



โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า  
การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

โดย

นายปิยะพงษ์ ไกรสร รหัสนักศึกษา B6328283

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ประจำปีการศึกษา 2566

## การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้เล่ม  
โครงการวิศวกรรมไฟฟ้าฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์)

ประธานกรรมการ

---

(รศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์)

ชื่อโครงการ	การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD
ผู้จัดทำ	นายปิยะพงษ์ ไกรสร รหัสนักศึกษา B6328283
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.กมล อารีรักษ์
ปีการศึกษา	2/2566

---

### บทคัดย่อ

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ เพราะสามารถทำให้เกิดความเสียหายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อไม่ทางด้านอุตสาหกรรมหรืออาคารพาณิชย์ โดยฮาร์มอนิกเกิดจากกระแสไหลผ่านโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้รูปคลื่นกระแสบิดเบี้ยว การกำจัดฮาร์มอนิกมีอยู่หนึ่งวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูง ประยุกต์ใช้ได้หลากหลายสถานการณ์ นั่นคือ การใช้ตัวกรองกำลังแอกทีฟ ที่จะฉีดกระแสชดเชยเข้าไปยังจุดต่อร่วม เพื่อหักล้างองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิก ยกเว้นอันดับที่ความถี่มูลฐาน วงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องใช้คู่กับการตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีหนึ่งในนั้น คือ วิธี SD ที่ใช้การคำนวณผ่านกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นหลัก สำหรับระบบที่ใช้ในการจำลองเป็นระบบไฟฟ้าจำหน่ายฝั่งผู้ใช้งาน โดยใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นแทนกลุ่มโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และใช้แหล่งกำเนิดกระแสชดเชยเป็นแบบอุดมคติ หลังจากฉีดกระแสชดเชยแล้วพบว่าผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจ กระแสที่แหล่งจ่ายมีความเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ และค่า %THD อยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

## Abstract

Eliminating harmonics in an electrical system is important because they can damage electrical equipment. It affects whether industrial or commercial buildings. Harmonics are caused by non-linear current flow through the load that drawing distortion of the current waveform. There is one highly efficient method of eliminating harmonics, and also, be applied in a variety of situations, that is an active power filter which have principle by to inject current into power system at PCC. The injected current cancels out the harmonic current except for the rank at the fundamental frequency. Active power filter must be used in conjunction with harmonics detection. There are several methods, one of which is the SD method which calculation is mainly based on average power. For the system used in the simulation, it is a user-side electrical distribution system. It uses a full-wave three-phase rectifier instead of a non-linear load group, and use the compensation current source as an ideal model. After injecting the compensation current, the results were found to be satisfactory. The current at the source is a pure sinusoidal signal and the %THD value is within the limits of IEEE Std. 519-2022.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินโครงการ จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมถึงแนะแนวทางในอนาคตอันเป็นประโยชน์แก่ผู้ทำโครงการมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ผู้ให้คำแนะนำในโครงการ และเสริมความรู้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ อาจารย์ที่เคยให้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการในด้านการปฏิบัติจริง

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมถึงองค์ความรู้ที่ท่านได้ถ่ายทอดทั้งในอดีตถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยห่วงใยให้ความรัก และกำลังใจเสมอมา

ปิยะพงษ์ ไกรษร

## สารบัญ

### หน้าที่

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD .....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ความหมายของฮาร์มอนิก.....	4
2.2 ลำดับเฟสฮาร์มอนิก (Harmonic phase sequences).....	5
2.3 นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ .....	6
2.2.1 ทริเพลอร์ฮาร์มอนิก (tripler harmonic).....	6
2.2.2 อินเตอร์ฮาร์มอนิก (interharmonic).....	6
2.2.3 คาแรคเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก (characteristic harmonic).....	6
2.2.4 นันคาแรคเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก (non-characteristic harmonic).....	6

2.4	ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (current distortion factor) .....	6
2.5	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	7
2.5.1	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากโหลดเชิงพาณิชย์ (commercial loads) .....	8
2.6	ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก .....	9
2.7	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ .....	10
2.8	วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD).....	12
2.9	การพิจารณาช่วงความถี่ตัดผ่านสำหรับวงจรกรองความถี่ .....	14
2.10	ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก .....	18
2.10.1	มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 .....	18
2.10.2	มาตรฐาน IEC 61000-3-2 .....	18
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	19
3.1	วิธีการวิจัย .....	19
3.1.1	แบบวงจรระบบไฟฟ้า .....	19
3.1.2	แหล่งจ่ายกระแสชดเชย.....	19
3.1.3	ขอบเขตการวัดฮาร์มอนิก .....	20
3.2	เครื่องมือที่ใช้ .....	20
3.2.1	บล็อกวงจรกรองความถี่ (analog filter design) .....	21
3.2.2	บล็อก Harmonic Detector SD method .....	24
3.2.3	บล็อกหน่วง (delay block) .....	25
3.2.4	แหล่งกำเนิดกระแสชดเชยอัตโนมัติ .....	26
3.2.5	power gui.....	27
3.2.6	การปรับตั้ง model setting.....	27
3.3	การเก็บข้อมูล .....	28
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปราย.....	29
4.1	ผลการวัดค่า .....	29

4.1.1 กำหนดค่าคงที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามการวิเคราะห์ที่ได้ของฟังก์ชัน FFT.....	31
4.1.2 กำหนดค่าคงที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยผ่านการวิเคราะห์ห้วงจร .....	32
4.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์.....	35
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	39
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	39
รายการอ้างอิง .....	40
ภาคผนวก.....	41
การเลือกความถี่ตัดผ่านและวงจรกรองความถี่ .....	41
การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม MATLAB....	46
บล็อกอื่น ๆ เพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลอง .....	50
ประวัติผู้ทำโครงการ .....	53



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม .....	3
ตารางที่ 2.1 ลำดับเฟสฮาร์มอนิก .....	6
ตารางที่ 2.2 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก .....	9
ตารางที่ 2.3 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก (ต่อ).....	10
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดความถี่ของกระแสสำหรับระบบพิกัด 120 V ถึง 69 kV.....	18
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 .....	18
ตารางที่ 4.1 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส A กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 .....	36
ตารางที่ 4.2 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส B กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 .....	36
ตารางที่ 4.3 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส B กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 (ต่อ).....	37
ตารางที่ 4.4 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส C กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022.....	37
ตารางที่ 4.4 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส C กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 (ต่อ).....	38
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2 .....	38

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 2.1 การเกิดฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	7
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลสำหรับอุปกรณ์อาร์ค (Mark F. McGranaghan, 2012).....	9
รูปที่ 2.3 การติดตั้งตัวกรองกำลังแอกทีฟ .....	11
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบ APF.....	12
รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD .....	14
รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน .....	17
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรการต่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นกับระบบไฟฟ้า .....	19
รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกการจำลองเพื่อทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD .....	20
รูปที่ 3.3 กระแสที่ไหลเข้าโหลดไม่เป็นเชิงเส้น .....	21
รูปที่ 3.4 กราฟสเปกตรัมแอมพลิจูดกระแสโหลด .....	21
รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบกราฟการตัดค่าปริมาณใด ๆ ระหว่างอุดมคติกับในทางปฏิบัติ .....	22
รูปที่ 3.6 กราฟจุดต่อจุดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	22
รูปที่ 3.7 กราฟจุดต่อจุดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน .....	23
รูปที่ 3.8 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ อันดับที่ 2.....	23
รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ของวงจรกรองความถี่ด้วย Analog filter design block.....	24
รูปที่ 3.10 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SD ส่วนที่1 .....	24
รูปที่ 3.11 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SD ส่วนที่2 .....	24
รูปที่ 3.12 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SD ส่วนที่3 .....	25
รูปที่ 3.13 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SD ส่วนที่4 .....	25
รูปที่ 3.14 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SD ส่วนที่5 .....	25
รูปที่ 3.15 พารามิเตอร์ของ delay block.....	26
รูปที่ 3.16 พารามิเตอร์ของ controlled current source .....	26
รูปที่ 3.17 พารามิเตอร์ sample time.....	27
รูปที่ 3.18 หน้าต่างการวิเคราะห์ FFT พร้อมแสดงการปรับตั้งพารามิเตอร์ .....	27
รูปที่ 3.19 model setting .....	28
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟส.....	29

รูปที่ 4.2	กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส A .....	30
รูปที่ 4.3	กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส B.....	30
รูปที่ 4.4	กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส C .....	31
รูปที่ 4.5	กราฟกระแสชดเชยคำนวณแต่ละเฟส ( $i_{ref}$ ) .....	31
รูปที่ 4.6	กราฟกระแสชดเชยจริงแต่ละเฟส ( $i_c$ ) .....	32
รูปที่ 4.7	แทนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้วยค่าคงที่.....	32
รูปที่ 4.8	กราฟสเปกตรัมกำลังไฟฟ้าแยกทีพีในโหมด DC component.....	32
รูปที่ 4.9	กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A เมื่อแทนค่าคงที่ตาม DC component.....	33
รูปที่ 4.10	วงจรสมมูลกรณีไดโอดหนึ่ง ๆ ทำงาน.....	33
รูปที่ 4.11	กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A เมื่อแทนค่าคงที่ตามการวิเคราะห์วงจรสมมูล	34
รูปที่ 4.12	กราฟกระแสหลังชดเชยแต่ละเฟส .....	34
รูปที่ 4.13	กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A .....	35
รูปที่ 4.14	กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส B .....	35
รูปที่ 4.15	กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส C .....	35

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

IGBT	insulated-gate bipolar transistor
THD	total harmonic distortion
TDD	total demand distortion
HVAC	heating ventilation and air conditioning หรือระบบปรับอากาศภายในอาคาร
PCC	point of common coupling หรือจุดต่อร่วม
APF	active power filter หรือวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
SD	synchronous detection หรือการตรวจจับแบบซิงโครนัส
HPF	high pass filter หรือวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
LPF	low pass filter หรือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

คำว่า ฮาร์มอนิก รู้จักกันในนาม “มลพิษ” ทางไฟฟ้า เรื่องราวโดยย่อของคุณเอ็ดเวิร์ด แอล. โอเวน (Edward L. Owen) ได้เล่าเรื่องราวประวัติศาสตร์ของฮาร์มอนิก (harmonic) ของระบบไฟฟ้า และได้ยกคำกล่าวของบุคคลในอดีตว่า “ฉันคิดว่าพวกเราเหล่าผู้ปฏิบัติงานด้านระบบไฟฟ้า ได้เห็นพ้องต้องกันว่า ฮาร์มอนิกเป็นเหมือนแขกเช่นเดียวกับเหล่าคนจน ฮาร์มอนิกจะอยู่กับพวกเราเสมอ หากสามารถกำจัดให้หมดสิ้นไปได้ พวกเราพร้อมยินดีที่จะทำเช่นนั้น” — เจ.บี. ฟิสเกน กล่าวเมื่อวันที่ 8 ก.ย. พ.ศ. 2459 (J.B. Fiske. Sept. 8, 1916) และพบว่าตั้งแต่ยุคแรกเริ่มที่มีการวางระบบไฟฟ้ากระแสสลับในสหรัฐอเมริกา ได้พบปัญหาที่แทรกซ้อนระหว่างเรโซแนนซ์ (resonance) ในสายส่งกับฮาร์มอนิก เพราะในสมัยนั้นยังมีการใช้ความถี่ที่สูงในระดับ 125 เฮิร์ตซ์ 133 เฮิร์ตซ์ หรือ 140 เฮิร์ตซ์ ในเวลาต่อมาคุณชไตน์เมตซ์ (Steinmetz) ได้เริ่มแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกอย่างจริงจังที่รัฐคอนเนตทิคัต เมืองฮาร์ตฟอร์ด (Hartford, Conn.) เป็นสาเหตุให้เจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric) หยุดความพยายามในการเพิ่มความถี่สูง ๆ จนกระทั่งได้มีการปรับลดระดับความถี่ลงมาเป็น 60 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากให้ขนาด 0.7 เพอร์เซ็นต์ ของขนาดกระแสฟัดที่สามารถส่งผลกระทบเล็กน้อยกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในทางแง่ลบ นอกจากนี้คุณเอ็ดเวิร์ด แอล. โอเวน ได้กล่าวถึงวรรณกรรมที่มีบทความเกี่ยวข้องกับแรงดันเกิน มีความสัมพันธ์กับการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation) ที่ใช้ขับอุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลัง (power semiconductor) เช่น IGBT ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเทียบเคียงได้กับปัญหาฮาร์มอนิกที่คุณชไตน์เมตซ์ได้พบเจอ แล้วในปัจจุบันอุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลังได้ถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อย ๆ (Edward L. Owen, 1998)

อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน นั้นหมายถึงปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย แหล่งพลังงานที่ใช้เดิมแบตเตอรี่ยานพาหนะไฟฟ้าอาจเป็นตู้ชาร์จตามสถานี หรือตู้ชาร์จที่พักอาศัย กล่าวคือ ภายในตู้ชาร์จมีส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือชุดอุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลัง เช่น อินเวอร์เตอร์ (inverter) เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าแห่งประเทศไทยไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่งเข้าสู่ตัวแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle) จึงเป็นหนึ่งในกลุ่มโหลดของการเกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีโหลดอีกมากมายที่ทำให้เกิดมลพิษ เนื่องจากการพัฒนาศักยภาพให้ได้ตามความต้องการของผู้บริโภค มีจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามประชากรของมนุษย์ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (electrical ballast) หม้อแปลงไฟฟ้า หลอดปล่อยประจุในก๊าซ

ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น โดยโหลดที่กล่าวมามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) ซึ่งส่งผลกระทบต่อในแง่ลบ เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ที่อาจอยู่ในรูปของความร้อน ณ จุดต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า อีกทั้งอายุการใช้งานของอุปกรณ์เสื่อมสภาพเร็วขึ้น ในด้านการเงินโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก อาจทำให้ถูกปรับค่าใช้จ่ายเนื่องจากค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ (power factor) ไม่ตรงตามกฎหมาย ส่วนทางด้านเทคโนโลยีพลังงานสะอาด เช่น ระบบโซลาร์เซลล์ (photovoltaic systems) ได้รับความสนใจ และเป็นที่ยอมรับตั้งแต่ระดับโรงงานอุตสาหกรรมไปจนถึงบ้านพักที่อยู่อาศัย ซึ่งระบบโซลาร์เซลล์มีองค์ประกอบของวงคอนเวอร์เตอร์ (converter) ที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้

ด้วยเหตุนี้ในการกำจัดฮาร์มอนิกจึงมีความสำคัญ ซึ่งจัดให้อยู่ในปัญหาด้านคุณภาพของระบบไฟฟ้า (power quality) โดยมีวิธีการกำจัดได้หลากหลายทางเลือก ดังเช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (passive power filter) การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (hybrid power filter) (Lin, Yang, and Tsai, 2002) และการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (active power filter) ล้วนแล้วเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยชุดตัวกรองกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยการตรวจจับกระแสด้วยวิธี SD

1.2.2 ออกแบบตัวกรองความถี่เพื่อกรองกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยให้ได้ THD ตามมาตรฐานที่กำหนด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การวิเคราะห์ และแก้ปัญหาฮาร์มอนิก มุ่งเน้นที่การปรับแก้กระแสฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นด้วยไดโอด (Three phase full diode wave rectifier) ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

1.3.2 ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

1.3.3 ใช้มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 และ IEC 61000-3-2

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานจนถึงปัจจุบันได้ทำการศึกษาทฤษฎีอัลกอริทึมของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งส่วนระบบไฟฟ้า และชุดกรองกำลังแอกทีฟ จากนั้นจำลองสถานการณ์เพื่อทราบข้อมูลก่อน และหลังการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ครั้งที่ 1 แล้วนำข้อมูลที่ได้ ไปใช้ในการปรับปรุงชุดกรองกำลังแอกทีฟโดยมุ่งเน้นที่การหาค่าความถี่ตัด

ผ่านภายในอัลกอริทึม SD ให้เหมาะสมที่สุด อาศัยการคำนวณทางทฤษฎีเทียบกับผลการจำลอง สรุปแผนการดำเนินการได้ดังตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม

แผนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2565			ปีการศึกษา 2566
	เทอม 1	เทอม 2	เทอม 3	เทอม 2
1. กำหนดหัวข้อโครงการ	/			
2. ฟังบรรยายความรู้และทฤษฎีเบื้องต้น	/			
3. ศึกษาทฤษฎีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SD	/			
4. สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า		/		
5. สร้างแบบจำลองชุดกรองกำลังแอกทีฟ		/		
6. จำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกครั้งที่ 1		/		
7. ออกแบบความถี่ตัดของตัวกรองให้เหมาะสม		/		
8. จำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกครั้งที่ 2			/	
9. สรุปผลการทดลองและนำเสนอ				/

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ที่มีประสิทธิภาพ สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส

1.5.2 ได้แบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 512-2022

## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายของฮาร์มอนิก

ความหมายของฮาร์มอนิก คือ จำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ซึ่งในระบบไฟฟ้าแห่งประเทศไทยใช้ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ หากยกตัวอย่างฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 5 และ 7 จะได้ความถี่เท่ากับ 150 เฮิร์ตซ์ 250 เฮิร์ตซ์ และ 350 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ เป็นต้น และภายในระบบไฟฟ้าจะต้องมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 เพียงอันดับเดียวซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับความถี่มูลฐาน การมีฮาร์มอนิกหลาย ๆ อันดับมารวมกัน จะทำให้รูปสัญญาณกระแสมีความผิดเพี้ยน ซึ่งการระบุอันดับฮาร์มอนิกของรูปสัญญาณกระแสหนึ่ง ๆ นั้นอาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์เรื่องอนุกรมฟูริเยร์ (fourier series) จึงนำมาประยุกต์ใช้ได้ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2-1) ดังนี้

$$i(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2-1)$$

ซึ่ง  $i(t)$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เขียนให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมฟูริเยร์

โดยสัมประสิทธิ์  $\omega_0, A_0, A_h$  และ  $B_h$  ของอนุกรมฟูริเยร์อธิบายได้ดังนี้

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad A_h = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(h\omega_0 t) dt$$

$$\text{และ } B_h = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(h\omega_0 t) dt$$

ในสมการที่ (2-1)

$A_0$  คือ องค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง

$h$  คือ อันดับของฮาร์มอนิก

$f_0$  คือ ความถี่มูลฐาน (เฮิร์ตซ์)

$T$  คือ คาบของสัญญาณ (วินาที)

ปรับรูปสมการที่ (2-1) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (2-2)

$$i(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2-2)$$



โดยที่

$$I_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (2-3)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{A_h}{B_h} \right) \quad (2-4)$$

ในสมการที่ (2-2) ถึงสมการที่ (2-4)

$I_h$  คือ ขนาดกระแสสูงสุดของฮาร์มอนิกที่อันดับ  $h$

$\phi_h$  คือ มุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับ  $h$

อย่างไรก็ตามการคำนวณด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ตามเวลาจริงนั้นอาจเป็นไปได้อย่างยากลำบาก มีความล่าช้า ถึงแม้การคำนวณด้วยโค้ดคอมพิวเตอร์ (computer code) กล่าวคือวิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete fourier transform) คำย่อคือ DFT จำเป็นต้องมีหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการคำนวณด้วยการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (fast fourier transform) คำย่อคือ FFT มาช่วยในการโค้ดทดแทนเพื่อให้สามารถแยกความถี่ของสัญญาณได้อย่างรวดเร็ว และใช้หน่วยประมวลผลต่ำกว่าได้ ซึ่งถูกนำเสนอแนวคิดนี้โดย เจ.ดับเบิลยู. คูลีย์ (J.W. Cooley) กับ เจ.ดับเบิลยู. ทูคีย์ (J.W. Tukey) (Edward L. Owen, 1998)

## 2.2 ลำดับเฟสฮาร์มอนิก (Harmonic phase sequences)

ระบบไฟฟ้าที่มีความสมดุลเฟสไม่ว่ากระแสหรือแรงดัน จะมีลำดับเฟสบวก (positive sequence) ของเฟส A-B-C ที่ระยะห่างมุมเท่ากับ 120 องศา (เช่น  $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$ ) เช่นเดียวกับลำดับเฟสลบ (negative sequence) A-C-B (เช่น  $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ ) ส่วนลำดับเฟสศูนย์ (zero sequence) นั้นจะมีมุมเท่ากับศูนย์ทุกเฟส A B และ C หากระบบไฟฟ้าสมดุลนี้มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นจะสามารถจัดกลุ่มอันดับฮาร์มอนิกได้โดยการนำค่าอันดับคูณกับมุมเฟสของลำดับเฟสบวก เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ได้  $2 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$  มีค่าเท่ากับ  $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$  จะเห็นว่าเป็นลำดับมุมเฟสที่เหมือนกับลำดับเฟสลบ ดังนั้นจึงจัดกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีลำดับลบ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ได้  $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$  มีค่าเท่ากับ  $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$  จะเห็นว่าเป็นลำดับมุมเฟสที่เหมือนกับลำดับเฟสศูนย์ ดังนั้นจึงจัดกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เป็นกลุ่มที่มีลำดับศูนย์ และฮาร์มอนิกอันดับที่ 4 ได้  $4 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$  มีค่าเท่ากับ  $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$  จะเห็นว่าเป็นลำดับมุมเฟสที่เหมือนกับลำดับเฟสบวก ดังนั้นจึงจัดกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับที่ 4 เป็นกลุ่มที่มีลำดับบวก แสดงลำดับเฟสต่ออันดับของฮาร์มอนิกคร่าว ๆ ดังตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 ลำดับเฟสฮาร์โมนิก

ลำดับเฟส	ฮาร์โมนิกอันดับที่
บวก $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$	1, 4, 7, 10, ...
ลบ $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$	2, 5, 8, 11, ...
ศูนย์ $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$	3, 6, 9, 12, ...

## 2.3 นิยามของฮาร์โมนิกแบบต่าง ๆ

2.2.1 ทริเพลอร์ฮาร์โมนิก (tripler harmonic) คือ ฮาร์โมนิกที่อันดับหารด้วย 3 แล้วลงตัว เช่น ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 6, 9, ... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับศูนย์ หากปรากฏอยู่ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย และเป็นระบบต่อลงดิน จะทำให้มีกระแสไหลผ่านในสายนิวทรัล เนื่องจากเกิดการอินเฟส (in-phase) กันทั้งสามเฟส

2.2.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิก (interharmonic) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

2.2.3 คาแรคเตอริสติกฮาร์โมนิก (characteristic harmonic) คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอนเวอร์เตอร์ ใช้อุปกรณ์สวิตช์สารกึ่งตัวนำกำลัง มีอันดับของฮาร์โมนิกเป็นไปตามสมการที่ (2-5)

$$h = kp \pm 1 \quad (2-5)$$

โดยที่  $h$  = อันดับของฮาร์โมนิก

$k$  = เลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

$p$  = จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์

2.2.4 นันคาแรคเตอริสติกฮาร์โมนิก (non-characteristic harmonic) คือ ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง มีอันดับของฮาร์โมนิกเป็นไปตามสมการที่ (2-5)

## 2.4 ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (current distortion factor)

ปริมาณหนึ่งใช้บ่งบอกถึงความเพี้ยนของสัญญาณได้เป็นอย่างดี คือ THD ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-6) (IEEE Std. 519-2022)

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2-6)$$

จากสมการที่ (2-6)

$I_1$  คือ กระแสสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน

$I_h$  คือ กระแสสูงสุดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่  $h$

$I_{rms}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอส

$I_{1,rms}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน

ในหลาย ๆ ครั้ง THD อาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดได้ หากกระแสที่ไหลมีค่าน้อยแต่กลับให้ THD ที่มีค่าสูง ในความเป็นจริงแล้วไม่ได้ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากนัก จึงควรใช้ค่าตัวประกอบ TDD ตามสมการที่ (2-7) (IEEE Std. 519-2022) ประกอบการพิจารณา

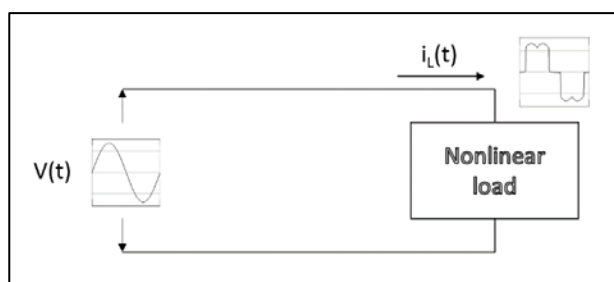
$$TDD = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2-7)$$

จากสมการที่ (2-7)

$I_L$  คือ กระแสสูงสุดของความต้องการกระแสที่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่พิจารณา

## 2.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้นมักมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยกระแสที่ไหลผ่านโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะที่บิดเบี้ยวแต่ยังคงมีความเป็นสัญญาณรายคาบ ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีลักษณะที่บิดเบี้ยวตามไปด้วย ซึ่งอาจแสดงได้จากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแบ่งกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ 2 กลุ่มหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากโหลดเชิงพาณิชย์ (commercial loads) เช่น โรงพยาบาล อาคารที่พักอาศัย ห้างสรรพสินค้า หรือ ศูนย์กลางแหล่งข้อมูลอินเทอร์เน็ต (internet data centers) มักประกอบไปด้วยโหลดเหล่านี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟส (single-phase power supplies)

โหลดชนิดนี้โดดเด่นในเรื่องกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่มีค่าสูงและจัดว่าเป็นทริเพิลฮาร์โมนิก ซึ่งส่งผลให้มีกระแสไหลในสายนิวทรัลได้แล้วนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง (Mark F. McGranaghan, 2012)

หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp)

เป็นโหลดที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวัน พบเห็นได้ทั่วไป โดยเฉพาะในอาคารเชิงพาณิชย์ ส่วนที่ทำให้เกิดความบิดเบี้ยวของกระแส คือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เป็นสำคัญ (Srianthumrong, 2013)

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ (adjustable-speed drives)

มักถูกใช้ในระบบปรับอากาศภายในอาคาร รู้จักกันในนาม HVAC และลิฟท์ ซึ่งอุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วยวงจรถอนเวอร์เตอร์ (Mark F. McGranaghan, 2012)

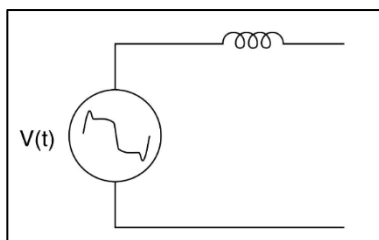
2.5.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากโหลดเชิงอุตสาหกรรม (industrial loads) เช่น โรงหลอมโลหะ โรงงานผลิตรถยนต์ เป็นต้น

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์

เครื่องจักรที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยบ่อยครั้งที่ใช้คู่กับตัวปรับระดับความเร็ว และด้วยภาระโหลดที่มากกว่าโหลดเชิงพาณิชย์ การใช้ไฟฟ้าจากระบบจึงถูกใช้ร่วมกันทั้งสามเฟส อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์อยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ ซึ่งโหลดกลุ่มนี้ทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์อาร์ค (arcing devices)

ในหมวดหมู่นี้จะรวมไปถึงเตาหลอมไฟฟ้า (arc furnaces) เครื่องเชื่อมด้วยลวดโลหะ (arc welders) และอุปกรณ์ให้แสงสว่างประเภทดิสชาร์จด้วยบัลลาสต์แม่เหล็ก (discharge-type lighting with magnetic ballasts) วงจรสมมูลที่ใช้อธิบายอุปกรณ์อาร์คเป็นดังรูปที่ 2.2 โดยวงจรถูกประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ คือ แคลมป์แรงดัน (voltage clamp) ต่ออนุกรมกับรีแอกแตนซ์ (reactance) ซึ่งใช้จำกัดกระแสด้วยเหตุผลบางอย่าง (Mark F. McGranaghan, 2012) สำหรับเตาหลอมไฟฟ้าจะให้สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ (IEEE Std. 519-2022) อีกทั้งยังสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลสำหรับอุปกรณ์อาร์ค (Mark F. McGranaghan, 2012)

มีอันดับทั้งเป็นจำนวนเต็ม และไม่เต็ม โดยเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะพบได้มาก (Kongpol, 2006)

อุปกรณ์อิ่มตัว (saturable device)

หากหม้อแปลง และอุปกรณ์ที่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้ากับแกนเหล็กรวมไปถึงมอเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ (Mark F. McGranaghan, 2012)

คอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่พบส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ชนิดหกพัลส์ (6-pulse converter) และคอนเวอร์เตอร์ชนิดสิบสองพัลส์ (12-pulse converter) โดยคอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้งสามเฟสซึ่งให้ความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับคอนเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส คือ การไม่ผลิตฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 (Mark F. McGranaghan, 2012)

## 2.6 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก

หนึ่งจุดผู้ใช้งานระบบไฟฟ้าอาจมีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นหลาย ๆ จุด ในบางครั้งโหลดเหล่านี้ อาจผลิตกระแสฮาร์มอนิกมาหักล้างกัน แต่อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ยากที่จะหักล้างกันจนหมด ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงผลเสียที่จะเกิดขึ้น เมื่อเกิดฮาร์มอนิกภายในระบบ ซึ่งเปรียบเสมือนตั้งมลพิษของระบบไฟฟ้า โดยตารางที่ 2.2 แสดงผลกระทบ ณ จุดต่าง ๆ พร้อมทั้งอธิบายถึงความเป็นไปได้โดยสังเขป

ตารางที่ 2.2 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก

ที่ตำแหน่ง	ผลกระทบ
มอเตอร์	เกิดความร้อนสูง สร้างเสียงรบกวน เสื่อมสภาพเร็วขึ้น เดินเครื่องกระตุก (Arrillaga and Watson, 2003) และเพิ่มระดับความเร็วได้ช้า (IEEE Std. 519-2022)

ตารางที่ 2.3 ผลเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก (ต่อ)

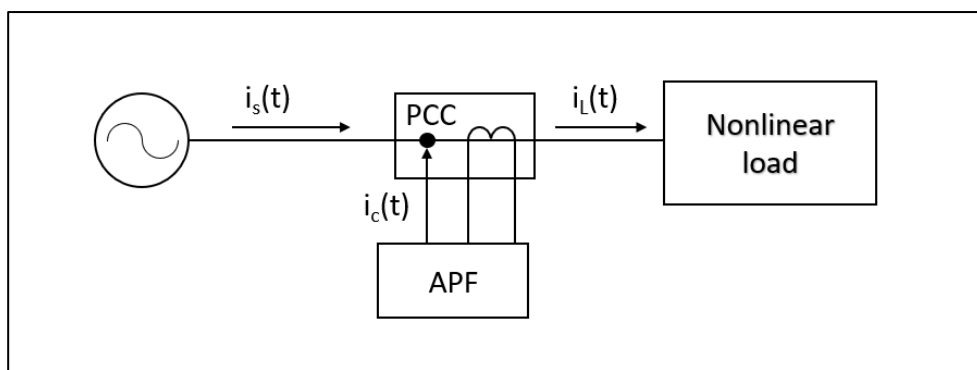
ที่ตำแหน่ง	ผลกระทบ
หม้อแปลงไฟฟ้า	เกิดความร้อนสูง มีเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดในหม้อแปลง และตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้า (George, 2001)
สายเคเบิล	เกิดความร้อนนำไปสู่ความเสียหายของฉนวนและความต้านทานสายส่งสูงมากขึ้น (IEEE Std. 519-2022)
ตัวเก็บประจุ	ความร้อนสูงขึ้น และค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป (George, 2001)
เครื่องมือวัด	เกิดความคลาดเคลื่อนในการบันทึกค่า (Elham, Clarence, and Adly, 1992)
อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เช่น รีเลย์ (relay) หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (circuit breaker)	ความถูกต้องแม่นยำลดลง (Ho, and Liu, 2001)
ฟิวส์	ความร้อนสูงขึ้นทำให้ขดลวดหลอมละลายก่อนเกิดการผิพร้อง (Kongpol, 2006)
ระบบสื่อสาร	เกิดการรบกวนสัญญาณ และลดคุณภาพของสัญญาณ (Kongpol, 2006)
หลอดไฟฟ้า	ลดอายุการใช้งาน และหลอดไฟกระพริบ
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	การรับสัญญาณพัลส์ข้อมูลผิดพลาด เกิดแรงดันต่ำหรือแรงดันเกิน และหน้าจอกะพริบ

## 2.7 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

ปัจจุบันมีวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่หลากหลาย ดังเช่นตัวกรองกำลังพาสซีฟ มีข้อดีที่ออกแบบง่าย และใช้ต้นทุนต่ำ แต่ด้วยข้อเสียที่มีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของวงจรกรองขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ (impedance) ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงโหลด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองฮาร์มอนิกลดลง นอกจากนี้อาจเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบได้ (Cheng, Bhattacharya and Divan, 1996) อีกวิธีในการกำจัดฮาร์มอนิก คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซก (zigzag transformers) สามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูง และอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเฟสศูนย์ ส่งผลให้เกิดการโอเวอร์โวลต ณ จุดนิวทรัลได้

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบชุกแซกควรรติดตั้งใกล้กับตำแหน่งผู้ใช้ไฟเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี (Mark F. McGranaghan, 2012)

อย่างไรก็ตาม วิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูง ไม่ขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายรวมไปถึงไม่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ของระบบ สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายสถานการณ์ อีกทั้งยังสามารถระบุอันดับฮาร์มอนิกได้มากกว่าหนึ่งอันดับในคราวเดียวและเพียงชุดอุปกรณ์เดียวเท่านั้น วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกนี้ คือ ตัวกรองกำลังแอกทีฟ (Mark F. McGranaghan, 2012) โดยแผนภาพอย่างง่ายสำหรับการติดตั้งตัวกรองกำลังแอกทีฟบนระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่ง ณ จุด PCC จะประกอบไปด้วยกระแสไหลเข้าและไหลออกจึงนำมาเขียนเป็นสมการที่ (2-8)



รูปที่ 2.3 การติดตั้งตัวกรองกำลังแอกทีฟ

$$i_s(t) = i_L(t) - i_c(t) \quad (2-8)$$

ในสมการที่ (2-8)

$i_s(t)$  คือ กระแสที่แหล่งจ่าย

$i_L(t)$  คือ กระแสที่ไหลผ่านโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

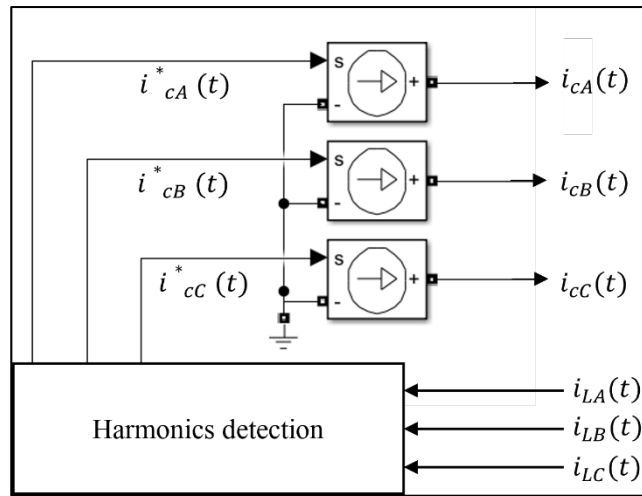
$i_c(t)$  คือ กระแสชดเชยจริง

โดยที่  $i_c(t)$  ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีในการตรวจจับ ดังเช่นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการตรวจจับ SD และในส่วน  $i_L(t)$  ได้จากการวัดค่า

จากรูปที่ 2.3 ภายในบล็อก APF จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ดังรูปที่ 2.4 ได้แก่

1. ชุดแหล่งจ่ายกระแส เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดกระแสชดเชย เป็นส่วนที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติในการฉีดกระแสชดเชยจริง ตรงกับกระแสชดเชยที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

2. ส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonics detection) เพื่อบอกปริมาณค่ากระแสชดเชยที่ควรฉีดเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมปริมาณการฉีดกระแสจากแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบ APF

## 2.8 วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (วิธี SD)

จากสมการที่ (2-8) หากนำมาเขียนในเทอมของ  $i_c(t)$  พร้อมเปลี่ยนเป็นค่า  $i_c^*(t)$  และแทนค่า  $i_s(t)$  ด้วยค่า  $i_m(t)$  จะได้สมการที่ (2-9)

$$i_c^*(t) = i_L(t) - i_m(t) \quad (2-9)$$

ในสมการที่ (2-9)

$i_c^*(t)$  คือ กระแสชดเชยคำนวณ

$i_m(t)$  คือ กระแสที่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน

โดยที่  $i_m(t)$  ได้จากการคำนวณในแต่ละเฟส ตามสมการที่ (2-10) ถึง สมการที่ (2-12)

$$i_{mA}(t) = \frac{2e_A(t)P_A}{E_A^2} \quad (2-10)$$

$$i_{mB}(t) = \frac{2e_B(t)P_B}{E_B^2} \quad (2-11)$$

$$i_{mC}(t) = \frac{2e_C(t)P_C}{E_C^2} \quad (2-12)$$



ซึ่ง  $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$  และ  $e_C(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่เวลา  $t$  ใด ๆ ส่วน  $E_A$ ,  $E_B$  และ  $E_C$  คือ ค่ายอดแรงดันในแต่ละเฟสเช่นกัน ลำดับถัดมา  $P_A$ ,  $P_B$  และ  $P_C$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟในแต่ละเฟสโดยมีการคำนวณเป็นไปดังสมการที่ (2-13) ถึง สมการที่ (2-15)

$$P_A = \frac{P_{dc}E_A}{E_{tot}} \quad (2-13)$$

$$P_B = \frac{P_{dc}E_B}{E_{tot}} \quad (2-14)$$

$$P_C = \frac{P_{dc}E_C}{E_{tot}} \quad (2-15)$$

จากสมการที่ (2.13) ถึงสมการที่ (2.15) สามารถคำนวณค่า  $E_{tot}$  ได้จากสมการที่ (2-16) ส่วนค่า  $P_{dc}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

$$E_{tot} = E_A + E_B + E_C \quad (2-16)$$

สมมติให้กระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสอยู่ในสภาพสมดุลหลังฉีดกระแสชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังสมการที่ (2-20) เมื่อ  $I_{mA}$ ,  $I_{mB}$  และ  $I_{mC}$  คือ ค่ากระแสยอดในแต่ละเฟส

$$i_{mA}(t) = I_{mA} \sin(\omega t + \phi) \quad (2-17)$$

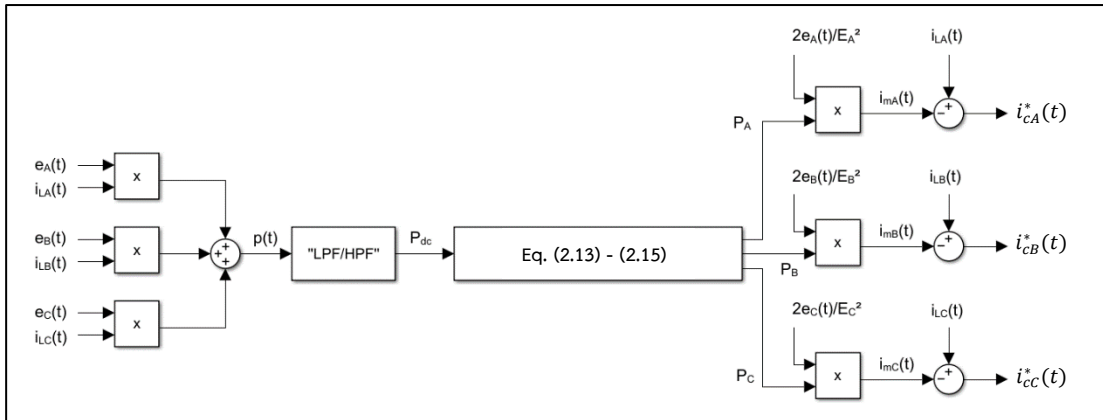
$$i_{mB}(t) = I_{mB} \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \quad (2-18)$$

$$i_{mC}(t) = I_{mC} \sin(\omega t + \phi - 240^\circ) \quad (2-19)$$

$$I_{mA} = I_{mB} = I_{mC} \quad (2-20)$$

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD จะอาศัยค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ( $P_{dc}$ ) ซึ่งได้จากค่ากำลังไฟฟ้าขณะใด ๆ ( $p(t)$ ) ของโหลดที่เกิดจากการคูณกันระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดกับค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส นำค่ากำลังไฟฟ้างกล่าวไปผ่านวงจรกรองความถี่ที่เป็นไปได้ทั้งวงจรกรองความถี่ต่ำ

ผ่าน (low pass filter) และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter) สุดท้ายเมื่อนำการคำนวณข้างต้นมาสร้างแผนภาพกระบวนการจะได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD

## 2.9 การพิจารณาช่วงความถี่ตัดผ่านสำหรับวงจรกรองความถี่

กรณีที่ระบบไฟฟ้าปราศจากฮาร์มอนิกอันดับอื่น ๆ นอกจากอันดับที่ 1 ทั้งค่าแรงดันและกระแส จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นดังสมการที่ (2-21)

$$P_{dc} = \frac{3E_A I_A}{2} = \frac{3E_B I_B}{2} = \frac{3E_C I_C}{2} \quad (2-21)$$

ซึ่ง  $I_A, I_B$  และ  $I_C$  คือ ค่ายอดของกระแส และมีค่าเท่ากันเมื่อระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะสมดุล

กรณีที่ระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกมากกว่าหนึ่งอันดับ จะทำให้รูปสมการของ  $P_{dc}$  เปลี่ยนไป หากพิจารณาเพียงกระแสมีฮาร์มอนิก ไม่มีการเลื่อนของเฟสเพิ่มเติมและคงสภาวะสมดุลของระบบ กล่าวคือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่จะมีความสัมพันธ์กับลำดับเฟสฮาร์มอนิก จะนำไปสู่การพิสูจน์สมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกจนสุดท้ายได้สมการที่ (2-22) ถึงสมการที่ (2-24) มีความเกี่ยวข้องกับลำดับเฟสบวก ลำดับเฟสลบ และลำดับเฟสศูนย์ ตามลำดับ กำหนดให้ค่า  $i_A(t)$   $i_B(t)$  และ  $i_C(t)$  เป็นดังนี้

$$i_A(t) = I_{1A} \sin(\omega_0 t + \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hA} \sin(h\omega_0 t + \phi_h)$$

$$i_B(t) = I_{1B} \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 120^\circ) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hB} \sin(h\omega_0 t + \phi_h - 120^\circ h)$$

$$i_C(t) = I_{1C} \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 240^\circ) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hC} \sin(h\omega_0 t + \phi_h - 240^\circ h)$$

โดย  $I_{1A} = I_{1B} = I_{1C}$

กำหนดให้ค่า  $v_A(t)$   $v_B(t)$  และ  $v_C(t)$  เป็นดังนี้

$$v_A(t) = V_{1A} \sin(\omega_0 t + \phi_1)$$

$$v_B(t) = V_{1B} \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 120^\circ)$$

$$v_C(t) = V_{1C} \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 240^\circ)$$

โดย  $V_{1A} = V_{1B} = V_{1C}$

สมการกำลังไฟฟ้าแยกที่พหุนามใด ๆ เป็นดังนี้

$$p(t) = i_A(t)v_A(t) + i_B(t)v_B(t) + i_C(t)v_C(t)$$

$$p(t) = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} + V_{1A} \sum_{h=2}^{\infty} (I_{hA} \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \sin(\omega_0 t + \phi_1) \\ + I_{hB} \sin(h\omega_0 t + \phi_h - 120^\circ h) \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 120^\circ) \\ + I_{hC} \sin(h\omega_0 t + \phi_h - 240^\circ h) \sin(\omega_0 t + \phi_1 - 240^\circ))$$

ระบบไฟฟ้าอยู่ในสถานะสมดุลสามเฟสจะกำหนดให้ว่า  $\phi_h$  และ  $\phi_1$  มีค่าเท่ากับศูนย์ พร้อมให้  $x = \omega_0 t$  จะได้ว่า

$$p(t) = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} + V_{1A} \sum_{h=2}^{\infty} (I_{hA} (\sin(hx) \sin(x)) \\ + I_{hB} (\sin(hx - 120^\circ h) \sin(x - 120^\circ)) \\ + I_{hC} (\sin(hx - 240^\circ h) \sin(x - 240^\circ)))$$

กำหนดให้  $p_{hB}(t) = \sin(hx - 120^\circ h) \sin(x - 120^\circ)$  และ  $p_{hC}(t) = \sin(hx - 240^\circ h) \sin(x - 240^\circ)$  นำไปแทนค่าได้

$$\begin{aligned}
p_{hB}(t) &= \sin(hx - 120^\circ h) \sin(x - 120^\circ) \\
&= (\sin(hx) \cos(120^\circ h) - \sin(120^\circ h) \cos(hx)) (\sin(x) \cos(120^\circ) \\
&\quad - \sin(120^\circ) \cos(x)) \\
&= (\sin(hx) \cos(120^\circ h) - \sin(120^\circ h) \cos(hx)) \left( \frac{-\sin(x)}{2} - \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_{hC}(t) &= \sin(hx - 240^\circ h) \sin(x - 240^\circ) = (\sin(hx) \cos(240^\circ h) \\
&\quad - \sin(240^\circ h) \cos(hx)) (\sin(x) \cos(240^\circ) - \sin(240^\circ) \cos(x)) \\
&= (\sin(hx) \cos(240^\circ h) - \sin(240^\circ h) \cos(hx)) \left( \frac{-\sin(x)}{2} + \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right) \\
&= (\sin(hx) \cos(120^\circ h) + \sin(120^\circ h) \cos(hx)) \left( \frac{-\sin(x)}{2} + \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right)
\end{aligned}$$

สมมติให้ค่ายอดของกระแสฮาร์มอนิกทุกเฟสในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากัน จากนั้นนำค่า  $p_{hB}(t)$  และ  $p_{hC}(t)$  แทนลงในสมการ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
p(t) &= \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} + V_{1A} \sum_{h=2}^{\infty} I_{hA} \left( (\sin(hx) \sin(x)) \right. \\
&\quad + (\sin(hx) \cos(120^\circ h) - \sin(120^\circ h) \cos(hx)) \left( \frac{-\sin(x)}{2} - \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right) \\
&\quad \left. + (\sin(hx) \cos(120^\circ h) + \sin(120^\circ h) \cos(hx)) \left( \frac{-\sin(x)}{2} + \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right) \right) \\
p(t) &= \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} + V_{1A} \sum_{h=2}^{\infty} I_{hA} \left( (\sin(hx) \sin(x)) \right. \\
&\quad \left. + 2 \sin(hx) \cos(120^\circ h) \left( \frac{-\sin(x)}{2} \right) + 2 \sin(120^\circ h) \cos(hx) \left( \frac{\sqrt{3} \cos(x)}{2} \right) \right) \\
&= \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} \\
&\quad + V_{1A} \sum_{h=2}^{\infty} I_{hA} \left( (1 - \cos(120^\circ h)) (\sin(hx) \sin(x)) \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{3} \sin(120^\circ h) \cos(hx) \cos(x) \right)
\end{aligned}$$

หากแทนค่า  $h = 4, 7, 10, \dots$  จะได้เป็นสมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟตามสมการที่ (2-22)

$$p(t) = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} + \frac{3V_{1A}}{2} \left( \sum_{h=4,7,10,\dots}^{\infty} I_{hA} (\cos((h-1)\omega_0 t)) \right) \quad (2-22)$$

หากแทนค่า  $h = 2, 5, 8, \dots$  จะได้เป็นสมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟตามสมการที่ (2-23)

$$p(t) = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} - \frac{3V_{1A}}{2} \left( \sum_{h=2,5,8,\dots}^{\infty} I_{hA}(\cos((h+1)\omega_0 t)) \right) \quad (2-23)$$

หากแทนค่า  $h = 3, 6, 9, \dots$  จะได้เป็นสมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟตามสมการที่ (2-24)

$$p(t) = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} \text{ เมื่อ } h = 3, 6, 9, \dots \quad (2-24)$$

จากสมการที่ (2-22) ถึงสมการที่ (2-24)

$p(t)$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะใด ๆ

$I_{1A}$  คือ ค่ายอดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 หรือที่ความถี่มูลฐานสำหรับเฟส A

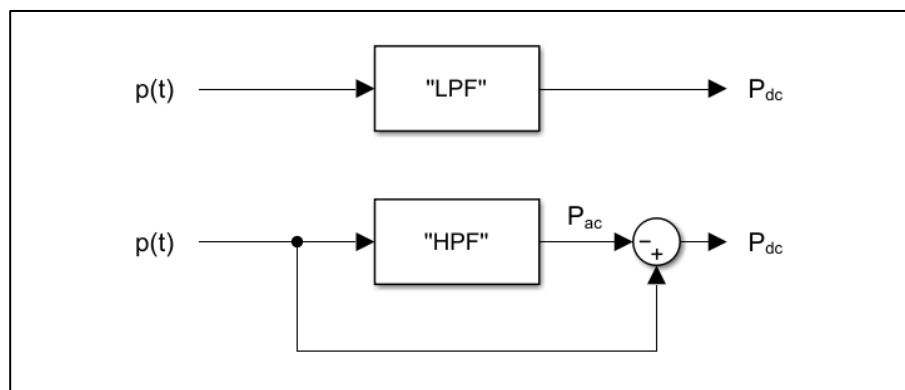
$V_{1A}$  คือ ค่ายอดแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 หรือที่ความถี่มูลฐานสำหรับเฟส A

$I_{hA}$  คือ ค่ายอดกระแสฮาร์โมนิกอันดับใด ๆ ยกเว้นอันดับที่ 1 สำหรับเฟส A

โดยที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในเฟส A จะมีค่าเท่ากับกับเฟส B และ C ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยยังเป็นไปตามสมการที่ (2-25) ซึ่งปรากฏในทุกสมการที่ (2-22) ถึงสมการที่ (2-24)

$$P_{dc} = \frac{3I_{1A}V_{1A}}{2} \quad (2-25)$$

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยไม่ได้อยู่ในรูปของความถี่ใด ๆ ซึ่งจะปรากฏแท่งสเปกตรัม ณ ตำแหน่ง 0 เฮิร์ตซ์ และการมีอยู่ของแท่งสเปกตรัมอื่น ๆ เกิดจากผลกระทบของกระแสฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับ แผนภาพบล็อกทั้งกรณีที่ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

## 2.10 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

### 2.10.1 มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

การกำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกของมาตรฐานนี้จำแนกตามระดับแรงดันที่ผู้ใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้นติดตั้งอยู่ สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (distribution system) ไปจนถึงระบบผู้ใช้งาน (utilization system) ควรใช้การจำกัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังตารางที่ 2.3

### ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดความเพี้ยนของกระแสสำหรับระบบพิกัด 120 V ถึง 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order <sup>b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	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

<sup>a</sup>For  $h \leq 6$ , even harmonics are limited to 50% of the harmonic limits shown in the table.  
<sup>b</sup>Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.  
<sup>c</sup>Power generation facilities are limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$  unless covered by other standards with applicable scope.  
 where:  
 $I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC  
 $I_L$  = maximum demand load current at PCC under normal load operating conditions

### 2.10.2 มาตรฐาน IEC 61000-3-2

เป็นอีกกรอบมาตรฐานเพื่อจำกัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละอันดับดังตารางที่ 2.4

### ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2

h	3	5	7	9	11	13	15-39
Max, $I_h$ , A	2.3	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15-15/h
Equipment input current $\leq 16$ A per phase							

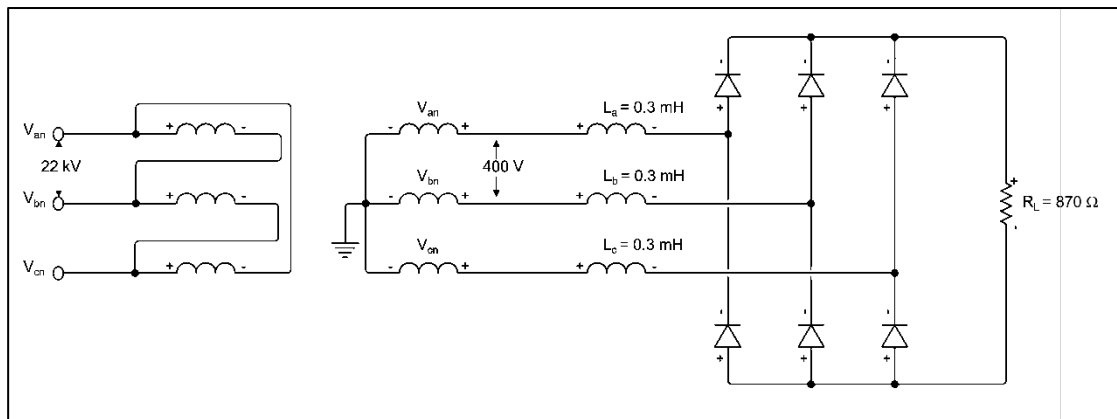
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีการวิจัย

##### 3.1.1 แบบวงจรระบบไฟฟ้า

กลุ่มโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นมักอยู่ใกล้ฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายไปจนถึงระบบผู้ใช้งาน สำหรับการจำลองจึงเลือกแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกด้วยระบบดังกล่าวที่มีระดับ 400 โวลต์ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลง ต่อเข้ากับโหลดแบบสามเฟสสี่สาย โดยมองโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นภาพรวม และแทนด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นด้วยไดโอดประเภท 6 พัลส์ ที่จ่ายพลังงานให้กับตัวต้านทาน ดังแผนภาพวงจรที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรการต่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นกับระบบไฟฟ้า

ซึ่งจากรูปที่ 3.1  $L_a$ ,  $L_b$  และ  $L_c$  คือตัวเหนี่ยวนำของสายไฟฟ้าระหว่างหม้อแปลงไปถึงโหลด และเนื่องจากเป็นโหลดประเภทคอนเวอร์เตอร์ อาจสามารถใช้นิยามฮาร์มอนิกแบบคาแรคเตอร์ิสติกฮาร์มอนิกได้จากสมการที่ (2-5) ด้วยเหตุจากโหลดที่ใช้เป็นแบบ 6 พัลส์ จึงคาดการณ์ฮาร์มอนิกอันดับแรกได้ จากวงจรทำให้ทราบค่า  $p$  มีค่าเท่ากับ 6 และกำหนดให้  $k$  มีค่าต่ำที่สุด คือ 1 จะได้ว่า  $h$  มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 5

##### 3.1.2 แหล่งจ่ายกระแสชดเชย

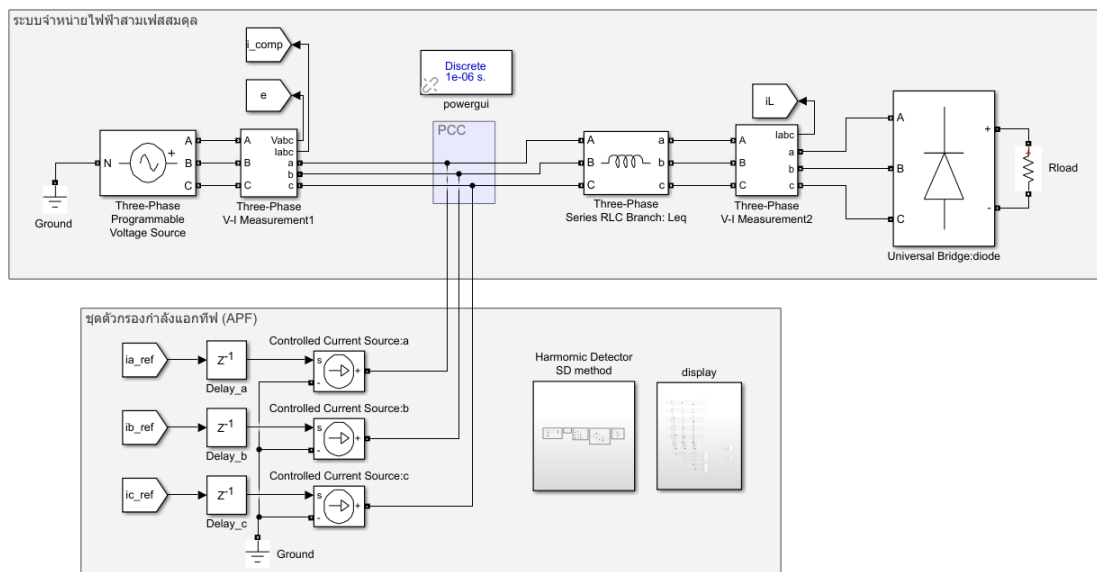
ด้วยการมุ่งเน้นในการศึกษาการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ได้ลดปัจจัยภายนอกที่ไม่เกี่ยวข้องให้มากที่สุด จึงละเว้นให้แหล่งกำเนิดกระแสชดเชยมีสภาพที่เป็นอุดมคติ ส่งผลทำให้ค่า  $i_c(t)$  มีค่าเท่ากับ  $i_c^*(t)$

### 3.1.3 ขอบเขตการวัดฮาร์โมนิก

การพิจารณาช่วงความถี่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของกระแส และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกในช่วงความถี่สูง ๆ นั้นจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับโครงการนี้ จึงใช้การพิจารณาช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2500 เฮิร์ตซ์ ซึ่งจัดอยู่ในคลาส A (Class A) ของมาตรฐาน IEEE Std. 519 กล่าวคือ ให้พิจารณาขั้นต่ำที่ 50 อันดับของฮาร์โมนิก เพราะมีความเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าต่าง ๆ ในมาตรฐาน IEC มากที่สุด (IEEE Std. 519-2022)

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้

การวิจัยโดยใช้สถานการณ์จริงนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องด้วย สถานที่ ค่าใช้จ่าย รวมไปถึงข้อจำกัดอื่น ๆ อีกมากมาย เพื่อให้เข้าใจหลักการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี SD อย่างง่าย จึงเลือกการทำโครงการโดยอาศัยการจำลองสร้างสถานการณ์ ด้วยโปรแกรมที่น่าเชื่อถือ และให้ผลลัพธ์ประกอบการรวบรวมข้อมูลได้อย่างสะดวก โดยเลือกใช้โปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) เวอร์ชัน R2021b ด้วยเครื่องมือ ซิมูลิงค์ (Simulink) จึงได้ออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.2

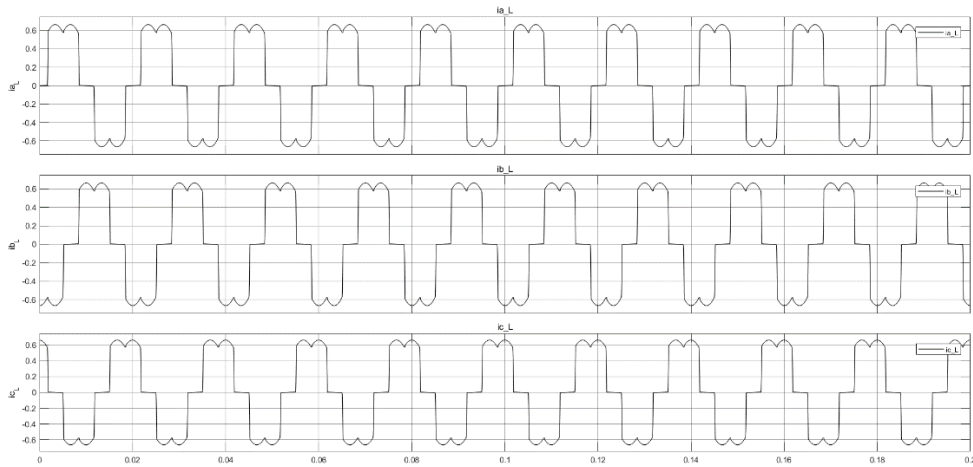


รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกการจำลองเพื่อทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี SD

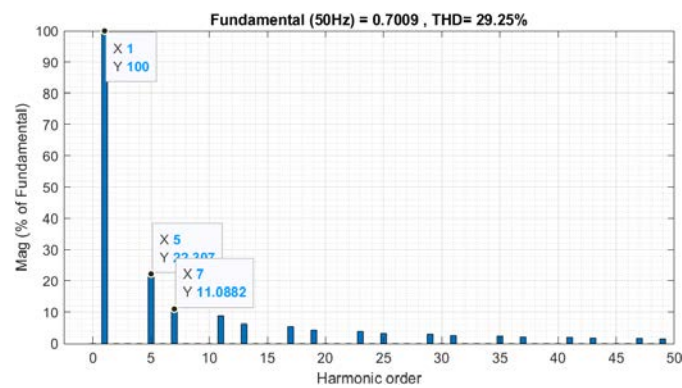
ผลการจำลองก่อนการชดเชยทำให้ได้รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายบิดเบี้ยวเหมือนกับกระแสไหลเข้าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นตามรูปที่ 3.3 รูปคลื่นลักษณะนี้อาจเรียกเป็นรูปทรง “หูกระต่าย” (Mark F. McGranaghan, 2012) เมื่อนำไปพล็อตกราฟสเปกตรัมแอมพลิจูดกระแสที่พิจารณาเพียงเฟส A แทนเฟสอื่น ๆ เนื่องจากเป็นระบบสามเฟสที่สายสภาวะสมดุล อาจกล่าวได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จะได้



ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งปรากฏอันดับฮาร์มอนิกที่นอกเหนือจากอันดับความถี่มูลฐานเป็นครั้งแรก คือ อันดับที่ 5 ตรงตามการคาดการณ์ไว้ในหัวข้อที่ 3.1



รูปที่ 3.3 กระแสที่ไหลเข้าโหลดไม่เชิงเส้น



รูปที่ 3.4 กราฟสเปกตรัมแอมพลิจูดกระแสโหลด

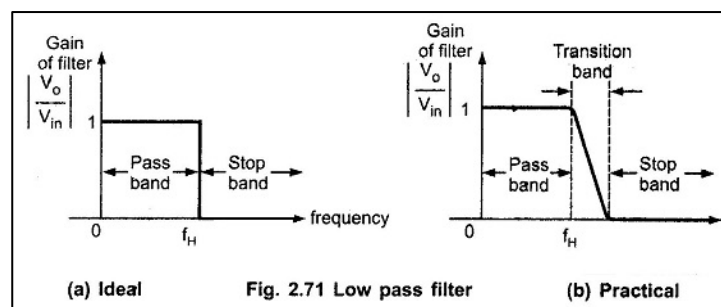
### 3.2.1 บล็อกวงจรกรองความถี่ (analog filter design)

บล็อกนี้ไม่สามารถวัดค่าด้วยบล็อกสโคป (scope block) ได้โดยตรง จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์กราฟด้วยฟังก์ชัน FFT ที่มีอยู่ในบล็อก power gui ดังนั้นจึงต้องอาศัยการวิเคราะห์อันดับฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (harmonic of active power) ผ่านสมการที่ (2-22) ถึง (2-24)

จากการปรากฏอันดับฮาร์มอนิกกระแสที่นอกเหนือจากอันดับความถี่มูลฐานเป็นครั้งแรก นั้นคือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จึงนำไปกำหนดช่วงความถี่ตัดผ่านของวงจรกรองความถี่ที่ใช้กรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้ ซึ่งตรงกับเงื่อนไขของสมการที่ (2-23) เมื่อนำไปแทนค่า และพิจารณาองค์ประกอบความถี่เทียบกับความถี่มูลฐาน กำหนดให้เป็น 50 เฮิร์ตซ์ ทำให้ทราบอันดับฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้ว่ามีค่าเท่ากับ 6 เส้นสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟกำเนิด ณ

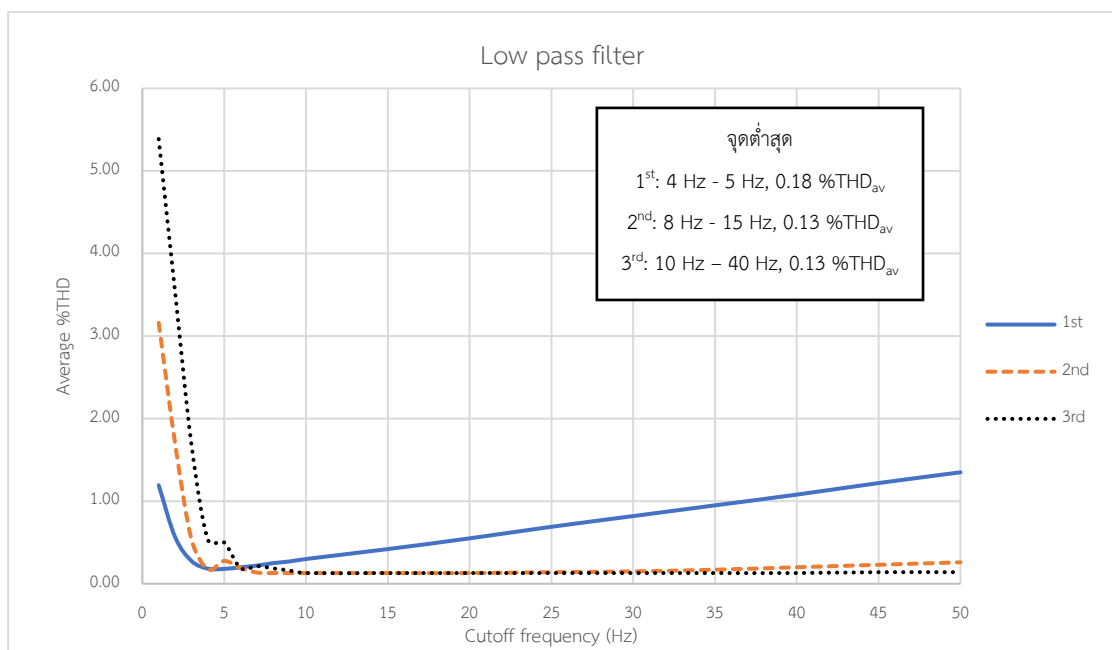
ตำแหน่ง 0 เฮิร์ตซ์ และ 300 เฮิร์ตซ์ เป็นต้นไป การพิสูจน์เส้นสเปกตรัมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้แสดงไว้ในภาคผนวก

วงจรกรองความถี่ในอุดมคตินั้นสามารถตัดปริมาณในช่วงที่ต้องการนำออกได้อย่างแม่นยำ แต่ในความเป็นจริงก่อนถึงจุดตัดความถี่ (cut off frequency) มักมีการไล่ระดับปริมาณที่ค่อย ๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบให้เห็นภาพในรูปที่ 3.5 เนื่องจากบล็อกวงจรกรองความถี่นี้ ไม่ได้ทำงานในลักษณะที่เป็นอุดมคติ ดังนั้นได้พิจารณาความถี่ตัดต่าง ๆ ทั้งรูปแบบวงจรความถี่ต่ำผ่าน และวงจรความถี่สูงผ่านด้วยวิธีจุดต่อจุด (point to point) วิเคราะห์ ณ วินาทีที่ 0.18 จนได้กราฟแนวโน้มดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 (ค่าความถี่ตัด ที่พิจารณาทั้ง LPF และ HPF แสดงไว้ในภาคผนวก)

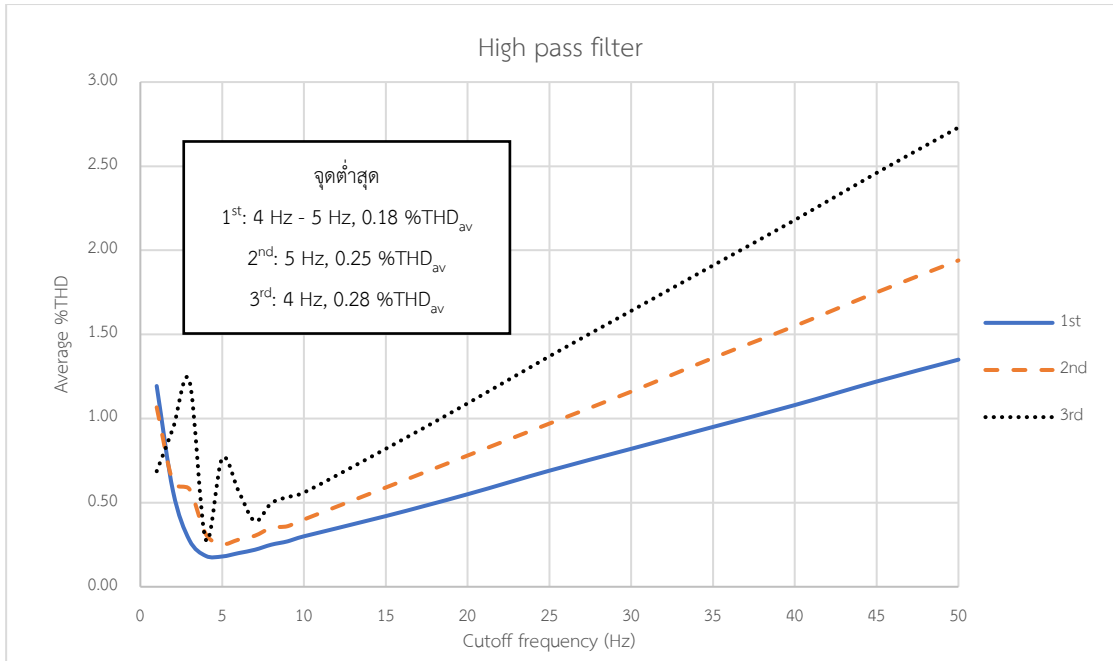


รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบกราฟการตัดค่าปริมาณใด ๆ ระหว่างอุดมคติกับในทางปฏิบัติ

ที่มา: <https://www.eeeguide.com/frequency-response-for-low-pass-filter-and-high-pass-filter/>

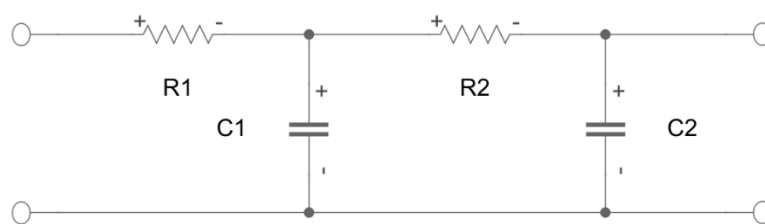


รูปที่ 3.6 กราฟจุดต่อจุดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 3.7 กราฟจุดต่อจุดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

จากกราฟรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 พบว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ THD เฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.13 ที่ความถี่ 8 เฮิรตซ์ ถึง 15 เฮิรตซ์ และ 10 เฮิรตซ์ ถึง 40 เฮิรตซ์ ตามลำดับ แต่วงจรอันดับที่ 3 มีความซับซ้อน และใช้อุปกรณ์มากกว่าอันดับที่ 2 ดังนั้นจึงใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน อันดับที่ 2 แล้วนำสมการความถี่ตัดผ่านอันดับที่ 2 แบบพาสซีฟ มาประกอบการพิจารณาเลือกค่าความถี่ตัดผ่าน



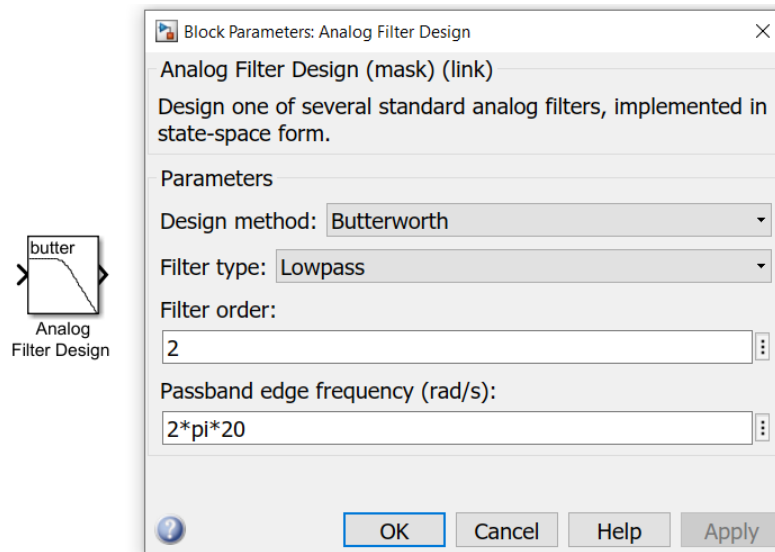
รูปที่ 3.8 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ อันดับที่ 2

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) หากความถี่มีค่ามาก จะทำให้พารามิเตอร์  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  และ  $C_2$  มีค่าลดลง อาจกล่าวได้ว่า มีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน แล้วเมื่อพารามิเตอร์เหล่านี้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายใน

การออกแบบเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้น ควรเลือกใช้ที่ความถี่ตัดผ่านเท่ากับ 15 เฮิรตซ์

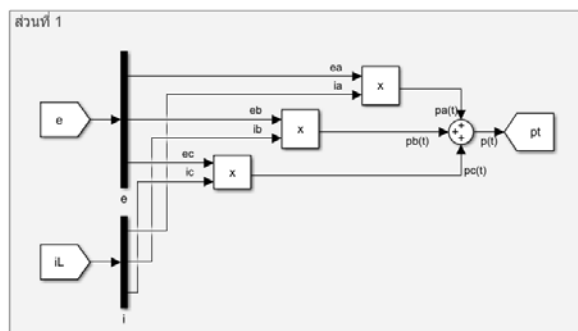
สำหรับการปรับตั้งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของบล็อก Analog Filter Design เป็นไปดังรูปที่ 3.9



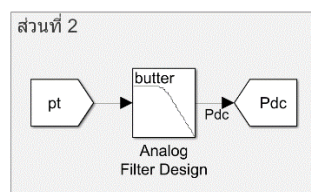
รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ของวงจรกรองความถี่ด้วย Analog filter design block

### 3.2.2 บล็อก Harmonic Detector SD method

จากรูปที่ 3.2 ภายในบล็อก “Harmonic Detector SD method” จะประกอบไปด้วย 5 ส่วน ดังรูปต่อไปนี้ โดยค่า  $i_{ref}$  เป็นค่าเดียวกันกับ  $i_c^*$



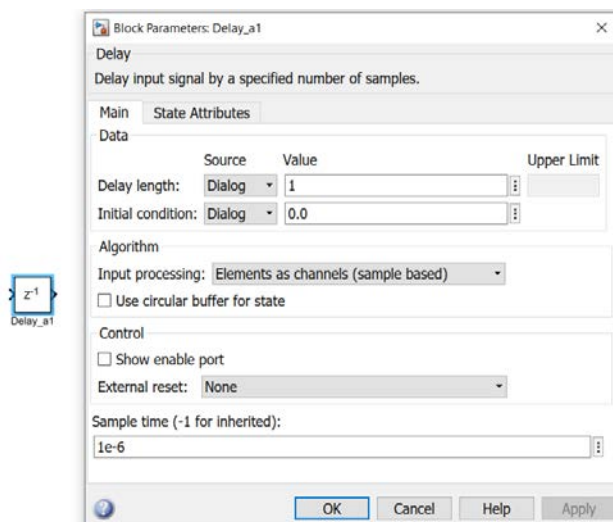
รูปที่ 3.10 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกวิธี SD ส่วนที่1



รูปที่ 3.11 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกวิธี SD ส่วนที่2



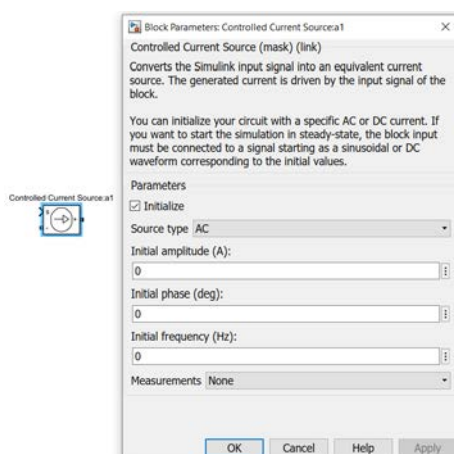
อุดมคติ แต่ต้องนำค่า  $i_{ref}$  ไปผ่านบล็อกหน่วงก่อนเพื่อแก้ไขปัญหาบางอย่างภายในโปรแกรม จึงจะสามารถฉีดกระแสชดเชยเข้าระบบไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมได้ และเนื่องด้วยกระแสชดเชยเป็นไปตามอุดมคติ การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกจึงขึ้นอยู่กับวิธีการระบุเอกลักษณ์ สำหรับพารามิเตอร์ในการปรับตั้ง แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 พารามิเตอร์ของ delay block

### 3.2.4 แหล่งกำเนิดกระแสชดเชยอุดมคติ

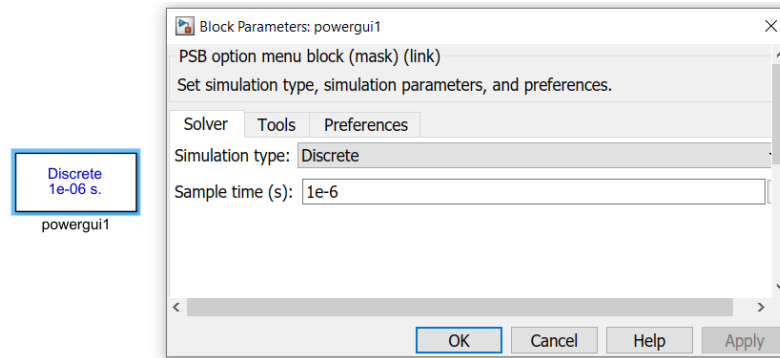
อาศัยบล็อกแหล่งกำเนิดกระแสแบบควบคุมได้ (controlled current source) แสดงการปรับตั้งค่าดังรูปที่ 3.16



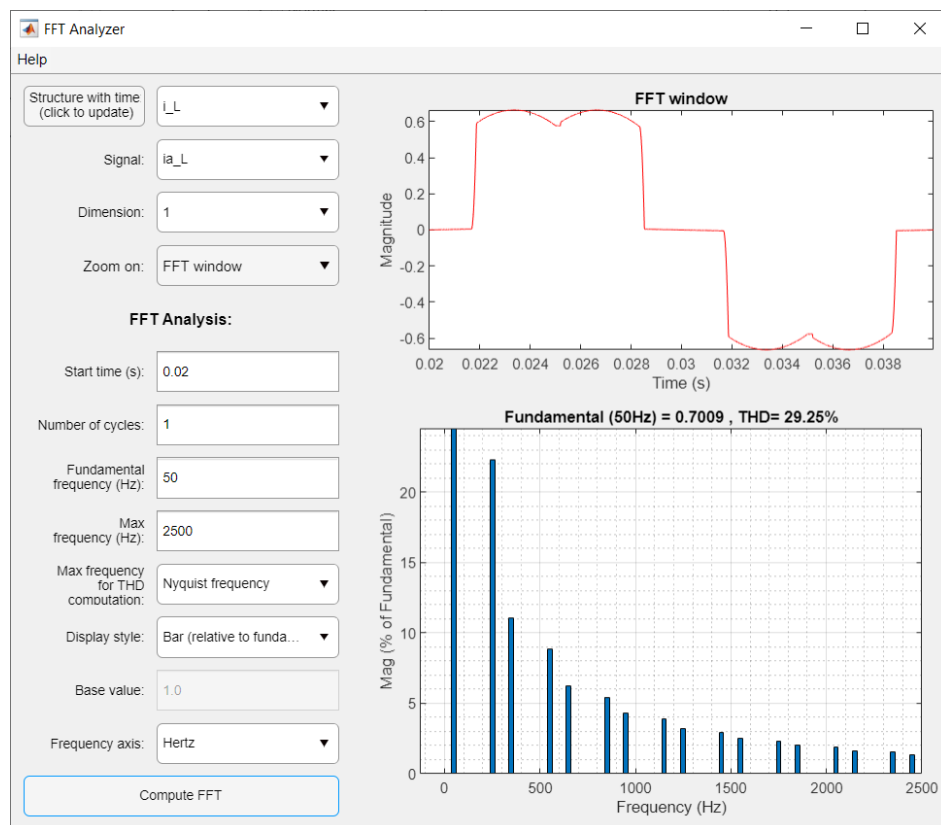
รูปที่ 3.16 พารามิเตอร์ของ controlled current source

### 3.2.5 power gui

เป็นบล็อกใช้ควบคุมเวลาการเก็บตัวอย่าง (sample time) อีกทั้งยังมีฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ FFT เพื่อช่วยวาดกราฟสเปกตรัมได้อย่างรวดเร็วผ่านการเก็บค่าจากบล็อกสโคป แสดงการปรับตั้งที่รูปที่ 3.17 และหน้าต่าง FFT รูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 พารามิเตอร์ sample time

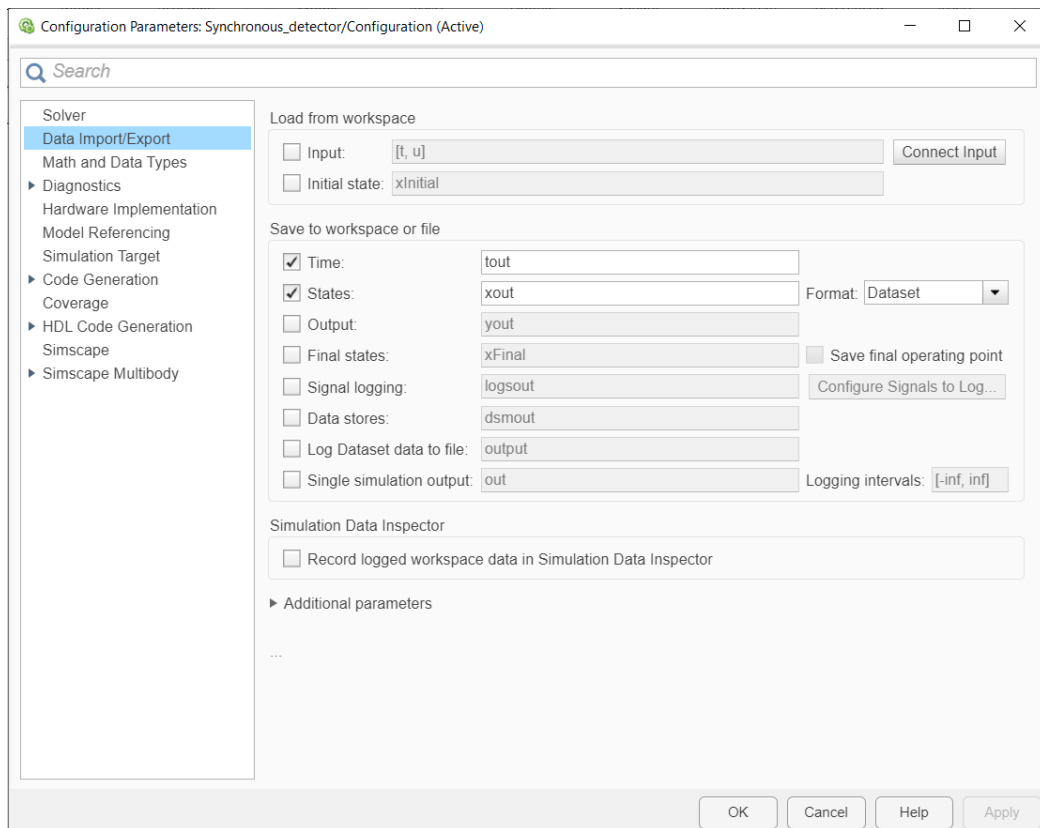


รูปที่ 3.18 หน้าต่างการวิเคราะห์ FFT พร้อมแสดงการปรับตั้งพารามิเตอร์

### 3.2.6 การปรับตั้ง model setting

เป็นการปรับตั้งเพื่อให้มีการบันทึกค่าจากบล็อกสโคป ซึ่งเครื่องมือการวิเคราะห์ FFT อาศัย

ข้อมูลจากการบันทึกเหล่านี้ แสดงการปรับตั้งดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 model setting

### 3.3 การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลอาศัยเครื่องมือการวิเคราะห์ FFT เพื่อดูค่าปริมาณ THD และค่ายอดกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับควบคุมกับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 และ IEC 61000-3-2 ตามตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

สำหรับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 จะกำหนดให้กระแสสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน มีค่าเท่ากับกระแสสูงสุดของความต้องการกระแสที่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน กล่าวคือ THD มีค่าเท่ากับ TDD

จากเงื่อนไข c ในตารางที่ 2.4 มีความนัยว่าหากนำมาตรฐานอื่นมาใช้ครอบคลุมกับระบบที่พิจารณาร่วมด้วย จะถูกกำหนดด้วยค่าความผิดเพี้ยนของกระแสเหล่านี้ ซึ่งโครงการนี้ได้ใช้มาตรฐาน IEC เข้ามาประกอบการพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้น การกำจัดฮาร์มอนิกกระแสจะอาศัยเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของค่า THD ผ่านค่า TDD ในเงื่อนไขที่กระแสลัดวงจรสูงสุดต่อกระแสโหลดสูงสุด ณ จุดต่อร่วม มีค่าต่ำกว่า 20 จึงสรุปได้ว่าค่า THD ต้องน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

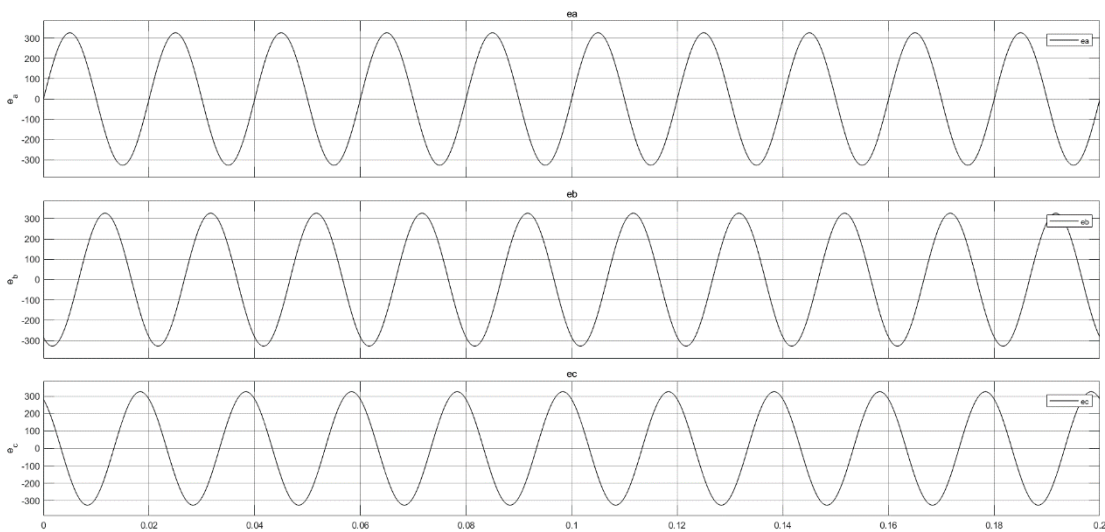


## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปราย

#### 4.1 ผลการวัดค่า

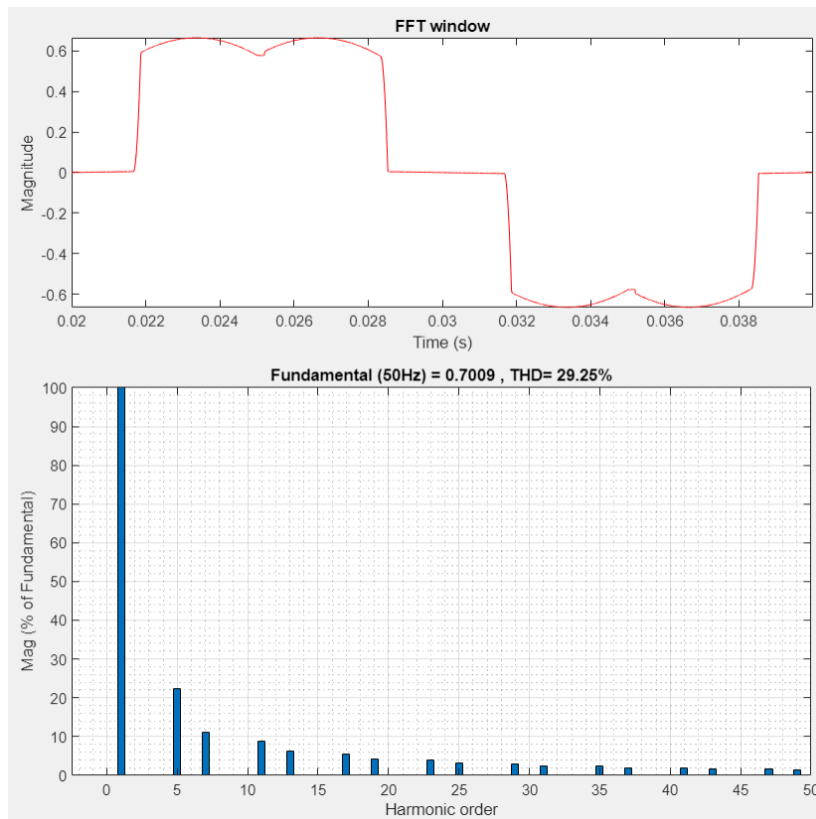
การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในครั้งนี ค่าของแรงดันที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้น เป็นรูปคลื่นไซน์ที่บริสุทธิ์ ตรวจสอบวัดค่าที่ฝั่งแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้า ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.1 บ่งบอกถึงความเรียบไม่บิดเบี้ยวตามที่กำหนดไว้



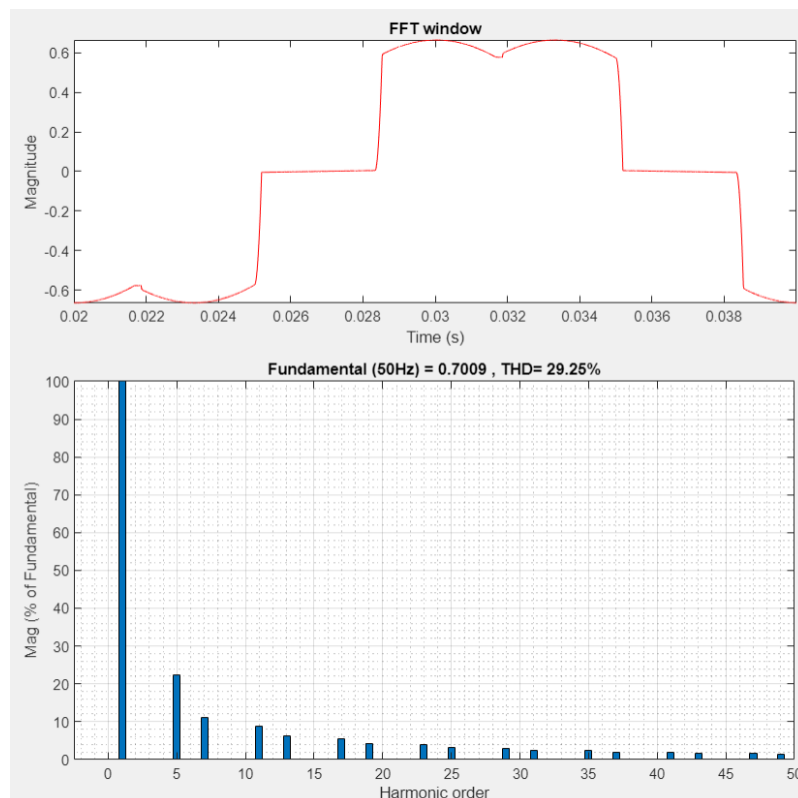
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟส

รูปกราฟแบบคลื่นและแบบสเปกตรัมของกระแสก่อนการชดเชยของแต่ละเฟสดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4 ถูกพิจารณาเป็นกระแสที่ไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากว่า หากระบบยังไม่มี การต่อตัวกรองกำลังแอกทีฟกระแสจากแหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

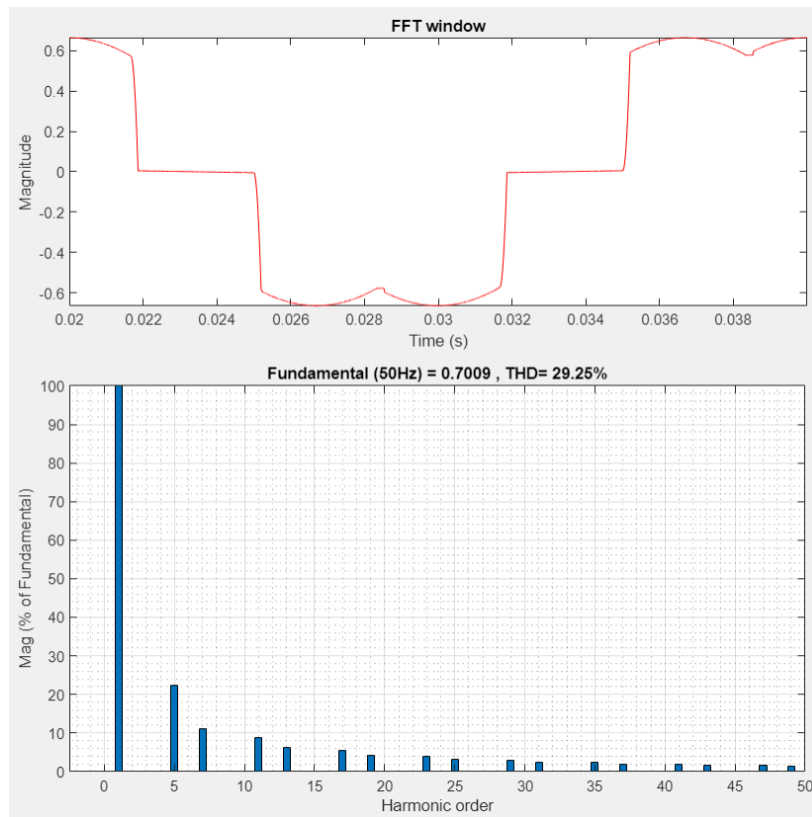
กระแสชดเชยคำนวณและกระแสชดเชยจริงที่ได้มีลักษณะของแต่ละเฟส ดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากราฟทั้ง 2 รูปมีลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ ยังเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0 ถึงประมาณวินาทีที่ 0.02 นั้นมีลักษณะที่เป็นช่วงปรับตัว โดยค่อย ๆ เข้าสู่จุดที่เป็นรายคาบ ซึ่งหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ การหน่วงเวลาของวงจรกรองความถี่ที่อยู่ภายในบล็อก APF ดังนั้นจึงเริ่มการพิจารณากระแสฮาร์มอนิก ณ วินาทีที่ 1.8 เพื่อหลีกเลี่ยงช่วงดังกล่าว หากเปลี่ยนบล็อกวงจรกรองความถี่เป็นบล็อกค่าคงที่ (constant block) ไต ๆ ดังรูปที่ 4.7 โดยการใช้การแทนค่าคงที่ด้วยกัน 2 แบบ ดังนี้



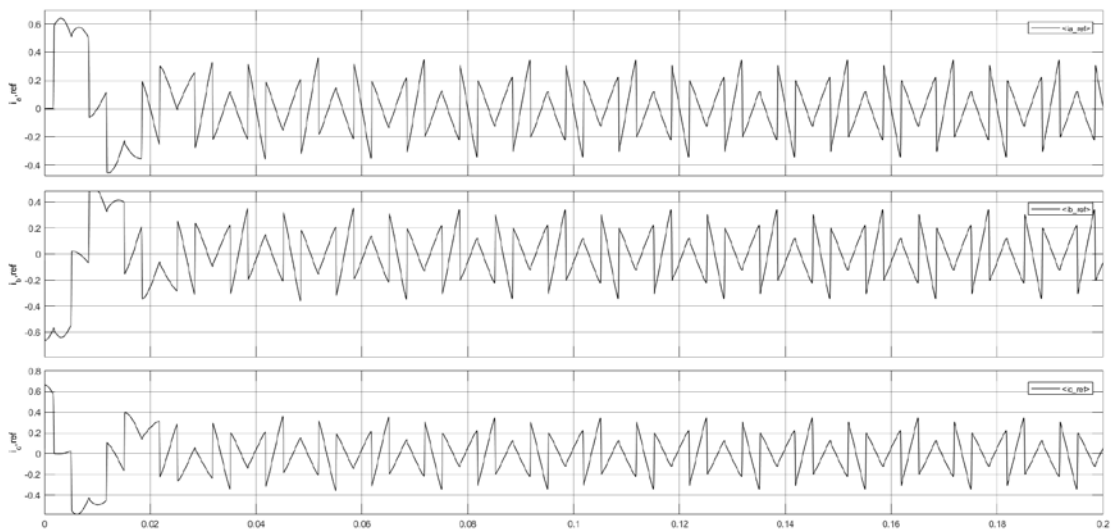
รูปที่ 4.2 กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส A



รูปที่ 4.3 กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส B



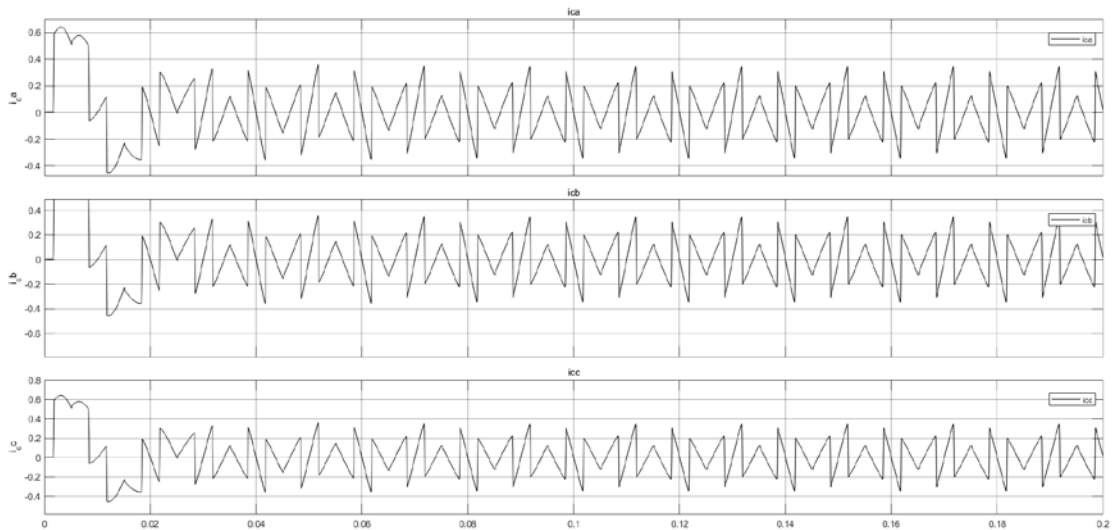
รูปที่ 4.4 กราฟคลื่นและกราฟสเปกตรัมของกระแสไหลเข้าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เฟส C



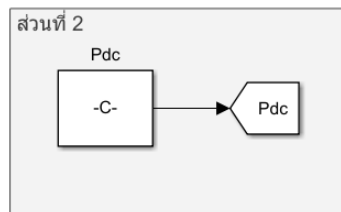
รูปที่ 4.5 กราฟกระแสขดเคย์คำนวณแต่ละเฟส ( $i_{ref}$ )

#### 4.1.1 กำหนดค่าคงที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามการวิเคราะห์ที่ได้ของฟังก์ชัน FFT

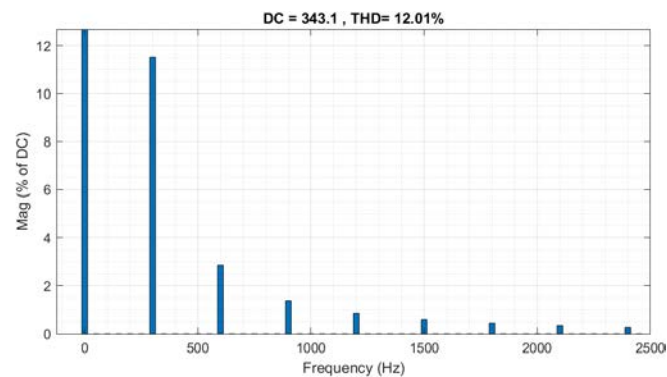
ในฟังก์ชัน FFT มีทางเลือกในการพิจารณาองค์ประกอบดีซี (DC component) หากนำสโคปไปตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าขณะใด ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ในโหมดองค์ประกอบดีซี ก็จะทราบค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย แสดงค่าในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 343.1 วัตต์



รูปที่ 4.6 กราฟกระแสขดเซยจริงแต่ละเฟส ( $i_c$ )



รูปที่ 4.7 แทนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้วยค่าคงที่

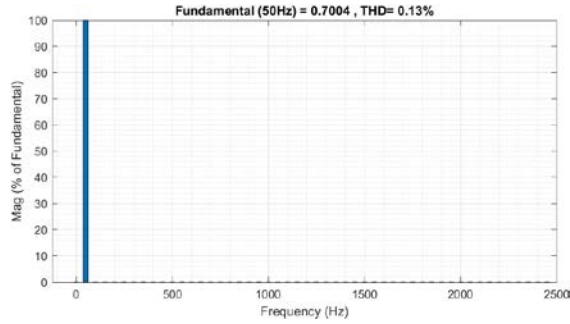


รูปที่ 4.8 กราฟสเปกตรัมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในโหมด DC component

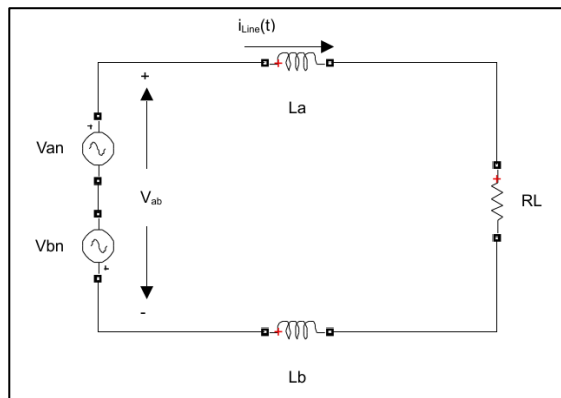
เมื่อนำค่าดังกล่าวไปแทนในบล็อกค่าคงที่จะทำให้ได้ผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์ THD ของกระแสหลังขดเซยเฟส A เท่ากับ 0.13 และมีค่าเท่ากันในทุกเฟสแสดงดังรูปที่ 4.9

#### 4.1.2 กำหนดค่าคงที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยผ่านการวิเคราะห์วงจร

จากรูปที่ 4.10 แสดงวงจรสมมูลกรณีคู่ไดโอดหนึ่ง ๆ ทำงาน ซึ่งจากความรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้ทราบค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวต้านทานของเฟสใด ๆ ดังสมการที่ (4-1)



รูปที่ 4.9 กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A เมื่อแทนค่าคงที่ตาม DC component



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลกรณีคู่ไดโอดหนึ่ง ๆ ทำงาน

$$I_{\phi n} = I_{Line} = \frac{\sqrt{3}V_m}{|Z_{eq}|} \tag{4-1}$$

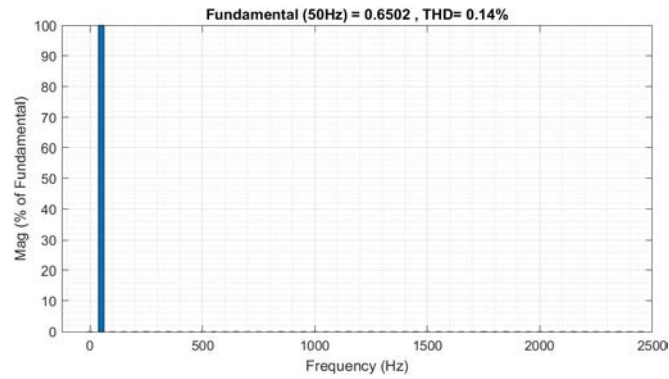
จากสมการที่ (4-1)

$V_m$  คือ ค่ายอดของแรงดันหนึ่งเฟส

$|Z_{eq}|$  คือ ขนาดอิมพีแดนซ์สมมูล

เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสมการที่ (4-1) จะทำให้ได้ค่ายอดของกระแสในสายเพียงหนึ่งเฟส เท่ากับ 0.6502 แอมป์ จากสมการที่ (2-21) นำค่าต่าง ๆ แทนในสมการดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าคงที่ของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 318.53 วัตต์ แสดงผลลัพท์เปอร์เซ็นต์ THD เท่ากับ 0.13 ดังรูปที่ 4.11

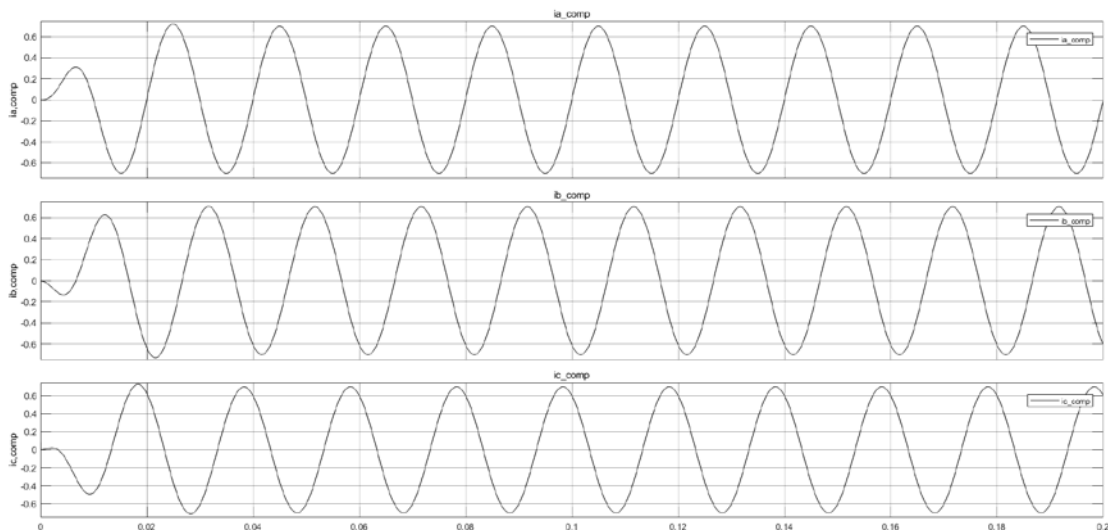
ถึงแม้การแทนค่าคงที่ของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยทั้ง 2 แบบในข้างต้น ยังไม่สามารถทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ THD เป็นศูนย์ได้ แสดงให้เห็นถึงสาเหตุอื่น ๆ ภายนอกนั้นมีผลกระทบให้ยังคงไม่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกให้หมดสิ้น ซึ่งบางสาเหตุอาจมีความเกี่ยวข้องดังเช่น ผลจากการคำนวณแบบเวลาไม่เนื่อง (discrete time) หรือช่วงกระแสในสภาวะชั่วคราว (transient current) หรือผลจากบล็อกห้วงเป็นต้น



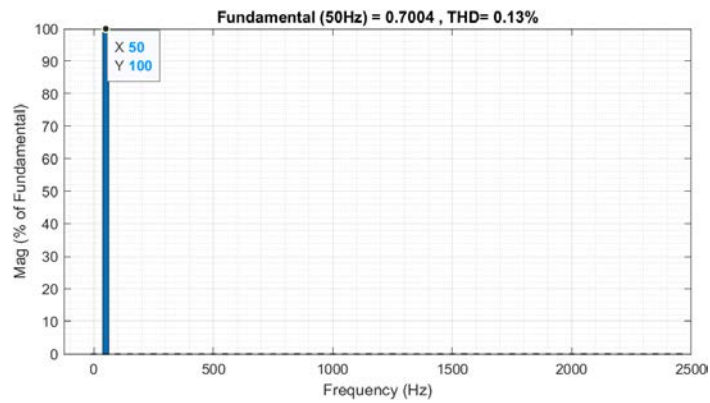
รูปที่ 4.11 กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A เมื่อแทนค่าคงที่ตามการวิเคราะห์วงจรสมมูล

ส่วนทางด้านกระแสจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าหลังได้การฉีดกระแสเข้าระบบ ณ จุดต่อร่วม แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยคลื่นที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระแสชดเชยจริงย่อมมีอิทธิพลต่อกระแสหลังชดเชย ซึ่งเห็นได้ชัดในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงประมาณวินาทีที่ 0.02

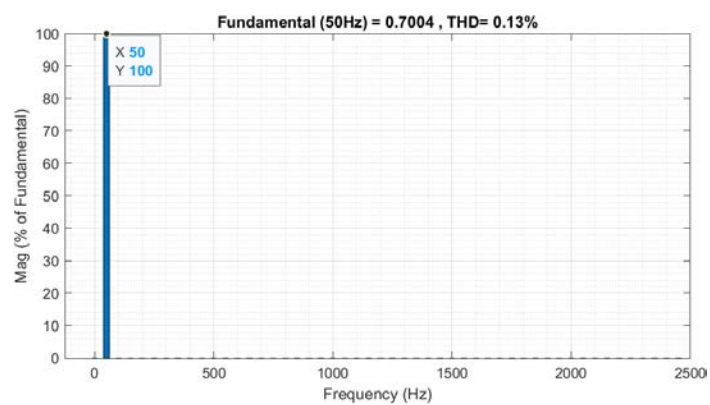
จากรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของกระแสในแต่ละเฟส มีค่าเท่ากันทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.25 เปอร์เซ็นต์ เหนือเกินเดียวกับกราฟสเปกตรัมของกระแสหลังชดเชยที่แสดงในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 พบว่าถูกลดค่าเปอร์เซ็นต์ THD เหลือเท่ากับ 0.13 เปอร์เซ็นต์เท่ากันทุกเฟส



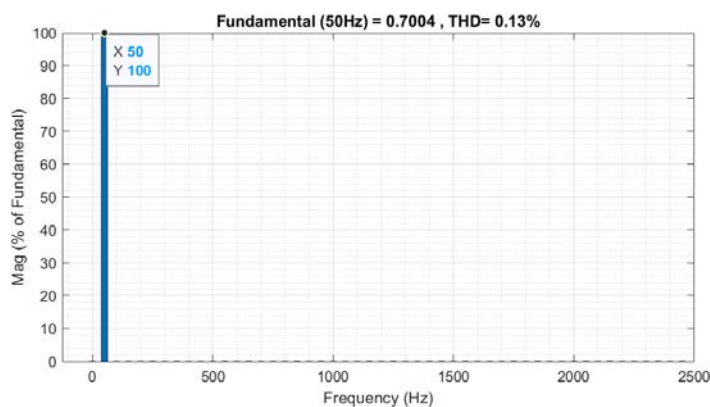
รูปที่ 4.12 กราฟกระแสหลังชดเชยแต่ละเฟส



รูปที่ 4.13 กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส A



รูปที่ 4.14 กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส B



รูปที่ 4.15 กราฟสเปกตรัมกระแสหลังชดเชย เฟส C

## 4.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์

กราฟสเปกตรัมกระแสก่อนชดเชยทำให้หาค่า THD เท่ากับ 29.25 เปอร์เซ็นต์ หลังชดเชยพบว่าให้ค่า THD เท่ากับ 0.13 เปอร์เซ็นต์ ในทุก ๆ เฟส ซึ่งน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ตามเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาของมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 หากพิจารณาองค์ประกอบอื่น ๆ จะแสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง

ตารางที่ 4.1 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส A กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

อันดับฮาร์มอนิกกระแส หลังชดเชยที่ปรากฏ	ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดของ กระแสฮาร์มอนิกที่วัดได้	ช่วงอันดับฮาร์มอนิกที่ มาตรฐาน IEEE 519 พิจารณา		ผลลัพธ์
5	0.03	2≤h<11 <sup>a</sup> 2.0%	11≤h<17 1.0%	ผ่าน ทั้งหมด
7	0.03			
11	0.03			
13	0.03	17≤h<23 0.75%	23≤h<35 0.3%	
17	0.03			
19	0.03			
23	0.03	35≤h<50 0.15%		
25	0.03			
29	0.03			
31	0.02			
35	0.03			
37	0.02			
41	0.02			
43	0.02			
47	0.02			
49	0.02			

ตารางที่ 4.2 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส B กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

อันดับฮาร์มอนิกกระแส หลังชดเชยที่ปรากฏ	ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดของ กระแสฮาร์มอนิกที่วัดได้	ช่วงอันดับฮาร์มอนิกที่ มาตรฐาน IEEE 519 พิจารณา		ผลลัพธ์
5	0.03	2≤h<11 <sup>a</sup> 2.0%	11≤h<17 1.0%	ผ่าน ทั้งหมด
7	0.03			
11	0.03			
13	0.03	17≤h<23 0.75%		
17	0.03			
19	0.03			
23	0.03			



ตารางที่ 4.3 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส B กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 (ต่อ)

อันดับฮาร์มอนิกกระแส หลังชดเชยที่ปรากฏ	ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดของ กระแสฮาร์มอนิกที่วัดได้	ช่วงอันดับฮาร์มอนิกที่ มาตรฐาน IEEE 519 พิจารณา		ผลลัพธ์
23	0.03		23≤h<35 0.3%	ผ่าน ทั้งหมด
25	0.03			
29	0.03			
31	0.02			
35	0.03	35≤h<50 0.15%		
37	0.02			
41	0.02			
43	0.02			
47	0.02			
49	0.02			

ตารางที่ 4.4 การเทียบกระแสฮาร์มอนิก เฟส C กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

อันดับฮาร์มอนิกกระแส หลังชดเชยที่ปรากฏ	ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดของ กระแสฮาร์มอนิกที่วัดได้	ช่วงอันดับฮาร์มอนิกที่ มาตรฐาน IEEE 519 พิจารณา		ผลลัพธ์
5	0.03	2≤h<11 <sup>a</sup> 2.0%		ผ่าน ทั้งหมด
7	0.03			
11	0.03			
13	0.03	11≤h<17 1.0%		
17	0.03			
19	0.03	17≤h<23 0.75%		
23	0.03			
25	0.03	23≤h<35 0.3%		
29	0.03			
31	0.02			
35	0.03	35≤h<50 0.15%		
37	0.02			
41	0.02			

ตารางที่ 4.5 การเทียบกระแสฮาร์โมนิก เฟส C กับมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 (ต่อ)

43	0.02	35 ≤ h < 50 0.15%	ผ่าน ทั้งหมด
47	0.02		
49	0.02		

จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์โมนิกในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันทุกอันดับ ดังนั้นการพิจารณาอีกมาตรฐาน คือ IEC 61000-3-2 จึงพิจารณาเพียงเฟส A เฟสเดียว แสดงได้ดังค่าในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2

h	$i_h$ ที่กำหนด (A)	$i_h$ ที่ได้จากการจำลอง (mA)	ผลลัพธ์
3	2.3	0.00	ผ่านทั้งหมด
5	1.14	0.24	
7	0.77	0.23	
9	0.40	0.00	
11	0.33	0.21	
13	0.21	0.18	
17	0.88	0.20	
19	0.79	0.18	
23	0.65	0.20	
25	0.60	0.18	
29	0.52	0.19	
31	0.48	0.17	
35	0.43	0.18	
37	0.41	0.16	

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองทำให้ทราบเปอร์เซ็นต์ THD ที่มีค่าต่ำมาก ในหลักทศนิยม อาจกล่าวได้ว่าวิธีการตรวจ SD สามารถรับมือกับสถานการณ์ที่สร้างไว้ได้เป็นอย่างดี

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD อาจมีกระบวนการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับวิธีอื่น เช่น วิธี PQ หรือวิธี SRF โดยจะสังเกตเห็นถึงค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีผลต่อการกำหนดกระแสชดเชย กล่าวคือการออกแบบวงจรกรองความถี่นั้นมีผลโดยตรงกับการลดปริมาณฮาร์มอนิก หากวงจรกรองความถี่มีสถานะไม่อุดมคติก็จะส่งผลให้ไม่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกให้หายหมดไปจากระบบไฟฟ้าได้

แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบวงจรกรองความถี่ในครั้งนี้ คิดที่สถานะสมดุลสามเฟส ค่ายอดกระแสฮาร์มอนิกของทั้งสามเฟสในแต่ละอันดับมีค่าเท่ากัน ไม่คิดการเลื่อนของมุมเฟส หากสถานะเหล่านี้ไม่เกิดขึ้น การกรองค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจะเป็นไปได้อย่างยากลำบาก และไม่อาจทำให้ THD ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดกระแสชดเชยแบบอุดมคติเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ เพื่อให้เข้าใจความสมจริงในทางปฏิบัติมากขึ้น โดยนำกระแสชดเชยคำนวณที่ได้แปลงเป็นสัญญาณในการขับอุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ เช่น IGBT เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมมาด้วยตัวควบคุมสัญญาณ โดยที่นิยม คือ การควบคุมแบบพีไอ (PI controller)

2. จำลองโหลดในหลาย ๆ สถานการณ์ เช่น มีกลุ่มโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเข้ากับระบบหรือกลุ่มโหลดที่มีผลต่อสถานะสมดุลสามเฟส เพื่อดูผลการรับมือได้ของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก SD หรือนำวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีอื่น ๆ มาใช้และเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย

## รายการอ้างอิง

- Edward L. Owen, (1998). A History of Harmonics in Power Systems. IEEE Industry Applications Magazine
- McGranaghan, Mark F. (2012). Electrical Power System Quality. McGraw-Hill Publishing.
- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทระดับบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
- IEEE Std. 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.**
- IEEE Std. 519-2022. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electrical Power Systems.**
- Suleyman ADAK, Hasan CANGI. (2020). Harmonic analysis of stand alone photovoltaic system at low irradiance conditions. The International Journal of Energy & Engineering Sciences, 5(1), Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijeess/issue/52128/651400>
- Richard P. Bingham, HARMONICS - Understanding the Facts. Retrieved from <https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/harmonics-understanding-thefacts.pdf>
- Ramon Pinyo. HARMONICS: CAUSES, EFFECTS AND MINIMIZATION. Retrieved from [https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01\\_whitepaper-armonics\\_\(1\).pdf](https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01_whitepaper-armonics_(1).pdf)

### ภาคผนวก

#### การเลือกความถี่ตัดผ่านและวงจรรองความถี่

วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

LPF Order 1				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	0.66	1.47	1.45	1.19
2	0.33	0.69	0.68	0.57
3	0.2	0.32	0.31	0.28
4	0.17	0.19	0.19	0.18
5	0.18	0.18	0.18	0.18
6	0.2	0.2	0.2	0.20
7	0.22	0.22	0.22	0.22
8	0.25	0.25	0.25	0.25
9	0.27	0.27	0.27	0.27
10	0.3	0.3	0.3	0.30
15	0.42	0.42	0.42	0.42
20	0.55	0.55	0.55	0.55
25	0.69	0.69	0.69	0.69
30	0.82	0.82	0.82	0.82
35	0.95	0.95	0.95	0.95
40	1.08	1.08	1.08	1.08
45	1.22	1.22	1.22	1.22
50	1.35	1.35	1.35	1.35

LPF Order 2				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	1.72	3.92	3.84	3.16
2	0.95	2.1	2.06	1.70
3	0.31	0.66	0.65	0.54
4	0.14	0.19	0.19	0.17
5	0.19	0.32	0.32	0.28
6	0.15	0.21	0.21	0.19
7	0.13	0.14	0.14	0.14
8	0.13	0.13	0.13	0.13
9	0.13	0.13	0.13	0.13
10	0.13	0.13	0.13	0.13
15	0.13	0.13	0.13	0.13
20	0.13	0.13	0.13	0.13
25	0.14	0.14	0.14	0.14
30	0.15	0.15	0.15	0.15
35	0.17	0.17	0.17	0.17
40	0.2	0.2	0.2	0.20
45	0.23	0.23	0.23	0.23
50	0.26	0.26	0.26	0.26

LPF Order 3				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	2.97	6.7	6.49	5.39
2	1.91	4.4	4.3	3.54
3	0.92	2.1	2.05	1.69

LPF Order 3 (ต่อ)				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
4	0.15	0.73	0.73	0.54
5	0.35	0.58	0.57	0.50
6	0.29	0.14	0.14	0.19
7	0.14	0.25	0.25	0.21
8	0.16	0.2	0.2	0.19
9	0.15	0.13	0.2	0.16
10	0.13	0.13	0.13	0.13
15	0.13	0.13	0.13	0.13
20	0.13	0.13	0.13	0.13
25	0.13	0.13	0.13	0.13
30	0.13	0.13	0.13	0.13
35	0.13	0.13	0.13	0.13
40	0.13	0.13	0.13	0.13
45	0.14	0.14	0.14	0.14
50	0.14	0.14	0.14	0.14

วงจรรองความถี่สูงผ่าน

HPF Order 1				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	0.66	1.47	1.45	1.19
2	0.33	0.69	0.68	0.57
3	0.2	0.32	0.31	0.28
4	0.17	0.19	0.19	0.18
5	0.18	0.18	0.18	0.18

HPF Order 1 (ต่อ)				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
6	0.2	0.2	0.2	0.20
7	0.22	0.22	0.22	0.22
8	0.25	0.25	0.25	0.25
9	0.27	0.27	0.27	0.27
10	0.3	0.3	0.3	0.30
15	0.42	0.42	0.42	0.42
20	0.55	0.55	0.55	0.55
25	0.69	0.69	0.69	0.69
30	0.82	0.82	0.82	0.82
35	0.95	0.95	0.95	0.95
40	1.08	1.08	1.08	1.08
45	1.22	1.22	1.22	1.22
50	1.35	1.35	1.35	1.35

HPF Order 2				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	0.59	1.31	1.3	1.07
2	0.15	0.86	0.86	0.62
3	0.4	0.67	0.67	0.58
4	0.33	0.31	0.3	0.31
5	0.24	0.26	0.26	0.25
6	0.26	0.29	0.29	0.28
7	0.3	0.29	0.32	0.30
8	0.33	0.36	0.36	0.35



HPF Order 2 (ต่อ)				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
9	0.36	0.36	0.36	0.36
10	0.4	0.4	0.4	0.40
15	0.59	0.59	0.59	0.59
20	0.78	0.78	0.78	0.78
25	0.97	0.97	0.97	0.97
30	1.16	1.16	1.16	1.16
35	1.36	1.36	1.36	1.36
40	1.55	1.55	1.55	1.55
45	1.75	1.75	1.75	1.75
50	1.94	1.94	1.94	1.94

HPF Order 3				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
1	0.38	0.85	0.83	0.69
2	0.52	1.15	1.16	0.94
3	0.67	1.5	1.5	1.22
4	0.28	0.28	0.28	0.28
5	0.51	0.89	0.89	0.76
6	0.44	0.64	0.63	0.57
7	0.39	0.39	0.39	0.39
8	0.45	0.52	0.52	0.50
9	0.5	0.55	0.55	0.53
10	0.56	0.56	0.56	0.56
15	0.82	0.82	0.82	0.82

HPF Order 3 (ต่อ)				
$f_c$	THD <sub>iA</sub>	THD <sub>iB</sub>	THD <sub>iC</sub>	THD <sub>av</sub>
20	1.09	1.09	1.09	1.09
25	1.37	1.37	1.37	1.37
30	1.64	1.64	1.64	1.64
35	1.91	1.91	1.91	1.91
40	2.18	2.18	2.18	2.18
45	2.46	2.46	2.46	2.46
50	2.73	2.73	2.73	2.73

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าแยกทีฟขณะใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม

### MATLAB

การคำนวณผ่าน script file

ที่กระแสความถี่มูลฐาน  $\omega_0 = 100\pi$  หรือ  $f_0 = 50 \text{ Hz}$  จึงกำหนดให้

$$v_a(t) = 100\sin(\omega_0 t) \quad v_b(t) = 100\sin(\omega_0 t - 120^\circ) \quad v_c(t) = 100\sin(\omega_0 t + 120^\circ)$$

$$i_a(t) = 10\sin(\omega_0 t) \quad i_b(t) = 10\sin(\omega_0 t - 120^\circ) \quad i_c(t) = 10\sin(\omega_0 t + 120^\circ)$$

จากกำลังไฟฟ้า 3 เฟส คือ  $p(t) = i_a(t)v_a(t) + i_b(t)v_b(t) + i_c(t)v_c(t)$  นำไป  
คำนวณผลด้วย MATLAB มีโค้ดดังนี้

```

%% fund.
clear;clc
Im = 10; Vm = 100;
T = 1e-6; n = (0.04/T)+1; w = 100*pi; i = 1;
while i <= n
    va(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T);
    vb(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T-120*pi/180);
    vc(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T+120*pi/180);
    ia(i) = Im*sin(w*(i-1)*T);
    ib(i) = Im*sin(w*(i-1)*T-120*pi/180);
    ic(i) = Im*sin(w*(i-1)*T+120*pi/180);
    pT(i) = va(i)*ia(i) + vb(i)*ib(i) + vc(i)*ic(i);
    i = i + 1;
end
t = 0:T:0.04;
plot(t,pT)

```

ที่กระแสฮาร์โมนิกมากกว่าหนึ่ง

$$i_a(t) = 10\sin(\omega_0 t) + 5\sin(h\omega_0 t)$$

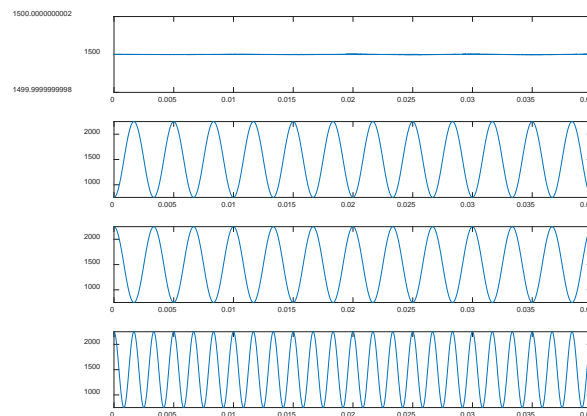
$$i_b(t) = 10\sin(\omega_0 t - 120^\circ) + 5\sin(h\omega_0 t - 120^\circ)$$

$$i_c(t) = 10\sin(\omega_0 t + 120^\circ) + 5\sin(h\omega_0 t + 120^\circ)$$

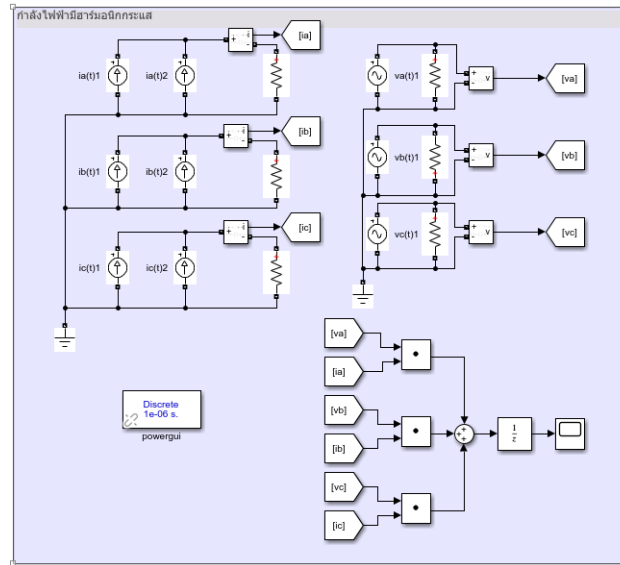
นำไปคำนวณผลด้วย MATLAB มีโค้ดดังนี้

```
% harmonic
clear;clc
Im = 10; Vm = 100; I1 = 5; h = 13;
T = 1e-6; n = (0.04/T)+1; w = 100*pi; i = 1;
while i <= n
    va(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T);
    vb(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T-120*pi/180);
    vc(i) = Vm*sin(w*(i-1)*T+120*pi/180);
    ia(i) = Im*sin(w*(i-1)*T) + I1*sin(h*(w*(i-1)*T));
    ib(i) = Im*sin(w*(i-1)*T-120*pi/180) + I1*sin(h*(w*(i-1)*T-120*pi/180));
    ic(i) = Im*sin(w*(i-1)*T+120*pi/180) + I1*sin(h*(w*(i-1)*T+120*pi/180));
    pT(i) = va(i)*ia(i) + vb(i)*ib(i) + vc(i)*ic(i);
    i = i + 1;
end
t = 0:T:0.04;
plot(t,pT)
```

ผลลัพธ์เป็นกราฟดังรูป เมื่อกำหนดให้  $h = 1, 5, 7$  และ  $11$  ตามลำดับ

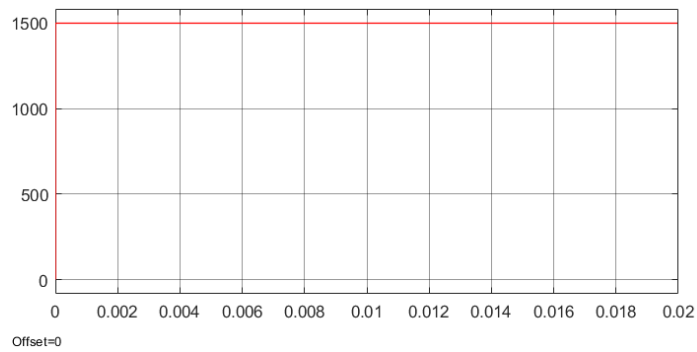


การจำลองด้วย Simulink

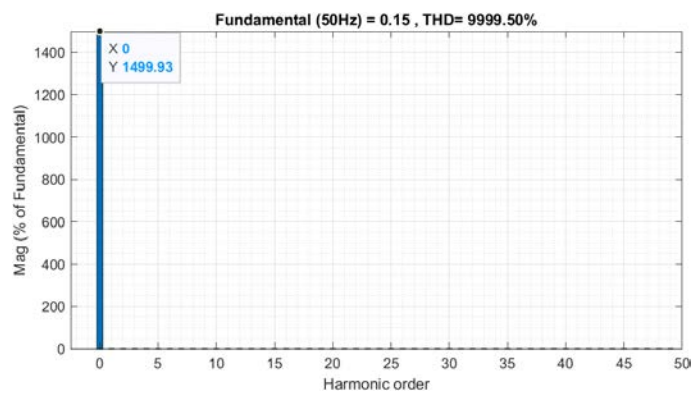


กรณีกระแสมูลฐานจะทำการ comment แหล่งจ่ายกระแสที่ ia(t)2, ib(t)2 และ ic(t)2

ผลการจำลอง

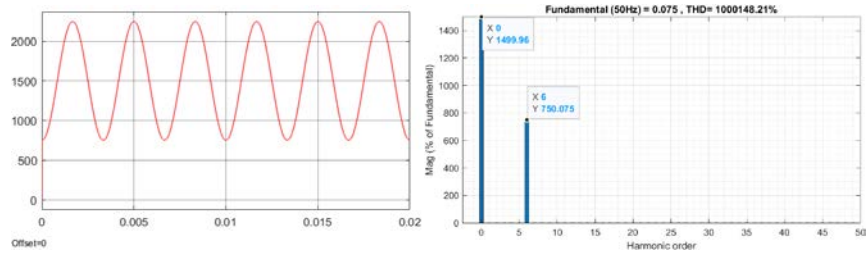


รูปกราฟกำลังไฟฟ้า

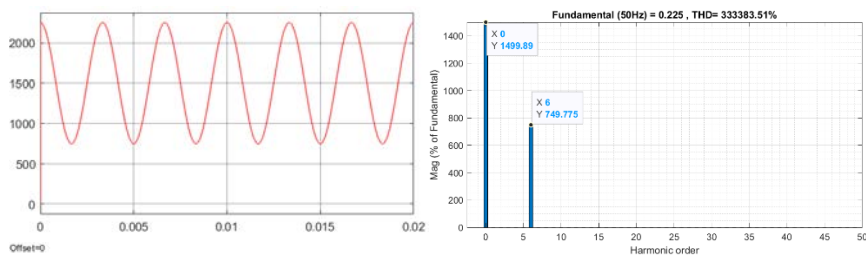


รูปกราฟสเปกตรัมแอมพลิจูด

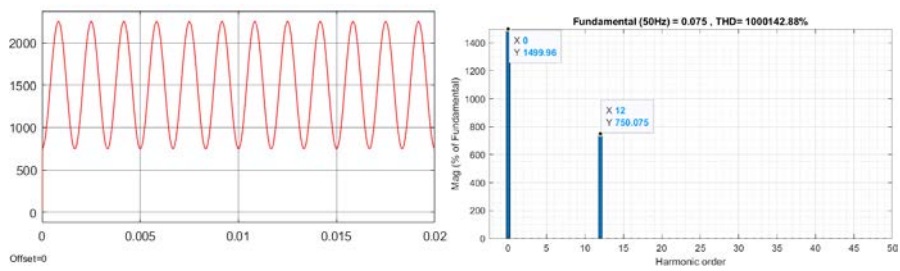
จากนั้นพิจารณากรณีที่กำลังไฟฟ้า 3 เฟสมีกระแสฮาร์โมนิกมากกว่าหนึ่ง ผลการจำลอง ที่  $h = 5$



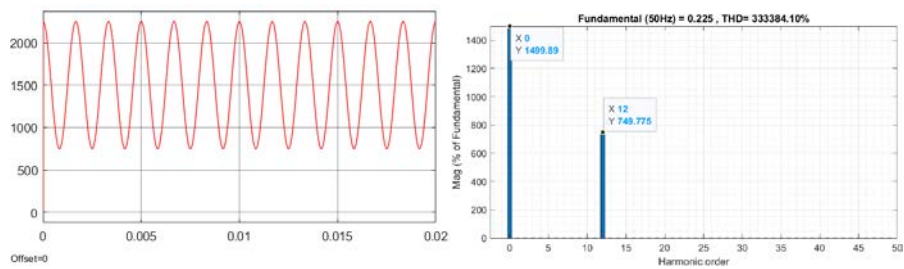
ที่  $h = 7$



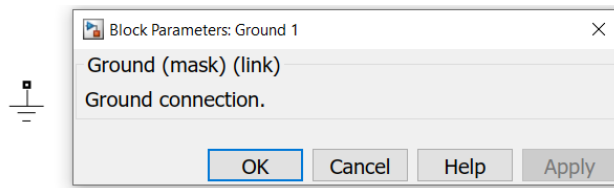
ที่  $h = 11$



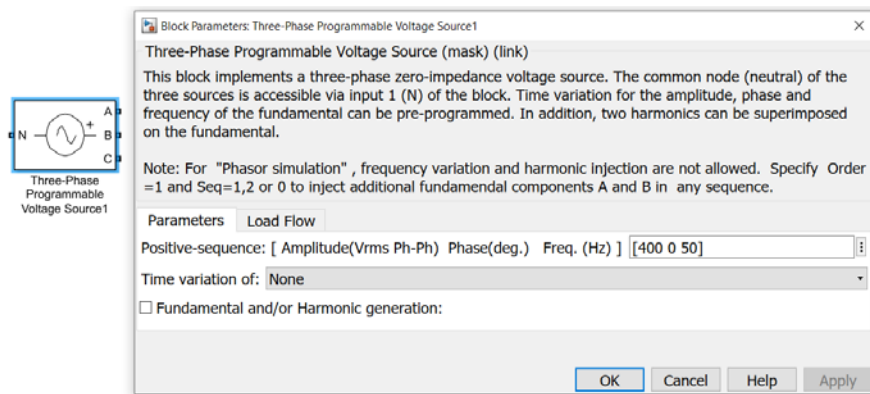
ที่  $h = 13$



บล็อกอื่น ๆ เพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลอง



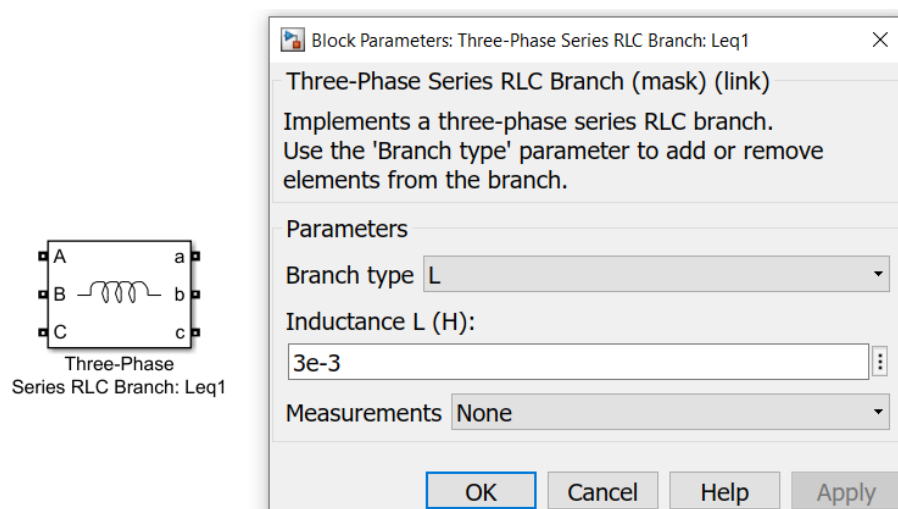
Ground block



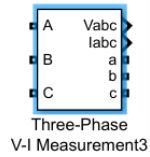
พารามิเตอร์แหล่งจ่าย



Goto block และ from block



พารามิเตอร์ของ Three-Phase Series RLC Branch



Block Parameters: Three-Phase V-I Measurement3

Three-Phase VI Measurement (mask) (link)

Ideal three-phase voltage and current measurements.

The block can output the voltages and currents in per unit values or in volts and amperes.

Parameters

Voltage measurement

Use a label

Voltages in pu, based on peak value of nominal phase-to-ground volt...

Current measurement

Use a label

Currents in pu

OK Cancel Help Apply

บล็อกสำหรับวัดค่า โดยปรับตั้งดังรูป



Block Parameters: Rload1

Series RLC Branch (mask) (link)

Implements a series branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

Parameters

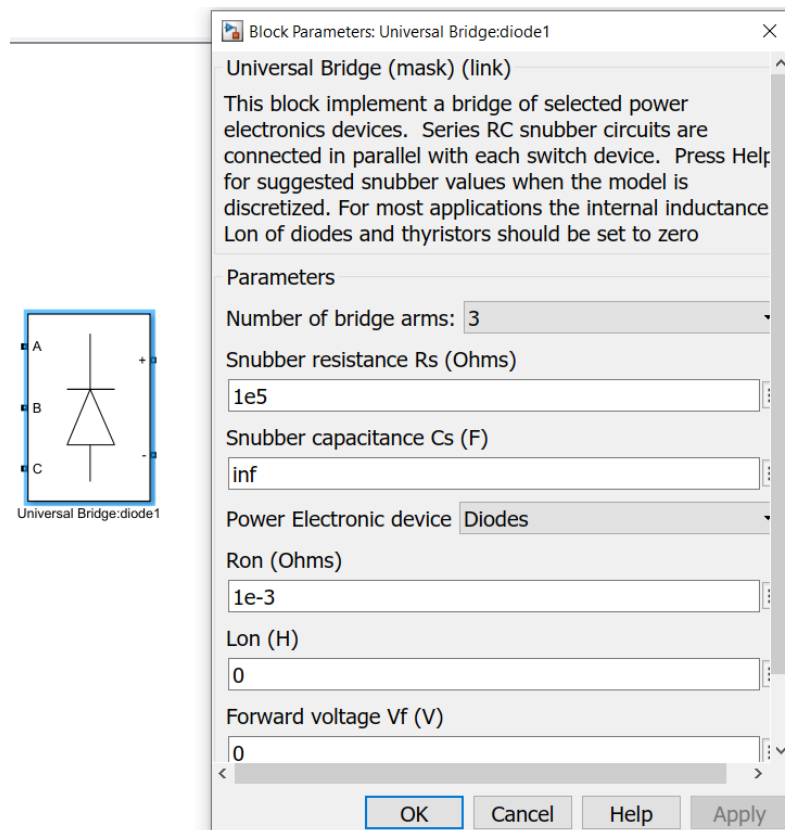
Branch type:

Resistance (Ohms):

Measurements

OK Cancel Help Apply

พารามิเตอร์ Series RLC Branch



การปรับตั้งค่า Universal Bridge แทนโพลต์ไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางบล็อกทางคณิตศาสตร์

รูปบล็อก	ชื่อ	หน้าที่
	Product	ดำเนินการผลคูณ
	Sum	ดำเนินการผลบวกและลบ
	Gain	ขยายค่าเป็นจำนวนเท่า
	Constant	ค่าคงคงที่
	Mathematical functions	ดำเนินการคณิตศาสตร์ เช่น ยกกำลัง 2



## ประวัติผู้ทำโครงการ

นายปิยะพงษ์ ไกรสร เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2544 ณ อำเภอบ้านแพง จังหวัดนครพนม จบวุฒิการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบ้านแพงพิทยาคม โดยสำเร็จการศึกษาเมื่อปี 2563 ได้มีโอกาสแข่งขันทักษะทางวิชาการด้านโครงการคณิตศาสตร์เชิงบูรณาการ จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาตลอดหลักสูตรจากมูลนิธิ ชวน รัตนรักษ์