

การพัฒนาอัลกอริทึมการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน
สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส



นางสาวมณีนรรัตน์ ผดุงศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**IMPROVEMENT OF SLIDING WINDOW WITH
FOURIER ANALYSIS ALGORITHM FOR HARMONIC
ELIMINATION IN SINGLE – PHASE POWER SYSTEMS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2020

การพัฒนาอัลกอริทึมการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดวเลื่อน
สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



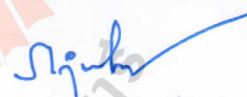
(รศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



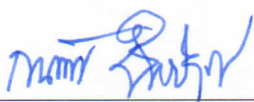
(รศ. ดร.กฤษฎณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มณีนรุตน์ ผดุงศิลป์ : การพัฒนาอัลกอริทึมการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (IMPROVEMENT OF SLIDING WINDOW WITH FOURIER ANALYSIS ALGORITHM FOR HARMONIC ELIMINATION IN SINGLE-PHASE POWER SYSTEMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 140 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยใช้วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นจากวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนที่เรียกว่า Modified Sliding Window Fourier Analysis หรือ M-SWFA ร่วมกับระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้ออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยได้มีการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์ และค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1 นอกจากนี้ได้มีการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและการทดสอบสมรรถนะในทางปฏิบัติ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กระแสอ้างอิงที่คำนวณด้วยวิธี M-SWFA บนบอร์ด DSP มีความถูกต้อง วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ฉีดกระแสชดเชยตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากวิธี M-SWFA สามารถทำให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์มากขึ้น ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอต่อการควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรง ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_r$) ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลง และยังสามารถปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียง 1

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา

มณีนรุตน์ ผดุงศิลป์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. อารีรักษ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. กอพล อารีรักษ์

MANEERAT PADUNGSIN : IMPROVEMENT OF SLIDING WINDOW
WITH FOURIER ANALYSIS ALGORITHM FOR HARMONIC
ELIMINATION IN SINGLE-PHASE POWER SYSTEMS.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D.,
140 PP.

HARMONIC ELIMINATION/SHUNT ACTIVE POWER FILTER/SWFA/
M-SWFA/HYSTERESIS/PI

This thesis presents harmonic elimination and power factor (PF) improvement in single-phase power systems by using a shunt active power filter. The proposed harmonic detection algorithm called M-SWFA is used to calculate the reference current of the shunt active power filter. This algorithm is modified from the conventional sliding window with Fourier analysis (SWFA) to achieve a unity power. In this thesis, the hysteresis controller is applied for compensating current control and the PI controller is used for DC bus voltage control. The harmonic elimination performance and power factor improvement are tested by hardware in the loop simulation that is operated by MATLAB/Simulink program and DSP board TMS320F28335 Experimenter Kit. The simulation results show that the shunt active power filter can eliminate harmonic current and correct power factor of the system. The waveform of the source current becomes more sinusoidal and the system has a unity power factor after compensation. In addition, the hardware of the harmonic elimination system was implemented to test the practical performance. The experimental results show that the reference current computed by M-SWFA algorithm

on DSP board is correct and the compensating current from the shunt active power filter can track the reference current. Moreover, the shunt active power filter can eliminate the harmonic current in the system. The waveform of the source current becomes more sinusoidal and the percentage of total harmonic distortion ($\%THD$) is decreased. The power factor value of the system is increased closely to 1 after compensation.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature ณัฐกร หงษ์ศิลป์

Advisor's Signature ดร. อ. อ. อ.

Co-advisor's Signature ดร. อ. อ. อ.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลผู้มีอุปการคุณ ทั้งทางด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการ ศึกษา ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตและการดำเนินงานวิจัย วิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและชี้แนะจุดปรับปรุงแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้มอบ คำแนะนำ และความรู้ทางวิชาการเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร. พลสิทธิ์ สานติประพันธ์ ดร. ศศิยา อุดมสุข ดร. จักรกริช ภักดีโต นางสาว ปทุมพร วงศ์ใหญ่ นายเกื้อกูล กองกาญจนะ นายชาคริต ปานแป้น นางสาวจิรวรรณ หอมจันทร์ นางสาวชวริศร เกื้อนพพิงเทียม นายฐานันตร์ ตรงใจ นายภูษิต โกศาพิเชฐ นายเจษฎา พันธุ์ออน และ นายทศไนย สุภนราพรณ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำ แลกเปลี่ยนความรู้ และให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้าน การศึกษาและการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณประพันธ์ คัทวี และคุณอาทิตย์ พรหมผา เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคุณอนุสร ปรกอบแก้ว และคุณอัญชลี รักคำกลาง เลขานุการประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกด้านเอกสารในระหว่างการศึกษา รวมถึงนางสาวธัญลักษณ์ อันดี และนายณัฐศรัณฐ์ วัชรบรรจง ผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยติดต่อ ประสานงาน และช่วยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติหน้าที่สอนปฏิบัติการในระหว่างการศึกษา

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้นายประสิทธิ์ ผดุงศิลป์ และนางอรอุษา ผดุงศิลป์ บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัย ที่มอบความรัก ให้ การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และสนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

มณีนันท์ ผดุงศิลป์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปแบบรายงาน.....	6
2 ปรัชญารวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก.....	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชย สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	28
2.7 สรุป.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนา.....	32
3.1	บทนำ.....	32
3.2	การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA).....	32
3.3	การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนา (M-SWFA).....	36
3.4	การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA.....	39
3.5	สรุป.....	56
4	การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	57
4.1	บทนำ.....	57
4.2	ระบบกักตุนฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	57
4.3	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส.....	58
4.3.1	โครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส.....	58
4.3.2	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_f).....	59
4.3.3	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{DC}).....	61
4.4	การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส.....	63
4.5	การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	67
4.6	การจำลองสถานการณ์การกักตุนฮาร์มอนิก.....	68
4.7	สรุป.....	79
5	การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกักตุนฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	80
5.1	บทนำ.....	80

สารบัญ (ต่อ)

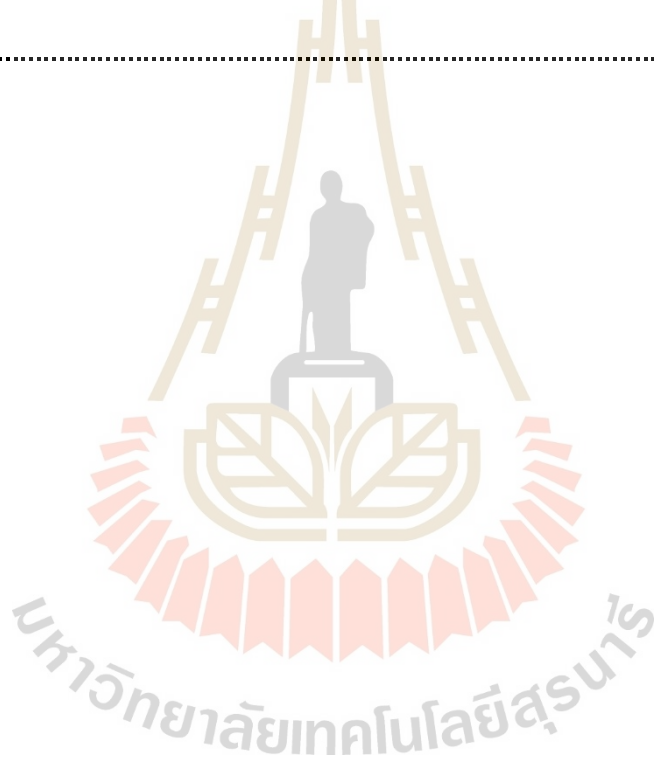
หน้า

5.2	การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	80
5.2.1	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	81
5.2.2	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	84
5.2.3	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สำหรับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง.....	88
5.2.4	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส.....	93
5.2.5	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและวงจรขับเคลื่อน.....	97
5.3	ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	99
5.3.1	ผลการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA.....	101
5.3.2	ผลการทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	102
5.4	สรุป.....	106
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	107
6.1	สรุป.....	107
6.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	109
	รายการอ้างอิง.....	110
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสแบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	114

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข	โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ของระบบการจัดฮาร์ดมอณิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	123
ภาคผนวก ค	โค้ดโปรแกรมภาษาซีระบบการจัดฮาร์ดมอณิกด้วยวงจรรองกำลัง แอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	129
ภาคผนวก ง	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	138
ประวัติผู้เขียน.....		140



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและคุณสมบัติของวงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	9
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	13
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน.....	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับ วงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของ วงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	28
3.1 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 2 Arms.....	47
3.2 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms.....	49
3.3 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms.....	51
3.4 ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	55
4.1 การทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์.....	59
4.2 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย.....	77
4.3 ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ที่พิกัดกระแสโหลดต่าง ๆ.....	79
5.1 รายละเอียดแต่ละพินของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit.....	89
5.2 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

5.3 ผลค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่า PF ของระบบไฟฟ้า.....	106
--	-----



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	ระบบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	2
1.2	แผนภาพระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	5
2.1	วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน.....	14
2.2	แผนภาพของการปรัทัศน์วรรณกรรม.....	31
3.1	แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ A_1 และ B_1	34
3.2	แผนภาพแสดงขั้นตอนการโปรแกรมตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA.....	36
3.3	แผนภาพแสดงขั้นตอนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA.....	38
3.4	การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335.....	39
3.5	แผนภาพรูปการทำงานการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	40
3.6	ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	41
3.7	ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA กรณีลดขนาดกระแสโหลด.....	42
3.8	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีทดสอบ เพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	43
3.9	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีทดสอบ ลดขนาดกระแสโหลด.....	44
3.10	สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 2 Arms.....	46
3.11	สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms.....	48
3.12	สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชย ที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่าย กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	54
3.14 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่าย กรณีลดขนาดกระแสโหลด.....	54
4.1 ระบบกำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส.....	58
4.2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส.....	59
4.3 สเปกตรัมของกระแสโหลดในระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำลังฮาร์มอนิก.....	60
4.4 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ.....	62
4.5 แผนภาพลือระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส.....	63
4.6 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส.....	63
4.7 แผนภาพลือระบบควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	67
4.8 ระบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการกำลังฮาร์มอนิก กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	69
4.9 ระบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการกำลังฮาร์มอนิก กรณีลดขนาดกระแสโหลด.....	69
4.10 ผลการกำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	70
4.11 ผลการกำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน กรณีลดขนาดกระแสโหลด.....	71
4.12 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	72
4.13 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส กรณีลดขนาดกระแสโหลด.....	72
4.14 ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณิ ลดขนาดกระแสไหลด.....	74
4.16 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชยกำลังฮาร์มอนิก.....	76
4.17 ผลการเปรียบเทียบมูฟเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่าย กรณีเพิ่มขนาดกระแสไหลด.....	78
4.18 ผลการเปรียบเทียบมูฟเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่าย กรณีลดขนาดกระแสไหลด.....	78
5.1 ระบบที่พิจารณาสร้างฮาร์ดแวร์กำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอททิฟ แบบขนาน.....	81
5.2 ระบบฮาร์ดแวร์กำลังฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอททิฟแบบขนาน.....	81
5.3 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น TSB-10M.....	82
5.4 ตัวเหนี่ยวนำ L_s ขนาด 10 μ H.....	82
5.5 เซอร์คิตเบรกเกอร์ รุ่น S401 E-B8.....	83
5.6 ตัวเหนี่ยวนำ L_L ขนาด 20 mH.....	83
5.7 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ รุ่น GBPC3510.....	83
5.8 ชุดไหลดไหลดไฟฟ้ากระแสตรง.....	84
5.9 ตัวเหนี่ยวนำ L_R ขนาด 0.3 H.....	84
5.10 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้ารุ่น HX 10-P.....	85
5.11 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้ารุ่น LV25-P.....	85
5.12 วงจรปรงแต่งสัญญาณ.....	86
5.13 โครงสร้างของวงจรรอกแอททิฟแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่ง.....	87
5.14 วงจรรอกแอททิฟแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่ง.....	87
5.15 บอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit.....	88
5.16 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมวงจรรอกกำลังแอททิฟแบบขนาน.....	91
5.17 แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้คำนวณโปรแกรมระบบควบคุม วงจรรอกกำลังแอททิฟแบบขนานในหนึ่งรอบ.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ไอซีเบอร์ DAC712P	92
5.19 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit.....	92
5.20 โครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของวงจรควบคุมกระแสชดเชย.....	94
5.21 วงจรควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์รีเซ็ต.....	96
5.22 ผลการทดสอบวงจรควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์รีเซ็ต.....	96
5.23 ตัวเก็บประจุ C_{DC} ความจุไฟฟ้า 2800 μF	97
5.24 ตัวเหนี่ยวนำ L_f ขนาด 8 mH.....	97
5.25 ไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063.....	98
5.26 ขาสำหรับใช้เชื่อมต่อของ ไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063.....	98
5.27 วงจรจับเกด.....	98
5.28 แรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าก่อนการชดเชย.....	99
5.29 ค่า $\%THD_i$ และสเปกตรัมกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชย.....	100
5.30 ค่า PF ของระบบไฟฟ้าก่อนการชดเชย.....	100
5.31 ผลการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ด้วยวิธี M-SWFA.....	101
5.32 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	103
5.33 ค่า $\%THD_i$ และสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย.....	103
5.34 ค่า PF ของระบบไฟฟ้าหลังการชดเชย.....	104
5.35 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีเซ็ต.....	105
5.36 ผลการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงของตัวควบคุมพีไอ.....	105

บทที่ 1

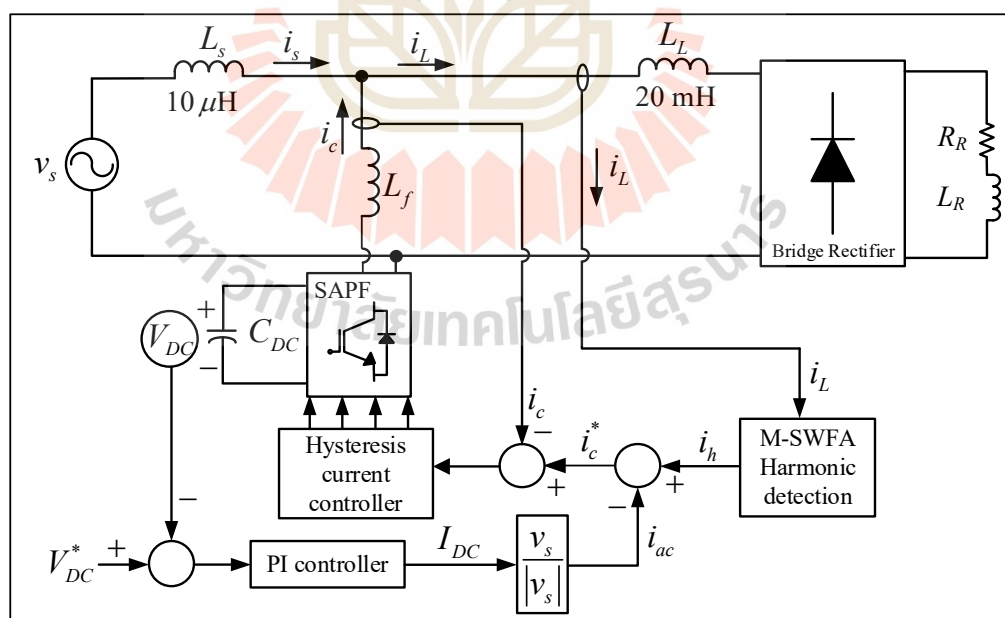
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เช่น เครื่องปรับอากาศ คอมพิวเตอร์ ตู้เชื่อม วงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ล้วนมีคุณสมบัติเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่ส่งผลเสียหลายประการ ได้แก่ เกิดความร้อนและกำลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องมือวัดทำงานผิดพลาดและมีอายุการใช้งานสั้นลง (M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka, 2002) เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารและอุปกรณ์ต่าง ๆ (Bhim Singh, et al., 1999) การกำจัดฮาร์มอนิกให้ลดลงหรือหมดไปจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะนอกจากจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิกแล้วยังช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่ถูกนำมาใช้งานจากอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่ามี 3 วิธี คือ วิธีการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) ซึ่งนิยมใช้ในการลดปริมาณฮาร์มอนิกเฉพาะบางกลุ่มหรือบางอันดับ วิธีการใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter: APF) ที่สามารถเลือกกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งแบบทุกอันดับและบางอันดับขึ้นอยู่กับ การเลือกกำหนดตรวจสอบฮาร์มอนิก และวิธี การใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter: HPF) ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่าง PPF และ APF เพื่อเสริมประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังไม่ประสบปัญหาเรโซแนนซ์แบบการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2559)

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วน โดยส่วนแรก คือ วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ส่วนที่สอง คือ ส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Detection) ทำหน้าที่คำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน ส่วนที่สาม คือ

ส่วนควบคุมกระแสชดเชย (Compensating Current Control) และเทคนิคการสวิตช์ (Switching Technique) ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีลักษณะเป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก และส่วนสุดท้าย คือ ส่วนการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (DC Bus Voltage Control) ทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีอุปกรณ์สวิตช์ IGBT เป็นโครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (M. Rukonuzzaman, M. Nakaoka, 2002) และดำเนินการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) (M.EI-Habrouk, M.K. Darwish, 2001) ให้สามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ช่วยปรับปรุ้ค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าได้ โดยเรียกวิธีการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นนี้ว่าวิธี Modified-Sliding Window with Fourier Analysis หรือ M-SWFA ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) (P.A. Dahono, 2009) และตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ตามลำดับ (พลสิทธิ์ สานติประพันธ์, 2554)



รูปที่ 1.1 ระบบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้และพัฒนาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.2.4 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

1.2.5 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

1.2.6 เพื่อสร้างระบบฮาร์ดแวร์กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสและพีไอ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 พิจารณาการจัดฮาร์มอนิกเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหakeresฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

1.3.2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

1.3.3 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปใช้โปรแกรม Simulink บน MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit

1.3.4 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่พิจารณากำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่นที่ต่อเข้ากับโหลดตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

1.3.5 การวัดประสิทธิภาพการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่ายเท่านั้น โดยค่าดังกล่าวจะต้องมีค่าลดลงภายหลังการชดเชย และการวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจะใช้ค่า PF ซึ่งจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.41 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.42 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบที่พิจารณาไม่มีฮาร์มอนิกปะปน

1.5 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่ง คือ การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและศึกษาวิธีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ได้แก่ โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ส่วนที่สอง คือ การพัฒนาวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก SWFA ให้สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit เพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธี SWFA แบบดั้งเดิม และวิธี M-SWFA ที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ ส่วนที่สาม คือ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในระบบกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ได้แก่ การออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรง ค่าตัวเก็บประจุดีซี และค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสที่ใช้ในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชย และการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง รวมถึงการจำลองสถานการณ์กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ และในส่วนที่สี่ คือ การสร้างระบบฮาร์ดแวร์กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสและการทดสอบระบบดังกล่าว โดยระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1.2

ส่วนที่ 1 การสำรวจปฏิกิริยาระบบการกักเก็บแอมอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส		
1.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน - แบบ Half-bridge ตัวเก็บประจุแยก - แบบ H-bridge - แบบ Cascade Multi-level ตัวเก็บประจุแยก		งานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ H-bridge เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดี และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่าโครงสร้างที่มีตัวเก็บประจุแยก
1.2 วิธีการตรวจจับสนามอนิก - วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง - วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส - วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบเร็ว - วิธีตัวกรองทำนายแบบปรับคัว - วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน - วิธีโครงข่ายประสาทเชิงปรับตัว		งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน ข้อดี - ให้ผลคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องแม่นยำ - มีการประมวลผลที่รวดเร็ว ข้อเสีย - ไม่สามารถลดขนาดของไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบเพื่อลดขนาดตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้
1.3 การควบคุมกระแสชดเชย - ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี - ตัวควบคุมมัลติโรโซแนนซ์ - วิธีการควบคุมแบบทำนาย - วิธีการควบคุมแบบดิจิตอล - วิธีการควบคุมแบบเคบิต - วิธีการควบคุมแบบทำซ้ำ - วิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส - วิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน - วิธีการควบคุมแบบกรอบอ้างอิงซิงโครนัส		งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีในการตอบสนองทางพลวัตของรูปสัญญาณที่มีความถี่สูง เป็นวิธีที่รวมการควบคุมกระแสและการสวิตช์เข้าด้วยกัน และง่ายต่อการสร้างจริง
1.4 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง - การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ - การควบคุมด้วยวิธีฟuzzyลอจิก		งานวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากให้สมรรถนะการทำงานที่ดี ง่ายต่อการสร้างจริง
ส่วนที่ 2 การพัฒนาวิธีการตรวจจับสนามอนิกและการจำลองสถานการณ์		
2.1 การพัฒนาวิธีการตรวจจับสนามอนิก SWFA ให้สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ โดยเรียกวิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้ว่าวิธี M-SWFA		
2.2 การจำลองสถานการณ์ระบบกักเก็บแอมอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับสนามอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวิธี SWFA และวิธี M-SWFA โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติแทนวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน		
ส่วนที่ 3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบการกักเก็บแอมอนิก		
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน - ค่าแรงดันบัสไฟตรง - ค่าความเหนี่ยวนำวงจรกรอง - ค่าตัวเก็บประจุคิซึ		
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส - ความถี่สวิตช์ของไอจีบีที - ขนาดแถบฮิสเตอร์ซิส	3.3 ค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ - ค่าอัตราขยาย K_p และ K_i	
3.4 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบกักเก็บแอมอนิกและตัวควบคุม		
ส่วนที่ 4 สร้างระบบฮาร์ดแวร์การกักเก็บแอมอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส		
4.1 การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกักเก็บแอมอนิก - ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น - วงจรตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า - โปรแกรมตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี M-SWFA และโปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง - วงจรของตัวควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์ซิส - วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานที่ใช้โมดูล ไอจีบีทีและวงจรขับเคลื่อน		
4.2 การทดสอบสมรรถนะการกักเก็บแอมอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบฮาร์ดแวร์กักเก็บแอมอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานที่สร้างขึ้น		

รูปที่ 1.2 แผนภาพระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้ด้านการกำจัดการแผ่สาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน

1.6.3 ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับวิธีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนาขึ้น

1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.6.5 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

1.6.6 ได้โปรแกรมจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบกำจัดการแผ่สาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.6.7 ได้ระบบฮาร์ดแวร์การกำจัดการแผ่สาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

1.6.8 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มรายงาน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอผลการปฏิสนั้รณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการกำจัดการแผ่สาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 3 นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA) และการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนา (M-SWFA) สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของทั้งสองวิธีด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 4 นำเสนอโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมทั้งสองส่วน และการจำลอง

สถานการณ์ทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดสารมอริกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างระบบฮาร์ดแวร์กำจัดสารมอริกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และผลการทดสอบของระบบ

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีทั้งหมด 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซีสำหรับระบบจำลองสถานการณ์การตรวจจับกระแสสารมอริกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสแบบฮาร์ดแวร์ในรูป ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซีสำหรับระบบจำลองสถานการณ์กำจัดสารมอริกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสแบบฮาร์ดแวร์ในรูป ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซีระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

องค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แนวคิดและวิธีการที่หลากหลายถูกคิดค้นและพัฒนาเพื่อใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าให้ลดลงหรือหมดไป การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงถือเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่จะช่วยให้ผู้วิจัยทราบถึงแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิก รวมถึงสามารถเลือกใช้งานวิธีการต่าง ๆ และพัฒนาองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมได้ หนึ่งในวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยม คือ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบมากกว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีรูปแบบโครงสร้างของวงจรและวิธีการควบคุมการทำงานที่หลากหลาย ในบทนี้จึงได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยและเทคนิคการสวิตช์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยผลการสำรวจงานวิจัยทั้ง 5 ส่วนดังกล่าวจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2 – 2.6 ตามลำดับ ซึ่งมีตารางรายละเอียดประกอบไปด้วย ปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัย และเนื้อหาสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยโดยสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีหลากหลายประเภท คุณสมบัติการทำงานของวงจรและค่าใช้จ่ายในการสร้างมีความแตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวงจรรอกกำลังแอ็กทิฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995	David A. Torrey and Adel M. A. M. Al-Zamel	นำเสนอการออกแบบและการใช้งานของวงจรรอกกำลังแอ็กทิฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ H-bridge โครงสร้างวงจรประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 1 ตัว สวิตช์ 4 ตัว และตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว โดยวงจรดังกล่าวสามารถสร้างกระแสชดเชยผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อลดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นหลายๆ โหลดต่อขนานกันได้ นอกจากนี้ยังได้มีการแนะนำวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ Half-bridge ที่มีโครงสร้างวงจรเป็นตัวเก็บประจุ 2 ตัว และสวิตช์ 2 ตัว ซึ่งสามารถใช้แทนวงจรแบบ H-bridge ได้
1999	L. Benchaita, S. Saadate, and A. Salem Nia	นำเสนอการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวงจรรอกกำลังแอ็กทิฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแสเพื่อลดผลจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า วงจรทั้งสองชนิดสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีราคาถูกกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสและไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำภายในแหล่งจ่ายของระบบ อย่างไรก็ตาม วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบน้อยกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส จึงอาจทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสมีประสิทธิภาพดีกว่าในระบบไฟฟ้าที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงสูง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra	นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้าง การควบคุม การออกแบบ การใช้งานในทางปฏิบัติ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิก และสรุปแนวทางในการเลือกใช้งานวงจรรอกกำลังแอกทีฟ นั่นคือวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเหมาะต่อการใช้ชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ร่วมกับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมเหมาะกับการใช้ชดเชยแรงดันฮาร์มอนิก และรักษาความสมดุลและระดับของแรงดัน วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบไฮบริดเหมาะกับการใช้ชดเชยกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ร่วมกับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และการรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่าย
2000	W.-L.Lu, S.-N.Yeh, J.-C.Hwang and H.-PHsieh	นำเสนอการสังเคราะห์วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่สามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและค่าตัวประกอบกำลังได้ โดยมีลักษณะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ Half-bridge ที่มีโครงสร้างเป็นตัวเก็บประจุ 2 ตัว สวิตช์ 2 ตัว และตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว นอกจากนี้ยังเพิ่มวงจร DC chopper เข้ากับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำหน้าที่เป็น UPS และชาร์จแบตเตอรี่สำรองในระบบไฟฟ้าได้
2000	M.El-Habrouk, M.K.Darwish and P.Mehta	นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างและการใช้งานวงจรรอกกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและชนิดแหล่งจ่ายกระแส พบว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายกระแสโดยส่วนใหญ่ถูกใช้งานในระบบไฟฟ้าสามเฟส และมีความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานมากกว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวงจรรอกกำลังแอทฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	B.-R. Lin and T.-Y. Yang	นำเสนอวงจรรอกกำลังแอทฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ Half-bridge ซึ่งวงจรที่ได้นำเสนอมีการใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่น้อยกว่าวงจรแบบ Neutral-point-clamped และแบบ Flying capacitor อีกทั้งยังรองรับการควบคุมแบบ Three-levels PWM ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้
2014	W. R. N. Santos, et al.	นำเสนอวงจรรอกกำลังแอทฟแบบยูนิเวอร์แซลที่มีโครงสร้างตัวเก็บประจุแยก เป็นวงจรรอกกำลังที่รวมวงจรรอกแอทฟแบบอนุกรมและแบบขนานเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถชดเชยได้ทั้งแรงดันฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกและกำลังไฟฟ้รีแอทฟ
2016	Yanshen Hu, Yunxiang Xie, Dianbo Fu, and Li Cheng	นำเสนอวงจรรอกกำลังแอทฟแบบขนานที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีการทำงานแบบ 5-level โดยโครงสร้างวงจรที่นำเสนอได้ลดจำนวนสวิตช์ลงจากโครงสร้างแบบดั้งเดิมซึ่งมี 8 ตัวเหลือเพียง 4 ตัว นอกจากนี้ยังมีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวของวงจรให้มีความสมดุล ทำให้วงจรรอกกำลังแอทฟสามารถลดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

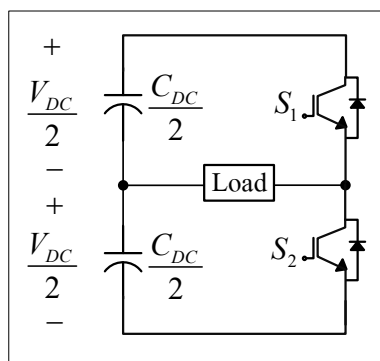
จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง และคุณสมบัติของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ พบว่า วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสามารถแบ่งประเภทตามการเชื่อมต่อออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน (Shunt active power filter) วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบอนุกรม (Series active power filter) และวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบไฮบริด (Hybrid active power filter) วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแต่ละประเภทมีจุดเด่นและคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน โดย วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานมีความเหมาะต่อการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟมากที่สุด ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบอนุกรมเหมาะต่อการชดเชยแรงดันฮาร์มอนิกและรักษาความสมดุลและระดับของแรงดัน ไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมากที่สุด ส่วนวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบไฮบริดเหมาะต่อระบบที่ต้องการการชดเชยทั้งกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟ และการรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ดังนั้น วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟที่เลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน

วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทตามชนิดของแหล่งจ่าย คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) และวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติและข้อแตกต่างของวงจรทั้งสองประเภทแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 (M.El-Habrouk et al., 2000)

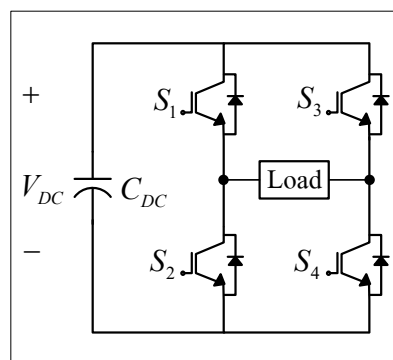
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

คุณสมบัติ	ประเภทของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	
	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส
1. ระบบไฟฟ้ากำลังที่นิยมใช้	หนึ่งเฟสและสามเฟส	สามเฟส
2. หลักการทำงาน	ใช้ดูปควบคุมกระแสควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อสร้างกระแสชดเชยฉีดเข้าที่จุด PCC	ฉีดกระแสชดเชยซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจรเข้าที่จุด PCC โดยตรง
3. พิกัดกำลังไฟฟ้า	พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำ หรือ พิกัดกำลังไฟฟ้าปานกลาง	พิกัดกำลังไฟฟ้าปานกลาง
4. ความซับซ้อนในการควบคุมการทำงาน	ง่าย	ยาก
5. ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก	ดี	ดี
6. ความถี่การสวิตช์	2 — 25 kHz	20 — 30 kHz
7. แหล่งพลังงานของวงจร	ตัวเก็บประจุ	ตัวเหนี่ยวนำ
8. ราคา	ถูก	แพง

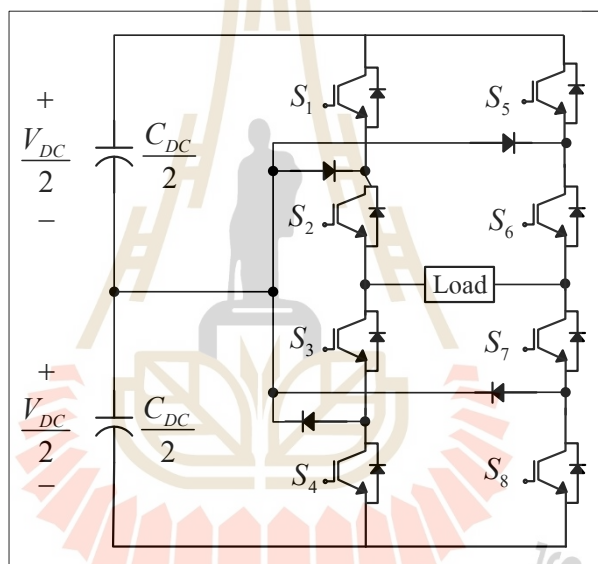
จากคุณสมบัติต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งมีความเหมาะสมในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายกระแส



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half-bridge



(ข) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H-bridge



(ค) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Cascade 5 level

รูปที่ 2.1 วงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

วงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสมีรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half-bridge วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H-bridge และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Cascade-multilevel ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้ส่งผลให้จำนวนของอุปกรณ์ จุดเด่นจุดด้อยของวงจรมีความแตกต่างกัน โดยสามารถสรุปคุณสมบัติของโครงสร้างวงจรแต่ละรูปแบบได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

คุณสมบัติ	รูปแบบโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน		
	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบ Half-bridge	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบ H-bridge	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบ Cascade-multilevel
1. จำนวนตัวเก็บประจุ	2	1	2
2. จำนวนสวิตช์	2	4	มากกว่าหรือเท่ากับ 4
3. จุดเด่น	จำนวนอุปกรณ์ สวิตช์น้อย	ง่ายต่อการควบคุม แรงดันตกคร่อมตัว เก็บประจุ	ให้ประสิทธิภาพการ การแผ่กระจายที่ดีที่สุด
4. จุดด้อย	ต้องการการควบคุม แรงดันตกคร่อมตัว เก็บประจุสองตัว	ต้องการตัวเก็บประจุ ที่มีค่าความจุไฟฟ้า สูง	- จำนวนอุปกรณ์สวิตช์มาก - ต้องการการควบคุมแรงดัน ตกคร่อมตัวเก็บประจุสอง ตัว - ราคาสูง

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H-bridge เนื่องจากง่ายต่อการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และมีราคาใกล้เคียงกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half-bridge แต่ไม่สูงเท่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Cascade-multilevel และสามารถให้ประสิทธิภาพการแผ่กระจายที่ดีต่อการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H-bridge ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ 3 ส่วนที่จำเป็นต้องมีการออกแบบ เพื่อให้วงจรมีสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ แรงดันบัลไฟตรง ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	C.Y. Hsu and H.Y.Wu	นำเสนอการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยใช้หลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) ทำให้สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กแต่เพียงพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในการฉีดกระแสชดเชยได้
1997	David M.E. Ingram and Simon D. Round	นำเสนอการออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยการคำนวณจะใช้เวลาประมาณให้ขนาดกระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่มีค่าสูงสุดเป็นค่ากระแสชดเชยในตัวเหนี่ยวนำ ผลการคำนวณจะให้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่เป็นขอบเขตค่าสูงสุด ซึ่งจะต้องเลือกค่าที่อยู่ในช่วงดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	Thomas, T. Haddad, K. Joos, G. and Jaafari A.	นำเสนอวิธีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยให้ผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุ โดยการคำนวณจะใช้การพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันไฟฟ้าของระบบ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรง โดยกำหนดให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของผลรวมแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่แหล่งจ่ายกับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
2000	M.El-Habrouk, M.K.Darwish and P.Mehta	รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่า ค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ถูกเลือกใช้เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก จะมีค่า 1.3 ถึง 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย
2005	Cupertino, Marinelli, Zanchetta, and Sumner	นำเสนอวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันบัลไฟตรง ค่าตัวเก็บประจุ และค่าตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดทางปัญญาระดับสูงที่เรียกว่า เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Narongrit T., Areerak K-L., and Srikaew A.	นำเสนอวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกดีที่สุด
2009	V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh	กล่าวถึงการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานว่าควรมีค่ามากกว่าค่ายอดแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยกำหนดให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าเท่ากับ 1.2 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย

จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า การออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงมีขอบเขตที่ค่อนข้างกว้าง งานวิจัยต่าง ๆ มีการเลือกใช้ค่าแรงดันบัลไฟตรงตั้งแต่ 1.2 ถึง 2 เท่า ของค่ายอดแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม หลักการสำคัญร่วมกันของการออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงในงานวิจัยเหล่านี้ คือ การออกแบบค่าแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่ามากกว่าค่ายอดแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าแรงดันบัลไฟตรงประมาณ 1.1 เท่า ของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ทั้งนี้ เพื่อไม่ให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงสูงจนเกินไป สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ได้ง่ายและราคาไม่แพง ส่วนการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ คือ วิธีของ David M.E. Ingram และวิธีการออกแบบค่าตัวเก็บประจุได้เลือกใช้การออกแบบตามวิธีของ Thierry Thomas เนื่องจากมีความง่ายต่อการออกแบบ และให้ความยืดหยุ่นต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ที่อยู่ภายในขอบเขตที่มีการออกแบบไว้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเป็นการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสำหรับนำมาใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในการฉีดกระแสชดเชย วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสมีหลายวิธีให้เลือกใช้งาน ซึ่งแต่ละวิธีมีความซับซ้อนและการคำนวณที่แตกต่างกัน และกระแสอ้างอิงที่ได้ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกำจัดฮาร์มอนิกภายหลังการชดเชยที่แตกต่างกันด้วย ในหัวข้อนี้จึงนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสวิธีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Jinjun Liu, Jun Yang, and Zhaoan Wang	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งเดิมเป็นวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยมีการสมมติเฟสของแรงดันและกระแสเพิ่มเติมเพื่อใช้อ้างอิงในการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบเดียวกันกับที่ใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งให้ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่แม่นยำทั้งในช่วงพลวัตและในช่วงสภาวะคงตัว และมีการคำนวณน้อยกว่าการใช้วิธีฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) โดยตรง
2001	M.El-Habrouk and M.K.Darwish	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนหรือวิธี SWFA ที่ถูกพัฒนาให้มีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่าวิธี FFT และยังคงให้ผลการคำนวณที่แม่นยำ เหมาะกับการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกแบบเวลาจริง (real time) และเหมาะกับการประมวลผลทางดิจิทัลบนบอร์ด DSP

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี โครงข่ายประสาทแบบปรับตัว โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้การฝึกสอน ทำให้สามารถระบุกระแสฮาร์มอนิกตามเวลาจริงได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยสามารถให้ผลลัพธ์ภายในหนึ่งคาบเวลาของสัญญาณมูลฐาน
2002	Sébastien Mariethoz, and Alfred C. Rufer	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธี FFT โดยมีการทดสอบการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสองโครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบวงเปิด ซึ่งใช้การคำนวณจากกระแสโหลด และ โครงสร้างแบบวงปิด ซึ่งใช้การคำนวณจากกระแสกริด (Grid current) จากการทดสอบพบว่า การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในโครงสร้างแบบวงปิดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าโครงสร้างแบบวงเปิด เนื่องจากสามารถกำจัดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบวงเปิดได้ อย่างไรก็ตาม ทั้งสองวิธีให้ค่ากระแสอ้างอิงที่สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นและชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบไฟฟ้าได้
2003	M.Saitou, N. Matsui and T. Shimizu	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส หรือวิธี SRF ด้วยการประยุกต์ใช้การแปลงฮิลเบิร์ต ซึ่งเดิมเป็นวิธีที่ถูกใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส โดยวิธีดังกล่าวสามารถประมาณองค์ประกอบฮาร์มอนิกทั้งในสถานะชั่วครู่และสถานะคงตัวได้ดี

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Mario Gonzalez, Victor Cardenas, and Felipe Pazos	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกจะมีการสมมติเฟสของกระแสเพิ่มเติมเช่นเดียวกันกับวิธี PQ วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนในการสร้างจริง นอกจากนี้วิธีดังกล่าวสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและกำลังรีแอกทีฟได้ ทำให้สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้
2005	Byung-Moon Han, Byong-Yeul Bae, and Seppo J. Ovaska	นำเสนอการปรับปรุงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยตัวกรองทำนายแบบปรับตัวได้ โดยลดปัญหาที่เกิดจากการใช้อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (Least Mean Square: LMS) ที่อยู่ในตัวกรองทำนายปรับตัวแบบดั้งเดิม และสร้างตัวกรองที่สามารถปรับตัวและคาดคะเนกระแสมูลฐานเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากการทดสอบใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองแอกทีฟทั้งบนโปรแกรม MATLAB และฮาร์ดแวร์จริง พบว่าวงจรกรองสามารถลดกระแสชดเชยเพื่อลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Linash P. Kunjumammed, and Mahesh K.Mishra	นำเสนอเปรียบเทียบอัลกอริทึมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยอัลกอริทึมดังกล่าว ได้แก่ วิธีการคูณฟังก์ชันไซน์ วิธี SRF วิธี PQ และวิธีการแปลงฟูริเยร์ ซึ่งจากผลการสำรวจพบว่า วิธีการแปลงฟูริเยร์เป็นวิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากเวลาการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ค่อนข้างสั้น และให้ผลการทำงานที่ดีแม้แหล่งจ่ายแรงดันจะมีความผิดเพี้ยน
2008	Maurizio Cirrincione, Marcello Pucci, and Gianpaolo Vitale	นำเสนอการตรวจจับกระแสกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองนอตช์ (Notch Filter) และวงจรกรองแถบ (Band Filter) ร่วมกับวิธีโครงข่ายประสาท (Neural Network) ที่มีพื้นฐานจาก ADALINE สำหรับการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก นอกจากนี้มีการเลือกใช้ LMS เพื่อปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของตัวประสาทแบบออนไลน์แทนที่การใช้วิธีการสอนในโครงข่ายประสาทแบบทั่วไป ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า วงจรกรองสามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ ได้ดี
2009	Maurizio Cirrincione, Marcello Pucci, Gianpaolo Vitale and Abdellatif Miraoui	นำเสนอเปรียบเทียบผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี วงจรกรองโครงข่ายประสาทแบบปรับตัว (Adaptive Neural Filtering) กับการใช้วิธี PQ พบว่าวิธีการทั้งสองให้ประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน แต่วิธีที่ได้แนะนำให้ผลที่ถูกต้องและไม่ได้รับผลกระทบเมื่อความถี่กริด (Grid frequency) เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่สามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังในระบบแบบวิธี PQ ได้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการใช้วิธี PQ ในรูปแบบทั่วไป โดยมีการจำลองผลการทำงานบนโปรแกรม Simulink และประมวลผลผ่านบอร์ด DSP เพื่อเปรียบเทียบกับวิธี PQ แบบดั้งเดิม จากผลการทดสอบ พบว่า การใช้วิธี PQ รูปแบบทั่วไปที่ได้ นำเสนอให้ผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ดีกว่า
2014	S. Tiyyarachakun, K-L. and K-N. Areerak	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการใช้วิธี PQ ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน ซึ่งให้ผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้วิธี PQ เนื่องจากการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน สามารถทำให้ตรวจจับองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างแม่นยำ
2014	Bruno A. Angélico, Leonardo B.G. Campanhol and Sérgio A. Oliveira da Silva	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF โดยใช้ Phase Lock Loop (PLL) ช่วยคำนวณมุมเฟสกริดและสร้างพิกัดเวกเตอร์ซึ่งโครนัสหนึ่งหน่วยเพื่อนำไปใช้ในวิธีการดังกล่าว โดยกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้มีความถูกต้อง ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถชดเชยฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมมีค่าลดลง

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ทั้งวิธีการดั้งเดิมและวิธีการที่ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับเป็นทางเลือกในการใช้งาน โดยในแต่ละวิธีจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในตารางข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน หรือวิธี SWFA เนื่องจากวิธีดังกล่าวใช้การวิเคราะห์ฟูรีเยร์ซึ่งให้ผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ

ขณะหนึ่ง วิธีกรอบอ้างอิงเชิงโครนัส และวิธีการคูณฟังก์ชันไซน์ ที่ใช้วงจรกรองอีกทั้งยังมีความรวดเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธี FFT

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีหลากหลายวิธี และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ถูกต้องตามกระแสอ้างอิงและสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการสำรวจวิธีการควบคุมและตัวควบคุมต่าง ๆ ที่ถูกใช้ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995	David A. Torrey, and Adel M. A. M. Al-Zamel	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Sliding Mode Control) ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งมีจุดเด่นที่ความง่ายในการออกแบบและสร้างจริง ลักษณะกระแสชดเชยคล้อยตามกระแสอ้างอิง และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีค่าลดลงภายหลังการชดเชย
2000	Sedighy M., Shashi B. Dewan, and Francis P. Dawson	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งมีการออกแบบและคำนวณผลการประวิงเวลาร่วมด้วย ทำให้การตอบสนองของกระแสชดเชยต่อสัญญาณอ้างอิงมีประสิทธิภาพ โดยกระแสชดเชยสามารถตามรอยกระแสอ้างอิงและมีการประวิงเพียง 2 จุดเท่านั้น

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	K. Nishida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวิธีเดดบีต (Deadbeat Current Control) โดยใช้ Adaptive Line Enhancer (ALE) ช่วยในการทำนายความผิดพลาดของการควบคุมกระแสชดเชย ทำให้การควบคุมมีความยืดหยุ่น
2004	Ramon Costa-Castelló, Robert Griñó, and Enric Fossas	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยแบบดิจิทัลด้วยวิธีการควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิงและชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่มีอันดับสูงได้ดี
2008	José Matas, Luis García de Vicuña, J. Miret, and al.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีการควบคุมแบบโหมคเลื่อนในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งเหมาะกับวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา มีความยืดหยุ่นและไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในระบบ
2008	P.A. Dahano	นำเสนอการควบคุมและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวิธีฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิม และแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแถบแบนด์คู่และประยุกต์เทคนิคการสวิตช์แบบ Symmetrical unipolar PWM เข้าด้วยกัน โดยมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของทั้งสองวิธี พบว่า ทั้งสองวิธีตอบสนองในสภาวะพลวัตได้ดี แต่วิธีฮิสเตอร์ซิสแบบใหม่ใช้ความถี่สวิตช์น้อยกว่าในการสร้างกระแสเอาต์พุตจากวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิง

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Maurizio Cirrincione, Marcello Pucci, Gianpaolo Vitale and A. Miraoui	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายแรงดันด้วยตัวควบคุมมัลติเรโซแนนซ์ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่าง ๆ ตัวควบคุมแต่ละตัวจะต้องมีการปรับจูนค่าแบบออฟไลน์ก่อนการใช้งาน ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้เป็นอย่างดี ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่แหล่งจ่ายมีค่าลดลง
2014	Bruno A. Angélico, Leonardo B.G. Campanhol and Sérgio A. Oliveira da Silva	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีไอและพีไอดี ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งตัวควบคุมทั้งสองให้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุมพีไอดีให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่แหล่งจ่ายต่ำกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ
2014	Shafiuzzaman K. Khadem, Malabika Basu, and Michael F. Conlon	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีฮิสเทอรีซิสและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Ant'onio Martins, Sandro Vale, Vitor Sobrado, and Adriano Carvalho	นำเสนอเปรียบเทียบการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟสามวิธี คือ วิธีการควบคุมแบบพีไอ วิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส และวิธีการควบคุมแบบกรอบอ้างอิงซิงโครนัส จากผลการทดลอง พบว่า การควบคุมกระแสแบบพีไอและแบบฮิสเตอร์ซิสให้ประสิทธิผลที่ดีมาก มีความง่ายและวิธีฮิสเตอร์ซิสมีการตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าวิธีการกรอบอ้างอิงซิงโครนัส
2015	Sangshin Kwak, Soo-Eon Kim, and Jun-Cheol Park	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีการทำนายสองแบบที่ถูกพัฒนาจากเดิมด้วยการใช้กระบวนการ Optimization เพื่อลดความผิดพลาดของกระแสที่อยู่ในคาบเวลาการชักตัวอย่างในอนาคต ทำให้สามารถลดความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของกระแสชดเชยและลดการกระเพื่อมของสัญญาณลงได้

จากการสำรวจผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะเป็นไปตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับกระแสอาร์มอนิก พบว่า มีวิธีการควบคุมกระแสชดเชยทั้งหมด 10 วิธี ได้แก่ วิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน วิธีการควบคุมแบบดิจิตอล วิธีการควบคุมแบบเดบิต วิธีการควบคุมแบบทำซ้ำ วิธีฮิสเตอร์ซิส ตัวควบคุมมัลติเรโซแนนซ์ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี วิธีการควบคุมแบบกรอบอ้างอิงซิงโครนัส และวิธีการทำนาย ดังที่ได้นำเสนอในตารางที่ 2.6 แต่วิธีที่ง่ายและให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย คือ วิธีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์พีดับเบิ้ลยูเอ็ม และวิธีฮิสเตอร์ซิส แต่วิธีฮิสเตอร์ซิสมีความไวต่อการตอบสนองในทางพลวัตที่ดีกว่า สามารถควบคุมกระแสชดเชยได้โดยไม่ต้องใช้เทคนิคการสวิตช์เข้ามาเกี่ยวข้อง และง่ายต่อการสร้างวงจรในทางปฏิบัติ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิสสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอททิฟ

ผลการสำรวจวิธีการและตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง (V_{DC}) ของวงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอททิฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	J.-C. Wu and H.-L. Jou	ใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงในวงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบสามารถคงค่าแรงดันบัลไฟตรงไว้ได้
2002	M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka	ใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งผลการทำงานของตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีฮิสเทอรีซิส ทำให้การฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองมีลักษณะตามกระแสอ้างอิง และตัวควบคุมพีไอสามารถรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าคงที่ได้
2010	Ilhami Colak, Ramazan Bayindir	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก โดยมีการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีซีลอจิกสามารถรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าคงที่ได้ ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในการออกแบบ และเนื่องจากการควบคุมใช้ผลต่างของกระแสชดเชยและกระแสอ้างอิงที่ความถี่มูลฐานแทนการใช้ผลต่างของแรงดันบัลไฟตรงจริงและแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง จึงไม่จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดระดับแรงดันบัลไฟตรง

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

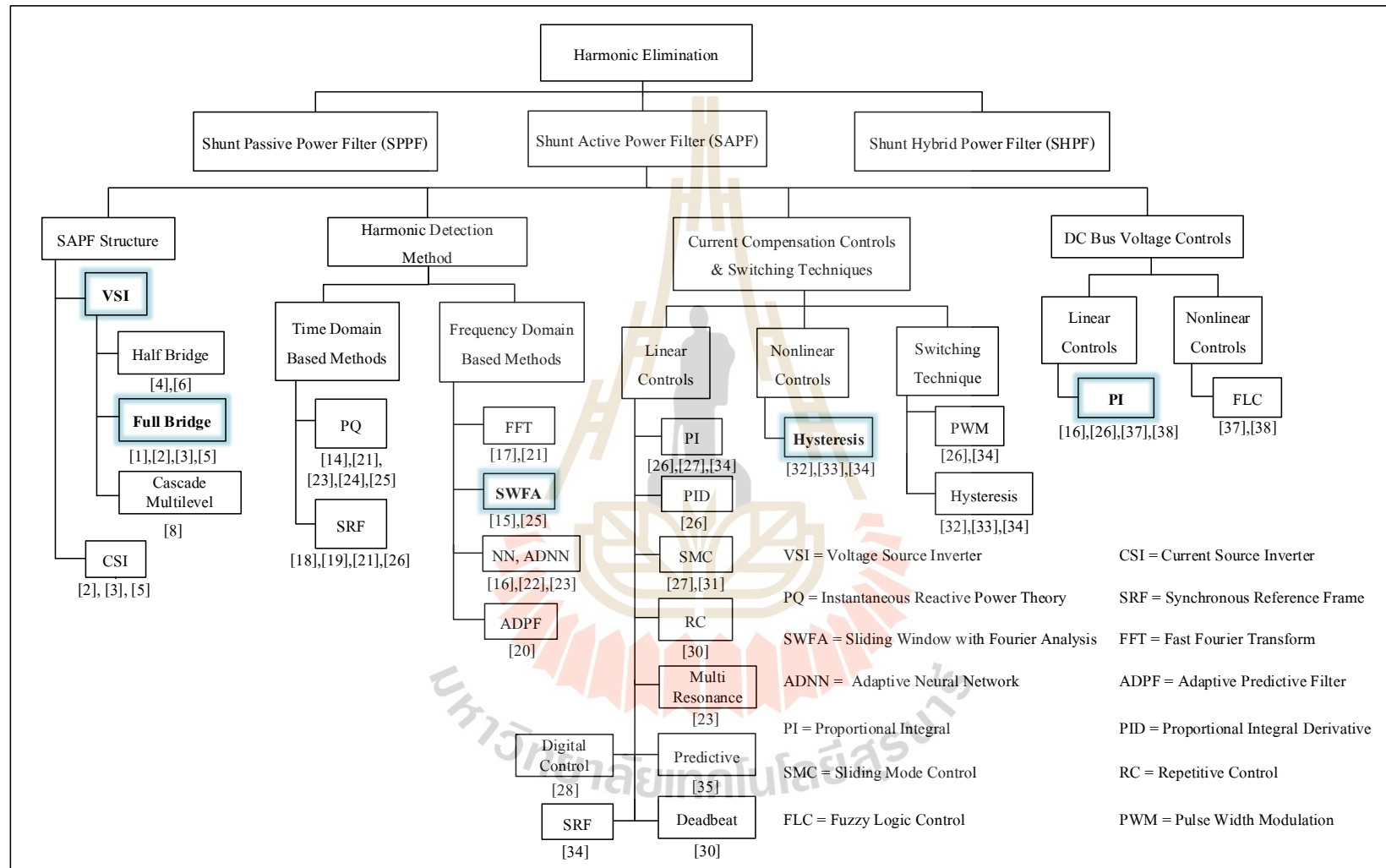
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Bruno A. Angélico, Leonardo B.G. Campanhol and Sérgio A. Oliveira da Silva	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน เนื่องจากเป็นวิธีที่เรียบง่าย ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดี ตัวควบคุมมีลักษณะสมบัติที่ยืดหยุ่น จากการจำลองสถานการณ์พบว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรงให้คงที่ได้ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด
2016	Atiqi Mohd Zainuri, Mohd Radzil, and al.	นำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่เรียกว่า Step size error cancellation ที่ใช้เทคนิคพีชชีลอจิกเข้ามาช่วยในการคำนวณ และมีการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับตัวควบคุมพีชชีและตัวควบคุมพีไอ จากผลการเปรียบเทียบพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ทั้งความเร็วในการตอบสนอง การพุ่งเกินของแรงดัน และการกระเพื่อมของสัญญาณในสภาวะอยู่ตัว และตัวควบคุมพีชชีให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมพีชชีมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการออกแบบมากกว่าตัวควบคุมพีไอ

จากผลการสำรวจผลงานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน พบว่า มีการใช้ตัวควบคุมอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวควบคุมพีไอ และ ตัวควบคุมพีชชี โดยตัวควบคุมพีไอได้รับความนิยมในการเลือกใช้งานสูงกว่าตัวควบคุมพีชชี เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้างจริง และให้สมรรถนะการทำงานที่ดี ในขณะที่วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีชชีจะมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากกว่า ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอ และเหมาะกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสไม่มีความซับซ้อนมากนัก

2.7 สรุป

การศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัสดฮาร่มอนิกด้วยวงจรกรรองกำล้งแอกทฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำล้งหนึ่งเฟสช่วยให้ผู้วิจัยทราบถึงองค์ประกอบ และวิธีการต่าง ๆ ที่ถูกคิดค้นและพัฒนาจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจ และสามารถเลือกใช้งานวิธีการต่าง ๆ ในการกำจัสดฮาร่มอนิกได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมยังเป็นพื้นฐานสำคัญที่ช่วยให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงแนวทางการต่อยอดและพัฒนาองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมด้วย สำหรับภาพรวมปรัทัศน์วรรณกรรมทั้งหมดที่ผู้วิจัยศึกษาได้ถูกสรุปไว้ในรูปที่ 2.2 โดยบล็อกที่แสดงเป็นสีเทา คือ วิธีการที่ได้เลือกใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนจะนำเสนอในบทต่อ ๆ ไป





รูปที่ 2.2 แผนภาพของการปรัทศน์วรรณกรรม

บทที่ 3

การตรวจจับกระแสมอเตอร์

ด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนา

3.1 บทนำ

การตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis) หรือวิธี SWFA (M.EI-Habrouk, M.K. Darwish, 2001) เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) ซึ่งสามารถตรวจจับกระแสมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของวิธีนี้ คือ ไม่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังพร้อมกับการตรวจจับกระแสมอเตอร์ได้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้คิดพัฒนาการตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธี SWFA ที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ โดยเรียกวิธีการตรวจจับกระแสมอเตอร์ที่ถูกพัฒนานี้ว่า วิธี M-SWFA (Modified-Sliding Window with Fourier Analysis) ซึ่งวิธีการตรวจจับกระแสมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อคำนวณหากระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานสำหรับการกำจัดกระแสมอเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ดังนั้น ในบทนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับการตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธี SWFA ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิม และวิธี M-SWFA ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยขั้นตอนการตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธี SWFA จะอธิบายในหัวข้อที่ 3.2 ส่วนขั้นตอนการตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธี M-SWFA จะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 นอกจากนี้ การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการตรวจจับกระแสมอเตอร์ของทั้งสองวิธีโดยใช้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป จะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.4

3.2 การตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA)

ในปี 2001 M.EI-Habrouk และ M.K. Darwish ได้นำเสนอการตรวจจับกระแสมอเตอร์ด้วยวิธี SWFA ที่ใช้สมการฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์กระแสโหลดและคำนวณกระแสสมรรถนะ โดยใช้เทคนิควินโดว์เลื่อนเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณ ทำให้วิธี SWFA มีความรวดเร็วในการประมวลผลมากกว่าวิธี FFT ที่ใช้การคำนวณด้วยสมการฟูรีเยร์เช่นเดียวกัน และยังมีความเหมาะสมต่อการดำเนินการทางดิจิทัลบนบอร์ด Digital Signal Processing (DSP) อีกด้วย นอกจากนี้

วิธี SWFA ยังให้ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นแบบเวลาจริง จึงสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างทันทีเมื่อโหลดในระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง สำหรับการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA จะเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ออยเลอร์ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกระแสโหลด (i_L) ในระบบไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งประกอบด้วย เทอมที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสตรง (DC Component) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณกระแสสลับ (AC Component)

$$i_L(kT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC Component}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT_s) + B_h \sin(h\omega kT_s)]}_{\text{AC Component}} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับของกระแสโหลด จะพบว่าประกอบไปด้วยสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน ($h=1$) และสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ($h=[2, \infty)$) ซึ่งค่ากระแสโหลดที่ความถี่ใด ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2) โดยค่าสัมประสิทธิ์ A_h และ B_h สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$i_{Lh}(kT_s) = A_h \cos(h\omega kT_s) + B_h \sin(h\omega kT_s) \quad (3.2)$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \cos(h\omega nT_s) \quad (3.3)$$

$$B_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \sin(h\omega nT_s) \quad (3.4)$$

โดยที่

h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมที่ความถี่มูลฐาน (เรเดียนต่อวินาที, rad/s)

k, n คือ ค่าตัวบ่งชี้เวลา

T_s คือ ค่าเวลาในการชักตัวอย่าง (วินาที, s)

N คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบความถี่มูลฐาน

สมการที่ (3.2) ถึง (3.4) จะถูกใช้เป็นสมการหลักสำหรับการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งในการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในที่นี้จะพิจารณา

กระแสไหลดที่ความถี่มูลฐาน (i_{L1}) ดังสมการที่ (3.5) โดยค่าสัมประสิทธิ์ A_1 , B_1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

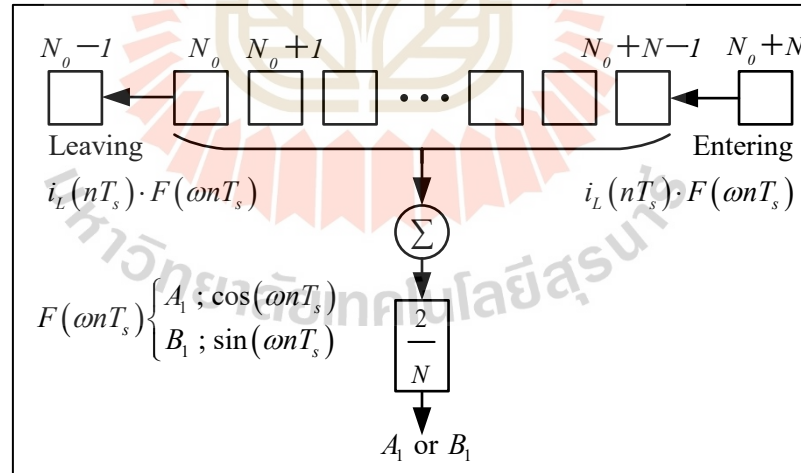
$$i_{L1}(kT_s) = A_1 \cos(\omega kT_s) + B_1 \sin(\omega kT_s) \quad (3.5)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \cos(\omega nT_s) \quad (3.6)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \sin(\omega nT_s) \quad (3.7)$$

จากสมการข้างต้น การคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับข้อมูลกระแสไหลด (i_L) หนึ่งคาบ จำนวน N ข้อมูล และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 เริ่มต้นจากสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวสามารถแสดงเป็นแผนภาพแสดงการคำนวณ A_1 และ B_1 ในลักษณะหน้าต่างข้อมูลของกระแสไหลดหนึ่งคาบ ตั้งแต่ $n = N_0$, $N_0 + 1$, $N_0 + 2$, ..., $N_0 + N - 1$ ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ A_1 และ B_1

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า A_1 , B_1 ค่าใหม่ (A_1^{new} , B_1^{new}) ด้วยเทคนิควินโดว์เลื่อน คือ เลื่อนลบข้อมูล $i_L(nT_s) \cdot F(\omega nT_s)$ ค่าเก่า (ตำแหน่งข้อมูลที่ $n = N_0 - 1$) ออกจาก A_1^{old} , B_1^{old} (การคำนวณรอบแรก ค่า A_1^{old} , B_1^{old} จะมีค่าเท่ากับ A_1 , B_1 เริ่มต้น) จากนั้นเลื่อนข้อมูล

$i_L(nT_s) \cdot F(\omega nT_s)$ ค่าใหม่ (ตำแหน่งข้อมูลที่ $n = N_0 + N$) บวกเข้าไปใน A_1^{old} , B_1^{old} ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยการคำนวณหาค่า A_1^{new} กำหนดให้ $F(\omega nT_s)$ คือ ฟังก์ชัน $\cos(\omega nT_s)$ ส่วนการคำนวณหาค่า B_1^{new} กำหนดให้ $F(\omega nT_s)$ คือ ฟังก์ชัน $\sin(\omega nT_s)$ การคำนวณหาค่า A_1^{new} และ B_1^{new} ดังกล่าว สามารถเขียนแสดงเป็นสมการได้ดังสมการ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ

$$A_1^{new} = A_1^{old} + \frac{2}{N} \left[i_L \{ (N_0 + N)T_s \} \cdot \cos \{ \omega (N_0 + N)T_s \} - i_L \{ (N_0 - 1)T_s \} \cdot \cos \{ \omega (N_0 - 1)T_s \} \right] \quad (3.8)$$

$$B_1^{new} = B_1^{old} + \frac{2}{N} \left[i_L \{ (N_0 + N)T_s \} \cdot \sin \{ \omega (N_0 + N)T_s \} - i_L \{ (N_0 - 1)T_s \} \cdot \sin \{ \omega (N_0 - 1)T_s \} \right] \quad (3.9)$$

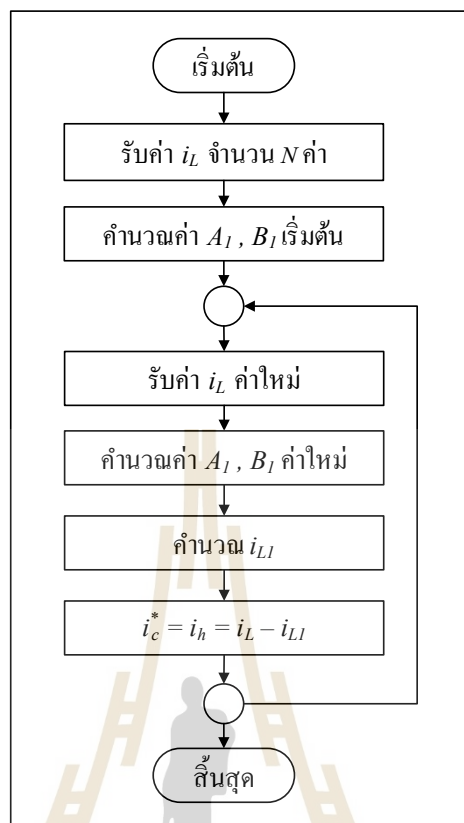
ขั้นตอนที่ 3 นำค่า A_1^{new} , B_1^{new} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ไปใช้คำนวณหาค่า i_{L1} โดยใช้สมการที่ (3.5)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่ากระแสฮาร์โมนิก (i_h) โดยนำค่า i_{L1} ซึ่งเป็นค่ากระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน ไปหักลบออกจากค่ากระแสโหลดทั้งหมด (i_L) ดังสมการที่ (3.10)

$$i_h = i_L - i_{L1} \quad (3.10)$$

ขั้นตอนที่ 5 ในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 เป็นการคำนวณหาค่า i_h ชุดข้อมูลแรกเท่านั้น สำหรับค่า i_h ของชุดข้อมูลถัดไปจะต้องดำเนินการคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 ใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ จึงจะทำให้ได้รูปสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกที่ใช้เป็นกระแสอ้างอิง (i_c^*) ให้กับวงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบขนานเพื่อฉีดชดเชยให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสต่อไป

จากขั้นตอนการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกทั้ง 5 ขั้นตอนในข้างต้น สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการ โปรแกรมตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

3.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนที่พัฒนา (M-SWEA)

อุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส นอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกแล้ว บางชนิดยังเป็นโหลดกำลังรีแอกทีฟที่ทำให้มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและกระแสโหลดมีความต่างกัน ทำให้เกิดปัญหาค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) ต่ำกว่า 1 การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถแก้ทั้งปัญหากระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กลับมาใกล้เคียง 1 จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ถึงแม้ว่าการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้านี้จะสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่การคำนวณกระแสด้วยวิธีดังกล่าวใช้เฉพาะค่ากระแสโหลดคำนวณร่วมกับสมการฟูริเยร์เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทราบถึงปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาวิธี SWFA ให้สามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก พร้อมทั้งปรับปรุงให้ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1 ได้ภายหลังการชดเชยจึงได้ถูกคิดค้นและนำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

การคำนวณกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA ได้เริ่มต้นจากการพิจารณากระแสโหนดด้วยสมการฟูรีเยร์ที่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ A_h และ B_h ซึ่งเป็นรูปแบบสมการฟูรีเยร์แบบเต็มดังแสดงในสมการที่ (3.1) แต่การคำนวณกระแสฮาร์โมนิกที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี M-SWFA ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ จะเริ่มต้นจากการพิจารณากระแสโหนดด้วยสมการฟูรีเยร์แบบย่อ ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ C ดังแสดงในสมการที่ (3.11) โดยค่ากระแสโหนดที่ความถี่ใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.12) และค่าสัมประสิทธิ์ C_h สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

$$i_L(kT_s) = \frac{C_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \sin(h\omega kT_s + \theta_h)] \quad (3.11)$$

$$i_{Lh}(kT_s) = C_h \sin(h\omega kT_s + \theta_h) \quad (3.12)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) สามารถคำนวณหาค่ากระแสโหนดที่ความถี่มูลฐาน (i_{L1}) ได้ดังสมการที่ (3.14) โดยค่าสัมประสิทธิ์ C_1 สามารถหาได้จากสมการที่ (3.15)

$$i_{L1}(kT_s) = C_1 \sin(\omega kT_s + \theta) \quad (3.14)$$

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (3.15)$$

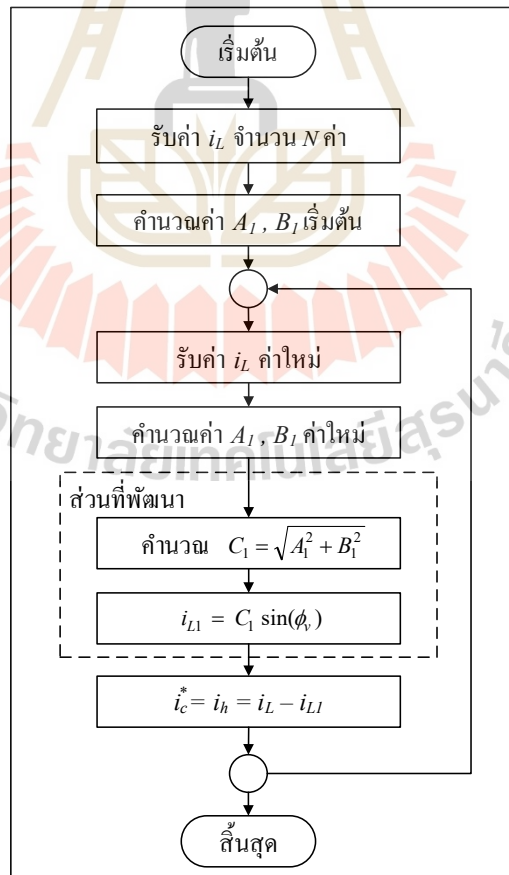
จากสมการที่ (3.14) มุมเฟสของกระแสโหนดที่ความถี่มูลฐานที่ปรากฏ คือ $\omega kT_s + \theta$ ซึ่งเป็นมุมที่ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำลง ดังนั้น การคำนวณกระแสโหนดที่ความถี่มูลฐานในวิธี M-SWFA จึงปรับใช้มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (ϕ_v) แทน เพื่อให้การคำนวณหากระแสโหนดที่ความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้ามีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดัน ซึ่งจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1 ภายหลังการชดเชยได้ การคำนวณกระแสโหนดที่ความถี่มูลฐานดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.16) โดยที่มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจะทำการคำนวณในรูปเทอม $\sin \phi_v$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.17)

$$i_{L1}(kT_s) = C_1 \sin(\phi_v) \quad (3.16)$$

$$\sin \phi_v = \frac{v_s}{V_m} \quad (3.17)$$

ดังนั้น การคำนวณหากระแสฮาร์โมนิก (i_h) ตามสมการที่ (3.10) ด้วยค่า i_{L1} จากสมการที่ (3.16) จะทำให้ได้ค่า i_h ที่สามารถกำจัดฮาร์โมนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้ด้วย

วิธี M-SWFA ที่พัฒนาขึ้นนี้มีขั้นตอนการคำนวณการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกเช่นเดียวกันกับวิธี SWFA แบบดั้งเดิมที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 ทุกประการ แต่มีข้อแตกต่างเพียงการคำนวณค่ากระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานที่ใช้สมการที่ (3.16) ในการคำนวณแทนสมการที่ (3.5) โดยสามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการทำงานการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกของวิธี M-SWFA ได้ดังรูปที่ 3.3

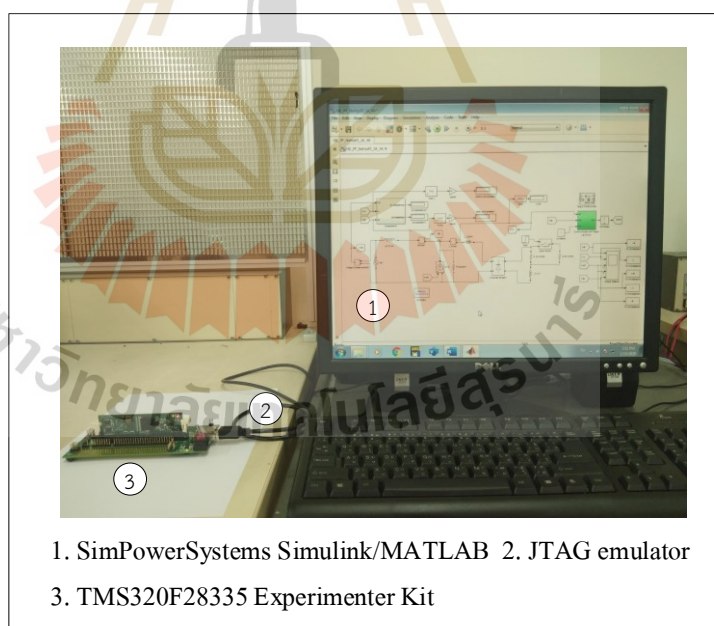


รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี M-SWFA

จากวิธี SWFA และวิธี M-SWFA ที่ได้นำเสนอในหัวข้อนี้ จะถูกนำไปจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งสามารถรายละเอียดได้ในหัวข้อถัดไป

3.4 การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA

การทดสอบสมรรถนะการจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวิธี SWFA และ M-SWFA จะใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop: HIL) ซึ่งจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริงมากกว่าการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ซึ่งสามารถเชื่อมต่อสื่อสารกันผ่านสาย USB JTAG emulation ดังแสดงในรูปที่ 3.4



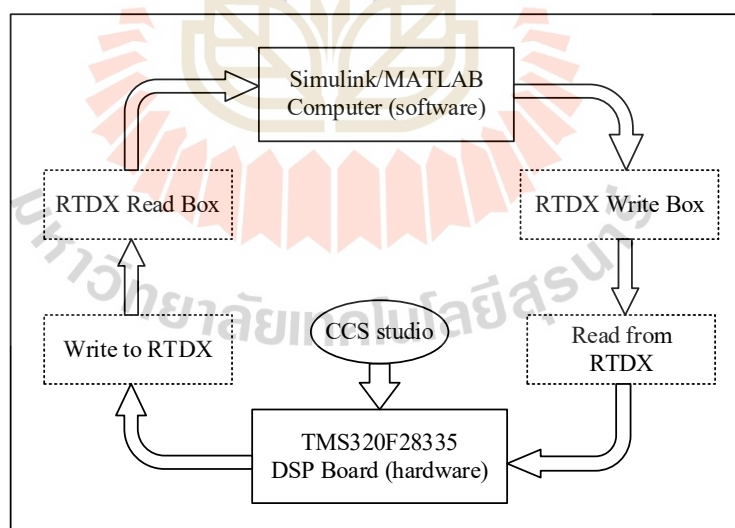
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในที่นี้ โปรแกรม MATLAB/Simulink จะใช้สำหรับสร้างส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่มีปัญหากระแสฮาร์มอนิกและค่าตัวประกอบ

กำลังต่ำ และใช้สร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ส่วนบอร์ด DSP ที่เป็นฮาร์ดแวร์จะใช้สำหรับสร้างส่วนของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก โดยบอร์ด DSP จะรับข้อมูลกระแสโหลด (i_L) และแรงดัน (v_s) จากโปรแกรม MATLAB/Simulink มาคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก (i_h) ตามวิธี SWFA และ M-SWFA จากนั้นจะส่งผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่ได้กลับไปโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อลดกระแสชดเชยต่อไป

การโปรแกรมคำนวณกระแสฮาร์มอนิกทั้งวิธี SWFA และวิธี M-SWFA บนบอร์ด DSP จะเขียนผ่านโปรแกรม Code Composer Studio (CC Studio) ซึ่งมีโค้ดคำสั่งในรูปแบบภาษาซี ส่วนการทำงานรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink และบอร์ด DSP จะดำเนินการผ่านช่องทางสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) ซึ่งมีแผนภาพการทำงานทั้งการอ่านและเขียนข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับรายละเอียดวิธีการเชื่อมโยงและการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการเชื่อมโยงของโปรแกรม MATLAB กับบอร์ด DSP สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557)

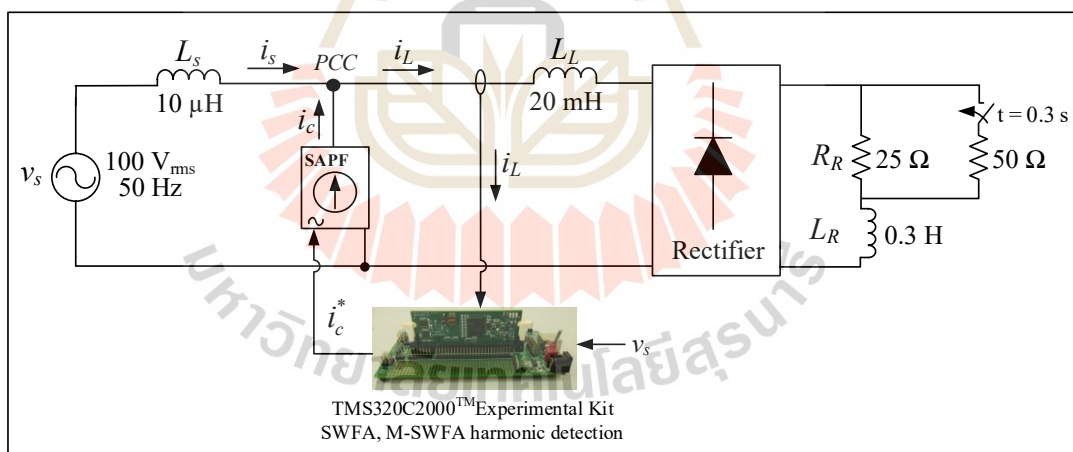
หมายเหตุ: โค้ดโปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA สามารถดูได้จากภาคผนวก ก



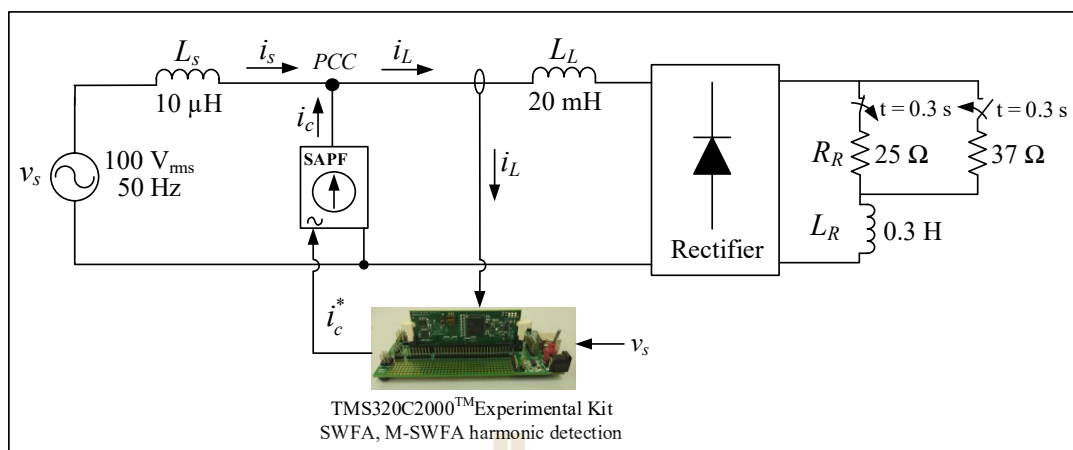
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของงานจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่ใช้พิจารณาจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง กำหนดให้ระบบมีโหลดปกติเป็น

ตัวเหนี่ยวนำ L_L ขนาด 20 mH ต่ออนุกรมกับวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน R_R ขนาด 25 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L_R ขนาด 0.3 H ซึ่งโหลดดังกล่าวมีพิกัดค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 Arms และนอกจากนี้จะกำหนดให้โหลดของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันที่เวลา 0.3 วินาที เพื่อทดสอบความเร็วและความแม่นยำของวิธี SWFA และ M-SWFA โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด (จาก 3 Arms เป็น 4 Arms) ด้วยการต่อตัวต้านทานขนาด 50 Ω ขนานเพิ่มกับโหลด R_R และกรณีลดขนาดกระแสโหลด (จาก 3 Arms เป็น 2 Arms) ด้วยการปลดโหลด R_R และเชื่อมต่อตัวต้านทานขนาด 37 Ω อย่างไรก็ดีตาม การจำลองสถานการณ์ในบทนี้จะมุ่งเน้นที่การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวิธี SWFA และ M-SWFA เท่านั้น ดังนั้น จึงกำหนดใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติ ทั้งนี้ เพื่อไม่พิจารณาถึงผลกระทบทางด้านโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับแผนภาพระบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA ในกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด และในกรณีลดขนาดกระแสโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

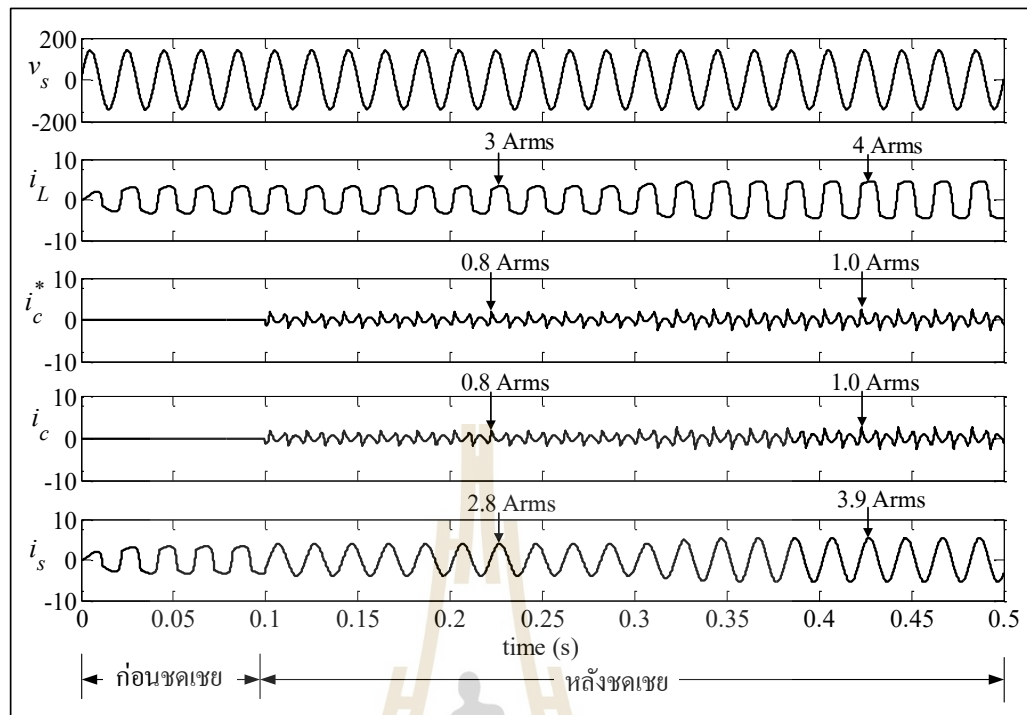


รูปที่ 3.6 ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด

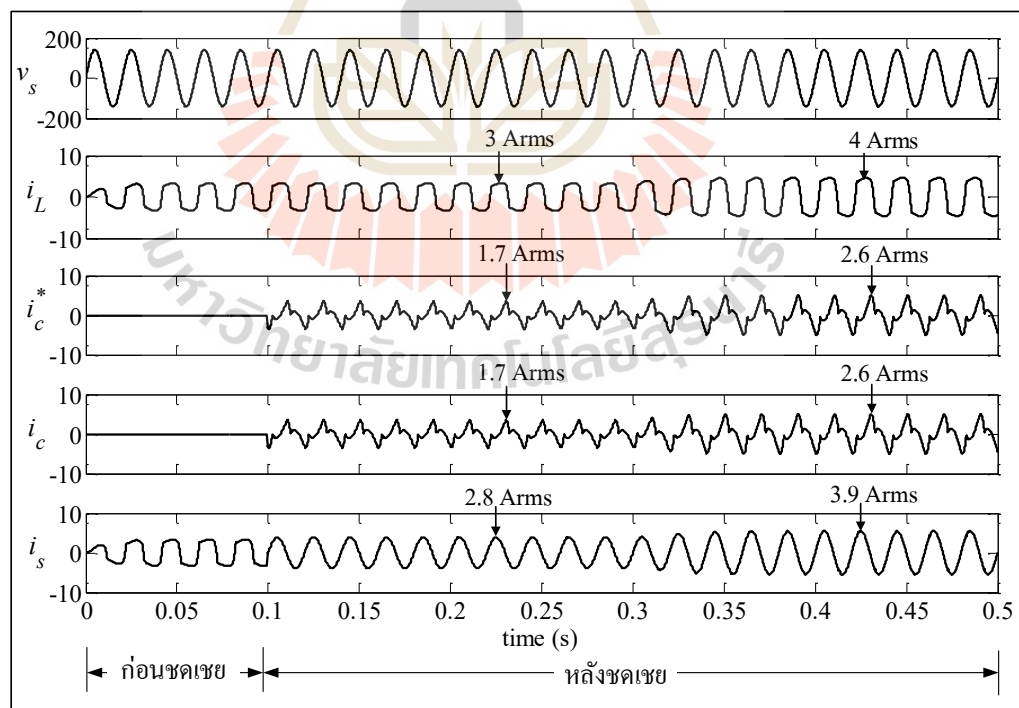


รูปที่ 3.7 ระบบที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA กรณีลดขนาดกระแสโหลด

ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี SWFA และ M-SWFA กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 (ก) และ 3.8 (ข) ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ในช่วงเริ่มต้นก่อนมีการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที สังเกตได้ว่าลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) ของทั้งสองวิธีมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ อย่างไรก็ตาม เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติติดกระแสชดเชย (i_c) ตามลักษณะรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และวิธี M-SWFA ในช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที จะเห็นได้ว่าลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของทั้งสองวิธีกลับมาเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพิ่มสูงขึ้นจาก 3 Arms เป็น 4 Arms ที่ช่วงเวลา 0.3 วินาทีเป็นต้นไป พบว่า รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของวิธี SWFA และ M-SWFA มีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานยังคงสามารถติดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ดี ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยยังคงมีลักษณะเป็นรูปไซน์เช่นกัน

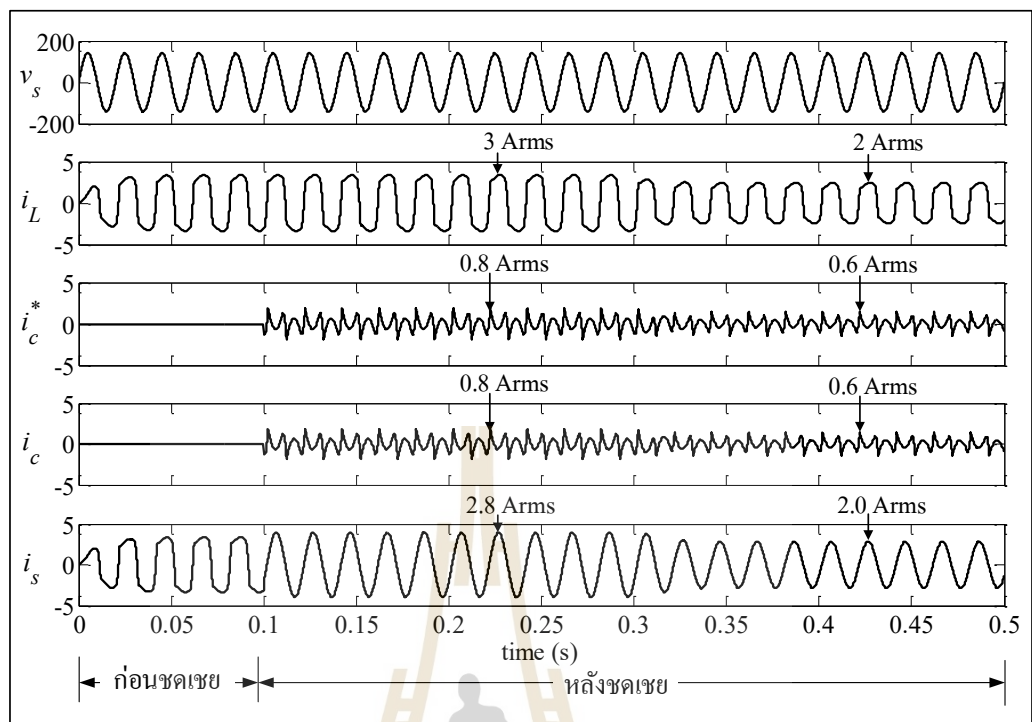


(ก) วิธี SWFA

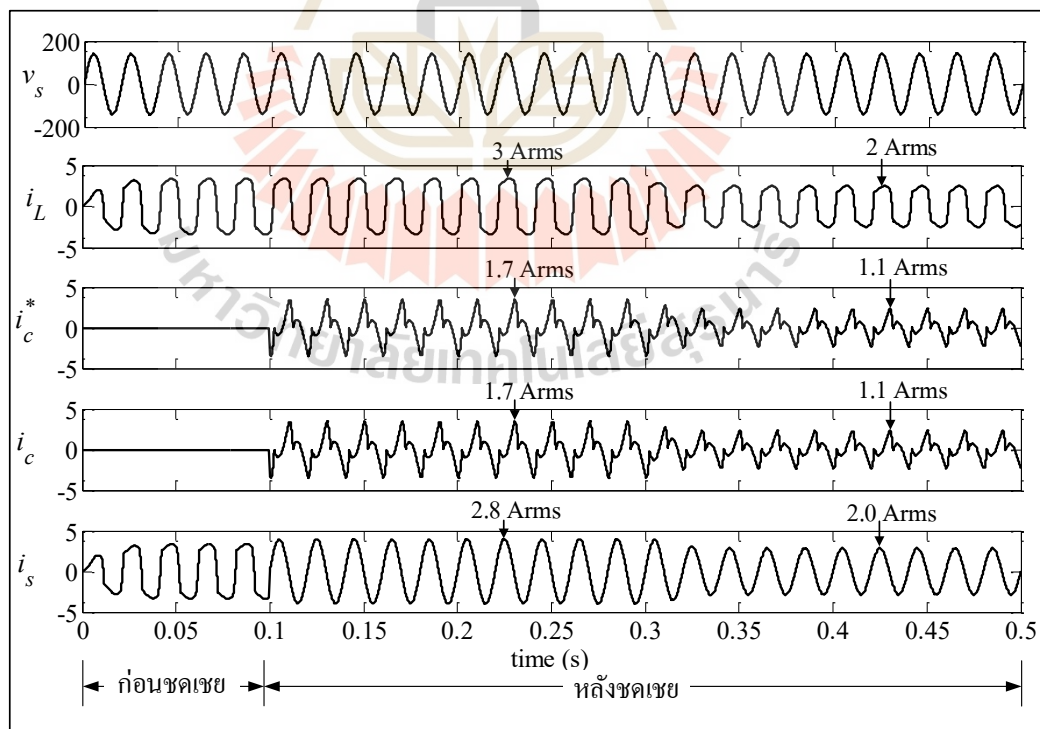


(ข) วิธี M-SWFA

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีทดสอบเพิ่มขนาดกระแสโหลด



(ก) วิธี SWFA



(ข) วิธี M-SWFA

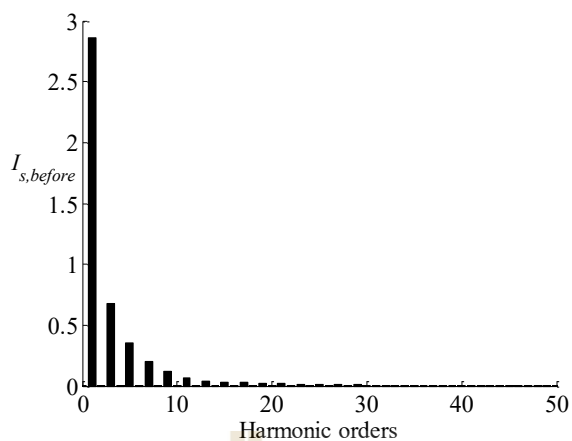
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกกรณีทดสอบลดขนาดกระแสโหลด

สำหรับการทดสอบในกรณีปรับลดขนาดกระแสไหลจาก 3 Arms เป็น 2 Arms ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวิธี SWFA และวิธี M-SWFA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (ก) และ 3.9 (ข) ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า รูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของทั้งสองวิธีสามารถปรับขนาดให้คล้อยตามขนาดของกระแสไหล (i_L) ที่มีการลดขนาดลงตั้งแต่เวลา 0.3 วินาที เป็นต้นไป ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นได้ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าทั้งวิธี SWFA และวิธี M-SWFA ยังคงสามารถคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสลดลง

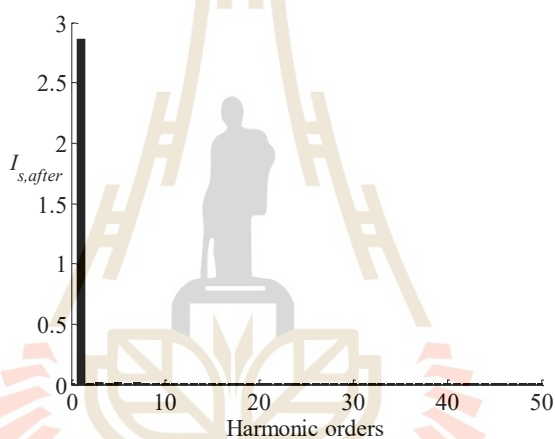
และจากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.8 และ 3.9 เมื่อนำรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งก่อนและหลังการชดเชยที่ฟักัดกระแสไหล 2 Arms 3 Arms และ 4 Arms ไปวิเคราะห์ด้วยกราฟสเปกตรัมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ถึง 3.12 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดของขนาดกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ (I_h) รวมถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ ($\%HD_{i,h}$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_i$) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ถึง 3.3 โดยการคำนวณค่า $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.18) และ (3.19) ตามลำดับ

$$\%HD_{i,h} = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (3.18)$$

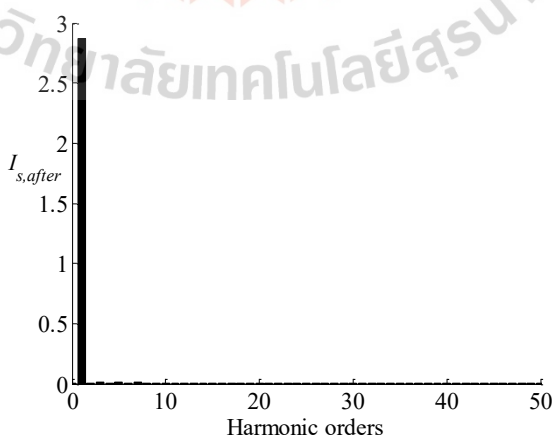
$$\%THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \times 100\% \quad (3.19)$$



(ก) I_s ก่อนการชดเชย



(ข) I_s หลังการชดเชยของวิธี SWFA

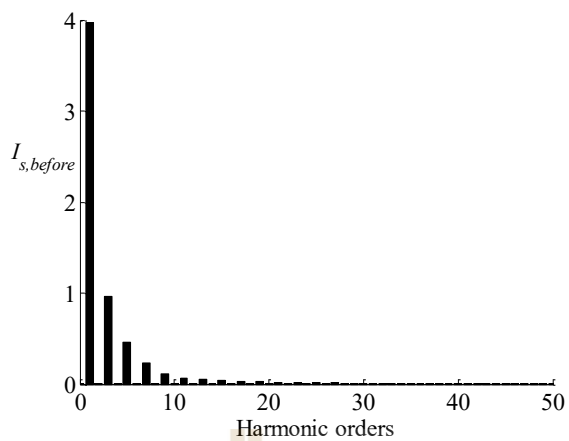


(ค) I_s หลังการชดเชยของวิธี M-SWFA

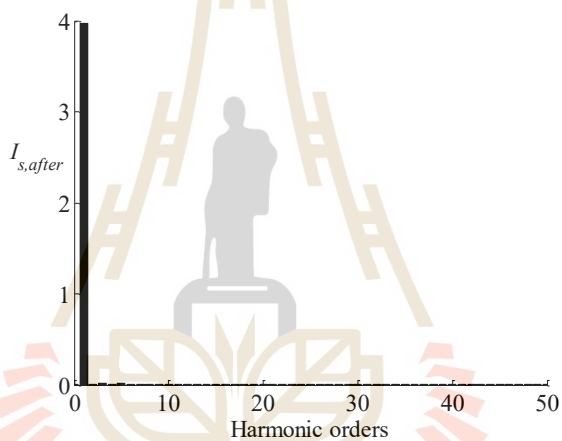
รูปที่ 3.10 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชยที่พิกัดกระแสโหลด 2 Arms

ตารางที่ 3.1 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัด
กระแสโหลด 2 Arms

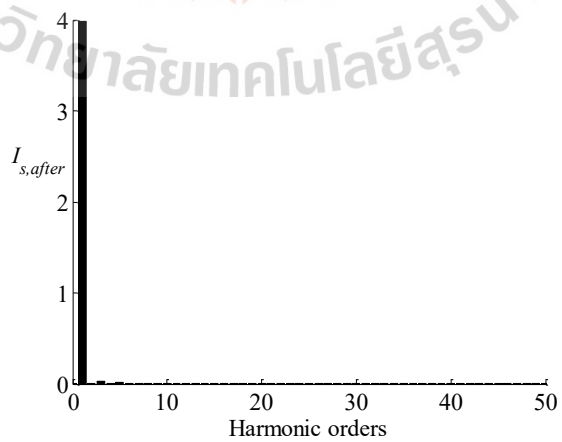
h	พิกัดกระแสโหลด 2 Arms					
	ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย			
			SWFA		M-SWFA	
	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$
1	2.8580	—	2.8599	—	2.8698	—
3	0.6799	23.7880	0.0161	0.5632	0.0168	0.5863
5	0.3547	12.4099	0.0131	0.4576	0.0133	0.4623
7	0.2032	7.1097	0.0093	0.3263	0.0093	0.3236
9	0.1172	4.1011	0.0058	0.2044	0.0057	0.1982
11	0.0675	2.3613	0.0038	0.1321	0.0037	0.1284
13	0.0423	1.4814	0.0036	0.1242	0.0036	0.1262
15	0.0326	1.1393	0.0037	0.1288	0.0038	0.1318
17	0.0282	0.9855	0.0033	0.1148	0.0033	0.1156
19	0.0239	0.8354	0.0025	0.0883	0.0025	0.0862
21	0.0191	0.6677	0.0020	0.0705	0.0020	0.0681
23	0.0148	0.5170	0.0021	0.0725	0.0021	0.0729
25	0.0119	0.4164	0.0022	0.0768	0.0023	0.0786
27	0.0105	0.3664	0.0020	0.0703	0.0020	0.0713
29	0.0096	0.3372	0.0016	0.0558	0.0016	0.0549
31	0.0087	0.3035	0.0013	0.0466	0.0013	0.0449
33	0.0075	0.2609	0.0014	0.0503	0.0014	0.0503
35	0.0063	0.2192	0.0016	0.0552	0.0016	0.0563
37	0.0055	0.1908	0.0015	0.0516	0.0015	0.0525
39	0.0051	0.1773	0.0012	0.0411	0.0012	0.0407
41	0.0048	0.1687	0.0010	0.0339	0.0009	0.0325
43	0.0044	0.1553	0.0011	0.0375	0.0011	0.0372
45	0.0039	0.1363	0.0012	0.0429	0.0013	0.0437
47	0.0034	0.1183	0.0012	0.0413	0.0012	0.0422
49	0.0031	0.1083	0.0009	0.0331	0.0009	0.0330
$\%THD_i$	28.28		0.89		0.90	



(ก) I_s ก่อนการชดเชย



(ข) I_s หลังการชดเชยของวิธี SWFA

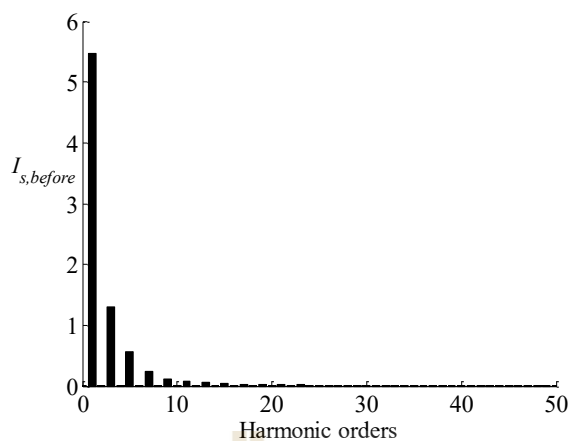


(ค) I_s หลังการชดเชยของวิธี M-SWFA

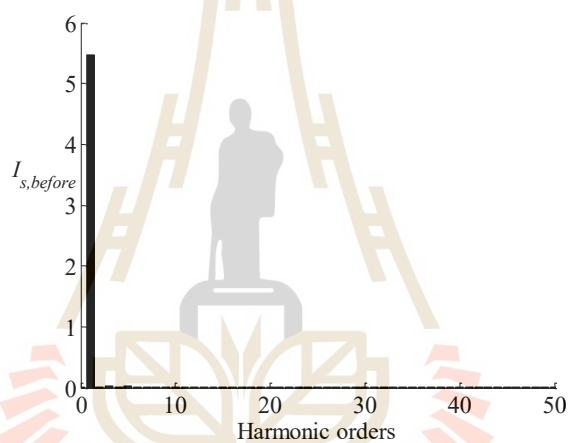
รูปที่ 3.11 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms

ตารางที่ 3.2 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัด
กระแสโหลด 3 Arms

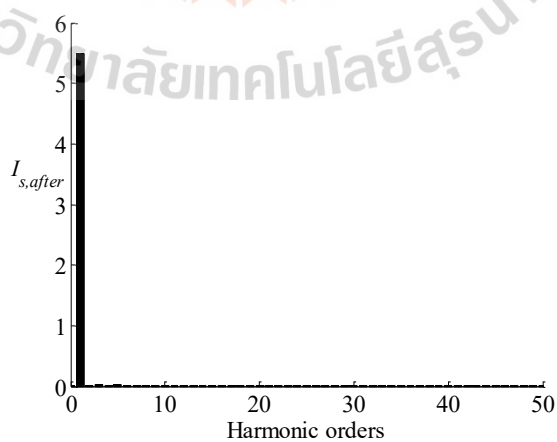
h	พิกัดกระแสโหลด 3 Arms					
	ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย			
			SWFA		M-SWFA	
	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$
1	3.9671	—	3.9693	—	3.9850	—
3	0.9640	24.3004	0.0231	0.5825	0.0241	0.6060
5	0.4637	11.6898	0.0166	0.4186	0.0167	0.4194
7	0.2348	5.9182	0.0096	0.2430	0.0093	0.2344
9	0.1177	2.9671	0.0053	0.1334	0.0051	0.1275
11	0.0683	1.7207	0.0053	0.1334	0.0055	0.1378
13	0.0539	1.3574	0.0055	0.1374	0.0056	0.1411
15	0.0450	1.1347	0.0042	0.1064	0.0042	0.1049
17	0.0344	0.8661	0.0029	0.0740	0.0028	0.0700
19	0.0250	0.6303	0.0031	0.0770	0.0031	0.0781
21	0.0200	0.5030	0.0033	0.0836	0.0034	0.0864
23	0.0179	0.4504	0.0028	0.0698	0.0028	0.0700
25	0.0158	0.3979	0.0020	0.0507	0.0019	0.0479
27	0.0130	0.3288	0.0021	0.0527	0.0021	0.0526
29	0.0107	0.2688	0.0024	0.0602	0.0025	0.0622
31	0.0094	0.2380	0.0021	0.0532	0.0022	0.0541
33	0.0088	0.2222	0.0015	0.0387	0.0015	0.0369
35	0.0079	0.2002	0.0015	0.0387	0.0015	0.0379
37	0.0068	0.1711	0.0019	0.0466	0.0019	0.0480
39	0.0059	0.1487	0.0017	0.0438	0.0018	0.0449
41	0.0055	0.1393	0.0013	0.0320	0.0012	0.0310
43	0.0053	0.1325	0.0012	0.0295	0.0011	0.0284
45	0.0047	0.1194	0.0015	0.0373	0.0015	0.0381
47	0.0041	0.1038	0.0015	0.0375	0.0015	0.0387
49	0.0038	0.0951	0.0011	0.0282	0.0011	0.0278
$\%THD_i$	27.92		0.83		0.84	



(ก) I_s ก่อนการชดเชย



(ข) I_s หลังการชดเชยของวิธี SWFA



(ค) I_s หลังการชดเชยของวิธี M-SWFA

รูปที่ 3.12 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชยที่ฟักัดกระแสโหลด 4 Arms

ตารางที่ 3.3 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย ที่พิกัด
กระแสโหลด 4 Arms

h	พิกัดกระแสโหลด 4 Arms					
	ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย			
			SWFA		M-SWFA	
	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$	I_h (A)	$\%HD_{i,h}$
1	5.4668	—	5.4691	—	5.4940	—
3	1.3100	23.9633	0.0315	0.5756	0.0329	0.5980
5	0.5589	10.2233	0.0187	0.3413	0.0184	0.3344
7	0.2375	4.3445	0.0081	0.1476	0.0074	0.1343
9	0.1165	2.1312	0.0073	0.1334	0.0077	0.1403
11	0.0897	1.6405	0.0077	0.1416	0.0081	0.1468
13	0.0700	1.2796	0.0052	0.0942	0.0049	0.0897
15	0.0476	0.8703	0.0038	0.0703	0.0038	0.0684
17	0.0348	0.6371	0.0048	0.0870	0.0050	0.0916
19	0.0306	0.5592	0.0041	0.0741	0.0041	0.0749
21	0.0257	0.4700	0.0027	0.0485	0.0024	0.0443
23	0.0199	0.3637	0.0031	0.0574	0.0033	0.0592
25	0.0166	0.3041	0.0033	0.0611	0.0035	0.0638
27	0.0152	0.2789	0.0023	0.0427	0.0022	0.0409
29	0.0132	0.2417	0.0021	0.0384	0.0020	0.0372
31	0.0109	0.1996	0.0027	0.0490	0.0028	0.0515
33	0.0097	0.1782	0.0023	0.0416	0.0023	0.0424
35	0.0091	0.1669	0.0016	0.0286	0.0014	0.0261
37	0.0080	0.1468	0.0020	0.0369	0.0021	0.0379
39	0.0069	0.1262	0.0022	0.0395	0.0023	0.0413
41	0.0064	0.1176	0.0015	0.0273	0.0014	0.0262
43	0.0061	0.1112	0.0014	0.0262	0.0014	0.0254
45	0.0054	0.0983	0.0019	0.0345	0.0020	0.0362
47	0.0048	0.0873	0.0016	0.0291	0.0016	0.0298
49	0.0046	0.0841	0.0011	0.0200	0.0010	0.0182
$\%THD_i$	26.62		0.75		0.76	

จากรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณาผลสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายที่พิกัดขนาดกระแสโหลดเท่ากับ 2 Arms จะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกปรากฏที่อันดับฮาร์มอนิกเลขคี่ ตั้งแต่อันดับที่ 3 ถึงอันดับที่ 49 ($h=[3,5,7,...,49]$) โดยสามารถคำนวณค่า $\%THD_i$ ได้เท่ากับ 28.28% ในขณะที่ภายหลังจากการชดเชย พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เคยปรากฏได้มีค่าลดลงเหลือใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชยที่ได้จากวิธี SWFA และ M-SWFA มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.89% และ 0.90% ตามลำดับ สามารถดูค่า $\%HD_{i,h}$ ของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับได้จากตารางที่ 3.1

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งก่อนและหลังการชดเชยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms ดังรูปที่ 3.11 และที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms ในรูปที่ 3.12 พบว่า สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกปรากฏที่อันดับฮาร์มอนิกเลขคี่เช่นเดียวกัน โดยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms มีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 27.92% และที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms มีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 26.62% ส่วนภายหลังจากการชดเชย กระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากวิธี SWFA และ M-SWFA ให้ผลสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยที่มีปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในอันดับต่าง ๆ ลดลงเหลือใกล้เคียงศูนย์ โดยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชยของวิธี SWFA และ M-SWFA มีค่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.83% และ 0.84% ตามลำดับ (ค่า $\%HD_{i,h}$ สามารถดูได้จากตารางที่ 3.2) ส่วนที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms วิธี SWFA และ M-SWFA ให้ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชยใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75% และ 0.76% ตามลำดับ (ค่า $\%HD_{i,h}$ สามารถดูได้จากตารางที่ 3.3)

การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี SWFA และวิธี M-SWFA จะใช้วิธีการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชย และค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ โดยการหาค่า PF จะใช้การคำนวณตามสมการที่ (3.20) ซึ่งประกอบไปด้วยค่า Distortion Power Factor (PF_{dist}) ที่เกิดจากปริมาณกระแสฮาร์มอนิก และค่า Displacement Power Factor (PF_{disp}) ที่เกิดจากความต่างของมุมเฟสของกระแสและแรงดัน ทั้งนี้ค่า PF_{dist} และ PF_{disp} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.21) และ (3.22) ตามลำดับ

$$PF = PF_{dist} \times PF_{disp} \quad (3.20)$$

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (3.21)$$

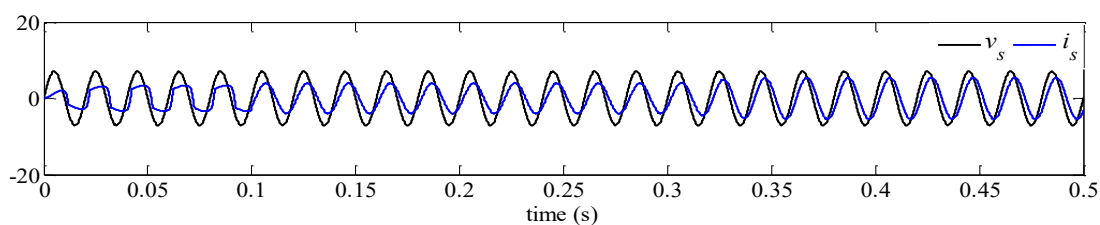
$$PF_{\text{disp}} = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.22)$$

โดย P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (Active Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt, W)
 S_1 คือ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Apparent Power)
 มีหน่วยเป็นโวลต์แอมแปร์ (VoltAmpere, VA)
 Q คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power)
 มีหน่วยเป็นโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ (VoltAmpere Reactive, VAR)

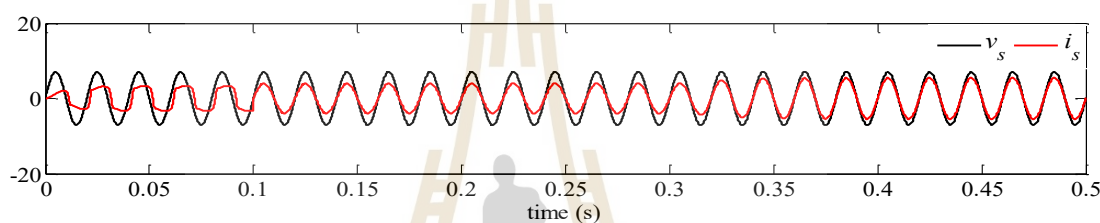
ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายจากการจำลองสถานการณ์กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาก่อนการชดเชย (0 ถึง 0.1 วินาที) รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms นอกจากจะมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์แล้ว ยังมีมุมเฟสล่าช้าลงจากแรงดันด้วย จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ามีค่าลดต่ำลงเหลือเท่ากับ 0.82 และหลังจากมีการฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป พบว่า รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายที่ได้จากทั้งสองวิธีกลับมาเป็นรูปไซน์ แต่พบว่าการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ไม่สามารถทำให้มุมเฟสของรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายตรงกันกับมุมเฟสของแรงดันภายหลังการชดเชยได้ ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติ 3 Arms (0.1 ถึง 0.3 วินาที) และในช่วงเวลาหลังเพิ่มกระแสโหลดเป็น 4 Arms (0.3 วินาทีเป็นต้นไป) โดยค่าตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยของวิธี SWFA ที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms มีค่าเท่ากับ 0.85 และที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms มีค่าเท่ากับ 0.80 (ก่อนการชดเชยมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.78) ในขณะที่การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA สามารถปรับให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่มีเฟสตรงกันกับแรงดันได้ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติ และในช่วงเวลาหลังเพิ่มกระแสโหลด ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยให้มีค่าเท่ากับ 1

และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายจากการจำลองสถานการณ์กรณีลดขนาดกระแสโหลดดังรูปที่ 3.14 พบว่า วิธี SWFA ยังคงให้ผลรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยที่มีมุมเฟสล่าช้าจากมุมเฟสของแรงดัน ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติที่พิกัด 3 Arms (0.1 ถึง 0.3 วินาที) และในช่วงเวลาหลังการลดขนาดกระแสโหลดเป็น 2 Arms (0.3 วินาทีเป็นต้นไป) โดยในช่วงเวลาหลังการลดขนาดกระแสโหลด ค่าตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.88 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเวลาก่อนการชดเชยที่มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85 เพียงเล็กน้อย ในขณะที่วิธี M-SWFA สามารถปรับแก้ให้รูปสัญญาณ

กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชยมีมุมเฟสที่ตรงกันกับมุมเฟสของแรงดันได้ และมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ภายหลังจากการชดเชย

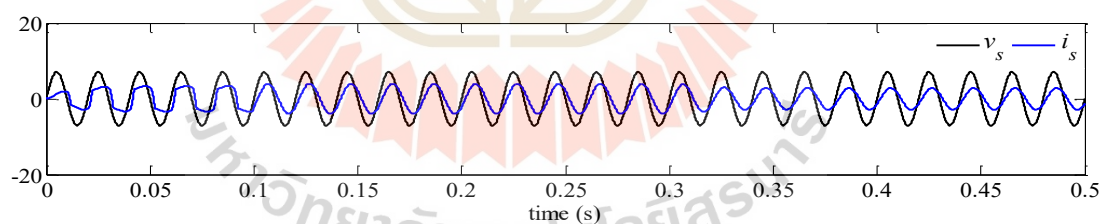


(ก) วิธี SWFA

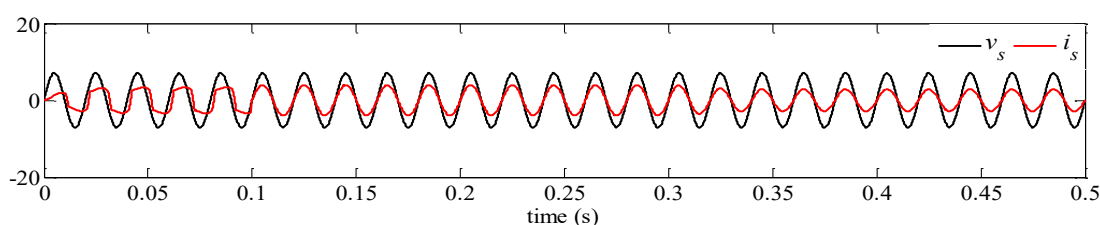


(ข) วิธี M-SWFA

รูปที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด



(ก) วิธี SWFA



(ข) วิธี M-SWFA

รูปที่ 3.14 ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายกรณีลดขนาดกระแสโหลด

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดในข้างต้น สามารถสรุปค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ก่อนและหลังการชดเชยที่ได้จากวิธี SWFA และ M-SWFA ทั้งในกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด และลดขนาดกระแสโหลด ได้ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ช่วงเวลาการทดสอบ	ผลการทดสอบ	พิกัดกระแสโหลด		
		2 Arms	3 Arms	4 Arms
ก่อนการชดเชย	$\%THD_i$	28.28	27.92	26.62
	PF_{Dist}	0.96	0.96	0.97
	PF_{Disp}	0.88	0.85	0.80
	PF	0.85	0.82	0.78
หลังการชดเชย	วิธี SWFA			
	$\%THD_i$	0.89	0.83	0.75
	PF_{Dist}	1	1	1
	PF_{Disp}	0.88	0.85	0.80
	PF	0.88	0.85	0.80
	วิธี M-SWFA			
	$\%THD_i$	0.90	0.84	0.76
	PF_{Dist}	1	1	1
	PF_{Disp}	1	1	1
	PF	1	1	1

ค่า $\%THD_i$ และค่า PF ในตารางที่ 3.4 ถือเป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับเปรียบเทียบระหว่างวิธี SWFA และวิธี M-SWFA ซึ่งจากตารางดังกล่าว พบว่า การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ที่คิดค้นพัฒนาขึ้นมานั้นไม่เพียงแต่จะสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกให้กับระบบได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำเช่นเดียวกันกับวิธี SWFA เท่านั้น แต่ยังสามารปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้กลับมาเท่ากับ 1 ได้ ถึงแม้ขนาดของกระแสโหลดในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง

3.5 สรุป

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA เป็นวิธีที่ให้ผลการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งยังมีความรวดเร็วในการประมวลผล ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นแล้วว่า วิธี SWFA มีสมรรถนะในการทำงานที่ดีคุณสมบัติที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตาม วิธี SWFA มีข้อด้อย คือ ไม่สามารถหาค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นพัฒนาวิธีการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนรูปแบบใหม่ที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ ซึ่งเรียกว่าวิธี M-SWFA ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นแล้วว่า วิธี M-SWFA ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจจับกระแสกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 3 ได้ยื่นจดลิขสิทธิ์โปรแกรมการคำนวณบน SIMULINK ดังนี้

กองพล อาริรักษ์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และมนิรัตน์ ผดุงศิลป์ (2559). บล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (เอสดับเบิลยูเอฟเอ) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่สร้างด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับทุกอันดับ. 7 ต.ค. 2559, 347050

กองพล อาริรักษ์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และมนิรัตน์ ผดุงศิลป์ (2559). บล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (เอสดับเบิลยูเอฟเอ) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่สร้างด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับบางอันดับ. 7 ต.ค. 2559, 347049

กองพล อาริรักษ์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และมนิรัตน์ ผดุงศิลป์ (2562). บล็อกตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (วิธี SWFA) ที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้บนโปรแกรม Simulink. 30 เม.ย. 2562, 374510

บทที่ 4

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุม สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

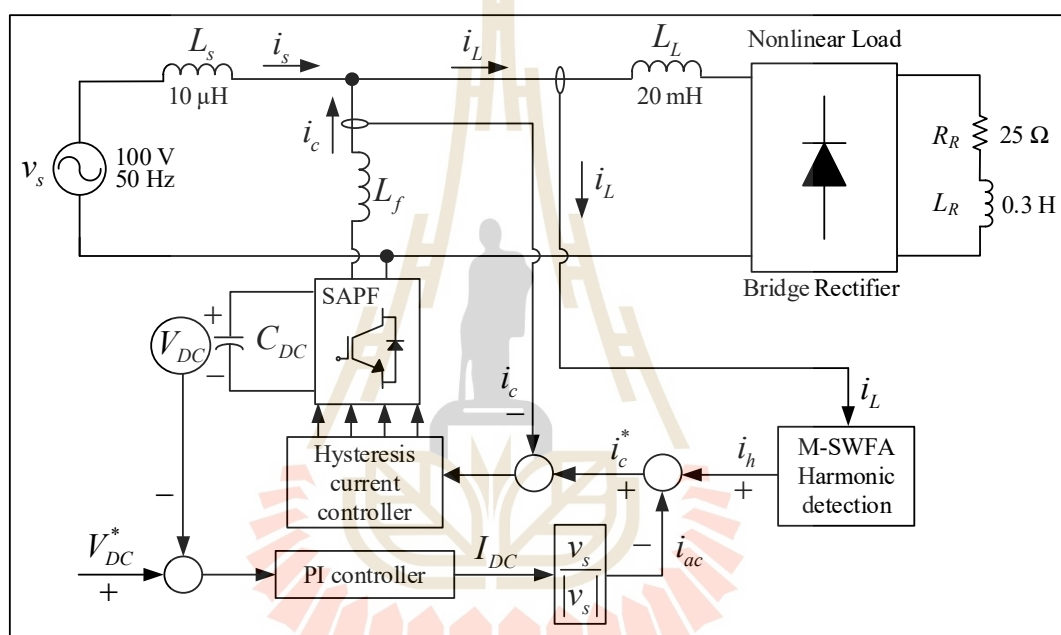
4.1 บทนำ

นอกจากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความสำคัญต่อสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแล้ว การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาข้างถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเช่นกัน ในบทนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยส่วนประกอบของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.2 ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ส่วนที่สอง คือ การออกแบบระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส ซึ่งจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4 และส่วนที่สาม คือ การออกแบบระบบควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.5 นอกจากนี้ การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.6

4.2 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน โดยส่วนแรก คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ส่วนที่สอง คือ การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยเลือกใช้วิธี M-SWFA ดังปรากฏในบล็อก M-SWFA Harmonic Detection เนื่องจากวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ดังกล่าวให้กระแสอ้างอิงที่มีความถูกต้อง แม่นยำ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุ่งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่สาม คือ การควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดกระแสชดเชยให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง ดังปรากฏในบล็อก Hysteresis Current Controller และส่วนสุดท้าย คือ การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีค่าคงที่ ดังปรากฏในบล็อก PI Controller สำหรับรายละเอียดของแต่ละส่วนสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป



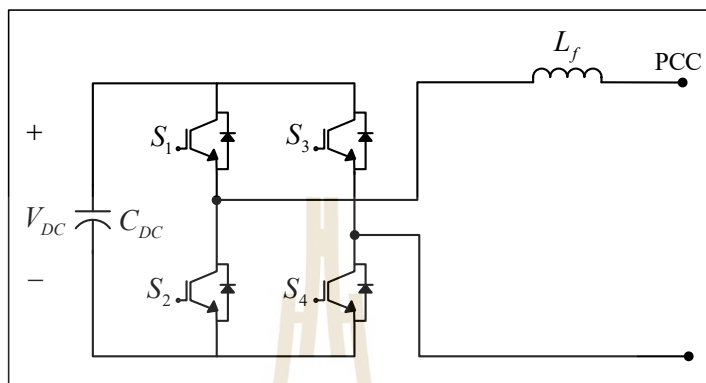
รูปที่ 4.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

4.3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

4.3.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ H-bridge ประกอบไปด้วยสวิตช์ไोजิปีทีจำนวน 4 ตัว (S_1 ถึง S_4) ตัวเก็บประจุดีซี (C_{DC}) จำนวน 1 ตัว และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) 1 ตัว (M. Rukonuzzaman, M. Nakaoka, 2002) โดยตัวเก็บประจุดีซีจะทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานในการจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจร ส่วนสวิตช์ไोजิปีทีจะทำหน้าที่เปิด-ปิดวงจรเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เกิดขึ้นที่เอาต์พุตของ

วงจร (รายละเอียดดังตารางที่ 4.1) และตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยจากแรงดันเอาต์พุตที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมสวิตช์ ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบไฟฟ้าที่จุด PCC ได้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส

ตารางที่ 4.1 การทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์

โหมดการทำงาน	S_1	S_2	S_3	S_4	V_{out}
1	ON	OFF	ON	OFF	0
2	ON	OFF	OFF	ON	$+V_{DC}$
3	OFF	ON	ON	OFF	$-V_{DC}$
4	OFF	ON	OFF	ON	0

4.3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f)

ในปี ค.ศ. 1997 David M.E. Ingram และ Simon D. Round (David M.E. Ingram, Simon D. Round, 1997) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน หรือ L_f ซึ่งอาศัยขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)$) โดยใช้องค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่มีขนาดกระแสมากที่สุด ($i_{h,\max}(t)$) ตามสมการที่ (4.1) และ (4.2) ดังนี้

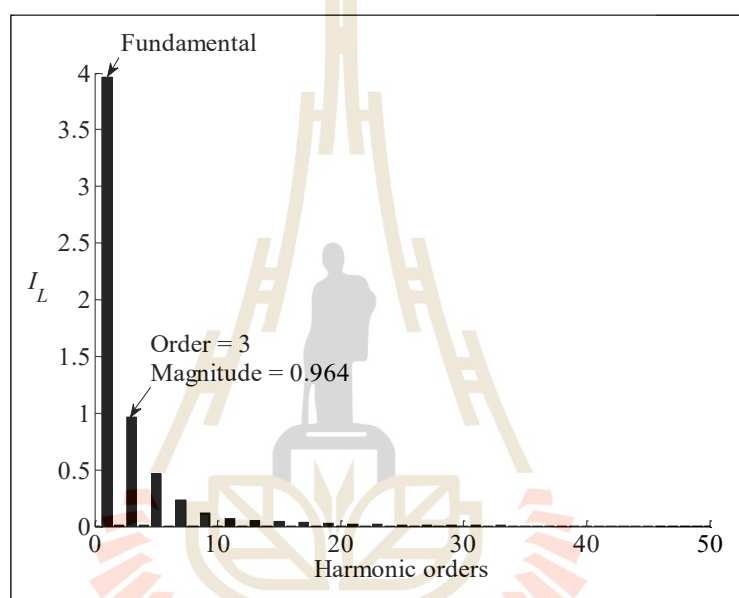
$$i_{h,\max}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (4.1)$$

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = A2\pi f \quad (4.2)$$

โดย

A คือ แอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่มีขนาดกระแสสูงสุด (A)

f คือ ความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของกระแสโหลดในระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์โมนิก

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกในรูปที่ 4.3 พบว่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ($f = 150$ Hz) มีขนาดสูงสุด ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.964 A ดังนั้น จากสมการที่ (4.2) จะได้ว่า

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = 0.964 \times 2\pi \times 150 = 908.55 \text{ A/s}$$

ขั้นที่ 2 ออกแบบค่า L_f ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยใช้วิธีการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,\max}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.3) ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{DC}^* - V_{PCC}}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (4.3)$$

โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (V) (≈ 141.4 V)
 V_{DC}^* คือ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง

จากขั้นที่ 2 การออกแบบค่า V_{DC}^* จะต้องกำหนดให้มีความมากกว่าค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (M.El-Habrouk, et al., 2000) ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า V_{DC}^* มีค่า 1.1 เท่าของค่ายอดแรงดันที่จุด PCC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 155 V จากการกำหนดค่า V_{DC}^* ดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่าขอบเขตตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,\max}$) แสดงได้ดังนี้

$$L_{f,\max} = \frac{155 - 141.4}{908.55} = 15 \text{ mH}$$

จากค่า $L_{f,\max}$ เท่ากับ 15 mH ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่า L_f เท่ากับ 8 mH

4.3.3 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{DC})

ในปี ค.ศ. 1998 Thierry Thomas (Thierry Thomas, et al., 1998) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยให้ผลลัพธ์ของการออกแบบอยู่ในรูปของค่าขอบเขตต่ำสุดของค่าความเก็บประจุ ($C_{DC,\min}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.4)

$$C_{DC,\min} = \frac{\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (4.4)$$

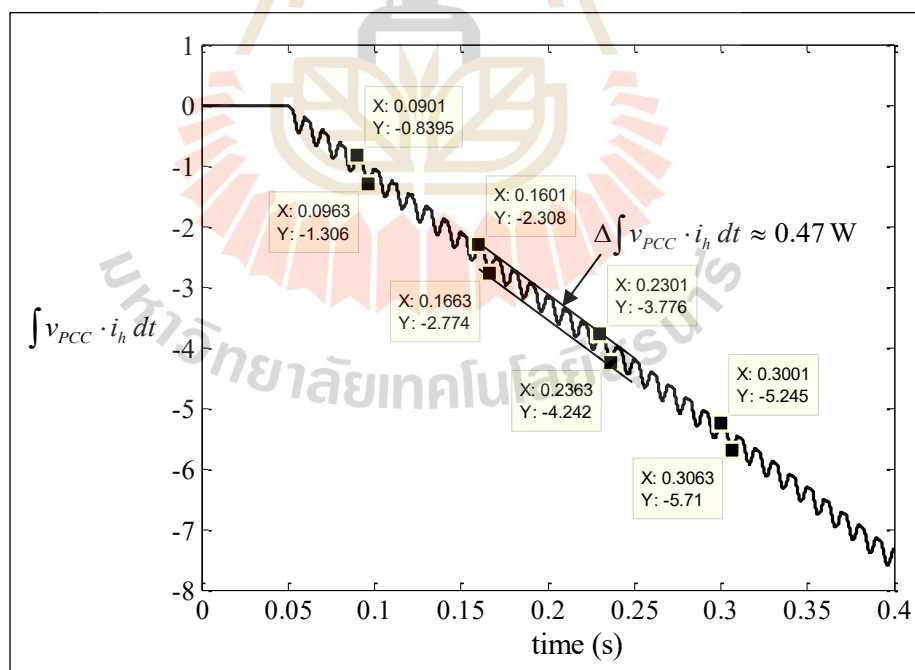
โดยที่ v_{PCC} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC
 i_h คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิก
 ΔV_{DC} คือ แรงดันกระเพื่อมของแรงดันบัลไฟตรง

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{DC}) จะต้องคำนึงถึงการควบคุมค่าแรงดันกระเพื่อม (ΔV_{DC}) และระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ซึ่งค่าแรงดันกระเพื่อมควรมีค่าไม่เกิน 2% ของแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) (Thierry Thomas, et al., 1998) เนื่องจากค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้คือ 155 V ดังนั้น ค่าแรงดันกระเพื่อมสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 3.1 V

การคำนวณค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังไฟฟ้าแอททิฟ ($\Delta \int v_{PCC} \cdot i_h dt$) สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งจากจุดข้อมูลแต่ละคู่ มีค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังไฟฟ้าแอททิฟประมาณเท่ากับ 0.47 W ดังนั้น ค่าขอบเขตตัวเก็บประจุต่ำสุดหรือ $C_{DC,min}$ คือ

$$C_{DC,min} = \frac{0.47}{3.1 \times 155} = 0.98 \text{ mF}$$

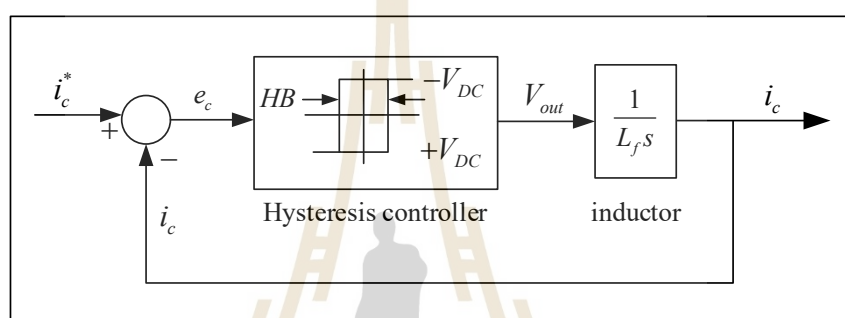
จากค่า $C_{DC,min}$ ในข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุ C_{DC} ขนาดเท่ากับ 2.8 mF ทั้งนี้ เนื่องจากต้องการให้แรงดันกระเพื่อมมีค่าน้อย



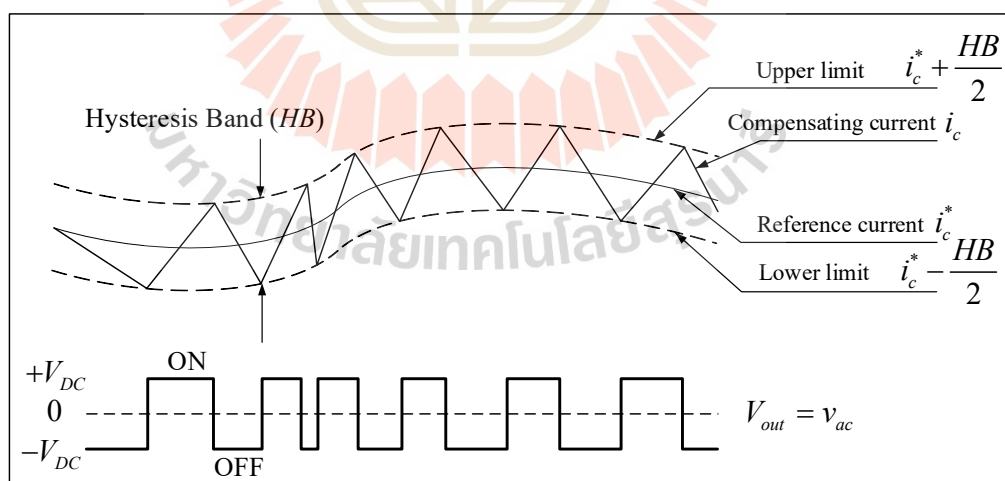
รูปที่ 4.4 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอททิฟ

4.4 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสเป็นวิธีการที่สร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดี และสามารถควบคุมการบิดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ (M. Rukonuzzaman, M. Nakaoka, 2002) นอกจากนี้ ตัวควบคุมดังกล่าวยังสามารถสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการเปิด - ปิดสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอททิฟแบบขนานได้โดยไม่ต้องใช้เทคนิคการสวิตช์อื่น ๆ ร่วมด้วย สำหรับแผนภาพบล็อกและลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส



รูปที่ 4.6 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 4.5 ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสมีอินพุตของระบบควบคุม (e_c) คือ ผลต่างของกระแสอ้างอิง (i_c^*) กับกระแสชดเชย (i_c) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแถบฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis

Band: HB) เพื่อสร้างพัลส์ควบคุมการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตที่มีขนาด $+V_{DC}$ และ $-V_{DC}$ และมีพลานท์ (Plant) ของตัวควบคุม คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.6 ขอบเขตของแถบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Band: HB) จะมีลักษณะรอบตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก โดยแถบฮิสเทอรีซิสจะมีขอบเขตบน (Upper limit) และขอบเขตล่าง (Lower limit) ที่มีระยะห่าง ($\frac{HB}{2}$) จากสัญญาณกระแสอ้างอิงเท่ากัน กระแสชดเชยที่อยู่ในขอบเขต HB จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้ตามการสวิตช์ของอุปกรณ์ไอจีบีที โดยในกรณีที่สวิตช์ S_1, S_4 นำกระแส (ON) และสวิตช์ S_2, S_3 หยุดนำกระแส (OFF) จะส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อกระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบน สวิตช์ S_1, S_4 จะหยุดนำกระแส ในขณะที่สวิตช์ S_2, S_3 จะนำกระแสแทน ทำให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง เมื่อค่ากระแสชดเชยลดลงจนถึงขอบเขตล่าง สวิตช์ S_1, S_4 ก็จะนำกระแส (สวิตช์ S_2, S_3 หยุดนำกระแส) อีกครั้ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2552)

สำหรับการออกแบบค่า HB สามารถทำได้โดยพิจารณาสมการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) (P.A. Dahono, 2009) ซึ่งอยู่ในรูปของผลต่างระหว่างแรงดันเอาต์พุตวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (v_{ac}) กับแรงดันที่จุดต่อร่วม (v_{PCC}) ดังสมการที่ (4.5)

$$v_{L_f} = v_{ac} - v_{PCC} = L_f \frac{di_c}{dt} \quad (4.5)$$

และเมื่อพิจารณาสมการที่ (4.5) แบบจุดต่อจุด จะทำให้ได้สมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยดังสมการที่ (4.6)

$$\Delta i_c = \frac{(V_{DC} - V_{PCC})}{L_f} \Delta t \quad (4.6)$$

ในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_1, S_4 นำกระแส (t_{ON}) แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะมีค่าเท่ากับ $+V_{DC}$ ซึ่งจะทำให้กระแสชดเชย i_c เพิ่มขึ้นเป็นขนาดเท่ากับ HB และในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_1, S_4 หยุดนำกระแส (t_{OFF}) แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบ

ขนานจะมีค่าเท่ากับ $-V_{DC}$ ซึ่งจะทำให้กระแสชดเชยลดลงเป็นขนาดเท่ากับ HB เช่นเดียวกัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสชดเชยในสมการที่ (4.6) จะสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยในรูปของขนาดแถบฮิสเตอร์ซิส (HB) ได้ดังสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ

$$HB = \frac{V_{DC} - V_{PCC}}{L_f} t_{ON} \quad (4.7)$$

$$-HB = \frac{(-V_{DC} + V_{PCC})}{L_f} t_{OFF} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) สามารถหาเวลาการนำกระแส (t_{ON}) และการหยุดนำกระแส (t_{OFF}) ของสวิตช์ S_1, S_4 ได้ดังสมการที่ (4.9) และ (4.10)

$$t_{ON} = \frac{HB \cdot L_f}{V_{DC} - V_{PCC}} \quad (4.9)$$

$$t_{OFF} = \frac{-HB \cdot L_f}{-V_{DC} + V_{PCC}} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.9) และ (4.10) สามารถหาคาบเวลาการสวิตช์ (T_{sw}) ได้ดังสมการที่ (4.11)

$$T_{sw} = t_{ON} + t_{OFF} = \frac{2HBL_f}{(V_{DC} - V_{PCC})} \quad (4.11)$$

เมื่อ $T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}}$ จะได้สมการสำหรับใช้ออกแบบขนาดแถบฮิสเตอร์ซิสดังสมการที่ (4.12)

$$HB = \frac{V_{DC} - V_{PCC}}{2L_f f_{sw}} \quad (4.12)$$

พิจารณากรณีแรงดันที่จุด PCC เท่ากับศูนย์ ($V_{PCC} = 0$) จะได้สมการคำนวณขนาด
แถบฮิสเตอร์ซีสมากที่สุด ($HB_{\max}$) ดังสมการที่ (4.14)

$$HB_{\max} = \frac{V_{DC}}{2L_f f_{sw}} \quad (4.14)$$

และเมื่อพิจารณากรณีแรงดันที่จุด PCC สูงสุด ($V_{PCC} = V_m$) จะได้สมการคำนวณขนาด
แถบฮิสเตอร์ซีน้อยที่สุด ($HB_{\min}$) ดังสมการที่ (4.15)

$$HB_{\min} = \frac{V_{DC} - V_m}{2L_f f_{sw}} \quad (4.15)$$

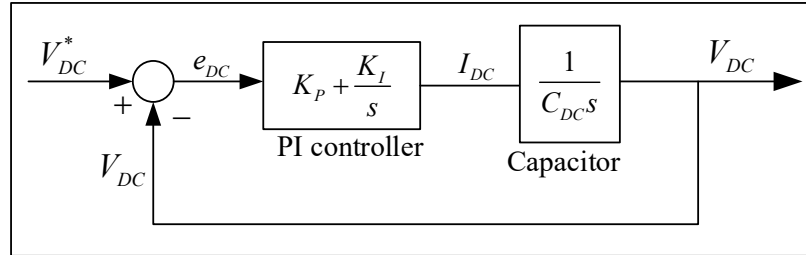
จากสมการที่ (4.14) และ (4.15) เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่การสวิตช์ในการออกแบบเท่ากับ
30 kHz ซึ่งเป็นความถี่สวิตช์สูงสุดของโมดูลไอจีบีที SK45GH063 ที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์
นี้ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณขนาดแถบฮิสเตอร์ซีสมากที่สุดและน้อยที่สุดได้เท่ากับ 0.323 A และ
0.028 A ตามลำดับ ดังนี้

$$HB_{\max} = \frac{155}{2 \times 8 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^3} = 0.323 \text{ A}$$

$$HB_{\min} = \frac{155 - 141.4}{2 \times 8 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^3} = 0.028 \text{ A}$$

จากขอบเขตของแถบฮิสเตอร์ซีตในช่วงต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้
แถบฮิสเตอร์ซีตซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.1 A ทั้งนี้ เพื่อไม่ให้ขนาดการกระเพื่อมของกระแสชดเชย
เนื่องจากการสวิตช์สูงมากเกินไปและความถี่การสวิตช์ยังคงอยู่ในขอบเขตการทำงานของโมดูล
ไอจีบีทีที่เลือกใช้

4.5 การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งอินพุตของตัวควบคุม (e_{DC}) คือ ผลต่างของแรงดันบัลไฟตรง (V_{DC}) ค่าจริงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานกับค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) ที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับพลาพารามิเตอร์ของระบบควบคุม คือ ตัวเก็บประจุดีซี (C_{DC}) โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอจะถูกนำไปลบกับกระแสอ้างอิง ดังปรากฏในรูปที่ 4.1

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_I ของตัวควบคุมแบบพีไอจะใช้วิธีการประมาณโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามของฟังก์ชันถ่ายโอนและพจน์พหุนามอันดับสองมาตรฐาน (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2011) ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{K_p s + K_I}{C_{DC} s^2 + K_p s + K_I} \quad (4.16)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.17)$$

ผลการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองจะทำให้ได้สมการสำหรับออกแบบค่า K_p และ K_I ดังสมการที่ (4.18) และ (4.19) ตามลำดับ

$$K_p = 2\zeta\omega_n C_{DC} \quad (4.18)$$

$$K_I = C_{DC}\omega_n^2 \quad (4.19)$$

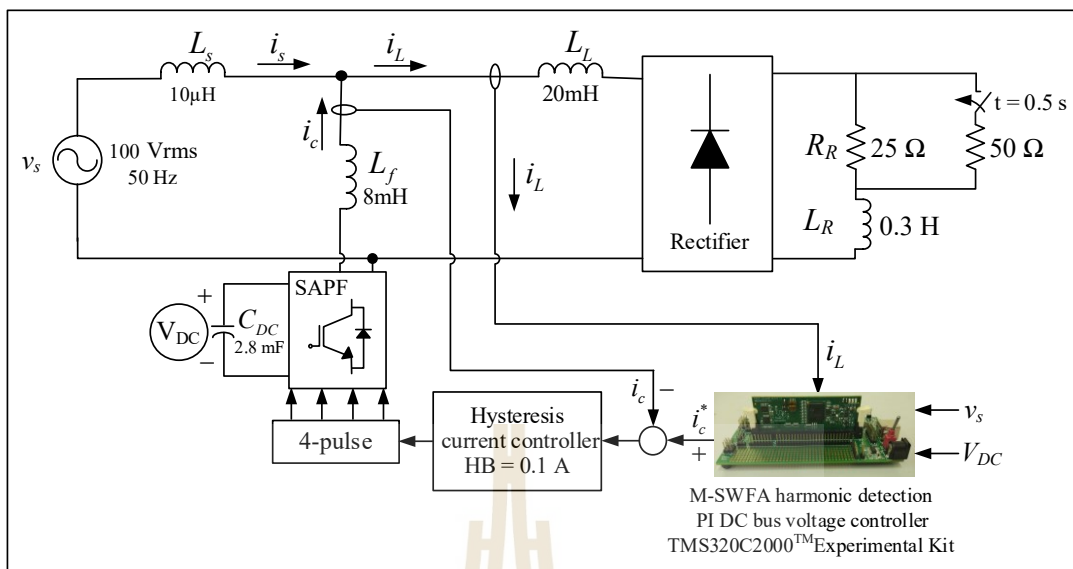
โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)
 ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ ζ มีค่าเท่ากับ 0.707 เพื่อให้ผลการตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (underdamped response) และ ω_n กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10π rad/s เพื่อไม่ให้ผลการตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วสูงและส่งผลกระทบท่ออุปกรณ์ควบคุมกระแสชดเชย (Thierry Thomas, et al., 1998) จากการกำหนดดังกล่าว เมื่อกำหนดค่า K_p และ K_I ตามสมการที่ (4.18) และ (4.19) จะได้ค่า $K_p = 0.124$ และ $K_I = 2.763$ ตามลำดับ

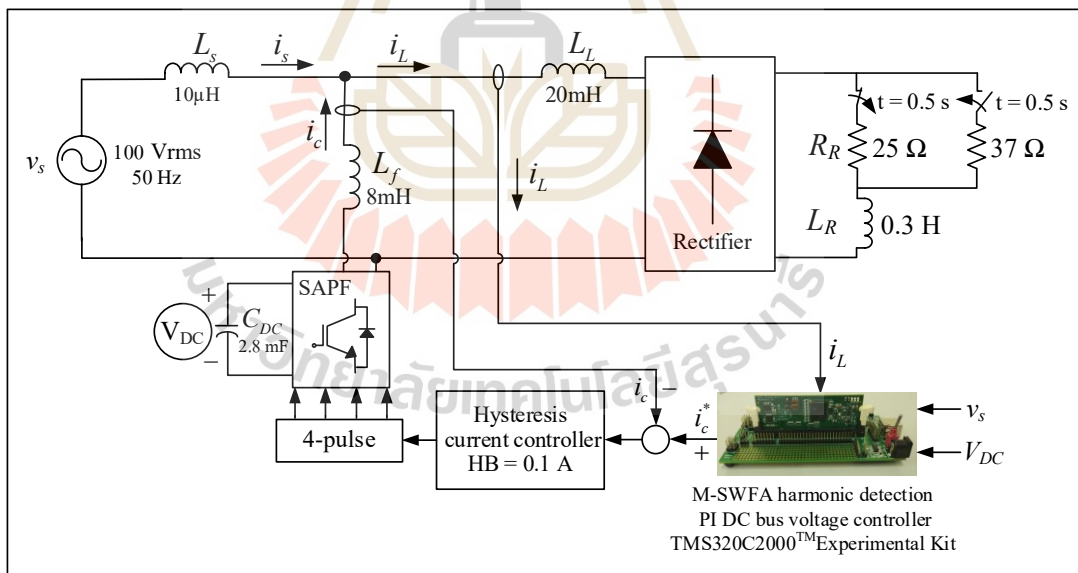
จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ 4.3 ถึง 4.5 จะถูกนำไปใช้สำหรับระบบก่าจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 4.1 ซึ่งในหัวข้อต่อไป จะเป็นการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และสมรรถนะของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสและตัวควบคุมพีไอ รวมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

4.6 การจำลองสถานการณ์การก่าจัดฮาร์มอนิก

ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่ใช้พิจารณาก่าจัดฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นระบบเดียวกันกับที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 โดยมีพิกัดกระแสโหลดปกติเท่ากับ 3 Arms การจำลองสถานการณ์ระบบไฟฟ้าดังกล่าว รวมถึงวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสจะถูกสร้างบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่วนการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกดำเนินการสร้างบนบอร์ด DSP โดยการจำลองสถานการณ์จะกำหนดแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด (จาก 3 Arms เป็น 4 Arms) และกรณีลดขนาดกระแสโหลด (จาก 3 Arms เป็น 2 Arms) ที่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการก่าจัดฮาร์มอนิกกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลดและกรณีลดขนาดกระแสโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

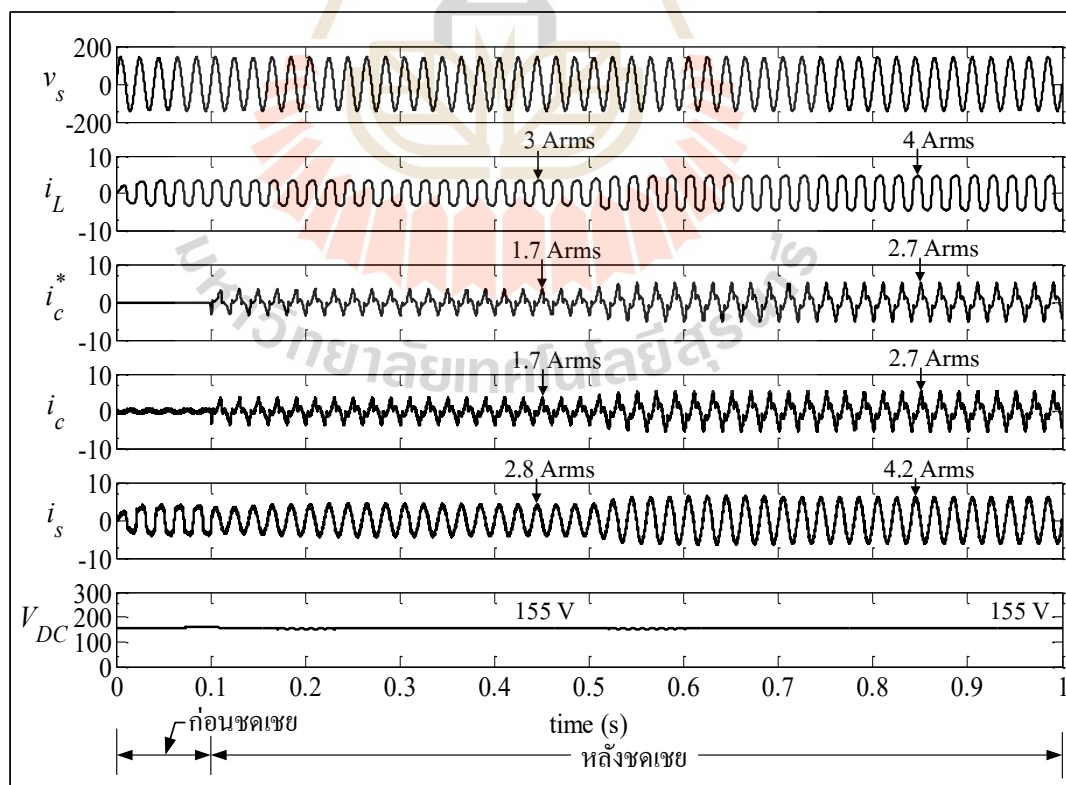


รูปที่ 4.8 ระบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก
กรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด



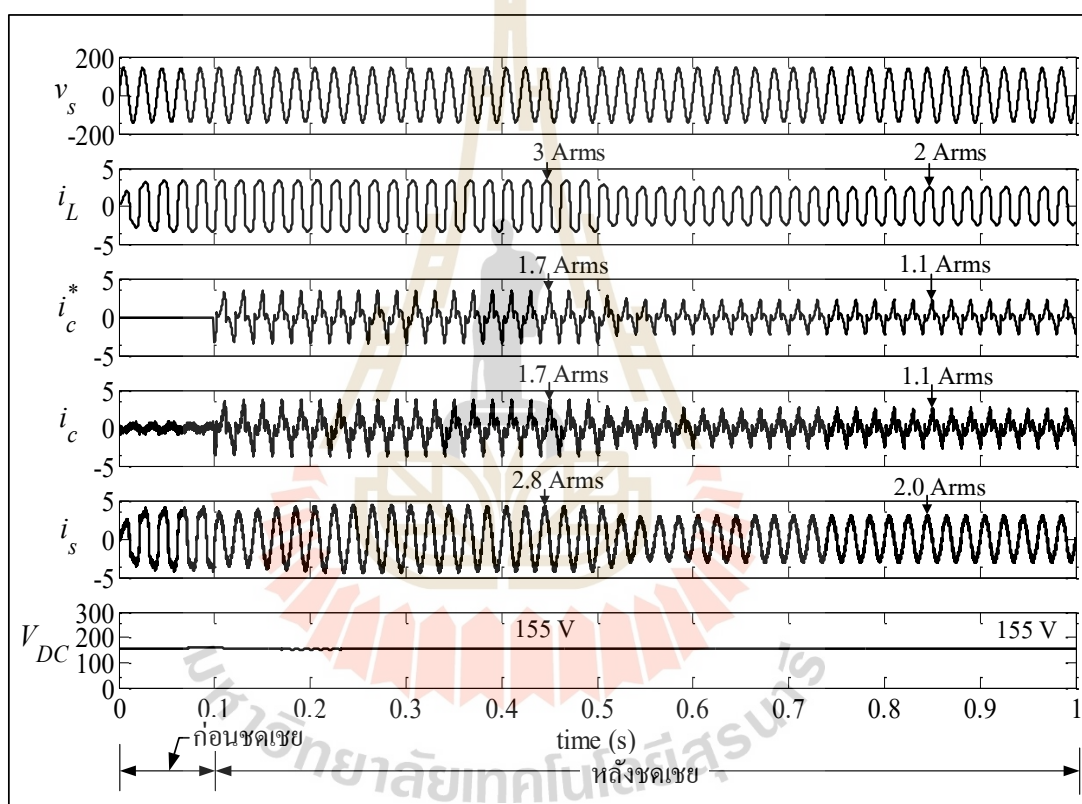
รูปที่ 4.9 ระบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก
กรณีลดขนาดกระแสโหลด

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นก่อนการชดเชยที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที กระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ เนื่องจากในช่วงเวลานี้ยังไม่มีกราดกระแสชดเชย (i_c) จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน อย่างไรก็ตาม ที่ช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานได้เริ่มกราดกระแสชดเชยร่วมกับการควบคุมของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสทำให้ลักษณะของรูปสัญญาณกระแสชดเชยคล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA จึงส่งผลให้ลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยกลับมาเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดกระแสโหลดจากปกติ 3 Arms เป็น 4 Arms ที่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป พบว่า รูปสัญญาณของกระแสชดเชยที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสยังคงมีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน ทำให้กระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยยังคงมีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ นอกจากนี้ เมื่อสังเกตรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตรง (V_{DC}) ที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ จะเห็นได้มีค่าคงที่ประมาณ 155 V ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติและหลังการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดกระแสโหลด

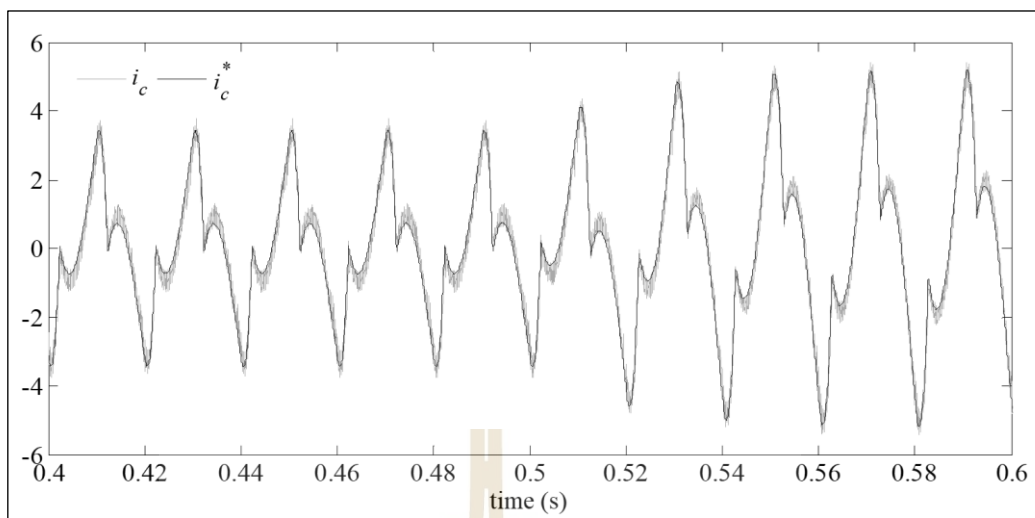


รูปที่ 4.10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด

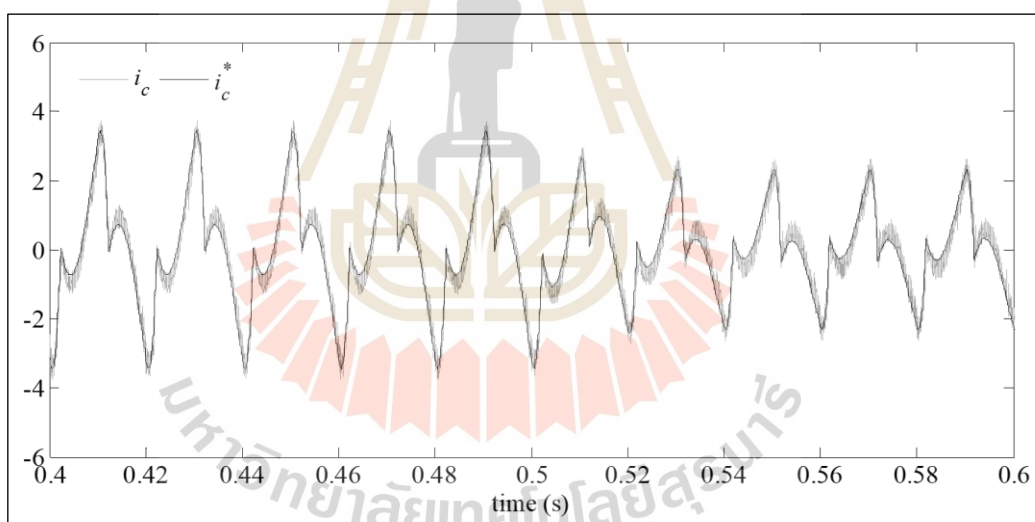
ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสกรณีลดขนาดกระแสโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสยังคงมีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA แม้ขนาดกระแสโหลดจะลดลงเป็น 2 Arms ที่ 0.5 วินาทีเป็นต้นไปก็ตาม ซึ่งส่งผลให้ลักษณะกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้รูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอยังคงมีค่าคงที่ประมาณ 155 V เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.11 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีลดขนาดกระแสโหลด



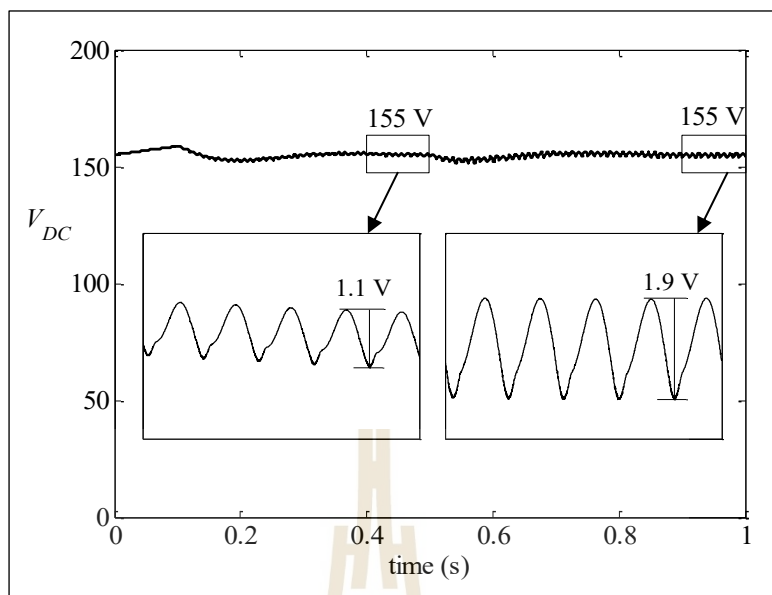
รูปที่ 4.12 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีซีสกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด



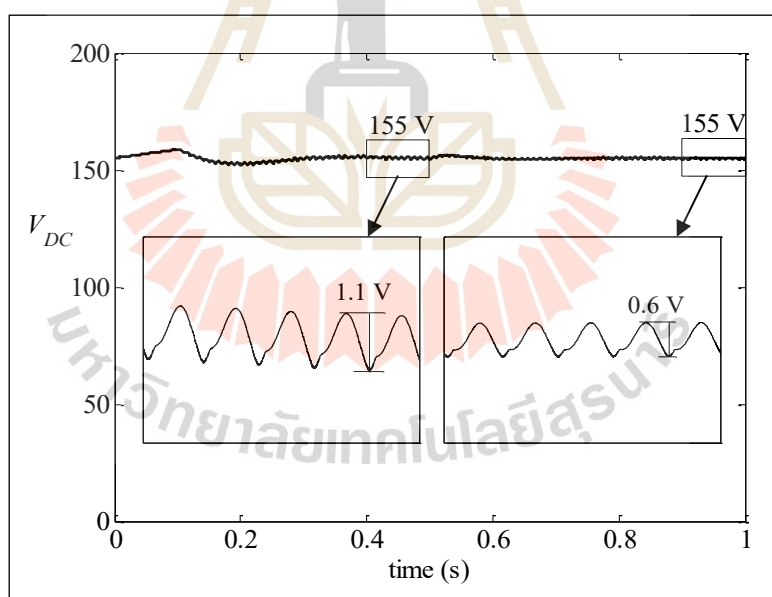
รูปที่ 4.13 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีซีสกรณีลดขนาดกระแสโหลด

ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสในเชิงการเปลี่ยนแปลงโหลดกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลดเป็น 4 Arms และกรณีลดขนาดกระแสโหลดเป็น 2 Arms สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.12 จะสังเกตเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาที่กระแสอ้างอิงมีความชันสูง ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้ตามรอยกระแสอ้างอิงได้โดยไม่เกิดการฟุ้งเกิน และในช่วงเวลาที่กระแสชดเชยมีความชันต่ำ ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสยังคงสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้คล้อยตามกระแสอ้างอิงได้ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสชดเชยสามารถตามรอยกระแสอ้างอิงได้ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติ 3 Arms (เวลา 0.1 ถึง 0.5 วินาที) และในช่วงเวลาที่กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดเป็น 4 Arms (เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป) นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าผลการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่อมีการลดขนาดกระแสโหลดลงเป็น 2 Arms ที่เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป รูปสัญญาณกระแสชดเชยยังคงสามารถตามรอยกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสที่ได้จากการออกแบบมีความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิง และสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด และกรณีลดขนาดกระแสโหลดแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาที่กระแสโหลดปกติ 3 Arms (ช่วงเวลา 0 ถึง 0.5 วินาที) ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอมีการเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดต่ำลง และปรับตัวเข้าสู่ค่าคงที่ที่ 155 V ที่เวลาประมาณ 0.45 วินาที โดยมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 1.1 V และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดกระแสโหลดขึ้นเป็น 4 Arms ที่เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป พบว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าลดต่ำลงในช่วงเวลา 0.5 ถึง 0.6 วินาที ก่อนจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าคงที่ที่ 155 V ที่เวลาประมาณ 0.9 วินาที โดยมีการกระเพื่อมของค่าแรงดันบัสไฟตรงอยู่ที่ 1.9 V ซึ่งค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงทั้งในช่วงกระแสโหลดปกติและหลังเพิ่มขนาดกระแสโหลดมีค่าอยู่ในขอบเขตตามที่ออกแบบไว้คือ 3.1V นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไกรณีลดขนาดกระแสโหลดในรูปที่ 4.15 พบว่า ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในช่วงเวลาที่กระแสโหลดปกติ 3 Arms มีลักษณะเดียวกันกับในกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาการลดขนาดกระแสโหลดเป็น 2 Arms ที่เวลา 0.5 วินาที เป็นต้นไป ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลา 0.5 ถึง 0.6 วินาที ก่อนจะเข้าสู่ค่าคงที่ที่ 155 V ที่เวลา 0.7 วินาที เป็นต้นไป และมีการกระเพื่อมของค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 0.6 V ซึ่งอยู่ในขอบเขตของการออกแบบไว้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด

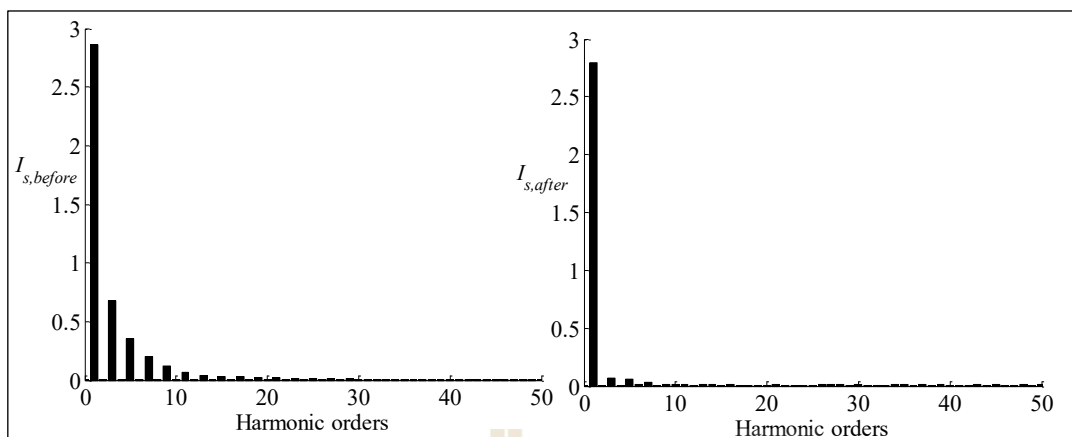


รูปที่ 4.15 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีลดขนาดกระแสโหลด

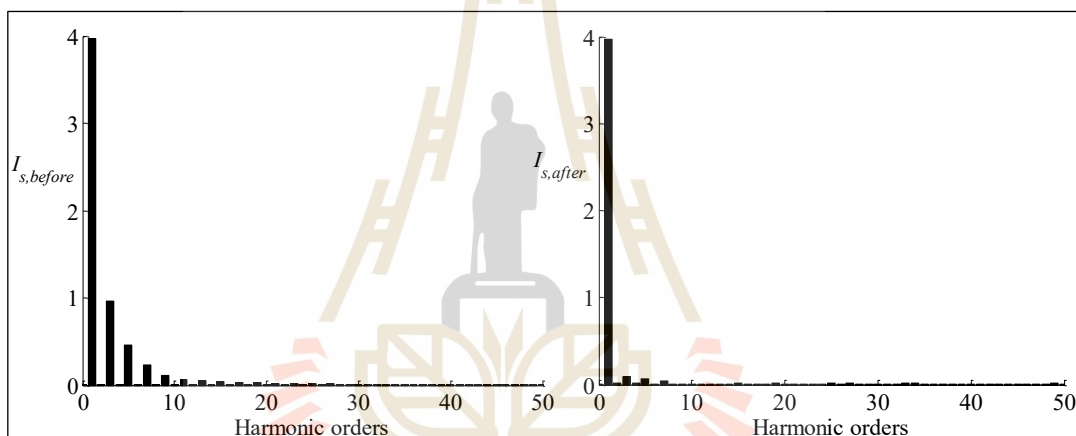
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อนำรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งก่อนและหลังการชดเชยที่พิกัดกระแสโหลด 2 Arms 3 Arms และ 4 Arms ไปวิเคราะห์ด้วยกราฟสเปกตรัมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 (ก) ถึง 4.16 (ค) ตามลำดับ โดยรายละเอียดของขนาดกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ (I_h) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ ($\%HD_{i,h}$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ($\%THD_i$) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาผลสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายที่พิกัดขนาดกระแสโหลดเท่ากับ 2 Arms จะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกปรากฏที่อันดับฮาร์มอนิกเลขคี่ ตั้งแต่อันดับที่ 3 ถึงอันดับที่ 49 ($h=[3,5,7,...,49]$) โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 28.27% ส่วนภายหลังการชดเชยพบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เคยปรากฏมีค่าลดลงเหลือเพียงเล็กน้อย โดยมีค่า $\%THD_i$ หลังการชดเชยเท่ากับ 3.84% และเมื่อพิจารณาผลสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายที่พิกัดขนาดกระแสโหลดเท่ากับ 3 Arms และ 4 Arms พบว่า สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกปรากฏที่อันดับฮาร์มอนิกเลขคี่เช่นเดียวกัน โดยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms มีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 27.92% และที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms มีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 26.62% ส่วนภายหลังการชดเชยผลสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยที่มีปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในอันดับต่าง ๆ ลดลงเหลือเพียงเล็กน้อย โดยที่พิกัดกระแสโหลด 3 Arms ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 3.24% ส่วนที่พิกัดกระแสโหลด 4 Arms มีค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเท่ากับ 2.94%

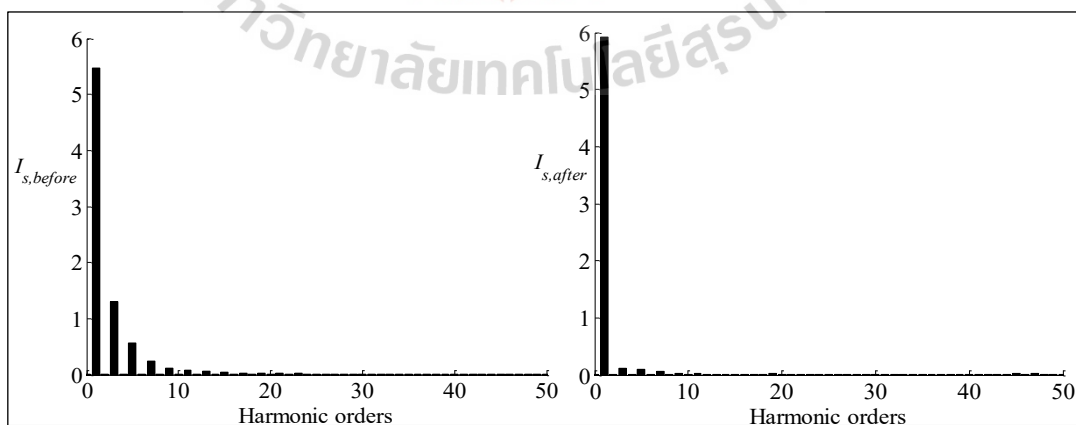
สำหรับผลการเปรียบเทียบมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตเห็นได้ว่า สัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นรูปไซน์ และมีมุมเฟสตรงกันกับมุมเฟสของแรงดัน ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติ 3 Arms (0.3 ถึง 0.5 วินาที) และในช่วงเวลาหลังเพิ่มกระแสโหลดเป็น 4 Arms (0.5 วินาทีเป็นต้นไป) โดยค่าตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยกรณีลดขนาดกระแสโหลดในรูปที่ 4.18 พบว่า รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายยังคงมีมุมเฟสตรงกันกับมุมเฟสของแรงดัน ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติที่พิกัด 3 Arms (0.3 ถึง 0.5 วินาที) และในช่วงเวลาหลังการลดขนาดกระแสโหลดเป็น 2 Arms (0.5 วินาทีเป็นต้นไป) และมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 เช่นเดียวกัน



(ก) พิกัดกระแสโหนด 2 Arms



(ข) พิกัดกระแสโหนด 3 Arms

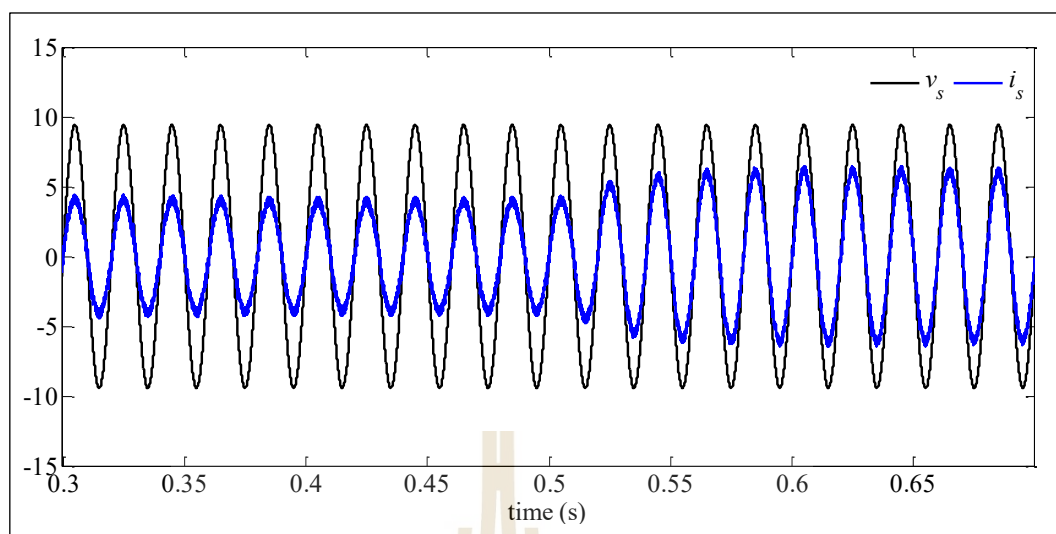


(ค) พิกัดกระแสโหนด 4 Arms

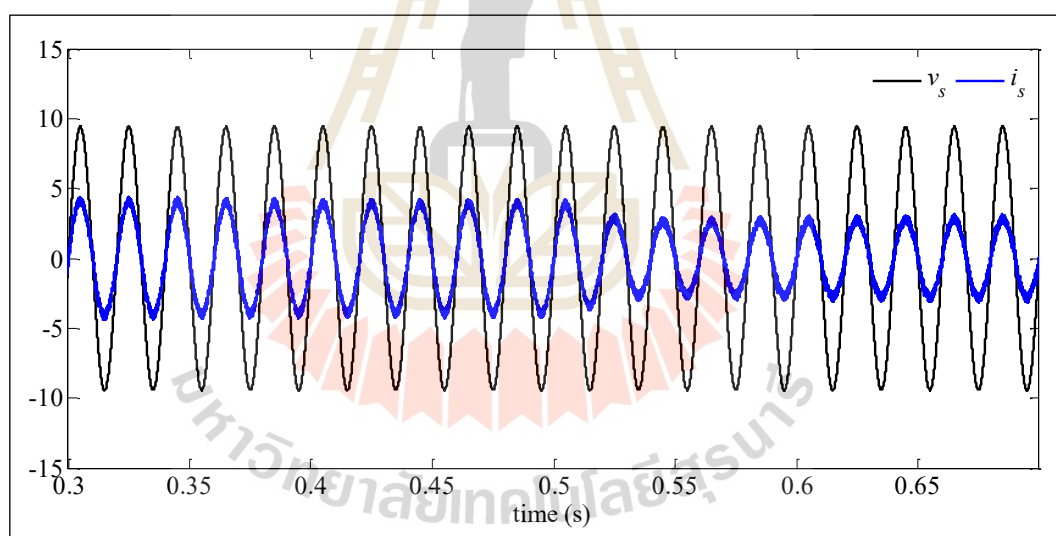
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนและหลังการชดเชยกำลังฮาร์มอนิก

ตารางที่ 4.2 ค่า I_h , $\%HD_{i,h}$ และ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย

h	พิกัดกระแสโหนด 2 Arms				พิกัดกระแสโหนด 3 Arms				พิกัดกระแสโหนด 4 Arms			
	ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย		ก่อนการชดเชย		หลังการชดเชย	
	I_h	$\%HD_{i,h}$	I_h	$\%HD_{i,h}$	I_h	$\%HD_{i,h}$	I_h	$\%HD_{i,h}$	I_h	$\%HD_{i,h}$	I_h	$\%HD_{i,h}$
1	2.86	-	2.79	-	3.97	-	3.97	-	5.47	-	5.91	-
3	0.68	23.79	0.07	2.33	0.96	24.30	0.09	2.19	1.31	23.96	0.12	1.97
5	0.35	12.41	0.06	2.23	0.46	11.69	0.07	1.82	0.56	10.22	0.09	1.55
7	0.20	7.11	0.03	1.20	0.23	5.92	0.04	1.09	0.24	4.35	0.06	1.00
9	0.12	4.10	0.02	0.60	0.12	2.97	0.00	0.02	0.12	2.13	0.03	0.50
11	0.07	2.36	0.02	0.62	0.07	1.72	0.01	0.26	0.09	1.64	0.02	0.36
13	0.04	1.48	0.01	0.45	0.05	1.36	0.00	0.05	0.07	1.28	0.01	0.22
15	0.03	1.14	0.01	0.24	0.05	1.14	0.01	0.37	0.05	0.87	0.00	0.06
17	0.03	0.99	0.00	0.17	0.03	0.87	0.01	0.20	0.03	0.64	0.01	0.24
19	0.02	0.84	0.00	0.14	0.03	0.63	0.01	0.37	0.03	0.56	0.02	0.35
21	0.02	0.67	0.01	0.50	0.02	0.50	0.01	0.25	0.03	0.47	0.01	0.15
23	0.01	0.52	0.01	0.28	0.02	0.45	0.00	0.08	0.02	0.36	0.01	0.11
25	0.01	0.41	0.01	0.21	0.02	0.40	0.01	0.38	0.02	0.30	0.00	0.05
27	0.01	0.37	0.01	0.49	0.01	0.33	0.01	0.31	0.02	0.28	0.00	0.08
29	0.01	0.34	0.00	0.15	0.01	0.27	0.00	0.08	0.01	0.24	0.01	0.12
31	0.01	0.31	0.01	0.26	0.01	0.24	0.01	0.30	0.01	0.20	0.01	0.25
33	0.01	0.26	0.01	0.30	0.01	0.22	0.01	0.33	0.01	0.18	0.02	0.27
35	0.01	0.22	0.01	0.45	0.01	0.20	0.00	0.04	0.01	0.17	0.00	0.07
37	0.01	0.19	0.02	0.57	0.01	0.17	0.00	0.10	0.01	0.15	0.01	0.25
39	0.01	0.18	0.01	0.36	0.01	0.15	0.01	0.13	0.01	0.13	0.02	0.26
41	0.00	0.17	0.00	0.18	0.01	0.14	0.01	0.21	0.01	0.12	0.01	0.20
43	0.00	0.16	0.01	0.33	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01	0.11	0.00	0.06
45	0.00	0.14	0.01	0.44	0.00	0.12	0.00	0.08	0.01	0.10	0.02	0.32
47	0.00	0.12	0.01	0.26	0.00	0.10	0.01	0.19	0.00	0.09	0.02	0.41
49	0.00	0.11	0.00	0.13	0.00	0.10	0.02	0.48	0.00	0.08	0.01	0.17
$\%THD_i$	28.27		3.84		27.92		3.24		26.62		2.93	



รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบมูฟเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายกรณีเพิ่มขนาดกระแสโหลด



รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบมูฟเฟสของแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายกรณีลดขนาดกระแสโหลด

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดในข้างต้น สามารถสรุปค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ก่อนและหลังการชดเชยทั้งในกรณีโหลดปกติ (3 Arms) เพิ่มขนาดกระแสโหลด (4 Arms) และลดขนาดกระแสโหลด (2 Arms) ได้ดังตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ที่พิกัดกระแสโหลดต่าง ๆ

พิกัดกระแสโหลด	ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
	$\%THD_i$	PF_{Dist}	PF_{Disp}	PF	$\%THD_i$	PF_{Dist}	PF_{Disp}	PF
2 Arms	28.27	0.96	0.88	0.85	3.84	1	1	1
3 Arms	27.92	0.96	0.85	0.82	3.24	1	1	1
4 Arms	26.62	0.97	0.80	0.78	2.93	1	1	1

จากค่า $\%THD_i$ และค่า PF ในตารางที่ 4.3 รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดข้างต้น ถือเป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะของวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบ โดยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสและตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรง ทำให้วงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยที่มีลักษณะตามกระแสอ้างอิงและสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าให้กลับมามีค่าเท่ากับ 1 ได้ ทั้งในกรณีขนาดกระแสโหลดปกติ และในกรณีขนาดกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสที่ใช้ในการควบคุมกระแสชดเชย และตัวควบคุมพีไอที่ใช้ควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบได้ถูกนำมาใช้งานในการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงได้เป็นอย่างดี อีกทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอมียังคงที่ตามค่าอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำให้วงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานร่วมกับระบบควบคุมที่ได้ออกแบบสามารถกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

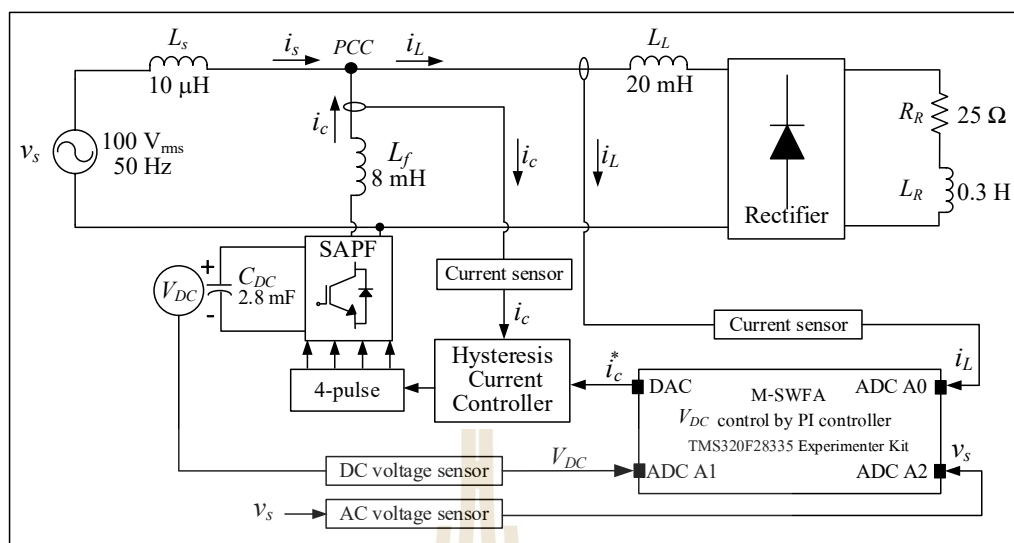
การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

5.1 บทนำ

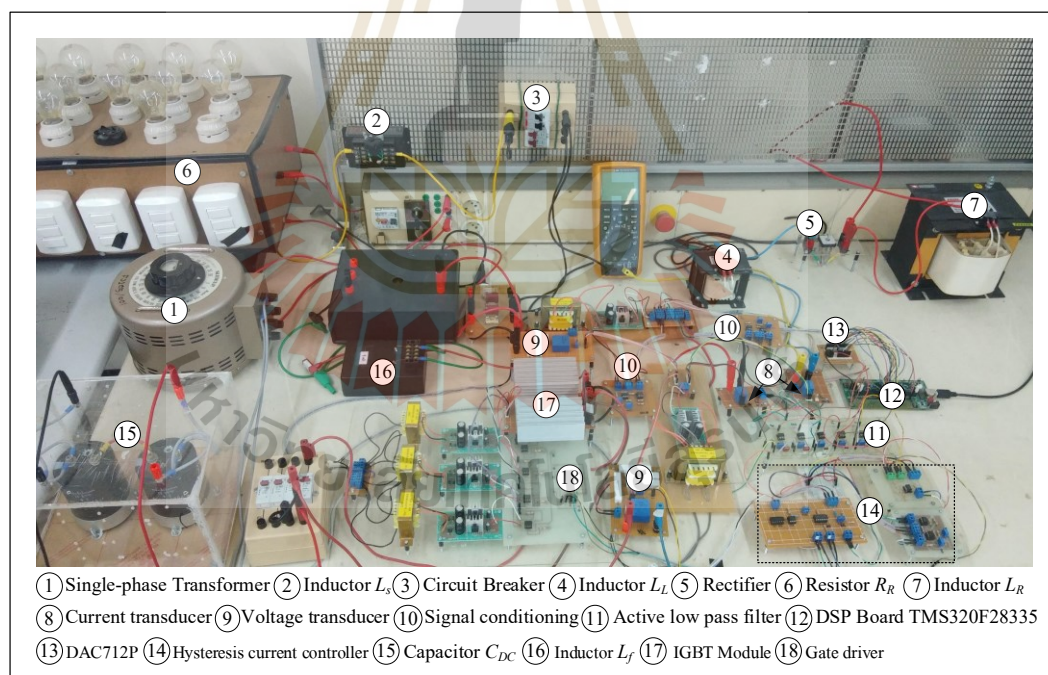
ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบตามรายละเอียดในบทที่ผ่านมา เพื่อดำเนินการทดสอบสมรรถนะในทางปฏิบัติ โดยสามารถแบ่งส่วนประกอบการสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบกำจัดฮาร์มอนิกได้เป็น 5 ส่วน ส่วนแรก คือ ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนที่สอง คือ อุปกรณ์และวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ส่วนที่สาม คือ การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอบนบอร์ด DSP ส่วนที่สี่ คือ วงจรควบคุมกระแสชดเชยฮาร์โมนิก และส่วนสุดท้ายคือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและวงจรจับเกต ซึ่งรายละเอียดการสร้างฮาร์ดแวร์ทั้งหมดจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ส่วนผลการทดสอบการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบฮาร์ดแวร์จะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3

5.2 การสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่พิจารณาที่ใช้สำหรับทดสอบผลในทางปฏิบัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยมีส่วนของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอสร้างอยู่บนบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit จากระบบดังกล่าว สามารถแสดงผลการสร้างฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการสร้างฮาร์ดแวร์แต่ละส่วนสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5.2.1 ถึง 5.2.5



รูปที่ 5.1 ระบบที่พิจารณาสร้างฮาร์ดแวร์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 5.2 ระบบฮาร์ดแวร์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

5.2.1 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

อุปกรณ์ที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ (Single-phase variable voltage transformer) รุ่น TSB-10M ของบริษัทผู้ผลิต VOLTAC ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต

เป็น 110 V และ 220 V ความถี่ 50 ถึง 60 Hz ส่วนด้านเอาต์พุตสามารถปรับใช้งานได้ในช่วงแรงดัน 0 ถึง 260 V พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 A โดยหม้อแปลงนี้จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสำหรับระบบที่จะพิจารณากำจัดฮาร์โมนิก โดยปรับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Vrms และมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz สำหรับลักษณะของหม้อแปลงดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น TSB-10M

อุปกรณ์ที่ 2 ตัวเหนี่ยวนำ L_s ขนาด $10\ \mu\text{H}$ มีพิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A ใช้แทนค่าความเหนี่ยวนำในสายส่งของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีลักษณะดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ตัวเหนี่ยวนำ L_s ขนาด $10\ \mu\text{H}$

อุปกรณ์ที่ 3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) รุ่น S401 E-B8 ของบริษัทผู้ผลิต ABB ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 230 V พิกัดกระแสไฟฟ้า 8 A ความถี่ 50 ถึง 60 Hz สำหรับลักษณะของอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์ รุ่น S401 E-B8

อุปกรณ์ที่ 4 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 20 mH ของบริษัทผู้ผลิต ESTEL มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 V และมีพิกัดกระแสไฟฟ้า 5 A ความถี่ 50 Hz อุปกรณ์ดังกล่าวถูกใช้เป็นโหลด L_L ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยลักษณะของอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ตัวเหนี่ยวนำ L_L ขนาด 20 mH

อุปกรณ์ที่ 5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ (Single-phase bridge rectifier) รุ่น GBPC3510 ของบริษัทผู้ผลิต SEP ELECTRONIC CORP มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1000 V และพิกัดกระแสไฟฟ้า 35 A แสดงดังรูปที่ 5.7 ทำหน้าที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 5.7 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ รุ่น GBPC3510

อุปกรณ์ที่ 6 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวต้านทาน R_R โดยนำไปใช้เป็นโหลดค่าความต้านทานของวงจรเรียงกระแสที่มีค่าเท่ากับ $25\ \Omega$



รูปที่ 5.8 ชุดโหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ที่ 7 ตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 0.3 H มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 V และพิกัดกระแสไฟฟ้า 5 A ความถี่ 50 Hz ของบริษัทผู้ผลิต ESTEL อุปกรณ์ดังกล่าวถูกใช้เป็นโหลดตัวเหนี่ยวนำ L_R ของวงจรเรียงกระแส มีลักษณะดังรูปที่ 5.9

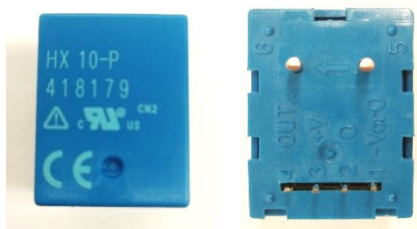


รูปที่ 5.9 ตัวเหนี่ยวนำ L_R ขนาด 0.3 H

5.2.2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สร้างวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ 8 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (Current sensor) รุ่น HX 10-P ของบริษัท LEM มีช่วงการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 10 A โดยใช้สำหรับตรวจวัดค่ากระแสโหลด (i_L) ของระบบไฟฟ้าและส่งค่าให้กับบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit เพื่อใช้ในการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกตามวิธี M-SWFA นอกจากนี้ยังใช้ตรวจวัดค่ากระแสชดเชย (i_c)

เพื่อใช้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน e_c ให้กับตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้ารุ่น HX 10-P

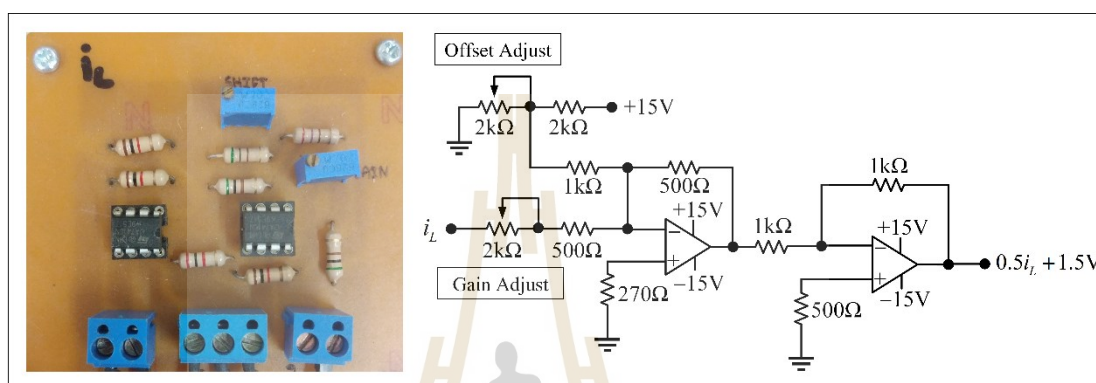
อุปกรณ์ที่ 9 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้า (Voltage sensor) รุ่น LV25-P ของบริษัทผู้ผลิต LEM สามารถตรวจวัดได้ทั้งแรงดันกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) มีช่วงการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10 ถึง 500 V อุปกรณ์ดังกล่าวใช้ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_s) เพื่อใช้เป็นมุมเฟสอ้างอิงให้กับ การ คำนวณ ตรวจ จับ กระแส ฮาร์โมนิก ด้วยวิธี M-SWFA และใช้ตรวจวัดค่าแรงดันบัสไฟตรง V_{DC} ที่คกร้อมตัวเก็บประจุ C_{DC} เพื่อใช้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน e_{DC} ให้กับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ดำเนินการภายในบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 5.11



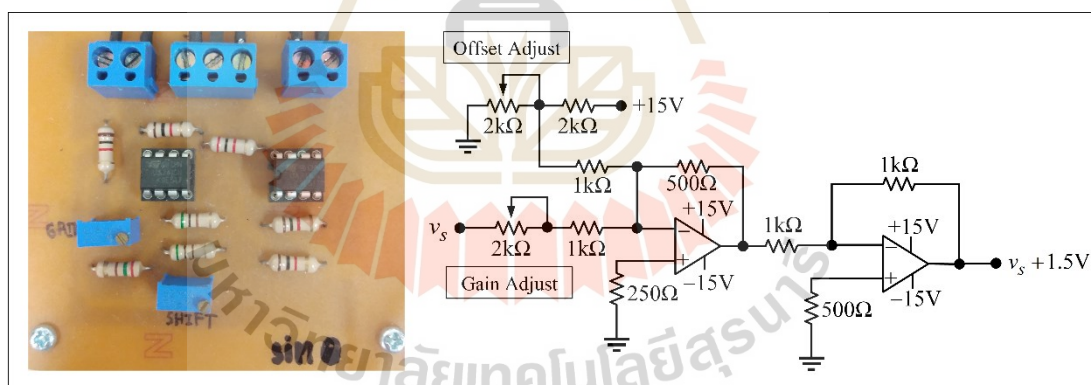
รูปที่ 5.11 ตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้ารุ่น LV25-P

อุปกรณ์ที่ 10 วงจรปรงแต่งสัญญาณ (Signal conditioning circuit) ที่สร้างด้วยไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 ของบริษัทผู้ผลิต STMicroelectronics ใช้สำหรับปรับขนาดและขระดับสัญญาณกระแสโหลด (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_s) ที่ได้จากตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและตัวตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าที่เดิมมีสัญญาณทั้งในซิกบวกและซิกลบให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3 V เท่านั้น ทั้งนี้

เนื่องจากเป็นขอบเขตการรับสัญญาณแอนะล็อกของช่องสัญญาณ ADC (Analog-to-Digital Converter) ของบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit โดยวงจรปรั้งแต่งสัญญาณกระแสไหล i_L และแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย v_s มีลักษณะโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (ภักดี สวัสดิ์นะที, 2556)



(ก) สำหรับปรับสัญญาณกระแสไหล



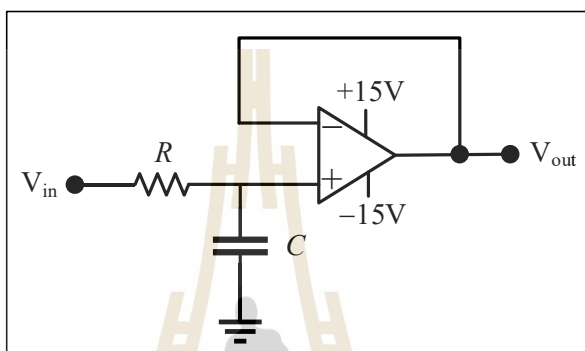
(ข) สำหรับปรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย

รูปที่ 5.12 วงจรปรั้งแต่งสัญญาณ

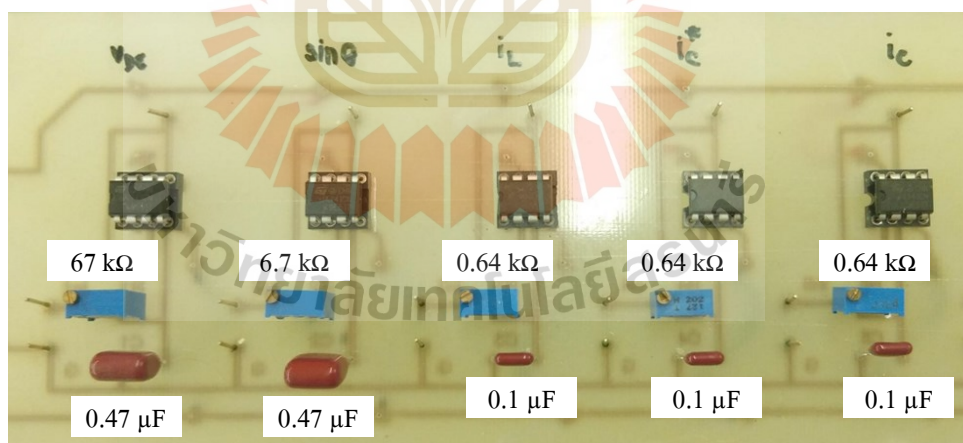
อุปกรณ์ที่ 11 วงจรกรองแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่ง (First order low-pass filter) ใช้ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงออกจากสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการควบคุมวงจรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 5.13 โดยสามารถออกแบบพารามิเตอร์ R และ C ของวงจรได้จากการกำหนดค่าความถี่ตัด (f_c) ดังสมการที่ (5.1) จากรูปที่ 5.13 ได้กำหนดให้วงจรมีค่าความถี่ตัดของ

กระแสโหลด (i_L) กระแสอ้างอิง (i_c^*) และกระแสชดเชย (i_c) เท่ากับ 2500 Hz ส่วนค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) และแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) กำหนดให้มีความถี่ตัดเท่ากับ 5 Hz และ 50 Hz ตามลำดับ ทำให้ได้วงจรกรองแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่งดังแสดงในรูปที่ 5.14

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1)$$



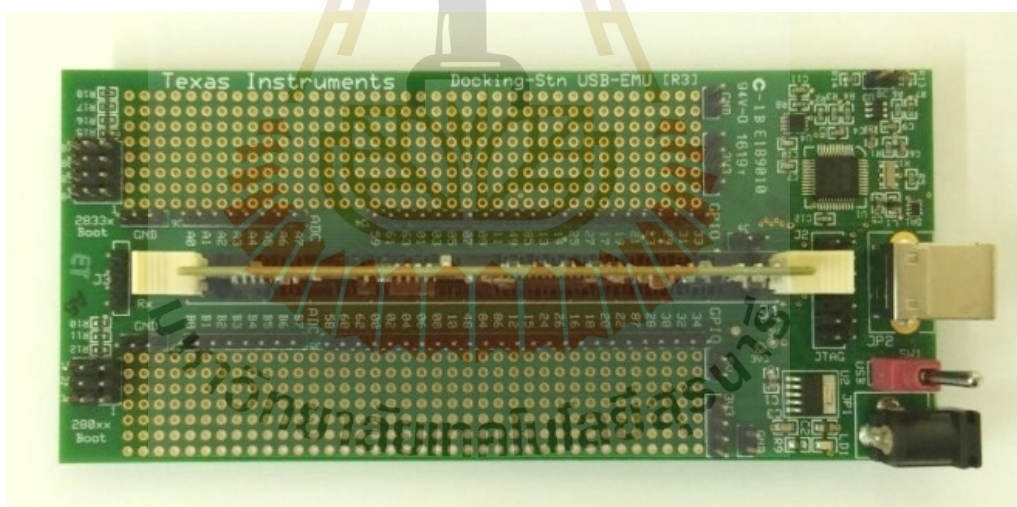
รูปที่ 5.13 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่ง



รูปที่ 5.14 วงจรกรองแอกทีฟแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่ง

5.2.3 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กและควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรง

อุปกรณ์ที่ 12 บอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ของบริษัทผู้ผลิต Texas Instrument มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแสดงดังรูปที่ 5.15 บอร์ดนี้มีความเร็วในการประมวลผลของซีพียู 150 MHz และมีความละเอียด 32 บิต มีพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อกจำนวน 2 พอร์ต พอร์ตละ 8 ช่องสัญญาณ คือ ADC A0-A7 และ ADC B0-B7 ช่องสัญญาณเหล่านี้สามารถแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 บิตได้โดยตรง นอกจากนี้ยังมีพินภายนอกที่สามารถเชื่อมต่อเพื่อใช้เป็นพินอินพุตหรือพินเอาต์พุต (GPIO) ทั้งหมด 47 พิน (จากจำนวนพินทั้งหมด 88 พิน โดยแบ่งเป็น 3 พอร์ต คือ GPA 00-31 GPB 32-63 GPC 64-87) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละพินแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้งานช่องสัญญาณ ADC A0-A2 สำหรับรับสัญญาณแอนะล็อกของกระแสโหลด (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) และแรงดันบัลไฟตรง (V_{DC}) ตามลำดับ เพื่อนำไปคำนวณตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยวิธี M-SWFA และควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 5.15 บอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดแต่ละพินของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit

Pin	Signal	Pin	Signal
00	GPIO0 / EPWM1A	24	GPIO24 / ECAP1 / EQEP2A / MDXB
01	GPIO1 / EPWM1B / ECAP6 / MFSRB	25	GPIO25 / ECAP2 / EQEP2B / MDRB
02	GPIO2 / EPWM2A	26	GPIO26 / ECAP3 / EQEP2I / MCLKXB
03	GPIO3 / EPWM2B / ECAP5 / MCLKRB	27	GPIO27 / ECAP4 / EQEP2S / MFSXB
04	GPIO4 / EPWM3A	28	GPIO28 / SCIRXDA / XZCS6
05	GPIO5 / EPWM3B / MFSRA / ECAP1	29	GPIO29 / SCITXDA / XA19
06	GPIO6 / EPWM4A / EPWMSYNCI / EPWMSYNCO	30	GPIO30 / CANRXA / XA18
07	GPIO7 / EPWM4B / MCLKRA / ECAP2	31	GPIO31 / CANTXA / XA17
08	GPIO8 / EPWM5A / CANTXB / ADCSOCAO	32	GPIO32 / SDAA / EPWMSYNCI / ADCSOCAO
09	GPIO9 / EPWM5B / SCITXDB / ECAP3	33	GPIO33 / SCLA / EPWMSYNCO / ADCSOCBO
10	GPIO10 / EPWM6A / CANRXB / ADCSOCBO	34	GPIO34 / ECAP1 / XREADY
11	GPIO11 / EPWM6B / SCIRXDB / ECAP4	48	GPIO48 / ECAP5 / XD31
12	GPIO12 / TZ1 / CANTXB / MDXB	49	GPIO49 / ECAP6 / XD30
13	GPIO13 / TZ2 / CANRXB / MDRB	58	GPIO58 / MCLKRA / XD21
14	GPIO14 / TZ3 / XHOLD / SCITXDB / MCLKXB	59	GPIO59 / MFSRA / XD20
15	GPIO15 / TZ4 / XHOLDA / SCIRXDB / MFSXB	60	GPIO60 / MCLKRB / XD19
16	GPIO16 / SPISIMOA / CANTXB / TZ5	61	GPIO61 / MFSRB / XD18
17	GPIO17 / SPISOMIA / CANRXB / TZ6	62	GPIO62 / SCIRXDC / XD17
18	GPIO18 / SPICLKA / SCITXDB / CANRXA	63	GPIO63 / SCITXDC / XD16
19	GPIO19 / SPISTEA / SCIRXDB / CANTXA	84	GPIO84 / XA12
20	GPIO20 / EQEP1A / MDXA / CANTXB	85	GPIO85 / XA13
21	GPIO21 / EQEP1B / MDRA / CANRXB	86	GPIO86 / XA14
22	GPIO22 / EQEP1S / MCLKXA / SCITXDB	87	GPIO87 / XA15
23	GPIO23 / EQEP1I / MFSXA / SCIRXDB		

สำหรับโปรแกรมระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอโดยใช้บอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit สามารถสรุปเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 5.16 และสามารถอธิบายโปรแกรมแต่ละส่วนได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 คือ การประกาศเรียกฟังก์ชันใช้งานบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit และฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของภาษาซี รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชัน เช่น ฟังก์ชัน ADC ฟังก์ชัน GPIO เป็นต้น

ส่วนที่ 2 คือ การกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ส่วนที่ 3 คือ การโหลดรับข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ค่ากระแสโหลด (i_L) ที่ช่องสัญญาณ ADCA0 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_s) ที่ช่องสัญญาณ ADCA1 และค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{DC}) ที่ช่องสัญญาณ ADCA2

ส่วนที่ 4 คือ การคำนวณค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ (i_{ac}) ที่ใช้ในการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งมีค่า K_p เท่ากับ 0.124 และ K_I เท่ากับ 2.763

ส่วนที่ 5 คือ การคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก i_h ด้วยการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.3 บทที่ 3

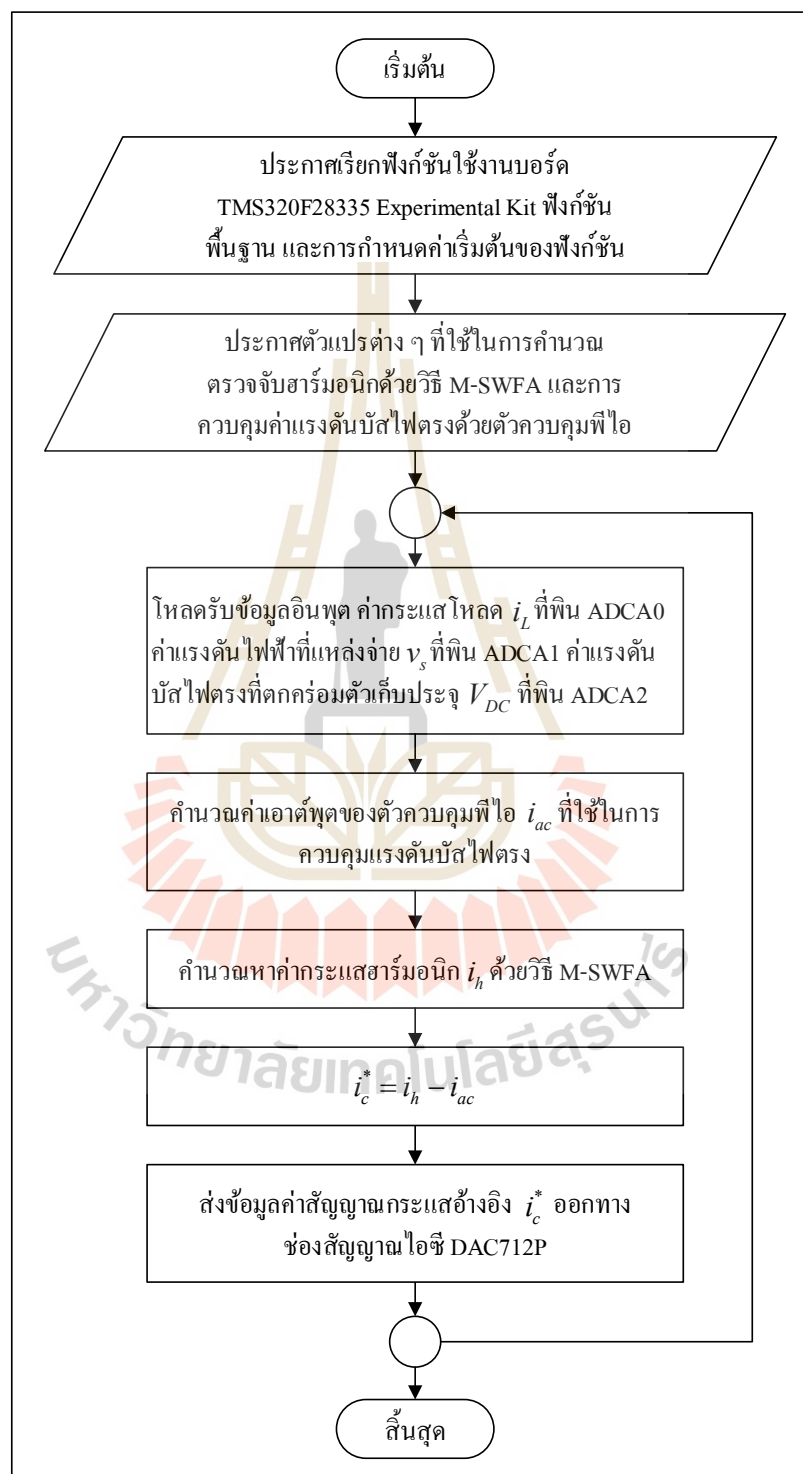
ส่วนที่ 6 คือ การคำนวณค่ากระแสอ้างอิง i_c^* จากค่ากระแสฮาร์มอนิก (i_h) และค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอที่ใช้ควบคุมแรงดันบัลไฟตรง (i_{ac}) ด้วยสมการที่ (5.2)

$$i_c^* = i_h - i_{ac} \quad (5.2)$$

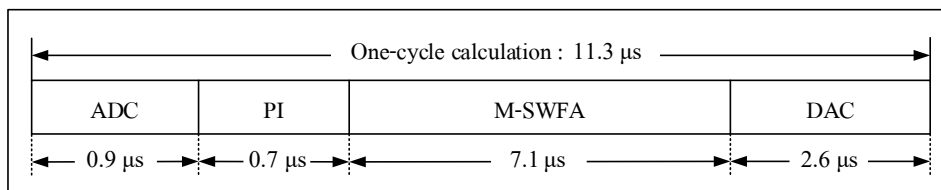
ส่วนที่ 7 คือ การส่งค่ากระแสอ้างอิง i_c^* ที่คำนวณได้ไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital-to-Analog Converter: DAC) ซึ่งสร้างด้วยไอซี DAC712P เพื่อส่งไปยังตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสเพื่อควบคุมกระแสชดเชยต่อไป

การคำนวณของโปรแกรมในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 7 เป็นเพียงการคำนวณรอบแรกซึ่งได้ข้อมูลกระแสอ้างอิง i_c^* เพียงหนึ่งจุดเท่านั้น สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง i_c^* ค่าใหม่ทุกครั้งจะทำการคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 7 ตลอดการควบคุม ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมหนึ่งรอบมีค่าประมาณเท่ากับ 11.3 μs ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.17

หมายเหตุ : โค้ดโปรแกรมภาษาซีระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถดูได้จากภาคผนวก ค



รูปที่ 5.16 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

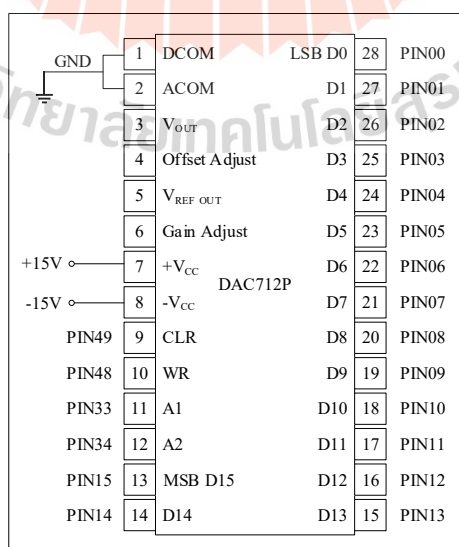


รูปที่ 5.17 แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้คำนวณโปรแกรมระบบควบคุม
วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในหนึ่งรอบ

อุปกรณ์ที่ 13 ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เบอร์ DAC712P ของบริษัทผู้ผลิต Burr Brown ซึ่งมีความละเอียด 15 บิต โดยใช้ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลของสัญญาณกระแสอ้างอิง i_c^* ที่ได้จากการคำนวณด้วยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit เป็นสัญญาณแบบแอนะล็อกเพื่อส่งต่อไปยังวงจรควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์ซิส สำหรับลักษณะของไอซี DAC712P สามารถดูได้จากรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ไอซีเบอร์ DAC712P



รูปที่ 5.19 การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit

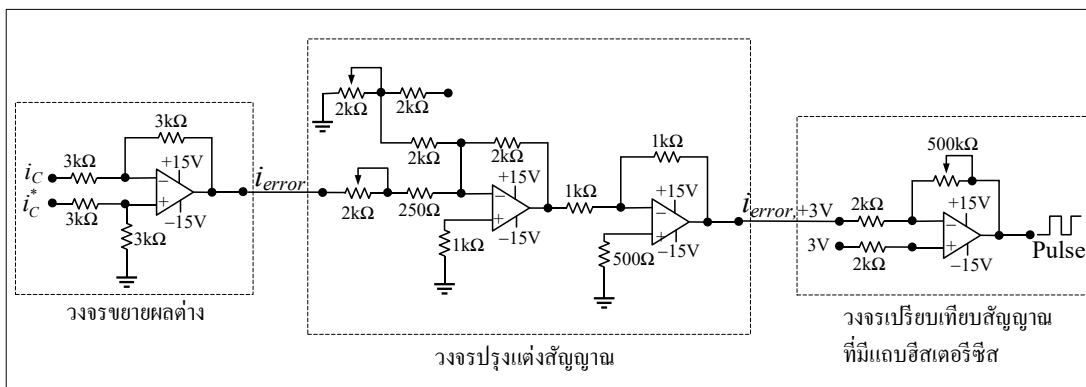
การเชื่อมต่อไอซี DAC712P กับพินของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 โดยขั้นตอนการสั่งการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกสามารถทำได้โดยการใช้คำสั่งสัญญาณดิจิทัลเวิร์ด 4 บิต ผ่านพิน 33 (A1) 34 (A2) และพิน 48 (WR) 49 (CLR) ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยขั้นตอนที่ 1 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับไอซี DAC712P ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูล i_c^* ขนาด 15 บิต ขั้นตอนที่ 3 คือ การบ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 คือ ขั้นตอนสำหรับการโหลดอินพุตแลตช์ (input latch) และขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 คือ การโหลดดีทิวเอแลตช์ (D/A latch) ของไอซี DAC712P (ทศพร ฌรณกุลฤทธิ์, 2557)

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการสั่งการควบคุมสำหรับไอซี DAC712P

ขั้นตอนการสั่งการควบคุม ของไอซี DAC712P	พิน 49 (CLR)	พิน 48 (WR)	พิน 34 (A2)	พิน 33 (A1)
ขั้นที่ 1	1	1	1	1
ขั้นที่ 2	โหลดข้อมูลกระแสอ้างอิง i_c^* ผ่านพิน 00 ถึงพิน 15			
ขั้นที่ 3	1	1	1	1
ขั้นที่ 4	1	1	1	0
ขั้นที่ 5	1	0	1	0
ขั้นที่ 6	1	1	1	0
ขั้นที่ 7	1	1	0	1
ขั้นที่ 8	1	0	0	1
ขั้นที่ 9	1	1	0	1

5.2.4 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส

อุปกรณ์ที่ 14 วงจรควบคุมกระแสชดเชย มีลักษณะโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.20 ซึ่งประกอบด้วย 3 วงจรย่อย คือ วงจรขยายผลต่าง (Differential amplifier circuit) วงจรปรุงแต่งสัญญาณ (Signal conditioning circuit) และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีแถบฮิสเทอรีซิส (Comparator circuit with hysteresis band) โดยมีรายละเอียดของแต่ละวงจร ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.20 โครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของวงจรควบคุมกระแสชดเชย

วงจรขยายผลต่าง ทำหน้าที่คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน e_c ระหว่างกระแสอ้างอิง (i_c^*) กับกระแสชดเชย (i_c) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแถบฮิสเตอร์ซิส โดยสามารถกำหนดค่าอัตราขยายของวงจรผ่านการออกแบบค่าตัวต้านทานดังสมการที่ (5.3) อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้วงจรขยายผลต่างมีอัตราขยายเท่ากับ 1 เนื่องจากค่า e_c จะถูกส่งต่อไปยังวงจรปรับแต่งสัญญาณซึ่งสามารถปรับเพิ่มหรือลดขนาดสัญญาณให้เหมาะสมกับการทำงานได้ภายหลัง

$$e_c = \frac{R_f}{R_i} (i_c^* - i_c) \quad (5.3)$$

วงจรปรับแต่งสัญญาณ ทำหน้าที่ยกระดับสัญญาณ e_c ให้มีค่าอยู่เฉพาะเชิงบวกและปรับเพิ่มหรือลดขนาดสัญญาณเพื่อให้เหมาะสมต่อการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งมีขอบเขตการรับสัญญาณอินพุตในช่วง 0 ถึง 10 V เท่านั้น สำหรับวงจรปรับแต่งสัญญาณที่สร้างขึ้นได้กำหนดให้ยกระดับสัญญาณ e_c ขึ้น 3 V เพื่อให้สอดคล้องกับค่าแรงดันอ้างอิงของแถบฮิสเตอร์ซิสในวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีแถบฮิสเตอร์ซิส ทำหน้าที่ควบคุมกระแสชดเชยและสร้างพัลส์ควบคุมการสวิตช์วงจรรอกำลังแอกทิฟแบบขนานด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณ e_c กับแถบฮิสเตอร์ซิส วงจรดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากไอซีเปรียบเทียบสัญญาณ เบอร์ LM319N จากผู้ผลิต STMicroelectronics ซึ่งสามารถกำหนดขนาดแถบฮิสเตอร์ซิสได้จากการออกแบบค่าตัวต้านทาน R_i และ R_f ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.4)

$$HB = \frac{2R_1}{R_1 + R_f} V_{CC} \quad (5.4)$$

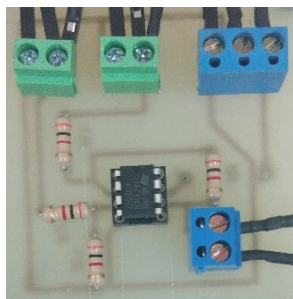
โดยที่ V_{CC} คือ ค่าแรงดันไฟเลี้ยงของวงจร (Voltage at the common collector) มีค่าเท่ากับ +15 V

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบใช้ค่าแถบฮิสเตอร์ซิส (HB) มีขนาดเท่ากับ 0.1 A ซึ่งเมื่อกำหนดให้ R_1 มีค่าเท่ากับ 2 k Ω จะสามารถคำนวณค่า R_f ได้เท่ากับ 598 k Ω แสดงได้ดังนี้

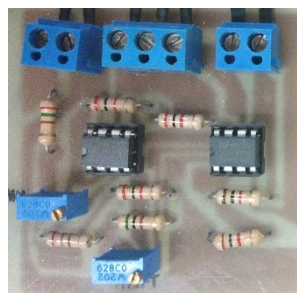
$$R_f = \frac{2R_1}{HB} V_{CC} - R_1 = \frac{2(2k\Omega)}{0.1A} (15V) - 2k\Omega = 598 k\Omega$$

จากค่า R_f ในช่วงต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (trimmer potentiometer) ขนาด 1 M Ω เพื่อความสะดวกในการปรับขนาดและความถูกต้องของขนาดแถบฮิสเตอร์ซิส และเนื่องจากพัลส์ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณสามารถสั่งการได้เพียงสวิทช์ S_1 และ S_4 ของวงจรกรองกำลังแอกทิฟแบบขนานเท่านั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ไอซีอินเวอร์เตอร์ (Not gate) เบอร์ 74LS04 ของบริษัทผู้ผลิต STMicroelectronics สำหรับสร้างพัลส์สั่งการสวิทช์ S_2 และ S_3

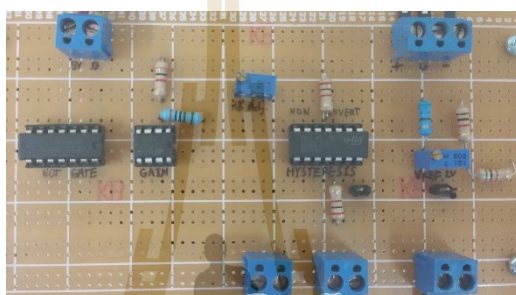
จากโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของวงจรควบคุมกระแสชดเชยในรูปที่ 5.20 สามารถแสดงผลการสร้างวงจรควบคุมกระแสชดเชยซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายผลต่าง วงจรปรั้งแต่งสัญญาณ และวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีแถบฮิสเตอร์ซิส ได้ดังรูปที่ 5.21 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมกระแสชดเชยในเบื้องต้นด้วยการใช้สัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับ 30 kHz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณแทนสัญญาณ e_c เพื่อเปรียบเทียบกับแถบฮิสเตอร์ซิส ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วงจรควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์ซิสสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง พัลส์การสวิทช์มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเมื่อสัญญาณ e_c อยู่เหนือขอบเขตของแถบฮิสเตอร์ซิสที่มีขนาดเท่ากับ 0.1 V (มีความหมายเท่ากับ 0.1 A) และมีความถี่ในการสวิทช์อยู่ในขอบเขตของโมดูลไอจีบีทีที่เลือกใช้ (ความถี่ในการสวิทช์สูงสุดเท่ากับ 30 kHz)



(ก) วงจรขยายผลต่าง

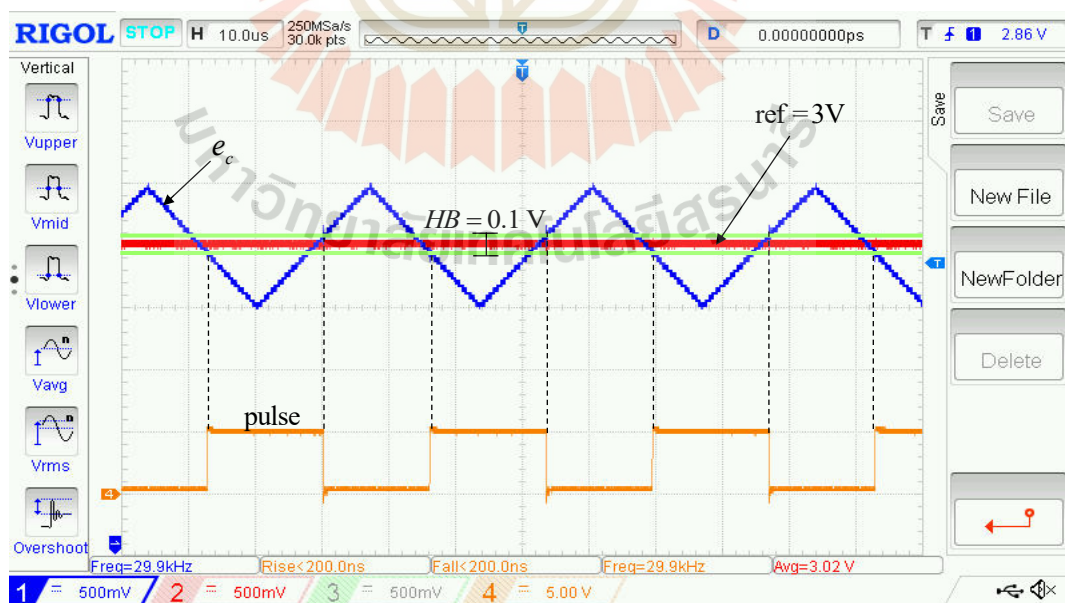


(ข) วงจรปรุ้งแต่งสัญญาณ



(ค) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีแถบฮิสเตอร์ซิส

รูปที่ 5.21 วงจรควบคุมกระแสสวิตช์เซมิคอนดักเตอร์



รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบวงจรควบคุมกระแสสวิตช์เซมิคอนดักเตอร์

5.2.5 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและวงจรขับเคลื่อน

อุปกรณ์ที่ 15 ตัวเก็บประจุ C_{DC} มีความจุไฟฟ้าเท่ากับ 2800 μF (ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 5600 μF จำนวนสองตัวต่ออนุกรมกัน) และมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.23 โดยตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานสำหรับการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 5.23 ตัวเก็บประจุ C_{DC} ความจุไฟฟ้า 2800 μF

อุปกรณ์ที่ 16 ตัวเหนี่ยวนำ L_f ขนาดเท่ากับ 8 mH พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง โดยมีลักษณะของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.24

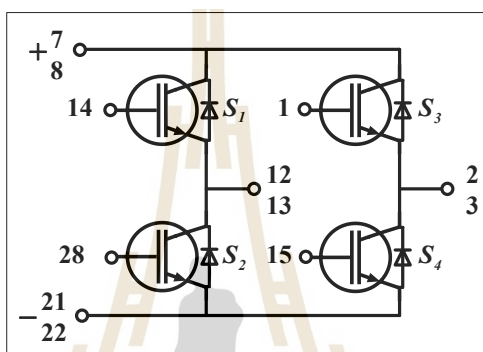


รูปที่ 5.24 ตัวเหนี่ยวนำ L_f ขนาด 8 mH

อุปกรณ์ที่ 17 โมดูลไอจีบีที (IGBT Module) รุ่น SK45GH063 ของบริษัทผู้ผลิต Semikron มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 600 V และพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 45 A ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของโมดูลไอจีบีทีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 และมีรายละเอียดสำหรับเชื่อมต่อแสดงในรูปที่ 5.26

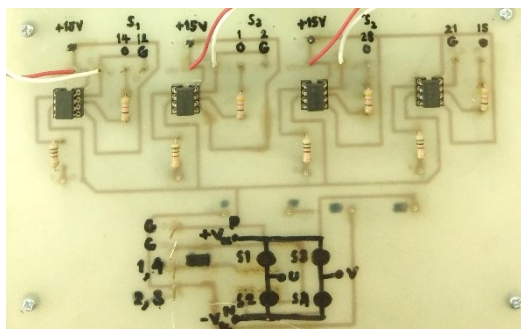


รูปที่ 5.25 ไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063



รูปที่ 5.26 ขาสำหรับใช้เชื่อมต่อของไอจีบีทีโมดูล รุ่น SK45GH063

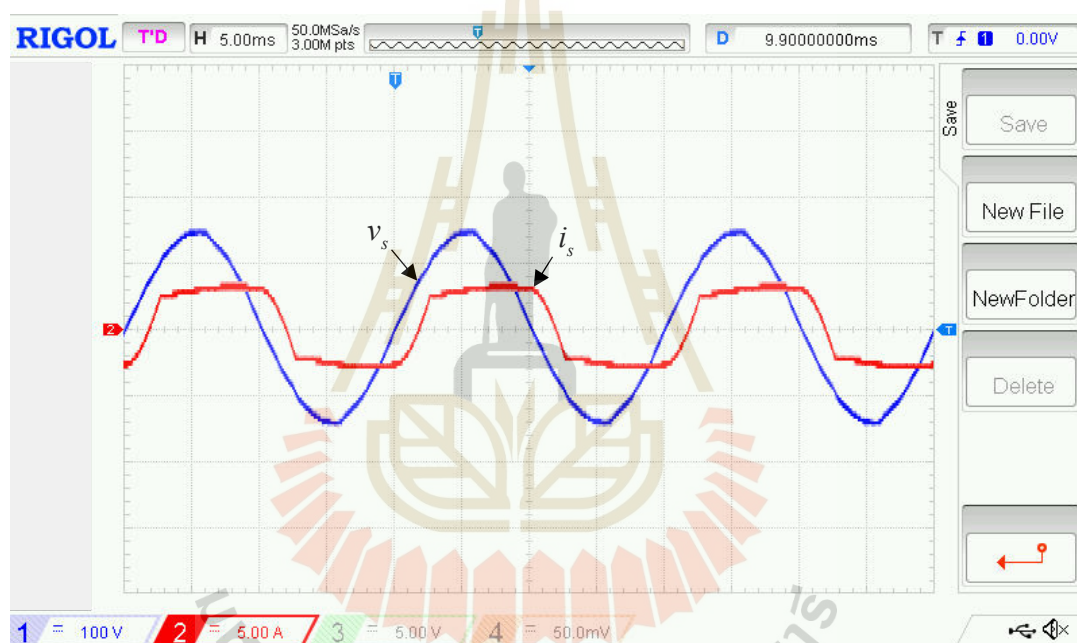
อุปกรณ์ที่ 18 วงจรขับเกต (Gate driver circuit) ใช้ทำหน้าที่ขยายสัญญาณพัลส์จากฝั่งของตัวควบคุมที่เดิมมีขนาด 5 V ให้มีขนาด 15 V เพื่อเป็นพัลส์จุดชนวนขาเกตของอุปกรณ์ไอจีบีทีภายในวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่แยกกราวด์ของระบบควบคุมออกจากกราวด์ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวงจรดังกล่าวสร้างขึ้นจากไอซี Photo coupler เบอร์ PC923L0NSZ จากบริษัทผู้ผลิต SHARP ซึ่งมีลักษณะของวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.27



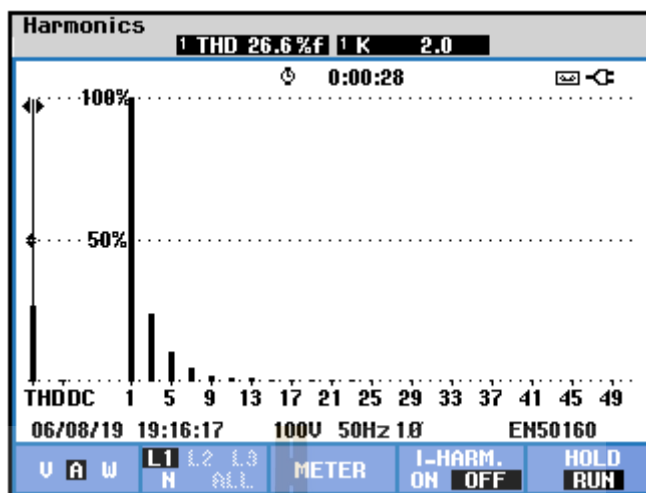
รูปที่ 5.27 วงจรขับเกต

5.3 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

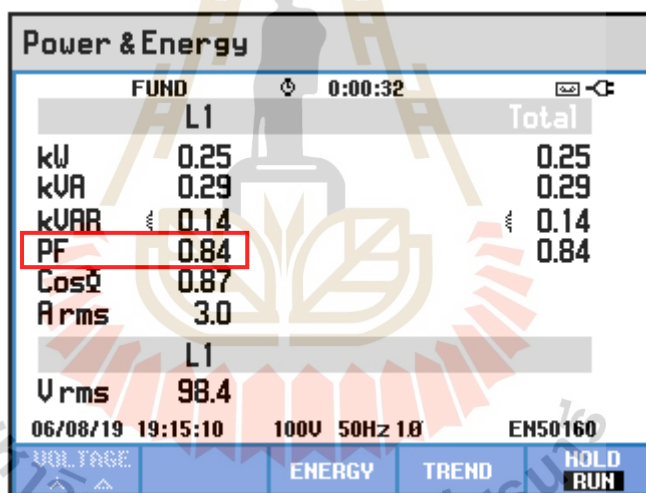
จากระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในรูปที่ 5.2 ผลการตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสก่อนมีการชดเชยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.28 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า กระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) บิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ และมีมมเฟสล่าช้าไปจากแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) และเมื่อตรวจวัดค่า $\%THD_i$ และค่าตัวประกอบกำลัง (PF) โดยใช้เครื่องมือวัด Fluke รุ่น 434 พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีปริมาณฮาร์มอนิกที่อันดับ 3 5 7 9 เป็นหลัก และมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 26.6% ดังแสดงผลในรูปที่ 5.29 และมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำเท่ากับ 0.84 ดังที่ปรากฏในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.28 แรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าก่อนการชดเชย



รูปที่ 5.29 ค่า %THD_i และสเปกตรัมกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชย

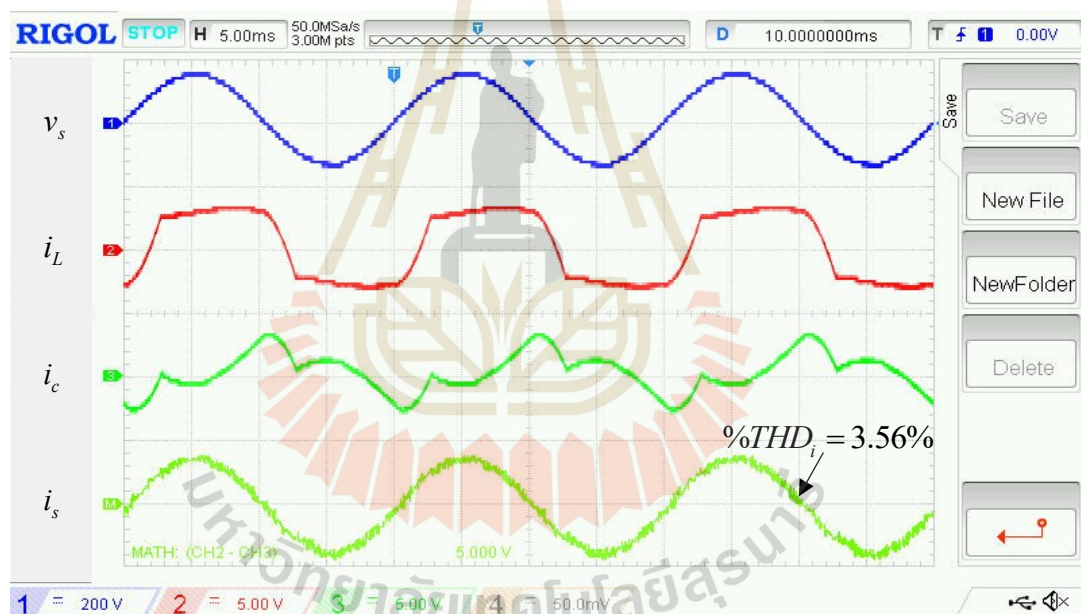


รูปที่ 5.30 ค่า PF ของระบบไฟฟ้าก่อนการชดเชย

การทดสอบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในทางปฏิบัติโดยใช้ระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในรูปที่ 5.2 จะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน โดยในส่วนแรก คือ การทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA บนบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ซึ่งผลการทดสอบสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5.3.1 และในส่วนที่สอง คือ การทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้จากการออกแบบ (ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4) ซึ่งผลการทดสอบในส่วนนี้สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 5.3.2

5.3.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA บนบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit สามารถทำได้โดยการนำค่ากระแสอ้างอิง i_c^* ที่ได้จากการคำนวณมาหักลบออกจากรูปสัญญาณกระแสโหลด i_L โดยใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์บนเครื่องออสซิลโลสโคป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่าย i_s หลังการชดเชย ($i_s = i_L - i_c^*$) และหากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA สามารถคำนวณกระแสอ้างอิง i_c^* ได้อย่างถูกต้อง ผลลัพธ์ของกระแสที่แหล่งจ่าย i_s ที่ได้จากการคำนวณบนเครื่องออสซิลโลสโคปจะมีลักษณะเป็นรูปไซน์ ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

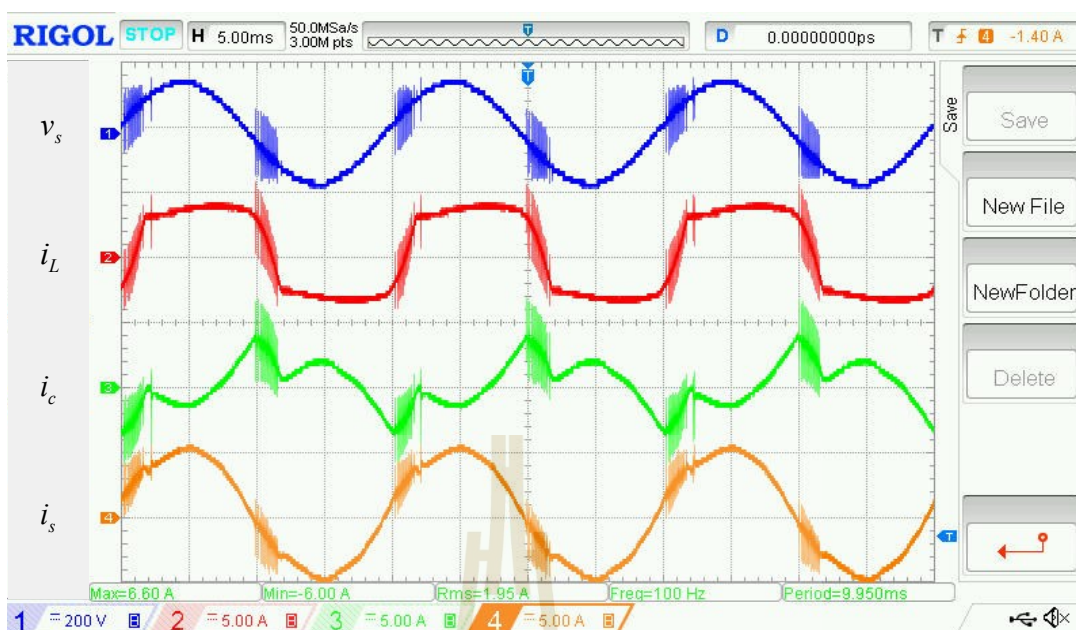
จากรูปที่ 5.31 จะสังเกตได้ว่า ผลลัพธ์ของกระแสที่แหล่งจ่าย i_s ที่ได้จากการดำเนินการบนเครื่องออสซิลโลสโคปมีลักษณะเป็นรูปไซน์ โดยสามารถคำนวณค่า $\%THD_i$ ได้เท่ากับ 3.56% ซึ่งหมายความว่า กระแสอ้างอิง i_c^* ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA บนบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit มีความถูกต้อง นอกจากนี้ มุมเฟสของกระแสที่แหล่งจ่าย i_s ยังมีความใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย v_s ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง

i_c^* ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับกระแสจะสามารถกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าและทำให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายกลับมาเป็นรูปไซน์ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่า PF ของระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

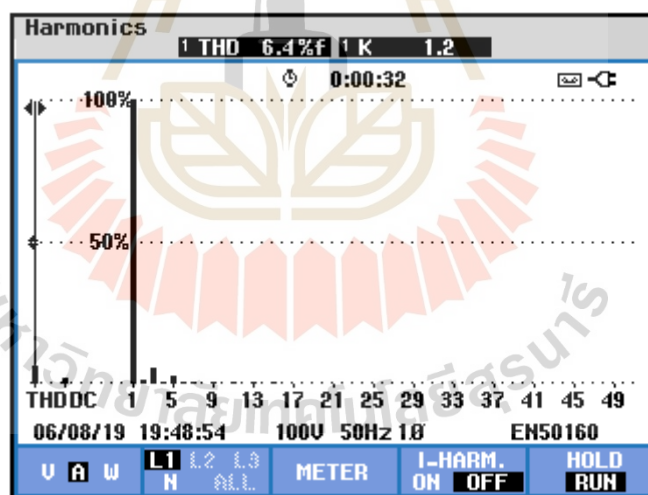
5.3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ผลการทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง V_{DC}^* ของตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากการทดสอบระบบในทางปฏิบัติเกิดแรงดันตกของค่าแรงดันบัลไฟตรงอย่างมากในช่วงเวลาก่อนการชดเชย ส่งผลให้การควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ค่าอ้างอิง 155 V ไม่สามารถทำได้ ด้วยเหตุนี้ จึงมีการกำหนดค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงค่าใหม่ที่มีค่าไม่สูงจนเกินไป และยังคงเพียงพอต่อการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยได้กำหนดค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงค่าใหม่เท่ากับ 95 V ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิกัดกระแสโหลดเท่ากับ 3 Arms สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.32 และผลการวัดค่า $\%THD_i$ และสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่า PF หลังการชดเชยแสดงดังรูปที่ 5.33 และ 5.34 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.32 สังเกตได้ว่า ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีในทางปฏิบัติ โดยผลการฉีดกระแสชดเชย i_c ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่าย หรือ i_s ของระบบไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นภายหลังการชดเชย โดยค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 6.4% ในขณะที่ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 26.6% อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่า $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชยจะมีค่าต่ำลง แต่ผลการกำจัดฮาร์มอนิกแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณรบกวนปรากฏขึ้นในระบบ ซึ่งวงจรกรองแบบผ่านต่ำอันดับที่หนึ่งที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2 ไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยในอนาคตถ้าหาแนวทางกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีกว่านี้ จะส่งผลให้ $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชยมีค่าต่ำลง ซึ่งสื่อถึงปริมาณฮาร์มอนิกมีค่าลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง พบว่า ค่า PF ภายหลังการชดเชยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.99 (จากเดิม 0.84) จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี M-SWFA นอกจากจะทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้แล้ว ยังสามารถช่วยชดเชยปรับค่า PF ของระบบไฟฟ้าให้สูงขึ้นใกล้เคียง 1 ได้อีกด้วย



รูปที่ 5.32 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

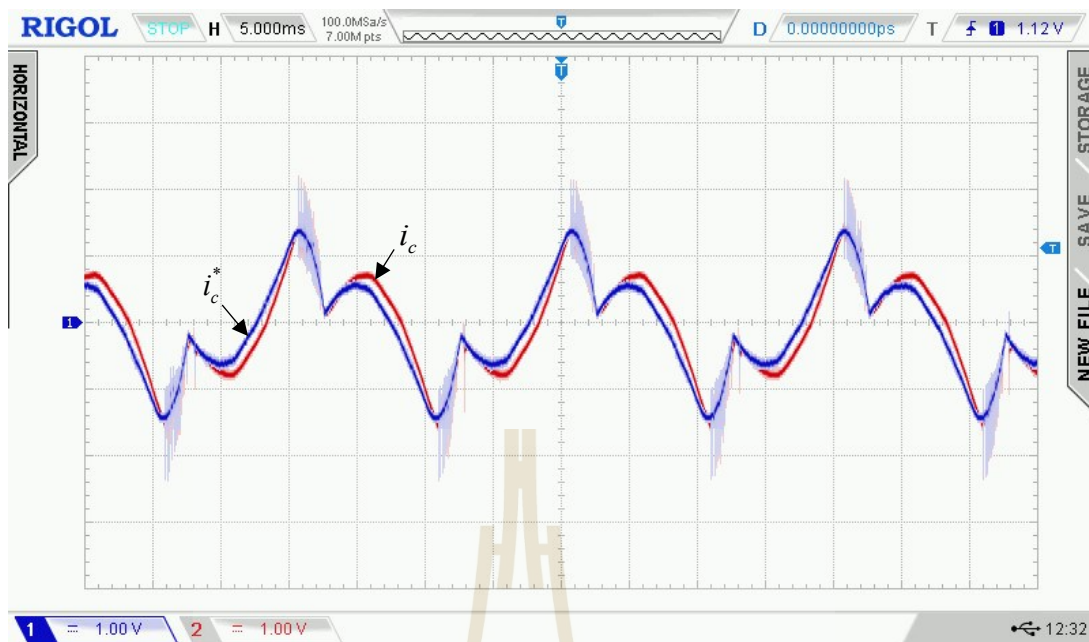


รูปที่ 5.33 ค่า $\%THD_i$ และสเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชย

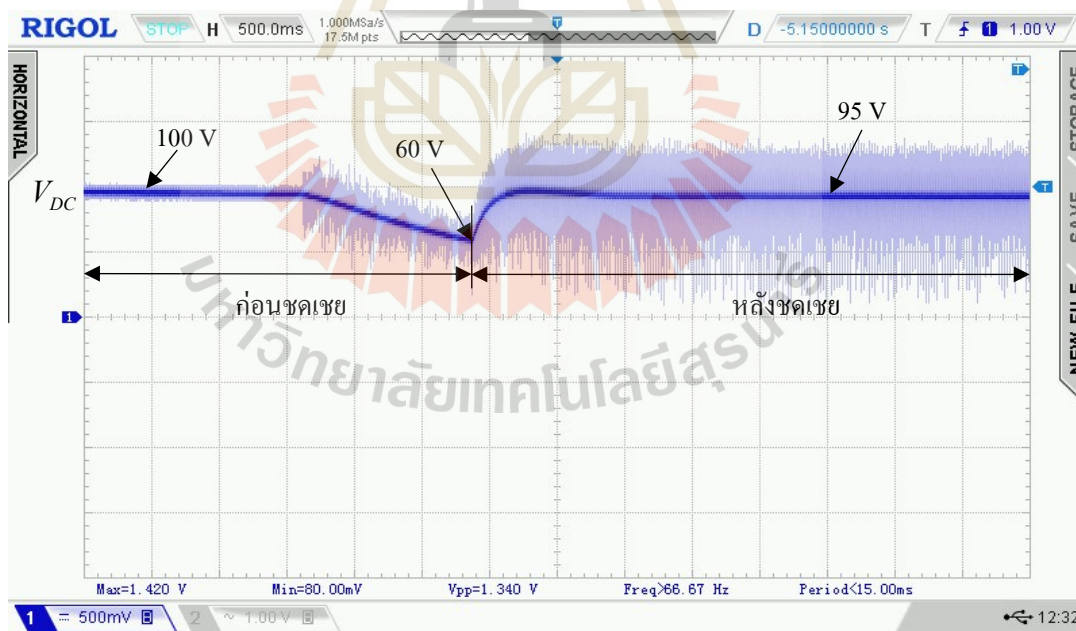
Power & Energy			
FUND		0:13:53	
L1		Total	
kW	0.35		0.35
kVA	0.35		0.35
kVAR	0.03		0.03
PF	0.99		0.99
Cost	1.00		
Arms	3.5		
L1			
Vrms	99.4		
06/08/19 19:47:30		100V 50Hz 1Ø	EN50160
VOLTAGE		ENERGY	TREND
			HOLD RUN

รูปที่ 5.34 ค่า PF ของระบบไฟฟ้าหลังการชดเชย

สำหรับผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสและการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 และ 5.36 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.35 จะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชย i_c ที่ผิดโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีลักษณะใกล้เคียงและคล้อยตามกระแสอ้างอิง i_c^* จากการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ได้ ส่งผลให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าลดลงและค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหลังการชดเชย และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{DC}) ของตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 5.36 จะสังเกตได้ว่าในช่วงก่อนการชดเชยแรงดันบัลไฟตรงมีค่า 100 V จากการชาร์จตัวเก็บประจุ C_{DC} ก่อนจะค่อย ๆ มีค่าลดลงเหลือ 60 V และเมื่อมีการเชื่อมต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อฉีดกระแสชดเชย พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{DC} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 95 V ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้



รูปที่ 5.35 ผลการควบคุมกระแสขดเซชด้วยตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส



รูปที่ 5.36 ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวควบคุมพีไอ

จากผลการทดสอบของระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในช่วงต้นสามารถสรุปค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่า PF ก่อนและหลังการชดเชยได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่สร้างขึ้นสามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิกให้ลดต่ำลงและปรับปรุงค่า PF ของระบบไฟฟ้าให้กลับมาใกล้เคียง 1 ได้จริง

ตารางที่ 5.3 ผลค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย และค่า PF ของระบบไฟฟ้า

สถานะการชดเชย	$\%THD_i$	PF
ก่อนการชดเชย	26.60	0.84
หลังการชดเชย	6.40	0.99

5.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างสรรค์แวร์ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี M-SWFA ร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการออกแบบไว้ในบทที่ 3 และ 4 โดยผลการทดสอบในทางปฏิบัติของระบบดังกล่าว ในด้านความถูกต้องของการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธี M-SWFA บนบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก M-SWFA ไม่เพียงแต่จะสามารถคำนวณตรวจจับกระแสได้อย่างถูกต้อง แต่ยังสามารปรับปรุงค่า PF ของระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้จากการออกแบบมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของวิธี M-SWFA ที่กล่าวไปข้างต้นเช่นเดียวกัน โดยค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือ 6.4% จากเดิมที่ก่อนการชดเชยมีค่าสูงถึง 26.6% และยังสามารถปรับปรุงให้ค่า PF ของระบบไฟฟ้ากลับมาใกล้เคียง 1 ได้จริง นอกจากนี้ ตัวควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์ซิสและตัวควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงพีไอที่ได้จากการออกแบบมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอต่อการควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้สามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์โมนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานซึ่งใช้วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นจากวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก วิธีการควบคุมกระแสชดเชย และวิธีการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง โดยรายละเอียดการค้นคว้าและการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ของทั้ง 4 ส่วนได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน หรือวิธี SWFA ถือเป็นวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่สามารถคำนวณหากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำ แต่วิธีดังกล่าวมีข้อด้อย คือ ไม่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าภายหลังการชดเชยได้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้คิดพัฒนาวิธี SWFA เพื่อปรับปรุงข้อด้อยในจุดนี้ โดยเรียกวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกพัฒนานี้ว่า วิธี M-SWFA ในบทที่ 3 ได้อธิบายรายละเอียดและวิธีการคำนวณหากระแสอ้างอิงของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองวิธี และได้มีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ทั้งนี้ ได้กำหนดใช้แหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบจากโครงสร้างของวงจร การทดสอบสมรรถนะได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่กระแสโหลดในระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และกรณีที่กระแสโหลดในระบบมีค่าลดต่ำลง ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงให้เห็นว่า วิธี SWFA มีสมรรถนะในการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกต้องและแม่นยำ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ทั้งในช่วงเวลากระแสโหลดปกติและในช่วงเวลากระแสโหลดเปลี่ยนแปลง แต่พบว่า ค่า PF ของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่วิธี M-SWFA ที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงแต่จะสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้ถูกต้องและแม่นยำเช่นเดียวกับวิธี SWFA แบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ยังสามารถปรับปรุงค่า PF ของระบบไฟฟ้าให้กลับมาเป็น 1 ได้อีกด้วย

สำหรับในบทที่ 4 ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างและวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ และได้มีการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ร่วมกับตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยใช้กรณีการทดสอบสมรรถนะเช่นเดียวกันกับในบทที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี M-SWFA ได้เป็นอย่างดี และตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามค่าอ้างอิงที่ออกแบบไว้เช่นกัน ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกกรณีการทดสอบ โดยรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายกลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์ และค่า PF ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1

ในบทที่ 5 ได้อธิบายการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีค่าพารามิเตอร์ของวงจรและตัวควบคุมตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 และได้มีการทดสอบสมรรถนะในทางปฏิบัติ 2 ส่วน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA ที่ใช้การคำนวณภายในบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit และการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้น จากการตรวจสอบความถูกต้องของกระแสอ้างอิงที่คำนวณด้วยวิธี M-SWFA พบว่า กระแสอ้างอิงมีความถูกต้อง และหากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชดเชยกระแสตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณจะสามารถกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้เพิ่มสูงขึ้นได้ ในส่วนของผลการทดสอบสมรรถนะของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ชดเชยตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากวิธี M-SWFA สามารถทำให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์มากขึ้น ค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลง และยังสามารถปรับปรุงให้ค่า PF ของระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียง 1 ได้จริง นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอต่อการควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัลไฟตรง ตามลำดับ

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการศึกษาวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบให้มีค่าลดลง เนื่องจากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกอย่างมีนัยสำคัญ
- ควรมีการพัฒนาตัวควบคุมกระแสชดเชยฮิสเตอร์ซิสให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น เช่น สามารถปรับแถบฮิสเตอร์ซิสได้ เป็นต้น
- ควรมีการวิเคราะห์ถึงสาเหตุการเกิดแรงดันตกของแรงดันบัสไฟตรงและดำเนินการปรับปรุงแก้ไข เพื่อเพิ่มสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในการกำจัดฮาร์มอนิก



รายการอ้างอิง

- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2552). การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 70-74
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2557). การออกแบบตัวควบคุมพีซีแบบปรับสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 118-127, 252-255
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ (2554). การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มบนแกนดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 76
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ กองพล และกองพัน อารีรักษ์ (2559). การสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนท์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON39). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 2-4 พฤศจิกายน. 243-246
- ภักดี สวัสดิ์นะที (2556). การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 136-141
- A. Martins, S. Vale, V. Sobrado and A. Carvalho (2014). Comparison of current control methods for grid-connected low-power single-phase converters. **40th Annual Conf. IEEE Ind. Electron. Society (IECON 2014)**. 4211-4217
- B. Angélico, S. Oliveira da Silva, L. Campanhol. (2014). Proportional-integral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**. 7: 2647-2659
- B.-R. Lin and T.-Y. Yang (2004). Three-level voltage-source inverter for shunt active filter. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 151(6): 744-751
- B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. **IEEE Trans. on Ind. Electron.** 46(5): 960-971

- Byung-Moon Han, Byong-Yeul Bae and S. J. Ovaska (2005). Reference signal generator for active power filters using improved adaptive predictive filter. **IEEE Trans. on Ind. Electron.** 52(2): 576-584
- C.Y. Hsu and H.Y.Wu (1996). A new single-phase active power filter with reduced energy-storage capacity. **IEE Proc-Electr. Power Appl.** 143(1): 25-30
- David A. Torrey and Adel M. A. M. Al-Zamelin (1995). Single-phase Active Power Filters for Multiple Nonlinear Loads. **IEEE Trans. on Power Eelectronics.** 10(3): 263-272
- D. M. E. Ingram and S. D. Round (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter. **IEEE Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive system.** 2(1): 744-749
- F. Cupertino, M. Marinelli, P. Zanchetta and M. Sumner (2005). Modelling and design of shunt active power filters using genetic algorithms. **European Conf. on Power Electronics and Applications.** 5-9
- I. Colak, R. Bayindir, O. Kaplan and F. Tas (2010). DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller. **2010 Ninth Int. Conf. on Machine Learning and Appl.** 692-696
- J.-C.Wu, H.-L.Jou (1996). Simplified control method for the single-phase active power filter. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 143(3): 219-224
- J. Liu, J. Yang, and Z. Wang (1999). A New Approach fo Single-Phase Harmonic Current Detecting and Its Application in A Htbrid Active Power Filter. **IECON'99. Conf. Proc. IEEE Ind. Electron. Society.** 2: 849-854
- J. Matas, L. Garcia de Vicuna, J. Miret, J. M. Guerrero and M. Castilla (2008). Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power Filter via Sliding Mode Control. **IEEE Trans. on Power Electron.** 23(1): 116-125
- K. Nishida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka (2004). Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power filter. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 151(3): 283-288
- L. Benchaïta, S. Saadate and A. Salem nia (1999). A Comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation. **IEEE Trans. on Power Electron.** 14(2): 642-647

- L. P. Kunjumammed and M. K. Mishra (2006). A control algorithm for single-phase active power filter under non-stiff voltage source. **IEEE Trans. on Power Electron.** 21 (3): 822-825
- M. Cirrincione, M. Pucci and G. Vitale (2008). A Single-Phase DG Generation Unit With Shunt Active Power Filter Capability by Adaptive Neural Filtering. **IEEE Trans. on Ind. Electron.** 55(5): 2093-2110
- M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui (2009). Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering. **IEEE Trans. on Ind. Electron.** 56(8): 3128-3143
- M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta (2000). Active power filters: A review. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 147(5): 403-413
- M. El-Habrouk and M. K. Darwish (2001). Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 148(1): 21-28
- M. Gonzalez, V. Cardenas and F. Pazos (2004). DQ transformation development for single-phase systems to compensate harmonic distortion and reactive power. **9th IEEE International Power Electronics Congress.** 177-182
- M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka (2002). Single-phase shunt active power filter with harmonic detection. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** 149(5): 343-350
- M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu (2003). A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation. **38th IAS Annual Meeting Conf.** 2: 1222-1227
- M. Sedighy, S. B. Dewan and F. P. Dawson (2000). A robust digital current control method for active power filters. **IEEE Trans. on Ind. App.** 36(4): 1158-1164
- P. A. Dahono (2009). New hysteresis current controller for single-phase full-bridge inverters. **IET Power Electron.** 2(5): 585– 594
- R. Costa-Castello, R. Grino and E. Fossas (2004). Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter. **IEEE Trans. on Power Electron.** 19(4): 1060-1068
- S. K. Khadem, M. Basu, M. F. Conlon (2014). Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters. **IET Power Electron.** 7(2): 418–430

- S. Kwak, S. Kim and J. Park (2015). Predictive Current Control Methods With Reduced Current Errors and Ripples for Single-Phase Voltage Source Inverters. **IEEE Trans. on Ind. Informatics**. 11 (5): 1006-1016
- S. Mariethoz and A. C. Rufer (2002). Open loop and closed loop spectral frequency active filtering. **IEEE Trans. on Power Electron**. 17(4): 564-573
- S. Tiyyarachakun, K-L. and K-N. Areerak (2014). Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. **Modelling and Simulation in Engineering**. Article ID381760: 1-20
- T. Thomas, K. Haddad, G. Joos and A (1998). Design and Performance of Active Power Filters. **IEEE Ind. Appl. Magazine**. 4(5): 38-46
- T. Narongrit, K-L Areerak and A. Srikaew (2009). Design of an Active power Filter using Adaptive Tabu Search. **Proc. 8th WSEAS Int. Conf. on AIKED**. 314-318.
- V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh (2009). Generalised single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation. **IET Power Electron**. 2(1): 67-78
- W.-L.Lu, S.-N.Yeh, J.-C.Hwang and H.-PHsieh (2000). Development of a single-phase half-bridge active power filter with the function of uninterruptible power supplies. **IEE Proc-Electr. Power Appl**. 147(4): 313-319
- W. R. N. Santos et al. (2014). The Transformerless Single-Phase Universal Active Power Filter for Harmonic and Reactive Power Compensation. **IEEE Trans. on Power Electron**. 29(7): 3563-3572
- Y. Hu, Y. Xie, D. Fu and L. Cheng (2016). New Single-Phase Π -Type 5-Level Inverter Using 3-Terminal Switch-Network. **IEEE Trans. on Ind. Electron**. 63(11): 7165-7174
- Z. Muhammad, A. Che soh, A. Mohd Radzi, N. Abd Rahim, and N. Mariun (2015). DC-link capacitor voltage control for single-phase shunt active power filter with step size error cancellation in self-charging algorithm. **IET Power Electron**. 9(2): 323-335



ภาคผนวก ก

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ
ไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสแบบฮาร์ดแวร์ในตู้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง หนึ่งเฟสแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

วิธี SWFA

```

1. #include <stdio.h>
2. #include <rtdx.h> /* RTDX_Read */
3. #include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
4. #include <math.h>
5. void SWFA(float *in1, float *in2, float *out1);
6. float din1[1];
7. float din2[1];
8. float dout_iswfa[1];
9. /******SWFA Variables******/
10. int k=0;
11. int j=0;
12. int h=0;
13. float N=1666;
14. float Ts=1.2e-5;
15. float w=100*3.1416;
16. float vm;
17. float zeta;
18. float A1;
19. float A1n[1666];
20. float B1;
21. float B1n[1666];
22. float A1o;
23. float B1o;
24. float iL1;
25. float iswfa;
26. /*-- defines RTDX channels --*/
27. RTDX_CreateInputChannel (ichan1);
28. RTDX_CreateInputChannel (ichan2);
29. RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);

30. /*----- main -----*/

```

```

31. void main()
32. {
33.     TARGET_INITIALIZE();      /* Target-specific initialization */
34.     RTDX_enableInput (&ichan1); /* Enable channels */
35.     RTDX_enableInput (&ichan2);
36.     RTDX_enableOutput(&ochan1);
37.     while (1) {
38.         /* Read inputs from host */
39.         RTDX_read( &ichan1, din1, 1 * sizeof(long) );
40.         RTDX_read( &ichan2, din2, 1 * sizeof(long) );
41.         /* Call function */
42.         SWFA(din1, din2, dout_iswfa);
43.         /* Write outputs to host */
44.         while ( RTDX_writing != NULL )
45.         { /* wait for previous write to complete */
46.             #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
47.             RTDX_Poll();
48.             #endif
49.         }
50.         RTDX_write( &ochan1, dout_iswfa, 1 * sizeof(long) );
51.     }
52. }
53. /*----- SWFA Harmonics Detection-----*/
54. void SWFA(float *in1, float *in2, float *out1)
55. {
56.     short t;
57.     for (t = 0; t < 1; t++) {
58.         /****sine zeta*****/
59.         vm=100*sqrt(2);
60.         zeta=in2[t]/vm;
61.         /****Compute initial A1 B1*****/
62.         if (k>=0&&k<N){
63.             A1n[k]=(2/N)*(in1[t]*cos(Ts*w*k);
64.             A1=A1+A1n[k];
65.             B1n[k]=(2/N)*(in1[t]*sin(Ts*w*k);

```

```

66. B1=B1+B1n[k];
67. iswfa=0;
68. k=k+1;
69. }
70. /****Sliding window compute A1 B1*****/
71. if(k>=N){
72. A1o=A1-A1n[j];
73. A1n[j]=(2/N)*(in1[t]*cos(Ts*w*j);
74. A1=A1o+A1n[j];
75. B1o=B1-B1n[j];
76. B1n[j]=(2/N)*(in1[t]*sin(Ts*w*j);
77. B1=B1o+B1n[j];
78. iL1=A1*cos(Ts*w*j)+B1*sin(Ts*w*j);
79. iswfa=in1[t]-iL1;
80. j=j+1;
81. if(j==N){
82. j=0;
83. }
84. }
85. /*----start compensation at 0.1s----*/
86. if(h<8333){
87. out1[t]=0;
88. h=h+1;
89. }
90. if(h>=8333){
91. out1[t]=iswfa;
92. }
93. }
94. return;
95. }

```

การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของวิธี SWFA

บรรทัดที่ 1 ถึง 4 `stdio.h` คือการเรียกใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของภาษาซี `rtdx.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานช่องสื่อสารแบบ RTDX `target.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit และ `math.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของภาษาซี

บรรทัดที่ 5 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน SWFA

บรรทัดที่ 6 ถึง 8 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อรับและส่งค่าผ่านช่องทาง RTDX ซึ่งได้แก่ `din1` `din2` และ `dout_iswfa`

บรรทัดที่ 10 ถึง 25 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

บรรทัดที่ 27 ถึง 29 คือ การสร้างช่องทาง RTDX ของอินพุต (`ichan1`, `ichan2`) และเอาต์พุต (`ochan1`) สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด DSP และโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 33 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับบอร์ด DSP เพื่อเรียกใช้งาน

บรรทัดที่ 34 ถึง 36 คือ การเรียกใช้งานช่องทางสื่อสาร `ichan1`, `ichan2` และ `ochan1`

บรรทัดที่ 39 ถึง 40 คือ การอ่านข้อมูล i_L และ v_r จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านช่องทาง `ichan1` และ `ichan2` เพื่อเก็บข้อมูลไว้ในตัวแปร `din1` และ `din2` ตามลำดับ

บรรทัดที่ 42 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

บรรทัดที่ 44 ถึง 52 คือ การเขียนข้อมูลที่เก็บไว้ในตัวแปร `dout_iswfa` ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยฟังก์ชัน SWFA ลงในช่องทาง `ochan1` เพื่อส่งค่าไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 54 ถึง 95 คือ รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

ไฟล์ *M-SWFA*

```

1.  #include <stdio.h>
2.  #include <rtdx.h>    /* RTDX_Read    */
3.  #include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
4.  #include <math.h>
5.  void MSWFA(float *in1, float *in2, float *out1);
6.  float din1[1];
7.  float din2[1];
8.  float dout_imswfa[1];
9.  /******MSWFA Variables*****/
10. int k=0;
11. int j=0;
12. int h=0;
13. float N=1666;
14. float Ts=1.2e-5;
15. float w=100*3.1416;
16. float vm;
17. float szeta;
18. float A1;
19. float A1n[1666];
20. float B1;
21. float B1n[1666];
22. float A1o;
23. float B1o;
24. float C1;
25. float iL1;
26. float imswfa;
27. /*-- defines RTDX channels --*/
28. RTDX_CreateInputChannel (ichan1); /* Channel from which to receive filter input */
29. RTDX_CreateInputChannel (ichan2); /* Channel from which to receive filter input */
30. RTDX_CreateOutputChannel(ochan1); /* Channel to output coefficient updates */
31. /*----- main -----*/
32. void main()
33. {

```

```

34. TARGET_INITIALIZE();      /* Target-specific initialization */
35. RTDX_enableInput (&ichan1); /* Enable channels */
36. RTDX_enableInput (&ichan2);
37. RTDX_enableOutput(&ochan1);
38. while (1) {
39.     /* Read inputs from host */
40.     RTDX_read( &ichan1, din1, 1 * sizeof(long) );
41.     RTDX_read( &ichan2, din2, 1 * sizeof(long) );
42.     /* Call function */
43.     MSWFA(din1, din2, dout_imswfa);
44.     /* Write outputs to host */
45.     while ( RTDX_writing != NULL )
46.     { /* wait for previous write to complete */
47.         #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
48.             RTDX_Poll();
49.         #endif
50.     }
51.     RTDX_write( &ochan1, dout_imswfa, 1 * sizeof(long) );
52. }
53. }
54. /*----- MSWFA Harmonics Detection -----*/
55. void MSWFA(float *in1, float *in2, float *out1)
56. {
57.     short t;
58.     for (t = 0; t < 1; t++) {
59.         /****sine zeta*****/
60.         vm=100*sqrt(2);
61.         szeta=in2[t]/vm;
62.         /****Compute initial A1 B1*****/
63.         if (k>=0&&k<N){
64.             A1n[k]=(2/N)*(in1[t])*cos(Ts*w*k);
65.             A1=A1+A1n[k];
66.             B1n[k]=(2/N)*(in1[t])*sin(Ts*w*k);
67.             B1=B1+B1n[k];

```

```

68.   imswfa=0;
69.   k=k+1;
70.   }
71.   /****Sliding window compute C1*****/
72.   if(k>=N){
73.     A1o=A1-A1n[j];
74.     A1n[j]=(2/N)*(in1[t])*cos(Ts*w*j);
75.     A1=A1o+A1n[j];
76.     B1o=B1-B1n[j];
77.     B1n[j]=(2/N)*(in1[t])*sin(Ts*w*j);
78.     B1=B1o+B1n[j];
79.     C1=sqrt(pow(A1,2)+pow(B1,2));
80.     iL1=C1*szeta;
81.     imswfa=in1[t]-iL1;
82.     j=j+1;
83.     if(j>=N){
84.       j=0;
85.     }
86.   }
87.   if(h<8333){
88.     out1[t]=0;
89.     h=h+1;
90.   }
91.   /*----start compensation at 0.1s----*/
92.   if(h>=8333){
93.     out1[t]=imswfa;
94.   }
95.   }
96.   return;
97.   }

```

การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของวิธี M-SWFA

บรรทัดที่ 1 ถึง 4 `stdio.h` คือการเรียกใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของภาษาซี `rtdx.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานช่องสื่อสารแบบ RTDX `target.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit และ `math.h` คือ การประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของภาษาซี

บรรทัดที่ 5 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน M-SWFA

บรรทัดที่ 6 ถึง 8 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อรับและส่งค่าผ่านช่องทาง RTDX ซึ่งได้แก่ `din1` `din2` และ `dout_imswfa`

บรรทัดที่ 10 ถึง 26 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

บรรทัดที่ 28 ถึง 30 คือ การสร้างช่องทาง RTDX ของอินพุต (`ichan1`, `ichan2`) และเอาต์พุต (`ochan1`) สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด DSP และโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 34 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับบอร์ด DSP เพื่อเรียกใช้งาน

บรรทัดที่ 35 ถึง 37 คือ การเรียกใช้งานช่องทางสื่อสาร `ichan1`, `ichan2` และ `ochan1`

บรรทัดที่ 40 ถึง 41 คือ การอ่านข้อมูล i_L และ v_r จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านช่องทาง `ichan1` และ `ichan2` เพื่อเก็บข้อมูลไว้ในตัวแปร `din1` และ `din2` ตามลำดับ

บรรทัดที่ 44 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชันการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

บรรทัดที่ 45 ถึง 53 คือ การเขียนข้อมูลที่เก็บไว้ในตัวแปร `dout_imswfa` ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยฟังก์ชัน M-SWFA ลงในช่องทาง `ochan1` เพื่อส่งค่าไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 55 ถึง 97 คือ รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular emblem with Thai script. Above the figure is a large, stylized Thai character 'ห' (ho) which forms a triangular shape.

ภาคผนวก ข

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบ
กำจัดฮาร์ดมอริกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบกำจัด ฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

```

1.  #include <stdio.h>
2.  #include <rt dx.h>    /* RTDX_Read    */
3.  #include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
4.  #include <math.h>
5.  void MSWFA_PI(float *in1, float *in2, float *in3, float *out1);
6.  float din1[1];
7.  float din2[1];
8.  float din3[1];
9.  float dout_iref[1];
10. /******M-SWFA Variables******/
11. int k=0;
12. int j=0;
13. int h=0;
14. float N=1666;
15. float Ts=1.2e-5;
16. float w=314.159265;
17. float vm;
18. float szeta;
19. float A1;
20. float A1n[1666];
21. float B1;
22. float B1n[1666];
23. float A1o;
24. float B1o;
25. float iL1;
26. float iref;
27. float imswfa;
28. float C1;
29. /******PI Controller Variables******/
30. float Vdcref=155;
31. float idc;
32. float iac;

```

```

33.  float Kp=0.124;
34.  float Ki=2.763;
35.  float Verr=0;
36.  float Gp=0;
37.  float Gi=0;
38.  /*-- defines RTDX channels --*/
39.  RTDX_CreateInputChannel (ichan1);
40.  RTDX_CreateInputChannel (ichan2);
41.  RTDX_CreateInputChannel (ichan3);
42.  RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);      */
43.  /*----- main -----*/
44.  void main()
45.  {
46.      TARGET_INITIALIZE();      /* Target-specific initialization */
47.      RTDX_enableInput (&ichan1); /* Enable channels */
48.      RTDX_enableInput (&ichan2);
49.      RTDX_enableInput (&ichan3);
50.      RTDX_enableOutput(&ochan1);
51.      while (1) {
52.          /* Read inputs from host */
53.          RTDX_read( &ichan1, din1, 1 * sizeof(long) );
54.          RTDX_read( &ichan2, din2, 1 * sizeof(long) );
55.          RTDX_read( &ichan3, din3, 1 * sizeof(long) );
56.          /* Call function */
57.          MSWFA_PI(din1, din2, din3, dout_iref);
58.          /* Write outputs to host */
59.          while ( RTDX_writing != NULL )
60.          { /* wait for previous write to complete */
61.              #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
62.              RTDX_Poll();
63.              #endif
64.              RTDX_write( &ochan1, dout_iref, 1 * sizeof(long) );
65.          }
66.      }

```

```

67.  /*----- MSWFA Harmonic Dectection with PI Controller for DC bus voltage-----*/
68.  void MSWFA_PI(float *in1, float *in2, float *in3, float *out1)
69.  {
70.      short t;
71.      for (t = 0; t < 1; t++) {
72.          /***PI Controller***/
73.          vm=100*sqrt(2);
74.          szeta=in2[t]/vm;
75.          Verr = Vdcref-in3[t];    //Verror = Vdcref-Vdc
76.          Gp = Verr*Kp;
77.          Gi = Gi+(Ts*Ki*Verr);
78.          idc= Gp+Gi;
79.          iac=idc*szeta;
80.          /***M-SWFA Harmoic Detection***/
81.          if (k>=0&& k<N){
82.              A1n[k]=(2/N)*(in1[t])*cos(Ts*w*k);
83.              A1=A1+A1n[k];
84.              B1n[k]=(2/N)*(in1[t])*sin(Ts*w*k);
85.              B1=B1+B1n[k];
86.              imswfa=0;
87.              k=k+1;
88.          }
89.          if(k>=N){
90.              A1o=A1-A1n[j];
91.              A1n[j]=(2/N)*(in1[t])*cos(Ts*w*j);
92.              A1=A1o+A1n[j];
93.              B1o=B1-B1n[j];
94.              B1n[j]=(2/N)*(in1[t])*sin(Ts*w*j);
95.              B1=B1o+B1n[j];
96.              C1=sqrt(pow(A1,2)+pow(B1,2));
97.              iL1=C1*zeta;
98.              imswfa=in1[t]-iL1;
99.              j=j+1;
100.         if(j==N){
101.             j=0;

```

```
102. }  
103. }  
104. iref=imswfa-iac;  
105. if(h<8333){  
106. out1[t]=0;  
107. h=h+1;  
108. }  
109. /*----start compensation at 0.1s----*/  
110. if(h==8333){  
111. out1[t]=iref;  
112. }  
113. }  
114. return;  
115. }
```



การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูประบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บรรทัดที่ 1 ถึง 4 stdio.h คือการเรียกใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของภาษาซี rtdx.h คือ การประกาศเรียกใช้งานช่องสื่อสารแบบ RTDX target.h คือ การประกาศเรียกใช้งานบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit และ math.h คือ การประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของภาษาซี

บรรทัดที่ 5 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน M-SWFA_PI ที่ประกอบด้วยการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 6 ถึง 9 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อรับและส่งค่าผ่านทาง RTDX ซึ่งได้แก่ din1 din2 din3 และ dout_iref

บรรทัดที่ 11 ถึง 28 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

บรรทัดที่ 30 ถึง 37 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 39 ถึง 42 คือ การสร้างช่องทาง RTDX ของอินพุต (ichan1, ichan2, ichan3) และ เอาต์พุต (ochan1) สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด DSP และ โปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 46 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับบอร์ด DSP เพื่อเรียกใช้งาน

บรรทัดที่ 47 ถึง 50 คือ การเรียกใช้งานช่องทางสื่อสาร ichan1 ichan2 ichan3 และ ochan1

บรรทัดที่ 53 ถึง 55 คือ การอ่านข้อมูล i_L , v_s และ V_{DC} จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านช่องทาง ichan1 ichan2 และ ichan3 เพื่อเก็บข้อมูลไว้ในตัวแปร din1 din2 และ din3 ตามลำดับ

บรรทัดที่ 57 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชันการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ (M-SWFA_PI)

บรรทัดที่ 59 ถึง 66 คือ การเขียนข้อมูลที่เก็บไว้ในตัวแปร dout_iref ลงในช่องทาง ochan1 เพื่อส่งค่าไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 68 ถึง 115 คือ รายละเอียดขั้นตอนการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอและการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular emblem with Thai script. Above the figure is a large, stylized Thai character 'ห' (ho) which forms a triangular shape.

ภาคผนวก ค

โค้ดโปรแกรมภาษาซีระบบกำจัดฮาร์ดโมนิกด้วยวงจรรอกำดังแอกทีฟ
แบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมภาษาซีระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

```

1.  #include "DSP28x_Project.h" // Device Headerfile and Project Include File
2.  #include <math.h>
3.  // ADC start parameters
4.  #if (CPU_FRQ_150MHZ) // Default - 150 MHz SYSCLKOUT
5.  #define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3) = 25.0
MHz
6.  #endif
7.  #define ADC_CKPS 0x1 // ADC module clock = HSPCLK/2*ADC_CKPS = 25.0MHz/(1*2) =
12.5MHz
8.  #define ADC_SHCLK 0xf // S/H width in ADC module periods = 16 ADC clocks
9.  void Gpio_select(void);
10. void DACport(int dac);
11. void delay_loop(void);
12. // Global variable
13. int dac;
14. int output;
15. float iLdg;
16. float iL;
17. float vsdg;
18. int Vdcdg;
19. int Vdc;
20. /*****SWFA Variables*****/
21. int k=0;
22. int j=0;
23. float N=1754;
24. float Ts=1.14e-5;
25. float w=314.1593;
26. float A1=0;
27. float A1n[1754];
28. float B1=0;
29. float B1n[1754];
30. float iL1;

```

```

31.  float imswfa;
32.  float iref;
33.  float zeta;
34.  float C1=0;
35.  /*****PI Controller Variables*****/
36.  int Vdcref=1297; //95V=1297
37.  float idc;
38.  float iac;
39.  float Kp=0.124;
40.  float Ki=2.763;
41.  int Verr=0;
42.  float Gp=0;
43.  float Gi=0;
44.  float lim;
45.  main()
46.  {
47.  // Step 1. Initialize System Control:
48.  InitSysCtrl();
49.  // Specific clock setting for this project:
50.  EALLOW;
51.  SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK = SYSCLKOUT/ADC_MODCLK
52.  EDIS;
53.  // Step 2. Initialize GPIO:
54.  Gpio_select();
55.  // Step 3. Clear all interrupts and initialize PIE vector table:
56.  // Disable CPU interrupts
57.  DINT;
58.  // Initialize the PIE control registers to their default state.
59.  // The default state is all PIE interrupts disabled and flags are cleared.
60.  InitPieCtrl();
61.  // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
62.  IER = 0x0000;
63.  IFR = 0x0000;
64.  // Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
65.  // Service Routines (ISR).

```

```

66.  InitPieVectTable();
67.  InitAdc(); // For this project, init the ADC
68.  // Specific ADC setup for this project:
69.  AdcRegs.ADCCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK;
70.  AdcRegs.ADCCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
71.  AdcRegs.ADCCTRL1.bit.CPS = 1;
72.  AdcRegs.ADCCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0;
73.  AdcRegs.ADCCTRL1.bit.CONT_RUN = 0;    // Setup continuous run
74.  AdcRegs.ADCCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1;    // 1 Cascaded mode
75.  AdcRegs.ADCCTRL2.bit.INT_MOD_SEQ1 = 0;
76.  AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1 = 0x3;
77.  AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0 iL
78.  AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1 vs to provide sine zeta
79.  AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2 vdc for PI controller
80.  AdcRegs.ADCCTRL2.all = 0x2000;
81.  // Step 5. User specific code, enable interrupts:
82.  Gpio_select();
83.  // Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever:
84.  for(;;)
85.  {
86.      //===== for ADC =====//
87.      AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;
88.      AdcRegs.ADCCTRL2.bit.SOC_SEQ1=1;
89.      iLdg=(AdcRegs.ADCRESULT0>>4); // recieve data iL from ADCA0
90.      iL=((iLdg-2047)*4.6); // 1.5V=2047
91.      vsdg=(AdcRegs.ADCRESULT1>>4); // recieve data vs from ADCA1
92.      zeta=((vsdg-2047)*1.5)/1365;
93.      Vdcdg=(AdcRegs.ADCRESULT2>>4); // recieve data Vdc from ADCA2
94.      Vdc=Vdcdg*1.03;
95.      /****PI Controller*****/
96.      Verr = (Vdcref-Vdc);
97.      Gp = Verr*Kp;
98.      Gi = (Gi+(Ki*Verr*Ts));
99.      lim=500;
100.  if(Gp>=lim){
101.      Gp=lim;

```

```

102. }if(Gp<=-lim){
103. Gp=-lim;
104. }
105. if(Gi>=lim){
106. Gi=lim;
107. }if(Gi<=-lim){
108. Gi=-lim;
109. }
110. idc=(Gp+Gi);
111. iac=idc*zeta;
112. //SWFA harmonic detection//
113. if (k>=0&& k<N){
114. A1n[k]=(2/N)*iL*cos(Ts*w*k);
115. A1=A1+A1n[k];
116. B1n[k]=(2/N)*iL*sin(Ts*w*k);
117. B1=B1+B1n[k];
118. imswfa=0;
119. k=k+1;
120. }
121. if(k>=N){
122. A1=A1-A1n[j];
123. A1n[j]=(2/N)*iL*cos(Ts*w*j);
124. A1=A1+A1n[j];
125. B1=B1-B1n[j];
126. B1n[j]=(2/N)*iL*sin(Ts*w*j);
127. B1=B1+B1n[j];
128. C1=sqrt(pow(A1,2)+pow(B1,2));
129. iL1=C1*zeta;
130. imswfa=iL-iL1;
131. j=j+1;
132. if(j==N){
133. j=0;
134. }
135. }
136. iref=imswfa-iac;

```

```

137. //=====Sending iref to DAC712=====//
138. output = iref; //float to int
139. DACport(output);
140. }
141. }
142. //=====Configure port A&B as a GPIO output pin=====//
143. void Gpio_select(void)
144. {
145. EALLOW;
146. //sets GPIO Muxs as I/O
147. GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;
148. GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0x0000;
149. GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000;
150. GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0x0000;
151. //sets GPIO DIR as Outputs
152. GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0xFFFFFFFF;
153. GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0xFFFFFFFF;
154. EDIS;
155. }
156. //=====DAC transfer process=====//
157. void DACport(int dac)
158. {
159. //step 1 : initial
160. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
161. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
162. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
163. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
164. //step 2 : load data
165. GpioDataRegs.GPADAT.all = dac;
166. //step 3 : finish loading data
167. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
168. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
169. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
170. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
171. //step 4 : load input latch WR=1
172. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;

```

```

173. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
174. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
175. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
176. delay_loop();
177. //stp 5 : WR=0
178. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;
179. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
180. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 0;
181. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
182. delay_loop();
183. //step 6 : WR=1
184. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 0;
185. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 1;
186. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
187. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
188. delay_loop();
189. //step 7 : load D/A latch WR=1
190. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
191. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
192. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
193. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
194. delay_loop();
195. //step 8 : WR=0
196. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
197. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
198. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 0;
199. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
200. delay_loop();
201. //step 9 : WR=1
202. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO33 = 1;
203. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34 = 0;
204. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO48 = 1;
205. GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO49 = 1;
206. delay_loop();
207. }
208. //=====delay loop=====//

```

```
209. void delay_loop(void)
210. { short i;
211.   for(i=0;i<1;i++){
212.   }
```



การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

บรรทัดที่ 1 ถึง 2 DSP28x_Project.h คือ การเรียกใช้ไฟล์เฮดเดอร์ของบอร์ด DSP TMS320F28335 Experimenter Kit และไฟล์ที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันที่ใช้ในโปรเจกต์ math.h คือ การประกาศเรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของภาษาซี

บรรทัดที่ 4 ถึง 8 คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของพอร์ต ADC บนบอร์ด DSP

บรรทัดที่ 9 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน Gpio_select สำหรับตั้งค่าการทำงานของพินบนบอร์ด DSP

บรรทัดที่ 10 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน DACport สำหรับแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC)

บรรทัดที่ 11 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน delay_loop สำหรับหน่วงเวลารอบกระบวนการแปลงข้อมูลของไอซี DAC712P

บรรทัดที่ 13 ถึง 44 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการรับข้อมูลจากพอร์ต ADC ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA และตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 48 ถึง 66 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของบอร์ด DSP

บรรทัดที่ 67 ถึง 80 คือ การตั้งค่าการทำงานของพอร์ต ADC โดยมีการรับค่า i_L , v_s และ V_{DC} ผ่านพิน ADCA0 ADCA1 และ ADCA0 ตามลำดับ

บรรทัดที่ 87 ถึง 94 คือ การกำหนดให้เริ่มรับค่าจากพอร์ต ADC และเก็บไว้ในตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกและการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง

บรรทัดที่ 96 ถึง 111 คือ การควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 113 ถึง 136 คือ การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี M-SWFA

บรรทัดที่ 138 ถึง 139 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชัน DAC เพื่อแปลงข้อมูลกระแสอ้างอิงจากข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

บรรทัดที่ 143 ถึง 155 คือ ฟังก์ชันสำหรับตั้งค่า GPIO ให้เป็นพินเอาต์พุตเพื่อส่งค่าออกจากบอร์ด DSP

บรรทัดที่ 157 ถึง 207 คือ ฟังก์ชันสำหรับควบคุมการแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกของไอซี DAC712P

บรรทัดที่ 209 ถึง 212 คือ ฟังก์ชันการหน่วงเวลา

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular emblem with a crown on top. The entire logo is rendered in a light gray color.

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มนิรัตน์ ผดุงศิลป์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2560). การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส. วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น: วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี., ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 10-13

มนิรัตน์ ผดุงศิลป์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2560). การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อนแบบบางอันดับสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON40) ., หน้า 230-233

M. Padungsin, T. Narongrit and K. Areerak (2018). **The Comparison Study of Harmonic Detection Algorithms for Single-Phase Power Systems.** *5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS).*, Kitakyushu, Japan, pp. 1-6

มนิรัตน์ ผดุงศิลป์ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2562). การเปรียบเทียบตัวควบคุมกระแสขดเคี้ยวของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี., ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 42-51



ประวัติผู้เขียน

นางสาวมณีนันท์ ผดุงศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2536 ที่อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวรนาถวิทยาลพบุรี ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี ก่อนจะย้ายภูมิลำเนาไปยังจังหวัดนครราชสีมา และเข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายในโครงการห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ โรงเรียนสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา เมื่อจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2555 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีด้วยทุนการศึกษาเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา และสำเร็จการศึกษาวិชากรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับหนึ่งในปี พ.ศ. 2558 จากนั้นในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตและปฏิบัติงานเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า และปฏิบัติการระบบควบคุม

