



การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ

HARMONIC DISTURBANCE REDUCTION

USING ADAPTIVE, WIENER, AND PASSIVE FILTERS



ฉิมรอน หะวอแม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

HARMONIC DISTURBANCE REDUCTION
USING ADAPTIVE, WIENER, AND PASSIVE FILTERS



IMRON HAROMAE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ

ของ

อิมรอน หะรอแม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิตร์ มาตรา)

ชื่อเรื่อง	การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ
ผู้วิจัย	อิมรอน หะรอแม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียว โดยจะต่อโหลดอินดักทีฟและโหลดมอเตอร์ สำหรับเทคนิคที่นำเสนอในการลดทอนองค์ประกอบฮาร์มอนิก ได้แก่ การใช้วงจรถูกแบบพาสซีฟ วงจรถูกแบบวีเนอร์ (Wiener filter) และวงจรถูกแบบปรับค่าได้ (adaptive filter) โดยอัลกอริทึมของวงจรถูกแบบปรับค่าจะใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (LMS) วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบปกติ (NLMS) วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบรัวไหล (LLMS) และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบวนซ้ำ (RLS) โดยงานวิจัยนี้จะพิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดฮาร์มอนิกของคลื่นกระแสขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ ด้วยการให้เทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่วงจรถูก ซึ่งจะอ้างอิงกับมาตรฐาน IEEE std 519-1992 ในการจำกัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมไม่ให้มีค่าที่สูงเกินกว่ากำหนด จากการทดลองสามารถสรุปได้สองกรณี ได้แก่ กรณีโหลดอินดักทีฟ วงจรถูกทั้งสามแบบสามารถลดฮาร์มอนิกได้ถึง 50% และพบว่าวงจรถูกแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบวนซ้ำ ให้ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.16% 1.14% 1.02% 0.94% ตามลำดับ ส่วนวงจรถูกแบบวีเนอร์และวงจรถูกแบบพาสซีฟให้ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.72% และ 2.06% สำหรับกรณีโหลดมอเตอร์ วงจรถูกแบบปรับค่าได้และแบบพาสซีฟสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกได้ถึง 50% เช่นกัน ยกเว้นวงจรถูกแบบวีเนอร์ไม่สามารถลดฮาร์มอนิกได้เนื่องจากคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เป็นสัญญาณที่แปรเปลี่ยนตามเวลาหรือสัญญาณที่ไม่คงที่ ทำให้การกรองของวงจรถูกแบบวีเนอร์ไม่สมบูรณ์ ซึ่งวงจรถูกแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบวนซ้ำ ให้ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.39% 0.53% 0.20% 0.98% ตามลำดับ ส่วนวงจรถูกแบบพาสซีฟให้ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.26% โดยผลการจำลองทั้งหมดอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-1992 ที่กำหนดไว้ ยกเว้นวงจรถูกแบบวีเนอร์สำหรับโหลดมอเตอร์

คำสำคัญ : ตัวกรองวีเนอร์, ตัวกรองแบบปรับค่าได้, อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว, ตัวกรองแบบพาสซีฟ, อัลกอริทึมแบบ LMS, อัลกอริทึมแบบ NLMS, อัลกอริทึมแบบ LLMS, อัลกอริทึมแบบ RLS, ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

Title	HARMONIC DISTURBANCE REDUCTION USING ADAPTIVE, WIENER, AND PASSIVE FILTERS
Author	IMRON HAROMAE
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Associate Professor Vuttipon Tarateeraseth , Ph.D.

This thesis aims to compare the effectiveness of harmonic disturbance reduction using adaptive, Wiener, and passive filters. For the adaptive filters, various algorithms are implemented, including least mean square (LMS), normalized least mean square (NLMS), leaky least mean square (LLMS), and recursive least square (RLS). The single-phase unipolar pulse width modulation (PWM) inverter with the inductive and the motor loads was chosen as a noise source. The simulated results showed that the inverter connected with all types of filters and could suppress total harmonic distortion (THD) up to 50%. The THDi of the single-phase inverter connected with inductive load using Wiener and passive filters were 1.72% and 2.01%, respectively. However, the THDi of adaptive filter using LMS, LLMS, NLMS, and RLS is 1.16%, 1.14%, 1.02%, and 0.94%, respectively. In addition, for the motor load, the simulated results indicated that all type of filters provided the best performance in term of THDi reduction, except for the Wiener filter. The THDi of inverter with passive and adaptive filters using LMS, LLMS, NLMS, and RLS are 2.26%, 1.39%, 0.53%, 0.20%, and 0.98%, respectively. Furthermore, all types of filters can suppress harmonics within the IEEE std 519-1992, apart from the case of the inverter connected with motors using Wiener filter.

Keyword : total harmonics distortion, adaptive filter, Wiener filter, passive filter, single-phase inverter, LMS, NLMS, LLMS, RLS

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่องจากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญาานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิประสาทความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดามารดา และครูอาจารย์ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

อิมรอน หารอแม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฑ
สารบัญรูปภาพ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต.....	3
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	3
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสัญญาณรบกวนชนิดต่างๆ.....	4
2.2 องค์ประกอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ.....	6
2.3.1 ความหมายของฮาร์มอนิก	6
2.3.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	8

2.3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม	9
2.3.4 ประเภทของฮาร์มอนิก	9
2.3.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก	10
2.3.6 มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก	12
2.3.6.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม	12
2.3.6.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม	12
2.4 อินเวอร์เตอร์	14
2.4.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่	16
2.4.2 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดี่ยว	18
2.5 เทคนิคการกรอง	19
2.5.1 ตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter)	19
2.5.2 ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter)	21
2.5.3 ตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter)	24
2.5.3.1 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	24
1 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	24
2 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	26
3 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล	27
2.5.3.2 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.1 ขั้นตอนการออกแบบการจำลองตัวกรองชนิดต่างๆและโหลดชนิดต่างๆ	33
3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์	35
3.2.1 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดี่ยว	35
3.2.2 การออกแบบตัวควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดี่ยว	36

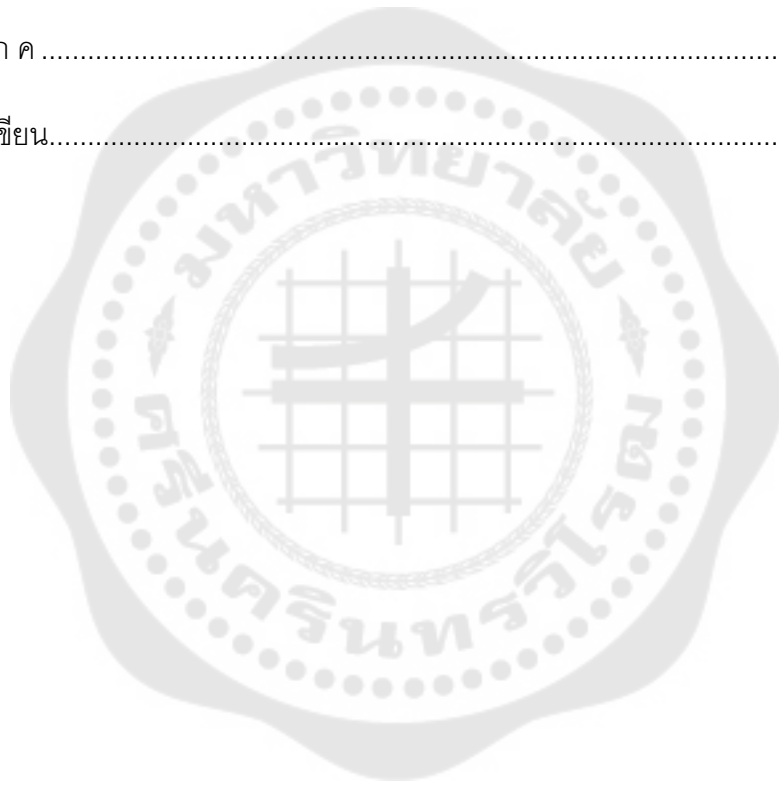
3.3 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยไมใส่ตัวกรอง	38
3.3.1 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยไมใส่ตัวกรองและต่อโหลดอินดักทีฟ	38
3.3.2 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยไมใส่ตัวกรองและต่อโหลดเป็นมอเตอร์.....	39
3.4 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ.....	41
3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ.....	41
3.4.2 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดอินดักทีฟ	42
3.4.3 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดเป็นมอเตอร์	43
3.5 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์.....	44
3.5.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองแบบวีเนอร์.....	44
3.5.2 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดอินดักทีฟ ..	45
3.5.3 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์	46
3.6 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้	47
3.6.1 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด.....	47
3.6.2 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ.....	48
3.6.3 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรุ่มไหล	48
3.6.4 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ	49
3.6.5 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดอินดักทีฟ	51
3.6.6 การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดเป็น	52
มอเตอร์.....	
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	53
4.1 ผลการจำลองฮาร์ดมอริกในวงจรรีจิสเตอร์.....	53

4.1.1 ผลการจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดอินดักทีฟ	53
4.1.1.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5	53
4.1.1.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7	55
4.1.1.3 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9	56
4.1.1.4 ผลจำลองแรงดันฮาร์มอนิกของโหลดอินดักทีฟ	57
4.1.2 การจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดมอเตอร์.....	58
4.1.2.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีไร้โหลด	58
4.1.2.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	59
4.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter)	60
4.2.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ	60
4.2.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5	60
4.2.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7	62
4.2.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9	63
4.2.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ.....	65
4.2.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์	66
4.2.2.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีไร้โหลด	66
4.2.2.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	67
4.3 ผลการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter)	68
4.3.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ	68
4.3.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5	69
4.3.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7	70
4.3.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9	71
4.3.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ.....	73

4.3.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์	74
4.3.2.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์.....	74
4.3.2.2 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์.....	76
4.4 ผลการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter)	77
4.4.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ	77
4.4.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5	77
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	78
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	79
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล.....	80
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ	82
4.4.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7	83
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	83
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	85
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล.....	86
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ.....	87
4.4.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9	89
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	89
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	90
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล.....	91
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ	93
4.4.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ.....	95
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	95
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	96

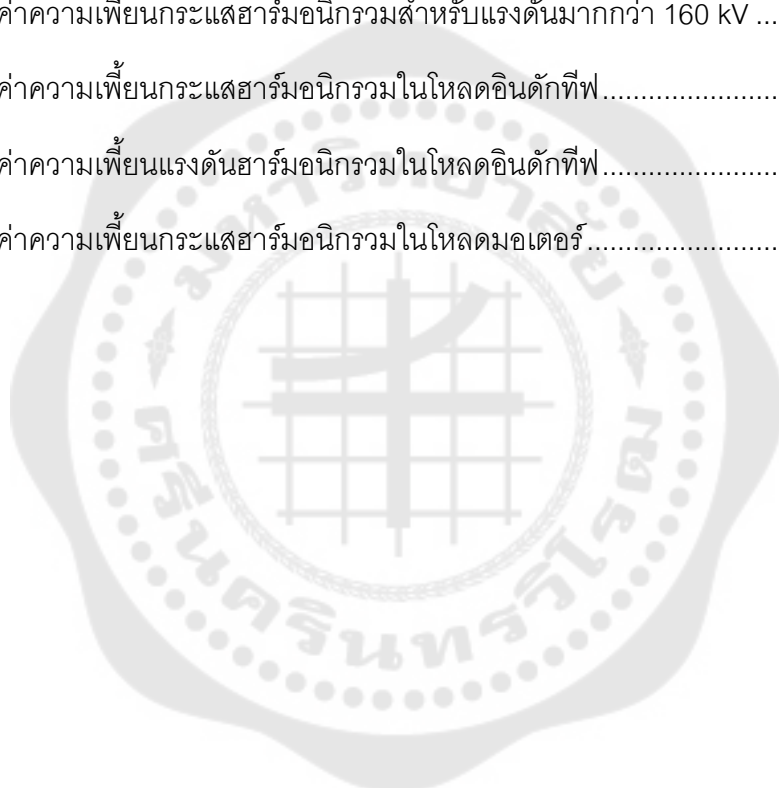
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล.....	97
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ.....	98
4.4.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีไหลมอเตอร์	100
4.4.2.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีรัวไหล.....	100
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	100
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	101
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล.....	102
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ.....	103
4.4.2.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	104
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	104
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	105
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล.....	106
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ.....	107
4.5 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่างๆ	108
4.5.1 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของโหลดอินดักทีฟ	108
4.5.2 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของไหลมอเตอร์	112
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	114
5.1 สรุปผล.....	114
5.2 ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม	120
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก	125
โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบวีเนอร์	126

ภาคผนวก ข	127
โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบปรับค่าได้.....	128
1 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	128
2 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ	128
3 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล.....	129
4 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ.....	129
ภาคผนวก ค	130
ประวัติผู้เขียน.....	135



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม	12
ตาราง 2 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดัน 120 V ถึง 69 kV.....	13
ตาราง 3 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดัน 69 kV ถึง 160 kV	13
ตาราง 4 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดันมากกว่า 160 kV	13
ตาราง 5 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมในโหลดอินดักทีฟ.....	109
ตาราง 6 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในโหลดอินดักทีฟ.....	111
ตาราง 7 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมในโหลดมอเตอร์.....	112



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	6
ภาพประกอบ 2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์	14
ภาพประกอบ 3 สวิตช์ตัวที่ 1 และ 4 จะนำกระแส	16
ภาพประกอบ 4 สวิตช์ตัวที่ 2 และ 3 จะนำกระแส	17
ภาพประกอบ 5 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วคู่	17
ภาพประกอบ 6 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว	18
ภาพประกอบ 7 วงจรสมมูลเมื่อมีการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ	20
ภาพประกอบ 8 บล็อกไดอะแกรมของตัวกรองแบบวีเนอร์	21
ภาพประกอบ 9 บล็อกไดอะแกรมสำหรับตัวกรองแบบปรับค่าได้	24
ภาพประกอบ 10 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	34
ภาพประกอบ 11 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวใน MATLAB/Simulink	35
ภาพประกอบ 12 วงจรขับอินเวอร์เตอร์ใน MATLAB/Simulink	36
ภาพประกอบ 13 PWM ขับมอเตอร์ตัวที่ 1 กับ ตัวที่ 3	37
ภาพประกอบ 14 PWM ขับมอเตอร์ตัวที่ 2 กับ ตัวที่ 4	37
ภาพประกอบ 15 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ใส่ตัวกรองและต่อโหลดอินดักทีฟ	38
ภาพประกอบ 16 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ใส่ตัวกรองและต่อโหลดเป็นมอเตอร์	39
ภาพประกอบ 17 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดอินดักทีฟ	42
ภาพประกอบ 18 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดเป็นมอเตอร์	43
ภาพประกอบ 19 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดอินดักทีฟ	45
ภาพประกอบ 20 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์	46
ภาพประกอบ 21 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดอินดักทีฟ	51

ภาพประกอบ 22 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดเป็นมอเตอร์	52
ภาพประกอบ 23 คลื่นกระแสด้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=100 \Omega$ และ $L=450 \text{ mH}$	54
ภาพประกอบ 24 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=100 \Omega$ และ $L=450 \text{ mH}$	54
ภาพประกอบ 25 คลื่นกระแสด้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=50 \Omega$ และ $L=150 \text{ mH}$	55
ภาพประกอบ 26 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=50 \Omega$ และ $L=150 \text{ mH}$	55
ภาพประกอบ 27 คลื่นกระแสด้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=10 \Omega$ และ $L=10 \text{ mH}$	56
ภาพประกอบ 28 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=10 \Omega$ และ $L=10 \text{ mH}$	56
ภาพประกอบ 29 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ของโหลดอินดักทีฟ	57
ภาพประกอบ 30 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของโหลดอินดักทีฟ	57
ภาพประกอบ 31 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียว กรณีไร้โหลด	58
ภาพประกอบ 32 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้ โหลด	59
ภาพประกอบ 33 คลื่นกระแสทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อมอเตอร์กระแสสลับเฟส เดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	59
ภาพประกอบ 34 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับ โหลดเต็มพิกัด	60
ภาพประกอบ 35 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัว เหนี่ยวนำมีค่า 0.689 H และตัวเก็บประจุมีค่า 3.676 uF	61
ภาพประกอบ 36 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำ มีค่า 0.689 H และตัวเก็บประจุมีค่า 3.676 uF	61
ภาพประกอบ 37 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัว เหนี่ยวนำมีค่า 0.707 mH และตัวเก็บประจุมีค่า 9.3573 uF	62
ภาพประกอบ 38 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำ มีค่า 0.707 mH และตัวเก็บประจุมีค่า 9.3573 uF	63

ภาพประกอบ 39 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.042 H และตัวเก็บประจุมีค่า 60.3 uF.....	64
ภาพประกอบ 40 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.042 H และตัวเก็บประจุมีค่า 60.3 uF	64
ภาพประกอบ 41 คลื่นแรงดันต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ	65
ภาพประกอบ 42 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ	65
ภาพประกอบ 43 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้โหลด.....	66
ภาพประกอบ 44 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้โหลด.....	67
ภาพประกอบ 45 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	67
ภาพประกอบ 46 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด	68
ภาพประกอบ 47 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120.....	69
ภาพประกอบ 48 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ	69
ภาพประกอบ 49 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120.....	70
ภาพประกอบ 50 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ	71
ภาพประกอบ 51 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120.....	72
ภาพประกอบ 52 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ	72

ภาพประกอบ 53 คลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลา
ของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120..... 73

ภาพประกอบ 54 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ
..... 73

ภาพประกอบ 55 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลา
ของโหลดมอเตอร์ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 1000..... 74

ภาพประกอบ 56 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดมอเตอร์
..... 75

ภาพประกอบ 57 คลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลา
ของโหลดมอเตอร์ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 1000..... 76

ภาพประกอบ 58 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดมอเตอร์
..... 76

ภาพประกอบ 59 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมน
เวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120..... 78

ภาพประกอบ 60 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอิน
ดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5..... 78

ภาพประกอบ 61 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมน
เวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 120
..... 79

ภาพประกอบ 62 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติใน
โหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5..... 80

ภาพประกอบ 63 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟ
โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120 81

ภาพประกอบ 64 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล
ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5..... 81

ภาพประกอบ 77 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120 90

ภาพประกอบ 78 ขนาดคลื่นกระแแและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในไหลอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9..... 91

ภาพประกอบ 79 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120 92

ภาพประกอบ 80 ขนาดคลื่นกระแแและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในไหลอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9..... 92

ภาพประกอบ 81 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120 93

ภาพประกอบ 82 ขนาดคลื่นกระแแและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในไหลอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9..... 94

ภาพประกอบ 83 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120..... 95

ภาพประกอบ 84 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด 95

ภาพประกอบ 85 คลื่นแรงดันด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 120 96

ภาพประกอบ 86 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ 96

ภาพประกอบ 87 คลื่นแรงดันด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120 97

ภาพประกอบ 88 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล 98

ภาพประกอบ 89 คลื่นแรงดันด้านขาออกเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 120 99

ภาพประกอบ 90 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ 99

ภาพประกอบ 91 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลด
มอเตอร์กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 1000..... 100

ภาพประกอบ 92 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลด
กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 1000 101

ภาพประกอบ 93 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดมอเตอร์กรณี
ไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 1000 102

ภาพประกอบ 94 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลด
มอเตอร์กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 1000... 103

ภาพประกอบ 95 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลด
มอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 1000
..... 104

ภาพประกอบ 96 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลด
มอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรอง
เป็น 1000..... 105

ภาพประกอบ 97 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดมอเตอร์กรณี
ขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 1000
..... 106

ภาพประกอบ 98 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีขับ
โหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 1000 107

ภาพประกอบ 99 ผลการเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟ
..... 109

ภาพประกอบ 100 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
โหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5..... 115

ภาพประกอบ 101 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
โหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7..... 116

ภาพประกอบ 102 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสนิวทริวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
 โหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9..... 116

ภาพประกอบ 103 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
 โหลดอินดักทีฟ..... 117

ภาพประกอบ 104 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสนิวทริวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
 โหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด 118

ภาพประกอบ 105 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสนิวทริวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ใน
 โหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด..... 118



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในครัวเรือนและระบบอุตสาหกรรม เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น ⁽¹⁾ ซึ่งในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังส่วนมากมักมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องในช่วงความถี่ 0 Hz – 2 kHz เรียกว่า (Total Harmonics Distortion: THD) หรือ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาหลักในระบบไฟฟ้าเนื่องจากผลกระทบในการสร้างปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์ ผลกระทบเหล่านี้รวมถึงการทำความร้อน (ในอุปกรณ์พาสซีฟ และอุปกรณ์แอคทีฟ) ⁽²⁾ การอ่านค่ามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้อง ⁽³⁾ การไม่ทำงานของรีเลย์ป้องกัน ⁽⁴⁾ และการรบกวนการสื่อสาร นอกจากนี้ปัญหานี้ฮาร์มอนิกยังส่งผลต่อคุณภาพไฟฟ้าทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่าย ⁽⁵⁾

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาลักษณะของฮาร์มอนิก จึงมีการใช้ตัวกรองในการกรองฮาร์มอนิก ซึ่งเทคนิคที่จะใช้ลดฮาร์มอนิก ได้แก่ ตัวกรองแบบพาสซีฟ ⁽⁶⁾ ซึ่งเป็นตัวกรองที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากอุปกรณ์หาซื้อได้ง่าย แต่จะมีข้อจำกัดที่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะมีขนาดใหญ่ และเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว มีหลายงานวิจัยได้นำเสนอตัวกรองแบบปรับค่าได้ ⁽⁷⁾ ตัวกรองแบบวีเนอร์ ⁽⁸⁾ และตัวกรองอื่นๆ ⁽⁹⁾ ซึ่งตัวกรองดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แต่จะมีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนแทนและเป็นตัวกรองแบบดิจิทัล ⁽¹⁰⁾

งานวิจัยนี้นำเสนอการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ โดยจะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเป็นกรณีศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter) ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter) และตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter)

2 เพื่อศึกษาการลดฮาร์มอนิกโดยใช้เทคนิคตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter) ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter) และตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) โดยจะจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

3 เพื่อดำเนินการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกโดยใช้เทคนิคตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter) ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter) และตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ตัวกรอง

4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบของฮาร์มอนิก โดยจะใช้การจำลองอินเวอร์เตอร์ใน MATLAB/Simulink

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในศึกษาเป็นอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียว พิกัดแรงดันขาเข้า 600 V ความถี่ 50 Hz และอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดเท่ากับ 0.8 โดยจะจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการจำลองจะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับเฟสเดียวที่มีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz

3 มาตรฐานที่ใช้ในการจำกัดค่าฮาร์มอนิกเพื่อไม่ให้ฮาร์มอนิกมีค่าสูงเกินกำหนด จะใช้มาตรฐาน IEEE std 519-1992

4 อันดับตัวกรองที่ใช้ในโหลดอินดักทีฟ จะใช้ค่า 120 และในโหลดมอเตอร์จะใช้ค่า 1000

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 ได้องค์ความรู้จากการศึกษาค้นคว้าการลดฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองแบบปรับค่าได้ ตัวกรองแบบวีเนอร์ และตัวกรองแบบพาสซีฟ

2 ได้ปรับปรุงสมรรถนะของโปรแกรมทดสอบของตัวกรองชนิดต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดียิ่งขึ้น

3 เปรียบเทียบค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในแต่ละตัวกรองให้ผ่านมาตรฐาน IEEE std 519-1992

4 สามารถต่อยอดความรู้การออกแบบอัลกอริทึมของตัวกรองชนิดต่าง ๆ ในการลดสัญญาณรบกวนชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิก

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ ซึ่งในที่นี้กล่าวถึงการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในช่วงความถี่ 0 KHz - 2 KHz และเทคนิคการกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ รวมถึงทฤษฎีการทำงานของวงจรรีโมเตอร์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้แบ่งหัวข้อออกเป็น 2 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสัญญาณรบกวนชนิดต่างๆ โดยจะมีเนื้อหา ดังนี้

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีหลายวิธีด้วยกันโดยในปี 1997 และ 1998 Chin S. Moo และคณะ กับ Yanchao Ji และคณะ ได้นำเสนอบทความวิจัยเรื่องการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งจากการทดลองสรุปว่าตัวกรองแบบพาสซีฟที่นำเสนอสามารถลดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแส และให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่สูง อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ เมื่อต้องการประสิทธิภาพให้มีค่าที่สูงขึ้น จำเป็นต้องมีค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่สูงตาม อีกทั้งปัญหาในเรื่องแรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวกรองแบบพาสซีฟอีกด้วย^(11, 12) ต่อมาในปี 2008 Yash Pal ได้นำเสนอถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแอกทีฟ ซึ่งสามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบวงรูปเปิด และวงรูปปิด ซึ่งวงรูปเปิดสามารถใช้เทคนิคในการปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบลูกคลื่นไซน์และแบบสเปซเวกเตอร์ได้ ส่วนวงรูปปิดสามารถใช้การควบคุมแบบต่างๆ เช่น การควบคุมแบบฮิสเตอรีซิส การควบคุมการเลื่อนโพล เป็นต้น อีกทั้งตัวกรองแบบแอกทีฟสามารถประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมชนิดต่างๆ เช่น เจนติกอัลกอริทึม อัลกอริทึมแบบฟuzzy และอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟจำเป็นต้องมีการจัดการกระแสเข้าไปในระบบเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิก อีกทั้งเมื่อมีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในตัวกรองแบบแอกทีฟ จึงจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่มีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อน⁽¹³⁾ ต่อมาการลดฮาร์มอนิกโดยใช้เทคนิคในการปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์⁽¹⁴⁾ ซึ่งเป็นหนึ่งในการลดฮาร์มอนิกโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งการใช้อุปกรณ์ชุดเซกเวย์อย่างตัวกรองแบบแอกทีฟ และไม่มีปัญหาใน

เรื่องแรงแซงแนวซ์อย่างตัวกรองพาสซีฟ ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอโดย Teena Jacob และคณะ ในปี 2016 โดยงานวิจัยพูดถึงการใช้เทคนิคในการปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ถึง 5 ประเภท คือ การปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณคลื่นไซน์ การปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยการจัดการเฟส การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ การมอดูเลตแบบขั้นบันได การมอดูเลตแบบเป็นขั้นตอน และการปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยการลดฮาร์มอนิกแบบเลือกได้ แต่การลดฮาร์มอนิกในรูปแบบนี้จะมีความยุ่งยากในการควบคุมการสับสวิตซ์ในวงจรแปลงผันพลังงาน เนื่องจากการจะลดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องมีการปรับการมอดูเลตที่ค่อนข้างซับซ้อนและยากอีกด้วย ต่อมาในปี 2016 และ 2017 Alhafadhi L และคณะได้นำเสนอการลดฮาร์มอนิกในรูปแบบใหม่^(7,9) โดยนำเสนอการลดฮาร์มอนิกโดยใช้เทคนิคตัวกรองแบบปรับค่าได้ ตัวกรองแบบวีเนอร์ และตัวกรองคัลมาน ซึ่งในตัวกรองแบบปรับค่าได้จะใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบเร็วไหล โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวต่ออยู่กับโหลดอินดักทีฟเป็นกรณีศึกษา ซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่แก้ปัญหาทางงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้การปรับมอดูเลตที่ยุ่งยาก และไม่จำเป็นต้องมีการฉีดกระแสเข้าไปในระบบ อีกทั้งไม่มีปัญหาเรื่องแรงแซงแนวซ์ที่เกิดขึ้นอีกด้วย จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง สรุปได้ว่าสามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองพาสซีฟ การลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแอกทีฟ การลดฮาร์มอนิกโดยใช้เทคนิคในการปรับมอดูเลตความกว้างพัลส์ และการลดฮาร์มอนิกในรูปแบบใหม่

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในปี 2003 Chi-Chou Kao นำเสนอการกำจัดเสียงสะท้อนโดยเฉพาะเส้นทางสั้นๆ (เช่น ทรานส์ รัจกรยานยนต์ เป็นต้น) โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และตัวกรองคัลมาน ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพที่ดีในการลดเสียงสะท้อน⁽¹⁵⁾ ต่อมาในปี 2008 M.B.Meenavathi และคณะ ได้นำเสนอการกำจัดสัญญาณรบกวนบนภาพโดยใช้ตัวกรองแบบโวลต์เตอร์รา ซึ่งตัวกรองชนิดนี้ให้ผลการกำจัดได้ดีกว่าตัวกรองแบบมีเดียน ตัวกรองแบบวีเนอร์ และตัวกรองแบบคัลมาน⁽¹⁶⁾ ต่อมาในปี 2012 Xiahong Bai และคณะ ได้นำเสนอการประมาณและการกำจัดเสียงรบกวนสำหรับการตรวจจับผู้ใช้นหลายคนตามอดโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบอิสระจากผลให้ผลสรุปว่า ในการตรวจจับสัญญาณมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น และเกิดความคลื่อนน้อยลง⁽¹⁷⁾ ต่อมาในปี 2018 Serdar Kockanat และคณะ ได้นำเสนอการกำจัดสัญญาณ

รบกวนบนคลื่นอัลตราซาวนด์ โดยใช้อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม จากงานวิจัยให้ผลสรุปว่า อัลกอริทึมชนิดนี้ให้ผลที่ดีกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ⁽¹⁸⁾ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ลด สัญญาณรบกวนของภาพสองมิติ⁽¹⁹⁾ และสัญญาณรบกวนของ คลื่นไฟฟ้าหัวใจ⁽²⁰⁾ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นไม่ได้กล่าวถึงการลดฮาร์มอนิก แต่จะมีตัวกรองที่สามารถประยุกต์ในการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

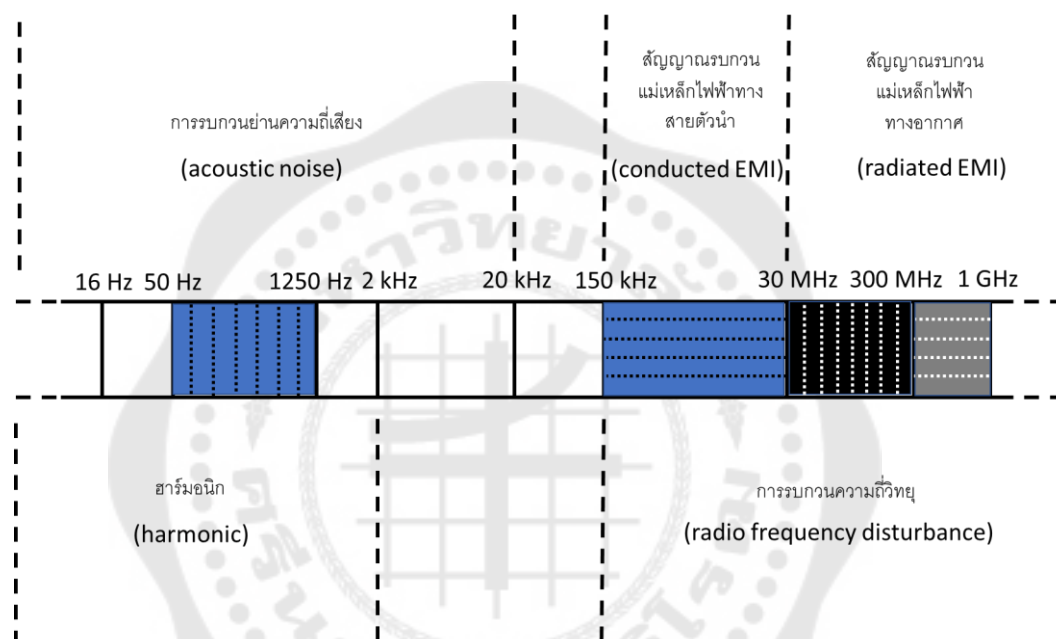
เพื่อแก้ปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบพาสซีฟ และแบบวีเนอร์ ซึ่งข้อแตกต่างจากงานวิจัยที่อ้างอิงข้างต้น⁽⁹⁾ คือ การใช้โหนดที่แตกต่างจากเดิมและการใช้อัลกอริทึมของตัวกรองแบบปรับค่าได้ที่พัฒนาจากเดิม สำหรับงานวิจัยนี้จะมีการใช้โหนดอินดักทีฟ และโหนดมอเตอร์เพิ่มขึ้นมาจากเดิม ส่วนตัวกรองที่พัฒนาจากเดิม จะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจากงานวิจัยของ Serdar Kockanat และคณะ⁽¹⁸⁾ มาปรับใช้ในการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.2 องค์ประกอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference: EMI) คือการที่ อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายหรือได้รับผลกระทบจากสาเหตุการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือระบบ เพื่อให้เกิดการพัฒนา วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านี้คือ สิ่งที่อยู่รอบตัวหรือผู้ที่ใช้งานควรคำนึงถึงตั้งแต่การออกแบบ เนื่องจากเมื่อเกิดปัญหาเหล่านี้แล้วจะทำการแก้ไขและป้องกันได้ยาก และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าให้เกิดความเสียหายได้ หรือส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของ อุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้านั้นๆ อีกทั้งเพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำงานได้สภาวะทำงานจริงหรือสภาวะที่ต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้ดีไม่แพ้สัญญาณรบกวนซึ่งกันและกัน จึงต้องทำการศึกษาอีกส่วนหนึ่งที่เรียกว่า ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic compatibility: EMC) ซึ่งจะแสดงถึงความสามารถของอุปกรณ์ในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า การศึกษาสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการออกแบบหรือใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งออกได้หลายรูปแบบ ตามพิสัยความถี่ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ซึ่งความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึง 2 kHz จัดอยู่ในพิสัยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือเรียกว่า ฮาร์มอนิก (harmonic) สำหรับความถี่ของการรบกวนทาง

แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง หรือจะเรียกว่า การรบกวนความถี่วิทยุ (radio frequency disturbance) โดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz โดยที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 MHz ถึง 30 MHz พิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted EMI) และย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz พิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (radiated EMI) ⁽²¹⁾ สำหรับย่านความถี่ในงานวิจัยนี้จะสนใจที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึง 2 kHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของฮาร์มอนิก



ภาพประกอบ 1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ

2.3.1 ความหมายของฮาร์มอนิก

ในความเข้าใจทางวิศวกรรมไฟฟ้า “ฮาร์มอนิก” คือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่หลักมูลคือ 50 Hz ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จะมีค่าเป็น 150 Hz เป็นต้น ซึ่งความถี่หลักมูล คือฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ สามารถหาได้จากการคูณกันของจำนวนเต็มบวกและความถี่หลักมูล

กระแสฮาร์มอนิก (harmonic current) คือฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในสายของระบบไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดหรือแหล่งกำเนิดต่างๆ และแรงดันฮาร์มอนิก (harmonic voltage) เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เช่น รีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ เมื่อต่อเข้าไปในระบบเพื่อการปรับปรุงตัว

ประกอบกำลังและแรงดันให้ดีขึ้น ซึ่งมีผลทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดความถี่ขึ้น สาเหตุมาจากค่ารีแอกแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะส่งผลให้เกิดความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้⁽²²⁾

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.1)$$

โดยที่

V_n	คือแรงดันฮาร์มอนิกที่ n [V]
Z_n	คือค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสที่ n [Ω]
I_n	คือกระแสฮาร์มอนิกที่ n [A]

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนั้น จะนำทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์มาประยุกต์ใช้ โดยทั่วไป สัญญาณที่เป็นรายคาบใดๆ สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.2) ดังนี้^(23, 24)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_1 t) + b_h \sin(h\omega_1 t)] \quad (2.2)$$

เมื่อ $f(t)$ หมายถึง ฟังก์ชันที่มีลักษณะเป็นรายคาบใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (2.3)

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [c_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h)] \quad (2.3)$$

ซึ่ง $\omega_1 = 2\pi f_1$, $c_0 = \frac{a_0}{2}$, $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$, $\varphi_h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$ และสามารถหาค่า a_0, b_0, c_0 ได้ดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.4)$$

$$b_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt \quad (2.5)$$

$$c_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt \quad (2.6)$$

โดยที่

h	คืออันดับที่ของฮาร์มอนิกที่ $h = 1, 2, 3, \dots, \infty$
c_0	คือองค์ประกอบของสัญญาณดีซี
c_h	คือขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ h
ϕ_h	คือมุมเฟสของฮาร์มอนิกอันดับที่ h
f_1	คือความถี่หลักมูลของสัญญาณ [Hz]
T	คือคาบสัญญาณที่ความถี่หลักมูล [s]

2.3.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ระบบไฟฟ้ากำลังในอุดมคติจะต้องทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แต่ในความจริงนั้นรูปคลื่นแรงดันมักจะมีค่าความเพี้ยนแทรกอยู่ในรูปคลื่นด้วย ซึ่งการที่รูปคลื่นไซน์เบี่ยงเบนไปจากรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ โดยปกติแล้วจะอ้างอิงถึงเทอมของความเพี้ยนฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยทั่วไปสาเหตุของความเพี้ยนนี้เกิดจากอุปกรณ์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าไปปรากฏอยู่ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือสาเหตุของการกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้านั้นเอง อีกทั้งสามารถแบ่งโหลดเหล่านี้ได้ออกมาเป็น 3 ประเภท⁽²⁵⁾ ได้แก่ แหล่งกำเนิดประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic devices) อุปกรณ์ในประเภทนี้ เช่น อินเวอร์เตอร์ เป็นต้น แหล่งกำเนิดประเภทแม่เหล็ก (ferromagnetic devices) อุปกรณ์ในประเภทนี้ได้แก่ หม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเกินพิกัดจะทำให้กระแสแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงจึงเกิดฮาร์มอนิกขึ้นมา และแหล่งกำเนิดประเภทอาร์ค (arcing devices) อุปกรณ์ในประเภทนี้ได้แก่ เต้าหอลอมจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกเป็นจำนวนมาก สาเหตุเกิดจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์ค ปัจจุบันโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีการใช้กันในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมากและมีทิศทางที่น่าจะเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม และผู้ต้องการใช้ไฟรายใหญ่ ซึ่งจะพบได้ว่าโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติในการทำงานที่จะส่งผลให้เกิดรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์เกิดฮาร์มอนิกไหลกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้า โดยจะส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้คุณภาพของระบบไฟฟ้าลดลง

2.3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (total harmonic distortion: THD) เป็นการบอกปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาจจะบอกเป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (total harmonic current distortion: %THD_i) หรืออาจจะบอกเป็นค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (total harmonic voltage distortion: %THD_v) ตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE จะหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมจากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ⁽²⁶⁾

$$\% \text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.7)$$

$$\% \text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.8)$$

โดยที่

V_n	คือค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ n [V]
I_n	คือค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n [A]
V_1	คือค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน [V]
I_1	คือค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ความถี่มูลฐาน [A]

2.3.4 ประเภทของฮาร์มอนิก

สำหรับค่ากระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจะแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆได้ ดังต่อไปนี้ ⁽²⁷⁾

-ฮาร์มอนิก (harmonic) หมายถึง ส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของค่าของความถี่หลักมูลหรือการคูณกันของลำดับฮาร์มอนิกกับความถี่หลักมูล

-อินเตอร์ฮาร์มอนิก (inter harmonic) หมายถึง ส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าไม่ลงตัวของความถี่มูลฐาน มักพบมากในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ก (arc furnace)

-ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (characteristic harmonic) หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งมีลำดับฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (2.9)

$$n = k_p \pm 1 \quad (2.9)$$

โดยที่

- n คือลำดับของฮาร์มอนิก
 k คือจำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
 p คือจำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

-ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (non characteristic harmonic) หมายถึงฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับกรณีฮาร์มอนิกคุณลักษณะ แต่มีลำดับฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.9) เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 10 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะที่มีอันดับ 9,11,19,21,29,31 ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกอันดับเป็น 5,7,15,17 ปนมาด้วย ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

-ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว (triplen harmonic) หมายถึง ฮาร์มอนิกที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 6 และ 9 เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มลำดับศูนย์ (zero sequence)

2.3.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังที่นำเสนอไว้ จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งฮาร์มอนิกนี้จะถือว่าเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดผลเสียต่อระบบไฟฟ้าหลายประการ ดังต่อไปนี้⁽²⁸⁾

-ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดปกติไปกว่าเดิม ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์

-ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่น้อยลง และเกิดการชำรุดเสียหายจะเกิดขึ้นได้ง่ายซึ่งมีสาเหตุมาจากค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิก

-ส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียในสายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในสายตัวนำ ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งจ่ายลดลง

-ส่งผลให้สายนิวทรัลเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากฮาร์มอนิกที่จัดอยู่ในกลุ่มลำดับศูนย์

-ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อน และเกิดความเครียดไดอิเล็กทริก (dielectric stress) ที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานสั้นลง และอาจทำให้พิวส์ของตัวเก็บประจุขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ นอกจากนี้ผลของแรงดันฮาร์มอนิกยังทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ และผลจากสภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวเก็บประจุทำให้เกิดการขยายของกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกให้มีปริมาณสูงขึ้นดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของตัวเก็บประจุให้ทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ตัวเก็บประจุที่ออกแบบจากผู้ผลิตควรอยู่ในกรอบตามมาตรฐานของ IEEE std. 18-1992

-ส่งผลให้พิวส์ทำงานผิดพลาดจากสภาวะปกติ และทำให้เกิดความร้อนในตัวพิวส์เพิ่มขึ้น ทำให้คุณลักษณะของเวลา และกระแส (time-current characteristic) ของพิวส์เปลี่ยนไป

-ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ชนิดต่างๆ ผิดพลาดไปจากเดิม เช่น รีเลย์ทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าการเริ่มตอบสนอง (pickup values) ที่สูงซึ่งโดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มตอบสนองที่ต่ำ นอกจากนี้ในกรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก (triplen) ในปริมาณมากพออาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด และในกรณีของรีเลย์ระยะทาง (distance relay) อาจทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการตั้งไว้ที่ความถี่หลักมูล นอกจากนี้ในกรณีของรีเลย์สถิตแบบต่ำ (static under frequency relay) อาจมีความไวเร็วกว่าปกติซึ่งทำให้ทำงานผิดพลาดได้ และในกลุ่มรีเลย์กระแสเกิน (over current relay) รีเลย์แรงดันเกิน (over voltage) และรีเลย์ชนิดผลต่าง (differential relay) อาจทำงานผิดพลาดเนื่องจากฮาร์มอนิกเช่นกัน เพราะว่าการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์เหล่านี้พิจารณาเฉพาะองค์ประกอบหลักมูลเท่านั้น

-ผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแสของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือทำให้ขนาดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลามีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิกซึ่งปัญหานี้อาจจะเกิดขึ้นได้กับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการตัดกระแสด้วยเช่นกัน

-ส่งผลให้มีเตอรืวัดค่ากำลังงานไฟฟ้า (watt-hour meter) ทำงานผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์จะทำการปรับแต่งไว้ที่ความถี่มูลฐาน

-ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าร้อนกว่าปกติ รวมถึงส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ซึ่งอาจส่งผลให้ข้อมูลในการสื่อสารมีความคลาดเคลื่อนได้

2.3.6 มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่ใช้ในการจำกัดค่าฮาร์มอนิกเพื่อไม่ให้ฮาร์มอนิกมีค่าสูงเกินกำหนด จะใช้มาตรฐาน IEEE std 519-1992 ⁽²⁹⁾ เป็นมาตรฐานที่เอาไว้กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ รวมทั้งการจำกัดค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวม และการจำกัดค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวมที่สามารถยอมรับได้

2.3.6.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

มาตรฐานที่จะสามารถบอกถึงการจำกัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เอาไว้ใช้ในการอ้างอิงในระดับสากลนั้นจะใช้การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสของไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับการไฟฟ้า (point of common coupling: PCC) ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ซึ่งได้กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (total voltage harmonics distortion) ไว้ดังนี้

ตาราง 1 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Distortion (THD) (%)
<69 kV	3.0	5.0
69,001 kV - 161 kV	1.5	2.5
>161 kV	1.0	1.5

2.3.6.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม

ขีดจำกัดกระแสค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (total current harmonics distortion) เป็นดัชนีเพื่อจำกัดค่าฮาร์มอนิกของกระแสของความถี่ของกระแสไหลสูงสุดที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้แสดงไว้ในตาราง 2 ตาราง 3 และตาราง 4

ตาราง 2 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดัน 120 V ถึง 69 kV

Maximum Harmonic Current Distortion of I_L (%)						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THD (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
≥ 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตาราง 3 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดัน 69 kV ถึง 160 kV

Maximum Harmonic Current Distortion of I_L (%)						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THD (%)
<20	2.0	1.0	1.5	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	2.5	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	4.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	5.5	5.0	1.0	0.5	7.5
≥ 1000	7.5	3.5	6.0	3.0	0.7	10.0

ตาราง 4 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดันมากกว่า 160 kV

Maximum Harmonic Current Distortion of I_L (%)						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	THD (%)
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

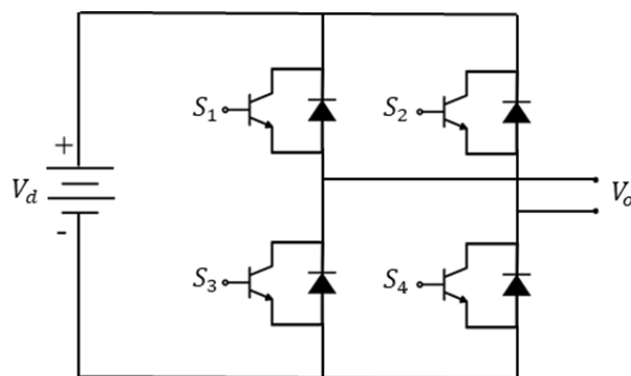
โดยที่

I_{SC} คือค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC) [A]

I_L คือค่ากระแสสูงสุดของโหลดที่ความถี่มูลฐาน [A]

2.4 อินเวอร์เตอร์

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นรวมถึงเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีความสำคัญเป็นอย่างมากในภาคของอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถรักษาความเร็วรอบ และแรงบิดตามต้องการได้ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงด้วย อินเวอร์เตอร์ (inverter) หมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับโดยแบ่งออกเป็นสองชนิดคือชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลัง (switching power supplies) ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง (uninterruptible power supplies) และอีกประเภทหนึ่งคือชนิดที่ใช้กับโหลดที่มีการเคลื่อนที่เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น จุดประสงค์ที่เหมือนกันของอินเวอร์เตอร์สองชนิดนี้คือต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งได้เป็น อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว และอินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ โดยที่จะมีสวิทซ์การควบคุม 4 ตัว จะเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจากภาพประกอบ 2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมสวิทซ์ทั้ง 4 ตัวเพื่อกำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลไปยังโหลด โดยวิธีการควบคุมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบต่างๆ และการควบคุมกระแสฮีสเตอร์ซิส



ภาพประกอบ 2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์

ในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์แบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) โดยอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) คือสัญญาณควบคุมรูปไซน์ส่วนสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (m_f) คือความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ส่วนความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ จะนิยามจากสมการที่ (2.50) และ (2.51) ตามลำดับ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (2.10)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.11)$$

โดยที่

$V_{control}$	คือสัญญาณควบคุมรูปไซน์ [V]
V_{tri}	คือสัญญาณรูปสามเหลี่ยม [V]
f_1	คือความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ [Hz]
f_s	คือความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ [Hz]
m_a	คืออัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
m_f	คืออัตราการมอดูเลตด้านความถี่

อินเวอร์เตอร์มีการนำไปใช้งานกันหลากหลาย เช่น ใช้เป็นระบบจ่ายไฟสำรอง ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือนำไปใช้ในรถยนต์เวลาเดินทางไปยังที่ๆ ไม่มีไฟฟ้า ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ต้องการสัญญาณแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ การควบคุมอินเวอร์เตอร์เป็นการกำหนดรูปแบบการเปิด/ปิดการไหลของกระแสในอินเวอร์เตอร์ วิธีการควบคุมการสวิตช์โดยทั่วไปจะใช้การควบคุมแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ โดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมรูปไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบ่งออกเป็น 2

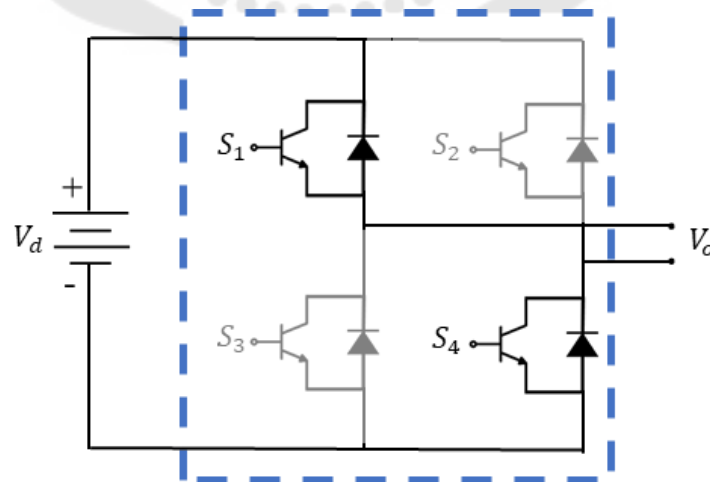
แบบ คือแบบเชิงขั้วคู่ (bipolar voltage switching) และแบบเชิงขั้วเดียว (unipolar voltage switching)

2.4.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่

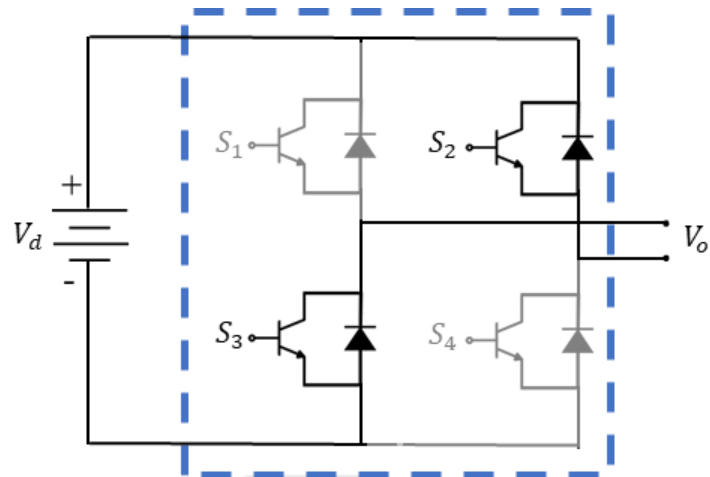
การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่ คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ ซึ่งการทำงานของสวิตช์ S_1 ทำงานร่วมกับ S_4 และ S_2 ทำงานร่วมกับ S_3 เมื่อสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ S_1 และ S_4 จะนำกระแส ขนาดแรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าเท่ากับ V_d ดังภาพประกอบ 4 แต่ถ้าสัญญาณควบคุมรูปคลื่นมีค่าน้อยกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ S_2 และ S_3 จะนำกระแสขนาดแรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าเท่ากับ V_d ⁽³⁰⁾ ดังภาพประกอบ 5 ภาพการสวิตช์แรงดันแบบเชิงขั้วคู่แสดงในภาพประกอบ 5 ⁽³¹⁾ โดยจะมีเงื่อนไขของการสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่ ดังนี้

$$V_{control} > V_{tri} : S_1, S_4 \text{ on} \quad V_{A_0} = \frac{1}{2} V_d \quad (2.12)$$

$$V_{control} < V_{tri} : S_2, S_3 \text{ on} \quad V_{A_0} = \frac{1}{2} V_d \quad (2.13)$$

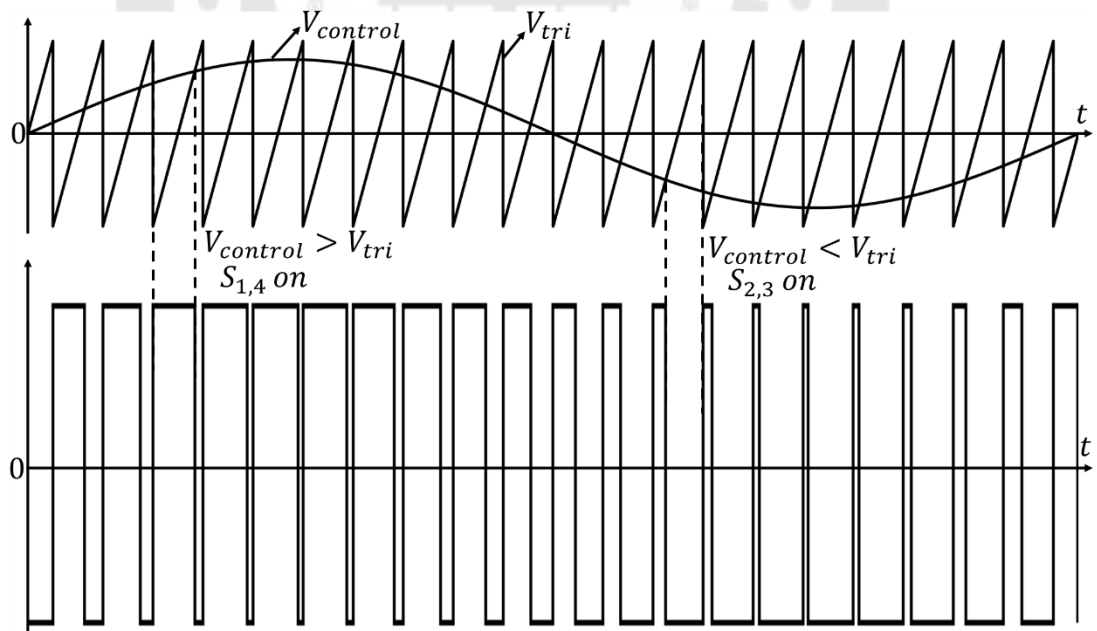


ภาพประกอบ 3 สวิตช์ตัวที่ 1 และ 4 จะนำกระแส



ภาพประกอบ 4 สวิตช์ตัวที่ 2 และ 3 จะนำกระแส

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วคู่ คือมีการสวิตซ์ของแรงดันระหว่างสาย (V_o หรือ V_{AB}) ระหว่างซั้วหรือบัสบวกกับลบ และความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่จะไหลลดเท่ากับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม



ภาพประกอบ 5 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วคู่

2.4.2 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดียว

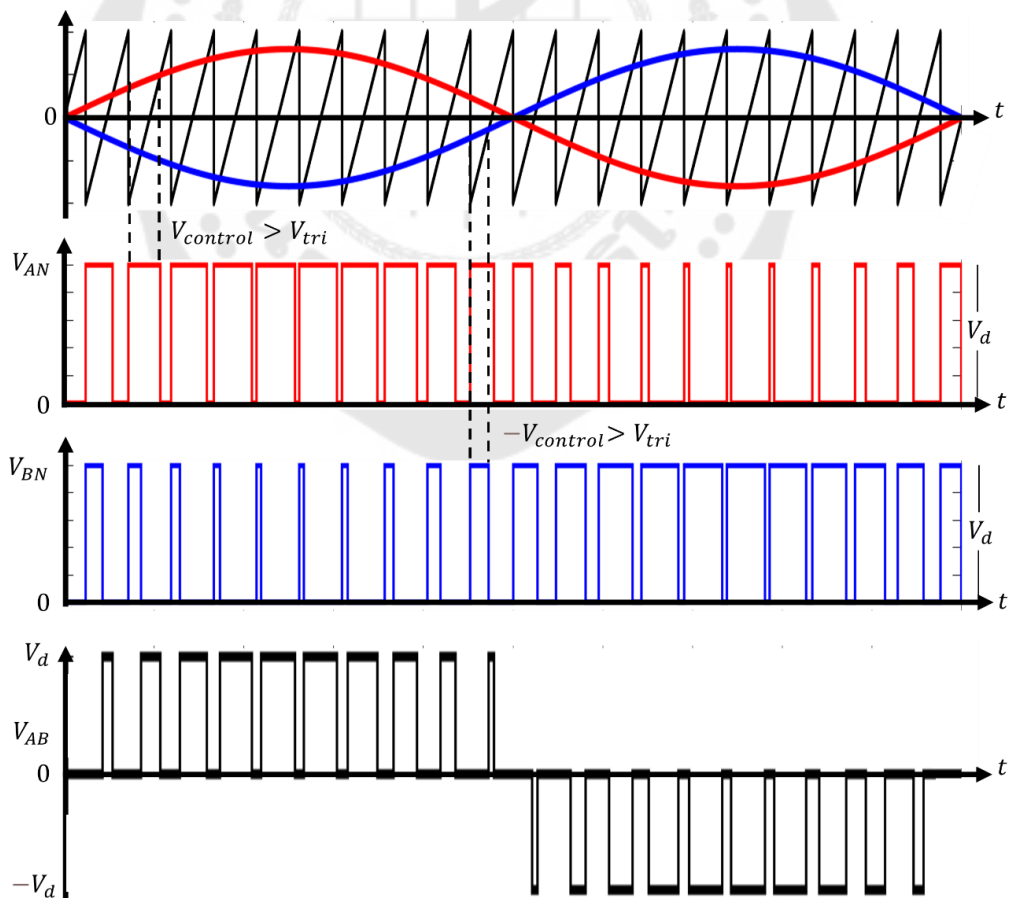
ข้อแตกต่างระหว่างการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่และแบบเชิงขั้วเดียวคือแบบเชิงขั้วเดียวจะมีการควบคุมสวิตช์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือสวิตช์ในกึ่ง A ถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B ถูกควบคุมจากสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดียวแสดงในภาพประกอบ 6 ⁽³¹⁾ โดยจะมีเงื่อนไขของการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดียว ดังนี้

เมื่อ $V_{control} > V_{tri}$ สวิตช์ S_1 นำกระแส $V_{AN} = V_d$

เมื่อ $V_{control} < V_{tri}$ สวิตช์ S_3 นำกระแส $V_{AN} = 0$

เมื่อ $-V_{control} > V_{tri}$ สวิตช์ S_2 นำกระแส $V_{BN} = V_d$

เมื่อ $-V_{control} < V_{tri}$ สวิตช์ S_4 นำกระแส $V_{BN} = 0$



ภาพประกอบ 6 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดียว

การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (V_0 หรือ V_{AB}) เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนระดับแรงดันจากการสวิตช์สูง เช่น กรณีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่ โดยจุดเด่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดี่ยว คือ การเกิดความถี่ด้านออกมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์แต่และเฟส ผลของความถี่ที่เพิ่มเป็นสองเท่านี้ ทำให้การออกแบบตัวกรองความถี่ได้ง่ายและประหยัด โดยข้อดีของการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วคู่ คือ การควบคุมการสวิตช์นั้น สามารถทำได้ง่ายกว่าแบบเชิงขั้วเดี่ยว แต่มีข้อเสียตรงการกรองความถี่สูงไม่ดีเท่ากับการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดี่ยว

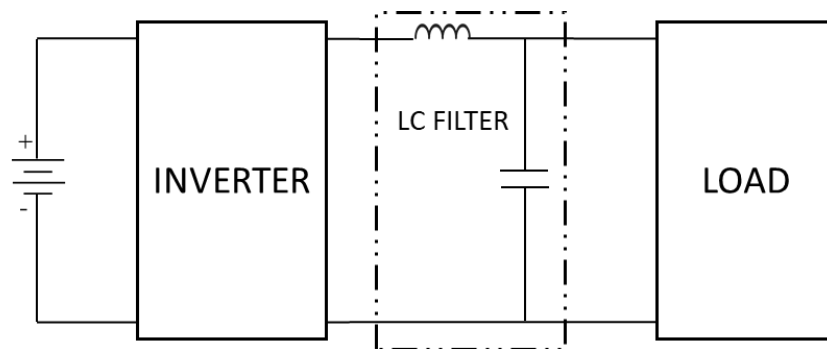
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วงจรอินเวอร์ตเฟสเดี่ยวแบบฟูลบริดจ์ โดยจะใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดี่ยว เนื่องจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดี่ยวมีความถี่ในการสวิตช์สูงกว่าทำให้กรองความถี่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์ที่กรองความถี่ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) มีขนาดเล็กลง

2.5 เทคนิคการกรอง

โดยปกติแล้วในระบบไฟฟ้ามักจะมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจนก่อให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องทำการกรองฮาร์มอนิกโดยการใช้ตัวกรองต่างๆในการกรองฮาร์มอนิกให้น้อยลงไป ซึ่งตัวกรองที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ ตัวกรองแบบพาสซีฟ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และตัวกรองแบบวีเนอร์ โดยที่รายละเอียดของแต่ละตัวกรองเป็นดังต่อไปนี้

2.5.1 ตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter)

ตัวกรองแบบพาสซีฟนั้นมีการต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งการใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เป็นหนึ่งในประเภทของตัวกรองแบบพาสซีฟ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาใช้เป็นตัวกรอง โดยตัวกรองแบบพาสซีฟนี้เองสามารถลดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ได้ ซึ่งวงจรสมมูลเมื่อมีการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟดูได้จากภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 วงจรสมมูลเมื่อมีการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ

ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{rated} = 2\pi f_0 L I_{rated} \quad (2.14)$$

$$L \leq \frac{V_{rated}}{2\pi f_0 I_{rated}} = L_{max} \quad (2.15)$$

โดยที่

V_{rated} คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดของวงจรอินเวอร์เตอร์ [V]

I_{rated} คือกระแสไฟฟ้าที่กำหนดของวงจรอินเวอร์เตอร์ [A]

f_0 คือค่าความถี่มูลฐาน [Hz]

L คือค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องการหา [H]

จากนั้น พิจารณาเงื่อนไขที่กำหนดความถี่ของเรโซแนนซ์ในตัวกรอง

$$f_0 \ll \left(f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right) < f_{sw} \quad (2.16)$$

โดยที่

f_r คือค่าความถี่เรโซแนนซ์ [Hz]

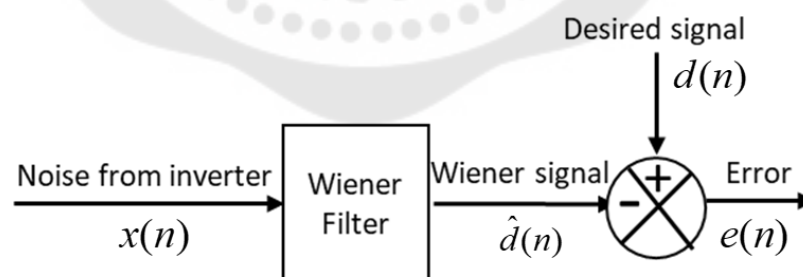
f_{sw} คือค่าความถี่สวิตซิ่ง [Hz]

C คือค่าตัวเก็บประจุที่ต้องการหา [F]

เมื่อทำการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุ จากนั้นจะนำค่าทั้งสองใส่ในวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ

2.5.2 ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter)

ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นตัวกรองเวลาแบบไม่ต่อเนื่องที่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปจะใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (mean square error: MSE) ⁽³²⁾ ตัวกรองแบบวีเนอร์สามารถประยุกต์ใช้ในการประมวลผลภาพ การประมวลสัญญาณ ระบบควบคุม และการสื่อสารแบบดิจิทัลสามารถดูบล็อกไดอะแกรมของตัวกรองแบบวีเนอร์ได้จากภาพประกอบ 8 แสดงหลักการการทำงานของตัวกรองแบบวีเนอร์ โดยจะนำสัญญาณรบกวนเข้าสู่การกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ ซึ่งจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน มาสร้างสมการสัมประสิทธิ์ตัวกรอง โดยค่าความคลาดเคลื่อน หาได้จากสัญญาณต้นแบบที่ต้องการ มาหักลบกับสัญญาณที่ได้จากตัวกรองแบบวีเนอร์ หลังจากนั้นจะนำค่าความคลาดเคลื่อนมาหาค่าสัมพัทธ์อัตโนมัติและสหสัมพันธ์ไขว้ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง นำมาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองมาทำการคอนโวลูชันกับสัญญาณรบกวน จะได้สัญญาณจากการกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์



ภาพประกอบ 8 บล็อกไดอะแกรมของตัวกรองแบบวีเนอร์

สมการในการคำนวณหาตัวกรองแบบวีเนอร์มีดังนี้

$$\hat{d}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m x(n-m) = w^T x(n) \quad (2.17)$$

$$x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad x(n-2) \dots x(n-M+1)]^T \quad (2.18)$$

$$w^T = [w(0) \quad x(1) \quad x(2) \dots x(M-1)]^T \quad (2.19)$$

โดยที่

$x(n)$ คือค่าสัญญาณขาเข้าของตัวกรอง

$\hat{d}(n)$ คือค่าสัญญาณขาออกของตัวกรอง

w^T คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง

M คือค่าอันดับของตัวกรอง

n คือจำนวนตัวอย่างที่เลือกใช้

T คือการทำเมทริกซ์สลับเปลี่ยน

ซึ่งจะต้องใช้ค่าคลาดเคลื่อน (error) เพื่อใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

ดังต่อไปนี้

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \quad (2.20)$$

โดยที่

$e(n)$ คือค่าความคลาดเคลื่อน (error)

$d(n)$ คือสัญญาณต้นแบบที่กำหนดให้

หลังจากนั้นทำการแทนค่าความคลาดเคลื่อน ดังสมการต่อไปนี้

$$J = E \{ (d(n) - \hat{d}(n))^2 \} = E \{ e^2(n) \} \quad (2.21)$$

โดยที่

J คือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

หลังจากนั้นทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E\{e^2(n)\} &= E\left[(d(n) - w^T(n)x(n))^2\right] \\ &= E[d(n)^2] - 2w^T E[x(n)d(n)] + w^T E[x(n)x(n)]w \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยที่

E คือค่าคาดหวัง (expectation)

หลังจากนั้นทำการแทนค่าสหสัมพันธ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$E\{e^2(n)\} = r_{dd}(0) - 2w^T r_{xd} + w^T r_{xx} w \quad (2.23)$$

หลังจากนั้นทำการอนุพันธ์เทียบกับ w ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial w} E\{e^2(n)\} = -2r_{xd} + 2r_{xx} w = 0 \quad (2.24)$$

ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองเป็นดังต่อไปนี้

$$w = r_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (2.25)$$

โดยที่

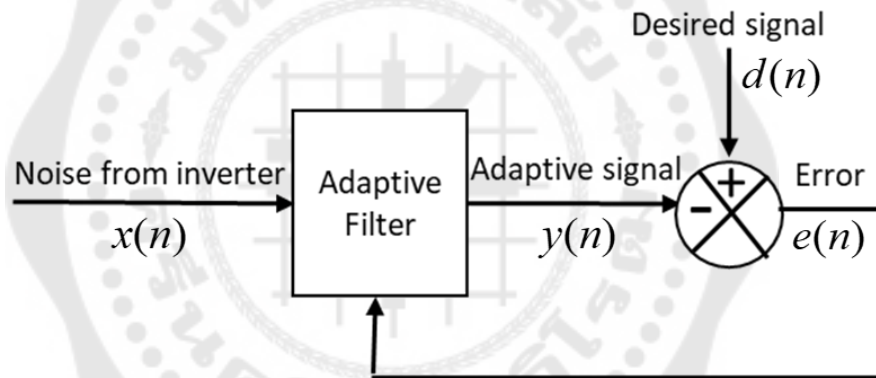
r_{xx} คือค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (auto-correlation)

r_{xd} คือค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation)

2.5.3 ตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter)

2.5.3.1 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

ตัวกรองแบบปรับค่าได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการลดสัญญาณรบกวน ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด least mean square (LMS) ⁽³²⁾ ซึ่งในการศึกษานี้จะนำวิธี LMS NLMS และ LLMS มาศึกษาในการทำวิจัย ⁽³³⁾ ซึ่งบล็อกไดอะแกรมดูได้จากภาพประกอบ 9 แสดงหลักการทำงานของตัวกรองแบบปรับค่าได้ โดยจะนำสัญญาณรบกวนเข้าสู่การกรองของตัวกรองแบบปรับค่าได้ ซึ่งจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนมาปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ในการใช้สมการกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนหาได้จากสัญญาณต้นแบบที่ต้องการ มาหักลบกับสัญญาณที่ได้จากตัวกรองแบบปรับค่าได้ หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองมาทำการคอนไวลูชันกับสัญญาณรบกวน จะได้สัญญาณจากการกรองของตัวกรองแบบปรับค่าได้



ภาพประกอบ 9 บล็อกไดอะแกรมสำหรับตัวกรองแบบปรับค่าได้

1 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นอัลกอริทึมทั่วไปที่ใช้ในการลดฮาร์มอนิก วิธีนี้ยังช่วยในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง สมการในการคำนวณมีดังนี้

$$x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad x(n-2) \dots x(n-M+1)] \quad (2.26)$$

โดยที่

- $x(n)$ คือค่าสัญญาณรบกวนขาเข้าตัวกรอง
- M คือค่าอันดับของตัวกรอง
- n คือจำนวนตัวอย่างที่เลือกใช้

หลังจากนั้นจะทำการกรองโดยใช้ในสมการดังต่อไปนี้

$$y(n) = [y(n) \quad y(n-1) \quad y(n-2) \dots y(n-M+1)]^T \quad (2.27)$$

$$y(n) = a^T(n)x(n) \quad (2.28)$$

โดยที่

$y(n)$ คือค่าสัญญาณขาออกของตัวกรอง

$a^T(n)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง

T คือการทำเมทริกซ์สลับเปลี่ยน

ซึ่งจะต้องใช้สมการความคลาดเคลื่อน (error) เพื่อปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองแบบปรับค่าได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.29)$$

โดยที่

$e(n)$ คือค่าความคลาดเคลื่อน (error)

$d(n)$ คือสัญญาณต้นแบบที่กำหนดให้

หลังจากนั้นทำการปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่ จากสมการดังต่อไปนี้

$$a(n+1) = a(n) - \mu \nabla j(e(n)) \quad (2.30)$$

โดยที่

$a(n+1)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่

$j(e(n))$ คือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

ทำการแทนค่าและหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง จะได้ดังต่อไปนี้

$$\nabla j(e(n)) = \nabla E(e(n)^2) = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial a} \quad (2.31)$$

โดยที่

E คือค่าคาดหวัง (expectation)

∇ คือสัญลักษณ์ของการอนุพันธ์

ทำการอนุพันธ์สมการ 2.31 จะได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial e(n)}{\partial a} = -x(n) \quad (2.32)$$

หลังจากนั้น จะทำการแทนค่า และปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ดังสมการต่อไปนี้

$$a(n+1) = a(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2.33)$$

โดยที่

μ คือค่าช่วงก้าว

2 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีนี้เป็นหนึ่งในวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเราจะเรียกว่า normalized least mean square (NLMS) ซึ่งหลักการการทำงานของตัวกรองแบบปรับค่าโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะเหมือนกับวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด แต่วิธีนี้จะดีกว่าในเรื่องผลกระทบของเสถียรภาพของสัญญาณและการลู่เข้าของสัญญาณ โดยการลู่เข้าของสัญญาณสามารถดูได้จากพารามิเตอร์ของค่าช่วงก้าว โดยจะมีค่าที่มากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ทำให้การลู่เข้าสู่สัญญาณดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งวิธีนี้จะมีการปรับสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่ไม่เหมือนกับวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ดังสมการต่อไปนี้

$$b(n+1) = b(n) + \frac{\mu}{\varepsilon + \|x(n)\|^2} e(n)x(n) \quad (2.34)$$

$$\|x(n)\|^2 = x(n)^H * x(n) \quad (2.35)$$

โดยที่

$b(n)$	คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง
$b(n+1)$	คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่
ε	คือขนาดตัวควบคุมการทำให้เป็นมาตรฐาน
$\ x(n)\ ^2$	คือปัจจัยในการทำให้เป็นปกติ
H	คือเมทริกซ์สังยุคเอร์มีเซียน

3 วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรั่วไหล

วิธีนี้เป็นหนึ่งในวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (least mean square) หลักการทำงานของตัวกรองชนิดนี้จะมีการทำงานที่เหมือนการกรองของตัวกรองแบบปรับค่า แต่จะมีการปรับสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่ไม่เหมือนกัน วิธีนี้เราจะเรียกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรั่วไหล leaky least mean square (LLMS) ซึ่งวิธีนี้จะสามารถแก้ปัญหาในเรื่องค่าช่วงก้าวที่ไม่ต้องเลือกเพื่อการันตีคุณภาพของสัญญาณ เนื่องจากการมีพารามิเตอร์ของค่าช่วงก้าวที่ไม่เหมือนกับวิธีที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ โดยค่าช่วงก้าวของตัวกรองนี้จะมีอยู่ด้วยกันสองที่ตามสมการที่ 2.36 โดยวิธีการปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองของวิธีนี้ สามารถดูได้จากสมการต่อไปนี้

$$c(n+1) = (1 - \mu\eta)c(n) + \mu e(n)x(n) \quad (2.36)$$

โดยที่

$c(n)$	คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง
$c(n+1)$	คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่
η	คือปัจจัยที่ทำให้เกิดการรั่วไหล ($\eta \ll 1$)

2.5.3.2 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นหนึ่งในตัวกรองที่สามารถปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองที่ จะเรียกวินี้ว่า recursive least square (RLS) วิธีนี้จะบรรจบกันในค่าเฉลี่ยที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในบทความวิจัยของ Serdar Kockanat และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้กล่าวถึงการใช่วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ ซึ่งให้ผลการกรองที่ดีกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้านี้ ซึ่งวิธีการนี้จะให้ผลการกรองที่ดี เนื่องจากการที่ไม่มีการคำนวณค่าช่วงก้าว โดยความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดกับตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำนั้นก็คือค่าช่วงก้าว (step size) สมการในการคำนวณหาตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ⁽³⁴⁾ มีดังนี้

$$J(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 \quad (2.37)$$

โดยที่

- $J(n)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
- λ คือค่าปัจจัยด้านน้ำหนัก
- $e(i)$ คือค่าความคลาดเคลื่อน (error)
- n คือจำนวนตัวอย่างที่เลือกใช้
- i คือจำนวนที่เลือกใช้ ณ ขณะนั้น

ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อน (error) สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$e(i) = d(i) - y(i) \quad (2.38)$$

ซึ่งสมการในการกรองจะใช้ในสมการดังต่อไปนี้

$$y(n) = w^H(n)u(i) \quad (2.39)$$

โดยที่

$d(i)$ คือสัญญาณต้นแบบที่กำหนดให้ เมทริกซ์สังยุคเฮอร์มีเซียน

H คือเมทริกซ์สังยุคเฮอร์มีเซียน

ซึ่งค่า $x(n)$ และ $y(n)$ หาได้ดังสมการนี้

$$u(i) = [u(i) \quad u(i-1) \quad u(i-2) \dots u(i-M+1)]^T \quad (2.40)$$

$$w(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \dots, w_{M-1}(n)]^T \quad (2.41)$$

โดยที่

$u(i)$ คือค่าสัญญาณรอบกวนขาเข้าตัวกรอง

M คือค่าอันดับของตัวกรอง

r คือการทำเมทริกซ์สลับเปลี่ยน

เมื่อนำสมการ (2.34) และ (2.35) มาแทนในสมการ (2.33) จะได้ดังต่อไปนี้

$$J(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |d(i) - w^H(n)u(i)|^2 \quad (2.42)$$

หลังจากนั้นทำการหาค่าคือค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง โดยการทำอนุพันธ์เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้ดังต่อไปนี้

$$\mathbf{R}(n)w(n) = \mathbf{r}(n) \quad (2.43)$$

เมื่อจะหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง เขียนใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$w(n) = \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{r}(n) \quad (2.44)$$

โดยที่

$\mathbf{R}(n)$ คือค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (auto-correlation)

$\mathbf{r}(n)$ คือค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation)

จะได้ค่า $\mathbf{R}(n)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(n) &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} u(i) u^H(i) \\ &= \lambda \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-i-1} u(i) u^H(i) + u(n) u^H(n) \\ &= \lambda \mathbf{R}(n-1) + u(n) u^H(n) \end{aligned} \quad (2.45)$$

และจะได้ค่า $\mathbf{r}(n)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(n) &= \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} u(i) d^*(i) \\ &= \lambda \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-i-1} u(i) d(i) + u(n) d^*(n) \\ &= \lambda \mathbf{r}(n-1) + u(n) d^*(n) \end{aligned} \quad (2.46)$$

ในสมการ (2.44) จะเห็นได้ว่า เมื่อจะหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ต้องทำการอินเวอร์ส (inverse) ของค่า $\mathbf{R}(n)$ ซึ่งจะใช้ทฤษฎีบทการผกผันของเมทริกซ์ (matrix inversion lemma) ได้ดังต่อไปนี้

$$\mathbf{R}^{-1}(n) = \lambda^{-1}\mathbf{R}^{-1}(n-1) - \frac{\lambda^{-2}\mathbf{R}^{-1}(n-1)u(n)u^H(n)\mathbf{R}^{-1}(n-1)}{1 + \lambda^{-1}u^H(n)\mathbf{R}^{-1}(n-1)u(n)} \quad (2.47)$$

ซึ่งวิธีการทำผกผันตามทฤษฎี จะมีสมการดังต่อไปนี้

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(DA^{-1}B + C^{-1})^{-1}DA^{-1} \quad (2.48)$$

สามารถจะนิยามค่า $\mathbf{P}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n)$ จะได้ดังต่อไปนี้

$$\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1}[\mathbf{P}(n-1) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)] \quad (2.49)$$

และจะได้

$$k(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1)u(n)}{\lambda + u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)} \quad (2.50)$$

โดยที่

$\mathbf{P}(n)$ คือค่าบ่งบอกถึงการทำเมทริกซ์สหสัมพันธ์แบบผกผัน

$k(n)$ คือเวกเตอร์ควบคุม

เมื่อนำค่า $u(n)$ คูณในสมการที่ (2.45) จะได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(n)u(n) &= \lambda^{-1}[\mathbf{P}(n-1)u(n) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)] \\ &= \lambda^{-1}\{[\lambda + u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)]k(n) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)\} \\ &= k(n) \end{aligned} \quad (2.51)$$

หลังจากนั้นสามารถทำการแทนค่า จะได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 w(n) &= \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{r}(n) = \mathbf{P}(n)\mathbf{r}(n) \\
 &= \lambda^{-1}[\mathbf{P}(n-1) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)] \cdot [\lambda\mathbf{r}(n-1) + u(n)d^*(i)] \\
 &= \mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}(n-1) + \lambda^{-1}d^*(i)[\mathbf{P}(n-1)u(n) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)] \\
 &\quad - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}(n-1)
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

หลังจากนั้นทำการค่าหาสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ได้ต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 w(n) &= w(n-1) + d^*(n)k(n) - k(n)u^H(n)w(n-1) \\
 &= w(n-1) + k(n)e(n)
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

โดยที่

$w(n)$ คือค่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง
 $w(n+1)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

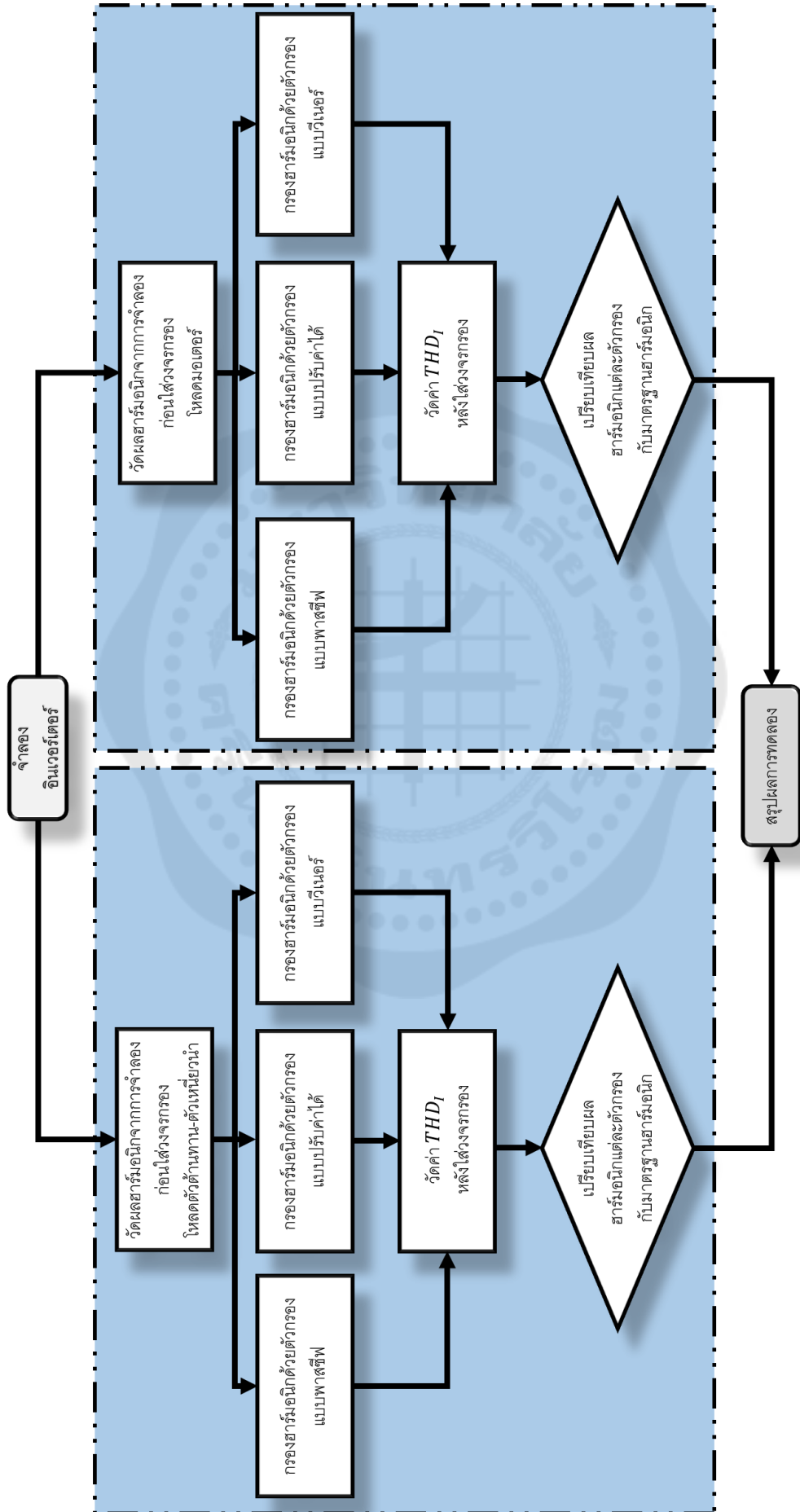
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการสร้างอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว รวมถึงขั้นตอนการสร้างตัวกรองแต่ละตัวกรองในการลดฮาร์มอนิกบนอนุกรมอิมพีแดนซ์กำลัง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการออกแบบการจำลองตัวกรองชนิดต่าง ๆ และโหลดชนิดต่าง ๆ

แผนผังสำหรับการจำลองงานวิจัยแสดงในภาพประกอบ 10 ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะลดฮาร์มอนิกในวงจร จึงได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการกรองของตัวกรองต่างๆ เพื่อสามารถกรองฮาร์มอนิกให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งตัวกรองที่ได้นำมาศึกษา ได้แก่ ตัวกรองแบบพาสซีฟ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และตัวกรองแบบวีเนออร์ ซึ่งได้ออกแบบการทดลองเพื่อสามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองของตัวกรองต่างๆ ได้ ในการทดลองนั้นจะเริ่มโดยการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จะใช้เป็นตัวแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ จากนั้นจะทำการออกแบบตัวกรองต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ และออกแบบโหลดที่ต่างกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบถึงความสามารถของตัวกรองซึ่งได้แก่ โหลดอินดักทีฟ และโหลดมอเตอร์

ซึ่งอันดับแรกนั้นทำการออกแบบสัญญาณรบกวนของวงจรก่อนใส่ตัวกรองต่างๆ โดยใช้โหลดอินดักทีฟ และโหลดมอเตอร์ ต่อมาทำการวัดฮาร์มอนิกโดยไม่ใส่ตัวกรอง จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรโดยใส่ตัวกรองซึ่งตัวกรองแรกๆ ที่เริ่มทำการจำลองคือ ตัวกรองแบบพาสซีฟ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และสุดท้ายจึงออกแบบตัวกรองแบบวีเนออร์ จากนั้นทำการวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมกระแสที่ใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ ตัวกรองแบบพาสซีฟ และตัวกรองแบบวีเนออร์ โดยทั้งหมดจะต่อโหลดเป็นโหลดอินดักทีฟ และโหลดมอเตอร์

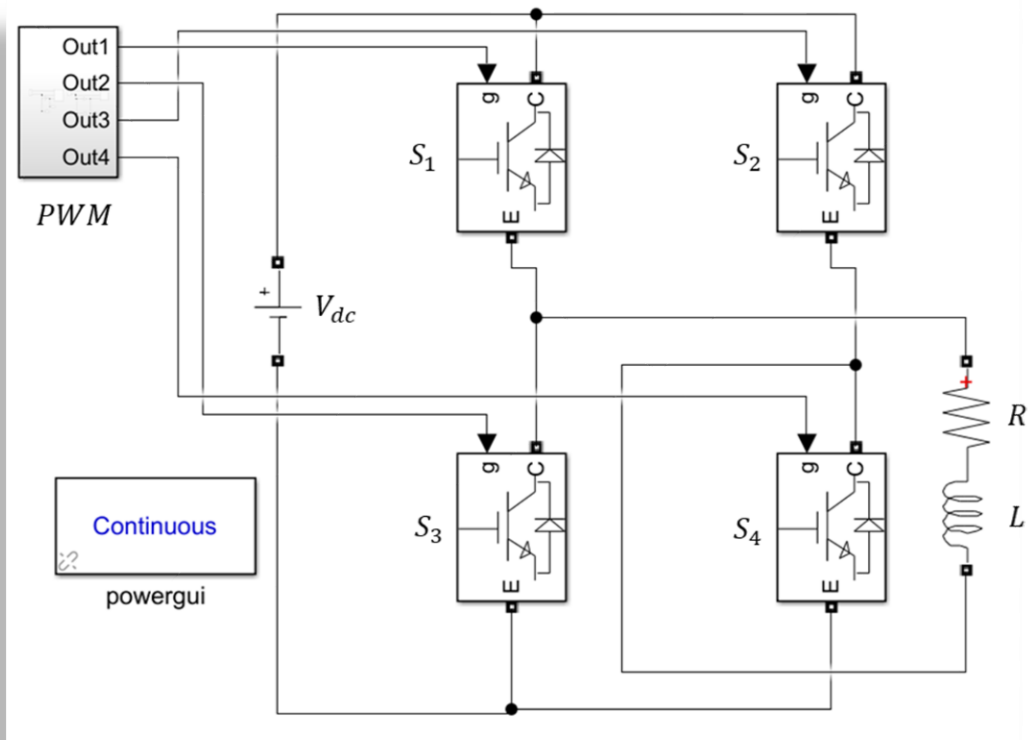
สุดท้ายจึงนำผลการจำลองที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันโดยจะแยกเป็นโหลดอินดักทีฟ และโหลดมอเตอร์ ซึ่งจะเปรียบเทียบได้ทั้งโดเมนเวลา (time domain) และเพื่อความชัดเจนของผลการจำลองมากขึ้น จึงนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบในโดเมนความถี่ (frequency domain) ซึ่งจะสามารถแสดงความแตกต่างได้ชัดเจนมากขึ้น และสุดท้ายจึงนำผลของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสที่วัดได้นั้นมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก โดยจะใช้ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 จึงเสร็จสิ้นการจำลองของงานวิจัย



ภาพประกอบ 10 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

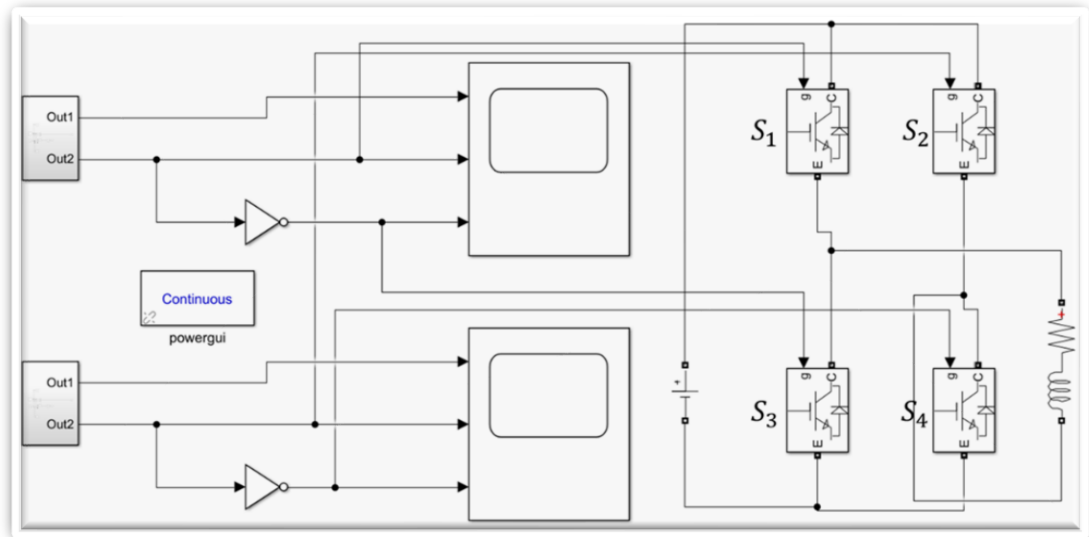
3.2.1 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว



ภาพประกอบ 11 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวใน MATLAB/Simulink

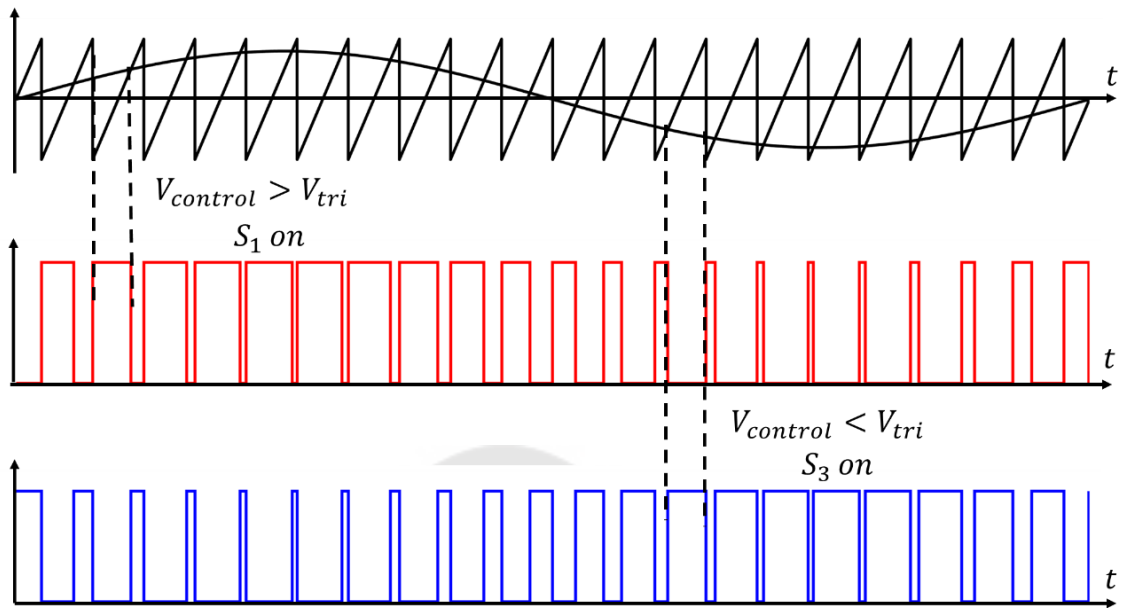
จากภาพประกอบ 11 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวนั้นเป็นตัวแปลงกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ และยังเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในวงจรอีกด้วย ซึ่งในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียวมาเป็นวงจรจำลอง โดยใช้สวิตช์ 4 ตัว แหล่งจ่ายกระแสตรง และโหลดอินดักทีฟในวงจร ซึ่งมีพิกัดแรงดันกระแสตรงมีค่าเป็น 600 โวลต์ อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดเท่ากับ 0.8 อัตราการมอดูเลตด้านความถี่เท่ากับ 21 และความถี่เป็น 50 Hz โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation) เป็นตัวขับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform)

3.2.2 การออกแบบตัวควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

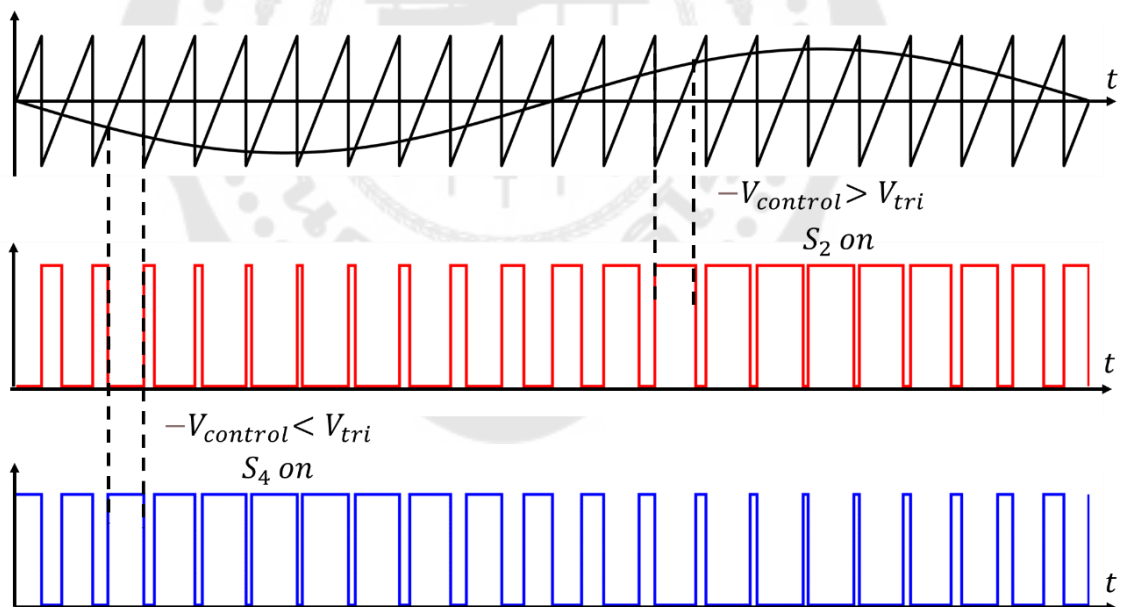


ภาพประกอบ 12 วงจรขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ใน MATLAB/Simulink

วงจรขับสำหรับงานวิจัยนี้เป็นวงจรขับแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งในวงจรรินเวอร์เตอร์นั้น ต้องการที่จะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 2 3 และ 4 สามารถดูภาพประกอบ 12 และในการขับวงจรรินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียว การควบคุมก็จะเป็นการนำสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์มาเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 กับ ตัวที่ 3 ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) เมื่อสัญญาณควบคุมไซน์ที่มีเฟสเป็น 0 องศา มีค่ามากกว่ารูปคลื่นสามเหลี่ยม จะเป็นการไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 ตามกราฟสัญญาณสีแดง และเมื่อสัญญาณควบคุมไซน์มีค่าน้อยกว่ารูปคลื่นสามเหลี่ยม จะเป็นการไปขับสวิตช์ตัวที่ 3 ตามกราฟสัญญาณสีน้ำเงิน ดังแสดงภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 PWM ขับมอเตอร์เฟตตัวที่ 1 กับ ตัวที่ 3



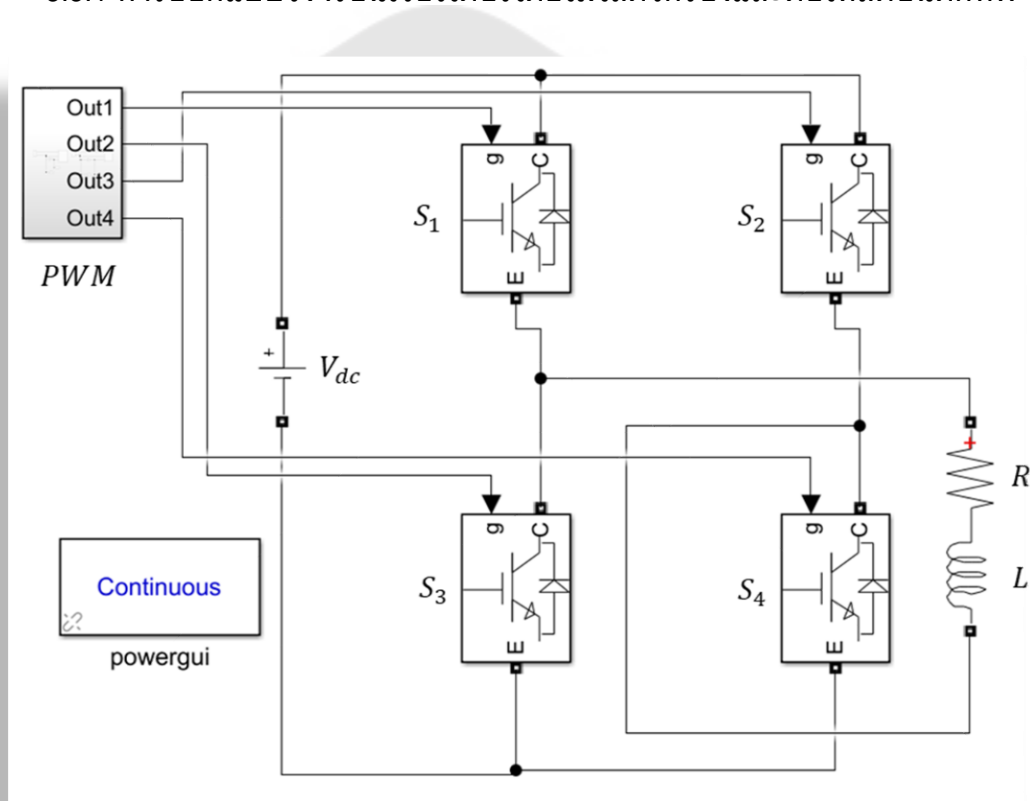
ภาพประกอบ 14 PWM ขับมอเตอร์เฟตตัวที่ 2 กับ ตัวที่ 4

จากภาพประกอบ 14 นำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 180 องศา มาเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 2 กับ ตัวที่ 4 ซึ่งต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์

(sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) เมื่อสัญญาณควบคุมไซน์ต่างเฟส 180 องศา มีค่ามากกว่ารูปคลื่นสามเหลี่ยม จะเป็นการไปขับสวิตช์ตัวที่ 2 ตามกราฟสัญญาณสีแดง และเมื่อสัญญาณควบคุมไซน์มีค่าน้อยกว่ารูปคลื่นสามเหลี่ยม จะเป็นการไปขับสวิตช์ตัวที่ 4 ตามกราฟสัญญาณสีน้ำเงิน

3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ใส่ตัวกรอง

3.3.1 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ใส่ตัวกรองและต่อโหลดอินดักทีฟ



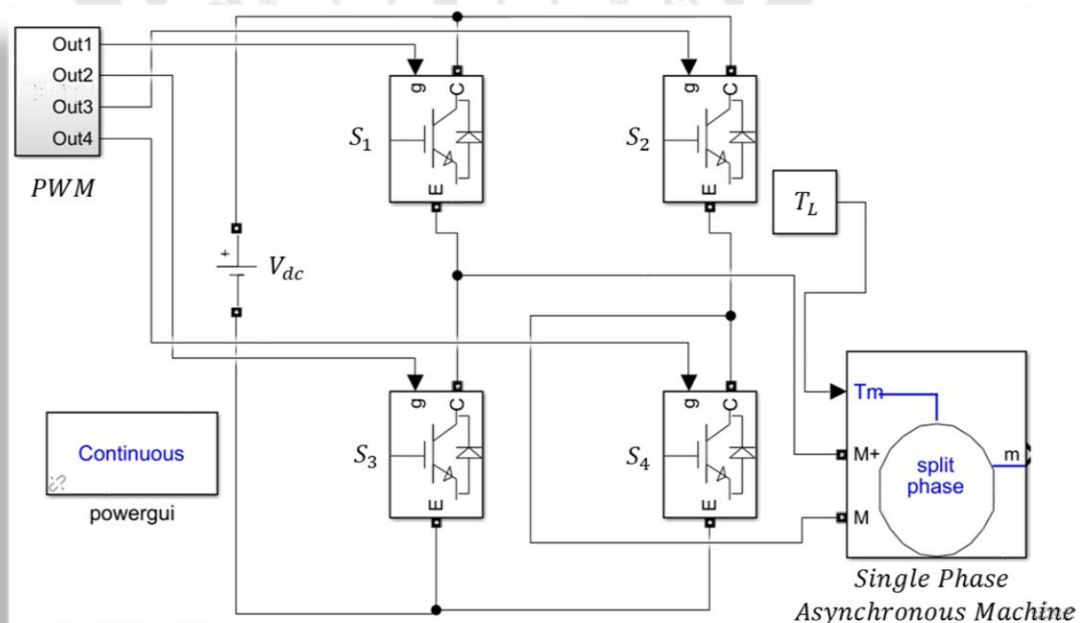
ภาพประกอบ 15 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ใส่ตัวกรองและต่อโหลดอินดักทีฟ

จากภาพประกอบ 15 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว ซึ่งมีพิคตของแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V ซึ่งต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม

(triangular waveform) โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดี่ยวจะมีการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟสกันคือ 0 องศา กับ 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะได้ PWM (pulse width modulation) ในการขับวงจรถออินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงซัวเดี่ยว การควบคุมก็จะเป็นการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 0 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 กับตัวที่ 3 และนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 2 กับตัวที่ 4

วงจรถออินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 โวลต์ โดยที่ต่อโหลดอินดักทีฟเป็นสามกรณีตามค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งจะใช้ตัวประกอบกำลังเป็น 0.5 0.7 และ 0.9 โดยอ้างอิงจากตำราเรียนของรองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ (35) เพื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ในทั้งสองกรณี และจากบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ (7) จะใช้ค่าตัวต้านทาน 0.5Ω และค่าตัวเหนี่ยวนำ 1.592 mH ซึ่งพบว่าคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้มีค่าสูงเกิน ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้โหลดอินดักทีฟจากการคำนวณค่าตัวประกอบกำลังจากการอ้างอิงจากตำราเรียนข้างต้น

3.3.2 การออกแบบวงจรถออินเวอร์เตอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์



ภาพประกอบ 16 วงจรถออินเวอร์เตอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์

จากภาพประกอบ 16 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว และเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเชิงขั้วเดียว ซึ่งต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) โดยแบบเชิงขั้วเดียวจะมีการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟสกันคือ 0 องศา กับ 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะได้ PWM (pulse width modulation) ในการขับวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียว การควบคุมก็จะเป็นการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 0 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับมอสเฟตตัวที่ 1 กับ ตัวที่ 3 และนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับมอสเฟตตัวที่ 2 กับ ตัวที่ 4

วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 โวลต์ โดยที่ต่อโหลดเป็นมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวแบบอะซิงโครนัส (single phase asynchronous machine) ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz โดยมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองฮาร์มอนิกคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) โดยจะใช้ชนิดสปลิตเฟส (split phase) ปกติมอเตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นแบบอะซิงโครนัสและซิงโครนัส ซึ่งในที่นี้จะเน้นมอเตอร์อะซิงโครนัสหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมอเตอร์ชนิดนี้มีสองชนิด คือ ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอกและโรเตอร์แบบพันขดลวด ที่เลือกใช้ชนิดสปลิตเฟสเนื่องจากการใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นภายในบ้าน โรงงานขนาดเล็ก รวมถึงง่ายต่อการใช้งาน การติดตั้ง และบำรุงรักษา โดยหลักการการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดกับขดสตาร์ทที่ต่อขนานกัน จะมีกระแสไหลทั้งสองขด ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์จะตัดกับตัวนำโรเตอร์ ทำให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ส่งผลทำให้เกิดแรงบิดขึ้น โรเตอร์จึงหมุนได้ตามทิศเดียวกับทางสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วสูงสุด สวิตช์แรงเหวี่ยงจะเปิดวงจรขดสตาร์ทออกเหลือเพียงขดลวดเดียว ซึ่งในที่นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จากโปรแกรม (default) โดยจะเปรียบเทียบกรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด ซึ่งแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 1.2 ได้มาจากการคำนวณแรงบิดของมอเตอร์ ดังสมการ 3.1 อย่างไรก็ตามการใส่ค่าแรงบิดในโปรแกรม MATLAB/Simulink จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็มบวก และไม่สามารถที่จะใช้เป็นจำนวนเต็มลบได้ เนื่องจากจะเป็นการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนมอเตอร์

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3.1)$$

โดยที่

T	คือค่าแรงบิดทางกล [Nm]
P	คือค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ [W]
ω	คือค่าความเร็วเชิงมุม [rad/sec]

3.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ

3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ

ขั้นที่ 1 เพื่อจำกัดองค์ประกอบของกระแสจากอินเวอร์เตอร์ โดยพิจารณากระแสของวงจรกรองจากพิกัดของอินเวอร์เตอร์ ($i_{inv}^{(s)}$) โดยจะคำนวณกระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุดจากโหลดอินดักทีฟและโหลดมอเตอร์ โดยที่ ($b=1/2$)

$$i_{inv}(peak) < b \cdot i_{inv} \quad (3.2)$$

ขั้นที่ 2 พิจารณาถึงแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง จากสมการ (3.2) และทำการคำนวณสมการ (3.3) จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะต้องกำหนดค่าความถี่มูลฐานในการจำลองอินเวอร์เตอร์

$$L \leq \frac{V_{rated}}{2\pi f_0 I_{rated}} = L_{max} \quad (3.3)$$

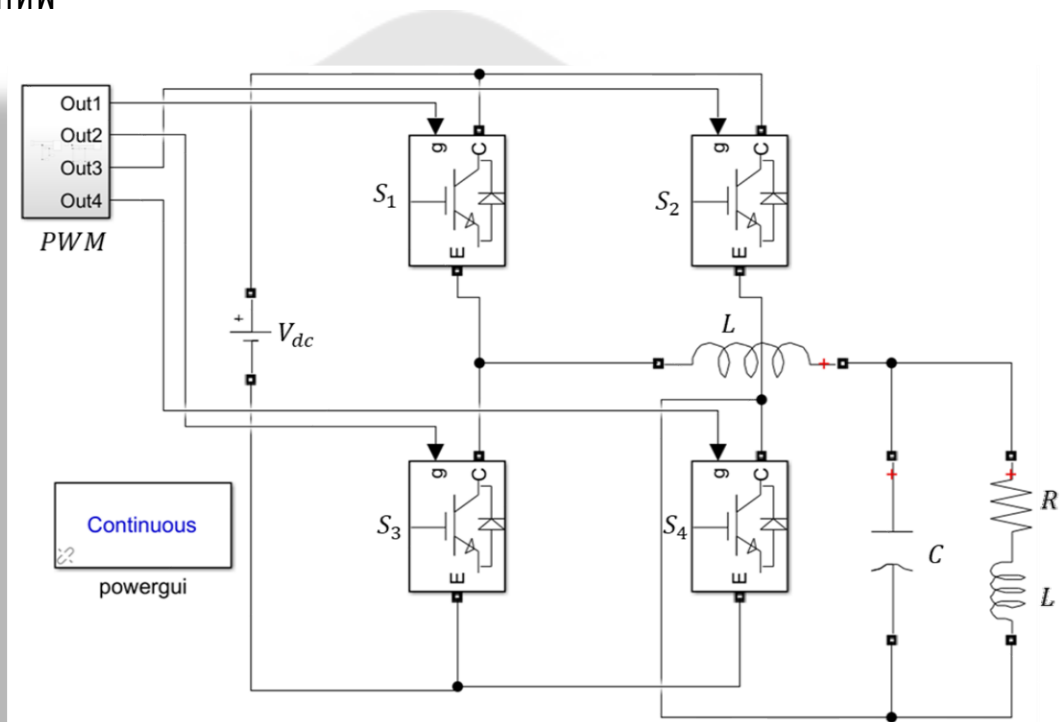
ขั้นที่ 3 กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรอง เมื่อทราบค่าตัวเหนี่ยวนำสามารถทำการคำนวณตัวเก็บประจุ ดังนี้

$$f_0 < \left(f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right) < f_{sw} \quad (3.4)$$

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบขนาดกระแสของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่ากระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุด ที่กำหนดในขั้นที่ 1

$$\frac{i_{inv}}{V_{rated(rms)}} = \frac{j\omega C}{1-LC\omega^2} \quad (3.5)$$

3.4.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดอินдукทีฟ

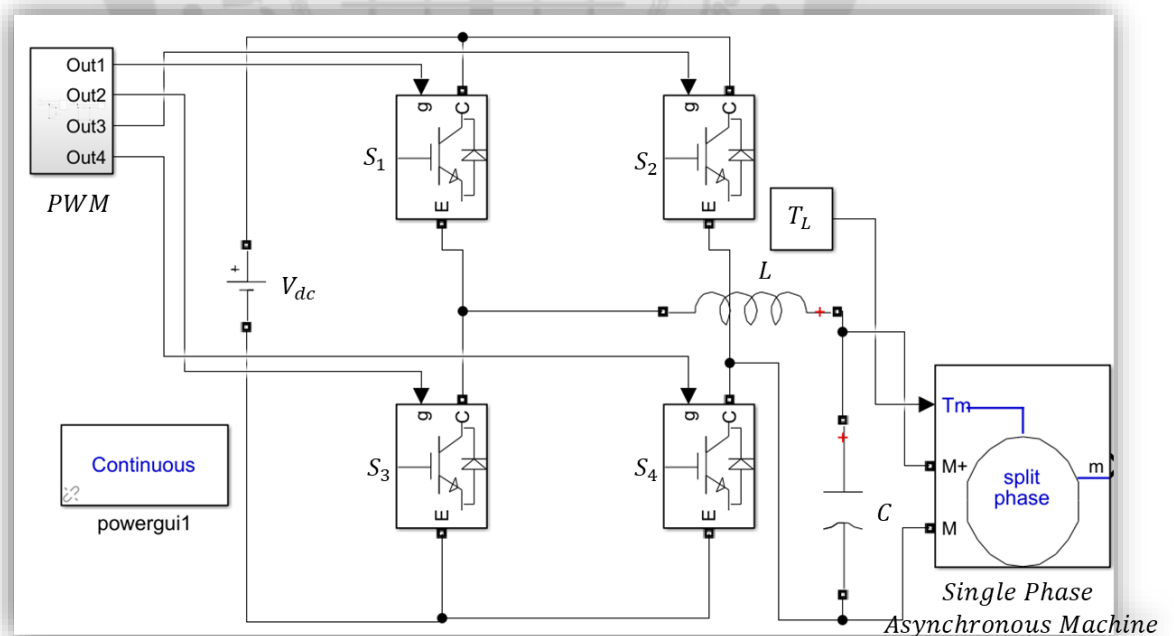


ภาพประกอบ 17 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดอินдукทีฟ

จากภาพประกอบ 17 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว ตามขั้นตอนการออกแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น การออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ กรณีโหลดอินдукทีฟจะมีแรงดันกระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เป็น 600 V แบ่งได้สามกรณี กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 โดยมีตัวต้านทาน 50 Ω ตัวเหนี่ยวนำ 150 mH ตามขั้นที่ 1 จะได้กระแสอินเวอร์เตอร์จากการจำลอง 4.989 A จะได้กระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 2.4945 A

($b=1/2$) ขั้นที่ 2 เมื่อทราบค่าความถี่มูลฐาน 50 Hz สามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ 3.2 ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.2702 H จากนั้นขั้นที่ 3 สามารถคำนวณตัวเก็บประจุ ตามสมการ 3.3 เมื่อกำหนดให้ความถี่แรงแชนซ์เท่ากับ 100 Hz จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 9.3573 μF ซึ่งสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์ ซึ่งคำนวณค่าจะได้ 1.6619 A ซึ่งเป็นจริงตามขั้นที่ 1 ของการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 โดยมีตัวต้านทาน 100 Ω ตัวเหนี่ยวนำ 450 mH กระแสอินเวอร์เตอร์จากการจำลองจะได้ 1.96 A เมื่อคำนวณตามขั้นตอนการออกแบบจะได้ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.689 H และตัวเก็บประจุเท่ากับ 3.676 μF กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 โดยมีตัวต้านทาน 10 Ω ตัวเหนี่ยวนำ 10 mH กระแสอินเวอร์เตอร์จากการจำลองจะได้ 32.38 A เมื่อคำนวณตามขั้นตอนการออกแบบจะได้ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.042 H และตัวเก็บประจุเท่ากับ 60.3 μF หลังจากนั้นจะนำตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบใส่ลงในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อดูผลการรอกฮาร์โมนิกทั้งสามกรณี

3.4.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดเป็นมอเตอร์



ภาพประกอบ 18 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟและต่อโหลดเป็นมอเตอร์

จากภาพประกอบ 18 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้ จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว ตามขั้นตอน การออกแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น การออกแบบตัวกรองแบบ พาสซีฟ กรณีไหลดเป็นมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวแบบอะซิงโครนัส (single phase asynchronous machine) ซึ่งจะซั้วไหลด 2 กรณี คือกรณีไร้อไหลด และกรณีซั้วไหลดเต็มพิกัด กรณีแรก การออกแบบตามขั้นที่ 1 จะได้กระแสอินเวอร์เตอร์จากการจำลอง 7.885 A จะได้กระแส อินเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 3.9425 A ($b=1/2$) ขั้นที่ 2 เมื่อทราบค่าความถี่มูลฐาน 50 Hz สามารถ คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ 3.2 ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.1592 H จากนั้นขั้นที่ 3 สามารถคำนวณตัวเก็บประจุ ตามสมการ 3.3 เมื่อกำหนดให้ความถี่แระโซแนนซ์ เท่ากับ 100 Hz จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 15.92 μF สุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบขนาดของ กระแสอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นจริงตามขั้นที่ 1 ของการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ กรณีซั้วไหลด เป็นเต็มพิกัด กระแสอินเวอร์เตอร์จากการจำลองจะได้ 9.06 A เมื่อกำหนดตามขั้นตอนการ ออกแบบจะได้ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.149 H และตัวเก็บประจุเท่ากับ 17.0 μF หลังจากนั้นจะนำตัว เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบใส่ลงในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อดูผลการกรองฮาร์ มอนิกทั้งสองกรณี ในทางปฏิบัติ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่อไหลดมอเตอร์จะไม่ใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ เนื่องจากเมื่อทำการปรับค่าอัตราการผลิตด้านความถี่ทำให้ความถี่มูลฐานมีค่าไม่นิ่ง โอกาส เกิดแระโซแนนซ์มีสูงมาก เมื่อมีแระโซแนนซ์โอกาสอุปกรณ์เกิดการเสียหายและระเบิดได้

3.5 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์

3.5.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองแบบวีเนอร์

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็น สัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz โดยจะมีแอมพลิจูดตามคลื่นกระแสของไหลด

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (r_{xx}) และค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (r_{xd})

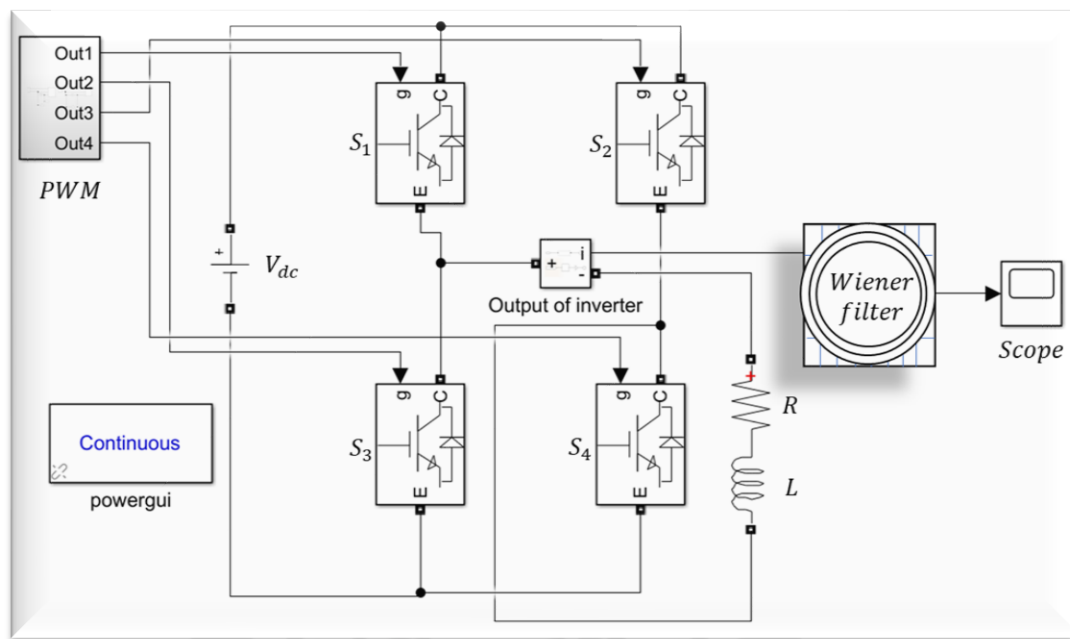
ขั้นที่ 3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง โดยการนำค่าสหสัมพันธ์ไขว้เป็นตัวเศษและ สหสัมพันธ์อัตโนมัติเป็นตัวส่วน ดังสมการ (3.6)

$$w = r_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (3.6)$$

ขั้นที่ 4 ทำการรอสารมอริกที่ไ้เกิดจากอินเวอร์เตอร์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองมากรคอนโวลูชันกับคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการ (3.7)

$$\hat{d}(n) = w^T x(n) \quad (3.7)$$

3.5.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดอินดักทีฟ



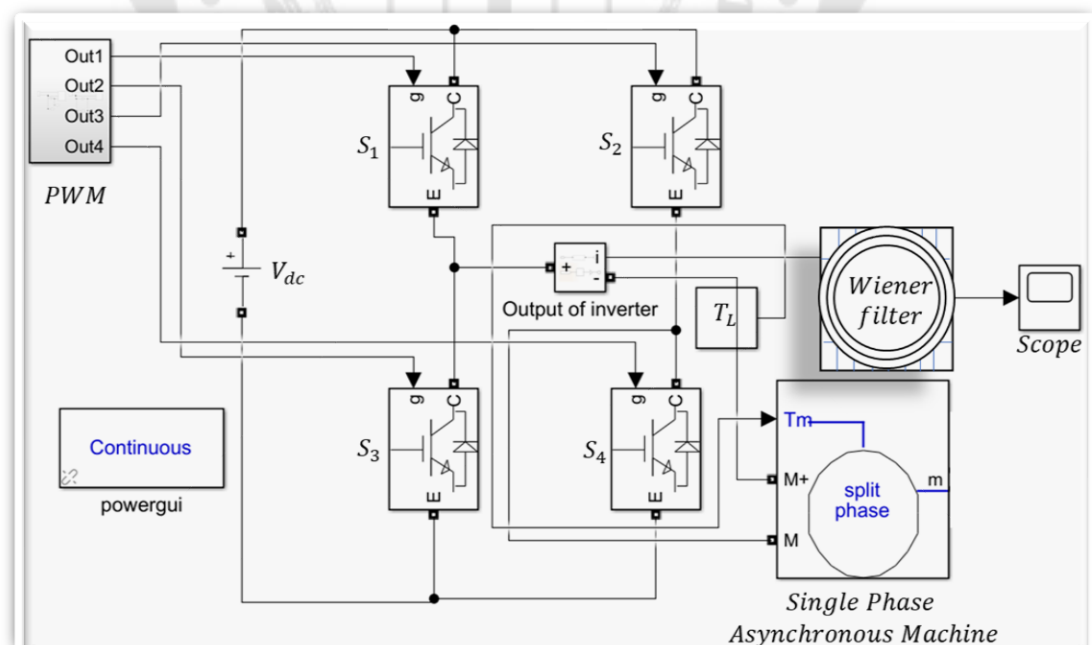
ภาพประกอบ 19 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดอินดักทีฟ

จากภาพประกอบ 19 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ไ้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดียวจะมีการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ต่างเฟสกันคือ 0 องศา กับ 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งการควบคุมก็จะเป็นการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 0 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 กับตัวที่ 3 และนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 2 กับตัวที่ 4 สามารถดูรายละเอียดการออกแบบในเนื่อหาการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 โวลต์ โดยที่ต่อโหลดอินดักทีฟตามตัวประกอบกำลัง โดยขั้นที่ 1 จะเป็นการสร้างสัญญาณต้นแบบ สำหรับโหลดอินดักทีฟ จะสร้างคลื่น

กระแสที่เป็นลูกคลื่นไซน์ต้นแบบขนาด 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A ตามลำดับของตัวประกอบกำลัง 0.5 0.7 และ 0.9 มีความถี่ 50 Hz โดยตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นตัวกรองที่ประมาณสัญญาณต้นแบบ โดยจะมีการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง (filter coefficient) จากการคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (auto-correlation) และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองได้จากการนำค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ไขว้เป็นเศษ และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติเป็นส่วน หลังจากนั้นก็จะทำการกรองสัญญาณฮาร์มอนิกโดยการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับคลื่นกระแสขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นก็จะได้สัญญาณที่ถูกกรองโดยตัวกรองแบบวีเนอร์ ซึ่งข้อจำกัดของตัวกรองแบบวีเนอร์คือคลื่นกระแสขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ต้องเป็นสัญญาณที่คงที่หรือสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในที่นี้จะใช้อันดับการกรองเป็น 120 ($M=120$) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการกรองเป็นสัญญาณมีความคล้ายสัญญาณต้นแบบ ตามบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ (°) เพื่อดูประสิทธิภาพในการกรองฮาร์มอนิก หลังจากนั้นจะทำการกรองเพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการกรองโดยจะสามารถดูได้ทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

3.5.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์



ภาพประกอบ 20 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์และต่อโหลดเป็นมอเตอร์

จากภาพประกอบ 20 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยจะมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดียว สามารถดูรายละเอียดการออกแบบได้ตามที่นำเสนอมาก่อน ซึ่งการออกแบบตัวกรองวีเนอรคือคลื่นกระแสขาออกที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวแบบอะซิงโครนัส (single phase asynchronous machine) ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz โดยมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองฮาร์มอนิกคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสปลิตเฟส (split phase) หลังจากนั้นก็จะทำการกรองโดยการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับคลื่นกระแสขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งข้อจำกัดของตัวกรองแบบวีเนอรคือคลื่นกระแสขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ต้องเป็นสัญญาณที่คงที่หรือสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในที่นี่จะใช้อันดับการกรองเป็น 1000 ($M=1000$) เนื่องจากค่าอันดับตัวกรองที่น้อยตามบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ (°) จะส่งผลกับการกรองได้ไม่ดี แต่การคำนวณในกรณีจะใช้เวลานานขึ้น สัญญาณที่ได้จากการกรองเป็นสัญญาณมีความคล้ายสัญญาณต้นแบบมากขึ้น

3.6 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้

3.6.1 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz โหลดอินดักทีฟจะมีแอมพลิจูดเป็น 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A สำหรับกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ และโหลดมอเตอร์จะมีแอมพลิจูดเป็น 7.885 A และ 9.06 A สำหรับกรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ดังสมการ (3.8) โดยนำค่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์มาทำการหักล้างกับค่าที่ได้จากการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับสัญญาณขาเข้าตัวกรอง

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3.8)$$

ขั้นที่ 3 นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ตามสมการ (3.9) โดยกำหนดค่าช่วงก้าวอยู่ระหว่างค่า 10^{-6} ถึง 10^{-8} ตามอ้างอิง (°)

$$a(n+1) = a(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (3.9)$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ตามสมการ (3.10)

$$y(n) = a^T(n)x(n) \quad (3.10)$$

3.6.2 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz โหลดอินดักทีฟจะมีแอมพลิจูดเป็น 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A สำหรับกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ และโหลดมอเตอร์จะมีแอมพลิจูดเป็น 7.885 A และ 9.06 A สำหรับกรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน จากสมการ (3.8) โดยนำค่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์มาทำการหักล้างกับค่าที่ได้จากการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับสัญญาณขาเข้าตัวกรอง

ขั้นที่ 3 นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ตามสมการ (3.11) โดยค่าช่วงก้าวประมาณ 10^{-1} ถึง 10^{-2}

$$b(n+1) = b(n) + \frac{\mu}{\varepsilon + \|x(n)\|^2} e(n)x(n) \quad (3.11)$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ตามสมการ (3.12)

$$y(n) = b^T(n)x(n) \quad (3.12)$$

3.6.3 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบเร็วไหล

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz โหลดอินดักทีฟจะมีแอมพลิจูดเป็น 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A สำหรับกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ และโหลดมอเตอร์จะมีแอมพลิจูดเป็น 7.885 A และ 9.06 A สำหรับกรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน จากสมการ (3.8) โดยนำค่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์มาทำการหักล้างกับค่าที่ได้จากการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับสัญญาณขาเข้าตัวกรอง

ขั้นที่ 3 นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ตามสมการ (3.13) โดยจะกำหนดค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ตามการออกแบบของ Alhafadhi L และคณะ (°) และค่า $\eta = 0.1$ ตามรายละเอียดการออกแบบจากตำราของ Alexander และคณะ (32)

$$c(n+1) = (1 - \mu\eta)c(n) + \mu e(n)x(n) \quad (3.13)$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ตามสมการ (3.14)

$$y(n) = c^T(n)x(n) \quad (3.14)$$

3.6.4 ขั้นตอนการออกแบบวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz โหลดอินดักทีฟจะมีแอมพลิจูดเป็น 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A สำหรับกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ และโหลดมอเตอร์จะมีแอมพลิจูดเป็น 7.885 A และ 9.06 A สำหรับกรณีไร้โหลด และกรณีชั้บโหลดเต็มพิกัด ซึ่งวิธีการออกแบบโดยทั่วไปของตัวกรองแบบปรับค่าได้จำเป็นต้องสร้างสัญญาณต้นแบบเพื่อการกรองโดยตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีแบบต่างๆเหล่านี้ จะทำการเลียนแบบสัญญาณให้ใกล้เคียงกับสัญญาณต้นแบบให้มากที่สุด

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ดังสมการ (3.15) โดยนำค่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์ต้นแบบมาทำการหักล้างกับค่าที่ได้จากการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับสัญญาณรบกวนขาเข้าตัวกรอง และทำการหาค่าหาเวกเตอร์ควบคุมของตัวกรอง ดังสมการ (3.16) (37)

$$e(i) = d(i) - y(i) \quad (3.15)$$

$$k(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1)u(n)}{\lambda + u^H(n)\mathbf{P}(n-1)u(n)} \quad (3.16)$$

ขั้นที่ 3 นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ตามสมการ (3.17)

$$w(n) = w(n-1) + k(n)e(n) \quad (3.17)$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ตามสมการ (3.18)

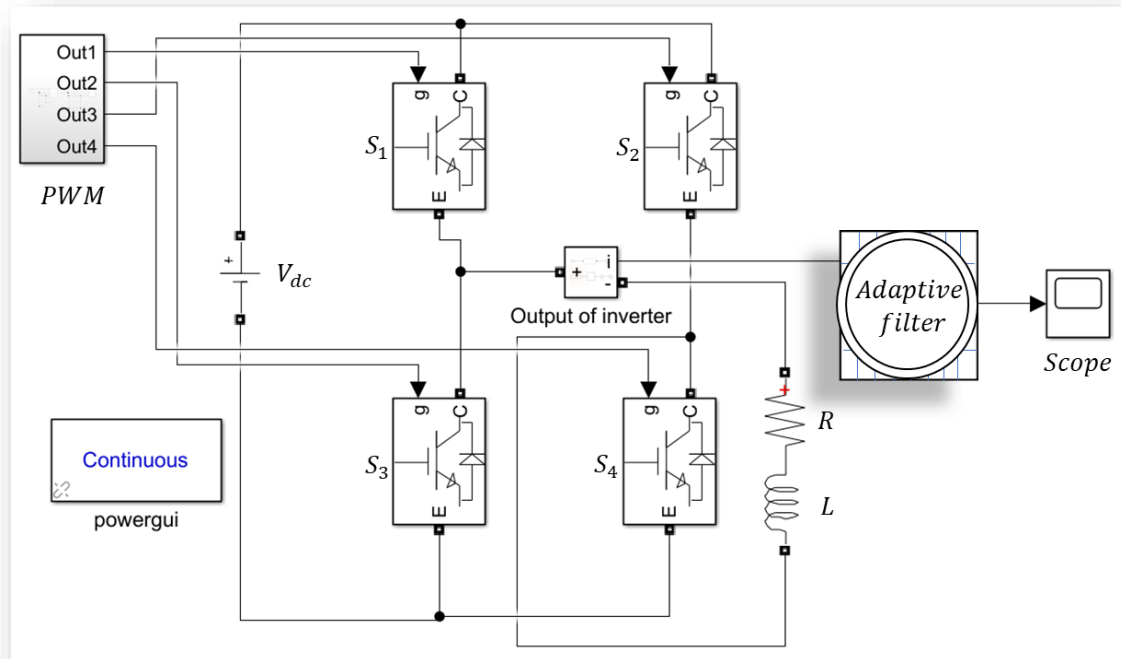
$$y(n) = w^H(n)u(n) \quad (3.18)$$

ขั้นที่ 5 ทำการหาค่าบ่งบอกถึงการทำเมทริกซ์สหสัมพันธ์แบบผกผัน เพื่อทำการปรับค่าเวกเตอร์ควบคุมของตัวกรอง ตามสมการ (3.19) ซึ่งค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์แบบผกผันมีค่าประมาณ 10^{-9} ถึง 10^{-10} และค่า $\lambda = 0.995$ ตามรายละเอียดการออกแบบจากตำราของ Simon Haykin ⁽³³⁾

$$\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1} [\mathbf{P}(n-1) - k(n)u^H(n)\mathbf{P}(n-1)] \quad (3.19)$$

จะสังเกตได้ว่าความเหมือนและความแตกต่างระหว่างตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีต่างๆ ดังนี้ ความเหมือนคือวิธีการกรองของตัวกรองแบบปรับค่าได้จะเป็นการนำค่าสัญญาณรบกวนมาทำการคอนโวลูชันกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง และความแตกต่างคือตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (LMS) ในแบบต่างๆจะมีการใช้ค่าช่วงก้าวเข้ามาในการคำนวณ แต่วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ (RLS) จะไม่มีการใช้ค่าช่วงก้าวในการคำนวณตัวกรองแบบปรับค่าได้

3.6.5 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดอินดักทีฟ



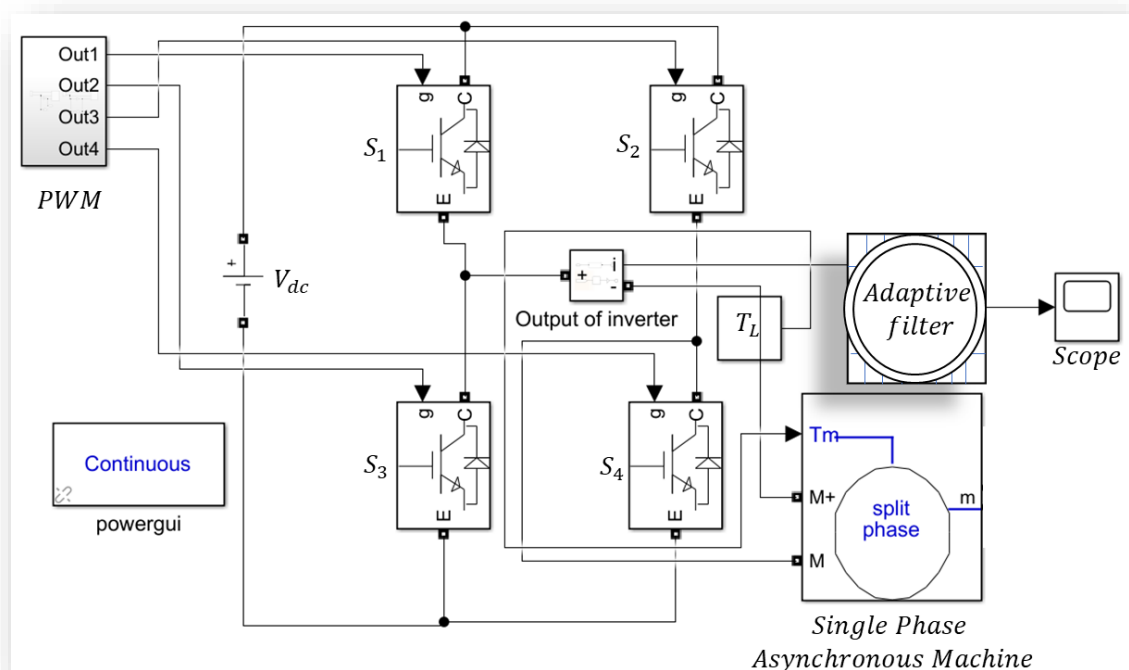
ภาพประกอบ 21 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดอินดักทีฟ

จากภาพประกอบ 21 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียวจะมีการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ต่างเฟสกันคือ 0 องศา กับ 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งการควบคุมก็จะเป็นการนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 0 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 1 กับตัวที่ 3 และนำสัญญาณควบคุมรูปไซน์ต่างเฟส 180 องศา มาเทียบรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะไปขับสวิตช์ตัวที่ 2 กับตัวที่ 4 สามารถดูรายละเอียดการออกแบบในเนื้อหาการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 โวลต์ โดยที่ต่อโหลดอินดักทีฟตามตัวประกอบกำลัง โดยขั้นที่ 1 จะเป็นการสร้างสัญญาณต้นแบบ สำหรับโหลดอินดักทีฟ จะสร้างคลื่นกระแสที่เป็นลูกคลื่นไซน์ต้นแบบขนาด 1.96 A 4.989 A และ 32.38 A ตามลำดับของตัวประกอบกำลัง 0.5 0.7 และ 0.9 มีความถี่ 50 Hz ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าได้เป็นตัวกรองชนิดหนึ่งที่สามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองโดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าได้จะ

ทำงานเลียนแบบสัญญาณลูกคลื่นไซน์ต้นแบบ ในที่นี้จะใช้อันดับการกรองเป็น 120 ($M=120$) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการกรองเป็นสัญญาณมีความคล้ายสัญญาณต้นแบบ ตามบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ^(๑) ซึ่งเงื่อนไขของแต่ละวิธีสามารถดูได้จากเนื้อหาการออกแบบตัวกรองแบบปรับค่าได้

3.6.6 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดเป็นมอเตอร์



ภาพประกอบ 22 วงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้และต่อโหลดเป็นมอเตอร์

จากภาพประกอบ 22 ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียวเพื่อจำลองคลื่นกระแส โดยวงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปเฟส ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz หลังจากนั้นก็จะทำการกรอง ซึ่งใช้อันดับการกรองเป็น 1000 ($M=1000$) เนื่องจากค่าอันดับตัวกรองที่น้อยตามบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ^(๑) จะส่งผลกับการกรองได้ไม่ดี แต่การคำนวณในกรณีจะใช้เวลาที่นานขึ้น ซึ่งเงื่อนไขของแต่ละวิธีสามารถดูได้จากเนื้อหาการออกแบบตัวกรองแบบปรับค่าได้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดผลการจำลองฮาร์มอนิกของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ซึ่งจะจำลองฮาร์มอนิกทางสายตัวนำแบบขับโหลดอินดักทีฟ รวมถึงแบบขับโหลดมอเตอร์ โดยในการจำลองในแต่ละกรณี จะใช้ตัวกรอง 3 แบบ คือตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) ตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter) และตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter)

แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองมาหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) ในแต่ละตัวกรองนำมาเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้มาตรฐานค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเป็นค่าอ้างอิงเทียบกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในแต่ละกรณีของตัวกรองแบบต่างๆ ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในแต่ละแบบต้องไม่เกิน 5% และสรุปผลเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกในแต่ละตัวกรอง

4.1 ผลการจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์

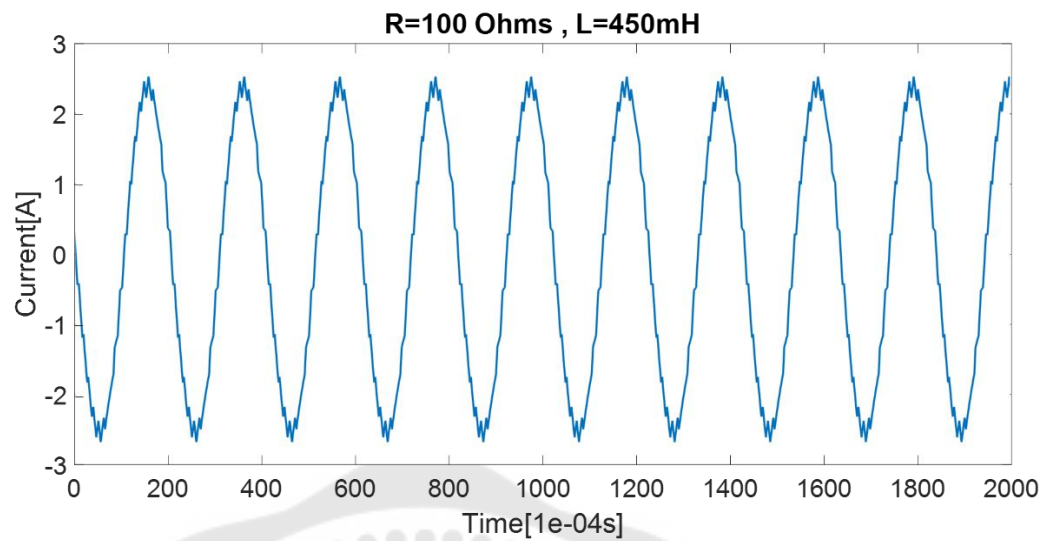
การจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในที่นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองฮาร์มอนิก จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นโหลดอินดักทีฟ และส่วนที่เป็นโหลดมอเตอร์ ดังนี้

4.1.1 ผลการจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดอินดักทีฟ

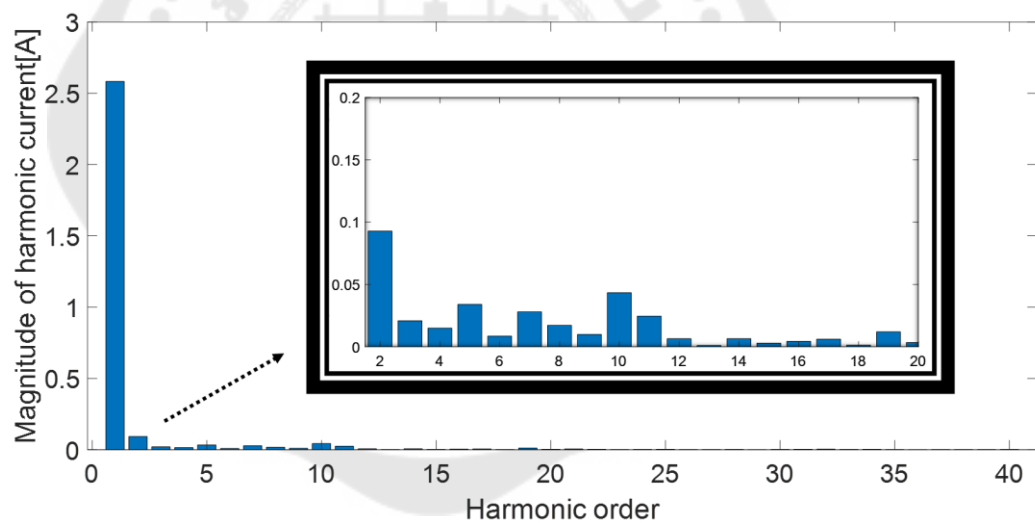
ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว ซึ่งมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V โดยมีโหลดอินดักทีฟที่พิจารณาตัวประกอบกำลัง 3 กรณี คือกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 เพื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละแบบ ดังต่อไปนี้

4.1.1.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 100 Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 450 mH จะได้คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



ภาพประกอบ 23 คลื่นกระแสต้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=100\ \Omega$ และ $L=450\ \text{mH}$



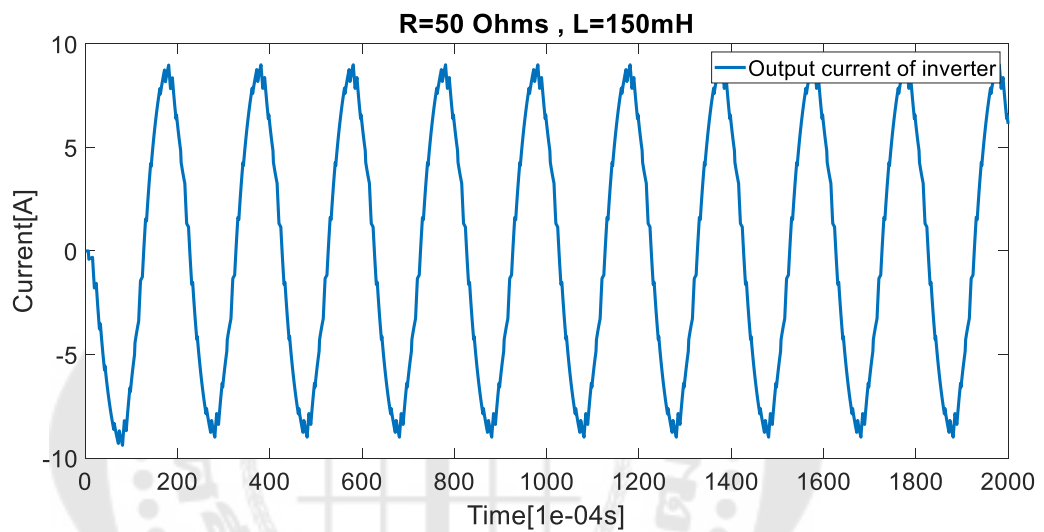
ภาพประกอบ 24 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=100\ \Omega$ และ $L=450\ \text{mH}$

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 23 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกโดยวัดจากกระแสขาออก พบว่า เมื่อใส่ตัวต้านทานมีค่า $100\ \Omega$ ตัวเหนี่ยวนำ $450\ \text{mH}$ จะได้กระแสที่ต่ำกว่าแรงดัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 6.52% ซึ่งค่าความ

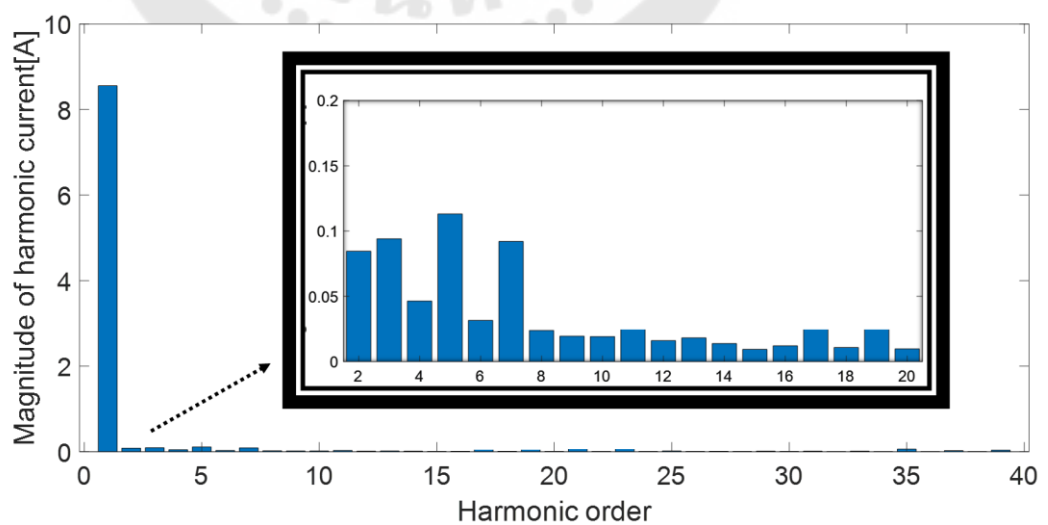
เพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 24

4.1.1.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 50Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 150 mH จะได้คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



ภาพประกอบ 25 คลื่นกระแสด้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=50 \Omega$ และ $L=150 \text{ mH}$

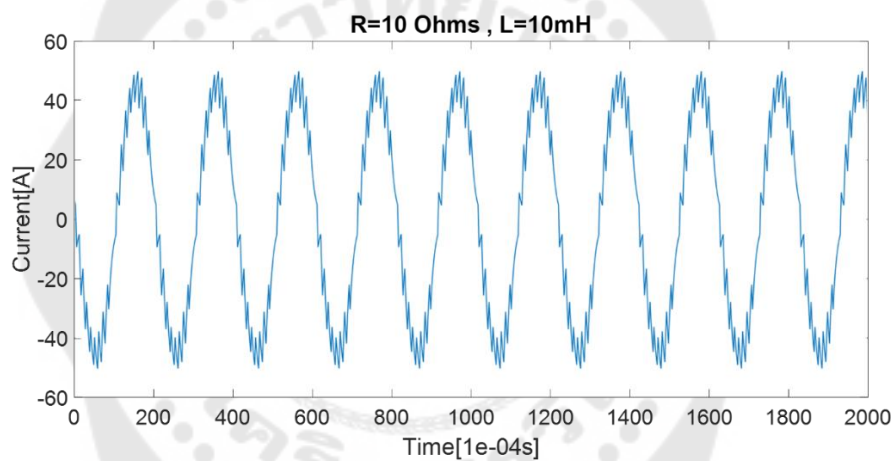


ภาพประกอบ 26 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=50 \Omega$ และ $L=150 \text{ mH}$

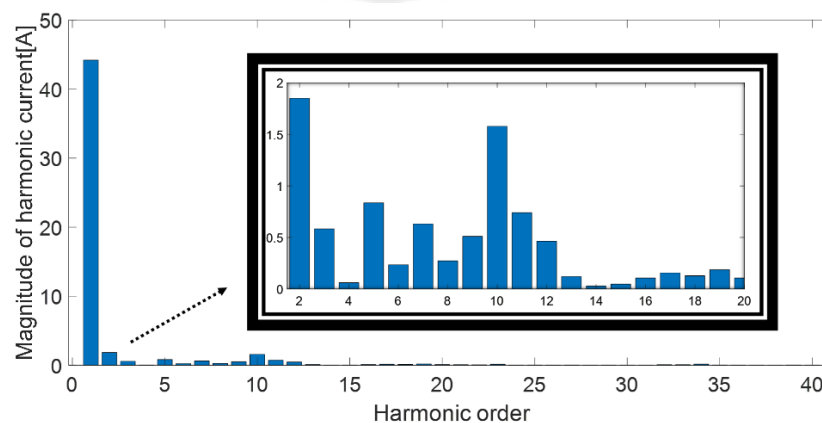
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 25 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกโดยวัดจากกระแสขาออก พบว่า เมื่อใส่ตัวต้านทานมีค่า 50Ω ตัวเหนี่ยวนำ 150 mH จะได้กระแสที่ต่ำกว่าแรงดัน และมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 5.84% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 26

4.1.1.3 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 10Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 mH จะได้คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



ภาพประกอบ 27 คลื่นกระแสด้านขาออกอินเวอร์เตอร์ของ $R=10 \Omega$ และ $L=10 \text{ mH}$

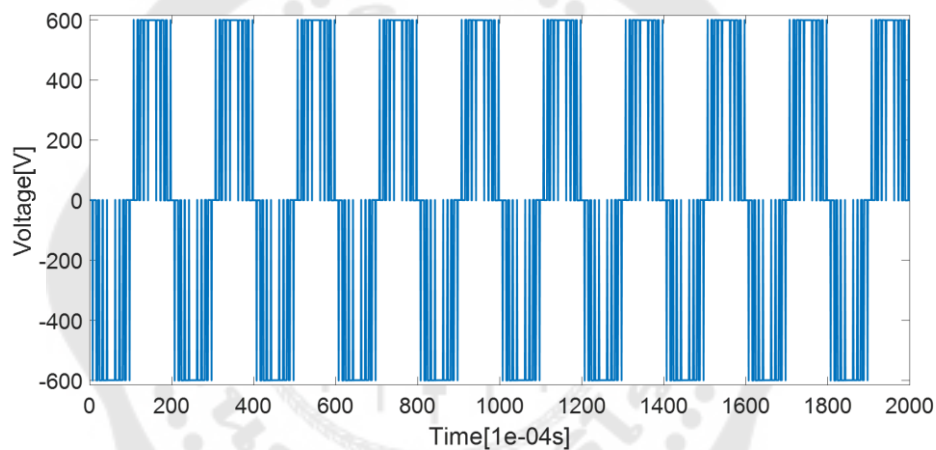


ภาพประกอบ 28 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของ $R=10 \Omega$ และ $L=10 \text{ mH}$

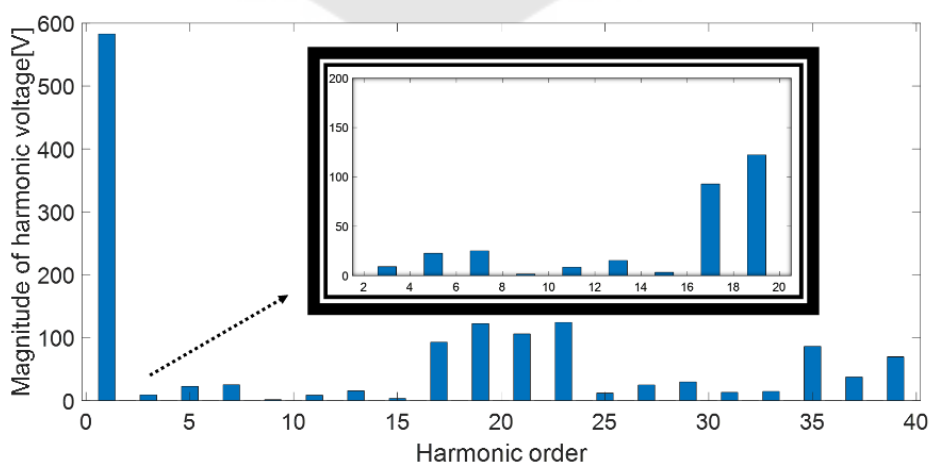
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 27 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกโดยวัดจากกระแสขาออก พบว่า เมื่อใส่ตัวต้านทานมีค่า 10Ω ตัวเหนี่ยวนำ 10 mH จะได้กระแสที่ต่ำกว่าแรงดัน และมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 5.64% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 28

4.1.1.4 ผลจำลองแรงดันฮาร์มอนิกของโหลดอินดักทีฟ

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟเพื่อหาค่าคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ จะได้ดังนี้



ภาพประกอบ 29 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ของโหลดอินดักทีฟ



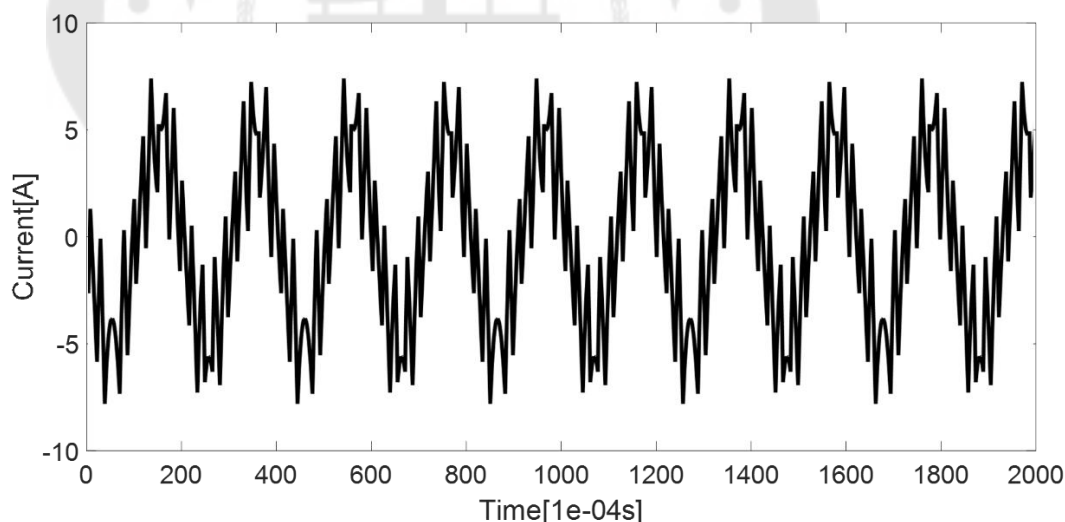
ภาพประกอบ 30 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของโหลดอินดักทีฟ

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 29 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกโดยวัดจากแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ ไม่มีความคล้ายลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 23.48% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 30

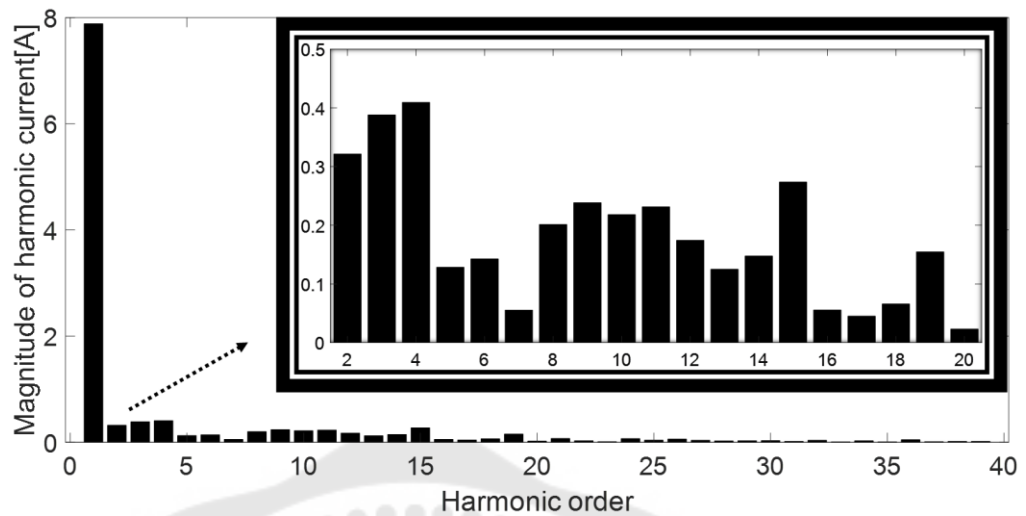
4.1.2 การจำลองฮาร์มอนิกในวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดมอเตอร์

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดี่ยวเพื่อจำลองคลื่นกระแส โดยวงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปเฟส (single phase asynchronous machine) ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz โดยจะใช้ขับโหลดออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด ดังนี้

4.1.2.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีไร้โหลด



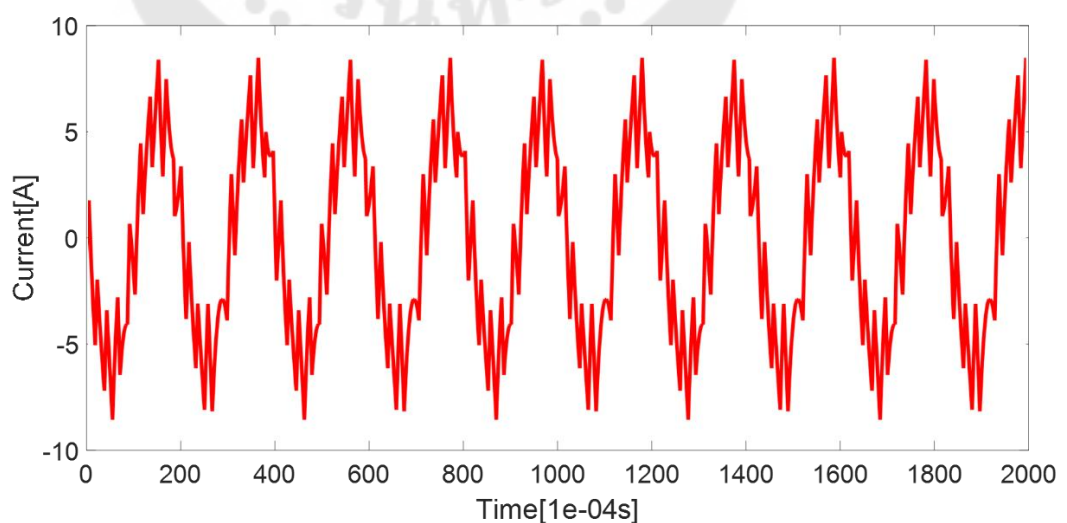
ภาพประกอบ 31 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้โหลด



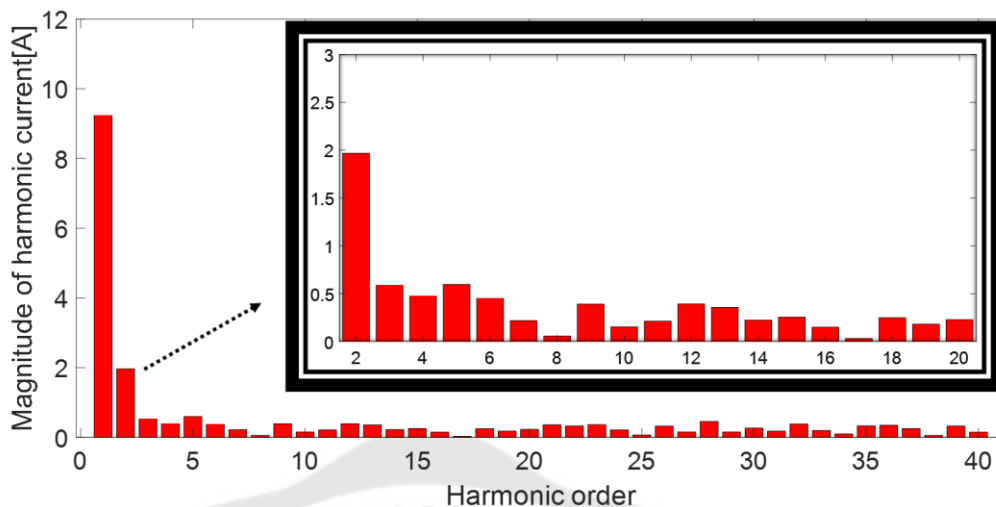
ภาพประกอบ 32 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้โหลด

จากภาพประกอบ 31 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดเป็นมอเตอร์ที่ไร้โหลด จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสจะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกปะปนอยู่ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม จะได้ 11.99% ซึ่งไม่ผ่านค่าที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% สามารถดูภาพประกอบ 32

4.1.2.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด



ภาพประกอบ 33 คลื่นกระแสทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด



ภาพประกอบ 34 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์โมนิกของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

จากภาพประกอบ 33 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยต่อโหลดเป็นมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกปะปนอยู่ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม จะได้ 17.68% ซึ่งไม่ผ่านค่าที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% สามารถดูภาพประกอบ 34

4.2 ผลการกรองฮาร์โมนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter)

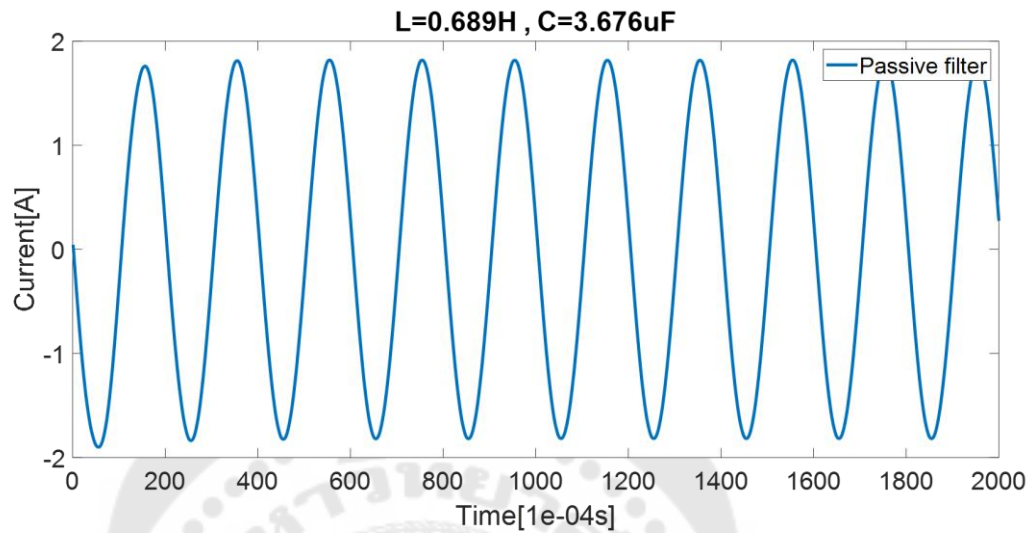
4.2.1 ผลการกรองฮาร์โมนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดียว ซึ่งมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V โดยมีโหลดอินดักทีฟที่พิจารณาตัวประกอบกำลัง 3 กรณี คือกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 เพื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละแบบ ดังต่อไปนี้

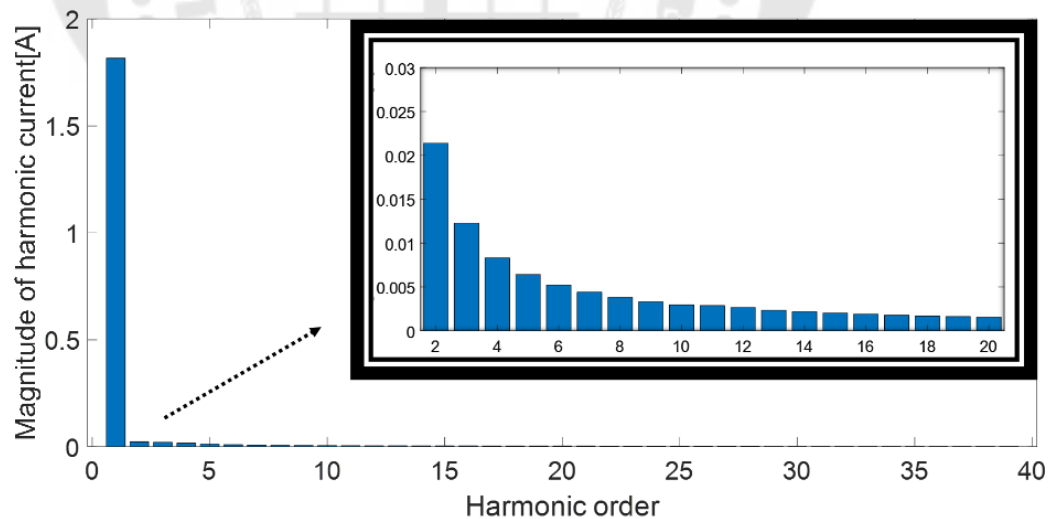
4.2.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์โมนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 100Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 450 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120 ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ โดยสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.689 H และตัวเก็บประจุมีค่า

3.676 μF ตามสมการการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟในบทที่ 3 จะแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 35 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.689 H และตัวเก็บประจุมีค่า 3.676 μF



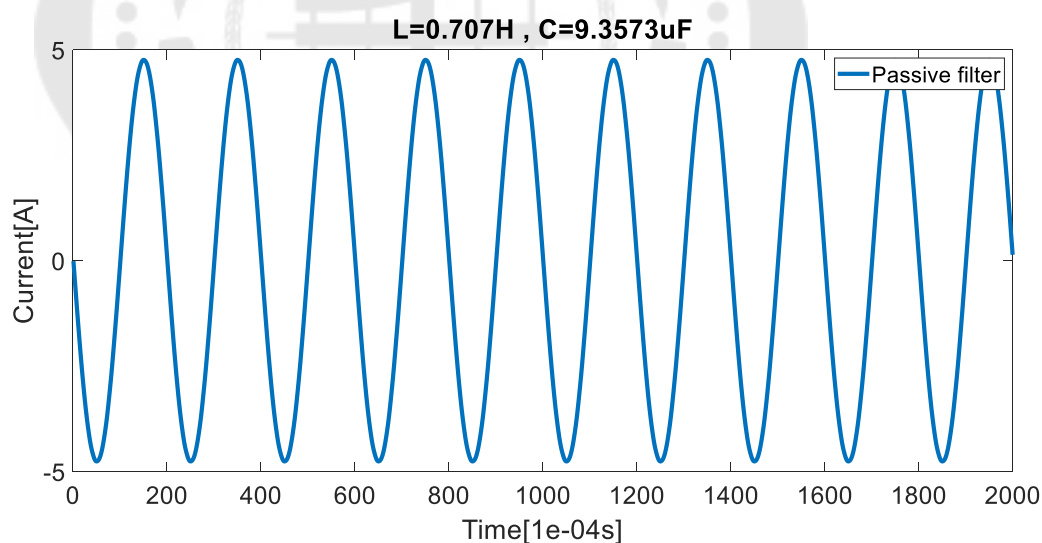
ภาพประกอบ 36 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.689 H และตัวเก็บประจุมีค่า 3.676 μF

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 35 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแส

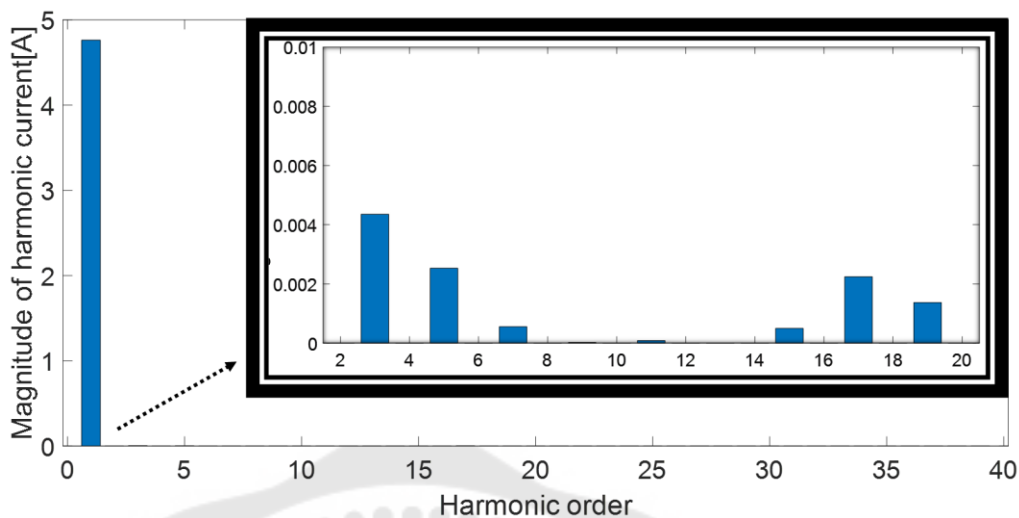
ขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 2.24% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบพาสซีฟผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 36

4.2.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโพลดิ้นดักที่ฟรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 50Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 150 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120 ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ โดยสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.707 H และตัวเก็บประจุมีค่า 9.3573 μF ตามสมการการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟในบทที่ 3 จะแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 37 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.707 mH และตัวเก็บประจุมีค่า 9.3573 μF

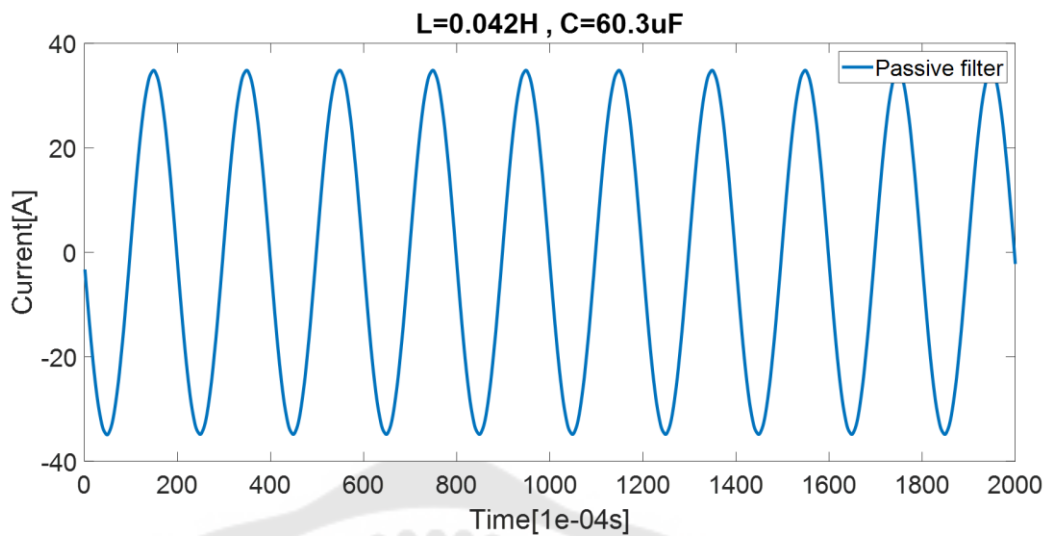


ภาพประกอบ 38 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.707 mH และตัวเก็บประจุมีค่า 9.3573 μF

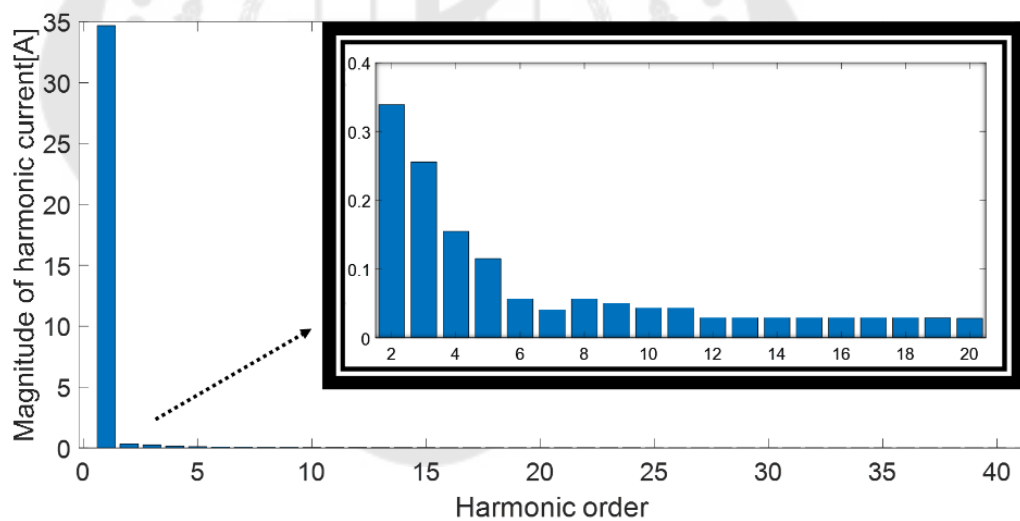
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 37 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 2.06% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบพาสซีฟผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 38

4.2.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 10 Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120 ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ โดยสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.042 H และตัวเก็บประจุมีค่า 60.3 μF ตามสมการการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟในบทที่ 3 จะแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 39 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.042 H และตัวเก็บประจุมีค่า 60.3 uF

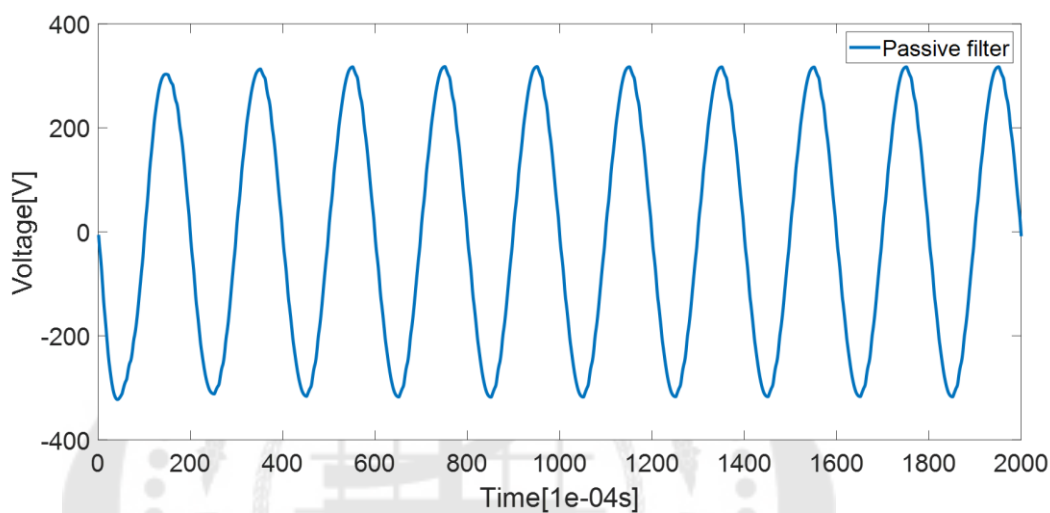


ภาพประกอบ 40 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีค่า 0.042 H และตัวเก็บประจุมีค่า 60.3 uF

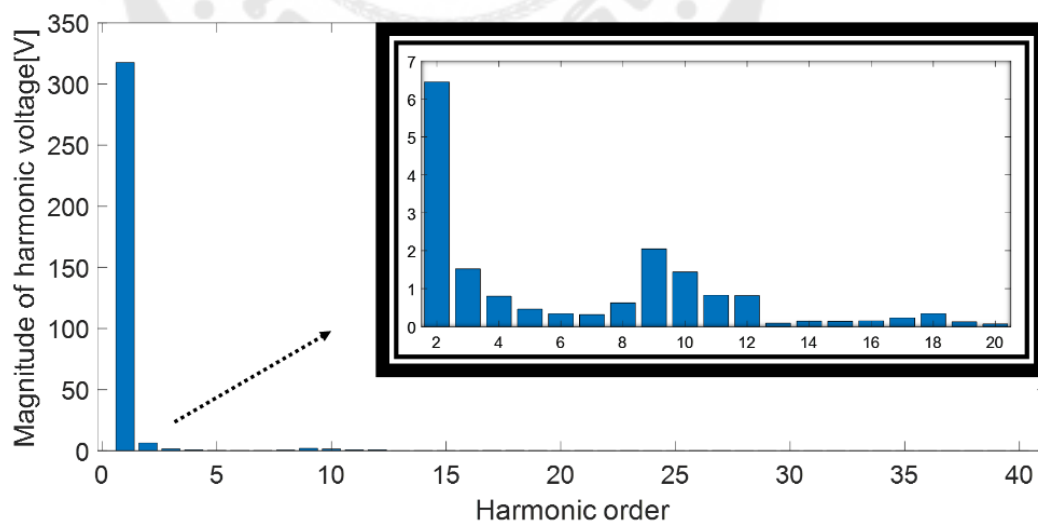
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 39 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบ

ความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 2.15% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบพาสซีฟผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 40

4.2.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ



ภาพประกอบ 41 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟ



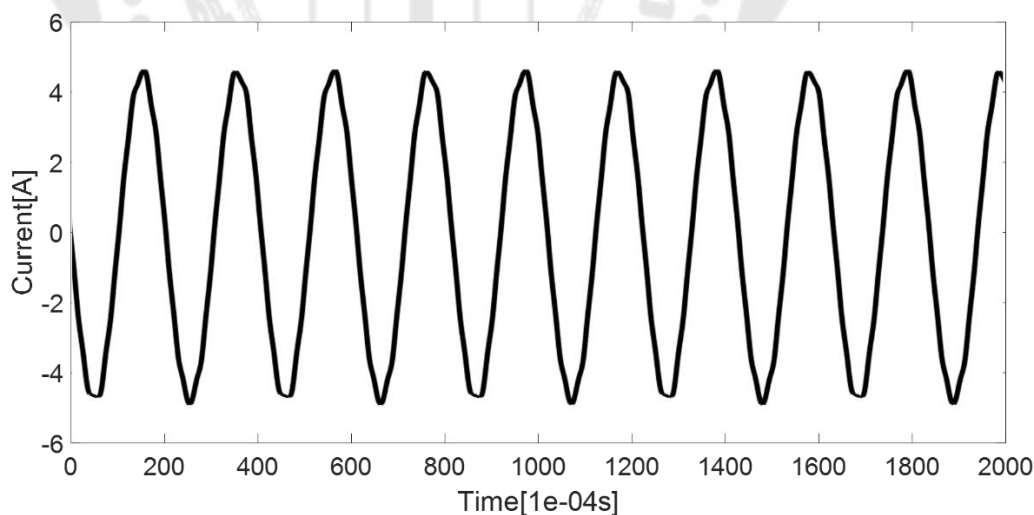
ภาพประกอบ 42 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟ

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 41 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟ จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สามห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 2.86% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบพาสซีฟผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 42

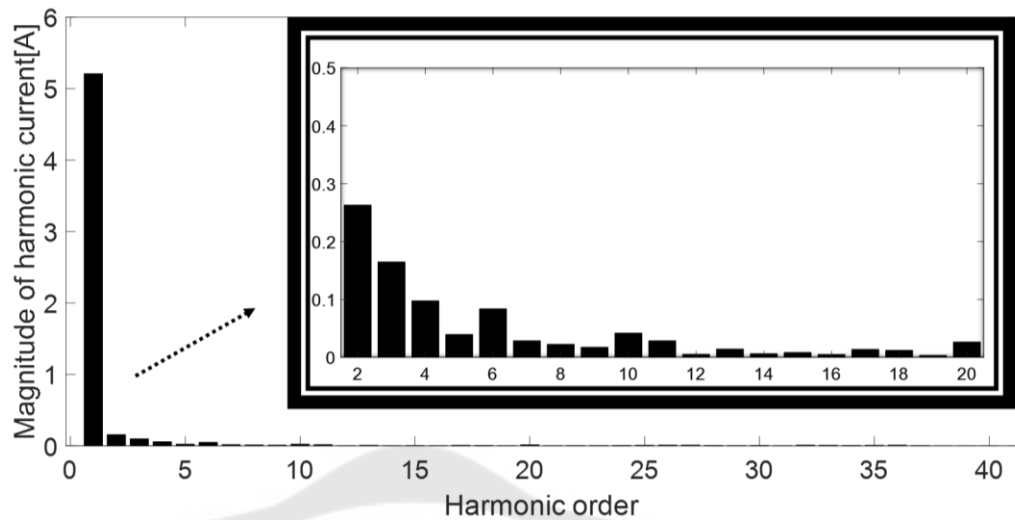
4.2.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว โดยมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปเฟส ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz โดยจะขับโหลดออกเป็น 2 กรณี กรณีไร้โหลด จะใส่ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.1592 H และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 15.92 μF กรณีขับโหลดเต็มพิกัดจะใส่ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.149 H และตัวเก็บประจุเท่ากับ 17.0 μF ตามขั้นตอนการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟในบทที่ 3 จะแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกได้ดังนี้

4.2.2.1 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีไร้โหลด



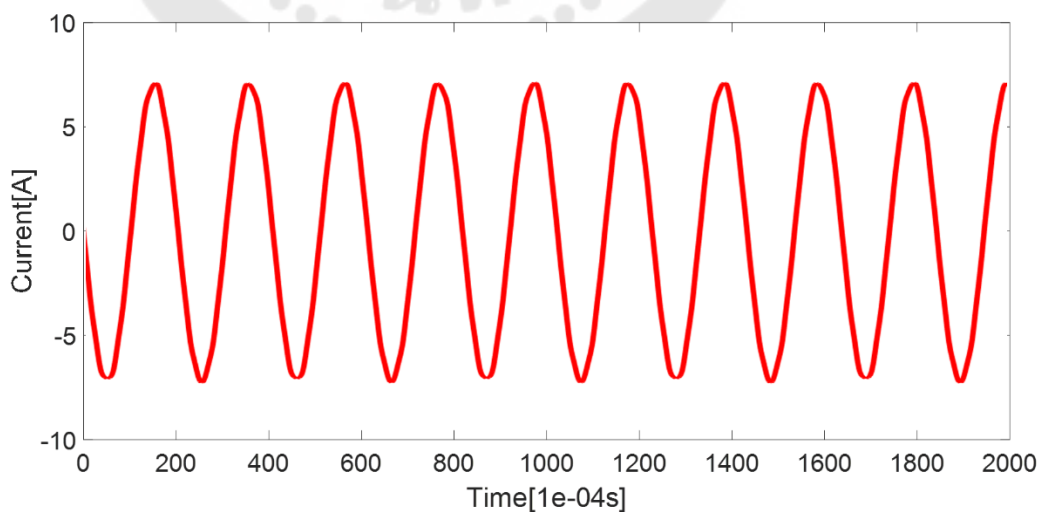
ภาพประกอบ 43 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์ กระแสสลิปเฟสเดียวกรณีไร้โหลด



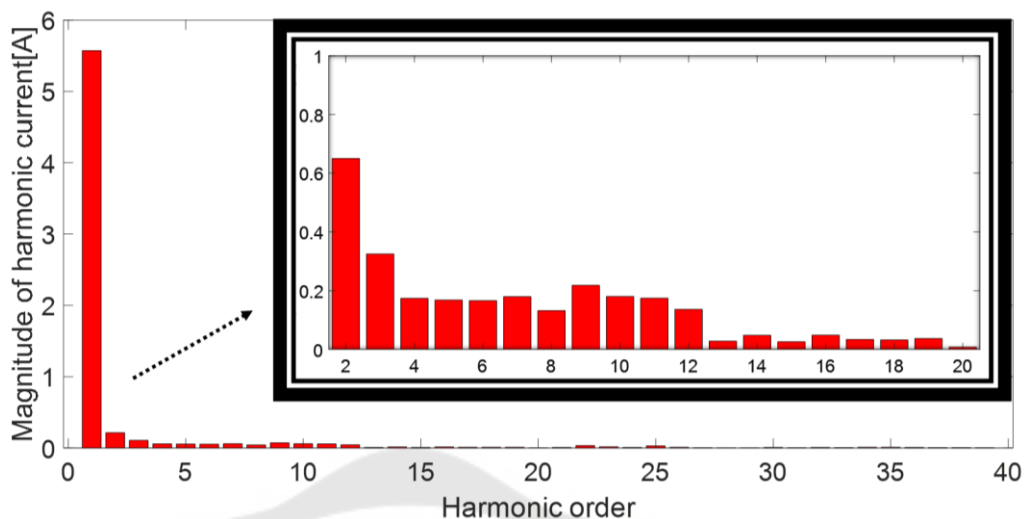
ภาพประกอบ 44 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีไร้โหลด

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 43 แสดงผลการจำลองสัญญาณซึ่งต่อโหลดเป็นมอเตอร์กรณีไร้โหลด จะสังเกตได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม จะได้ 2.26% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 44

4.2.2.2 ผลจำลองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด



ภาพประกอบ 45 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์โดยใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด



ภาพประกอบ 46 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบพาสซีฟของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 45 แสดงผลการจำลองสัญญาณซึ่งต่อโหลดเป็นมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด จะสังเกตได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม จะได้ 2.44% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 46

4.3 ผลการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ (Wiener filter)

ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นตัวกรองที่ประมาณสัญญาณต้นแบบ ซึ่งจะหามาจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (mean square error) โดยจะมีการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองจากการคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (auto-correlation) และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-correlation) ซึ่งนำค่าทั้งสองมาหารกันโดยตัวเศษจะเป็นค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ไขว้ และตัวส่วนจะค่าเป็นฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ สิ่งสำคัญในการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์คือสัญญาณรบกวนต้องเป็นสัญญาณที่คงที่ หรือสัญญาณที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา จึงจะทำการประมาณสัญญาณต้นแบบได้

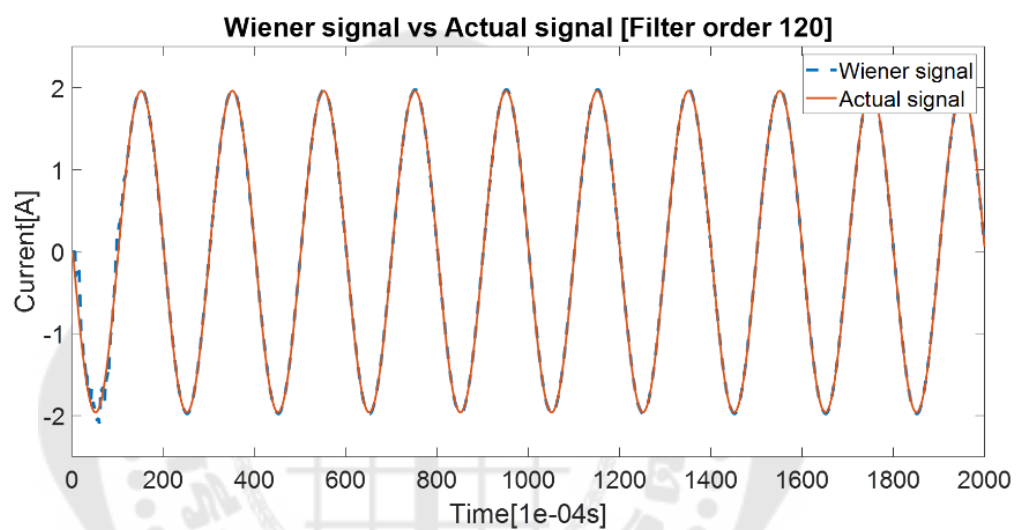
4.3.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดียว ซึ่งมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V โดยมี

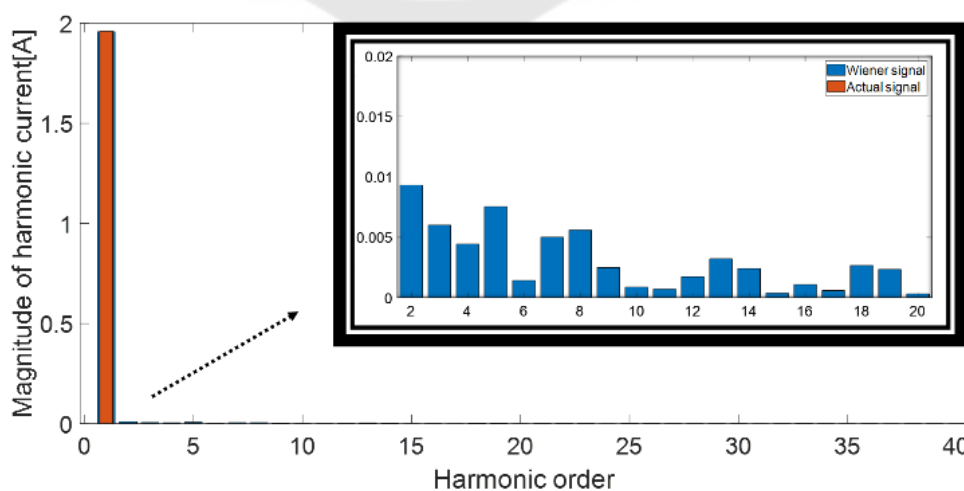
โหลดอินดักทีฟที่พิจารณาตัวประกอบกำลัง 3 กรณี คือกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 เพื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละแบบ ดังต่อไปนี้

4.3.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 100Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 450 mH ซึ่งจะได้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 47 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120

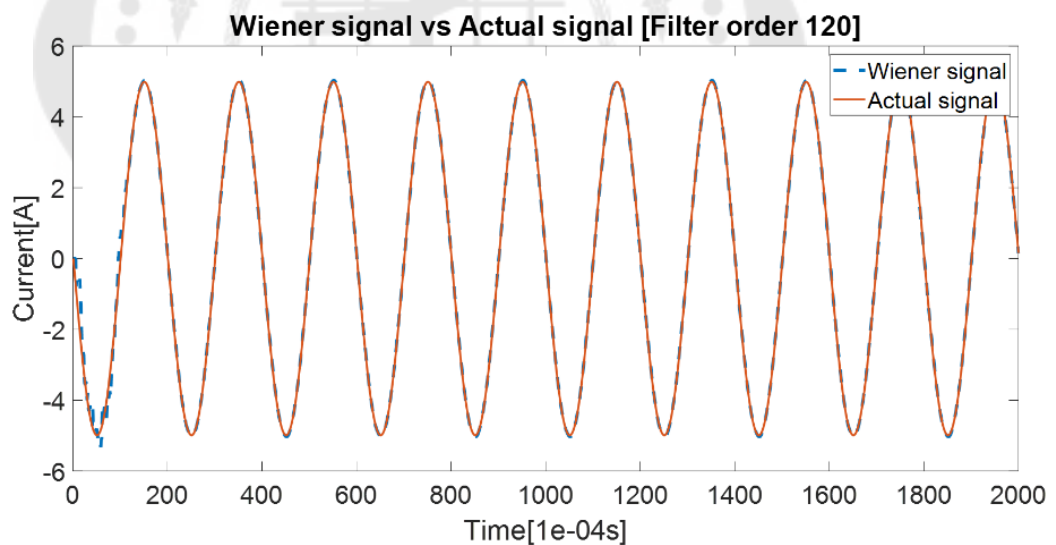


ภาพประกอบ 48 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ

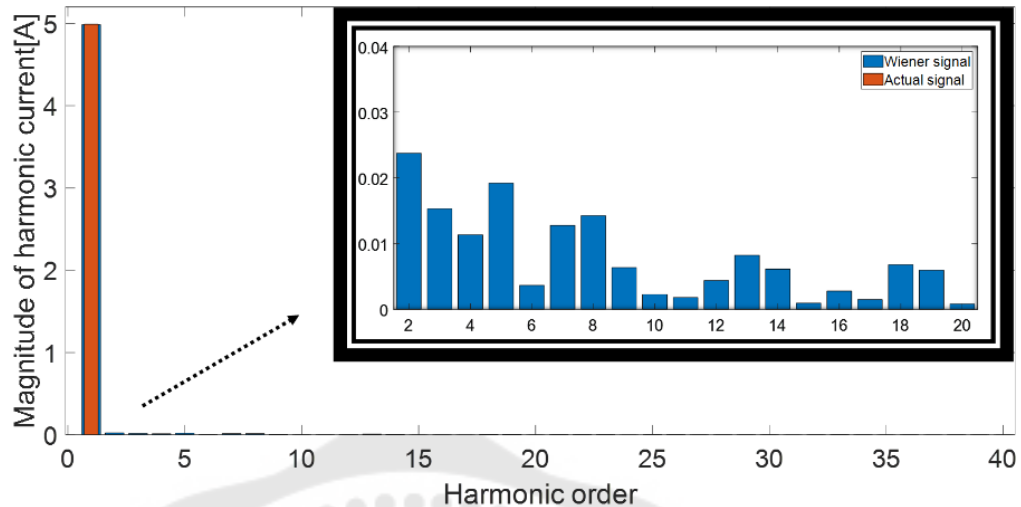
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 47 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.74% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 48

4.3.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 50Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 150 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 49 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120

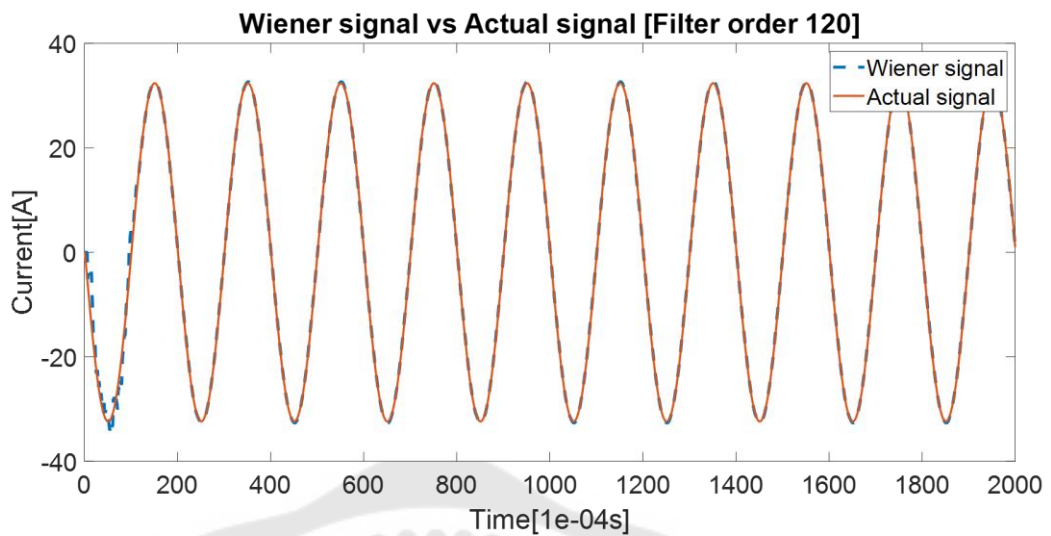


ภาพประกอบ 50 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ

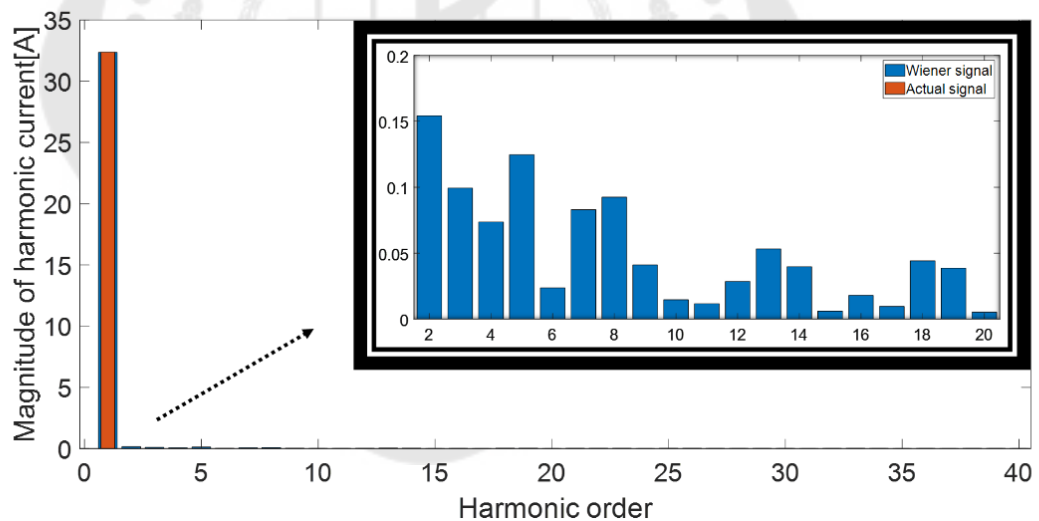
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 49 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.72% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 50

4.3.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 10Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 51 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120



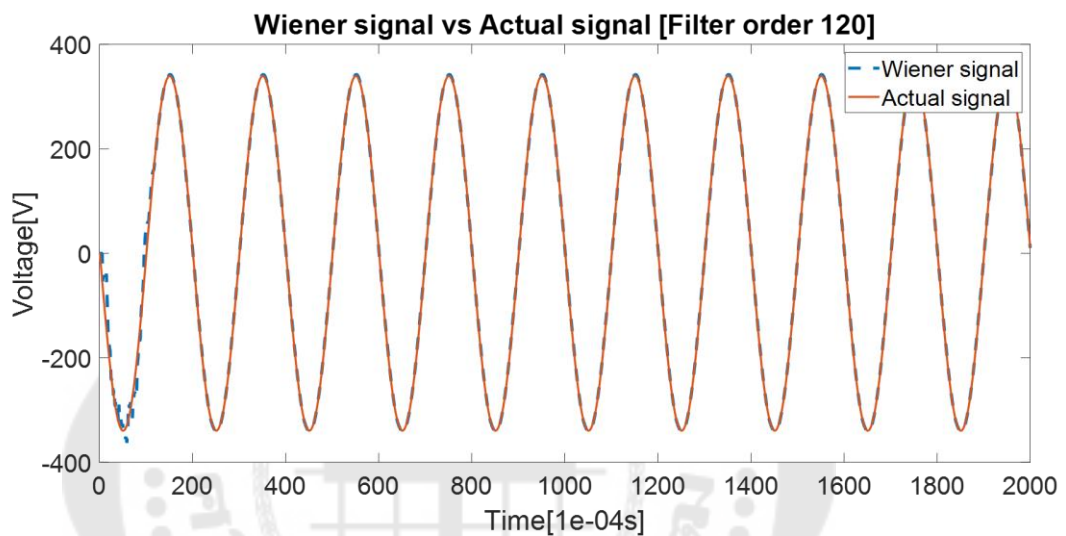
ภาพประกอบ 52 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 51 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยน

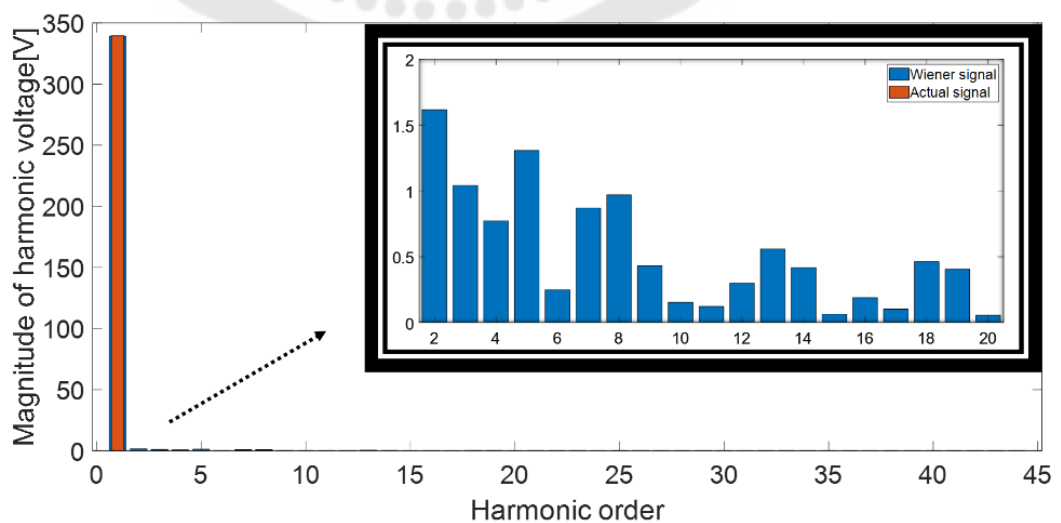
ฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.68% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 52

4.3.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟ ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะแสดงผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 53 คลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 120



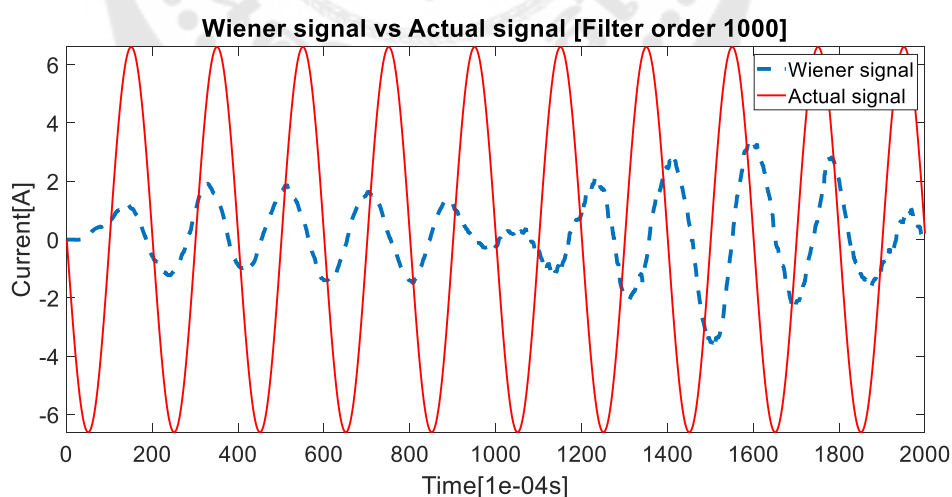
ภาพประกอบ 54 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดอินดักทีฟ

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 53 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟ จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของกราวด์ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สามห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 2.15% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 54

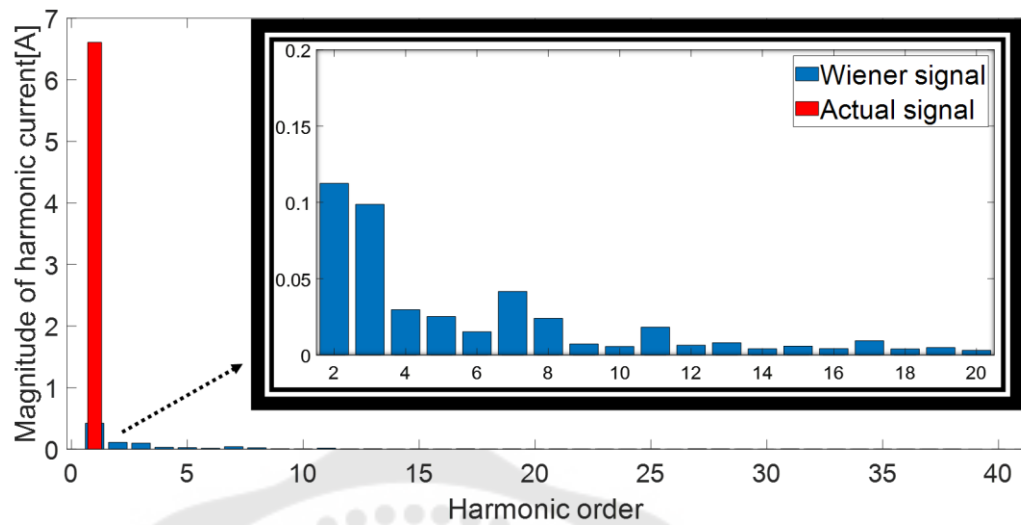
4.3.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงขั้วเดียว เพื่อจำลองคลื่นกระแสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ โดยต่อวงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปเฟส (single phase asynchronous machine) ซึ่งมีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz และคลื่นกระแสที่เป็นต้นแบบ 6.608 A ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 1000 สำหรับกรณีโหลดมอเตอร์ของตัวกรองแบบวีเนอร์จะเลือกกรณีไร้โหลด เนื่องจากสัญญาณขาเข้าของตัวกรองเป็นสัญญาณที่ไม่คงที่ ซึ่งจะแสดงผลการกรองฮาร์มอนิกได้ดังนี้

4.3.2.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์



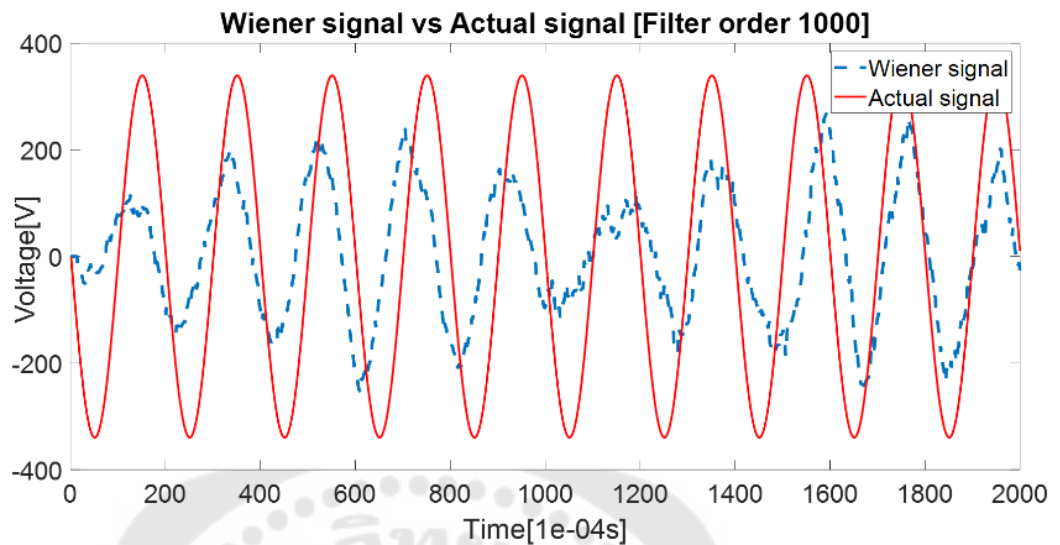
ภาพประกอบ 55 คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดมอเตอร์ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 1000



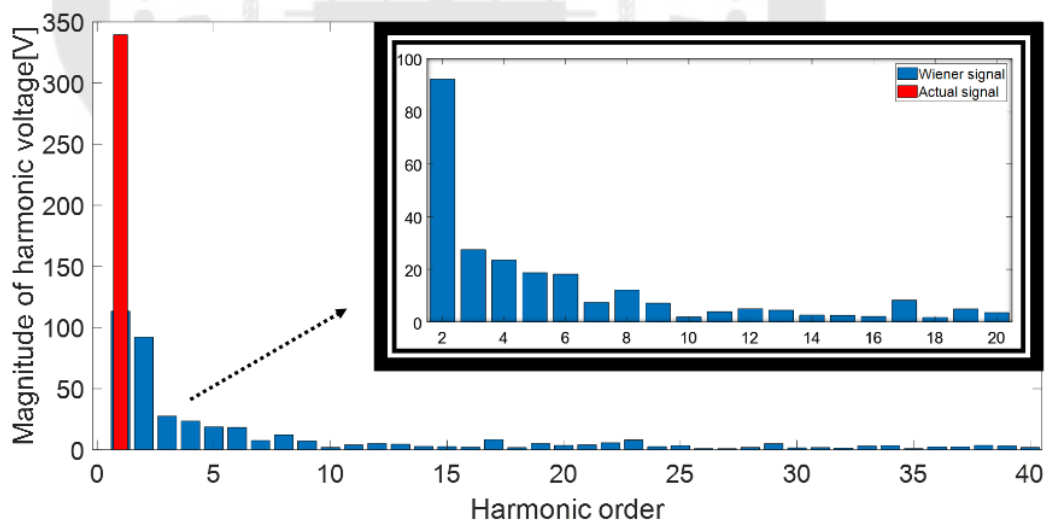
ภาพประกอบ 56 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดมอเตอร์

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 55 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบวีเนอร์ และกราฟเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ ซึ่งข้อจำกัดของตัวกรองวีเนอร์คือคลื่นกระแสขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ต้องเป็นสัญญาณที่คงที่หรือสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของการใส่ตัวกรองวีเนอร์ โดยมีอันดับในการคำนวณเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์ พบว่าจะได้สัญญาณขาออกที่ไม่เรียบ แต่มีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อเทียบสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณขาออกดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากราฟจะไม่ซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเกิดจากตัวกรองวีเนอร์มีข้อจำกัดอยู่ที่สัญญาณขาเข้าต้องคงที่ แต่สัญญาณที่เป็นขาเข้าของตัวกรองเป็นสัญญาณที่ได้จากมอเตอร์ ซึ่งมีความไม่คงที่ของสัญญาณ (non-stationary) ทำให้กรองไม่ได้ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 40.13% ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิกที่ต้องไม่เกิน 5% เนื่องจากตัวกรองวีเนอร์มีข้อจำกัดอยู่ที่สัญญาณขาเข้าตัวกรองวีเนอร์ต้องคงที่ แต่สัญญาณที่เป็นขาเข้าของตัวกรองวีเนอร์เป็นสัญญาณที่ได้จากมอเตอร์ ซึ่งมีความไม่คงที่ของสัญญาณ (non-stationary) ทำให้ไม่สามารถกรองได้ สามารถดูภาพประกอบ 56

4.3.2.2 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์



ภาพประกอบ 57 คลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดมอเตอร์ โดยใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์ และมีอันดับการกรองเป็น 1000



ภาพประกอบ 58 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบวีเนอร์ในโหลดมอเตอร์

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 57 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบวีเนอร์ และกราฟเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ ซึ่งข้อจำกัดของตัวกรองวีเนอร์คือคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ต้องเป็นสัญญาณที่คงที่หรือสัญญาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของการ

ใส่ตัวกรองวีเนอร์ โดยมีอันดับในการคำนวณเป็น 1000 และเป็นโพลีโนเมียล พบว่าจะได้สัญญาณขาออกที่ไม่เรียบ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่สูง เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 52.38% ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิกที่ต้องไม่เกิน 5% เนื่องจากตัวกรองวีเนอร์มีข้อจำกัดอยู่ที่สัญญาณขาเข้าตัวกรองวีเนอร์ต้องคงที่ สามารถดูภาพประกอบ 58

4.4 ผลการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองแบบปรับค่าได้ (adaptive filter)

ตัวกรองแบบปรับค่าได้เป็นตัวกรองชนิดหนึ่งที่สามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อน (error) โดยจะใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (least mean square) และค่ากำลังสองน้อยที่สุด (least square) โดยจะเป็นการนำค่าสัญญาณที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ป้อนเข้าตัวกรองแบบปรับค่าได้ ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าได้จะทำงานเลียนแบบสัญญาณลูกคลื่นไซน์ ซึ่งจะต้องสร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์ให้เป็นสัญญาณต้นแบบ เพื่อที่ตัวกรองแบบปรับค่าได้จะได้กรองสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ให้มีความคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ ซึ่งก็จะเหลือเพียงแค่องค์ประกอบมูลฐาน โดยที่ก่อนเข้าตัวกรองจะทำการวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม และทำการวัดหลังจากผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้ ซึ่งตัวกรองแบบปรับค่าได้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีต่าง ๆ เช่น วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

4.4.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโพลีโนเมียลอันดับที่ 3

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจำลองคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยมีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซั้วเดียว ซึ่งมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V โดยมีโพลีโนเมียลอันดับที่ 3 ที่พิจารณาตัวประกอบกำลัง 3 กรณี คือกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 เพื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละแบบ ดังต่อไปนี้

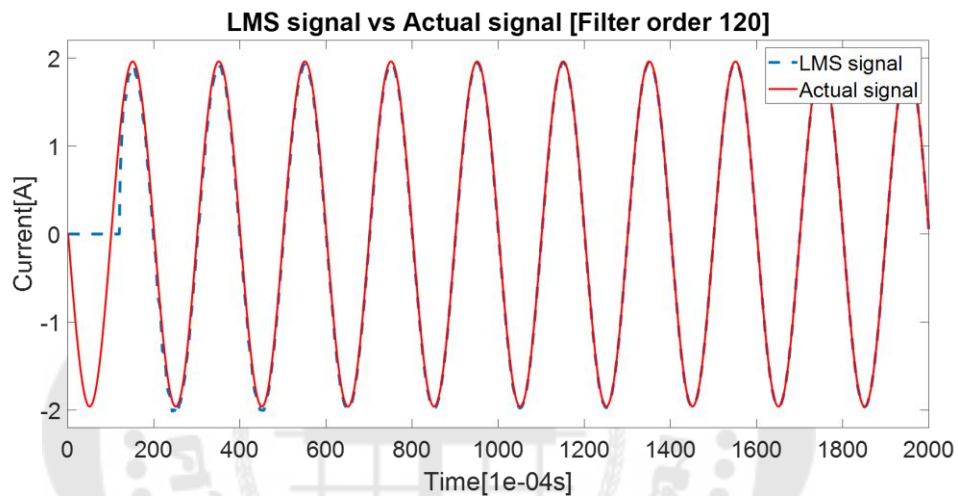
4.4.1.1 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโพลีโนเมียลอันดับที่ 3 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 100Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 450 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120

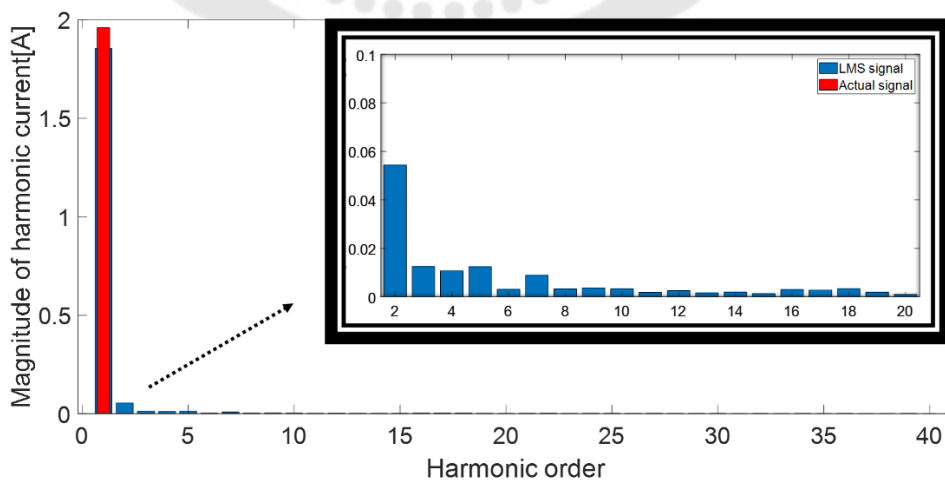
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นวิธีพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับค่า โดยจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการที่จำเป็นในวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$a(n+1) = a(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (4.1)$$



ภาพประกอบ 59 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120



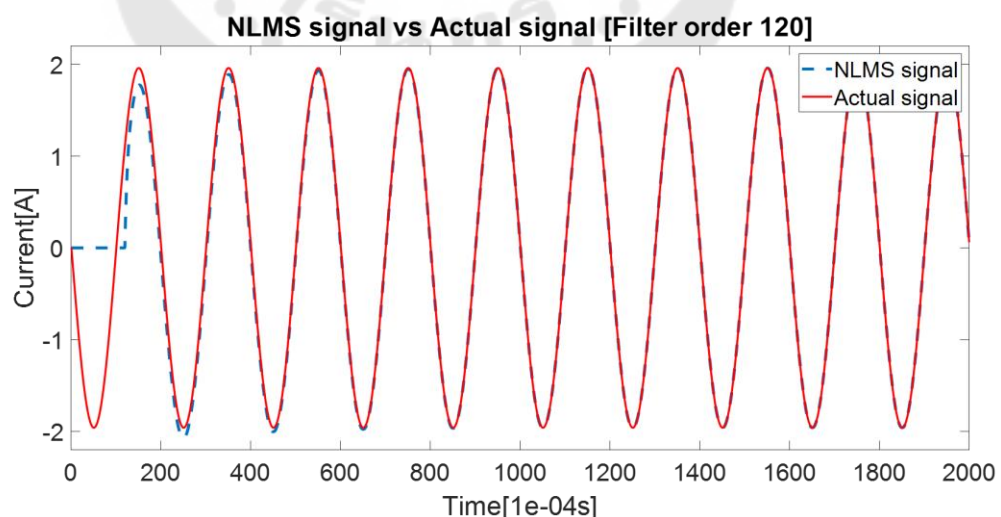
ภาพประกอบ 60 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 59 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.16% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 60

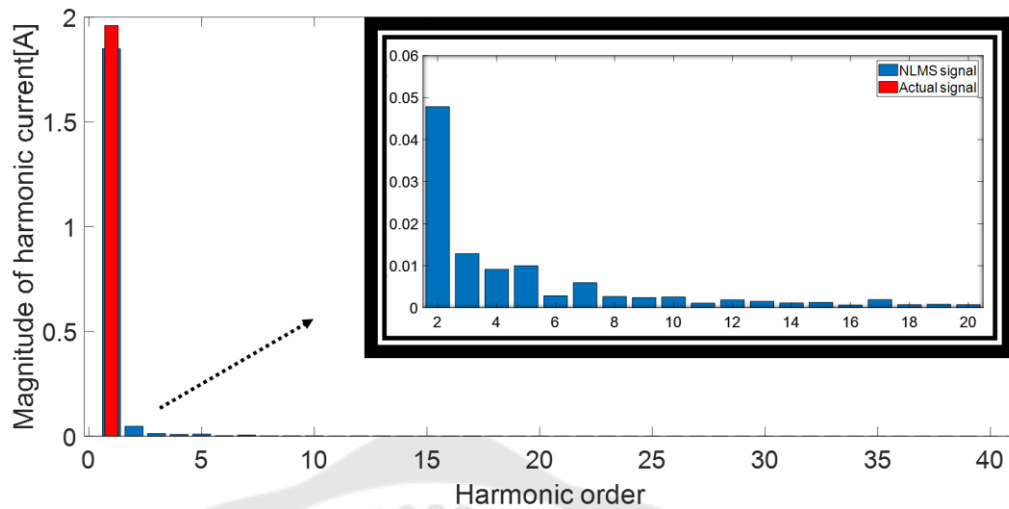
2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ซึ่งจะมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.2 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$b(n+1) = b(n) + \frac{\mu}{\varepsilon + \|x(n)\|^2} e(n)x(n) \quad (4.2)$$



ภาพประกอบ 61 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 120



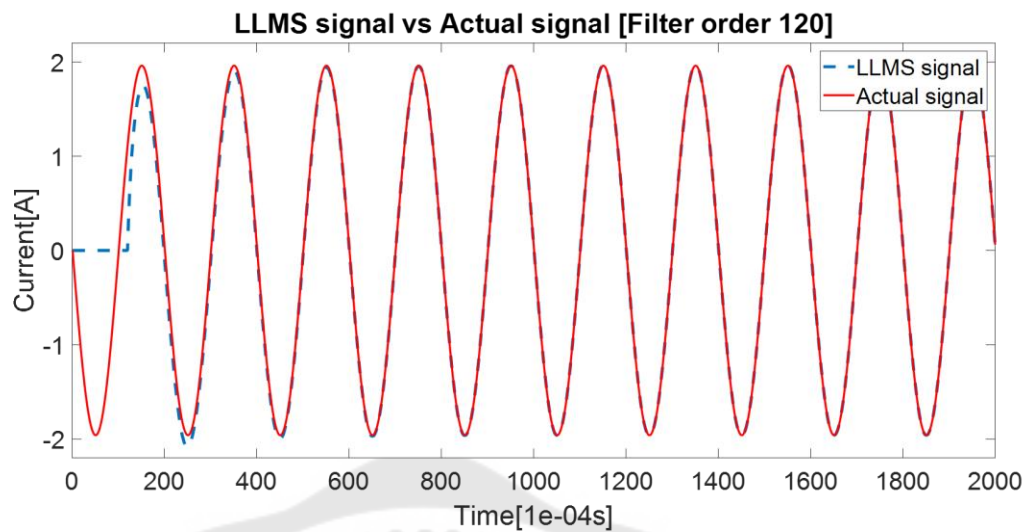
ภาพประกอบ 62 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 61 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.14% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 62

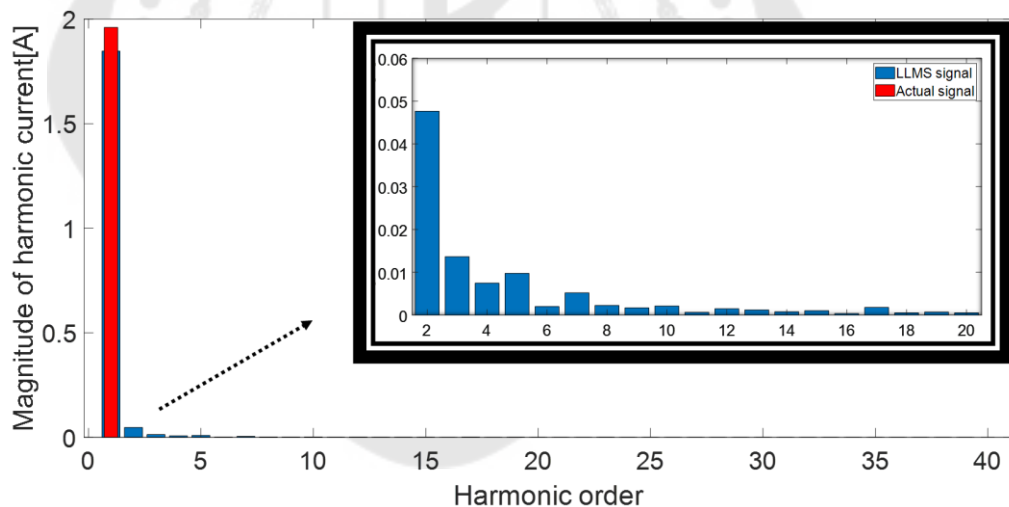
3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหลจะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ในการควบคุมการรัวไหลของค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.3 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แสดงในบทที่ 2 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$c(n+1) = (1 - \mu\eta)c(n) + \mu e(n)x(n) \quad (4.3)$$



ภาพประกอบ 63 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรวิ้ไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120



ภาพประกอบ 64 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรวิ้ไหล ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

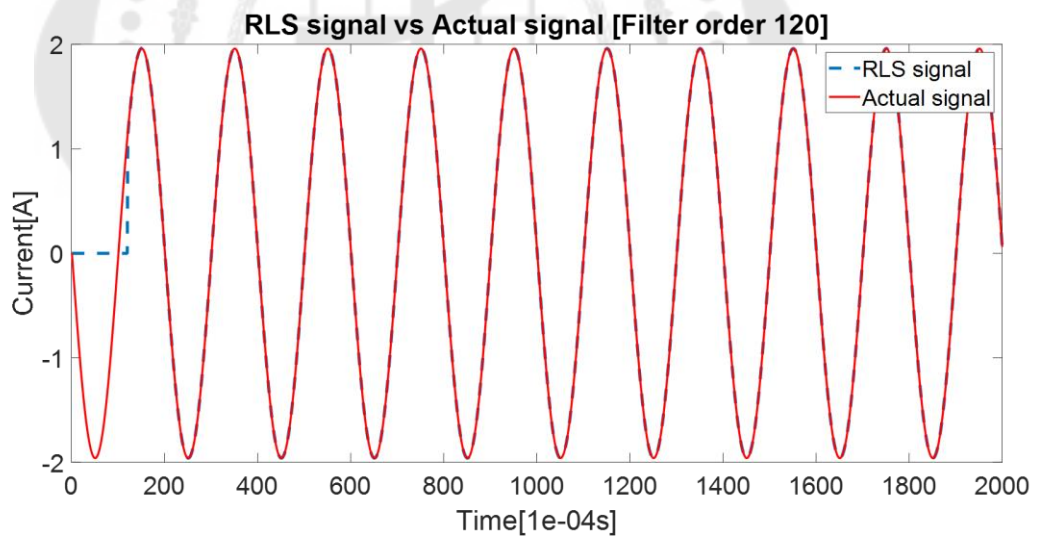
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 63 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรวิ้ไหลเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์

มอริกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.02% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 64

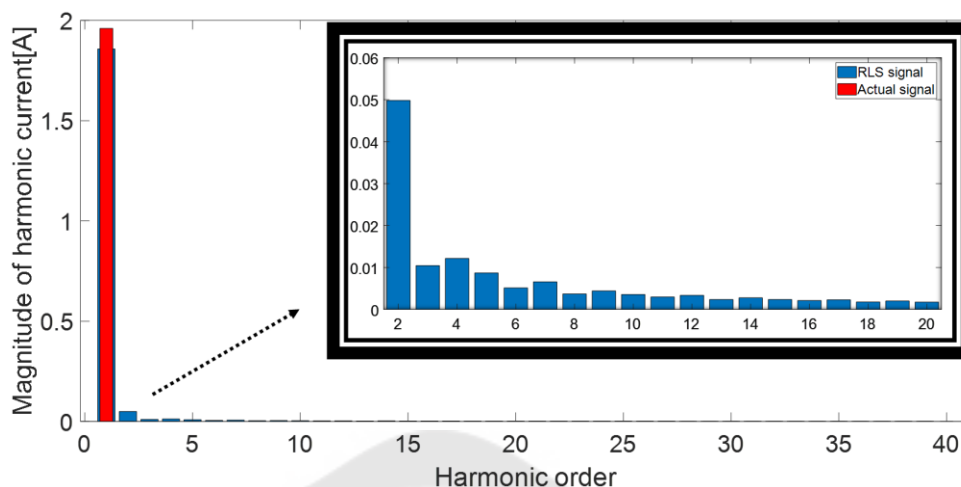
4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นหนึ่งในตัวกรองแบบปรับค่าได้ที่จะใช้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองเหมือนกับวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบต่าง ๆ ข้างต้น แต่จะมีข้อที่แตกต่างนั้นก็คือ วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำไม่จำเป็นต้องใช้ค่าช่วงก้าวในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.4 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 จะแสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$w(n) = w(n-1) + k(n)e(n) \quad (4.4)$$



ภาพประกอบ 65 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 120



ภาพประกอบ 66 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

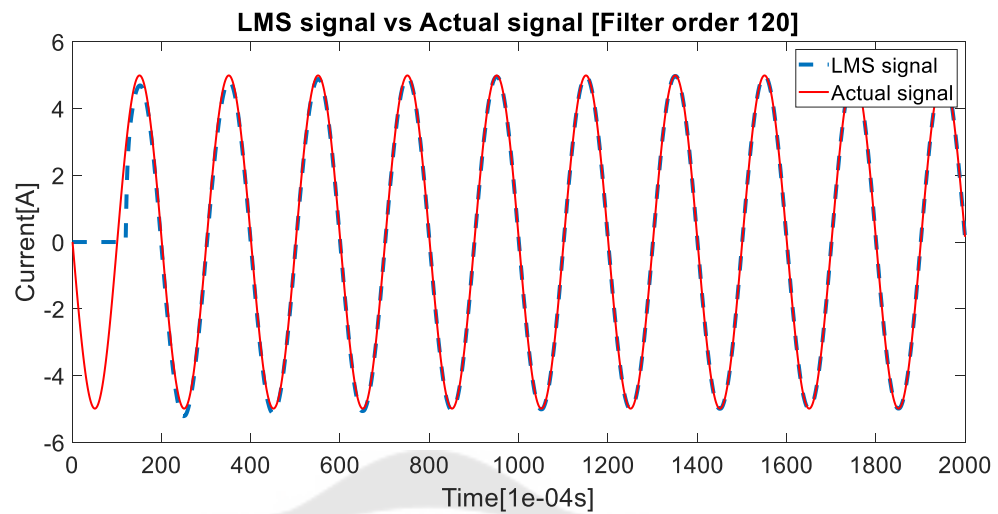
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 65 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในกราฟนี้จะได้ 0.94% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 66

4.4.1.2 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

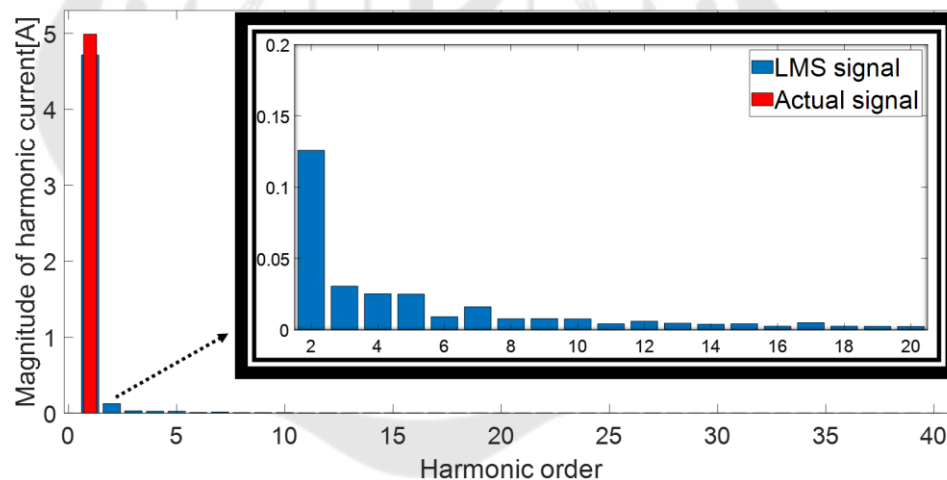
ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 50Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 150 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120

1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 67 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120



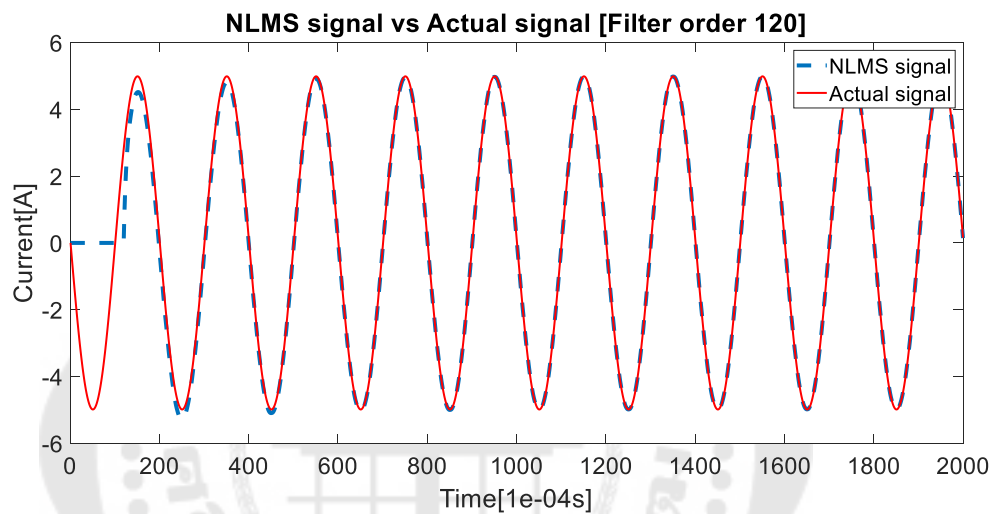
ภาพประกอบ 68 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 67 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่

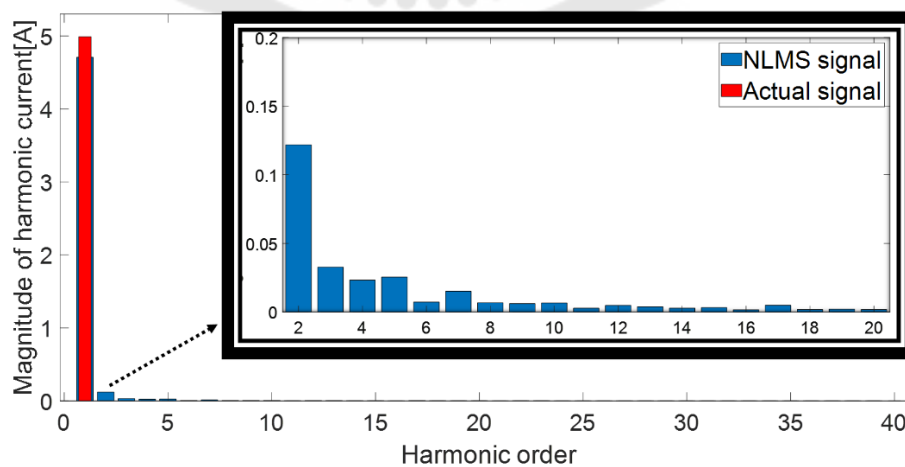
อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.16% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 68

2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.2 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 69 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 120

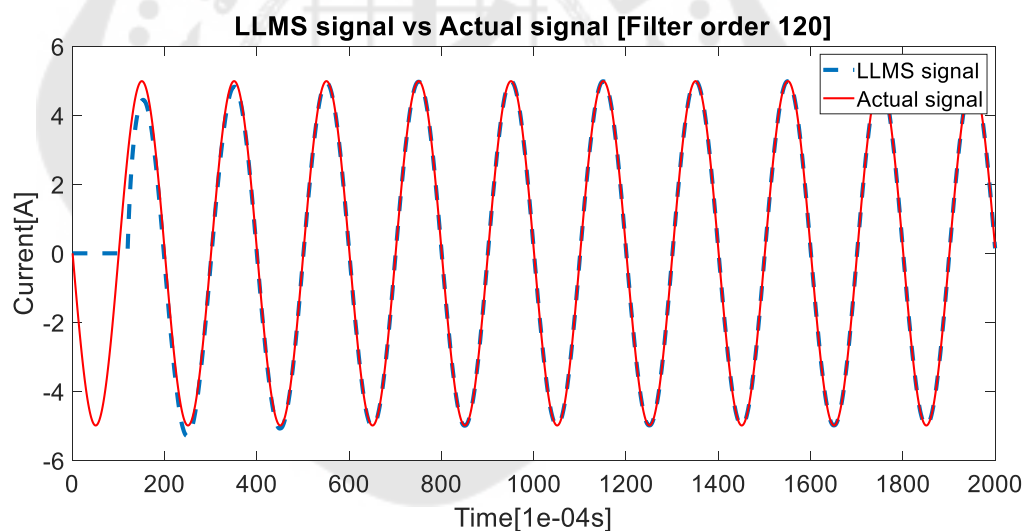


ภาพประกอบ 70 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

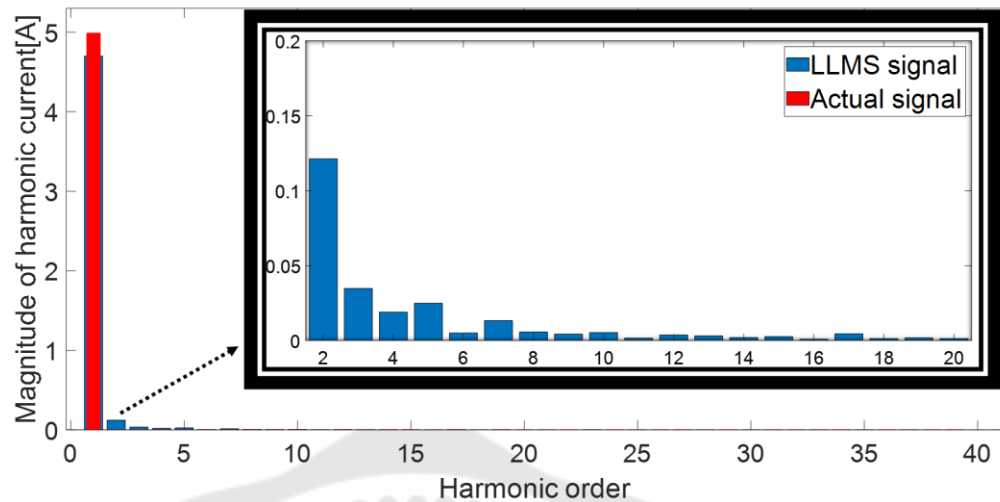
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 69 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม น้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.14% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 70

3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหลจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.3 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 71 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120

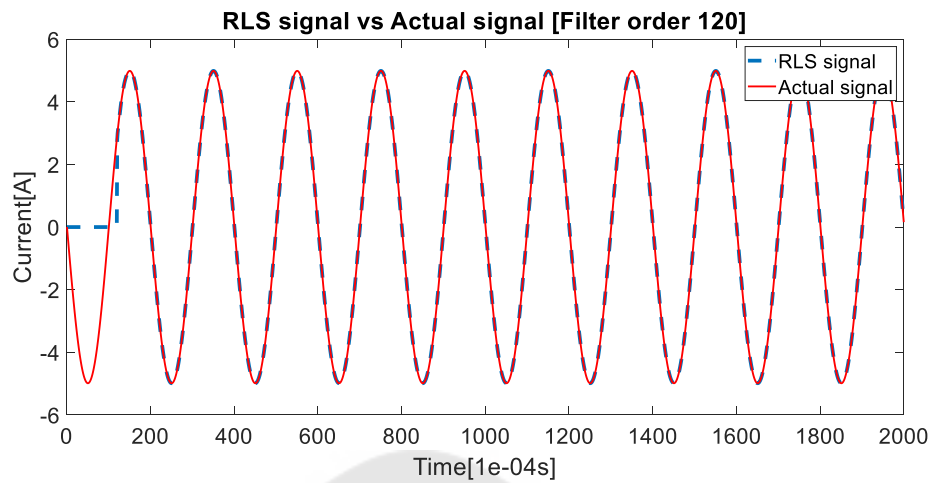


ภาพประกอบ 72 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร่วไหล
ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

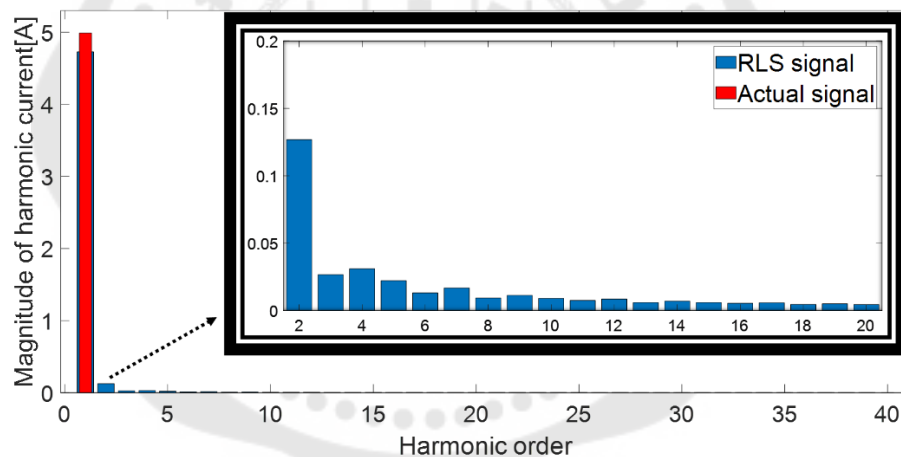
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 71 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร่วไหลเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.02% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 72

4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.4 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 73 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของไหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 120



ภาพประกอบ 74 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำในไหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 73 แสดงผลการจำลองคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อไหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นกระแสขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์ พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้น

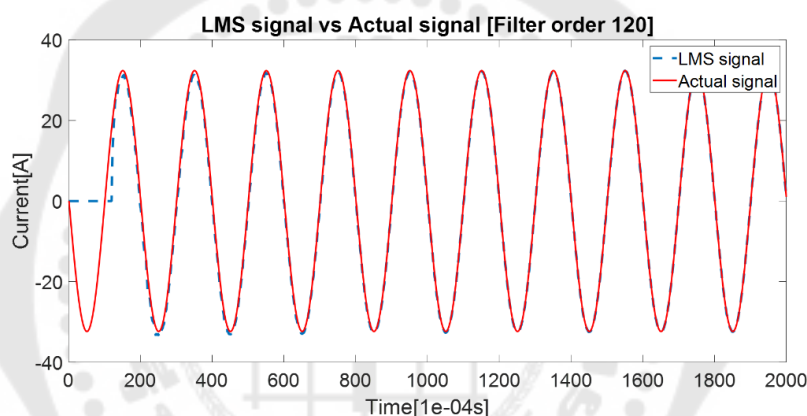
มีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.94% ซึ่งค่าที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 74

4.4.1.3 ผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

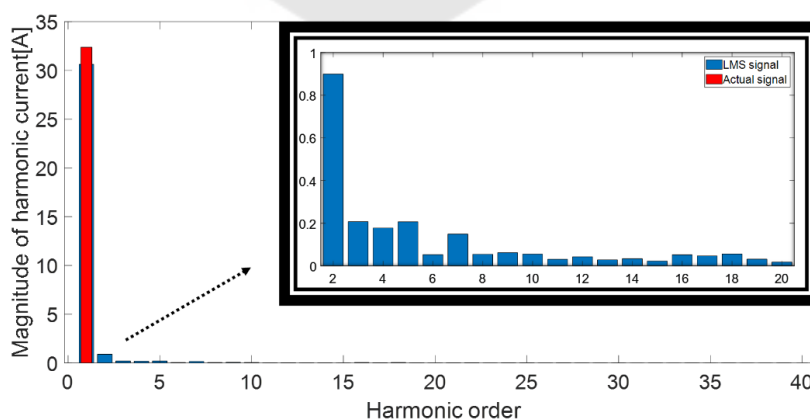
ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวของโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 โดยจะทำการต่อตัวต้านทานเท่ากับ 10Ω และตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 mH ซึ่งจะใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120

1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 75 คลื่นกระแสต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120

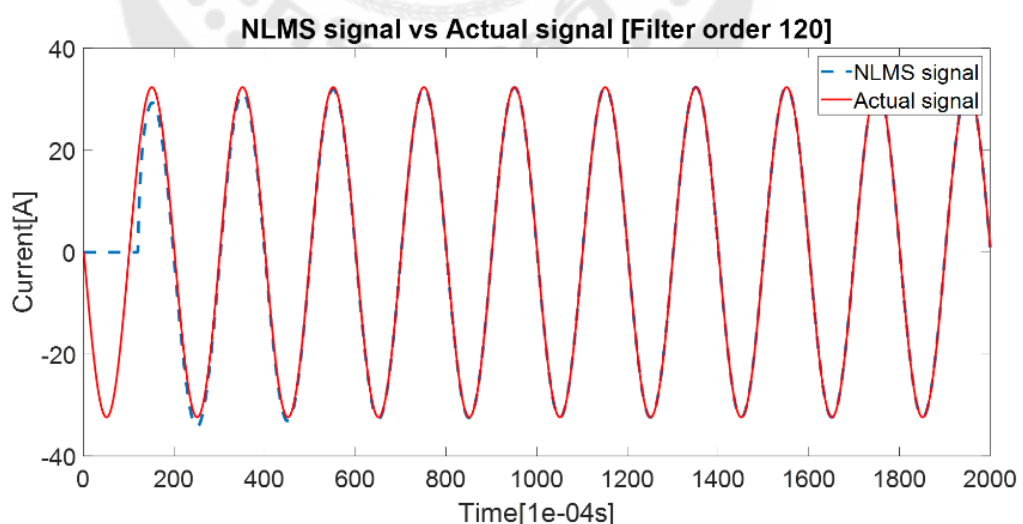


ภาพประกอบ 76 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

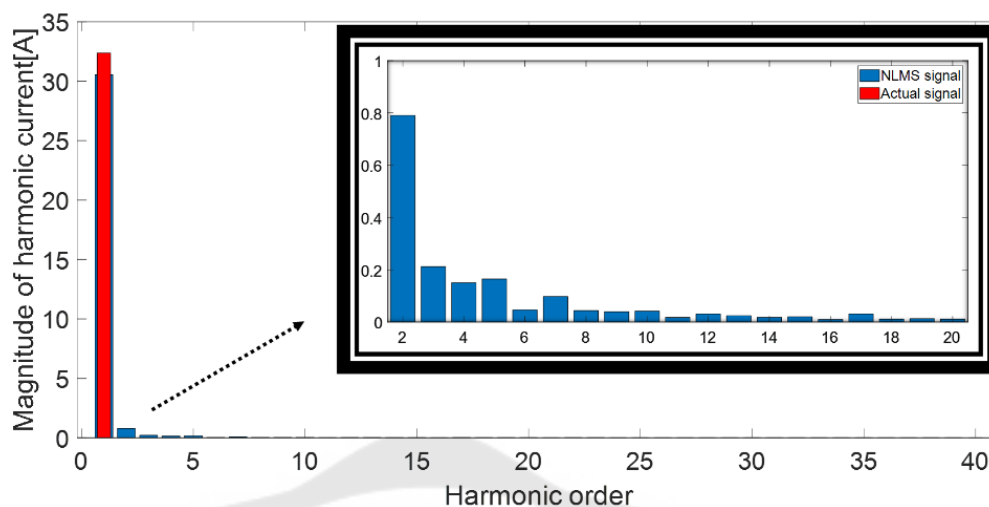
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 75 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 120 และเป็นโหลดอินดักทีฟที่ฟรควีนซีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้กัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 120 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 120 และค่าช่วงก้าว (step size) ต้องมีค่าน้อย ๆ ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งค่าช่วงก้าวน้อย ๆ จะทำให้กราฟที่ได้มีความเรียบขึ้น และเข้าใกล้สัญญาณต้นแบบมากขึ้น เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.15% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิกสามารถดูภาพประกอบ 76

2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.2 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 77 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปรับค่าได้ และมีอันดับการกรองเป็น 120

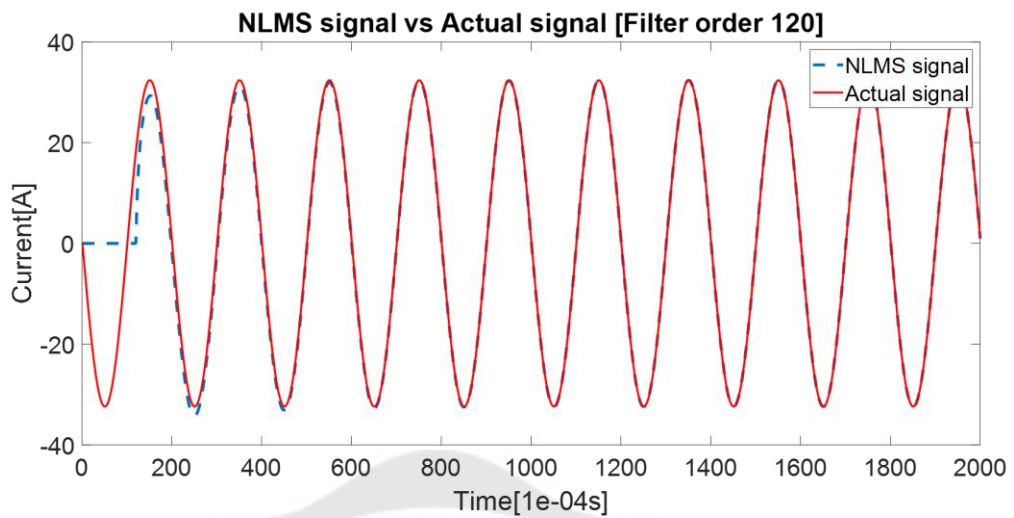


ภาพประกอบ 78 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

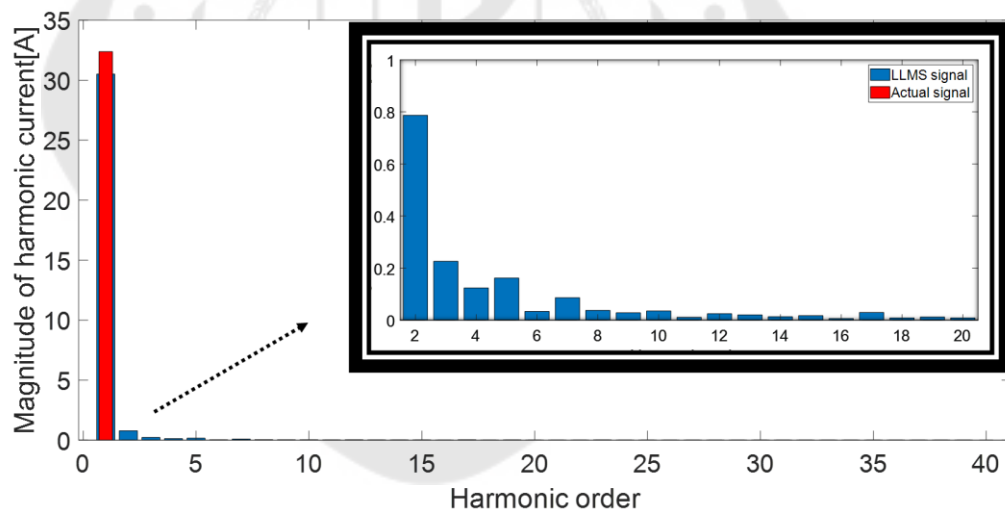
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 77 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 120 และเป็นโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 120 ดังนั้น การเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 120 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-1} ถึง 10^{-2} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์ เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.10% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ซึ่งผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 78

3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบทั่วโลก

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบทั่วโลกจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.3 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 79 คลื่นกระแสต้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120



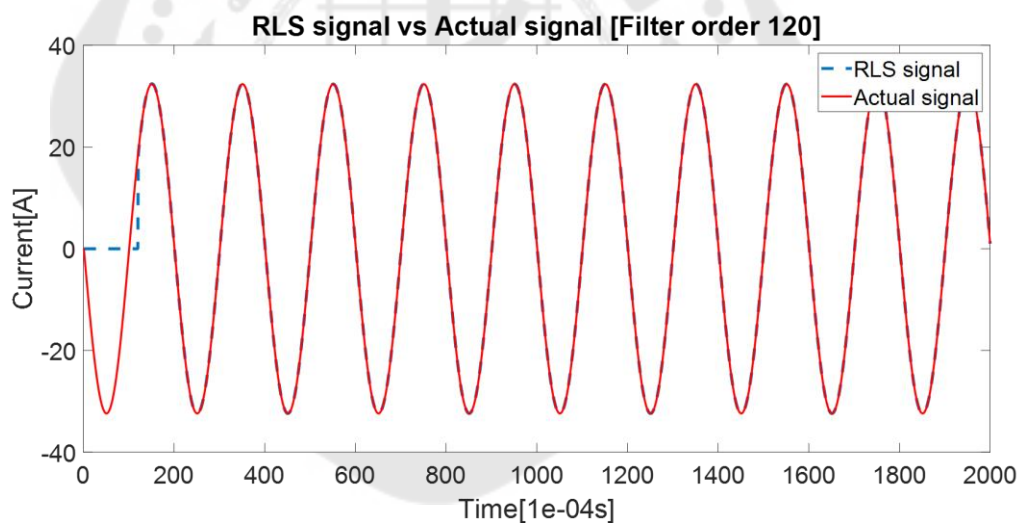
ภาพประกอบ 80 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 79 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 120 และเป็นโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหลเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณ

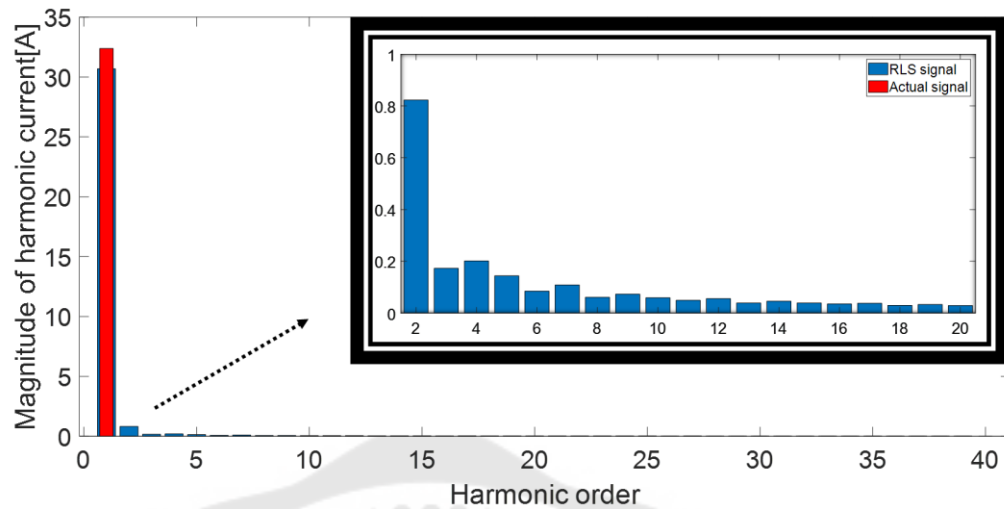
อ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 120 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 120 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการรั่วไหลต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.98% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรั่วไหลผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 80

4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.4 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 81 คลื่นกระแสต้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของไหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรั่วไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120



ภาพประกอบ 82 ขนาดคลื่นกระแสและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

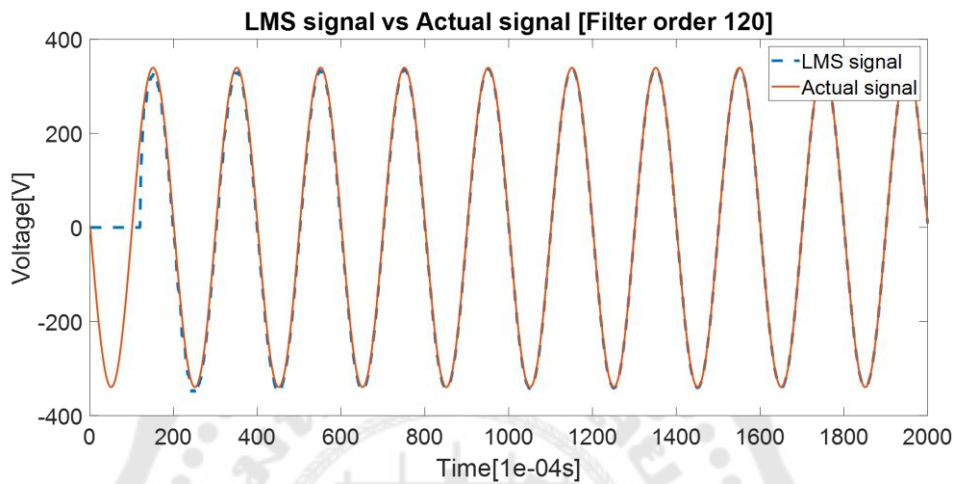
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 81 พบว่าเส้นสีน้ำเงินเป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำและเส้นสีแดงเป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 120 และเป็นโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 จะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจากให้อันดับการกรองเป็น 120 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 120 โดยมีค่าสหสัมพันธ์แบบผกผันมีค่าประมาณ 10^{-9} ถึง 10^{-10} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมด้านน้ำหนักการวนซ้ำต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ตามรายละเอียดการออกแบบจากตำราของ Simon Haykin (³³) ซึ่งจะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมด้านน้ำหนักการวนซ้ำเท่ากับ 0.995 เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.85% ซึ่งผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิกจำกัดอยู่ที่ 5% สามารถดูภาพประกอบ 82

4.4.1.4 ผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกกรณีโหลดอินดักทีฟ

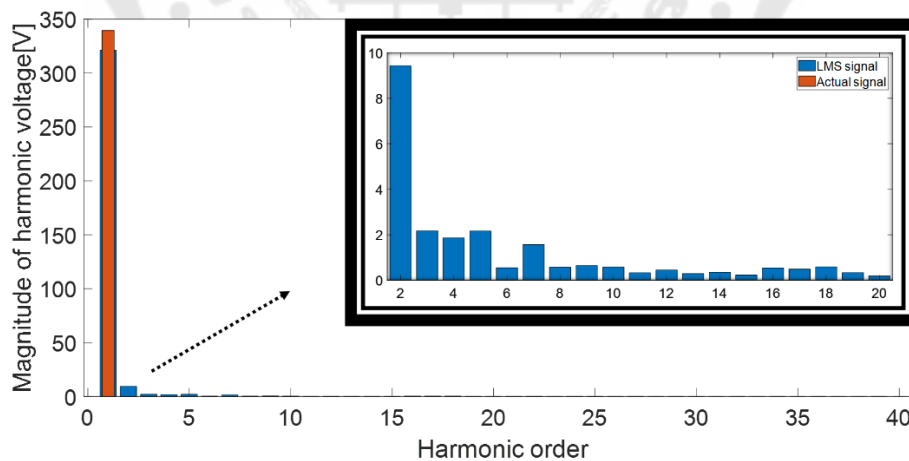
1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่

4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 83 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบในโดเมนเวลาของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 120



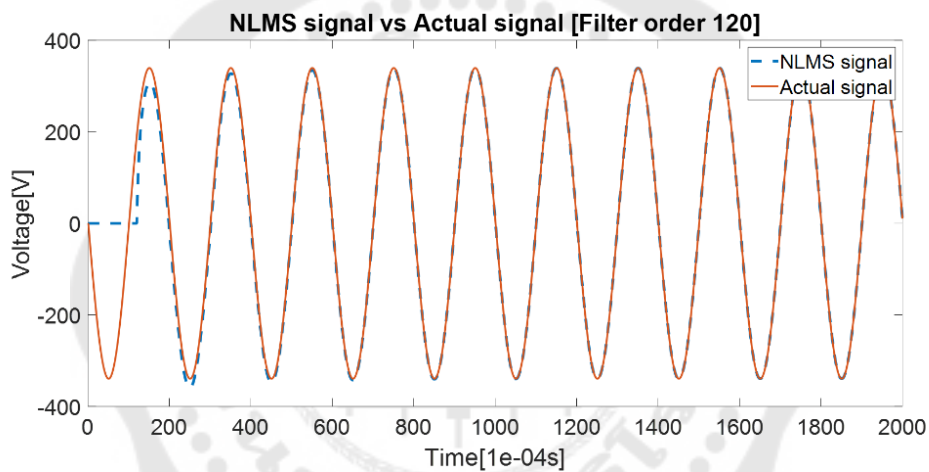
ภาพประกอบ 84 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 83 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นได้สัญญาณที่

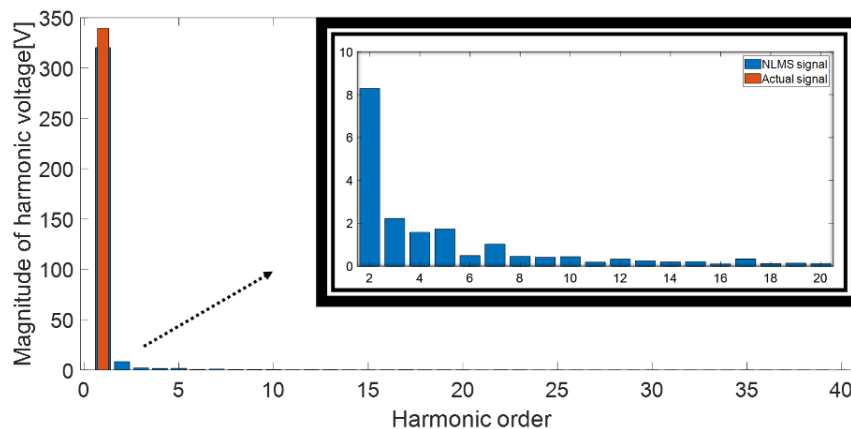
เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.36% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิกสามารถดูภาพประกอบ 84

2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.2 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 85 คลื่นแรงดันด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 120

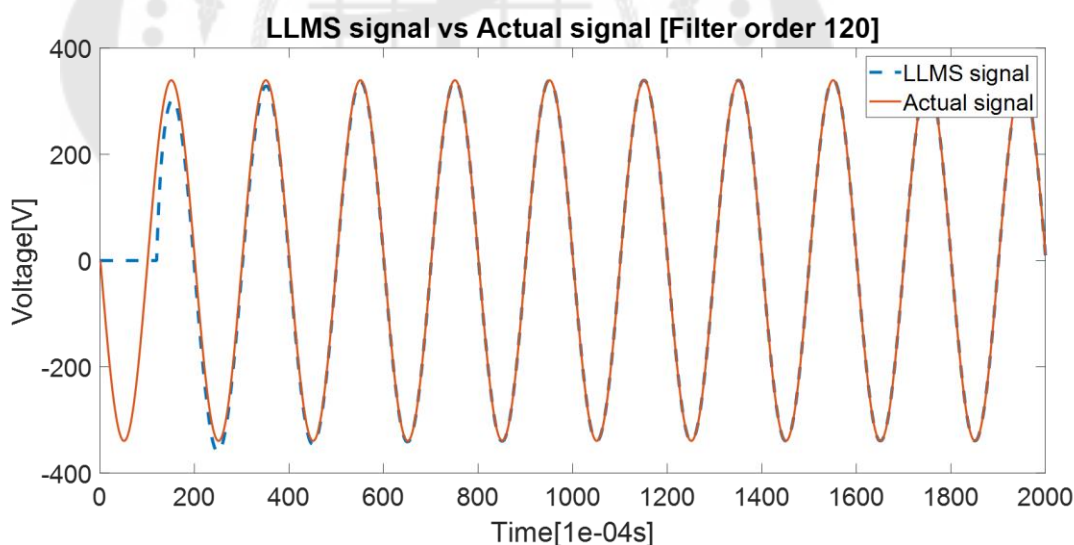


ภาพประกอบ 86 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

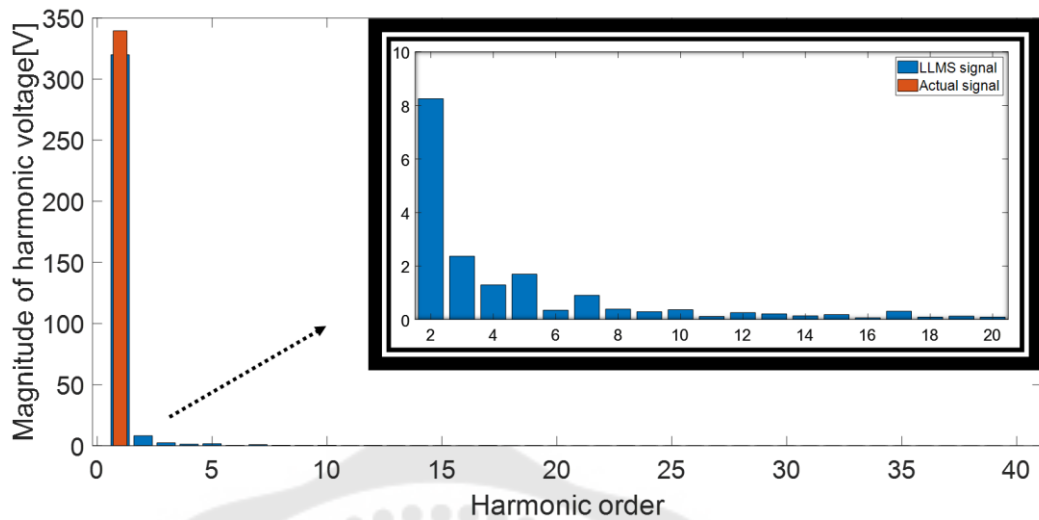
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 85 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินдукทีฟ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.22% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 86

3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัว้ไหล

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัว้ไหลจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.3 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 87 คลื่นแรงดันด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินдукทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัว้ไหล และมีอันดับการกรองเป็น 120

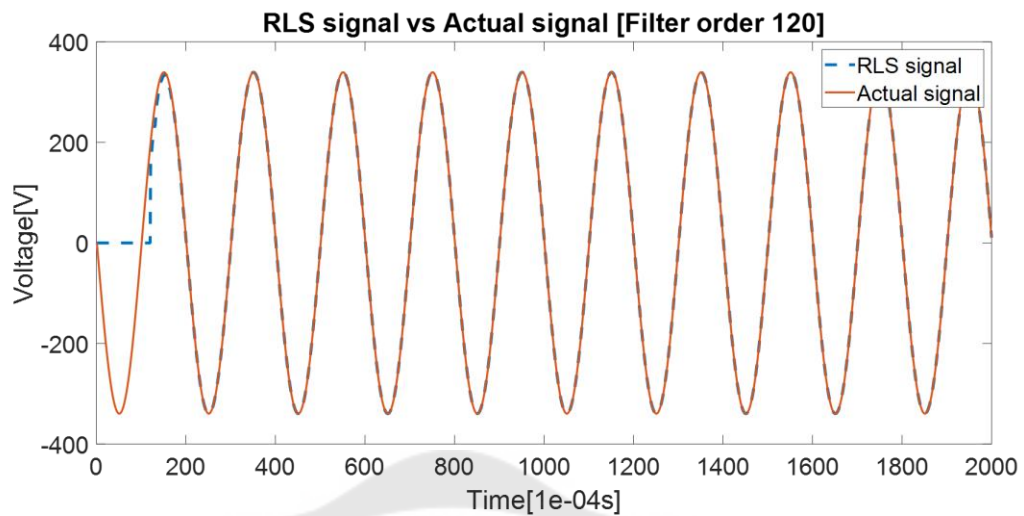


ภาพประกอบ 88 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล

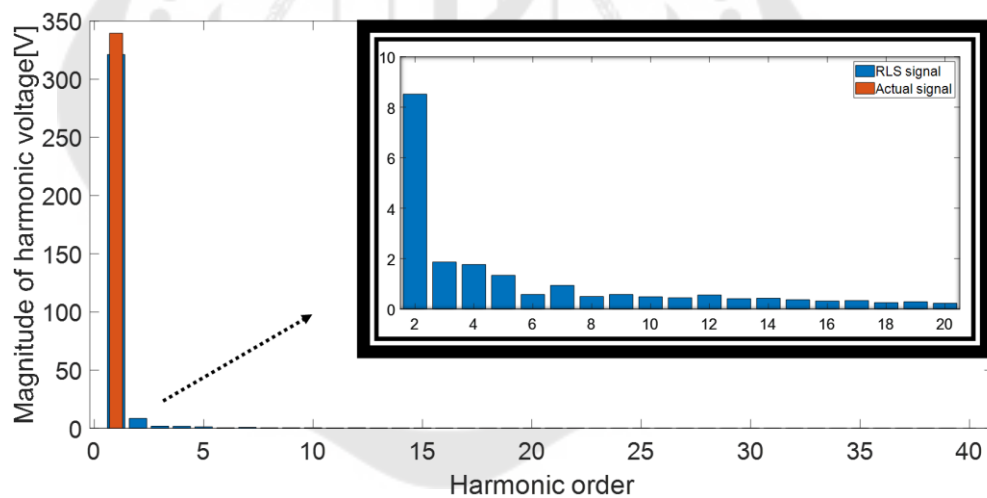
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 87 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหลเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.14% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 88

4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองตามสมการที่ 4.4 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2 แสดงผลการกรองแรงดันฮาร์มอนิกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 89 คลื่นแรงดันด้านขาออกเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดอินดักทีฟ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 120



ภาพประกอบ 90 ขนาดคลื่นแรงดันและอันดับฮาร์มอนิกของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 89 แสดงผลการจำลองคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดอินดักทีฟ และมีอันดับการกรองเป็น 120 จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงดันขาออกของการใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นได้สัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.02% ซึ่งค่าความ

เพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก สามารถดูภาพประกอบ 90

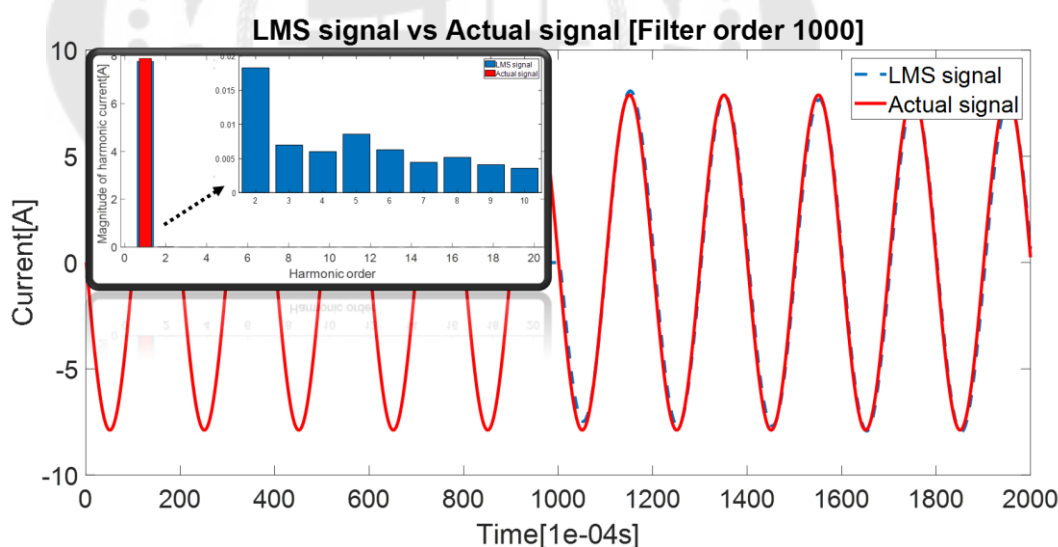
4.4.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีโหลดมอเตอร์

ทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเชิงซัวเดียว โดยมีแรงดันกระแสตรงเป็น 600 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสลิปเฟส มีพิกัด 0.25 แรงม้า แรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz ซึ่งมีอันดับการกรองเป็น 1000 ซึ่งจะมีการขับโหลดสองกรณี คือกรณีไร้โหลด และกรณีขับโหลดเต็มพิกัด แสดงได้ดังนี้

4.4.2.1 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีไร้โหลด

1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นวิธีพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับค่า โดยจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการที่จำเป็นในวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2



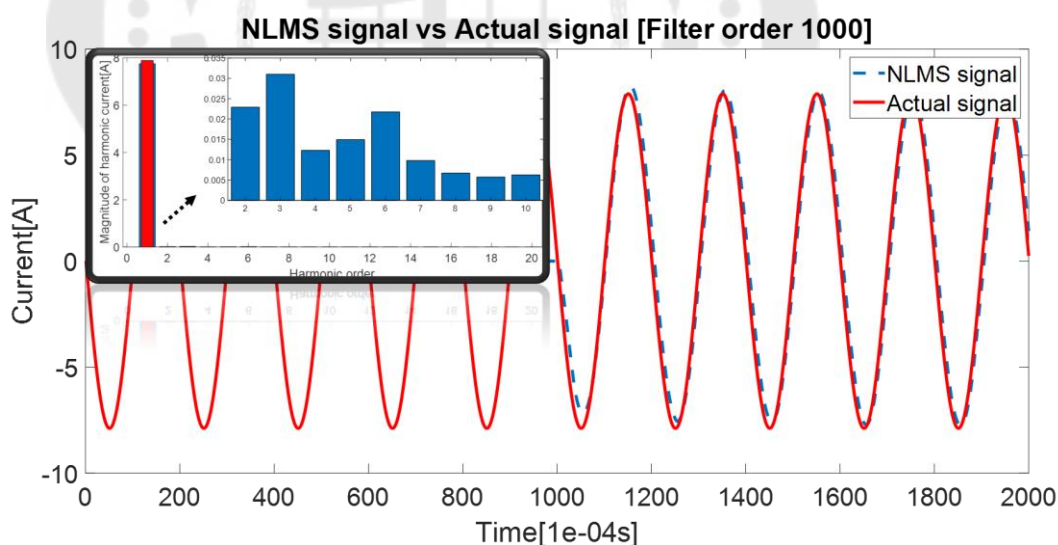
ภาพประกอบ 91 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 91 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลด

มอเตอร์กรณีไร้โหลด จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึม จะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) ต้องมีค่าน้อย ๆ ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งค่าช่วงก้าวน้อย ๆ จะทำให้กราฟที่ได้มีความเรียบขึ้น เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.39% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ซึ่งจะมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.2 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2



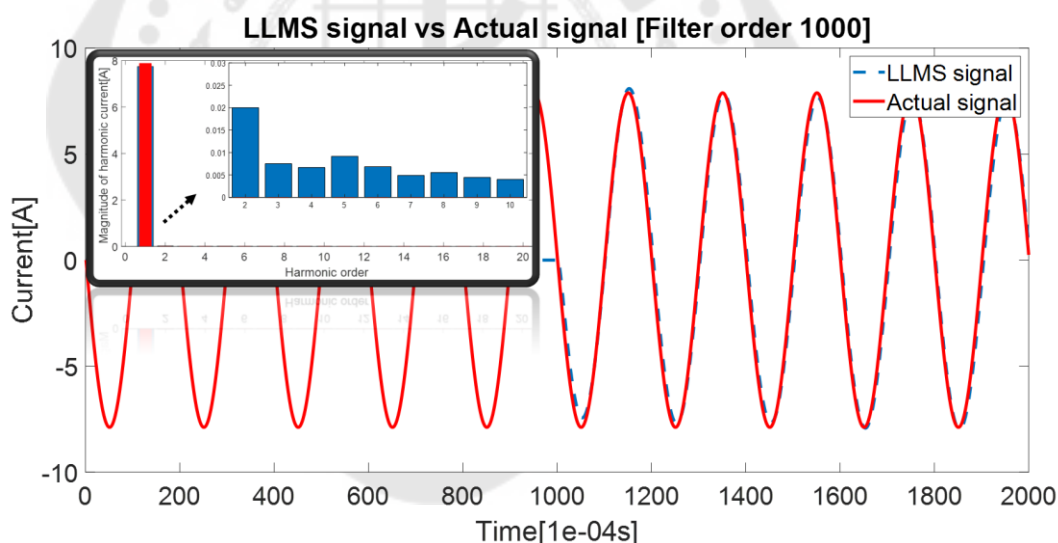
ภาพประกอบ 92 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดกรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 92 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลด

มอเตอร์กรณีไร้โหลด จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจากให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-1} ถึง 10^{-2} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.53% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ซึ่งผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหลจะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ในการควบคุมการร็วไหลของค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.3 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แสดงในบทที่ 2



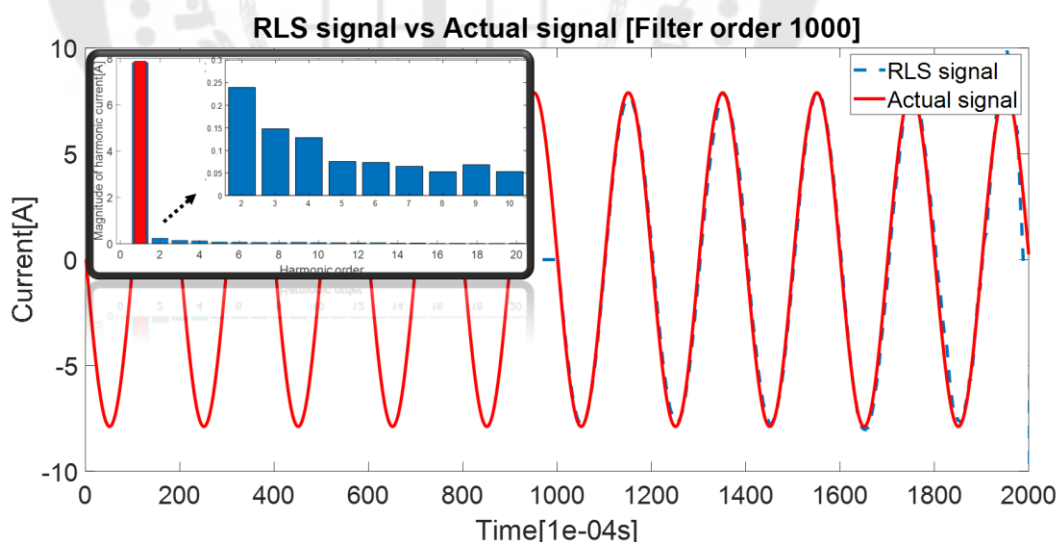
ภาพประกอบ 93 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 93 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหลเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมี

การซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการรั่วไหลต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.20% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบรั่วไหลผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นหนึ่งในตัวกรองแบบปรับค่าได้ที่จะใช้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองเหมือนกับวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบต่าง ๆ ข้างต้น แต่จะมีข้อที่แตกต่างนั่นก็คือ วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำไม่จำเป็นต้องใช้ค่าช่วงก้าวในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.4 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2



ภาพประกอบ 94 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 1000

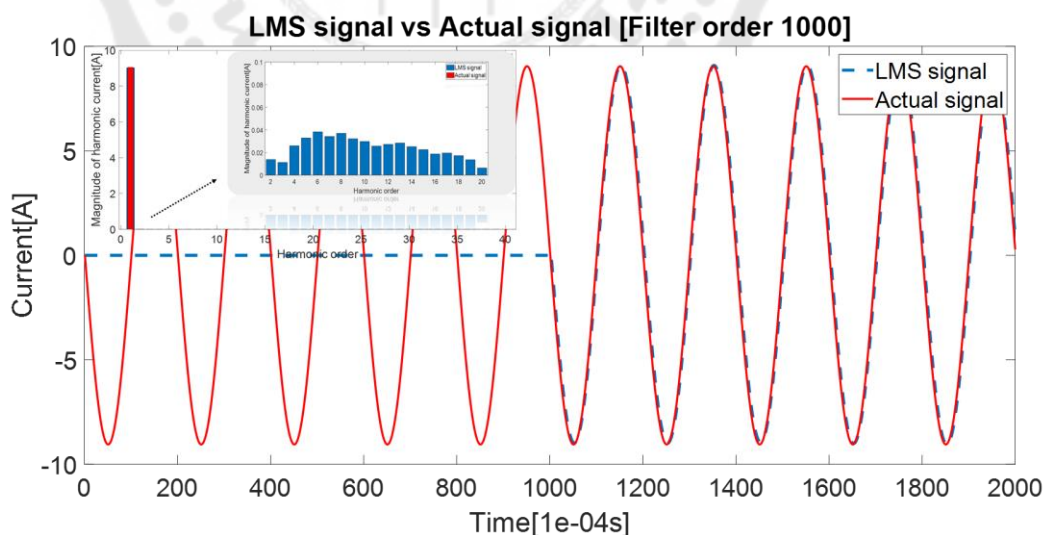
จากผลการจำลองในภาพประกอบ 94 พบว่าเส้นสีน้ำเงินเป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำและเส้นสีแดงเป็นกราฟที่เป็นสัญญาณ

ลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด จะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 โดยมีค่าสหสัมพันธ์แบบผกผันมีค่าประมาณ 10^{-9} ถึง 10^{-10} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมด้านน้ำหนักการวนซ้ำต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ตามรายละเอียดการออกแบบจากตำราของ Simon Haykin เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในกราฟนี้จะได้ 0.98% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

4.4.2.2 ผลการกรองฮาร์มอนิกกรณีขับโหลดเต็มพิกัด

1 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นวิธีพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับค่า โดยจะมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการที่จำเป็นในวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2

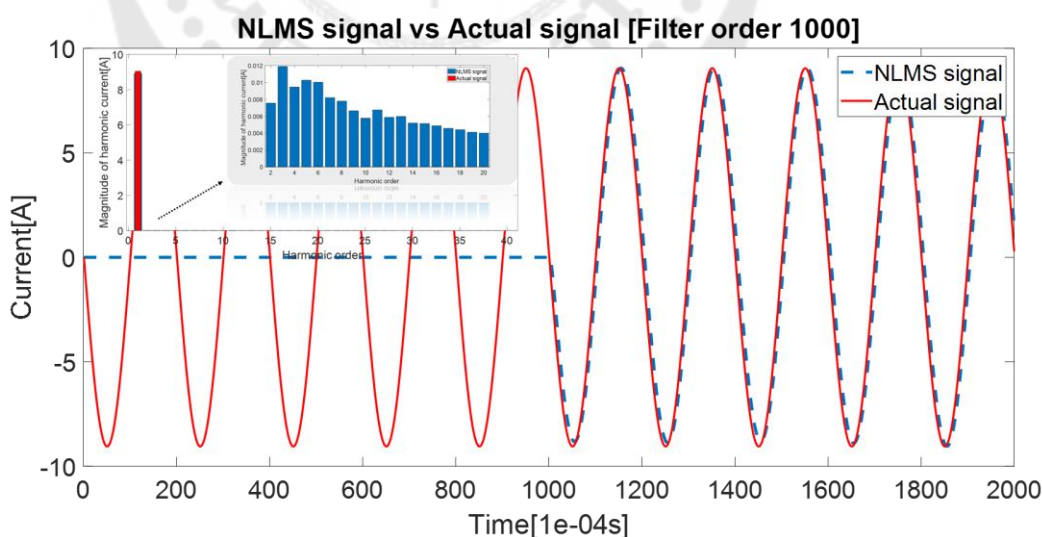


ภาพประกอบ 95 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 95 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) ต้องมีค่าน้อย ๆ ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งค่าช่วงก้าวน้อย ๆ จะทำให้กราฟที่ได้มีความเรียบขึ้น เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 1.35% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

2 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ซึ่งจะมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.2 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2

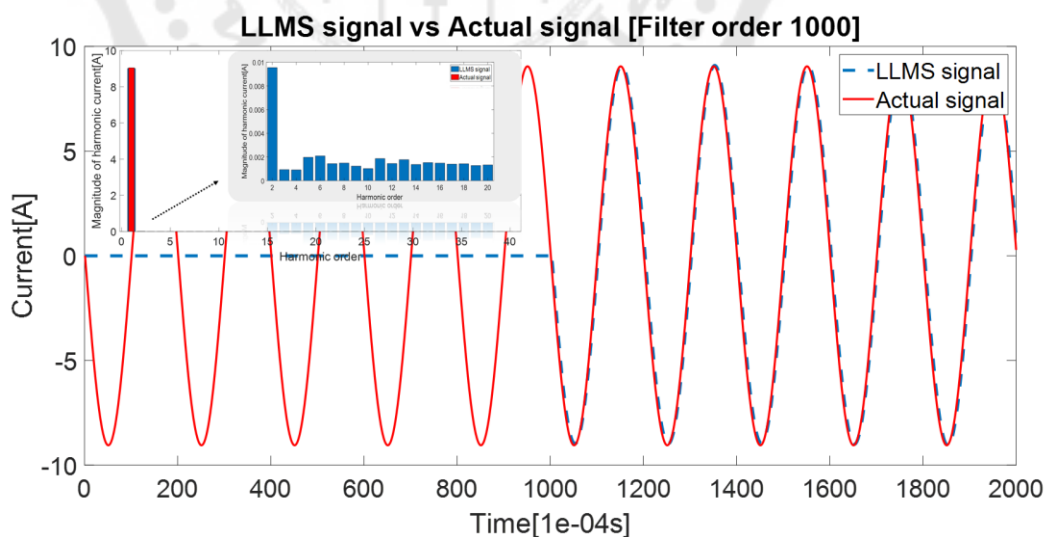


ภาพประกอบ 96 คลื่นกระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 96 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณขาออกของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-1} ถึง 10^{-2} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.38% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ซึ่งผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

3 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร่วไหล

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร่วไหลจะมีการเพิ่มพารามิเตอร์ในการควบคุมการร่วไหลของค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.3 โดยรายละเอียดที่มาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2

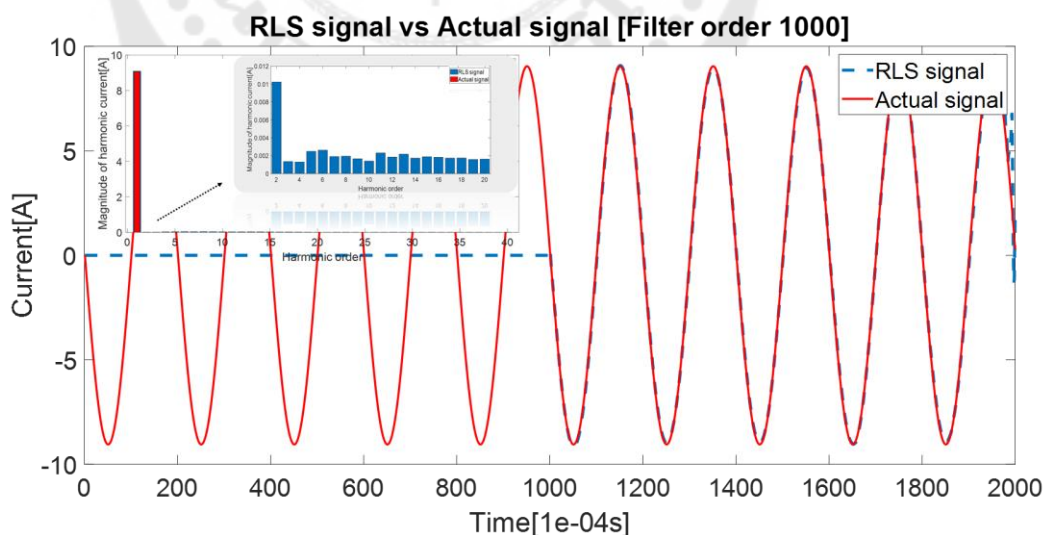


ภาพประกอบ 97 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบในของโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร่วไหล และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 97 พบว่าเส้นกราฟที่มีสีน้ำเงิน เป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบเร็วไหล และเส้นสีแดง เป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด จะเห็นได้ว่าเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจาก ให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรก ที่ 1000 และค่าช่วงก้าว (step size) มีค่าประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการเร็วไหลต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูริเยร์พบว่า องค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ในกราฟนี้จะได้ 0.20% ซึ่งค่าที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบเร็วไหลผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

4 ผลการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำเป็นหนึ่งในตัวกรองแบบปรับค่าได้ที่จะใช้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองเหมือนกับวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบต่าง ๆ ข้างต้น แต่จะมีข้อที่แตกต่างนั้นก็คือ วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำไม่จำเป็นต้องใช้ค่าช่วงก้าวในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองดังสมการที่ 4.4 โดยรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แสดงในบทที่ 2



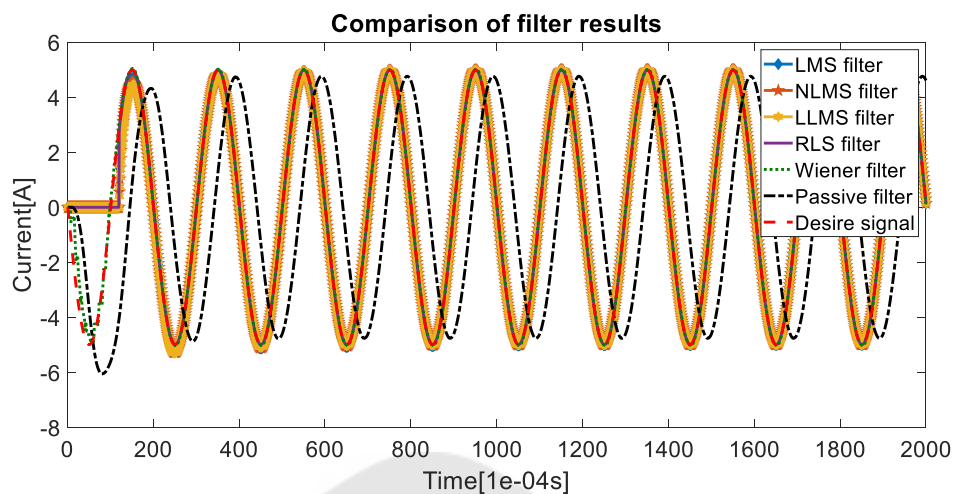
ภาพประกอบ 98 คลื่นกระแสด้านขาออกของเทียบกับสัญญาณต้นแบบของโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ และมีอันดับการกรองเป็น 1000

จากผลการจำลองในภาพประกอบ 98 พบว่าเส้นสีน้ำเงินเป็นกราฟที่ผ่านตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำและเส้นสีแดงเป็นกราฟที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณต้นแบบ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 และเป็นโหนดมอดูเลเตอร์ที่ขับโหนดเต็มพิกัด จะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจากให้อันดับการกรองเป็น 1000 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 โดยมีค่าสหสัมพันธ์แบบผกผันมีค่าประมาณ 10^{-9} ถึง 10^{-10} ซึ่งมากกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมด้านน้ำหนักการวนซ้ำต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ตามรายละเอียดการออกแบบจากตำราของ Simon Haykin⁽³³⁾ เมื่อทำการแตกอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวม พบว่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกที่อันดับที่สาม ห้า และอันดับที่สูงกว่านั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมในกราฟนี้จะได้ 0.86% ซึ่งค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมที่เป็นมาตรฐานอยู่ที่ 5% ดังนั้นผลที่ได้จากการกรองของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำผ่านมาตรฐานของฮาร์มอนิก

4.5 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่าง ๆ

4.5.1 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของโหนดอินดักทีฟ

ผลการเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ รวมถึงตัวกรองแบบวีเนอร์และแบบพาสซีฟมาเทียบกับวงจรที่ไม่ได้ใส่ตัวกรอง เมื่อต่อโหนดอินดักทีฟกรณีสี่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และอันดับการกรองเท่ากับ 120 พบว่าค่าสัญญาณขาออกของแต่ละตัวกรองเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง กราฟที่ได้จะมีการซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในตอนแรกที่เป็น 0 เนื่องจากให้อันดับการกรองเป็น 120 ดังนั้นการเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 120 เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่าตัวกรองที่ให้ผลการกรองที่ดีที่สุด คือ ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบวีเนอร์ และสุดท้ายจะเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ เช่นเดียวกันกับกรณีสี่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 และ 0.9 ของโหนดอินดักทีฟ ซึ่งตัวกรองทั้งหมดผ่านค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐาน IEEE std 519-1992 สามารถดูภาพประกอบ 99



ภาพประกอบ 99 ผลการเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟ

ตาราง 5 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมในโหลดอินดักทีฟ

รูปแบบการทดสอบการจำลอง	THD (%)	THD Standard (%)
ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5		
ไม่ใส่วงจรกรอง	6.52	5
L=0.689 H และ C=3.676 uF	2.24	5
ตัวกรองแบบวีเนอร์		
LMS	1.16	5
NLMS	1.14	5
LLMS	1.02	5
RLS	0.94	5
ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7		
ไม่ใส่วงจรกรอง	5.84	5
L=0.707 H และ C=9.35730 uF	2.06	5

ตาราง 5 (ต่อ)

ตัวกรองแบบวีเนอร์	1.72	5
LMS	1.16	5
NLMS	1.14	5
LLMS	1.02	5
RLS	0.94	5
ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9		
ไม่ใส่วงจรกรอง	5.64	5
L=0.042 H และ C=60.3 uF	2.15	5
ตัวกรองแบบวีเนอร์	1.68	5
LMS	1.15	5
NLMS	1.10	5
LLMS	0.98	5
RLS	0.85	5

จากตาราง 5 แสดงให้เห็นถึงค่าความเพี้ยนกระแสรวมของการจำลองอินเวอร์เตอร์ในโหลดอินดักทีฟ จากตารางทำให้ทราบว่าตัวกรองในแต่ละแบบมีค่าความเพี้ยนกระแสรวมลดลงอย่างเห็นได้ชัด และผ่านมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 ได้เป็นอย่างดี จะแบ่งผลการจำลองออกเป็น 3 กรณี กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ตัวกรองแบบพาสซีฟจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.24% ตัวกรองแบบวีเนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.74% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรุ่มไหล และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.16% 1.14% 1.02% และ 0.94% ตามลำดับ กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 ตัวกรองแบบพาสซีฟจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.06% ตัวกรองแบบวีเนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.72% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้

วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบ
 รัวไหล และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.16%
 1.14% 1.02% และ 0.94% ตามลำดับ กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 ตัวกรองแบบพาสซีฟจะ
 มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.15% ตัวกรองแบบวีเนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม
 เท่ากับ 1.68% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด
 แบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความ
 เพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.15% 1.10% 0.98% และ 0.85% ตามลำดับ

ตาราง 6 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในโหลดอินดักทีฟ

รูปแบบการทดสอบการจำลอง	THD (%)	THD Standard (%)
ไม่ใส่วงจรกรอง	23.48	5
L=0.042 H และ C=60.3 uF	2.86	5
ตัวกรองแบบวีเนอร์	2.15	5
LMS	1.36	5
NLMS	1.22	5
LLMS	1.14	5
RLS	1.02	5

จากตาราง 6 แสดงให้เห็นถึงค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมของการจำลอง
 อินเวอร์เตอร์ในโหลดอินดักทีฟ จากตารางทำให้ทราบว่าตัวกรองในแต่ละแบบมีค่าความเพี้ยน
 แรงดันฮาร์มอนิกรวมลดลงอย่างเห็นได้ชัด และผ่านมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 ได้อย่าง
 เห็นได้ชัด ตัวกรองแบบพาสซีฟจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.86% ตัวกรองแบบวี
 เนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.15% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสอง
 เฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธี
 กำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.36% 1.22% 1.14% และ
 1.02% ตามลำดับ

4.5.2 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของโหนดมอเตอร์

ผลการเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของตัวกรองชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ รวมถึงตัวกรองแบบวีเนอร์และแบบพาสซีฟมาเทียบกับวงจรที่ไม่ได้ใส่ตัวกรอง เมื่อต่อโหนดเป็นมอเตอร์ และอันดับการกรองเท่ากับ 1000 พบว่าเป็นสัญญาณที่เรียบ และมีคล้ายกับสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณอ้างอิง เมื่ออันดับการกรองเป็น 1000 การเริ่มทำงานของอัลกอริทึมจะทำงานตอนเริ่มแรกที่ 1000 ยกเว้นตัวกรองแบบวีเนอร์ เนื่องจากคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ เป็นสัญญาณที่แปรเปลี่ยนตามเวลา หรือสัญญาณที่ไม่คงที่ ทำให้การกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ไม่สมบูรณ์ เมื่อทำการหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม พบว่าตัวกรองที่ให้ผลการกรองที่ดีที่สุดคือ ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ รองลงมาจะเป็นวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และสุดท้ายจะเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งตัวกรองทั้งหมดผ่านค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เป็นมาตรฐาน IEEE std 519-1992 ยกเว้นตัวกรองแบบวีเนอร์ ดังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

ตาราง 7 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมในโหนดมอเตอร์

รูปแบบการทดสอบการจำลอง	THD (%)	THD Standard (%)
กรณีไร้โหลด		
ไม่ใส่วงจรกรอง	11.99	5
L=0.1592 H และ C=15.91 uF	2.26	5
ตัวกรองแบบวีเนอร์	40.13	5
LMS	1.39	5
NLMS	0.53	5
LLMS	0.20	5
RLS	0.98	5

ตาราง 7 (ต่อ)

กรณีขับโหลดเต็มพิกัด		
ไม่ใส่วงจรรอง	17.68	5
L=0.149 H และ C=17.0 uF	2.44	5
ตัวกรองแบบวีเนอร์	43.30	5
LMS	1.35	5
NLMS	0.38	5
LLMS	0.20	5
RLS	0.86	5

จากตาราง 7 แสดงให้เห็นถึงค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมของการจำลองอินเวอร์เตอร์ในโหลดมอเตอร์ จากตารางทำให้ทราบว่าตัวกรองในแต่ละแบบมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมลดลง และผ่านมาตรฐานของ IEEE std 519-1992 ได้อย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นตัวกรองแบบวีเนอร์ จะแบ่งผลการจำลองออกเป็น 2 กรณี กรณีไร้โหลด ตัวกรองแบบพาสซีฟจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.26% ตัวกรองแบบวีเนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 40.13% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.39% 0.53% 0.20% และ 0.98% ตามลำดับ กรณีขับโหลดเต็มพิกัด ตัวกรองแบบพาสซีฟจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.44% ตัวกรองแบบวีเนอร์จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 43.30% ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล และวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.35% 0.38% 0.20% และ 0.86% ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าในตัวกรองแบบวีเนอร์มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นเนื่องจากสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากโหลดมอเตอร์ทุกกรณี เป็นสัญญาณที่แปรเปลี่ยนตามเวลา หรือสัญญาณที่ไม่คงที่ ทำให้การกรองของตัวกรองวีเนอร์ไม่สมบูรณ์

บทที่ 5

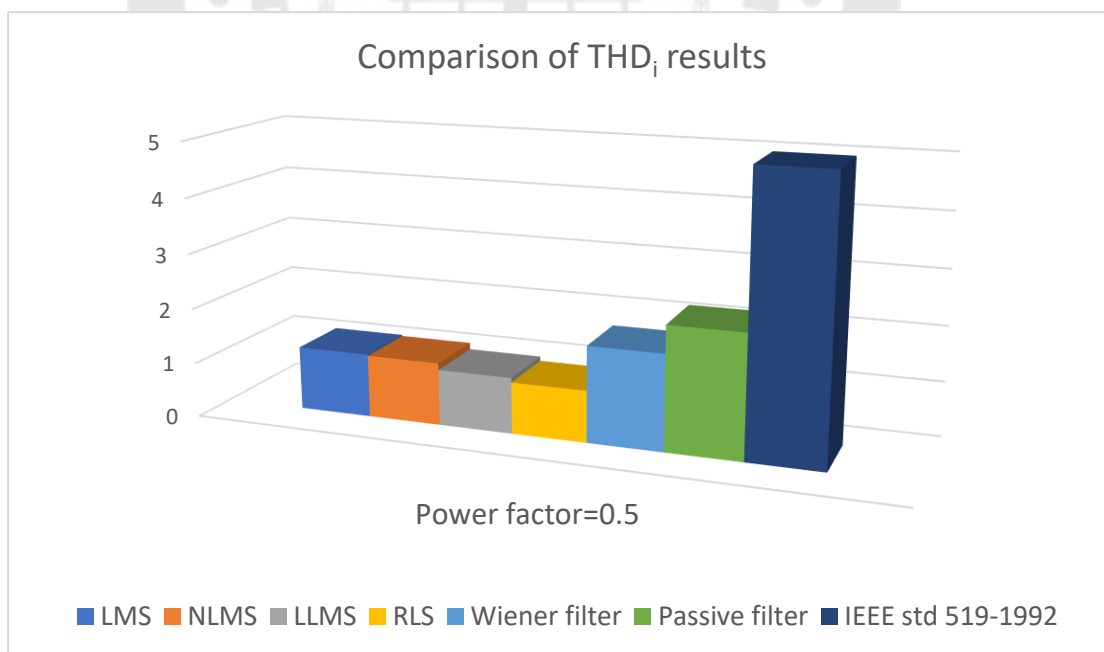
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

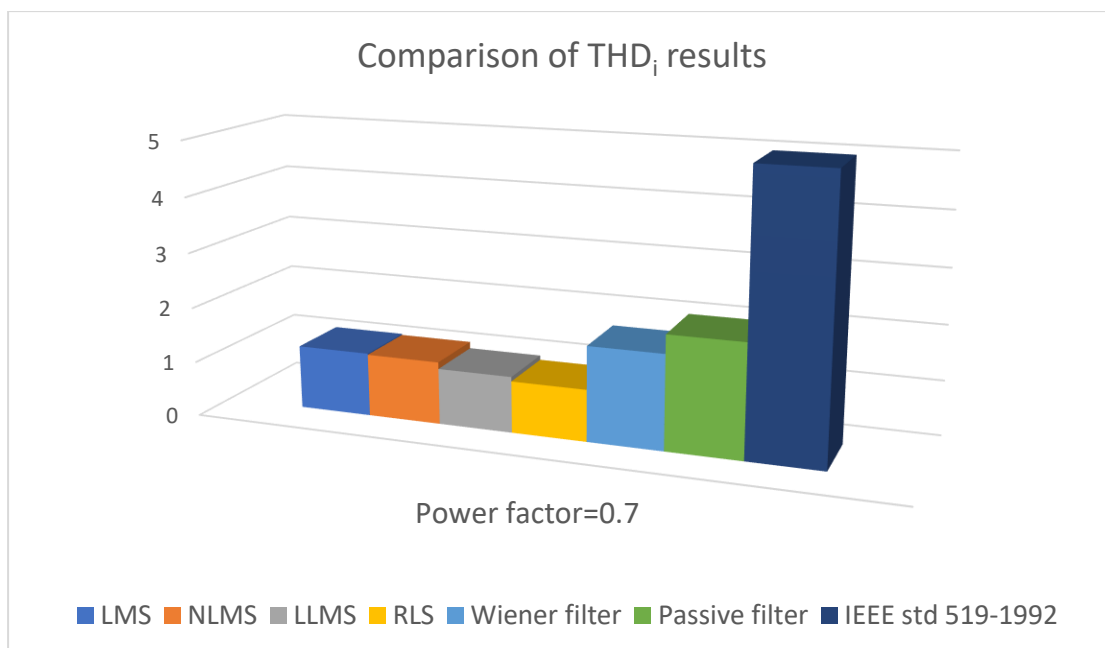
ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ โดยใช้วงอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียวเป็นกรณีศึกษา ซึ่งจะต่ออยู่กับโหลดอินดักทีฟและโหลดมอเตอร์ โดยผลการกรองฮาร์มอนิกจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ต่ออยู่กับโหลดอินดักทีฟ และส่วนที่ต่ออยู่กับโหลดมอเตอร์ จากการจำลองวิธีลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเชิงขั้วเดียว ที่เป็นที่มาของการเกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งจะใช้ตัวกรองพาสซีฟ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ และตัวกรองวีเนอร์ ในการลดดังกล่าวข้างต้น ซึ่งให้ข้อสรุปได้ว่า เมื่อต่อโหลดอินดักทีฟพบว่าตัวกรองที่ให้ผลในการกรองที่ดีที่สุด คือ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ ตัวกรองวีเนอร์ และตัวกรองแบบพาสซีฟ ตามลำดับ ส่วนเมื่อต่อโหลดที่เป็นมอเตอร์เฟสเดียวอะซิงโครนัส พบว่าตัวกรองที่ให้ผลในการกรองที่ดีที่สุด คือ ตัวกรองแบบปรับค่าได้ รองลงมาเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ ยกเว้นตัวกรองวีเนอร์ ในกรณีของตัวกรองวีเนอร์ต้องให้ความถี่ของสัญญาณเท่ากัน และสัญญาณที่จะเข้าตัวกรองวีเนอร์ต้องเป็นสัญญาณที่คงที่ (stationary) แต่สัญญาณที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่อโหลดเป็นมอเตอร์ เป็นสัญญาณที่ไม่คงที่ (non-stationary) ทำให้การกรองสัญญาณของตัวกรองวีเนอร์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ ซึ่งส่งผลให้การกรองไม่สมบูรณ์หรือไม่ได้ส่งผลกับการกรองเมื่อใส่ตัวกรองวีเนอร์ แต่อีกสองตัวกรองสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะที่เรียบ และผ่านมาตรฐานค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ตาม IEEE std 519-1992 ซึ่งเมื่อทำการมองในมุมมองการดูเข้าของตัวกรอง พบว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ จะมีค่าการดูเข้าที่สูง เนื่องจากค่าช่วงก่าวมีค่าที่มากกว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ อย่างไรก็ตามตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจะมีการดูเข้าที่นาน เนื่องจากจะมีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างซับซ้อนมาก แต่พบว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำจะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมดีกว่าตัวกรองแบบต่างๆ ที่ได้ทำการจำลองตรงตามบทความวิจัยของ Serdar Kockanat และคณะ⁽¹⁵⁾ อีกทั้งการใช้อันดับการกรองก็เป็นเรื่องสำคัญในการออกแบบตัวกรองแบบต่างๆ โดยที่เมื่อต่อโหลดอินดักทีฟ จะใช้อันดับตัวกรอง เท่ากับ 120 ซึ่งให้ผลการกรองที่มีประสิทธิผล ตามการใช้อันดับการกรองจากบทความวิจัยของ Alhafadhi L และคณะ⁽⁹⁾ อย่างไรก็ตามในกรณีต่อโหลดมอเตอร์การใช้อันดับตัวกรอง

เพียงแค่ 120 ไม่เพียงพอในการคำนวณ ผู้วิจัยจึงเพิ่มอันดับการกรองที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ 1000 ซึ่งพบว่า การกรองมีประสิทธิภาพแต่ต้องแลกด้วยกับเวลาของการคำนวณที่เพิ่มขึ้น

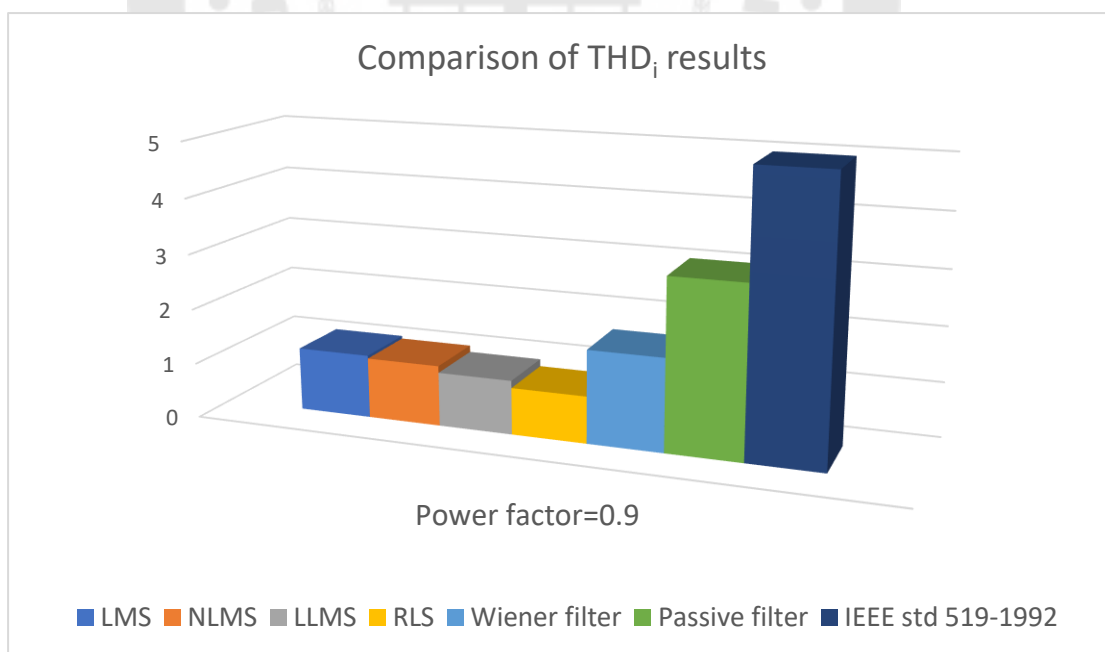
เมื่อทำการต่อโหลดอินดักทีฟ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟ จะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ลดลงจากมาตรฐาน เมื่อใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ โดยอันดับการกรองเป็น 120 จะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ลดลงจากมาตรฐาน เมื่อใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ ไม่ว่าจะใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด หรือวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ หรือวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล หรือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ โดยมีอันดับการกรองเป็น 120 จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ลดลงจากมาตรฐาน สรุปได้ว่าตัวกรองที่ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด คือตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบร็วไหล ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ รองลงมาจะเป็นตัวกรองแบบวีเนอร์ และสุดท้ายเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ สามารถดูภาพประกอบ 100 ภาพประกอบ 101 ภาพประกอบ 102 สำหรับกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 กรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 และกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 ตามลำดับ



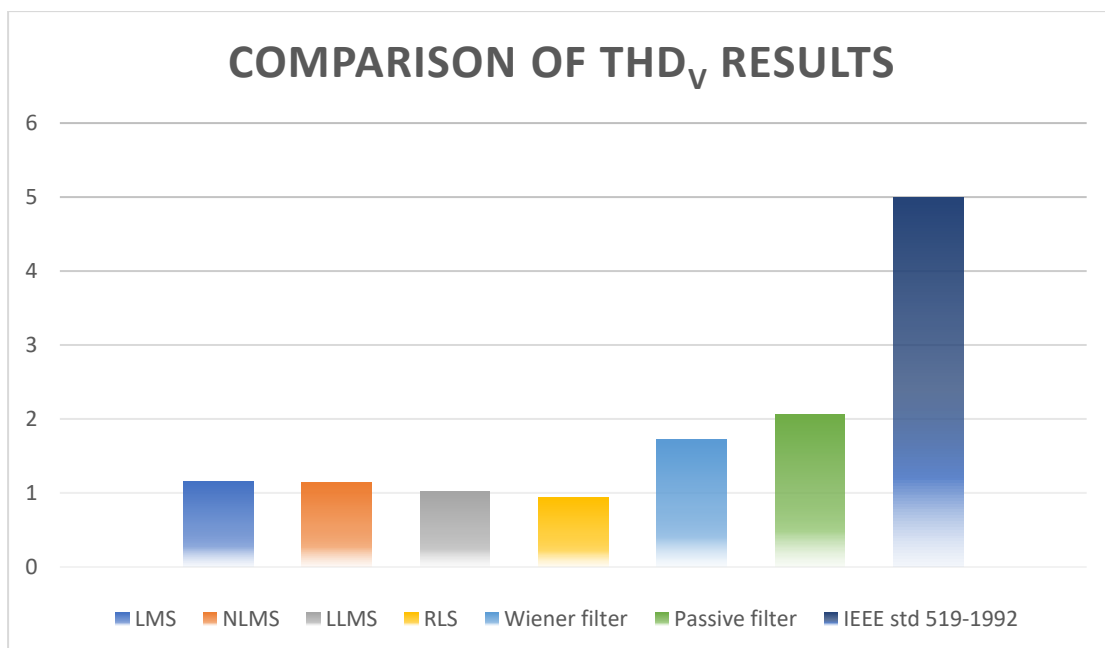
ภาพประกอบ 100 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5



ภาพประกอบ 101 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7

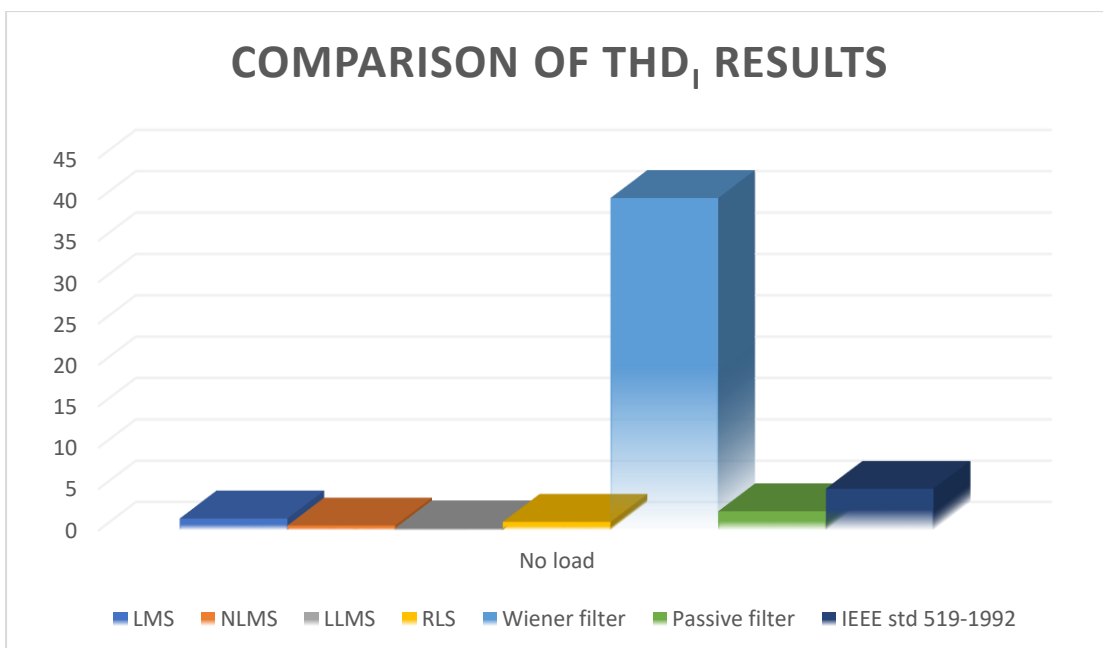


ภาพประกอบ 102 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟกรณีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9

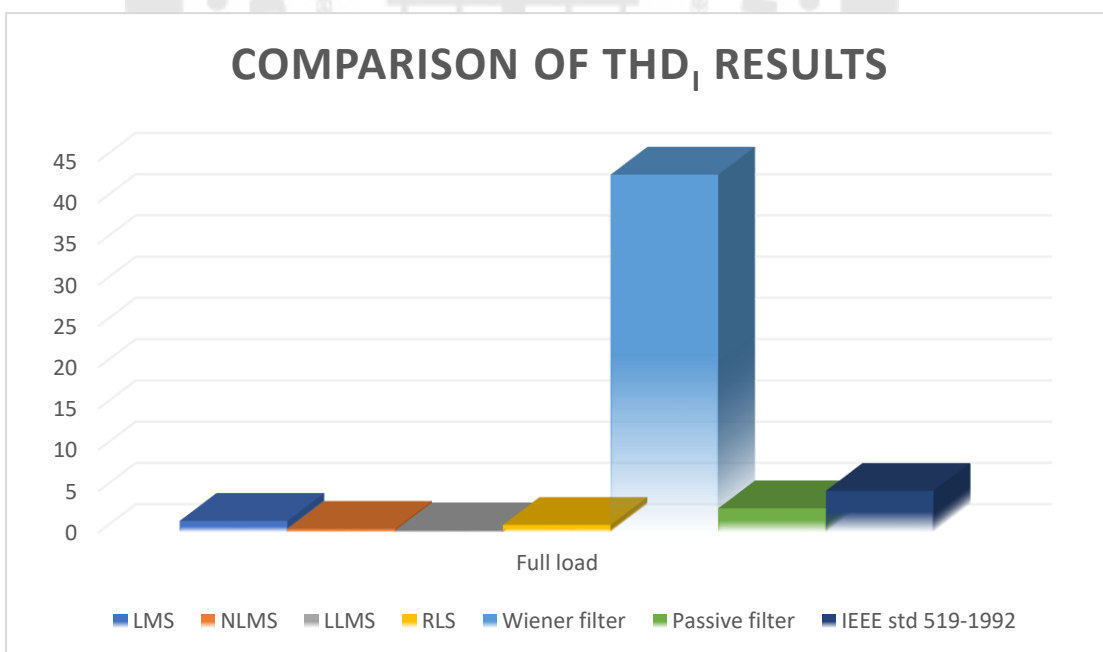


ภาพประกอบ 103 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดอินดักทีฟ

เมื่อทำการต่อโหลดมอเตอร์ จะเห็นได้ว่า เมื่อใส่ตัวกรองแบบพาสซีฟจะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมลดลงจากมาตรฐาน เมื่อใส่ตัวกรองแบบวีเนอร์ โดยอันดับการกรองเป็น 1000 จะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่เพิ่มขึ้นจากมาตรฐาน เมื่อใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ ไม่ว่าจะใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด หรือวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ หรือวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรวิ์ไหล หรือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ โดยมีอันดับการกรองเป็น 1000 จะมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ลดลงจากมาตรฐาน สรุปได้ว่าตัวกรองที่ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด คือตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรวิ์ไหล ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ ถัดมาจะเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ ยกเว้นตัวกรองแบบวีเนอร์ที่ไม่สามารถให้ผลการกรองในโหลดมอเตอร์ได้ เนื่องจากคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากโหลดมอเตอร์ เป็นสัญญาณที่แปรเปลี่ยนตามเวลา หรือสัญญาณที่ไม่คงที่ ทำให้การกรองของตัวกรองแบบวีเนอร์ไม่สมบูรณ์สามารถดูภาพประกอบ 104 ภาพประกอบ 105 สำหรับกรณีไร้โหลด กรณีขับโหลดเต็มพิกัด



ภาพประกอบ 104 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดมอเตอร์กรณีไร้โหลด



ภาพประกอบ 105 ผลการเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมของตัวกรองชนิดต่างๆ ในโหลดมอเตอร์กรณีขับโหลดเต็มพิกัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการจำลอง ทำให้มีข้อเสนอแนะที่ให้ได้ซึ่งผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพและง่ายต่อการจัดทำทดลอง ได้แก่

1 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะต้องมีการเช็คค่าช่วงก้ำว ให้มีค่าน้อยๆประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งจะให้สัญญาณจากตัวกรองที่สมบูรณ์แบบ ถ้าใส่ค่าที่มากทำให้สัญญาณที่ได้มาจะไม่สมบูรณ์ ในข้อนี้บ่งบอกถึงข้อจำกัดของวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

2 คลื่นสัญญาณที่จะเข้าตัวกรองแบบวีเนอร์ จะต้องเป็นคลื่นสัญญาณที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ซึ่งถ้าแปรเปลี่ยนตามเวลา จะทำให้สัญญาณที่ได้จากการกรองไม่สมบูรณ์ ในข้อนี้บ่งบอกถึงข้อจำกัดของตัวกรองแบบวีเนอร์

3 การเลือกใช้อันดับตัวกรองในการกรองของโพลดิอันดับที่พีและโพลดมอเตอร์ จำเป็นต้องให้มีการเลือกค่าที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ค่าที่เหมาะสมของอันดับตัวกรองคือ 120 และ 1000 สำหรับโพลดิอันดับที่พีและโพลดมอเตอร์

4 การลู่เข้าของตัวกรองในแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับค่าช่วงก้ำวของตัวกรองในแต่ละแบบ อย่างไรก็ตามตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ แม้ว่าจะไม่มีค่าช่วงก้ำวแต่เวลาการลู่เข้าของตัวกรองชนิดนี้จะมีเวลาในการคำนวณที่ค่อนข้างนาน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนมากกว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

5 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด จะมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ง่ายกว่าวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบวนซ้ำ แต่จะมีการเลือกค่าของช่วงก้ำวที่ไม่แม่นยำ ดังนั้นสามารถทำการศึกษาการปรับค่าช่วงก้ำวให้มีความถูกต้อง แม่นยำ เพื่อพัฒนาการลดฮาร์มอนิกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่อไป

6 สามารถใช้ตัวกรองชนิดอื่นที่ไม่เกี่ยวกับการลดฮาร์มอนิกมาปรับใช้ในการลดฮาร์มอนิกให้มีความทันสมัยยิ่งขึ้น ทันกับโลกปัจจุบัน

บรรณานุกรม

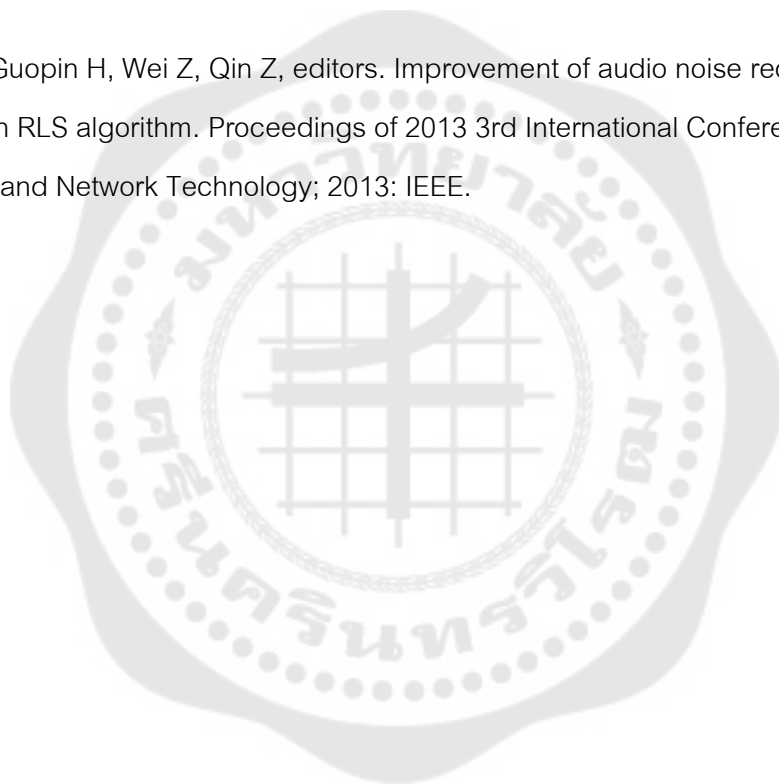
1. Mahesh G, Ganesan R, Das SK, editors. Effects of power harmonics and its control techniques. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility; 1999: IEEE.
2. Wagner V, Balda JC, Griffith D, Mceachern A, Barnes T, Hartmann D, et al. Effects of harmonics on equipment. IEEE transactions on power delivery. 1993; 8(2): 672-80.
3. Fuchs E, Roesler D, Kovacs K. Sensitivity of electrical appliances to harmonics and fractional harmonics of the power system's voltage. Part II: Television sets, induction watt-hour meters and universal machines. IEEE transactions on power delivery. 1987; 2(2): 445-53.
4. Ho J, Liu C, editors. The effects of harmonics on differential relay for a transformer. IEE CONFERENCE PUBLICATION; 2001: IET.
5. Henderson RD, Rose PJ. Harmonics: the effects on power quality and transformers. IEEE transactions on industry applications. 1994; 30(3): 528-32.
6. Peng FZ, Akagi H, Nabae A. A new approach to harmonic compensation in power systems. IEEEJ Transactions on Industry Applications. 1989; 109(12): 897-904.
7. Alhafadhi L, Asumadu J, Alsafi A, editors. Total Harmonics Distortion reduction using a new method of adaptive filtering. IEEE Western New York Image and Signal Processing Workshop (WNYISPW); 2016: IEEE.
8. Musznicki P, Schanen J-L, Granjon P, Chrzan PJ. The Wiener filter applied to EMI decomposition. IEEE Transactions on Power Electronics. 2008; 23(6): 3088-93.
9. Alhafadhi L, Asumadu J, Alsafi A, editors. Total harmonics distortion reduction using adaptive, Wiener, and Kalman filters. IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC); 2017: IEEE.
10. Badoni M, Singh A, Singh B. Comparative performance of wiener filter and adaptive least mean square-based control for power quality improvement. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016; 63(5): 3028-37.
11. Moo C, Cheng H, Guo S, editors. Designing passive LC filters with contour maps

[for diode bridge rectifiers]. Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems; 1997: IEEE.

12. Ji Y, Wang F. Single-phase diode rectifier with novel passive filter. IEE PROCEEDINGS CIRCUITS DEVICES AND SYSTEMS. 1998; 145: 254-9.
13. Pal Y, Swarup A, Singh B, editors. A review of compensating type custom power devices for power quality improvement. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference; 2008: IEEE.
14. Jacob T, Suresh LP, editors. A review paper on the elimination of harmonics in multilevel inverters using bioinspired algorithms. 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT); 2016: IEEE.
15. Kao C-C. Design of echo cancellation and noise elimination for speech enhancement. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2003; 49(4): 1468-73.
16. Meenavathi M, Rajesh K, editors. Volterra Filter for Dynamic Image Sequences. 2008 IEEE International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems; 2008: IEEE.
17. Bai X, Li H, Xing G, editors. Estimation and Elimination of Noise for ICA Based Blind Multiuser Detection. 2012 Second International Conference on Business Computing and Global Informatization; 2012: IEEE.
18. Kockanat S, Koza T, Karaboga N, Logoglu A. Adaptive FIR filtering using ABC algorithm: a noise reduction application on mitral valve doppler signal. Elektronika ir Elektrotechnika. 2018; 24(5): 62-8.
19. Kockanat S, Karaboga N, editors. Parameter tuning of artificial bee colony algorithm for gaussian noise elimination on digital images. 2013 IEEE INISTA; 2013: IEEE.
20. Al-Shoshan AA, Al-Shoshan AI, editors. Noise Elimination of Electrocardiogram Signals Using the Evolutionary Bispectrum. 2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS); 2018: IEEE.
21. ธาราธิรเศรษฐ์ ว. ปัญหาการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. Technology Electronic. ธันวาคม 2554 - มกราคม 2555; 38(220): 45-8.
22. บุญคุ้ม ธ, อินทร์จันทร์ ส, เกื้อสงค์ ป. การศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาวิธีลดค่าฮาร์มอนิกสใน

- โรงงานอุตสาหกรรม [ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมไฟฟ้า]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม; 2556.
23. Rosa FCDL. Harmonics and power systems. Boca Ration, FL: Taylor & Francis Group; 2549.
24. วิศวกรรมธรณธร ศ. วงจรรอกกำลังไฮบริดเพื่อลดทอนฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรม]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2552.
25. Arrillaga J, Watson NR. Power system harmonics. West Succex, England: John Wiley & Sons; 2546.
26. Hameed Z, Sial MRK, Yousaf A, Hashmi MU, editors. Harmonics in electrical power systems and how to remove them by using filters in etap. Proc of the 3rd Int Conf on Engineering and Emerging Technologies; 2016.
27. พวงระย้า ศ, สกุดแก้ว อ, มาเฮง ส, โอบาส ฉ. อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวรอกกำลังแบบแอคทีฟหนึ่งเฟส [ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมไฟฟ้า]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม; 2556. สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2562 จาก <http://dSPACE.spu.ac.th/handle/123456789/4700>
28. ใจตระกูล ๕. การควบคุมการฉีดแรงดันซัดเซยสำหรับวงจรรอกกำลังแอคทีฟอนุกรมด้วยวิธีฮีสเตอร์ซิส [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรม]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2555.
29. F II I. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. New York, NY, USA. 1993.
30. ชันเงิน น, ธาวาธิ์รเศรษฐ์ ว. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง; 2540.
31. SKVARENINA TL. THE POWER ELECTRONICS HANDBOOK. Boca Raton London New York Washington, D.C: CRC PRESS; 2002.
32. Poularikas AD, Ramadan ZM. Adaptive filtering primer with MATLAB. CRC Press; 2017.
33. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 3rd Edition. Prentice Hall; 1995.
34. Cheng X, He Y, Guizani M, editors. OFDM de-noising with RLS adaptive filter. 2016 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC); 2016: IEEE.

35. ยุทธนา ข. เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับคอนเวอร์เตอร์กำลังและการประยุกต์ใช้งานในตัว = PWM techniques for power converters and their applications. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ค, editor.: เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2560.
36. ไพโรจน์อมรชัย เ, สุขภาพ ข, สุวรรณกวิน ส. กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว : การหาสาเหตุความเสียหายของอินเวอร์เตอร์และการลดทอนกระแสชาร์จประจุระหว่างสายเคเบิล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27; ขอนแก่น2547. p. 315-7.
37. Guopin H, Wei Z, Qin Z, editors. Improvement of audio noise reduction system based on RLS algorithm. Proceedings of 2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology; 2013: IEEE.







ภาคผนวก ก

โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบวีเนอร์

โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบวีเนอร์

```

%Wiener Filter
clear all;
close all;
clc;
%desired signal is d(n). noise signal is x(n).
dn=V1(1:10000)';%Take the value from Simulink (Sine
wave)
xn=V4(1:10000)';%Take the value from Simulink (Output
of inverter)
N=length(xn);
%Wiener Algorithm
rv=AUTOCORR(xn(1:N));%computing autocorrelation
rx=CROSSCORR(dn(1:N),xn(1:N));%computing
crosscorrelation
M=120%M=order of filter for RL and M=1000 for motor
Rv=toeplitz(rv(1:M));%computing toeplitz matrix
w=inv(Rv)*rx(1:M).';%computing optimal coefficients
y=conv(w,xn);%filtering with Wiener filter
error=dn-y(1:N);%computing the error

%this function computes autocorrelation
function y=AUTOCORR(x)
K=length(x);
for n=1:K
    y(n)=sum([x,zeros(1,n-1)].*[zeros(1,n-1),x])/(K);
end
end

%this function computes crosscorrelation
function y=CROSSCORR(X,Z)
x=[X,zeros(1,length(Z)-length(X))]; %Making length of
x and z to be the same
z=[Z,zeros(1,length(X)-length(Z))];
N=length(z);
for n=1:N
    y(n)=sum([x,zeros(1,n-1)].*[zeros(1,n-1),z])/(N);
end
end

```



ภาคผนวก ข

โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบปรับค่าได้

โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองแบบปรับค่าได้

1 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

```
%LMS Algorithm
clear all;
close all;
clc;
%desired signal is d(n). noise signal is x(n).
M=120;%M=order of filter for RL and M=1000 for motor
mu=0.00000001;%mu=step size parameter
N=length(xn);
y=zeros(1,N);
w=zeros(1,M);%initialized filter coefficient vector
for n=M:N
    x1=xn(n:-1:n-M+1);%for each n the vector x1 is
    produced of length M with elements from x reverse
    order;
    y(n)=w*x1';%filtering with adaptive filter
    e(n)=dn(n)-y(n);%computing the error
    w=w+2*mu*e(n)*x1;%computing optimal coefficients
end
```

2 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบปกติ

```
%NLMS Algorithm
clear all;
close all;
clc;
%desired signal is d(n). noise signal is x(n). c is
constant
M=120;%M=order of filter for RL and M=1000 for motor
mu=0.2;%mu=step size parameter
N=length(xn);
y=zeros(1,N);
w=zeros(1,M);%initialized filter coefficient vector
for n=M:N
    x1=xn(n:-1:n-M+1);
    y(n)=w*x1';%filtering with adaptive filter
    e(n)=dn(n)-y(n);%computing the error
    w=w+(mu/(c+conj(x1)*x1'))*conj(e(n))*x1;%computing
    optimal coefficients
end
```

3 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแบบรัวไหล

```
%LLMS Algorithm
%desired signal is d(n). noise signal is x(n).
M=120%M=order of filter for RL and M=1000 for motor
mu=0.00000001;%mu=step size parameter
N=length(xn);
y=zeros(1,N);
w=zeros(1,M);%initialized filter coefficient vector
gamma=0.1;%gamma is the leakage coefficient.
for n=M:N
    x1=xn(n:-1:n-M+1);%for each n the vector x1 is
    produced of length M with elements from x reverse
    order;
    y(n)=w*x1';%filtering with adaptive filter
    e(n)=dn(n)-y(n);%computing the error
    w=(1-mu*gamma)*w+mu*e(n).*x1;%computing optimal
    coefficients
end
```

4 ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

```
%RLS Algorithm
%desired signal is d(n). noise signal is x(n).
M=120%M=order of filter for RL and M=1000 for motor
lamda = 0.9995 ;%lamda is the forgetting factor.
%initial P matrix
delta = 1e10 ;
P = delta * eye (M);
N=length(xn);
w=zeros(1,M);%initialized filter coefficient vector
for n=M:N
    x1=xn(n:-1:n-M+1);
    x2=x1';
    phi = x2' * P ;
    k = phi'/(lamda + phi * x2 );%k is the gain
    vector
    y(n)=w' * x2;%filtering with adaptive filter
    e(n)=dn(n)-y(n);%computing the error
    w = w + k * e(n) ;%computing optimal coefficients
    P = ( P - k * phi ) / lamda ; %P is the inverse
    correlation matrix of the input signal.
end
```




ภาคผนวก ค

ผลงานการตีพิมพ์สำหรับการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 42 The 42nd Electrical Engineering Conference (EECON-42)

การเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ

COMPARISON OF HARMONIC DISTURBANCE REDUCTION

USING ADAPTIVE, WIENER, AND PASSIVE FILTERS

อิมรอน หะรอเม ก่ำพด วรดิษฐ์ และวุฒิพด ธาราริษฺเครมฐ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ imron.ron@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบยูนิโพลาร์ โดยจะต่อโหลดเป็น RL ในการกรองจะใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ ซึ่งจะพิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดฮาร์มอนิกสัญญาณกระแสและแรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวกรอง จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวกรองทั้งสามแบบสามารถลดฮาร์มอนิกได้ถึง 50% และพบว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด รองลงมาเป็นตัวกรองแบบวีเนอร์ สุดท้ายเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟ

คำสำคัญ: ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวม ตัวกรองแบบปรับค่าได้ ตัวกรองแบบวีเนอร์ ตัวกรองแบบพาสซีฟ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

Abstract

This paper aims to compare the effectiveness of harmonic disturbance reduction using adaptive, Wiener, and passive filters. The single-phase unipolar pulse width modulation inverter with RL load was chosen as a noise source. The harmonic reduction performances of output voltage and current were simulated and compared. From the simulated results, it can be concluded that inverter with filter can reduce the total harmonics distortion (THD) up to 50% comparing with the case of without filter inserted. Moreover, the adaptive filter provides the best harmonic reduction performance followed by Wiener and passive filters.

Keywords: Total harmonics distortion, adaptive filter, Wiener filter, passive filter, single-phase inverter

1. บทนำ

เพื่อแก้ปัญหาผลกระทบของฮาร์มอนิก จึงมีการใช้ตัวกรองในการกรองฮาร์มอนิก ซึ่งเทคนิคที่จะใช้ลดฮาร์มอนิก ได้แก่ ตัวกรองแบบพาสซีฟ [1-2] ซึ่งเป็นตัวกรองที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากอุปกรณ์หาซื้อได้ง่าย แต่จะมีข้อจำกัดที่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บ

ประจุจะมีขนาดใหญ่ และเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว มีหลายงานวิจัยได้นำเสนอตัวกรองแบบปรับค่าได้ [3] ตัวกรองแบบวีเนอร์ [3-4] และตัวกรองคลื่นมาน [1] ซึ่งตัวกรองทั้งสามแบบไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แต่จะมีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนแทนและเป็นตัวกรองแบบดิจิทัล

บทความนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพและข้อจำกัดในการกรองของตัวกรองแต่ละแบบ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวม

มาตรฐานที่บังคับถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมสำหรับอ้างอิงในระดับสากลจะใช้การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างกาไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 [5] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวม ซึ่งขีดจำกัดความเพี้ยนแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกสรวมตามมาตรฐาน จะมีค่า THD เท่ากับ 5% โดยที่ THD หมายถึงอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่หลักมูล ดังสมการที่ (1)

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{1,rms}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 ตัวกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive Filter)

ตัวกรองแบบปรับค่าได้โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (least mean square : LMS) มาช่วยในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง ซึ่งบล็อกไดอะแกรมดูได้จากรูปที่ 1 และสมการในการคำนวณหาตัวกรองแบบปรับค่าได้มีดังนี้ [1,3]

$$y(n) = a^T(n)x(n) \quad (2)$$

โดยที่ $y(n)$ เป็นสัญญาณหลังเข้าตัวกรอง a เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง และ $x(n)$ เป็นสัญญาณรบกวนก่อนเข้าตัวกรอง โดยค่าความคลาดเคลื่อน (error) สามารถหาได้ดังสมการที่ (3)

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{3}$$

โดยที่ $e(n)$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อน และ $y(n)$ เป็นสัญญาณที่ต้องการ โดยพื้นฐานของค่าปรับสัมประสิทธิ์ตัวกรองเป็นดังสมการที่ (4)

$$A(n+1) = a(n) - \mu \nabla j(e(n)) \tag{4}$$

โดยที่ $A(n+1)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองรอบใหม่ μ เป็นค่าช่วงก้าว M เป็นค่าอันดับของตัวกรอง และ $j(e(n))$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง จากนั้นจะทำการหาค่า $\nabla j(e(n))$ จะได้

$$\nabla j(e(n)) = \nabla E(e(n)^2) = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial a} \tag{5}$$

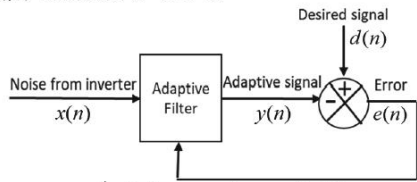
ทำการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับค่า a จะได้

$$\frac{\partial e(n)}{\partial a} = -x(n) \tag{6}$$

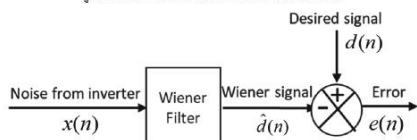
ซึ่งค่า E เป็นค่า expectation จากนั้นนำสมการที่ (5-6) มาแทนในสมการที่ (4) จะได้สัมประสิทธิ์การปรับตัวกรองรอบใหม่ดังแสดงใน (7)

$$A(n+1) = a(n) + 2\mu e(n)x(n) \tag{7}$$

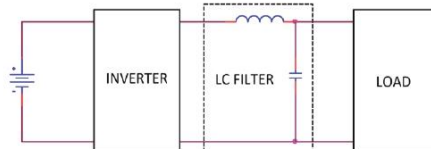
สำหรับขั้นตอนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองตามวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (7) โดยจะขึ้นอยู่กับค่าช่วงก้าว (step size) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งใช้สำหรับกำหนดอัตราเร็วในการปรับตัว โดยที่ค่าช่วงก้าวจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่และต้องมีค่าช่วงก้าวขนาดเล็ก สำหรับบทความนี้จะใช้ค่าช่วงก้าว (μ) ที่มีค่าประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-9} [2]



รูปที่ 1 บล็อกโคแอดแอมของตัวกรองแบบปรับค่าได้



รูปที่ 2 บล็อกโคแอดแอมของตัวกรองแบบวินเนอร์



รูปที่ 3 วงจรสมมูลเมื่อมีการใส่ตัวกรองพาสซีฟ

2.3 ตัวกรองวินเนอร์ (Wiener Filter)

ตัวกรองวินเนอร์เป็นตัวกรองเวลาแบบไม่ต่อเนื่องที่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปจะใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (mean square error : MSE) สามารถดูบล็อกโคแอดแอมของตัวกรองวินเนอร์ได้จากรูปที่ 2 ซึ่งสมการในการคำนวณหาตัวกรองวินเนอร์นั้นมีดังนี้ [1,3-4]

$$\hat{d}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m x(n-m) = w^T x(n) \tag{8}$$

โดยที่ $\hat{d}(n)$ เป็นสัญญาณหลังเข้าตัวกรอง w เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง และ $x(n)$ เป็นสัญญาณรบกวนก่อนเข้าตัวกรอง หลังจากนั้นจะหาค่าความคลาดเคลื่อน (error) ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \tag{9}$$

$$J = E \{ (d(n) - \hat{d}(n))^2 \} = E \{ e^2(n) \} \tag{10}$$

โดยที่ $e(n)$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อน $d(n)$ เป็นสัญญาณที่ต้องการ M เป็นค่าอันดับของตัวกรอง และ J เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง จากนั้นทำการหา expectation สมการที่ (10) จะได้

$$\begin{aligned} E \{ e^2(n) \} &= E \left[(d(n) - w^T x(n))^2 \right] \\ &= E \left[d(n)^2 \right] - 2w^T E \left[x(n)d(n) \right] \\ &\quad + w^T E \left[x(n)x(n)^T \right] w \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$E \{ e^2(n) \} = r_{dd}(0) - 2w^T r_{xd} + w^T r_{xx} w \tag{11}$$

โดยที่ r_{xd} เป็นค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) และ r_{xx} เป็นค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (autocorrelation) จากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับค่า w จะได้ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial w} E \{ e^2(n) \} = -2r_{xd} + 2r_{xx} w = 0 \tag{12}$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองวินเนอร์ ดังสมการที่ (13)

$$w = r_{xx}^{-1} r_{xd} \tag{13}$$

2.4 ตัวกรองแบบพาสซีฟ (Passive Filter)

ตัวกรองแบบพาสซีฟนิยมใช้เป็นวงจรกรองความถี่ที่ผ่านชนิด LC ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 3

3. การออกแบบการจำลอง

3.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

สำหรับบทความวิจัยนี้ใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบยูนิโพลาร์ ใช้ MATLAB/SIMULINK ในการจำลองกระแสและแรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยต่อโหลดเป็น RL ซึ่งมีค่า $R=2$ Ohms, $L=1.592$

mH ให้อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด (m_a) เท่ากับ 0.8 และอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ (m_f) เท่ากับ 2.1 โดยกำหนดเงื่อนไขการออกแบบดังนี้ ความถี่องค์ประกอบมูลฐาน 50 Hz (f_0), ความถี่การสวิตช์ 1 kHz (f_{sw}), ความถี่รีโชนเนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ 100 Hz (f_r), พิกัดขั้วเข้าของอินเวอร์เตอร์ : 600 V (V_{dc}), พิกัดขาออกอินเวอร์เตอร์ : 300 V (V_{peak}), 200 A (I_{peak})

3.2 การออกแบบตัวกรองแบบปรับค่าได้

ตัวกรองแบบปรับค่าได้จะทำการกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด[3] โดยที่อันดับตัวกรองกำหนดให้เท่ากับ 120 และเลือกค่าช่วงก้าว (μ) เป็น 5×10^{-4} สำหรับแรงดัน และ 5×10^{-5} สำหรับกระแส [1]

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz มีแอมพลิจูดเป็น 369 V 309 A สำหรับสัญญาณแรงดันและกระแส ตามลำดับ

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน โดยนำค่าสัญญาณลูกคลื่นไซน์มาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองกับสัญญาณขาเข้าตัวกรอง โดยเลือกจำนวนที่ 2,000 ค่า

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{14}$$

ขั้นที่ 3 นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากขั้นที่ 2 ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง ตามสมการด้านล่างนี้

$$A(n+1) = a(n) + 2\mu e(n)x(n) \tag{15}$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองสัญญาณรบกวนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ ตามสมการด้านล่างนี้

$$y(n) = a^T(n)x(n) \tag{16}$$

3.3 การออกแบบตัวกรองแบบวีเนอร์

ตัวกรองแบบวีเนอร์สามารถทำการกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง[4]โดยที่อันดับตัวกรองกำหนดให้เท่ากับ 120

ขั้นที่ 1 สร้างสัญญาณลูกคลื่นไซน์เพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยจะเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz มีแอมพลิจูดเหมือนขั้นที่ 1 ของการออกแบบตัวกรองแบบปรับค่าได้

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (r_{xx}) และค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (r_{xd}) โดยเลือกจำนวนที่ 10,000 ค่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง โดยการนำค่าสหสัมพันธ์ไขว้เป็นตัวแยกและสหสัมพันธ์อัตโนมัติเป็นตัวส่วน

$$w = r_{xx}^{-1}r_{xd} \tag{17}$$

ขั้นที่ 4 ทำการกรองฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองมาการคอนโวลูชันกับสัญญาณกระแสและแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

$$\hat{d}(n) = w^T x(n) \tag{18}$$

3.4 การออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ

ตัวกรองพาสซีฟทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิก ให้เหลือเฉพาะองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันที่ป้อนให้กับโหลด โดยสามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้จากสมการต่อไปนี้ [2]

ขั้นที่ 1 พิจารณากระแสของวงจรกรองจากพิกัดของอินเวอร์เตอร์

$$i_{mv}(peak) < b \cdot i_{mv} \text{ โดยที่ } b \ll 1 \tag{19}$$

จากกระแสอินเวอร์เตอร์ $i_{mv} = 200$ A ซึ่งคำนวณจะได้กระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 50 A โดยที่ ($b=1/4$)

ขั้นที่ 2 พิจารณาถึงแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

$$V_{rated} = 2\pi f_0 L I_{rated} \tag{20}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ

$$L \leq \frac{V_{rated}}{2\pi f_0 I_{rated}} = L_{max} \tag{21}$$

คำนวณตัวเหนี่ยวนำได้เท่ากับ 4.775 mH

ขั้นที่ 3 กำหนดความถี่รีโชนเนนซ์ของตัวกรอง

$$f_0 < f_r \left(= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right) < f_{sw} \tag{22}$$

คำนวณตัวเก็บประจุจากขั้นที่ 2 และความถี่รีโชนเนนซ์ (f_r) เท่ากับ 100 Hz ได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.5839 mF

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบขนาดกระแสของอินเวอร์เตอร์

$$\frac{i_{mv}}{V_{rated(rms)}} = \frac{j\omega C}{1 - LC\omega^2} \tag{23}$$

จะได้กระแสอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ 48 A ซึ่งน้อยกว่ากระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุด ที่กำหนดในขั้นที่ 1 (50A)

4. วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากรูปที่ 4 และ 5 เป็นสัญญาณแสดงแรงดันและกระแสขาออกในโดเมนเวลา ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบต่างๆ ก่อนใส่ตัวกรองพบว่าสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้ประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ โดยที่สัญญาณแรงดันมีลักษณะเป็นลูกคลื่น PWM และสัญญาณกระแสมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกผสมอยู่ และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกด้วยการหาค่าฟูเรียร์เพื่อหาค่า THD พบว่าค่า THD ของสัญญาณแรงดันและกระแสก่อนใส่ตัวกรองเท่ากับ 53.83% 10.00% ตามลำดับ หลังใส่ตัวกรองพบว่าสัญญาณแรงดันหลังจากใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ มีค่า THD_v เป็น 1.07% 1.14% 2.17% ตามลำดับ และสำหรับสัญญาณกระแสหลังจากใส่ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟ

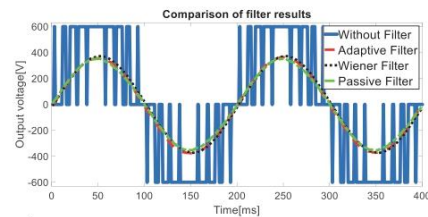
มีค่า THD_i เป็น 1.01% 1.39% 2.17% ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณทั้งสองมีค่า THD ที่ผ่านมาตรฐาน IEEE std. 519-1992 [5] ดังแสดงในตารางที่ 1

5. บทสรุป

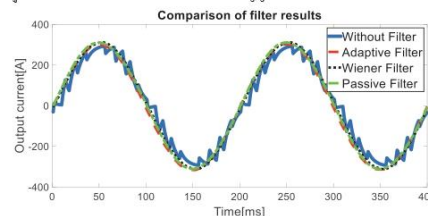
จากการทดลองการเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบยูนิโพลาร์ โดยต่อโหลดเป็น RL ซึ่งจะใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์ และแบบพาสซีฟในการลดฮาร์มอนิก ซึ่งให้ข้อสรุปได้ว่าตัวกรองทั้งสามแบบสามารถลดฮาร์มอนิกได้ถึง 50% โดยผลที่ได้ในแต่ละตัวกรองผ่านมาตรฐานฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ที่ว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดต้องน้อยกว่า 5% [5] และพบว่าตัวกรองแบบปรับค่าได้มีประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด แต่ควรคำนึงถึงอันดับตัวกรองและมีข้อจำกัดที่การหาค่าช่วงก้าวจำเป็นต้องมีค่าน้อย รองลงมาเป็นตัวกรองแบบวีเนอร์ควรคำนึงอันดับตัวกรองกับการหาฟังก์ชันสหสัมพันธ์และมีข้อจำกัดที่สัญญาณก่อนเข้าตัวกรองจะต้องเป็นสัญญาณที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และสุดท้ายเป็นตัวกรองแบบพาสซีฟควรคำนึงตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากนายวัชร ณะคีรีราเว ที่ให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ



รูปที่ 4 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของสัญญาณแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5 ผลเปรียบเทียบการกรองฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดของสัญญาณกระแส และแรงดัน[4]

รูปแบบการทดสอบการจำลอง	THD voltage (%)	THD current (%)	THD Standard (%)
ไม่ใส่ตัวกรอง	53.83	10.00	5
Adaptive Filter	1.07	1.01	5
Wiener Filter	1.14	1.39	5
Passive Filter	2.17	2.17	5

เอกสารอ้างอิง

[1] L. Alhafadhi, J. Asumadu, A. Alsafi, "Total harmonics distortion reduction using adaptive Wiener and Kalman filters", *IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCITC)*, pp. 1-8, 2017.

[2] เพ็ญภา ไพโรจน์อมรชัย;ชมพู สุขภาพ;สุรพงศ์ สุวรรณกวิน;วรวิทย์ เดียวพัฒนารัฐติกาล และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วณิชย์, "กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว : การหาสาเหตุความเสียหายของอินเวอร์เตอร์และการลดทอนกระแสฮาร์โมนิกระหว่างสายเคเบิล," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27*, ขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 315 – 317.

[3] Poularikas, Alexander D.; & Ramadan, Zayed M. ADAPTIVE FILTERING PRIMER with MATLAB. in *Taylor & Francis group*. Florida, FL, USA. 2006, sec. 3-7, pp. 19–130.

[4] P. Musznicki, J.-L. Schanen, P. Granjon, P. Chrzan, "The Wiener filter applied to EMI decomposition", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 3088-3093, 2008.

[5] T. M. Blooming, D. J. Camovale, "Application of IEEE Std. 519-1992 harmonic limits", *Pulp and Paper Industry Technical Conference 2006. Conference Record of Annual*, pp. 1-9, 2006.



อิมนอน หารอเม สำเร็จการศึกษา ว.ศ.บ. (ไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



กัภาพ วรดิษฐ์ สำเร็จการศึกษา ว.ศ.บ.(ไฟฟ้า) และ ว.ศ.ค.(ไฟฟ้า) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



วุดติพล ธาราธิ์เรณัฐ สำเร็จการศึกษา ว.ศ.บ. และ ว.ศ.ม. จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ Ph.D. จาก Polytechnic University of Turin ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอิมรอน หะรอแม
วัน เดือน ปี เกิด	24 สิงหาคม 2539
สถานที่เกิด	นราธิวาส
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(ไฟฟ้ากำลัง) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2563 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(ไฟฟ้ากำลัง) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	8 ถ.กำแพงบารู ต.บางนาค อ.เมือง จ.นราธิวาส 96000
ผลงานตีพิมพ์	อิมรอน หะรอแม กำพล วรดิษฐ์ และวุฒิพล ธาธาธีรเศรษฐ์ "การเปรียบเทียบการลดฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ แบบวีเนอร์และแบบพาสซีฟ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, หน้า 209-212, พฤศจิกายน 2562