช้งานได้ไม่ยาก แต่ก็อาจมีข้อเสียตรงที่ราคายังค่อนข้างสูง



เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Liu, "Adaptive Power Line Harmonic Detection For Active Filter Applications." Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. Ryerson University, Toronto, 2004.
- [2] B. Widrow and S.D. Stearns. **Adaptive Signal Processing**. Printice Hall. Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [3] H. Quanzhen, G. Zhiyuan, G. Shouwei, S. Yong, and Z. Xiaojin, "Comparison of LMS and RLS Algorithm for Active Vibration Control of Smart Structures." ICMTMA 2011 3rd International Conference on (vol. 1). January 2011, pp. 745-748.
- [4] L. Gyugi and E.C. Strycula. "Active AC Power Filter." Conf Rec of IEEE-IAS Annual Meeting. October 1976, pp. 529-535.
- [5] L. Zhou and Z. Li. "A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method." IEEE Trans on Power Electronics. vol. 15, No. 4, July 2000, pp. 655-659.
- [6] B. Singh and K. Al-Haddad. "A review of Active Filters for Power Quality Improvement." IEEE Trans on Industrial Electronics. vol. 46, No. 5, October 1999, pp. 960-971.
- [7] T.L. Leung, S. Valiviita, and S.J. Ovaska. "Adaptive and delayless Filtering System for Sinusoids with Varying Frequency." Southeastcon '99. IEEE Proceedings. March 1999, pp. 149-153.

ภาคผนวก

- บทความวิจัย การประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟ. การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8
- บทความวิจัย การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธี RLS เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
- Procedure Adaptive Harmonic current detection implemented by using digital signal processor. 2018 International Conference on Green Energy and Environment Engineering (CGEEE 2018)

การประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองแบบแอกทีฟ

The Application of Noise Cancellation Adaptive Filter to Detect Harmonic Current for Active Filter

ชาญชัย พุกกะพาดิ¹ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์¹ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงษ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: sakhon.w@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับตัวกรองแบบแอกทีฟโดยอาศัยพื้นฐานทฤษฎีของตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง เดิมทฤษฎีนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อประมวลผลสัญญาณเสียง ทฤษฎีดังกล่าวมีสองขั้นตอนวิธีที่นิยมคือ Least Mean Square (LMS) และ Recursive Least Square (RLS) ซึ่งจะทำกรวิเคราะห์และเปรียบเทียบทั้งสองขั้นตอนวิธีด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อเลือกขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟชนิดปรับค่าได้เองในงานวิจัยต่อจากนี้

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิก, ตัวกรองแบบแอกทีฟ, ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เอง, ขั้นตอนวิธี LMS, ขั้นตอนวิธี RLS

Abstract

This paper presents a method to detect the harmonic current for active filter based on the theory of noise cancellation adaptive filter theory. The theory was originally developed to process the audio signals. This theory has two popular algorithms i.e. Least Mean Square (LMS) and Recursive Least Square (RLS). This article was analyzed and compared the advantages and disadvantages of both types of algorithms by MATLAB Simulink program. Then decide on the appropriate algorithm for improve the efficiency of adaptive active filter in the next researches.

Keywords: harmonic, active filter, adaptive filter, LMS algorithm, RLS algorithm

1. บทนำ

ปัจจุบันใน โรงงานอุตสาหกรรมจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรเรียงกระแส และวงจรควบคุม

ความเร็วมอเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อกระแสและแรงดันทั้งในเชิงขนาด (Amplitude) และมุม (Phase Angle) คือจะทำให้รูปสัญญาณมีขนาดและรูปร่างเบี่ยงเบน (Distortion) ไปจากสภาพตอนที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงได้ตั้งกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากผู้ใช้ไฟ (สถานประกอบการประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม) โดยกำหนดค่าขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟรายใดๆที่จุดต่อรวม ทั้งยังมีการบังคับใช้สำหรับผู้ใช้ไฟรายใหม่ให้แสดงรายการใช้ไฟฟ้าและคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเพื่อให้การไฟฟ้าตรวจสอบ หากเกินขีดจำกัดที่กำหนดจะไม่จ่ายไฟให้ ส่วนผู้ใช้ไฟรายเดิมหากการไฟฟ้าตรวจสอบแล้วพบว่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดผู้ใช้ไฟต้องทำการแก้ไขเพื่อลดผลกระทบไม่ให้เกินขีดจำกัดที่กำหนด ไมเช่นนั้นการไฟฟ้าจะเข้าไปดำเนินการแก้ไขให้ และคิดค่าใช้จ่ายกับผู้ใช้ไฟหรือการจ่ายไฟฟ้า แม้ว่าปัจจุบันข้อกำหนดนี้จะมีคามเข้มงวดกับผู้นิยมขอใช้ไฟรายใหม่ แต่ในความเป็นจริงแล้วหากมีการตรวจสอบกันอย่างจริงจังจะพบผู้ใช้ไฟส่วนมากล้วนสร้างปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัด ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟได้ก็จะเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟเอง และยังเป็นกรปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ของผู้ให้บริการไฟฟ้าด้วย

ตารางที่ 1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก สำหรับผู้ใช้ไฟรายใดๆที่จุดต่อรวม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม (kV)	ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) (%)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22, 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
⊕	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2	2	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

ตารางที่ 2 ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก สำหรับผู้ใช้ไฟรายใดๆที่จุดต่อร่วม

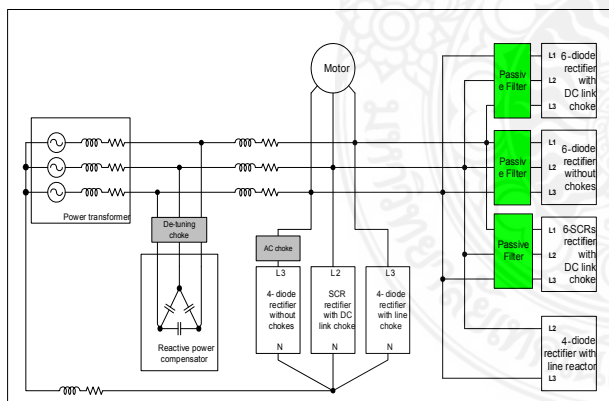
ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก รวมของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับที่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11 and 12	4	3	1.75
22, 24 and 33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

2. การปรับปรุงฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

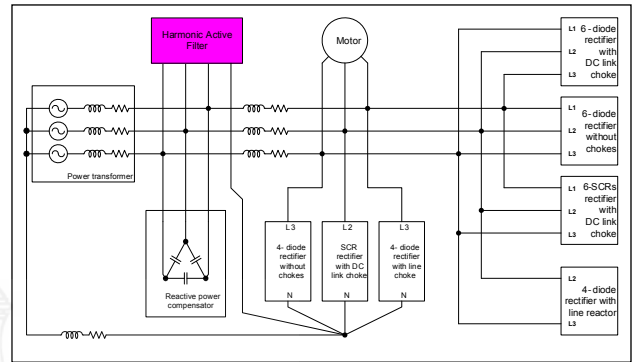
การแก้ไขหรือปรับปรุงฮาร์มอนิกทำได้โดยการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าไปที่ระบบ ซึ่งตัวกรองแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆคือ ตัวกรองแบบพาสซีฟ และตัวกรองแบบแอคทีฟ

ตัวกรองแบบพาสซีฟมีข้อเสียคือต้องทราบอันดับที่แน่นอนของฮาร์มอนิกแล้วจึงออกแบบตัวกรองพาสซีฟสำหรับฮาร์มอนิกอันดับนั้นๆซึ่งนิยมใช้ปรับปรุงที่สาขาย่อยของระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยต่อนุกรมกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 1

ตัวกรองแบบแอคทีฟสามารถปรับปรุงได้ทั้งที่สาขาย่อยหรือที่ระบบไฟฟ้าทั้งระบบ โดยการต่อขนานดังแสดงในรูปที่ 2 ตัวกรองแบบแอคทีฟยังสามารถปรับตัวได้เองเพื่อชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกช่วงเวลา จากข้อดีดังกล่าวทำให้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟมีความน่าสนใจและนำมาวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1 การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟในระบบไฟฟ้า

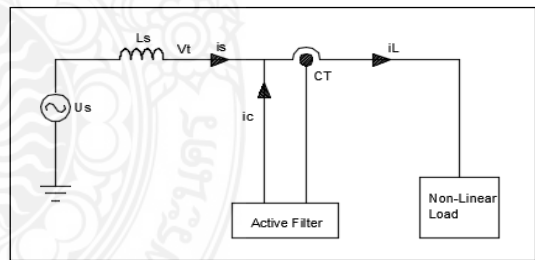


รูปที่ 2 การต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟในระบบไฟฟ้า

3. หลักการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

หลักการของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟคือ ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก จากนั้นจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดเท่ากับที่ตรวจจับได้แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเวลานั้น โดยส่วนประกอบหลักของตัวกรองแบบแอคทีฟมีสองส่วนคือ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม [1]

บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยแรงดันแหล่งจ่าย U_s เป็นแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave Form) แต่รูปคลื่นแรงดัน V_L เกิดการเบี่ยงเบนอันเนื่องจากโหลดที่ต่อเป็นโหลดที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

โดยกระแสโหลด i_L เกิดจากกระแสโหลดที่มีความถี่หลักมูล i_1

รวมกับกระแสโหลดที่มีความถี่ฮาร์มอนิก i_h ดังนี้

$$i_L(t) = i_1(t) + i_h(t) \quad (1)$$

เมื่อให้ i_s เป็นกระแสแอคทีฟที่อยู่ในเฟสเดียวกับแรงดัน U_s และ i_q เป็นกระแสรีแอคทีฟซึ่งมีมุมต่างจากกระแส i_s 90 องศา ดังนั้นกระแสโหลดที่มีความถี่หลักมูลจะมีค่าดังนี้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8

8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand

$$i_f(t) = i_s(t) + i_q(t) \quad (2)$$

แทนค่าจาก (2) ลงใน (1) จะได้

$$i_L(t) = i_s(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (3)$$

$$i_L(t) = i_s(t) + i_{comp}(t) \quad (4)$$

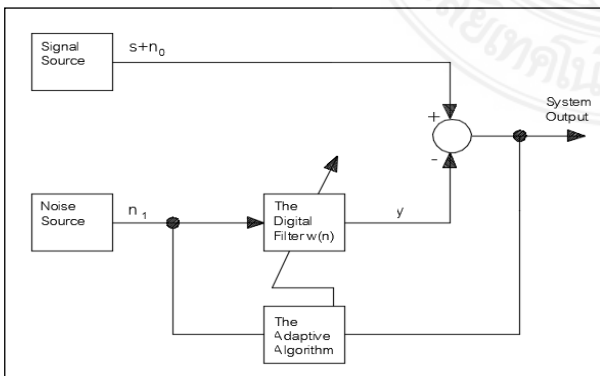
เมื่อกระแส i_{comp} คือกระแสที่ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟต้องจ่ายออกมาเพื่อปรับปรุงฮาร์มอนิก

4. ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง

ในส่วนนี้จะนำเสนอแนวคิดการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกชนิดปรับค่าได้เอง ซึ่งเป็นส่วนวงจรควบคุมของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เองอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของการตัดเสียงรบกวนซึ่งจะประมวลผลด้วยการแยกสัญญาณเสียงที่ต้องการออกจากสัญญาณเสียงรบกวน [2] โดยบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของทฤษฎีดังกล่าวนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4

เซ็นเซอร์หลักจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ s และสัญญาณรบกวน n_0 รวมกันเป็นสัญญาณ $s+n_0$ ซึ่งใช้เป็นสัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เอง โดยเซ็นเซอร์อีกตัวจะรับสัญญาณรบกวน n ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณ s แต่สัมพันธ์กับสัญญาณ n_0 โดย สัญญาณ n นี้เรียกว่าสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณทดแทน y และสัญญาณ y นี้ถูกจำลองให้ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และสุดท้ายสัญญาณเอาต์พุตของระบบก็คือการนำเอาสัญญาณ $s+n_0$ มาหักล้างกับสัญญาณ y ซึ่งจะได้ออกเป็นสัญญาณ $s+n_0-y$ [1]

ขั้นตอนวิธีปรับค่าได้เอง (The Adaptive Algorithm) เกิดจากการรับสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุตมาประมวลผลปรับค่า $w(n)$ เพื่อให้สัญญาณ y ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และทำเช่นนี้วนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณ y เข้าใกล้สัญญาณ n_0 มากที่สุด



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง

ในบทความนี้จะกล่าวถึงและเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่นิยมใช้สองชนิดคือ Least Mean Square (LMS) และ Recursive Least Square (RLS) โดยขั้นตอนวิธี LMS มีความนิยมใช้มากที่สุดในตัวกรองปรับค่าได้เอง ข้อดีคือมีความง่ายไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียคือมีความเร็วในการปรับตัวจนถึงจุดบรรจบช้ากว่าเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่น และมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตพอสสมการ [3] ค่าประมวลผล $w(n)$ ของขั้นตอนวิธี LMS หาได้จาก

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n) \cdot e(n) \quad (5)$$

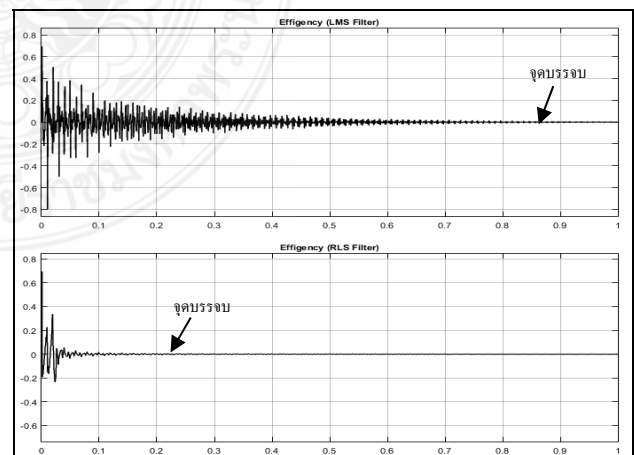
เมื่อ μ คือค่าคงที่ step size ($0 < \mu < 2$), $x(n)$ คือสัญญาณอ้างอิง n , และ $e(n)$ คือสัญญาณผิดพลาด $s+n_0-y$

ขั้นตอนวิธี RLS เป็นขั้นตอนวิธีที่ซับซ้อนกว่าขั้นตอนวิธี LMS แต่ข้อดีคือมีความเร็วในการปรับตัวจนถึงจุดบรรจบเร็วกว่าและมีผลกระทบจากสัญญาณ อินพุตน้อยกว่าขั้นตอนวิธี LMS [3] ค่าประมวลผล $w(n)$ ของขั้นตอนวิธี RLS หาได้จาก

$$w(n+1) = w(n) + \xi(n) \cdot e(n) \quad (6)$$

เมื่อ $\xi(n)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การได้เปรียบ (gain coefficient)

เมื่อจำลองการทำงานของขั้นตอนวิธี LMS และ RLS ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยตั้งค่า Step Size (μ) ของขั้นตอนวิธี LMS เป็น 0.07 และ Forgetting Factor ของขั้นตอนวิธี RLS เป็น 1 จะเห็นว่าขั้นตอนวิธี RLS ใช้เวลาในการวิ่งเข้าหาจุดบรรจบน้อยกว่า รวมทั้งช่วงเวลาก่อนและหลังจุดบรรจบจะมีการกระเพื่อมของสัญญาณน้อยกว่า ขั้นตอนวิธี LMS ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 นั่นคือเมื่อใช้ขั้นตอนวิธี RLS จะทำให้สัญญาณ y เข้าใกล้สัญญาณ n_0 ได้เร็วกว่า และสัญญาณเอาต์พุตมีความใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมากกว่าขั้นตอนวิธี LMS

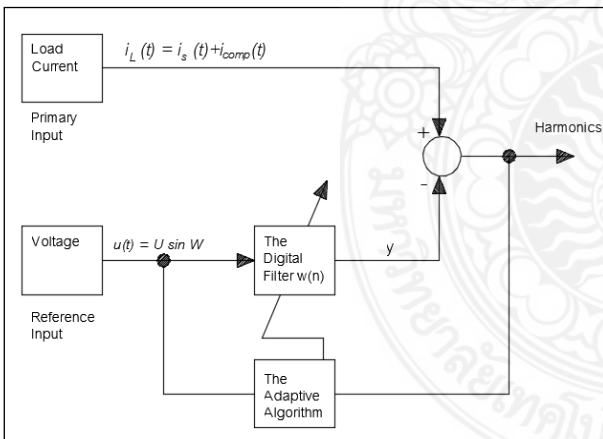


รูปที่ 5 ผลจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี LMS (บน) และขั้นตอนวิธี RLS (ล่าง)

5. การใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองเพื่อ ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเป็นสิ่งที่ยาก เนื่องจากปกติต้อง
รู้ขนาดและมุมของกระแสฮาร์มอนิกที่แท้จริง แต่อาจใช้วิธีหากระแส
ฮาร์มอนิกทางอ้อมหรือจากการวิเคราะห์ นั่นคือทำการวัดกระแสปกติ
(กระแสรวม) ที่มีความถี่หลักมูลและกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ จากนั้น
ทำการหักล้างกระแสความถี่หลักมูลออกไป ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือกระแส
ฮาร์มอนิกนั่นเอง [1] ซึ่งหลักการนี้จะเป็นหลักการเดียวกับทฤษฎีการใช้
ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4

บล็อกไดอะแกรมแสดงการประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณ
รบกวนชนิดปรับค่าได้เองมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้แสดงไว้ใน
รูปที่ 6 โดยสัญญาณกระแสโวลต์จะถูกตรวจจับด้วยหม้อแปลงกระแส
(Current Transformer) เมื่อพิจารณาจากสมการ (3.4) กระแสโวลต์คือ
ผลรวมของกระแส $i_s(t)$ และกระแส $i_{comp}(t)$ และจากทฤษฎีของตัวกรอง
ตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง สัญญาณอ้างอิงต้องสัมพันธ์กับ
สัญญาณที่ต้องการหักล้างออกจากระบบ กรณีนี้สัญญาณที่ต้องการ
หักล้างคือกระแส $i_s(t)$ ซึ่งมีมุมเฟสตรงกับแรงดันที่แหล่งจ่าย ส่วน
สัญญาณแรงดัน $u(t)$ นั้นรับมาจากหม้อแปลงแรงดันของแรงจ่าย
(Potential Transformer) และจะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง [1]



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมแสดงการประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิด
ปรับค่าได้เองมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

6. สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี LMS และขั้นตอนวิธี
RLS สำหรับตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง เห็นได้ว่า
ขั้นตอนวิธี RLS มีข้อดีกว่าคือความเร็วในการปรับจนถึงจุดบรรจบเร็ว

กว่า และมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตน้อยกว่า ถึงแม้ว่าการคำนวณจะ
ซับซ้อน ทำให้ต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูงและ
หน่วยความจำมากขึ้นก็ตาม แต่เมื่อนำหลักการของตัวกรองตัดสัญญาณ
รบกวนชนิดปรับค่าได้เองมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
การใช้ขั้นตอนวิธี RLS จะมีประสิทธิภาพ สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้
เร็วขึ้นและค่าผิดพลาดน้อยลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเพียง
เล็กน้อยกับผลที่ได้ก็นั้น ขั้นตอนวิธี RLS จึงมีความเหมาะสมที่จะวิจัย
และพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอดาปทีฟชนิด
ปรับตัวได้เองต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนในด้าน
ต่างๆเพื่อส่งบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Liu, "Adaptive Power Line Harmonic Detection For Active Filter Applications," Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, 2004.
- [2] B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [3] H. Quanzhen, G. Zhiyuan, G. Shouwei, S. Yong, and Z. Xiaojin, "Comparison of LMS and RLS Algorithm for Active Vibration Control of Smart Structures," ICMTMA 2011 3rd International Conference on (vol. 1), January 2011, pp. 745-748.
- [4] L. Gyugi and E.C. Strycula, "Active AC Power Filter," Conf Rec of IEEE-IAS Annual Meeting, October 1976, pp. 529-535.
- [5] L. Zhou and Z. Li, "A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method," IEEE Trans on Power Electronics, vol. 15, No. 4, July 2000, pp. 655-659.
- [6] B. Singh and K. Al-Haddad, "A review of Active Filters for Power Quality Improvement," IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 46, No. 5, October 1999, pp. 960-971.
- [7] T.L. Leung, S. Valiiviita, and S.J. Ovaska, "Adaptive and delayless Filtering System for Sinusoids with Varying Frequency," Southeastcon '99, IEEE Proceedings, March 1999, pp. 149-153.

การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธี RLS เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

Performance Test of RLS Algorithm for Detect The Harmonic Current of The Harmonic Active Filter

ชาญชัย พงษ์พาดิ¹ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์¹ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: chanchai@smarter.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เองด้วยขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีแอสต์สแควร์เพื่อใช้กับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ ซึ่งประยุกต์มาจากทฤษฎีของตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง โดยแต่เดิมทฤษฎีดังกล่าวใช้เพื่อการประมวลผลสัญญาณเสียง แต่ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟโดยทำการจำลองด้วยโปรแกรมแมตแลบ ซิมูลิงค์ จากผลการจำลองกับระบบไฟฟ้าในโรงงานที่สามารถทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกสัณ 3 กรณี แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถพัฒนาต่อไปเพื่อสร้างเป็นชุดต้นแบบในการใช้งานจริง

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิก, ตัวกรองแบบแอคทีฟ, ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เอง, ขั้นตอนวิธี RLS

Abstract

This paper presents the analysis efficacy of Recursive Least Square (RLS) to detect harmonic current for harmonic active filter which applied from noise-cancellation adaptive filter theory. The theory was originally used for audio signals processing, but this article developed the theory for harmonic active filter by simulation with MATLAB Simulink program. From simulation results of the electrical system in the factory that can made the harmonic current in three cases, the proposed method can detect the harmonic current effectively, and can be further developed to create a prototype in actual use.

Keywords: harmonic, active filter, adaptive filter, RLS algorithm

1. บทนำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง ได้ตั้งกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากสถานประกอบการประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม โดยกำหนดค่าขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟรายใดที่จุดต่อร่วม ทั้งยังมีการบังคับใช้สำหรับผู้ใช้ไฟรายใหม่ให้แสดงรายการใช้ไฟฟ้าและคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเพื่อให้การไฟฟ้าตรวจสอบหากเกินขีดจำกัดที่กำหนดจะไม่จ่ายไฟให้ ส่วนผู้ใช้ไฟรายเดิมหากการไฟฟ้าตรวจสอบแล้วพบว่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัด ผู้ใช้ไฟต้องทำการแก้ไขเพื่อลดผลกระทบไม่ให้เกินขีดจำกัดที่กำหนด ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟได้ก็จะเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟเองและยังเป็นการปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ของผู้ให้บริการ ไฟฟ้าด้วย

หนึ่งในวิธีการการแก้ไขหรือปรับปรุงฮาร์มอนิกทำได้โดยการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟเข้าไปที่ระบบ ตัวกรองแบบแอคทีฟสามารถใช้ปรับปรุงได้ทั้งที่สาขาย่อย หรือที่ระบบไฟฟ้าทั้งระบบ ซึ่งตัวกรองแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองจะมีความสามารถในการชดเชยความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกช่วงเวลา จากข้อดีดังกล่าวทำให้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟชนิดปรับค่าได้เองมีความน่าสนใจและนำมาวิเคราะห์ถึงวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

2. การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

2.1 หลักการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

หลักการของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟคือ ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก จากนั้นจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดเท่ากับที่ตรวจจับได้แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเข้าสู่ระบบ ไฟฟ้าเพื่อหักล้างกระแส

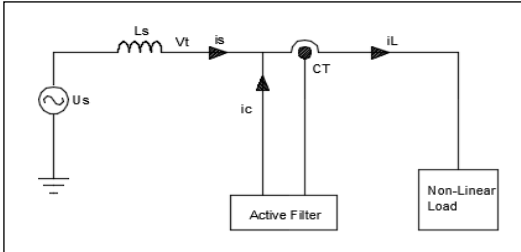
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเวลานั้น โดยส่วนประกอบหลักของตัวกรองแบบแอกทีฟมีสองส่วนคือ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม [1]

บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ

โดยกระแสโหลด i_L เกิดจากกระแสโหลดที่ความถี่หลักมูล i_f รวมกับกระแสโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก i_h ดังนี้

$$i_L(t) = i_f(t) + i_h(t) \quad (1)$$

เมื่อให้ i_s เป็นกระแสแอกทีฟที่อยู่ในเฟสเดียวกับแรงดัน U_s

และ i_q เป็นกระแสรีแอกทีฟซึ่งมีมุมต่างจากกระแส i_s 90 องศา ดังนั้นกระแสโหลดที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าดังนี้

$$i_f(t) = i_s(t) + i_q(t) \quad (2)$$

แทนค่าจาก (3.2) ลงใน (3.1) จะได้

$$i_L(t) = i_s(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (3)$$

$$i_L(t) = i_s(t) + i_{comp}(t) \quad (4)$$

เมื่อกระแส i_{comp} คือกระแสที่ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟต้องจ่ายออกมาเพื่อปรับปรุงฮาร์มอนิกนั่นเอง [1]

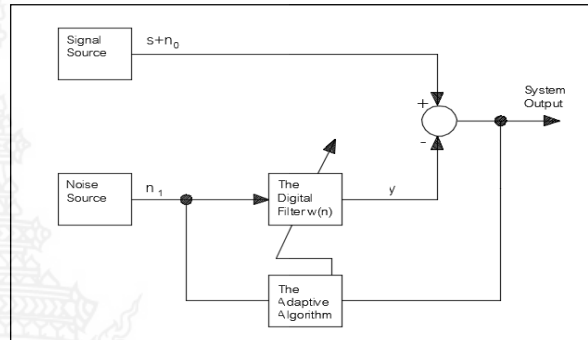
2.2 ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง

ในส่วนนี้จะนำเสนอแนวคิดการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกชนิดปรับค่าได้เอง ซึ่งเป็นส่วนวงจรควบคุมของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟ ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เองอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของการตัดเสียงรบกวนซึ่งจะประมวลผลด้วยการแยกสัญญาณเสียงที่ต้องการออกจากสัญญาณเสียงรบกวน [2] โดยบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของทฤษฎีดังกล่าวนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2

เซ็นเซอร์หลักจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ s และสัญญาณรบกวน n_0 รวมกันเป็นสัญญาณ $s+n_0$ ซึ่งใช้เป็นสัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ตัวกรองชนิดปรับค่าได้เอง โดยเซ็นเซอร์อีกตัวจะรับสัญญาณรบกวน n_1 ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณ s แต่สัมพันธ์กับสัญญาณ n_0 โดย สัญญาณ

n_1 นี้เรียกว่าสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณทดแทน y และสัญญาณ y นี้ถูกจำลองให้ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และสุดท้ายสัญญาณเอาต์พุตของระบบก็คือการนำเอาสัญญาณ $s+n_0$ มาหักล้างกับสัญญาณ y ซึ่งจะได้เป็นสัญญาณ $s+n_0-y$ [1]

ขั้นตอนวิธีปรับค่าได้เอง (The Adaptive Algorithm) เกิดจากการรับสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุตมาประมวลผลปรับค่า $w(n)$ เพื่อให้สัญญาณ y ใกล้เคียงกับสัญญาณ n_0 และทำเช่นนี้วนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณ y เข้าใกล้สัญญาณ n_0 มากที่สุด



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เอง

ขั้นตอนวิธีที่นิยมใช้มีสองชนิดคือลีสต์มีนสแควร์ (Least Mean Square: LMS) และรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ (Recursive Least Square: RLS) โดยลีสต์มีนสแควร์มีความนิยมใช้มากที่สุดในตัวกรองปรับค่าได้เองมีความง่ายไม่ซับซ้อน แต่ความเร็วในการปรับตัวจนถึงจุดบรรจบช้ากว่าวิธีอื่น และมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตพอสมควร [3] ค่าประมวลผล $w(n)$ ของขั้นตอนวิธีลีสต์มีนสแควร์หาได้จาก

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n) \cdot e(n) \quad (5)$$

เมื่อ μ คือค่าคงที่ step size ($0 < \mu < 2$), $x(n)$ คือสัญญาณอ้างอิง n_1 และ $e(n)$ คือสัญญาณผิดพลาด $s+n_0-y$

ขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์มีความซับซ้อนกว่าลีสต์มีนสแควร์ แต่ข้อดีคือมีความเร็วในการปรับตัวจนถึงจุดบรรจบเร็วกว่า และมีผลกระทบจากสัญญาณอินพุตน้อยกว่าลีสต์มีนสแควร์ [3] ค่าประมวลผล $w(n)$ ของขั้นตอนวิธีรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์หาได้จาก

$$w(n+1) = w(n) + \xi(n) \cdot e(n) \quad (6)$$

เมื่อ $\xi(n)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การได้เปรียบ (gain coefficient) จากข้อดีของรีเคอร์ซีฟลีสต์สแควร์ประกอบกับเทคโนโลยีตัวประมวลผลปัจจุบันที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกลง ทำให้ตัวกรองแบบแอกทีฟปรับชนิดปรับตัวได้เองมีความน่าสนใจ แต่จำเป็นต้องทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกก่อนนั่นเอง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

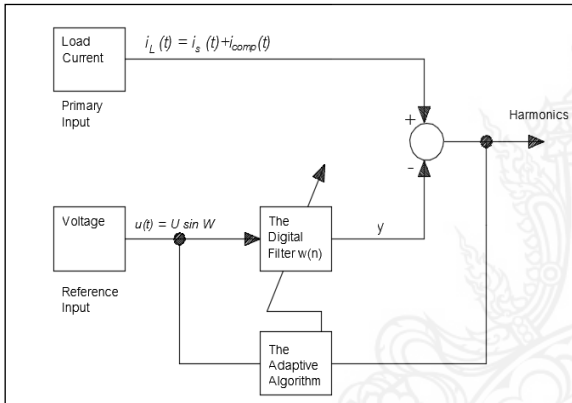
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

2.3 การใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองเพื่อ

ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเป็นสิ่งที่ยาก เนื่องจากปกติต้องรู้ขนาดและมุมของกระแสฮาร์มอนิกที่แท้จริง แต่อาจใช้วิธีการกระแสฮาร์มอนิกทางอ้อมหรือจากการวิเคราะห์ นั่นคือทำการวัดกระแสปกติ (กระแสรวม) ที่มีความถี่หลักมูลและกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ จากนั้นทำการหักล้างกระแสความถี่หลักมูลออกไป ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือกระแสฮาร์มอนิกนั่นเอง [1] ซึ่งหลักการนี้จะเป็นหลักการเดียวกับทฤษฎีการใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.2

บล็อกไดอะแกรมแสดงการประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการประยุกต์ใช้ตัวกรองตัดสัญญาณรบกวนชนิดปรับค่าได้เองมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

3. การทดสอบเพื่อตรวจสอบการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกชนิดปรับค่าได้

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกชนิดปรับค่าได้ด้วยขั้นตอนวิธีเรกซ์ซีฟลีสต์สแควร์ ว่ามีประสิทธิภาพเป็นอย่างไรด้วยโปรแกรมแมตแลบซิมูลิงค์ โดยทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 กรณี ซึ่งครอบคลุมทุกระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกและการเบี่ยงเบนฮาร์มอนิก

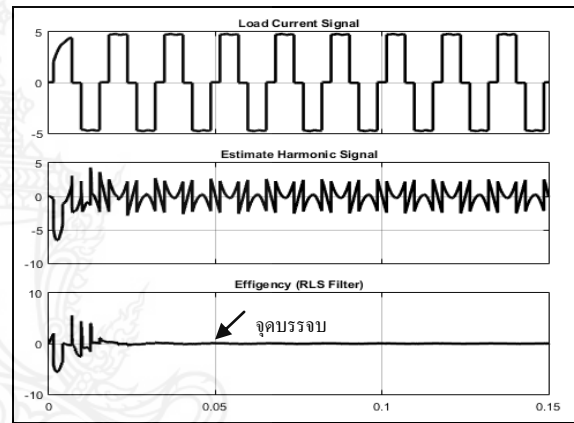
การจำลองระบบไฟฟ้าใน 3 กรณี จะจำลองโดยใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 110 V_(LN) 60 เฮิรตซ์ โดยต่ออยู่กับเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L และ R-L-C ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกประเภทนี้พบได้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

กรณีที่ 1 ให้ค่า R = 40Ω, L = 10 mH

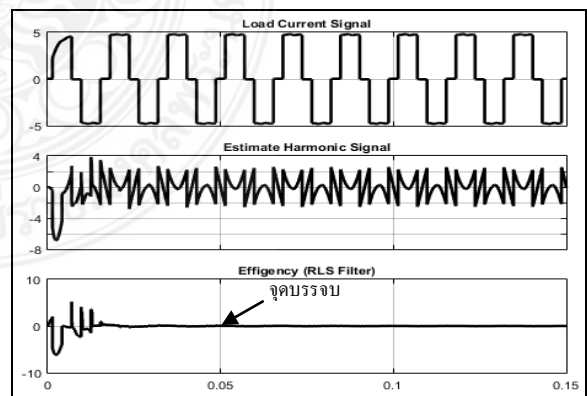
กรณีที่ 2 ให้ค่า R = 40Ω, L = 10 mH และ C = 10μF

กรณีที่ 3 ให้ค่า R = 40Ω, L = 10 mH และแหล่งจ่าย 3 เฟสไม่สมดุล โดยต่อโหลด R-L ที่แหล่งจ่ายไฟดังนี้ เฟสที่ 1, R = 40 Ω และ L = 10 mH เฟสที่ 2, R = 30 Ω และ L = 7.5 mH ส่วนเฟสที่ 3, R = 20 Ω และ L = 5mH

ผลการทดสอบในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีเรกซ์ซีฟลีสต์สแควร์ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบปรับค่าได้เอง เมื่อระบบไฟฟ้าต่ออยู่กับเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L ในกรณีที่ 1 และโหลด R-L-C ในกรณีที่ 2 ซึ่งระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบแหล่งจ่ายสมดุลจะใช้เวลาปรับตัวหรือค้นพบจุดบรรจบประมาณ 0.05 วินาที ซึ่งสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้จริง และเนื่องจากเป็นระบบแหล่งจ่าย 3 เฟสแบบสมดุล จึงนำผลการทดลองมาแสดงเพียง 1 เฟสเท่านั้น



รูปที่ 4 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 กระแสรวมของโหลด (บน) กระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ (กลาง) ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเรกซ์ซีฟลีสต์สแควร์ (ล่าง)



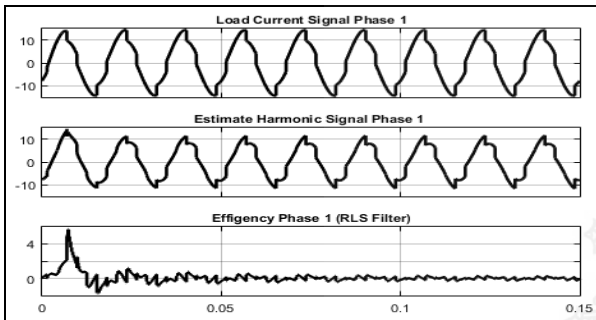
รูปที่ 5 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 กระแสรวมของโหลด (บน) กระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ (กลาง) ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเรกซ์ซีฟลีสต์สแควร์ (ล่าง)

บทความวิจัย

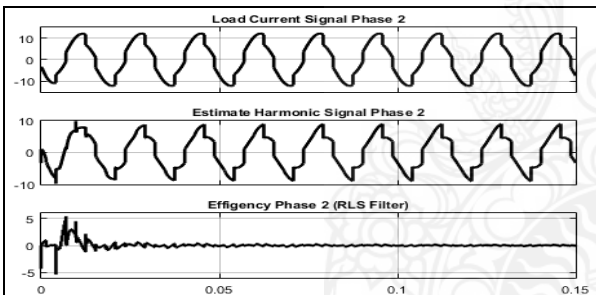
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

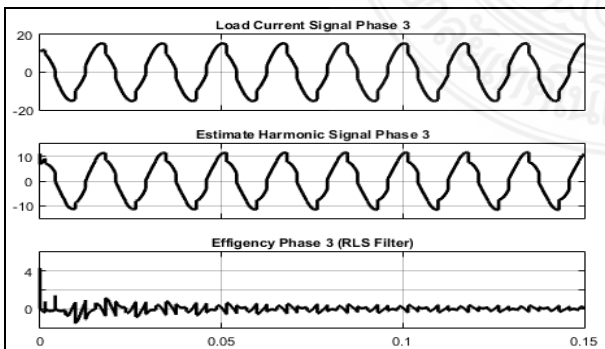
กรณีที่ 3 เมื่อใช้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุลต่อกับเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L นั้นผลการจำลองจะแยกออกเป็นแต่ละเฟสดังนี้ โดยในรูปที่ 6 แสดงผลการทดลองของเฟสที่ 1, รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองของเฟสที่ 2 และ รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองของเฟสที่ 3 จากผลการจำลองเห็นได้ว่าการใช้ขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เองจะสามารถตรวจจับกระแสรบกวนได้อย่างรวดเร็วและเห็นผลชัดเจนในทุกเฟส



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 เฟสที่ 1 กระแสรวมของ โหลด (บน) กระแสรบกวนที่ตรวจจับได้ (กลาง) ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เอง (ล่าง)



รูปที่ 7 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 เฟสที่ 2 กระแสรวมของ โหลด (บน) กระแสรบกวนที่ตรวจจับได้ (กลาง) ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เอง (ล่าง)



รูปที่ 8 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 เฟสที่ 3 กระแสรวมของ โหลด (บน) กระแสรบกวนที่ตรวจจับได้ (กลาง) ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เอง (ล่าง)

4. สรุป

จากผลการจำลองเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เองในการตรวจจับกระแสรบกวน จะสามารถตรวจจับกระแสรบกวนในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่มีแหล่งจ่ายแบบสมดุลและไม่สมดุลเมื่อใช้งานกับวงจรเรกติไฟเออร์ที่มีโหลด R-L และ R-L-C ได้อย่างรวดเร็วและชัดเจน ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ขั้นตอนวิธีเรกติไฟเออร์ที่ปรับค่าได้เองกับตัวกรองรบกวนแบบแอกทีฟชนิดปรับค่าได้เองด้วยการพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบเพื่อใช้งานจริงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนบทความนี้ในด้านต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Liu, "Adaptive Power Line Harmonic Detection For Active Filter Applications," Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, 2004.
- [2] B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [3] H. Quanzhen, G. Zhiyuan, G. Shouwei, S. Yong, and Z. Xiaojin, "Comparison of LMS and RLS Algorithm for Active Vibration Control of Smart Structures," ICMTMA 2011 3rd International Conference on (vol. 1), January 2011, pp. 745-748.
- [4] L. Gyugi and E.C. Strycula, "Active AC Power Filter," Conf Rec of IEEE-IAS Annual Meeting, October 1976, pp. 529-535.
- [5] L. Zhou and Z. Li, "A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method," IEEE Trans on Power Electronics, vol. 15, No. 4, July 2000, pp. 655-659.
- [6] B. Singh and K. Al-Haddad, "A review of Active Filters for Power Quality Improvement," IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 46, No. 5, October 1999, pp. 960-971.
- [7] T.L. Leung, S. Valiviita, and S.J. Ovaska, "Adaptive and delayless Filtering System for Sinusoids with Varying Frequency," Southeastcon '99, IEEE Proceedings, March 1999, pp. 149-153.

Adaptive Harmonic Current Detection Implemented by Using Digital Signal Processor

Sakhon Woothipatanapan

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon/Faculty of Engineering, Bangkok, Thailand

Email: sakhon.w@rmutp.ac.th

Chanchai Prugpadee

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon/Faculty of Engineering, Bangkok, Thailand

Email: chanchai@smarteres.com

Abstract—This paper aims to develop an efficient method for accurate detections of harmonic current distortions in power system for control of an active harmonic filter. The adaptive noise cancellation theory was originally developed for noise signal processing is applied for this control for active harmonic filter. There are many algorithms for adaptive noise cancellation, which lease mean square algorithm and recursive least square algorithm are most used. Since recursive least square algorithms is more effective. Therefore, this research has carried out a real time implementation to detect harmonic current distortion in power system by using digital signal processor kit TMS320C6713 for the adaptive harmonic filter.

Index Terms—active harmonic filter, lease mean square, recursive least square, digital signal processor

I. INTRODUCTION

One of the major power quality concern in power system is harmonic current distortion. These disturbances may be cause by nature such as lightning or by non-linear load such as large power electronic equipment, for example the high-power electric drive this equipment develop for energy saving but the same time also created harmonic current distortion. The naturally occurred disturbances are usually transients that can be protect by protective devices such as surge arresters, and this disturbance are last for a short duration. But the disturbances by non-linear load will stay in the system as long as the load are operating. These disturbances can cause abnormal operation of other equipment nearby or even damage them. Also, can affect the operation of the equipment that created the disturbances.

Active Harmonic Filter (AHF) is the equipment that can effective eliminated the harmonic disturbances caused by non-linear load on the power system. An active harmonic filter is basically a power electronic inverter that, can detect the harmonic current distortion in the power system, and inject equal-but-opposite amount of compensating harmonics current in to the power system to cancel the original harmonic.

An AHF basically consist of power inverter circuit and control circuit. First, the common operation of AHF is the harmonic detecting unit in the control circuit get the signal wave form of the power system voltage and current, and then computes the required compensation current. Second, based on the computed compensation current, the control unit generates firing signals to drive the inverter circuit. Finally, according to the firing signal, the inverter generates the compensation currents and injects them into the power system to eliminate the harmonic current distortion [1].

The most important step for the compensation current of AHF is harmonic current detection. If the harmonics are not detected accurately, the power system can be either under-compensated or over-compensated.

There have been many methods proposed for the detection of harmonic current in both frequency-domain and time-domain, but the applications of these methods are limited because of the restriction and assumptions made during the development of the theory. Their performances vary depending on the mains conditions and power electronic loads.

In this paper an adaptive harmonic current detection method is developed to overcome the above-mentioned problems. This method adapts very well to the change of loading and provides accurate detections of power system current distortions.

II. BASIC CONCEPT OF AHF

The basic concept of AHF simply uses a power electronic inverter to inject equal but opposite amount of harmonic current into the power system to cancel the original one. A typical AHF circuit is composed of a power circuit and a control circuit. The power circuit is commonly a standard inverter. The control unit consist of three subunit, a harmonic detecting unit, a filter processing unit and an inverter firing unit. First the control unit samples the instantaneous waveforms of the power system voltage and current, then determines the waveforms of the compensation current required for eliminate of the system harmonics. Based on the computed compensation current waveform, the control unit generates switching signal to the inverter. The

inverter then injects the compensation current into the power system to cancel the harmonic current.

The basic operation principle of AHF shown in Fig. 1. U_S is the voltage source, L_S is the source impedance including the power system impedance, i_s is the supply current, V_t is supply voltage, i_c is the compensating current, i_L is the load current, and CT is the current transformer or transducer. The non-linear load generates harmonics current on the power system, and the active filter injects opposite harmonics current to cancel them [2].

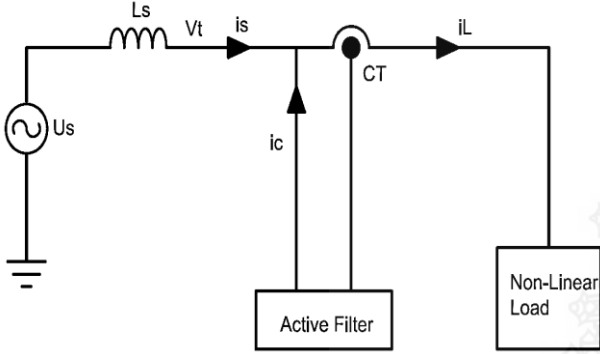


Figure 1. A simple circuit block diagram of AHF.

The wave form of voltage source U_S originally is sinusoidal but the voltage on the power system V_t becomes distorted when supplying non-linear load. This V_t is a function of load current. The non-linear load draws non-sinusoidal current that can be resulted into harmonic compensation using Fourier transformation. The load current can be written as:

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

$$i_L(t) = i_l(t) + i_h(t) \quad (2)$$

Where i_l is the fundamental current component and i_h is the summation of the harmonics current components. The fundamental current component i_l can be further decomposed into two parts:

$$i_l(t) = i_s(t) + i_q(t) \quad (3)$$

Where i_s is the active current component which has the same frequency and in phase with the source voltage u_s , and i_q is the reactive current component which is 90 degrees out of phase of i_s . Equation (2) can be rewritten as:

$$i_L(t) = i_s(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (4)$$

From (4) shown that actually both the harmonic current i_h and the reactive current i_q are needed to be compensated by AHF i_{comp} . Equation (4) can be rewritten as:

$$i_L(t) = i_s(t) + i_{comp}(t) \quad (5)$$

III. CONCEPT OF ADAPTIVE NOISE DETECTION

This section presents the concept of an effective adaptive harmonic detection which is based on the theory of adaptive noise cancellation. The theory was originally for signal processing operation to cancel the noise combined in a signal or to separate the good signals from the noisy signals [3], as shown in Fig. 2.

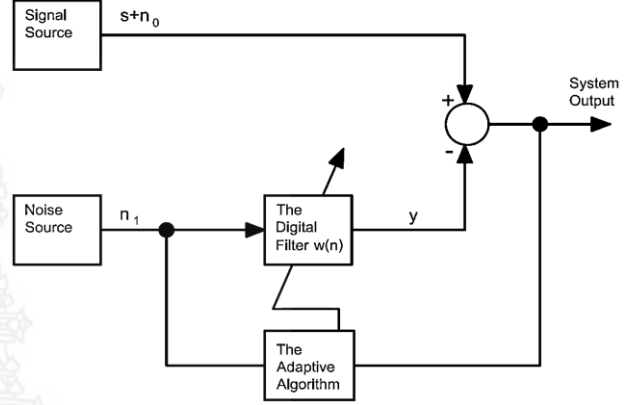


Figure 2. Block diagram of adaptive noise cancellation.

A signal is transmitted over a channel to a sensor that receives the signal "s" plus an uncorrelated noise " n_0 ". The combined signal and noise " $s+n_0$ " from the primary input to the noise canceller. A second sensor receives a noise " n_1 " that is uncorrelated with the signal but correlated in some unknown way with the noise " n_0 ". This sensor provides the reference input to the noise canceller. The noise " n_1 " is used to produce a compensating signal " y " that is close replica of " n_0 ". Then this compensating signal is subtracted from the primary input " $s+n_0$ " to produce the system output " $s+n_0+y$ ".

The adaptive noise canceller processes the reference input " n_1 " and output signal, automatically adjusts the compensating signal " y " through a least-squares algorithm " \mathcal{O}_n " until the compensating signal " y " is close to noise signal " n_0 " in other word until its output continuously to minimize the error signal.

Many algorithms can be used for the adaptive noise cancellation, Least Mean Square (LMS) algorithm and Recursive Least Square (RLS) algorithm are the most common used.

LMS is most simple and computationally less expensive algorithm. Weight update equation for LMS is given by (6)

$$\mathcal{O}(n+1) = \mathcal{O}(n) + \mu x(n) \cdot e(n) \quad (6)$$

Where $\mathcal{O}(n)$ is weight vector for LMS adaptive filter. μ is learning rate or step size and $0 < \mu < 1$.

RLS is relatively complex algorithm as compared to LMS algorithm. Also performance of RLS interms of convergence and Mean Square Error (MSE) is better than LMS. RLS adaptation algorithm filter coefficient adaptation $\mathcal{O}(n)$ is given by (7).

$$\hat{x}(n) = \hat{x}(n-1) - k(n) \cdot e(n) \quad (7)$$

Where $k(n)$ is RLS algorithm gain coefficient.

The efficiency of LMS and RLS algorithm are shown in Fig. 3. These algorithms are simulated by MATLAB Simulink, LMS algorithm step size (μ) is 0.07 and the RLS algorithm forgetting factor is 1. The RLS algorithm has the advantage in faster process adaptive to the end point than LMS algorithm and less effected to the input signal even the calculation processing is more complicated than LMS and required more higher performance processor. Due to the technology of processor in the present day there are sufficient to calculate RLS algorithm. So this research will focus on RLS algorithm [4]-[5].

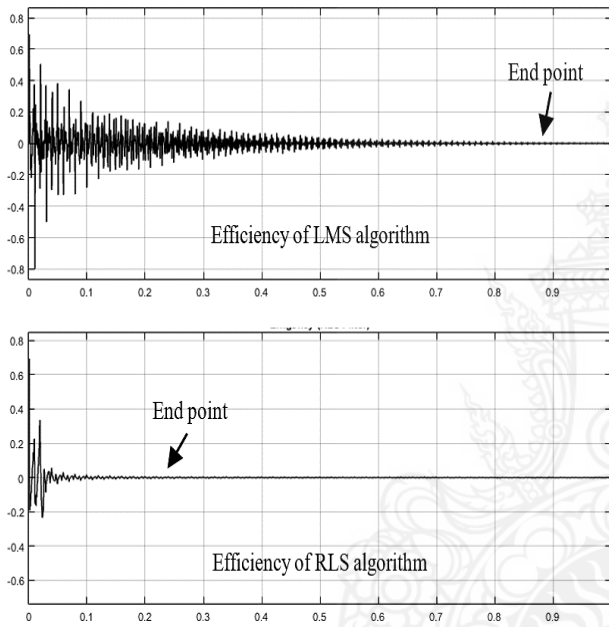


Figure 3. Efficiency of LMS algorithm (top), efficiency of RLS algorithm (bottom).

IV. APPLICATION OF ADAPTIVE NOISE CANCELLATION FOR HARMONIC CURRENT DETECTION

It is quite difficult to determine the harmonic current from the load current in power system. But if the fundamental component of the power system can be obtained, the total harmonic distortion then can be calculated by subtracting the fundamental component from the total load current. This is same to the adaptive noise cancellation concept.

Fig. 4 shows the block diagram for the active filter control using the adaptive noise cancellation algorithm for power system harmonic current detection. The primary input signal (i_L) from current transformer (CT) that transformed from power system load current. From (5), power system load current $i_L(t)$ is combination of $i_s(t)$ and $i_{comp}(t)$. Since voltage source have fundamental frequency and in-phase with $i_s(t)$. According to adaptive noise cancellation theory, the reference signal is correlated in some unknown way with the noise. Therefore, reference signal is source voltage signal $u(t)$.

That, get from potential transformer which connect from source voltage.

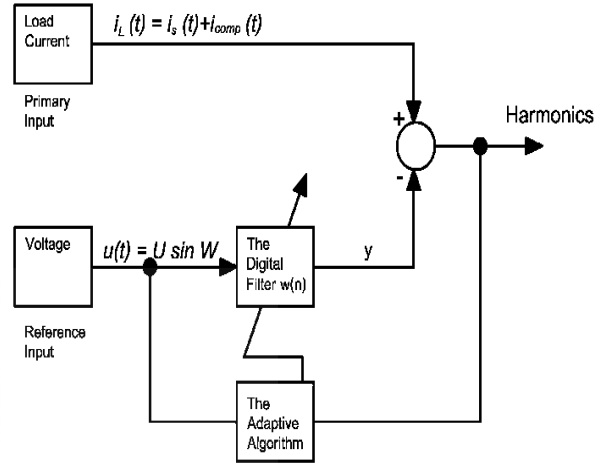


Figure 4. Application of adaptive noise cancellation for power system harmonic current detection.

V. DIGITAL SIGNAL PROCESSOR KIT (DSK)

Digital Signal Processors (DSP) are concerned primary with real time signal processing [6]. Digital signal processors are used for a wide range of applications which includes communication, control, image processing, also adaptive noise cancellation for speech processing. These processors very cost effective and can be reprogrammed easily for different application.

The C6713 DSK is a low-cost standalone development platform that enables users to evaluate and develop applications for the TI C67xx DSP family, block diagram of DSP TMS320C6713 from Texas Instruments is shown in Fig. 5. The DSK also serves as a hardware reference design for the TMS320C6713 DSP. The DSP on the 6713 DSK interfaces to on-board peripherals through a 32-bit wide EMIF (External Memory Interface). The SDRAM, Flash and CPLD are all connected to the bus. EMIF signals are also connected daughter card expansion connectors which are used for third party add-in boards [7], physical overview of DSP TMS320C6713 from Texas Instruments is shown in Fig. 6.

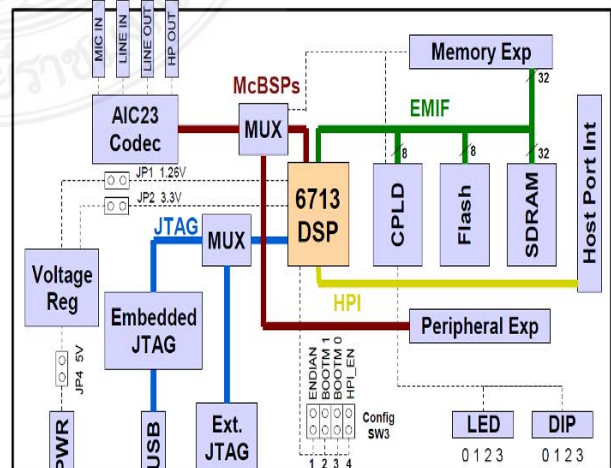


Figure 5. Block diagram of DSP TMS320C6713.

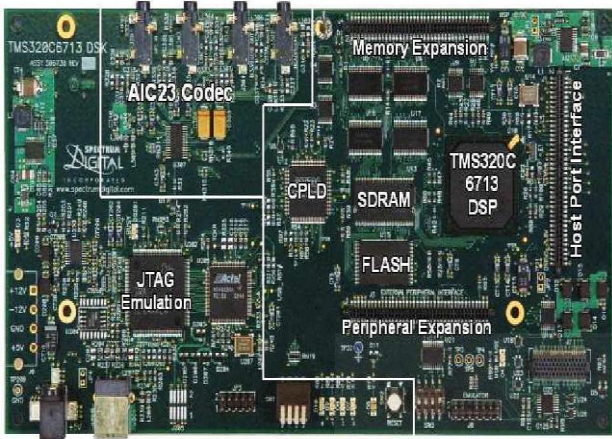


Figure 6. Physical overview of DSP TMS320C6713.

MATLAB is used as an interface for calling code composer studio (CCS) and then the program loaded into the TMS320C6713 [8]. First of all MATLAB code for the desired algorithm is written and then simulated for obtaining the result in MATLAB graph window. Diagram of MATLAB interfacing with DSP is shown in Fig. 7. However, the code written for MATLAB or the designed Simulink model can be direct loaded into TMS320C6713 then we can also perform some real time result depending upon the used algorithm [9]-[11].

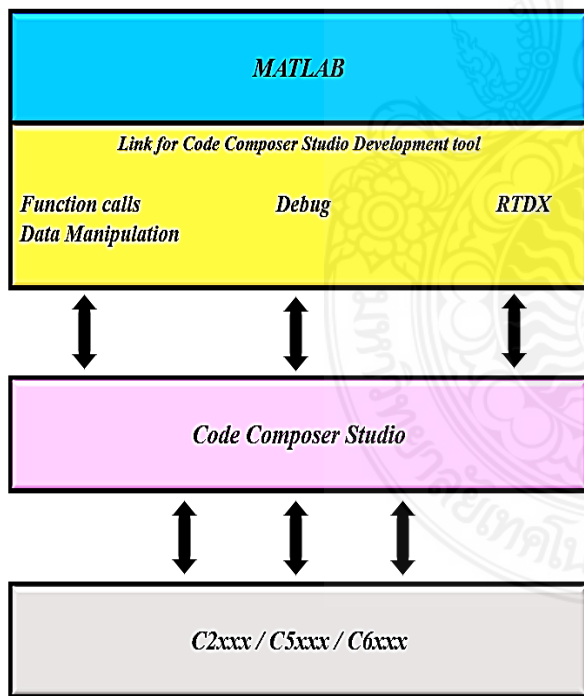


Figure 7. MATLAB interfacing with DSP.

VI. HARDWARE IMPLEMENTATION

Best result in simulation were obtained using RLS algorithm therefore we will use RLS algorithm in our hardware implementation. Although computational cost of RLS algorithm is high as compared to LMS and others algorithm. Hardware for adaptive harmonic current detection block diagram is shown in Fig 8.

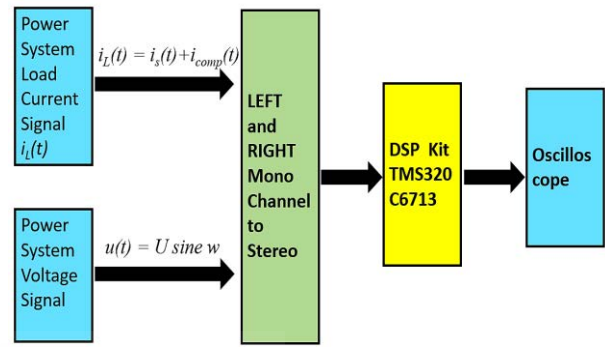


Figure 8. Hardware setup block diagram.

The power system load current signal (i_L) is used as original/desired signal and power system voltage signal (u) which same fundamental frequency and in-phase with active current (i_s). These both signals were then converted to stereo signal via stereo connector and used to input data to Digital Signal Processor Kit (DSK). Analog to Digital Converter (ADC) was used to sampling the input signal. Block diagram of adaptive harmonic current detection by RLS algorithm running by using TMS320C6713 DSK as shown in Fig. 9.

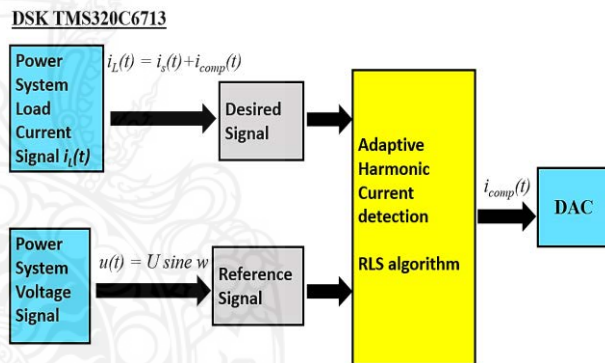


Figure 9. Harmonic current detection implementation.

VII. CONCLUSION

From the study, the adaptive noise cancellation which originally from noise signal processor to detect harmonic current in powers, there are many algorithms can be used. Even the Recursive Least Square algorithm needs more computation, but its algorithm also give better efficiency than other algorithm. We develop the noise cancellation by Recursive Least Square algorithm to detecting harmonic current in power system. Since DSP usually are used in communication, control, image processing also noise signal cancellation hardware work. Based on the preliminary study, DSP TMS320C6713 can apply to be the hardware for harmonic current detection of active harmonic filter in power system.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the contributions of Rajamangala University of Technology Phra Nakhon for funding research.

REFERENCES

- [1] W. Liu, "Adaptive Power Line Harmonic Detection for Active Filter Applications". Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, 2004.
- [2] L. Gyugi and E. C. Strycula, "Active AC Power Filter," *Conference of IEEE-IAS Annual Meeting*, October 1976, pp. 529-535.
- [3] B. Widrow and S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [4] H. Quanzhen, G. Zhiyuan, G. Shouwei, S. Yong and Z. Xiaojin. "Comparison of LMS and RLS Algorithm for Active Vibration Control of Smart Structures". In: ICMTMA 2011 3rd International Conference on (vol. 1), January 2011, pp. 745-748.
- [5] G. Singh, K. Savita, S. Yadav and V. Purwar, "Design of Adaptive Noise Canceller Using LMS Algorithm" *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*, Volume 3, Issue 3, May 2013, pp.85-89.
- [6] N. Kehtarnavaz. "Real-time digital signal processing based on the TMS320C6000". Elsevier; 2005.
- [7] Spectrum Digital, Inc. "TMS320C6713 DSK Technical Reference". rev.B. November 2003
- [8] R. K. Thenua and S. K. Agrawal, "Hardware Implementation of Adaptive Algorithms for Noise Cancellation", *International Journal of Information and Electronics Engineering*, Volume 2, No. 2, March 2012.
- [9] S. Rathnakara and V. Udayashankara, "Real Time System Identification of Speech Signal Using TMS320C6713", *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing (IOSR-JVSP)*, Volume 7, Issue 2, Ver. I (March – April 2017), PP 20-25.
- [10] V. J. Nayak and M. I. Patel, "Simulation of Adaptive Noise Cancellation", *Indian Streams Research Journal (ISRJ)*, Volume 2, Issue. 10, April. 2013, pp.2-7.
- [11] P. M. Awachat and S. S. Godbole, "A Design Approach For Noise Cancellation In Adaptive LMS Predictor Using MATLAB", *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Volume 2, Issue 4, July – August 2012, pp. 2388-2391.

Sakhon Woothipatanapan was born in 1973 at Bangkok, Thailand. He received his B. Eng. degree in electrical engineering from the Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathum Thani, Thailand, in 1997. He received his M. Eng. and D. Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand in 2002 and 2015, respectively. Dr.Sakhon is currently an assistant professor at the department of electrical engineering,



faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand. His current research interests include power electronics, soft-switching power converters, and harmonic filter.

Chanchai Prugpadee was born in 1972 at Bangkok, Thailand. He received his B. Eng. degree in instrumentation engineering from the King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 1996. He is currently study master degree in electrical engineering at Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), Bangkok, Thailand. His current research interests in power quality especially in active harmonic filter.



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายชาญชัย พุกษ์พาดิ
วัน เดือน ปีเกิด 27 สิงหาคม 2515
ภูมิลำเนา อำเภอเมือง จังหวัดระยอง
ประวัติการศึกษา

<u>วุฒิการศึกษา</u>	<u>ชื่อสถาบัน</u>	<u>ปีที่สำเร็จการศึกษา</u>
ปริญญาตรี วิศวกรรมการวัดและควบคุม ทางอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2539
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ไฟฟ้ากำลัง	สถาบันเทคโนโลยีสยามงคลวิทยา เขตเทคนิคกรุงเทพ	พ.ศ. 2536
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ไฟฟ้ากำลัง	โรงเรียนอาชีวะดอนบอสโก กรุงเทพ	พ.ศ. 2524

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ผู้อำนวยการฝ่ายบริหารและฝ่ายวิศวกรรม บริษัทสมาร์ทเอ็นจิเนียริงเซอร์วิสเสสจำกัด